



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



ΚΑΛΙΑΜΠΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΑΕΜ 5517

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ, ΜΕΤΑΛΛΩΝ
ΥΨΗΛΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ, ΚΑΙ Η ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΓΙΑ
ΟΡΥΚΤΕΣ ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2024





ΚΑΛΙΑΜΠΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ, ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΥΨΗΛΗΣ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ, ΚΑΙ Η ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΓΙΑ ΟΡΥΚΤΕΣ ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ

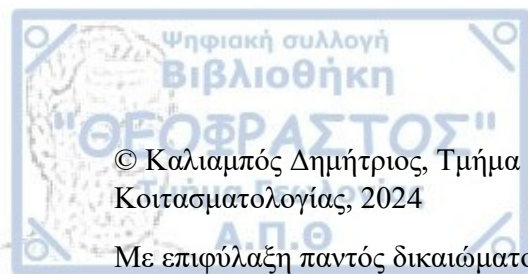
Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Βασίλης Μέλφος, Καθηγητής

© Καλιαμπός Δημήτριος, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.



© Καλιαμπός Δημήτριος, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Τεχνολογικές Εφαρμογές Κρίσιμων Μετάλλων, Μετάλλων Υψηλής Τεχνολογίας, και η Ευρωπαϊκή Πολιτική για Ορυκτές Πρώτες Ύλες– *Πτυχιακή Εργασία*

© Kaliampos Dimitrios, School of Geology, Department of Mineralogy, Petrology, Economic Geology, 2024

All rights reserved.

Technological Applications of Critical Metals, High Technology Metals, and the European Policy on Mineral Raw Materials – *Thesis*

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

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

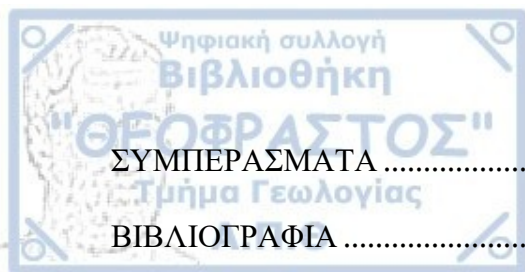
Εικόνα Εξωφύλλου:Source: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42852>





ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	2
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
2. ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ (Li-ion)	4
2.1 Γενικά.....	4
2.2 Τρέχοντα σημεία συμφόρησης εφοδιασμού κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού.....	5
2.3 Παρατηρήσεις και προτάσεις.....	7
3. ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ (Fuel cells).....	9
3.1 Γενικά.....	9
3.2 Τρέχοντα σημεία συμφόρησης εφοδιασμού κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού.....	11
3.3 Παρατηρήσεις και προτάσεις.....	13
4. ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	15
4.1. Γενικά.....	15
4.2. Τρέχοντα σημεία συμφόρησης εφοδιασμού κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού.....	17
4.3. Παρατηρήσεις και προτάσεις.....	18
5. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ	20
5.1. Γενικά.....	20
5.2. Τρέχοντα σημεία συμφόρησης εφοδιασμού κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού.....	22
5.3. Παρατηρήσεις και προτάσεις.....	24
6. ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ	25
6.1. Γενικά.....	25
6.2. Τρέχοντα σημεία συμφόρησης εφοδιασμού κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού.....	26
6.3. Βασικές παρατηρήσεις και προτάσεις	31



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	31
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	32



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τεχνολογικές Εφαρμογές Κρίσιμων Μετάλλων, Μετάλλων Υψηλής Τεχνολογίας, και η Ευρωπαϊκή Πολιτική για Ορυκτές Πρώτες Ύλες

Καλιαμπός Δημήτριος

Η γρήγορη τεχνολογική πρόοδος και η ανάπτυξη στις υψηλής τεχνολογίας βιομηχανίες έχουν οδηγήσει σε αυξημένη ζήτηση για κρίσιμα μέταλλα και μέταλλα υψηλής τεχνολογίας. Αυτά τα μέταλλα είναι απαραίτητα συστατικά στην κατασκευή διάφορων υψηλής τεχνολογίας προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων ηλεκτρονικών, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τεχνολογιών άμυνας. Ωστόσο, η προμήθειά τους είναι περιορισμένη, και πολλά από αυτά τα μέταλλα συγκεντρώνονται γεωγραφικά σε λίγες χώρες, καθιστώντας τα ευάλωτα σε διακοπές προμήθειας και τις αλλαγές των τιμών. Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) αναγνωρίζει τη σημασία αυτών των μετάλλων και έχει εφαρμόσει πολιτικές για να διασφαλίσει την ασφαλή και βιώσιμη προμήθειά τους. Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναλύει την τρέχουσα κατάσταση των κρίσιμων μετάλλων και μετάλλων υψηλής τεχνολογίας στην Ευρώπη, τη σημασία τους για την οικονομία της ΕΕ, την κατάσταση της αλυσίδας εφοδιασμού τους και τα μέτρα πολιτικής που μπορεί να λάβει η ΕΕ για την βιώσιμη προμήθειά τους.



ABSTRACT

Technological Applications of Critical Metals, High Technology Metals, and the European Policy on Mineral Raw Materials

Kaliampos Dimitrios

The rapid technological advancement and growth in high-tech industries have led to an increased demand for critical metals and high technology metals. These metals are essential components in the manufacturing of various high-tech products, including electronics, renewable energy, and defense technologies. However, their supply is limited, and many of these metals are geographically concentrated in a few countries, making them vulnerable to supply disruptions and price fluctuations. The European Union (EU) recognizes the importance of these metals and has implemented policies to ensure their secure and sustainable supply. This thesis analyzes the current status of critical metals and high technology metals in Europe, their importance to the EU economy, their current condition of their supply chains, and the EU's policy measures for their sustainable supply.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

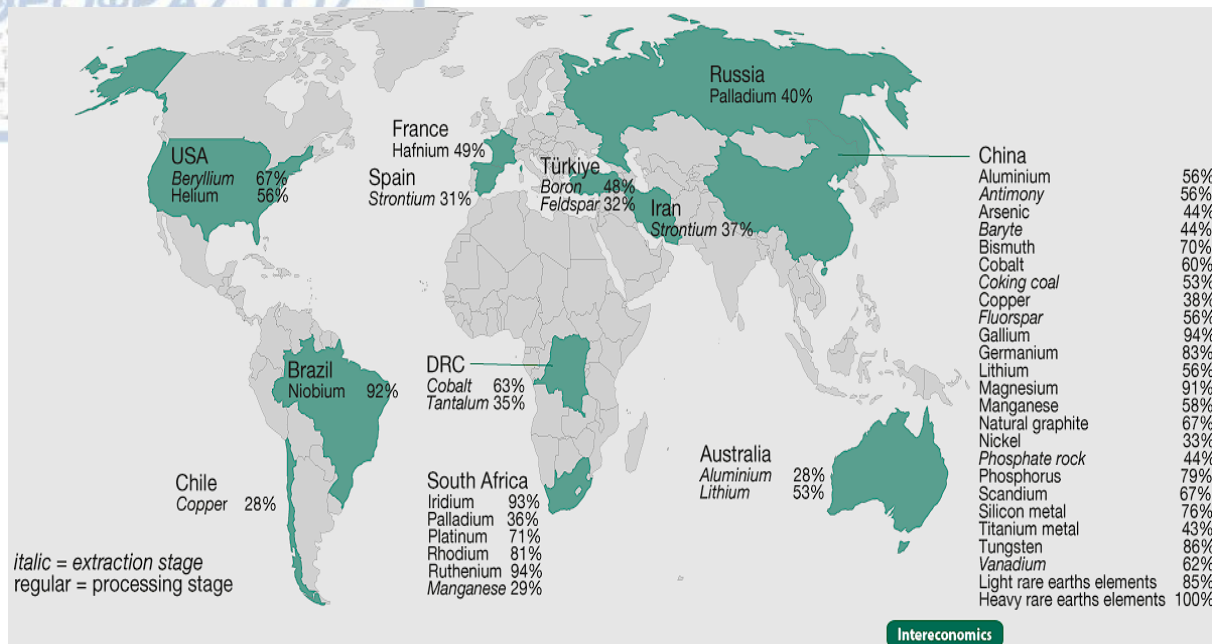
Τα κρίσιμα μέταλλα είναι μέταλλα που είναι απαραίτητα για την παραγωγή υψηλής τεχνολογίας προϊόντων αλλά επίσης είναι σε περιορισμένη προσφορά. Διακρίνονται για τη σπανιότητά τους, την υψηλή οικονομική τους αξία και τη στρατηγική τους σημασία. Ορισμένα από τα πιο σημαντικά κρίσιμα μέταλλα περιλαμβάνουν τα στοιχεία των σπάνιων γαιών, ελαφριών (LREE) και βαριών (HREE), το λίθιο, το κοβάλτιο, το βολφράμιο και τα μέταλλα της ομάδας της πλατίνας κλπ.

Τα μέταλλα υψηλής τεχνολογίας από την άλλη είναι μέταλλα που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή υψηλής τεχνολογίας προϊόντων, αλλά δεν είναι απαραίτητως σε έλλειψη. Διακρίνονται από την υψηλή οικονομική τους αξία και τη στρατηγική τους σημασία. Ορισμένα από τα πιο σημαντικά μέταλλα υψηλής τεχνολογίας περιλαμβάνουν το χαλκό, το αλουμίνιο και το νικέλιο μεταξύ άλλων.

Τα κρίσιμα και υψηλής τεχνολογίας μέταλλα αποτελούν το θεμέλιο της σύγχρονης τεχνολογίας (Leena et al., 2016). Είναι ζωτικής σημασίας για την παραγωγή προϊόντων υψηλής τεχνολογίας, όπως smartphones, υπολογιστές, ηλεκτρικά οχήματα και τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ζήτηση για αυτά τα μέταλλα έχει αυξηθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια, εγείροντας ανησυχίες για τη διαθεσιμότητα και τη βιωσιμότητά τους. Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει αναγνωρίσει τη σημασία αυτών των μετάλλων και έχει λάβει μέτρα για να διασφαλίσει τον ασφαλή και βιώσιμο εφοδιασμό τους μέσω της πολιτικής της για τις ορυκτές πρώτες ύλες (Σχήμα 1).

Παράλληλα, η ΕΕ έχει δεσμευτεί να γίνει η πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρος έως το 2050 μέσω της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας, της συμφωνίας του Παρισιού αλλά και της σύμβασης των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή (UNFCCC). Στόχοι οι οποίοι για να επιτευχθούν απαιτούνται καινοτομίες και προσαρμογές σε πολλούς τομείς όπως αυτούς της μεταφοράς, της παραγωγής ενέργειας, μπαταριών κ.α.

Αυτή η πτυχιακή παρέχει μια επισκόπηση των κρίσιμων μετάλλων, των μετάλλων υψηλής τεχνολογίας, μερικούς από τους στρατηγικούς τομείς στους οποίους χρησιμοποιούνται και της πολιτικής της ΕΕ για αυτές τις ορυκτές πρώτες ύλες. Εξετάζει τη σημασία αυτών των μετάλλων και τις προκλήσεις που συνδέονται με την προμήθεια και τη βιωσιμότητά τους. Συζητάει επίσης τα μέτρα που έχει λάβει η ΕΕ για να διασφαλίσει την προμήθεια αυτών των μετάλλων και την αποτελεσματικότητα αυτών των μέτρων. Τέλος, προτείνει λύσεις για περαιτέρω μέτρα που θα μπορούσε να λάβει η ΕΕ για να διασφαλίσει την ασφαλή και βιώσιμη προμήθεια κρίσιμων και μετάλλων υψηλής τεχνολογίας.

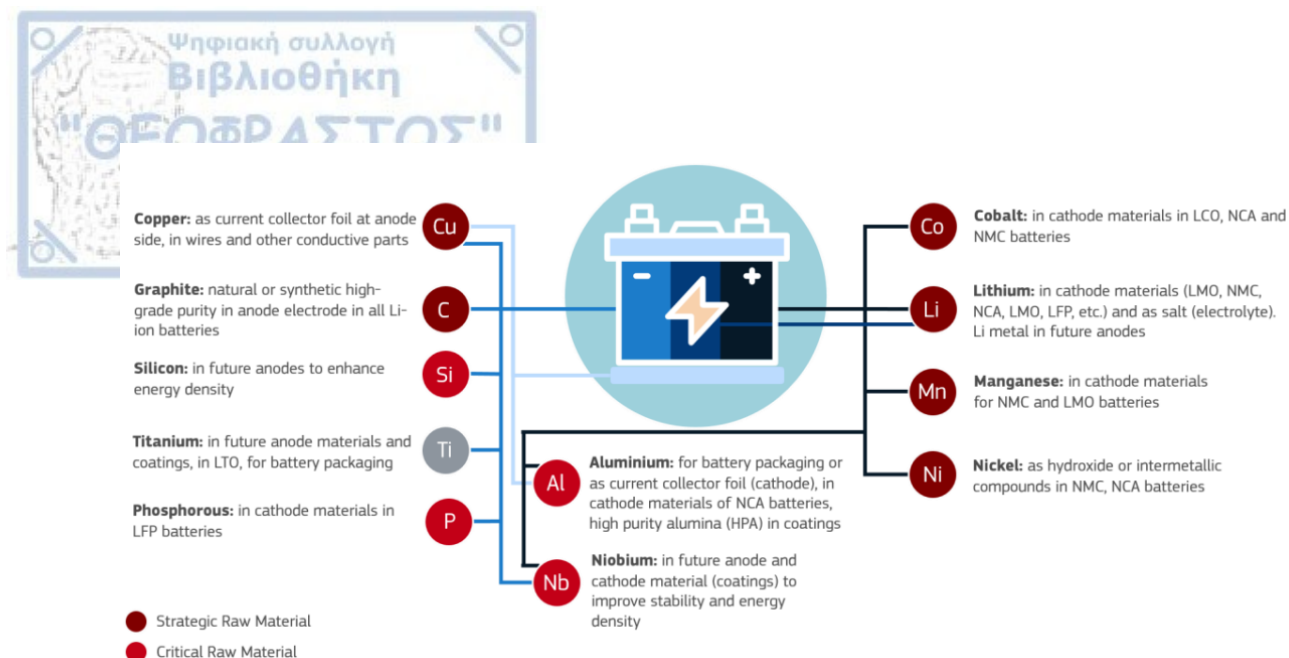


Σχήμα 1. Τοποθεσίες κρίσιμων μετάλλων (European Commission, 2023)

2. ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ (Li-ion)

2.1 Γενικά

Η τεχνολογία των μπαταριών λιθίου-ιόντων είναι μια τεχνολογία που αναπτύσσεται ακόμα και που χρησιμοποιείται σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών και είναι στρατηγικά σημαντική για την επίτευξη μιας πιο βιώσιμης και απανθρακωμένης Ευρώπης (EC, 2019). Προσφέρει βελτιωμένη ισχύ και ενεργειακή απόδοση σε σύγκριση με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος. Ενώ οι μπαταρίες λιθίου-ιόντων είναι κρίσιμες για στρατιωτικές εφαρμογές, η ανάπτυξή τους και η μελλοντική τους υιοθέτηση οδηγούνται κυρίως από την πολιτική ζήτηση για φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, αποθήκευση ενέργειας και ηλεκτρικά οχήματα (ΗΟ). Οι μπαταρίες λιθίου μεταλλικού οξειδίου χρησιμοποιούν διάφορα μέταλλα, όπως νικέλιο, κοβάλτιο, αργίλιο και μαγγάνιο (Σχήμα 2). Τα κύρια συστατικά μιας μπαταρίας είναι η κάθοδος, η άνοδος, ο ηλεκτρολύτης και ο διαχωριστής. Οι κάθοδοι και οι άνοδοι είναι κατασκευασμένοι από διαφορετικά υλικά που χαρακτηρίζουν την απόδοση της μπαταρίας. Πολλές χημικές συστάσεις έχουν ήδη καταστεί εμπορικές, ενώ άλλες εξελίσσονται επί του παρόντος (πilotικά και εργαστηριακά έργα) (Batteries Europe, 2021a, 2021b).



Σχήμα 2. Ορυκτές πρώτες ύλες στις μπαταρίες ιόντων λιθίου (Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study, 2023).

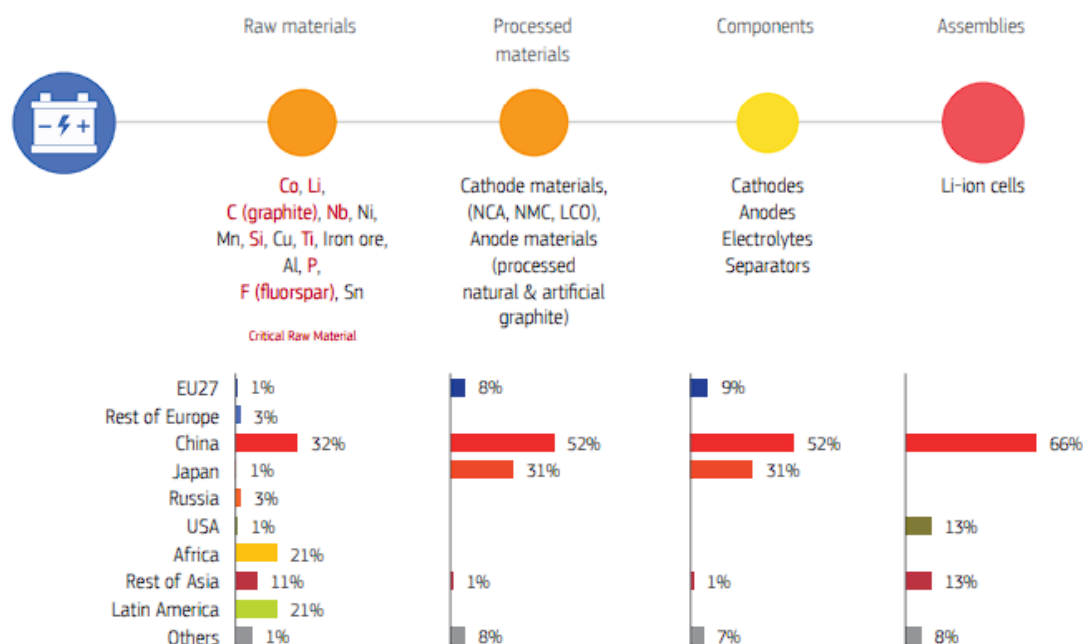
2.2 Τρέχοντα σημεία συμφόρησης εφοδιασμού κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού

Από όλα τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή μπαταριών, το κοβάλτιο, ο φυσικός γραφίτης και το λίθιο είναι κρίσιμα και βρίσκονται στη λίστα Critical Raw Materials (CRMs) του 2020 της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Study on the Critical Raw Materials for the EU, 2023). Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι κύριοι φορείς στην αλυσίδα εφοδιασμού των μπαταριών λιθίου-ιόντων.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση παράγει μόνο το 1% από τις συνολικές πρώτες ύλες για μπαταρίες. Επίσης, αξίζει να εξεταστούν και τα μεμονωμένα υλικά, το 54% της παγκόσμιας παραγωγής κοβαλτίου προέρχεται από τη Δημοκρατία του Κονγκό, ακολουθούμενη από την Κίνα (8%), τον Καναδά (6%), τη Νέα Καληδονία (5%) και την Αυστραλία (4%). Η παραγωγή καθαρού κοβαλτίου προέρχεται από την Κίνα (46%), τη Φινλανδία (13%), τον Καναδά και το Βέλγιο (και οι δύο 6%).

Περίπου το 90% της παγκόσμιας παραγωγής μεταλλικού λιθίου προέρχεται από τη Χιλή (40%), την Αυστραλία (29%) και την Αργεντινή (16%). Η Κίνα (45%) φιλοξενεί τις περισσότερες εγκαταστάσεις επεξεργασίας σκληρών μεταλλικών ορυκτών του λιθίου στον κόσμο. Η Χιλή (32%) και η Αργεντινή (20%) κυριαρχούν στην επεξεργασία του λιθίου από αλμυρά νερά (EC, 2019). Παρά τους πρόσφατους φόβους για έλλειψη και αύξηση των τιμών, αναμένεται ότι η προμήθεια του λιθίου δεν θα αποτελέσει κύριο πρόβλημα για την αλυσίδα εφοδιασμού των μπαταριών στο σύντομο ή μεσοπρόθεσμο μέλλον καθώς υπάρχουν ήδη ευρωπαϊκά ορυχεία και εργοστάσια υπό κατασκευή που αναμένεται να βοηθήσουν την

Ευρώπη να εισαχθεί στην αλυσίδα εφοδιασμού των μπαταριών έως το 2030 (JRC, 2022b). Ωστόσο, σύμφωνα με την (Roskill, 2018), είναι απαραίτητη μια αύξηση των τιμών για την υποστήριξη της ανάπτυξης νέων παραγωγικών ικανοτήτων για το μακροπρόθεσμο μέλλον.



Σχήμα 3. Μπαταρίες Λιθίου: μια εκτίμηση του ρίσκου εφοδιασμού, συμφορήσεων και κύριοι προμηθευτές (Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU, 2020). Κόκκινο χρώμα: εντοπίζεται υψηλό ρίσκο, Κίτρινο / Πορτοκαλί χρώμα: εντοπίζεται ρίσκο μεσαίας / χαμηλής αυτοπεποίθησης, Πράσινο / Μπλε χρώμα: δεν εντοπίζεται ρίσκο.

Η Κίνα είναι ο κύριος προμηθευτής υλικών ανόδου, καθώς και επεξεργασμένων υλικών (NMC) οξειδίου κοβαλτίου μαγνησίου νικελίου λιθίου και οξειδίου κοβαλτίου λιθίου (LCO), ενώ η Ιαπωνία είναι ο κύριος προμηθευτής υλικού καθόδου οξειδίου αργιλίου κοβαλτίου νικελίου λιθίου (NCA). Η Ευρωπαϊκή Ένωση εξαρτάται πλήρως από υλικά ανόδου και καθόδου NCA, ενώ παρέχει περίπου 18% των υλικών NMC και 15% των υλικών LCO. Ένα κρίσιμο πρόβλημα για την Ευρωπαϊκή Ένωση είναι ότι αυτές οι ποσότητες δεν επαρκούν για να ικανοποιήσουν την ευρωπαϊκή ζήτηση για μπαταρίες λιθίου-ιόντων. Η Ασία, με την Κίνα, την Ιαπωνία και τη Νότια Κορέα, παρέχει το 86% των επεξεργασμένων υλικών και συστατικών για μπαταρίες λιθίου-ιόντων παγκοσμίως. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, με το 8%, έχει έναν σχετικά μικρό μερίδιο στον εφοδιασμό. Άλλες χώρες παρέχουν μόλις το 8%, πράγμα που προσφέρει πολύ λίγο περιθώριο για την διαφοροποίηση του εφοδιασμού.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση εξαρτάται πλήρως από τις εισαγωγές μπαταριών, εκθέτοντας τη βιομηχανία σε αβεβαιότητες εφοδιασμού και πιθανά υψηλά κόστη. Η Κίνα αποτελεί τον κύριο παραγωγό μπαταριών λιθίου-ιόντων, καλύπτοντας το 66% της παγκόσμιας παραγωγής κυψελών. Η Ευρωπαϊκή Ένωση διαθέτει πολύ περιορισμένη παραγωγή (0,2% των μπαταριών λιθίου-ιόντων). Άλλοι προμηθευτές παρέχουν περίπου το 8% της παγκόσμιας προσφοράς, επομένως το τρέχον περιθώριο για διαφοροποίηση του εφοδιασμού είναι περιορισμένο. Ωστόσο, η Ευρωπαϊκή Ένωση επενδύει σημαντικά στην αλυσίδα εφοδιασμού των μπαταριών. Η χωρητικότητα που αναμένεται να είναι διαθέσιμη στην ΕΕ το 2021-2023 θα αυξηθεί σε 40 GWh, από τα τρέχοντα 3 GWh. Πολλές από αυτές τις εγκαταστάσεις παραγωγής είναι ασιατικές επενδύσεις. Αυτές οι ευρωπαϊκές χωρητικότητες συγκρίνονται με μια τρέχουσα παγκόσμια χωρητικότητα 150 GWh που έχει εντοπιστεί τώρα (JRC, 2018a). Ταυτόχρονα, κινέζικες εταιρείες θα πραγματοποιήσουν μια μεγάλη αύξηση στην παραγωγική ικανότητα των μπαταριών λιθίου-ιόντων, εξασφαλίζοντας την κυριαρχία της Κίνας στην αγορά των μπαταριών. Οι κατασκευαστές εξοπλισμού, οι παραγωγοί κυψελών και οι προμηθευτές αναμένεται να ανταγωνίζονται παγκοσμίως μεταξύ τους για να διασφαλίσουν τις αλυσίδες εφοδιασμού των μπαταριών τους και την πρόσβαση στις πέντε ουσιώδεις πρώτες ύλες μπαταριών - λίθιο, κοβάλτιο, νικέλιο, γραφίτη και μαγγάνιο.

2.3 Παρατηρήσεις και προτάσεις

Οι μπαταρίες λιθίου-ιόντων προσφέρουν βελτιωμένη ισχύ και ενεργειακή απόδοση σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μπαταρίες μολύβδου-οξέος που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος. Η εκμάθηση τεχνολογίας και οι οικονομίες κλίμακας έχουν μειώσει το συνολικό κόστος κατά 90% την τελευταία δεκαετία, ωστόσο, αυτό σημαίνει επίσης ότι το κόστος των πρώτων υλών είναι πλέον μεγαλύτερο, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 50-70% του συνολικού κόστους της μπαταρίας, από 40-50% πέντε πριν από χρόνια (IEA 2021). Αναδύονται ως μια σημαντική τεχνολογία σε μια ευρεία γκάμα πολιτικών και στρατιωτικών εφαρμογών. Λόγω της αυξανόμενης εισαγωγής ηλεκτρικών οχημάτων (EV), κινητών ηλεκτρικών συσκευών (3C) και σταθερών αποκεντρωμένων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (ESS), η ζήτηση για μπαταρίες λιθίου-ιόντων αναμένεται να αυξηθεί δραματικά ετησίως (> 30%) για τα επόμενα 10 χρόνια.

Το τελευταίο βήμα της αλυσίδας εφοδιασμού, η παραγωγή κυψελών λιθίου-ιόντων, εμπεριέχει υψηλό κίνδυνο εφοδιασμού για την Ευρωπαϊκή Ένωση. Αναγνωρίζεται υψηλός

κίνδυνος για τον εφοδιασμό με πρώτες ύλες και επεξεργασμένα υλικά, ενώ προβλέπεται μέτριο επίπεδο κινδύνου για τον εφοδιασμό με συστατικά.

Διάφορες εκτιμήσεις υποδηλώνουν ότι η πολιτική βιομηχανία στην Ευρωπαϊκή Ένωση απαιτεί έως και 30% των μπαταριών που παράγονται παγκοσμίως. Αυτό σημαίνει ότι η χωρητικότητα παραγωγής κυψελών πρέπει να αναπτυχθεί στην Ευρωπαϊκή Ένωση για να μειωθεί η εξάρτηση από την ασιατική αγορά. Η ανάλυση της πολιτικής αγοράς δείχνει ότι οι απαιτούμενες ποσότητες στην Ευρωπαϊκή Ένωση δεν μπορούν να καλυφθούν τα επόμενα χρόνια ούτε με τη συνδυασμένη χωρητικότητα των ασιατικών και ευρωπαϊκών κατασκευαστών κυψελών.

Ο Στρατηγικός Σχεδιασμός Δράσης για τις Μπαταρίες καθορίζει μια περιεκτική στρατηγική για την ενίσχυση των σταδίων της αλυσίδας εφοδιασμού των μπαταριών στην ΕΕ. Ωστόσο, η θέση της ΕΕ μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω με:

- **Διαφοροποίηση της προμήθειας υλικών**, με την εξασφάλιση εμπορικών συμφωνιών με τρίτες χώρες και χρήση οικονομικής διπλωματίας για το κοβάλτιο, το λίθιο, το φυσικό γραφίτη και το νικέλιο κατηγορίας-I προκειμένου να μειωθούν οι κίνδυνοι προμήθειας.

- **Βελτίωση των ευκαιριών κατασκευής στην ΕΕ**, με αύξηση της εξόρυξης, εξαγωγής και κατεργασίας στην ΕΕ βασικών πρώτων υλών και μεταποιημένων υλικών. Είναι σημαντικό να δημιουργηθεί ένα ελκυστικό επενδυτικό κλίμα καθώς και συγκεκριμένα οικοσυστήματα για την κατασκευή μπαταριών όπου εταιρείες με διαφορετική εμπειρία στην αλυσίδα εφοδιασμού μπορούν να ταυτιστούν. Ταυτόχρονα, η έλξη ξένων επενδύσεων από εταιρείες ηλεκτρονικών, αυτοκινήτων και κατασκευής μπαταριών μπορεί να υποστηρίξει άμεσα υψηλότερα περιβαλλοντικά και κοινωνικά πρότυπα σε σύγκριση με δραστηριότητες σε άλλα μέρη του κόσμου.

- **Ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση, αντικατάσταση.** Η ενίσχυση των δραστηριοτήτων ανακύκλωσης στην ΕΕ αποτελεί μια δράση χωρίς μειονεκτήματα που επιτρέπει την ανάκτηση και την επαναχρησιμοποίηση βασικών υλικών, όπως το κοβάλτιο, το λίθιο, το μαγγάνιο και το νικέλιο, για την παραγωγή νέων μπαταριών.

- **Προώθηση επενδύσεων έρευνας και ανάπτυξης, ανάπτυξη δεξιοτήτων και τεχνικών.** Συνιστάται περαιτέρω ανάλυση των (οικονομικών) μηχανισμών που επιτρέπουν τη βελτίωση των κοινωνικών και περιβαλλοντικών προτύπων, χωρίς να προκαλεί ανταγωνιστικό μειονέκτημα για τις ευρωπαϊκές εταιρείες σε σύγκριση με τις μη ευρωπαϊκές. Προτείνονται επίσης συγκεκριμένες επενδύσεις σε έρευνα και ιδιαίτερα στις επιστήμες των υλικών που σχετίζονται με τις μπαταρίες, τις γεωλογικές και μεταλλουργικές μελέτες. Τεχνικές και

δεξιότητες που χρησιμοποιούνται ήδη θα πρέπει να αναπτυχθούν περαιτέρω για να δημιουργηθεί μια ανταγωνιστική βιομηχανία, καθώς απαιτείται καινοτομία σε όλη την έκταση της εφοδιαστικής αλυσίδας, με νέα επιχειρηματικά μοντέλα και εργαλεία πληροφορικής.

- **Ενθάρρυνση διεθνούς συνεργασίας:** οι απαιτήσεις οικολογικού σχεδιασμού είναι απαραίτητες για την προώθηση υψηλότερων επιπέδων επαναχρησιμοποίησης, ανακατασκευής και ανακύκλωσης, συμπεριλαμβανομένης της αυξημένης χρήσης ανακυκλωμένου υλικού σε νέα προϊόντα για τη μείωση τόσο των περιβαλλοντικών όσο και των πρώτων υλών.

3. ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ (Fuel cells)

3.1 Γενικά

Οι κυψέλες καυσίμου (FCs) είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που μετατρέπουν άμεσα τη χημική ενέργεια των αντιδρώντων, π.χ. υδρογόνο και αέρα, σε ηλεκτρισμό και θερμότητα (Alaswad et al., 2022). Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται για τρεις κύριους τομείς: εφαρμογές μεταφοράς (75%), σταθερή παραγωγή ενέργειας (24%) και φορητές εφαρμογές (<1%) (E4tech, 2020). Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν μόνο νερό, χωρίς ατμοσφαιρικούς ρύπους, όπως τα οξείδια του αζώτου (NO_x), τα οξείδια του θείου (SO_x) ή σωματίδια, και εκπέμπουν σχεδόν μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου όταν λειτουργούν με ανανεώσιμους καθαρούς πόρους (FFFs και Hydrogen Joint Undertaking, 2017). Σε σύγκριση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης, οι κυψέλες καυσίμου δεν έχουν κινούμενα μέρη (εκτός από αντλίες ή συμπιεστές σε ορισμένα υποσυστήματα κυψελών καυσίμου), γεγονός που επιτρέπει αθόρυβη λειτουργία και χωρίς κραδασμούς. Σε σύγκριση με τις μπαταρίες, οι κυψέλες καυσίμου παρέχουν σχεδόν άμεση δυνατότητα επαναφόρτισης, υψηλότερες πυκνότητες ισχύος και τα ηλεκτρόδια τους δεν καταναλώνονται καθώς δεν συμμετέχουν στην αντίδραση. Ωστόσο, οι αντιδραστήρες πρέπει να τροφοδοτούνται συνεχώς από εξωτερικές αποθήκες (Alaswad et al., 2022). Στο μεσοπρόθεσμο έως μακροπρόθεσμο μέλλον, οι κυψέλες καυσίμου (FCs) μαζί με τον εφοδιασμό υδρογόνου καυσίμου θα προσφέρουν μια ελκυστική πιθανή λύση για καθαρή ενέργεια.

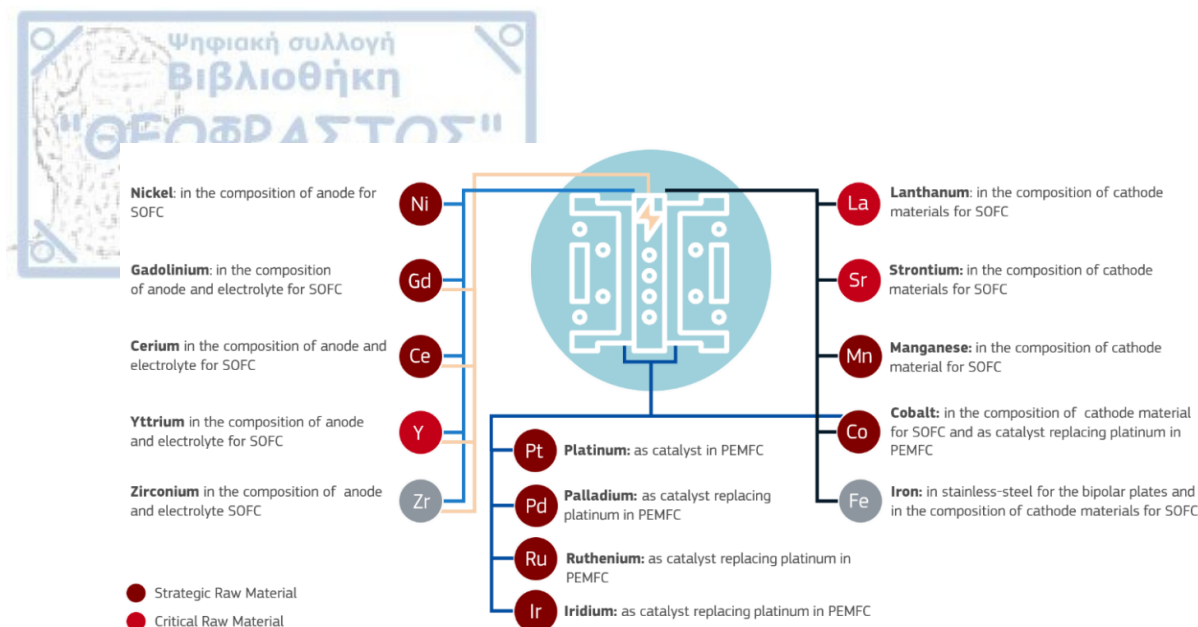
Η τεχνολογία της Κυψέλης Καυσίμου με Πολυμερή Ηλεκτρολυτική Μεμβράνη (PEM FC) είναι ο πιο δημοφιλής τύπος κυψέλης καυσίμου. Οι κυψέλες καυσίμου είναι υψηλά αποδοτικές όσον αφορά τη μετατροπή ενέργειας, μειώνουν την ατμοσφαιρική ρύπανση και είναι ικανές να λειτουργήσουν με καύσιμα που παράγονται από ανανεώσιμες πηγές. Η τεχνολογία PEM FC έχει υψηλή πυκνότητα ισχύος και λειτουργεί σε σχετικά χαμηλές

θερμοκρασίες σε σύγκριση με άλλους τύπους κυψελών καυσίμου, καθιστώντας την ιδανική για την αυτοκινητοβιομηχανία, τις τηλεπικοινωνίες, τα περονοφόρα, τα πρωτογενή συστήματα, τα κέντρα δεδομένων και τα συστήματα εφεδρικής ενέργειας. Παρόλο που η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου έχει εξελιχθεί πολύ, η ευρεία εφαρμογή στους οικιακούς και βιομηχανικούς τομείς δεν έχει ακόμη λάβει χώρα. Αναμένεται σημαντική ανάπτυξη της αγοράς κυψελών καυσίμου για την αυτοκινητοβιομηχανία στο μέλλον. Επίσης, αναμένεται αυξημένη ζήτηση για κυψέλες καυσίμου σε οχήματα χειρισμού υλικών, ελαφρά οχήματα, λεωφορεία και τον αεροδιαστημικό τομέα.

Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν καταλύτες, συνήθως κατασκευασμένους από πλατίνα ή μέταλλα της ομάδας της πλατίνας (PGMs), για τη μετατροπή του καυσίμου σε ενέργεια. Η τρέχουσα έρευνα επικεντρώνεται στη μείωση ή αποκλεισμό αυτών των ακριβών μετάλλων από τους καταλύτες και στην αύξηση της δραστηριότητας και της ανθεκτικότητας και έχει επιτευχθεί σημαντική μείωση τα τελευταία χρόνια. Λόγω των ενεργών προσπαθειών για απομάκρυνση υλικών, η σφοδρότητα των PGMs στις κυψέλες καυσίμου PEM έχουν μειωθεί κατά 80% από το 2005 (Leader, Gaustad και Babbitt, 2019). Σύμφωνα με την κοινή πρωτοβουλία υδρογόνου και κυψελών καυσίμου (FCH JU) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, η ποσότητα πλατίνας στην επόμενη γενιά οχημάτων με κυψέλες καυσίμου θα φτάσει σε παρόμοια επίπεδα με αυτά που χρησιμοποιούνται στους καταλύτες των πετρελαιοκίνητων οχημάτων, που αντιστοιχεί σε 3-7 γραμμάρια (Reuters Business News, 2018). Αυτό μπορεί να διευκολύνει σημαντικά τη μεγάλη κλιμακωτή εμπορική χρήση οχημάτων που λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου.

Οι περισσότερες κυψέλες καυσίμου έχουν ένα κανονικό σχεδιασμό, στον οποίο δύο ηλεκτρόδια χωρίζονται από ιοντοαγώγιμο ηλεκτρολύτη. Το κέντρο μιας κυψέλης καυσίμου PEM είναι η μονάδα μεμβράνης και ηλεκτροδίου (MEA), η οποία περιλαμβάνει πέντε βασικά στοιχεία: μεμβράνη, στρώση καταλύτη ανόδου, στρώση καταλύτη καθόδου και δύο στρώσεις διάχυσης αερίου (GDLs), μία για κάθε ηλεκτρόδιο.

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται μια επισκόπηση των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στις κυψέλες καυσίμου.



Σχήμα 4. Ορυκτές πρώτες ύλες στις κυψέλες καυσίμων (Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study, 2023).

3.2 Τρέχοντα σημεία συμφόρησης εφοδιασμού κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού

Για την παραγωγή κυψελών καυσίμου και τεχνολογιών αποθήκευσης υδρογόνου απαιτούνται περίπου 30 πρώτες ύλες. Από αυτές τις ύλες, 13 θεωρούνται κρίσιμες για την οικονομία της ΕΕ σύμφωνα με τη λίστα CRM του 2020 και περιλαμβάνουν το κοβάλτιο, το μαγνήσιο, τις σπάνιες γαίες, την πλατίνα, το παλλάδιο, τα βορικά ορυκτά, το μέταλλο του πυριτίου, το ρόδιο, το ρουθίνιο, το γραφίτη, το λίθιο, το τιτάνιο και το βανάδιο. Οι πρώτες ύλες και τα εξαρτήματα κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.

Οι μοναδικές χημικές και φυσικές ιδιότητες καθιστούν τις ιδιότητες της πλατίνας εξαιρετικούς καταλύτες για την αυτοκινητοβιομηχανία. Σήμερα, η ζήτηση για πλατίνα στις εφαρμογές των κυψελών καυσίμου είναι ασήμαντη σε σύγκριση με άλλες τελικές εφαρμογές. Ωστόσο, ένα όχημα με κυψέλες καυσίμου χρειάζεται περίπου 10 φορές περισσότερη πλατίνα από το μέσο φορτίο PGM ενός κανονικού βενζίνης ή πετρελαιοκίνητου οχήματος (Hao et al., 2019).

Η υψηλή τιμή της πλατίνας είναι ένα από τα κύρια προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι παραγωγοί κυψελών καυσίμου· η πλατίνα αντιπροσωπεύει περίπου το 50% του κόστους μιας στοίβας κυψελών καυσίμου. Επομένως, οι ερευνητές προσπαθούν διαρκώς να μειώσουν την ανάγκη για πλατίνα στις κυψέλες καυσίμου. Ο εφοδιασμός των πρώτων υλών που απαιτούνται στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου είναι ποικίλος, με περισσότερο από το ήμισυ των υλικών προερχόμενων από διάφορους προμηθευτές, με μικρό ποσοστό εφοδιασμού κάτω του 7%. Η Κίνα, με πάνω από 20% μερίδιο, είναι ο κύριος προμηθευτής των πρώτων υλών,

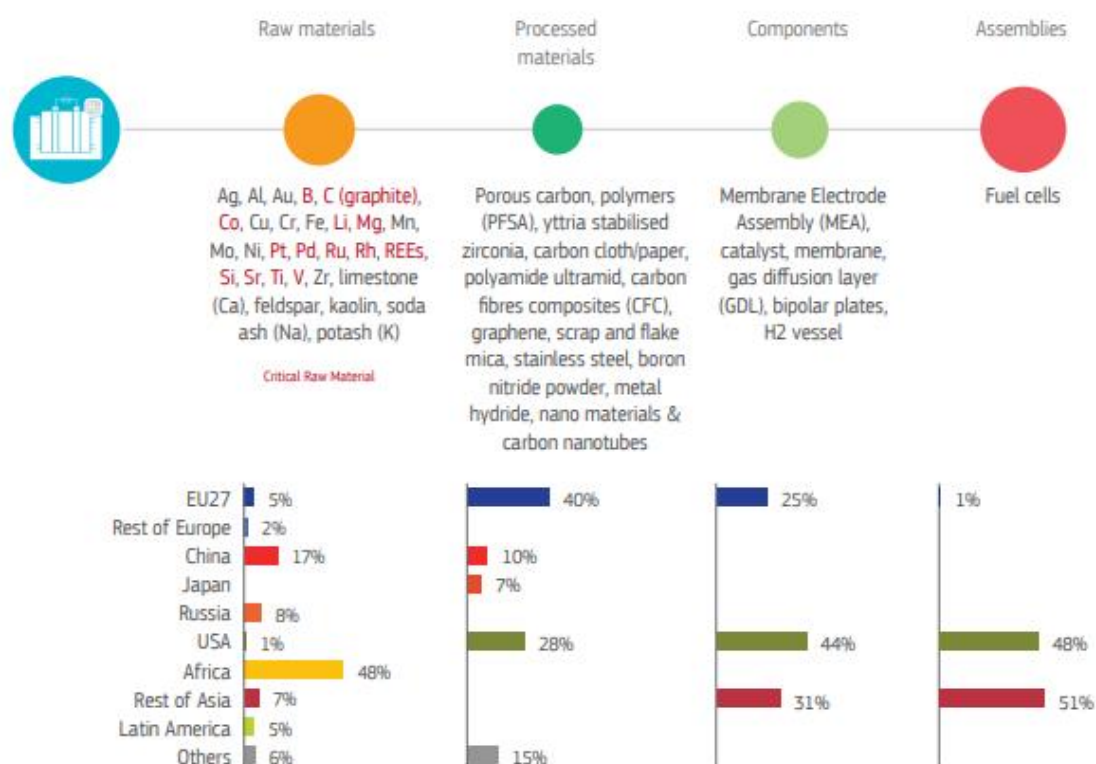
ακολουθούμενη από τη Νότιο Αφρική και τη Ρωσία. Η πλατίνα παράγεται κυρίως στη Νότιο Αφρική (71% της παγκόσμιας παραγωγής), ακολουθούμενη από τη Ρωσία (16%) και τη Ζιμπάμπουε (6%). Οι άλλες ιδιότητες της πλατίνας, δηλαδή το παλλάδιο, το ρόδιο και το ρουθήνιο, επίσης εφοδιάζονται κυρίως από τρεις κύριους προμηθευτές: Ρωσία, Νότια Αφρική και Ζιμπάμπουε.

Όσον αφορά το επόμενο βήμα στην αλυσίδα εφοδιασμού, αναγνωρίζονται 12 επεξεργασμένες ύλες ως οι πλέον σχετιζόμενες με τεχνολογίες κυψελών καυσίμου και αποθήκευσης/παραγωγής υδρογόνου, συγκεκριμένα πορώδης άνθρακας, ζιρκόνιο σταθεροποιημένο με ύτριο, πολυμερή (π.χ. υπερφθοροσουλφονικό οξύ - PFSA), σύνθετες ίνες άνθρακα (CFC), ανοξειδωτος χάλυβας, γραφένιο, θραύσματα και νιφάδες μαρμαρυγία, σκόνη νιτρικού βορίου, νανοϋλικά & νανοσωλήνες άνθρακα, ανθρακικό ύφασμα/χαρτί, υπεραμιδικά πολυαμίδια και υδρίδια μετάλλων. Για τα ηλεκτρόδια, έχουν αναπτυχθεί αρκετοί τύποι άνθρακα ή βασισμένων υλικών σε άνθρακα, συμπεριλαμβανομένων του μεσοπορώδους άνθρακα και των νανοϋλικών άνθρακα. Περίπου το 40% των επεξεργασμένων υλικών και το 25% των εξαρτημάτων των κυψελών καυσίμου προμηθεύονται από ευρωπαϊκές εταιρείες. Το χαρτί από ίνες άνθρακα και το ύφασμα άνθρακα χρησιμοποιούνται συνήθως ως στρώσεις διάχυσης αερίου (GDLs), που είναι βασικά εξαρτήματα σε διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου, συμπεριλαμβανομένων των κυψελών καυσίμου PEM, άμεσης μεθανόλης (DMFC) και φωσφορικού οξέος (PAFC). Οι διπολικές πλάκες είναι πολυλειτουργικά εξαρτήματα εντός της στοίβας κυψελών καυσίμου PEM. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τις διπολικές πλάκες περιλαμβάνουν γραφίτη και ανοξειδωτο χάλυβα. Ωστόσο, το ανοξειδωτο ατσάλι για τις διπολικές πλάκες πρέπει να επικαλυφθεί με επιστρώσεις για να αυξηθεί η λειτουργικότητα και η διάρκεια ζωής τους. Συνήθεις παραδείγματα υλικών επιστρώσεων με εξαιρετικές ιδιότητες είναι το χρυσό και άλλα ευγενή μέταλλα. Λόγω του υψηλού κόστους των ευγενών μετάλλων, είναι επιθυμητό να βρεθούν εναλλακτικά υλικά επιστρώσεων.

Οι κύριοι παραγωγοί κυψελών καυσίμου είναι η Ασία (κυρίως Ιαπωνία και Νότια Κορέα) και η Βόρεια Αμερική (Καναδάς και ΗΠΑ) (JRC, 2019). Το τελευταίο βήμα της αλυσίδας εφοδιασμού των κυψελών καυσίμου είναι η συναρμολόγηση των εξαρτημάτων της κυψέλης σε μια στοίβα και η ενσωμάτωσή της στον τελικό σύστημα. Ο σχεδιασμός της στοίβας και η συναρμολόγηση της κυψέλης είναι παράμετροι πολύ σημαντικές που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση των κυψελών καυσίμου και τη διανομή των αντιδραστηρίων στη στοίβα. Η συναρμολόγηση της κυψέλης θα επηρεάσει επίσης τη συμπεριφορά επαφής των διπολικών πλακών με τη μονάδα μεμβράνης και ηλεκτροδίου (MEA). Οι κατασκευαστές πρέπει να ευθυγραμμίσουν ακριβώς τα επαναλαμβανόμενα εξαρτήματα (π.χ. MEAs, διπολικές πλάκες

και σφραγίσματα) και τα μη επαναλαμβανόμενα εξαρτήματα (π.χ. πλάκες άκρων, ράβδους σύνδεσης, σύστημα φορτίου συμπίεσης και εξωτερικές συνδέσεις) για να διατηρηθεί η ανθεκτικότητα και η απόδοση της στοίβας.

Οι μερίδες των χωρών λαμβάνουν υπόψη επίσης τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή υδρογόνου και την αποθήκευση υδρογόνου. Η αξιολόγηση των συμφορήσεων δείχνει ότι υπάρχει ένα δυνητικά πολύ υψηλός κίνδυνος εφοδιασμού για τις συναρμολογημένες κυψέλες καυσίμου. Υψηλός κίνδυνος προβλημάτων εφοδιασμού εκτιμάται για το πρώτο βήμα της εφοδιαστικής αλυσίδας – πρώτες ύλες. Ενώ για τα άλλα δυο βήματα της αλυσίδας εφοδιασμού δεν αναμένονται προβλήματα.



Σχήμα 5. Κυψέλες καυσίμων και τεχνολογίες Υδρογόνου: μια εκτίμηση του ρίσκου εφοδιασμού, συμφορήσεων και κύριοι προμηθευτές (Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU, 2020). Κόκκινο χρώμα: εντοπίζεται υψηλό ρίσκο, Κίτρινο / Πορτοκαλί χρώμα: εντοπίζεται ρίσκο μεσαίας / χαμηλής αυτοπεποίθησης, Πράσινο / Μπλε χρώμα: δεν εντοπίζεται ρίσκο.

3.3 Παρατηρήσεις και προτάσεις

Παρόλο που η ανάπτυξη και η εφαρμογή των κυψελών καυσίμου (FC) έχει αυξηθεί τα τελευταία 10 χρόνια, παραμένει αβέβαιο πότε θα επιτευχθεί πλήρης μαζική εμπορική ανάπτυξη. Οι κατασκευαστές κυψελών καυσίμου εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από δημόσια χρηματοδότηση για να υποστηρίξουν τις δραστηριότητες εφαρμογής μεγάλης κλίμακας κυψελών καυσίμου σταθερής κατασκευής, είτε μέσω μέτρων προώθησης της τεχνολογίας είτε

μέσω μέτρων έλξης αγοράς. Οι κύριοι φραγμοί σε αυτό το στάδιο είναι η αξιοπιστία (διαθεσιμότητα και διάρκεια ζωής) και το κόστος των κυψελών καυσίμου.

Πολλές βασικές ευκαιρίες για πολιτικές δράσεις αναγνωρίζονται:

- **Διαφοροποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας υλικών**, όπως και για τις μπαταρίες Li-ion, περισσότερες από τις μισές πρώτες ύλες για τα FCs παράγονται από πολλές μικρότερες χώρες.

- **Βελτίωση των ευκαιριών κατασκευής στην ΕΕ**. Η αναμόρφωση του φυσικού αερίου με ατμό είναι η προτιμώμενη επιλογή για την παραγωγή υδρογόνου και μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε πολύ μεγάλη κλίμακα στην πηγή είτε ακόμα και τοπικά στο σημείο χρήσης μέσω μικρών μεταρρυθμιστών ενσωματωμένων με τα FCs.

- **Ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση, αντικατάσταση**. Παρόλο που η ανακύκλωση των FCs και των τεχνολογιών υδρογόνου μπορεί να ρυθμίζεται από νομοθεσία που αφορά πτυχές όπως η σχεδίαση, η επιλογή υλικών και το τέλος του κύκλου ζωής τους, η ανακύκλωση των FCs είναι μια νέα επιχειρηματική δραστηριότητα για τους ανακυκλωτές. Η εύρεση εναλλακτικής λύσης για την πλατίνα θα βοηθήσει στην αποφυγή του άμεσου προβλήματος της τιμής και της διαθεσιμότητας. Παρά τις πολλές προσπάθειες να αντικατασταθεί η πλατίνα με καταλυτές μη πολύτιμων μετάλλων, δεν υπήρξε μεγάλη επιτυχία στην εύρεση αποτελεσματικών εναλλακτικών με παρόμοιο επίπεδο δραστηριότητας. Μια εναλλακτική λύση είναι η αντικατάσταση της πλατίνας με άλλα πολύτιμα μέταλλα όπως το παλλάδιο ή το ρουθίνιο, αλλά η αφθονία τους είναι επίσης περιορισμένη.

- **Προώθηση της έρευνας και ανάπτυξης, ανάπτυξη δεξιοτήτων και τεχνικών**. Η προώθηση της έρευνας στην ανάπτυξη FCs είναι εφικτή και μπορεί να προσφέρει ελκυστικές ευκαιρίες για την ΕΕ. Για τον σκοπό αυτόν, ο πιο σημαντικός εταίρος θα ήταν η Ένωση Κοινών Επιχειρήσεων για το Υδρογόνο και τις FCs (FCH JU). Παρόλο που η σχεδίαση του επόμενου ευρωπαϊκού προγράμματος πλαισίου έρευνας βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη, αναμένεται ότι η έννοια ενός ιδιωτικού-δημόσιου εταιρικού σχήματος θα παραμείνει στην ουσία η ίδια. Η FCH JU αναπτύσσει επίσης εργαλεία εκπαίδευσης και εκπαιδευτικά μέσα για να αυξήσει την εμπιστοσύνη και την τεχνική εμπιστοσύνη στις τεχνολογίες και να αναπτύξει μια εξειδικευμένη ευρωπαϊκή εργατική δύναμη ικανή να λειτουργεί συστήματα FCs.

- **Ενίσχυση της διεθνούς συνεργασίας**. Οι τεχνολογίες FCs και υδρογόνου επωφελούνται από μια διεθνή προσέγγιση για την ανάπτυξη της απαιτούμενης υποδομής, μιας παγκόσμιας αγοράς για μεγάλες ποσότητες υδρογόνου και παγκόσμιων κανονισμών που επιτρέπουν την ασφαλή υιοθέτηση τους σε όλο τον κόσμο. Τα αποτελέσματα έρευνας

κοινοποιούνται επίσης διεθνώς στο πλαίσιο μιας παγκόσμιας τυποποίησης και ρυθμιστικής προσπάθειας. Η ύπαρξη προτύπων απόδοσης, ασφάλειας και αδειοδοτήσεων και τεχνικών κανονισμών θεωρείται ένα από τα μέσα για μια επιτυχημένη ανάπτυξη και εγκατάσταση νέων τεχνολογιών. Η ανάπτυξη βιομηχανικών προτύπων που επιτρέπουν τη συμβατότητα και τη διαλειτουργικότητα των εξαρτημάτων μπορεί να συμβάλει στη μείωση των δαπανών και την αύξηση της διαθεσιμότητας των εξαρτημάτων.

4. ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

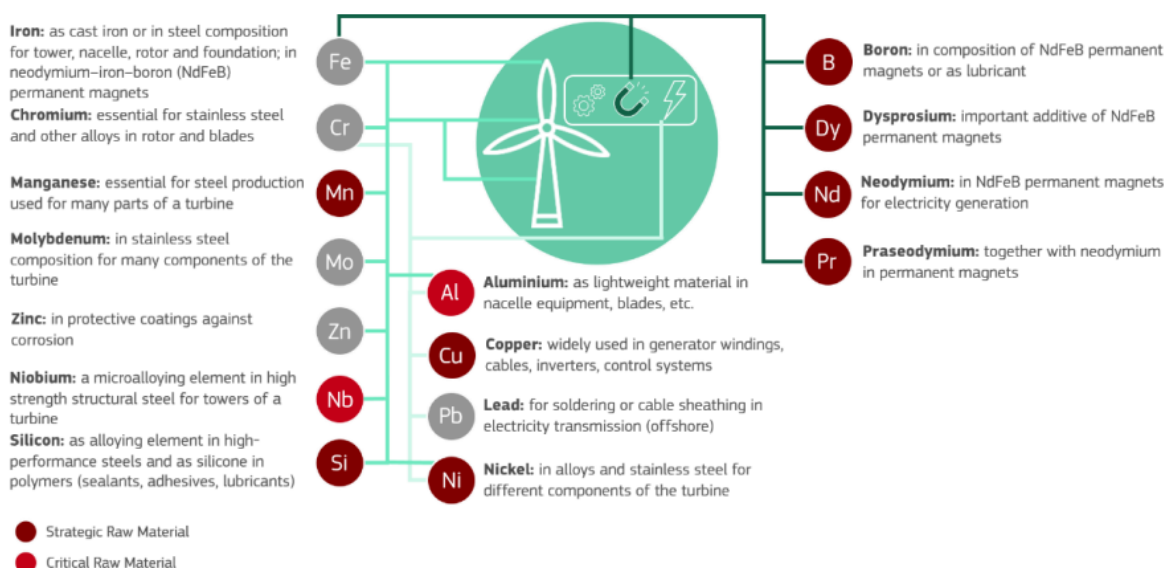
4.1. Γενικά

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μία από τις πιο οικονομικές τεχνολογίες για τη μείωση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και αποτελεί έναν αναπτυσσόμενο τομέα στη βιομηχανική βάση της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η περαιτέρω διείσδυση της τεχνολογίας της αιολικής ενέργειας στις αγορές της ΕΕ και παγκοσμίως εξαρτάται από τα τεχνοοικονομικά της χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με τα κανονιστικά πλαίσια και την αποτελεσματικότητα των ενεργειακών πολιτικών. Θα επηρεαστεί επίσης από τη σταθερότητα του εφοδιασμού υλικών και την εξέλιξη των τιμών των υλικών.

Οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται ειδικά για να βελτιώσουν την απόδοσή τους σε όρους παραγωγής ενέργειας, αξιοπιστίας, λειτουργίας, συντήρησης, κεφαλαίου και μεταφοράς. Το στοιχείο που διαφοροποιεί τις ανεμογεννήτριες μεταξύ τους, είναι η γεννήτρια, η οποία μετατρέπει τη κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ενέργεια, την οποία έπειτα μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι γεννητριών για ανεμογεννήτριες: άμεσου ρεύματος, εναλλασσόμενου ρεύματος σύγχρονο και ασύγχρονο. Λαμβάνοντας υπόψη την κυμαινόμενη φύση του ανέμου, είναι επιθυμητό οι γεννήτριες να λειτουργούν με μεταβλητή ταχύτητα για να μειώνονται οι μηχανικές καταπονήσεις στις πτέρυγες της ανεμογεννήτριας και στον μηχανισμό μετάδοσης. Οι γεννήτριες μόνιμων μαγνητών έχουν εισαχθεί τις τελευταίες δεκαετίες στις εφαρμογές ανεμογεννητριών λόγω της υψηλής πυκνότητας ισχύος και του χαμηλού βάρους τους. Ειδικότερα, οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη (PMSG) με άμεση μετάδοση προσφέρουν ορισμένα πλεονεκτήματα όσον αφορά την απόδοση, το βάρος, τις διαστάσεις και τη συντήρηση. Ωστόσο, αυτός ο τύπος ανεμογεννήτριας συνδέεται με υψηλή ζήτηση για σπάνιες γαίες (REEs). Το 2020, γεννήτριες που περιέχουν μόνιμους μαγνήτες σπάνιων γαιών χρησιμοποιήθηκαν σχεδόν σε όλους τους αιολικούς σταθμούς θαλάσσης στην ΕΕ και περίπου σε 72% των αιολικών σταθμών θαλάσσης

που τοποθετήθηκαν παγκοσμίως. Το ποσοστό των αιολικών σταθμών ενδοχώρας που εγκαταστάθηκαν το 2020 και χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες ήταν περίπου 13% στην ΕΕ και 22% παγκοσμίως (JRC, 2022).

Οι σπάνιες γαίες (REEs), δηλαδή το νεοδύμιο, το πρασεοδύμιο και το δυσπρόσιο, είναι καίρια συστατικά του ισχυρότερου μαγνητικού υλικού, του μαγνήτη νεοδυμίου (NdFeB). Αυτός ο μαγνήτης χρησιμοποιείται για την κατασκευή γεννητριών με μόνιμους μαγνήτες σύγχρονης λειτουργίας (PMSG), οι οποίες χρησιμοποιούνται στις κύριες δομές ανεμογεννητριών. Τα πιο σημαντικά υλικά που απαιτούνται στην παραγωγή αιολικής ενέργειας και τα κύρια εξαρτήματα ενός ανεμογεννήτριας αναφέρονται στο Σχήμα 6.



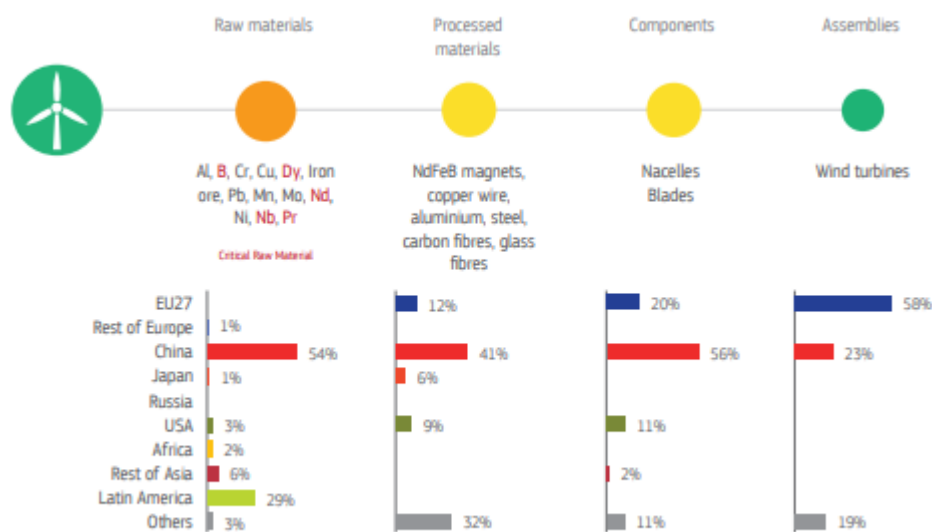
Σχήμα 6. Ορυκτές πρώτες ύλες στις ανεμογεννήτριες (Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study, 2023).

Αν και υπάρχουν διάφοροι τύποι μόνιμων μαγνητών, οι NdFeB είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται πιο πολύ λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους. Όσον αφορά τις ιδιότητες τους, μόνο οι μαγνήτες σαμαρίου-κοβαλτίου είναι ισάξιες τους. Ωστόσο, αυτοί οι μαγνήτες είναι σημαντικά πιο ακριβοί (Widmer, J.D. et al., 2015) (Lucas, J. et al., 2015). Το νεοδύμιο και το πρασεοδύμιο συμβάλλουν στη μαγνητική ισχύ, ενώ το δυσπρόσιο και το τέρβιο βελτιώνουν την αντίσταση στον απομαγνητισμό, ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες. Η ακριβής περιεκτικότητα των σπανίων γαιών εντός ενός μόνιμου μαγνήτη NdFeB μπορεί να ποικίλλει, με διαφορετικές αναλογίες των διαφορετικών στοιχείων να οδηγούν σε διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες. Το νεοδύμιο και το πρασεοδύμιο μπορούν να

αντικατασταθούν από άλλα στοιχεία αλλά αυτό συχνά περιορίζεται από τις προδιαγραφές συνθηκών λειτουργίας. Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα έχει επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση και πιθανή αντικατάσταση της χρήσης των νεοδυμίου και τερβίου, τα οποία είναι και δαπανηρά και ελάχιστα διαθέσιμα στοιχεία (Lucas, J. et al., 2015).

4.2. Τρέχοντα σημεία συμφόρησης εφοδιασμού κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού

Το κόστος των ανεμογεννητριών επηρεάζεται από τις τιμές των μετάλλων, ιδιαίτερα στην περίπτωση αυτών που χρησιμοποιούν γεννήτριες που περιέχουν στοιχεία σπάνιων γαιών (REEs). Για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών NdFeB, απαιτούνται σπάνιες γαίες όπως νεοδύμιο (Nd), πρασεοδύμιο (Pr), δυσπρόσιο (Dy) και τέρβιο (Tb) (Dias, A. e.t., 2020). Οι ανησυχίες ότι η προμήθεια των REEs ενδέχεται να μην είναι επαρκής για να καλύψει την αυξανόμενη ζήτηση για την παγκόσμια μετάβαση σε μια βιώσιμη ενεργειακή μελλοντική προοπτική έχουν αυξηθεί σημαντικά από το "τέλος" των REEs το 2011, όταν η πρακτικά μονοπωλιακή Κίνα επέβαλε περιορισμούς εξαγωγής.



Σχήμα 7. Ανεμογεννήτριες: μια εκτίμηση του ρίσκου εφοδιασμού, συμφορήσεων και κύριοι προμηθευτές (Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU, 2020). Κόκκινο χρώμα: εντοπίζεται υψηλό ρίσκο, Κίτρινο / Πορτοκαλί χρώμα: εντοπίζεται ρίσκο μεσαίας / χαμηλής αυτοπεποίθησης, Πράσινο / Μπλε χρώμα: δεν εντοπίζεται ρίσκο.

Η αξιολόγηση των σημείων αλληλεπίδρασης για τις ανεμογεννήτριες δείχνει ότι ο κίνδυνος για την προμήθεια των πρώτων υλών είναι ο υψηλότερος κατά μήκος της αλυσίδας

εφοδιασμού. Αυτός ο κίνδυνος μειώνεται μέσω ενός μεσαίου κινδύνου για την προμήθεια των επεξεργασμένων υλών και των εξαρτημάτων, μέχρι να φτάσει σε μη ανιχνεύσιμο κίνδυνο για τις συναρμολογήσεις. Η ευρωπαϊκή συμμετοχή αυξάνεται από 1% για τις πρώτες ύλες, σε 12% για τις επεξεργασμένες ύλες, 18% για τα εξαρτήματα, μέχρι 58% για τις συναρμολογήσεις (Σχήμα 7).

4.3. Παρατηρήσεις και προτάσεις

Ο κίνδυνος προμήθειας των στοιχείων των σπάνιων γαιών (REEs) στους μόνιμους μαγνήτες (PM) γεννήτριες για ανεμογεννήτριες είναι ένα από τα πιο ανησυχητικά χαρακτηριστικά της αιολικής βιομηχανίας σχετικά με τις πρώτες ύλες. Παρόλο που η τιμή των REEs έχει επιστρέψει σχεδόν στα επίπεδα πριν από την κρίση του 2011, η αυξανόμενη παγκόσμια ζήτησή τους μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις για την αιολική ενέργεια. Το 2019, παγκοσμίως παρήχθησαν περίπου 130.000 τόνοι μονίμων μαγνητών σπάνιων γαιών (NdFeB), που αντιστοιχούν σε έναν όγκο αγοράς 6,5 δισεκατομμυρίων ευρώ. Σήμερα, υπάρχει μόνο ικανότητα παραγωγής 1.000 τόνων στην Ευρώπη, ενώ εισάγονται από την Κίνα 16.000 τόνοι μαγνήτες κάθε χρόνο. Υπάρχουν μόνο οκτώ γνωστοί κατασκευαστές μόνιμων μαγνητών στην Ευρώπη, δύο από τους οποίους ανήκουν σε αμερικανικές εταιρείες. Οι υπόλοιπες έξι είναι ευρωπαϊκής ιδιοκτησίας (με μειοψηφικές μετοχές που κατέχει μία κινεζική εταιρεία σε μια περίπτωση), με σταθερή ιδιοκτησία και λειτουργικό προφίλ. Αυξάνονται έτσι οι ανησυχίες σχετικά με την εξάρτηση από μία αγορά (η Κίνα έχει σχεδόν το μονοπώλιο όχι μόνο στην παραγωγή των REEs, αλλά και στην κατασκευή μόνιμων μαγνητών), τον κίνδυνο των τιμών και τις πιθανές συνέπειες εμπορικών διαφωνιών μεταξύ Κίνας και ΗΠΑ. Ωστόσο, μετά την αύξηση των τιμών των REEs το 2011, οι κατασκευαστές ανεμογεννητριών έχουν βελτιώσει την αποδοτικότητα των υλικών στα προϊόντα τους, για παράδειγμα η περιεκτικότητα δυσπροσίου στους μόνιμους μαγνήτες έχει μειωθεί δραστικά. Εναλλακτικά, αν και λιγότερο αποδοτικά στις συνθήκες της θάλασσας, τα αιολικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιήσουν μη μαγνητικές μηχανές επαγωγής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όμως το πρόβλημα παραμένει, καθώς γύρω στο 20 με 25% των σπάνιων γαιών παγκοσμίως χρησιμοποιούνται στην παραγωγή μαγνητών NdFeB (Kaya, E.E et al., 2021). Παράλληλα, οι μόνιμοι μαγνήτες NdFeB έχουν διαφορετική διάρκεια ζωής, ανάλογα με τις εφαρμογές: 2 με 3 χρόνια σε ηλεκτρονικά καταναλωτών, όπως σκληροί δίσκοι σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές και λάπτοπ, 20 με 30 χρόνια στις ανεμογεννήτριες. Οι μαγνήτες στις ανεμογεννήτριες χάνουν τις

μαγνητικές τους ιδιότητες λόγω συνεχούς παραγωγής θερμότητας (Yang, Y. et al., 2017) (Önal, M.A.R et al., 2016).

Ευκαιρίες για τη βελτίωση της επίδρασης των υλικών στην ανταγωνιστικότητα της βιομηχανίας αιολικής ενέργειας της ΕΕ (JRC, 2017b):

- **Διαφοροποίηση στην προμήθεια υλικών.** Είναι απαραίτητο για την ΕΕ να διαφοροποιήσει την προμήθεια των ακριβών σπάνιων γαιών (REEs) μέσω συνεργασιών και συμμετοχής σε διάφορα τρέχοντα και μελλοντικά εξερευνητικά έργα σε παγκόσμια κλίμακα. Αρκετά ορυχεία και μονάδες επεξεργασίας για τις σπάνιες γαίες αυξάνουν τώρα την παραγωγή τους μετά από μεγάλες καθυστερήσεις. Καλή δυνατότητα για εξόρυξη των σπανίων γαιών υπάρχει και στην Ευρώπη, όπως για παράδειγμα στη Σουηδία, τη Φινλανδία, τη Γερμανία, την Ισπανία, τη Νορβηγία και τη Γροιλανδία.

- **Βελτίωση των ευκαιριών κατασκευής στην ΕΕ.** Εκτός από την ασφαλή πρόσβαση σε σπάνιες γαίες οι μονάδες επεξεργασίας και οι μονάδες κατασκευής μόνιμων μαγνητών είναι σημαντικά στοιχεία για την αιολική βιομηχανία της ΕΕ. Εκτός από την εξόρυξη, η επεξεργασία των σπάνιων γαιών είναι ένα κρίσιμο βήμα λόγω της υψηλής της περιβαλλοντικής επίπτωσης. Επομένως, η ασφαλής προμήθεια πρωτογενών και δευτερογενών πρώτων υλών μπορεί επίσης να ενισχύσει τις εταιρείες που παράγουν μαγνήτες με βάση νεοδυμίου, οι οποίοι αυτήν τη στιγμή εξαφανίζονται από την ΕΕ. Η παρακολούθηση των καινοτομιών και νέων εξελίξεων και η ικανότητα να ξεκινήσει την παραγωγή ή να ασφαλίσει συμβάσεις εγκαίρως με χώρες παραγωγής είναι άλλες ευκαιρίες για τη βελτίωση του ανταγωνιστικού τομέα στο μακροπρόθεσμο μέλλον.

- **Ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση, αντικατάσταση.** Ένας εφικτός τρόπος για να διασφαλιστεί η μελλοντική πρόσβαση της ΕΕ στις σπάνιες γαίες που χρειάζονται για τις ανεμογεννήτριες, κινητήρες ηλεκτρικών οχημάτων (EV) και άλλες υψηλής τεχνολογίας εφαρμογές είναι να διασφαλιστεί μια βιώσιμη ροή δευτερογενών υλικών μέσω ανακύκλωσης. Θα πρέπει να ιδρυθεί επαρκής ικανότητα συλλογής και δυνατότητας ανακύκλωσης στην ΕΕ το συντομότερο δυνατό για να αντιμετωπίσει τις αυξανόμενες ροές χρησιμοποιημένων μόνιμων μαγνητών από βιομηχανικό εξοπλισμό. Λόγω της ιδιαιτερότητας των διαδικασιών ανακύκλωσης, σωστή ρύθμιση και η εισαγωγή ενός συστήματος επισημάνσεως που υποδεικνύει τον τύπο των μόνιμων μαγνητών θα διευκολύνουν τη διαδικασία ανακύκλωσης και θα την κάνουν πιο αποτελεσματική. Ωστόσο, οι σπάνιες γαίες που παράγονται από την ανακύκλωση δεν θα καλύπτουν την πρωτογενή ζήτηση σε μια αναπτυσσόμενη αγορά. Παρ' όλα αυτά, αυτό μπορεί να είναι αρκετό, για να διασφαλίσει τις βιομηχανίες παραγωγής μαγνητών στην ΕΕ

βραχυπρόθεσμα, ενώ μακροπρόθεσμα θα μπορούσαν να αναπτυχθούν πρωτογενείς πηγές μεταλλευμάτων. Η εύρεση εναλλακτικών τεχνολογιών μπορεί να αλλάξει δραστικά τη μακροπρόθεσμη εικόνα. Οι νέες προηγμένες τεχνολογίες θα έρθουν με νέες απαιτήσεις υλικών και νέους προμηθευτές. Για παράδειγμα, όταν η τεχνολογία των μαγνητών από νιτρίδιο σιδήρου αποδειχθεί και εμπορευτεί τα επόμενα χρόνια, αυτό μπορεί σημαντικά να μειώσει την εξάρτηση της ΕΕ από την Κίνα για υλικά ανεμογεννητριών και ηλεκτρικών οχημάτων, αφού αυτός ο νέος μαγνήτης βασίζεται σε πιο πλούσια και φθηνά υλικά.

• **Προώθηση έρευνας και ανάπτυξης, ανάπτυξη δεξιοτήτων και τεχνικών.** Η προαγωγή καινοτόμων και υψηλά αποδοτικών μεθόδων επεξεργασίας, διαχωρισμού και ανακύκλωσης μπορούν να μειώσουν τον κίνδυνο προμήθειας για κρίσιμες πρώτες ύλες, ιδιαίτερα για τις σπάνιες γαίες. Ωστόσο, οι τεχνολογίες ανακύκλωσης για τις σπάνιες γαίες εξακολουθούν να βρίσκονται στα αρχικά στάδια ανάπτυξης και αντιμετωπίζουν πρακτικές προκλήσεις: πολλές άλλες συσκευές περιέχουν λιγότερο από ένα γραμμάριο από σπάνιες γαίες, και ο σχεδιασμός του προϊόντος δεν ευνοεί τον εύκολο διαχωρισμό των συστατικών, κάνοντας τη διαδικασία ανακύκλωσης ακριβή. Επιπλέον, υπάρχουν ανεπαρκείς πληροφορίες σχετικά με το περιεχόμενο των σπανίων γαιών σε διάφορα προϊόντα.

5. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

5.1. Γενικά

Η τεχνολογία φωτοβολταϊκών (ΦΒ) μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρικό ρεύμα και αναμένεται να ηγηθεί μαζί με την αιολική στον μετασχηματισμό του παγκόσμιου τομέα ηλεκτρικής ενέργειας. Χάρη στην τεχνολογική καινοτομία, τις οικονομίες κλίμακας και την εμπειρία κατασκευής, το κόστος της ενέργειας ΦΒ έχει μειωθεί με την πάροδο των χρόνων, οδηγώντας σε μεγάλη αύξηση της ανάπτυξής της σε όλο τον κόσμο.

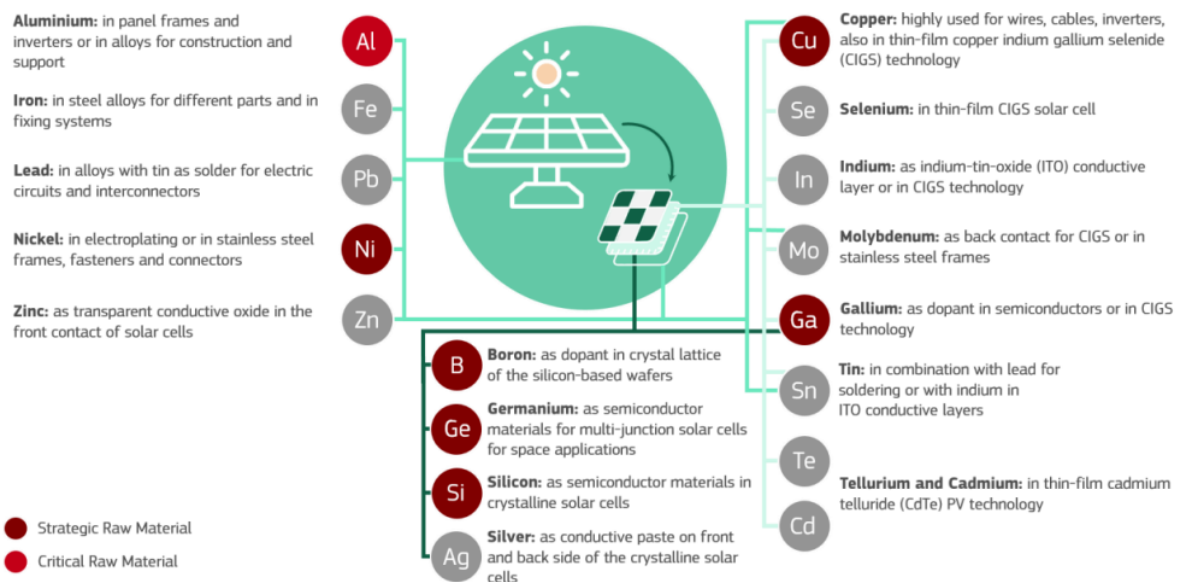
Οι εμπορικές τεχνολογίες ΦΒ περιλαμβάνουν κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si) (είτε μονοκρυσταλλικό είτε πολυκρυσταλλικό πυρίτιο) και λεπτού στρώματος (TF) που χρησιμοποιεί άμορφο πυρίτιο (a-Si), καθώς και τελλουριούχο κάδμιο (CdTe), χαλκό-ίνδιο-γάλλιο-σεληνίδιο (CIGS). Τα φωτοβολταϊκά πάνελ πυριτίου κρυστάλλου είναι η κυρίαρχη τεχνολογία, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 95% των παγκόσμιων εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών (Fraunhofer ISI, 2019). Τα CdTe και CIGS μπορούν να εναποτεθούν σε εύκαμπτα υποστρώματα, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για ενσωματώσεις σε κτίρια ή άλλες αντισυμβατικές εφαρμογές των ΦΒ. Τα κύτταρα άμορφου πυριτίου χρησιμοποιούνται

κυρίως σε μικρής κλίμακας και χαμηλής ισχύος εφαρμογές (Jean, Brown, Jaffe, Buonassisi, & Bulović, (2015)).

Εκτός από τις εμπορικές τεχνολογίες, μια τεράστια γκάμα νέων τεχνολογιών ΦΒ αναπτύσσονται επί του παρόντος, όπως οι κυψέλες πολλαπλών συνδέσεων (συνήθως υιοθετούνται σε διαστημικές εφαρμογές) ή υβριδικές συσκευές σε επίπεδο νανοκλίμακας. Αυτές οι νέες έννοιες δείχνουν δυνατότητες όσον αφορά τη σημαντική αύξηση της αποδοτικότητας και/ή τη μείωση του κόστους μέσω βελτιώσεων στην αρχιτεκτονική της συσκευής και τη λειτουργικότητα του υλικού.

Εκτός από τα ημιαγωγικά υλικά, απαιτούνται και άλλα υλικά στα φωτοβολταϊκά συστήματα, όπως ασήμι (χρησιμοποιείται ως πάστα για τη συλλογή, τη μεταφορά ηλεκτρονίων και τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος), πυρίτιο (για υψηλή διαπερατότητα και ανθεκτικό γυαλί στις φωτοβολταϊκά πλαίσια), αλουμίνιο (για την κατασκευή των πλαισίων γύρω από τα ηλιακά πάνελ) και χαλκός (ως υλικό αγωγών, γείωσης, μετασχηματιστών και ταινίες φωτοβολταϊκών κυττάρων). Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται μια επισκόπηση των πιο συνηθισμένων πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία φωτοβολταϊκών και η λειτουργικότητά τους.

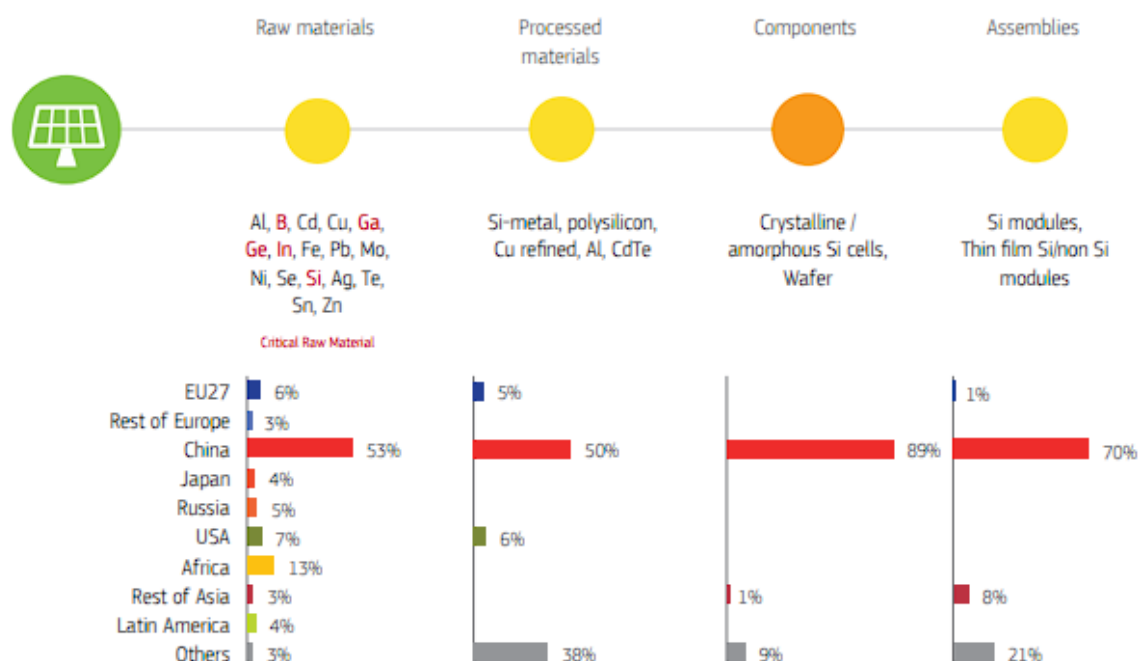
Figure 40. Selection of raw materials used in solar PV and their function



Σχήμα 8. Ορυκτές πρώτες ύλες στα φωτοβολταϊκά (Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study, 2023).

5.2. Τρέχοντα σημεία συμφόρησης εφοδιασμού κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού

Τα ηλιακά κύτταρα και οι μονάδες κατασκευάζονται συχνά από τις ίδιες εταιρείες. Οι κατασκευαστές καταβάλλουν συνεχείς προσπάθειες για να βελτιώσουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών μονάδων, ενώ ταυτόχρονα μειώνουν το κόστος και τη χρήση υλικών. Η υψηλότερη απόδοση που επιτυγχάνεται από τα φωτοβολταϊκά κύτταρα στο εργαστήριο υποδεικνύουν τη δυνατότητα αύξησης της απόδοσης και στις μελλοντικές εμπορικές τεχνολογίες. Στο παρελθόν (2007-2008), η ταχεία ανάπτυξη της βιομηχανίας των φωτοβολταϊκών οδήγησε σε αύξηση του κόστους του καθαρού πυριτίου και, κατά συνέπεια, σε ακριβότερες φωτοβολταϊκές μονάδες. Οι προβλεπόμενοι υψηλοί ρυθμοί ανάπτυξης στη βιομηχανία των φωτοβολταϊκών και η δυναμική της αγοράς ώθησαν τους κατασκευαστές να εξερευνήσουν τη μείωση του πυριτίου και άλλων υλικών στη διαδικασία παραγωγής. Το ρίσκο εφοδιασμού και οι κύριοι παίκτες των χωρών παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9. Φωτοβολταϊκά: μια εκτίμηση του ρίσκου εφοδιασμού, συμφορήσεων και κύριοι προμηθευτές (Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU, 2020). Κόκκινο χρώμα: εντοπίζεται υψηλό ρίσκο, Κίτρινο / Πορτοκαλί χρώμα: εντοπίζεται ρίσκο μεσαίας / χαμηλής αυτοπεποίθησης, Πράσινο / Μπλε χρώμα: δεν εντοπίζεται ρίσκο.

Η ταχεία εξάπλωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ΕΕ και παγκοσμίως θα ασκήσει κάποια πίεση στην προμήθεια ορισμένων σημαντικών πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Ορισμένα από αυτά έχουν υψηλό ρίσκο εφοδιασμού και ορίζονται ως Κρίσιμες Ορυκτές Πρώτες Ύλες (CRMs) για την ΕΕ, όπως το μέταλλο πυριτίου, το ίνδιο, το γάλλιο, το γερμάνιο και τα βορικά Από την άλλη πλευρά, άλλες πρώτες ύλες όπως ο χαλκός, το κάδμιο, το σελήνιο, το αργύριο και το τελλούριο έχουν μικρότερο ρίσκο εφοδιασμού. Η ΕΕ προμηθεύει το 6% των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Πολλές χώρες συνεισφέρουν στον εφοδιασμό πρώτων υλών και, ως εκ τούτου, το ρίσκο εφοδιασμού σε αυτό το στάδιο θεωρείται μέτριο. Παρόμοιο μέτριο ρίσκο εφοδιασμού αναμένεται για τις επεξεργασμένες ύλες. Από όλα τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα κύτταρα των φωτοβολταϊκών, το πυρίτιο είναι το πιο κοινό. Στο παρελθόν, υπήρξαν κάποια θέματα με τη διαθεσιμότητα του πυριτίου λόγω έλλειψης ανάπτυξης νέων εγκαταστάσεων καθαρισμού. Σήμερα, οι κατασκευαστές φωτοβολταϊκών πάνελ εξακολουθούν να φοβούνται πιθανές ελλείψεις πολυπυριτίου και την αστάθεια των τιμών του (στην πραγματικότητα, η τιμή του πολυπυριτίου αυξήθηκε κατά 35% το 2017 μετά το κλείσιμο πολλών εργοστασίων στην Κίνα λόγω περιβαλλοντικών κανονισμών) (Ryan & Martin, 2017). Η Κίνα καλύπτει περίπου το 70% της παγκόσμιας παραγωγικής ικανότητας πολυπυριτίου με ετήσια παραγωγή 288 κιλοτόνων (Research and Markets, 2019).

Το πιο ευάλωτο σημείο κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού της τεχνολογίας ΦΒ βρίσκεται στο επίπεδο των εξαρτημάτων, όπου η Κίνα κυριαρχεί στην αγορά εφοδιασμού κατά περίπου 89%. Στην πραγματικότητα, η Κίνα κυριαρχεί σε σχεδόν όλες τις πτυχές της κατασκευής και χρήσης φωτοβολταϊκών. Η κυριαρχία αυτή ξεκίνησε τη δεκαετία του 1990 ως αντίδραση στην αυξανόμενη ζήτηση για φωτοβολταϊκά πάνελ που προκλήθηκε από το γερμανικό πρόγραμμα προώθησης των ηλιακών πάνελ σε ταρατσες. Η κινέζικη κατασκευαστική ικανότητα ηλιακής ενέργειας αυξήθηκε περαιτέρω μετά την οικονομική κρίση του 2008, όταν η κυβέρνηση της Κίνας εισήγαγε το 2011 το feed-in tariff για την ηλιακή ενέργεια ΦΒ. Το 2019, η λίστα των 10 κορυφαίων εταιρειών όσον αφορά τις κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου περιλάμβανε οχτώ από την Κίνα, μία από τη Νότια Κορέα (Hanwha Q Cells) και μία από τον Καναδά (Canadian Solar), (BloombergNEF, 2020). Οι περισσότερες μονάδες κατασκευής κυττάρων κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) παρατίθενται στην Κίνα, αλλά επίσης και στη Μαλαισία, την Ινδία, την Ταϊβάν, το Βιετνάμ και τη Νότια Κορέα. Η παραγωγική ικανότητα της ΕΕ για κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) ανήλθε σε μόλις 0,6% το 2021, ιδιαίτερα στην Ιταλία, τη Γερμανία και τη Γαλλία (IEA, 2022a). Ένα ελαφρώς

υψηλότερο ποσοστό (περίπου 1,5%) των ηλιακών μονάδων με βάση τόσο το πυρίτιο όσο και τις λεπτές στρώσεις παράγεται στην ΕΕ, αν και η κύρια παραγωγή βρίσκεται στην Ασία.

5.3. Παρατηρήσεις και προτάσεις

Η Κίνα είναι ο ηγέτης στον εφοδιασμό και στα τέσσερα στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας τεχνολογίας ηλιακών φωτοβολταϊκών. Το μέγιστο μερίδιο που εκτιμάται για την ΕΕ είναι 6% για τις πρώτες ύλες και 5% για το στάδιο των επεξεργασμένων υλικών, ενώ στερείται σχεδόν πλήρως παραγωγή για ηλιακά κύτταρα και μονάδες.

Τέλος, μια σειρά από στρατηγικές μπορούν να εφαρμοστούν για τη μείωση των κινδύνων κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού:

- **Διαφοροποίηση του εφοδιασμού υλικών** με την ενίσχυση υπάρχουσων εταιρικών συνεργασιών και τη δημιουργία νέων εταιρικών σχέσεων μπορεί να εξασφαλίσει έναν αδιάκοπο εφοδιασμό υλικών. Η τιμή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου αυξάνεται λόγω των αγοραστικών συνθηκών και των κυρίαρχων προμηθευτών, αλλά η ΕΕ θα μπορούσε να επεκτείνει περαιτέρω τις δυνατότητες δικής της κατασκευής. Ένα ποσοστό των αναγκών της ΕΕ σε ασήμι και γυαλί θα μπορούσε να καλυφθεί από αύξηση της εσωτερικής παραγωγής και εισαγωγές από αξιόπιστους εταίρους. Ο Καναδάς μπορεί να εφοδιάσει σχεδόν όλες τις ανάγκες της ΕΕ για εισαγωγές ηλεκτρονικών φωτοβολταϊκών της ΕΕ για γερμάνιο, καθώς και για μια σειρά άλλων κρίσιμων πρώτων υλών. Η Ουκρανία διαθέτει αρκετά υλικά κρίσιμων πρώτων υλών που θα μπορούσαν να παίξουν σημαντικό ρόλο στην πιο στενή συνεργασία και ολοκλήρωση με τις ενεργειακές αγορές της ΕΕ.

- **Η ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση** ηλιακών πάνελ βρίσκεται στα πρώτα στάδια ανάπτυξης, καθώς ο μέσος χρόνος ζωής για αυτήν την τεχνολογία είναι 30 χρόνια και ο όγκος των προϊόντων στο τέλος της ζωής είναι επομένως ακόμα χαμηλός. Οι μέθοδοι ανακύκλωσης για τα ηλιακά πάνελ υπάρχουν, αλλά οι τεχνολογίες για την ανάκτηση υλικών υψηλής αξίας χρειάζονται βελτίωση. Η ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών και η κατασκευή ειδικών εργοστασίων ανακύκλωσης πάνελ ηλιακής ενέργειας θα μπορούσε να επιτρέψει την ανάκτηση μεγαλύτερου όγκου υλικών, μειώνοντας τη ζήτηση για πρωτογενή υλικά και έτσι μειώνοντας την εξάρτηση της ΕΕ από τις εισαγωγές. Η Ευρωπαϊκή Οδηγία για τα Απόβλητα από Ηλεκτρικούς και Ηλεκτρονικούς Εξοπλισμούς καθιστά τους παραγωγούς ηλιακών πάνελ στην αγορά της ΕΕ νομικά υπεύθυνους για τη διαχείριση στο τέλος της ζωής των προϊόντων.

- **Πιο αποτελεσματική χρήση των κύριων υλικών**, όπως το πυρίτιο, το ασήμι και το γυαλί, χάρη στην πρόσφατη πρόοδο στους τεχνικούς σχεδιασμούς και την παραγωγή.

- **Οι προσπάθειες έρευνας, ανάπτυξης και καινοτομίας** πρέπει να ενισχυθούν σε τομείς για την αύξηση της αποδοτικότητας και των στρατηγικών υποκατάστασης, εφαρμόζοντας νέες τεχνολογίες, όπως τα ηλιακά κύτταρα περοβσκίτη (CaTiO_3).

- **Η επέκταση της κατασκευαστικής ικανότητας της ΕΕ** πρέπει να πραγματοποιηθεί για να δημιουργηθεί μια ισχυρή εγχώρια αλυσίδα παραγωγής, ιδιαίτερα για τις ράβδους πυριτίου, δισκία πυριτίου και τμήματα κυττάρων, και να επωφεληθεί από τη γρήγορη καινοτομία στις τεχνικές κατασκευής για ολοένα και πιο βιώσιμα προϊόντα ηλιακής ενέργειας.

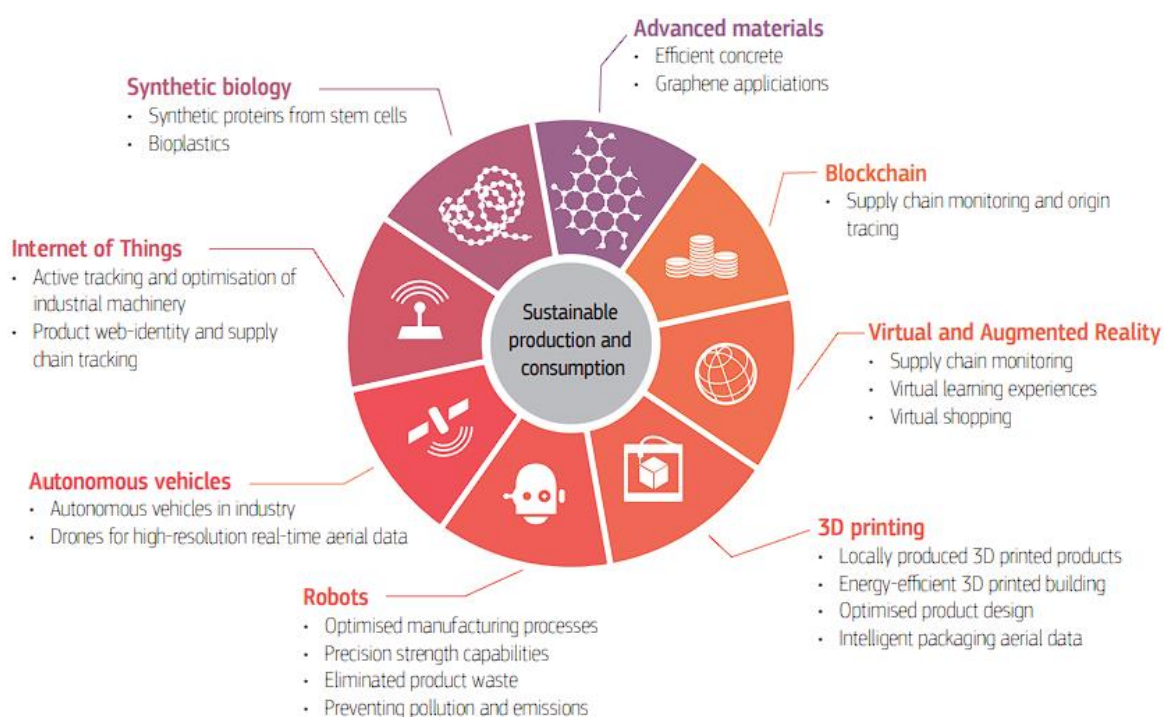
- **Πολιτικά μέτρα**, όπως η νέα Στρατηγική για την Ηλιακή Ενέργεια της ΕΕ, η Ευρωπαϊκή Πρωτοβουλία για τα Στέγαστρα Ηλιακής Ενέργειας, η Ευρωπαϊκή Συμμαχία για την Βιομηχανία της Φωτοβολταϊκής Ενέργειας και οι απλουστευμένες διαδικασίες άδειας, θα βοηθήσουν στη δημιουργία νέων επιχειρηματικών ευκαιριών για την ανάπτυξη ευρωπαϊκών αλυσίδων παραγωγής φωτοβολταϊκής ενέργειας. Επιπλέον, το 2023, η Επιτροπή θα προτείνει δύο υποχρεωτικά εσωτερικά μέσα αγοράς – έναν Κανονισμό Οικολογικού Σχεδιασμού και έναν Κανονισμό Ενεργειακής Επισήμανσης – για τα πωλούμενα ηλιακά φωτοβολταϊκά πάνελ και τους μετατροπείς στην ΕΕ.

6. ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

6.1. Γενικά

Οι ψηφιακές τεχνολογίες έχουν αλλάξει τον τρόπο λειτουργίας των επιχειρήσεων, τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι συνδέονται και ανταλλάσσουν πληροφορίες, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο αλληλοεπιδρούν με το δημόσιο και ιδιωτικό τομέα (Negreiro και Madiega, 2019). Η τεχνολογία πληροφοριών και επικοινωνίας (ΤΠΕ) έχει επίσης μετασχηματίσει τις διεργασίες παραγωγής, έχει διευκολύνει τη διάδοση νέων φαινομένων, όπως η ρομποτική, η αυτοματοποίηση και η τεχνητή νοημοσύνη, και έχει ανοίξει τον δρόμο για τη διεθνή διάσπαση των αλυσίδων προμήθειας αξίας. Οι ψηφιακές τεχνολογίες και τα δεδομένα διαθέτουν τεράστιες δυνατότητες για να επιταχύνουν περαιτέρω τις καθαρές μεταβάσεις ενέργειας σε ολόκληρο τον ενεργειακό τομέα. Στα ηλεκτρικά συστήματα, οι ψηφιακές τεχνολογίες μπορούν να βοηθήσουν στην ενσωμάτωση αυξανόμενων ποσοστών μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών, να επιτρέψουν μια γενική αύξηση της επεξεργαστικής ισχύος και να βελτιώσουν την αξιοπιστία των δικτύων (IEA, 2022).

Η ΕΕ προσπαθεί να επιτύχει την τεχνολογική κυριαρχία σε ορισμένους κρίσιμους τομείς ψηφιακής τεχνολογίας (π.χ. blockchain, κβαντικούς υπολογιστές και κοινή χρήση δεδομένων). Η ψηφιοποίηση θα επηρεάσει όλες τις διάφορες τεχνολογίες και τομείς που εξετάζονται σε αυτήν την πτυχιακή, καθώς αυξάνει την παραγωγικότητα και την αποδοτικότητα της βιομηχανίας και επιτρέπουν πιο εξατομικευμένες και διαφοροποιημένες σειρές προϊόντων (EC, 2017). Μέσω του "Internet of Things" (IoT), συνδεδεμένα ρομπότ, αυτόνομα οχήματα και αισθητήρες θα ενσωματώνονται ολόένα και περισσότερο στις βιομηχανικές διαδικασίες, τα κοινά αγαθά και τις υπηρεσίες, καθ' όλο το μήκος των αλυσίδων αξίας (Σχήμα 10).



Σχήμα 10. Ψηφιοποίηση και βιώσιμη παραγωγή και κατανάλωση (PwC, 2017a).

6.2. Τρέχοντα σημεία συμφόρησης εφοδιασμού κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού

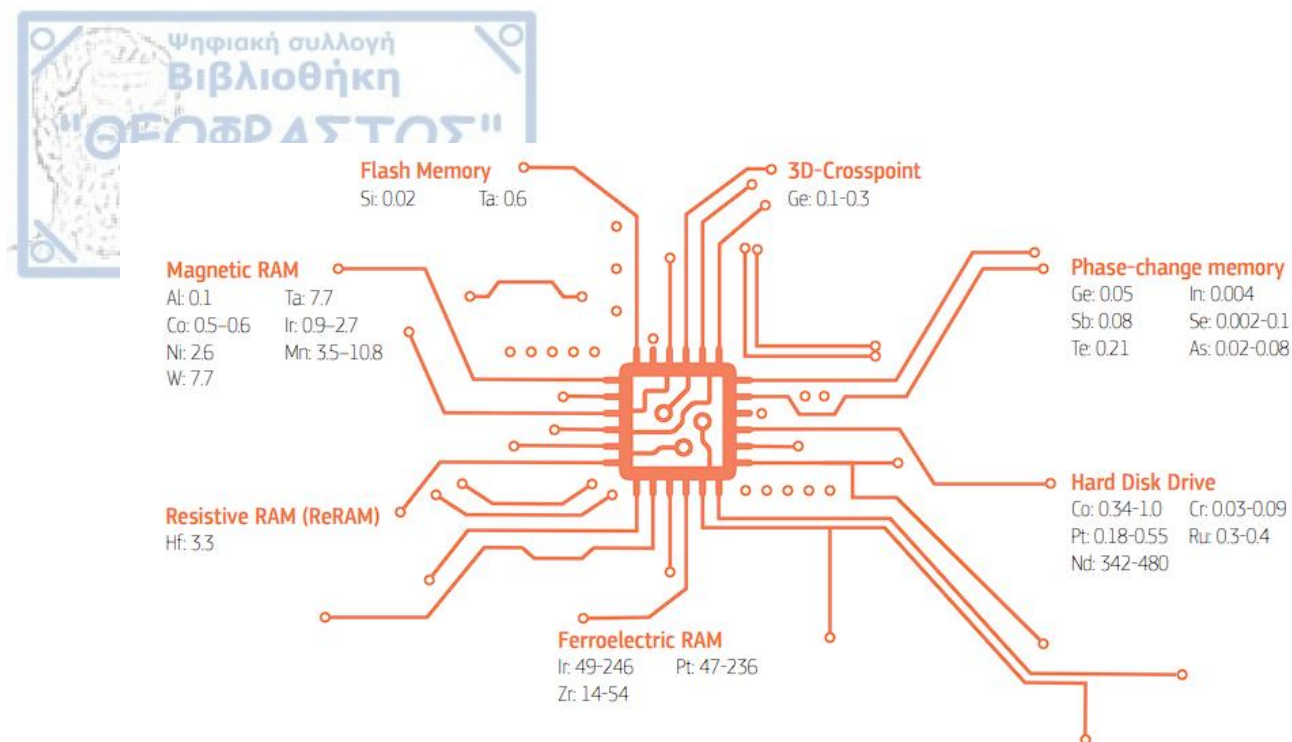
Ενώ η κρισιμότητα των υλικών ισχύει για το ευρύτερο τοπίο της ευρωπαϊκής βιομηχανίας, πολλά Κρίσιμα Ορυκτά Πρώτων Υλών (CRMs) είναι ιδιαίτερα ουσιώδη για την τεχνολογία πληροφοριών και επικοινωνίας (ΤΠΕ) και προηγμένα ηλεκτρονικά. Η εξάρτηση της Ευρώπης από ξένη τεχνολογία και ψηφιακά εξαρτήματα αυξάνεται καθώς υστερεί στην παραγωγή βασικών ψηφιακών τεχνολογιών. Το 2017, το συνολικό εμπορικό έλλειμμα της ΕΕ για υψηλής τεχνολογίας εξαρτήματα και προϊόντα ανήλθε σε 23 δισεκατομμύρια ευρώ - κυρίως λόγω μεγάλων εισαγωγών από την Κίνα (European Political Strategy Centre, 2019).

Από την οπτική γωνία των υλικών πρώτων υλών, η ψηφιακή βιομηχανία των ΤΠΕ έχει τρία κύρια χαρακτηριστικά (Ku, 2018). Πρώτον, χρησιμοποιεί ένα ευρύ και αυξανόμενο φάσμα στοιχείων για να διασφαλίσει τις επιθυμητές ηλεκτρονικές, μαγνητικές, οπτικές ή μηχανικές ιδιότητες που απαιτούνται για τα τσιπ και τις συσκευές. Δεύτερον, ο μεγάλος αριθμός των τσιπ και συσκευών που παράγονται κάθε χρόνο υποδηλώνει ότι ακόμη και μικρές αυξήσεις σε ορισμένα στοιχεία μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικούς όγκους υλικού σε σχέση με τις τρέχουσες προμήθειες. Τρίτον, η ταχύτητα των κύκλων εισαγωγής της τεχνολογίας μπορεί να είναι γρηγορότερη από τις χρονικές κλίμακες που σχετίζονται με άλλες πτυχές της αλυσίδας εφοδιασμού.

Αλλά υλικά πρώτων υλών που δεν χρησιμοποιούνται σε εξοπλισμό ΤΠΕ είναι εξίσου σημαντικά για τη διασφάλιση της κατάλληλης λειτουργίας του και μπορεί να γίνουν κρίσιμα για την ανάπτυξη των υπολογιστών της επόμενης γενιάς. Για παράδειγμα, το ήλιο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της λειτουργίας χαμηλής θερμοκρασίας κοντά στο απόλυτο μηδέν, που απαιτείται για τις τεχνολογίες κβαντικού υπολογισμού και ημιαγωγούς.

Μία από τις κύριες συνέπειες της ψηφιοποίησης θα είναι η τεράστια ποσότητα δεδομένων που παράγεται και αποθηκεύεται σε κέντρα δεδομένων, υποδομές επιχειρήσεων και τελικά σημεία (όπως υπολογιστές, έξυπνα κινητά και συσκευές ΤΠΕ). Η συνολική ποσότητα αυτών των δεδομένων ονομάζεται "παγκόσμια σφαίρα δεδομένων" ("Global Datasphere") και βιώνει τεράστια ανάπτυξη. Η Διεθνής Διακρατική Εταιρεία Δεδομένων προβλέπει ότι η Datasphere δεδομένων θα αυξηθεί από 33 Ζεταμπάιτ (ZB) το 2018 σε 175 Ζεταμπάιτ μέχρι το 2025 (Reinsel, Gantz, & Rydning, 2018).

Η αυξημένη ανάγκη για δεδομένα θα έχει μεγάλο αντίκτυπο στις τεχνολογίες αποθήκευσης δεδομένων, συμπεριλαμβανομένης της επιπλέον ζήτησης υλικών για την παραγωγή μνημών (βλ. Σχήμα 11). Σύμφωνα με τον (Ku, 2018), μπορεί να υπολογιστεί ότι η αποθήκευση της αναμενόμενης Datasphere του 2025 θα απαιτούσε έως και 80 κιλοτόνους νεοδυμίου, περίπου 120 φορές την τρέχουσα ετήσια ζήτηση της ΕΕ για αυτό το υλικό. Χρησιμοποιώντας αντί αυτού αναδυόμενες τεχνολογίες, όπως τη σιδηροηλεκτρική RAM (Ferroelectric RAM), θα απαιτούνταν έως και 40 κιλοτόνοι πλατίνας, που είναι περίπου 600 φορές την τρέχουσα ετήσια ζήτηση της ΕΕ.



Σχήμα 11. Εκτιμώμενοι παράγοντες έντασης υλικών για διαφορετικές τεχνολογίες μνημών. Οι ποσότητες είναι σε Zettabyte (ZB) (Ku, 2018).

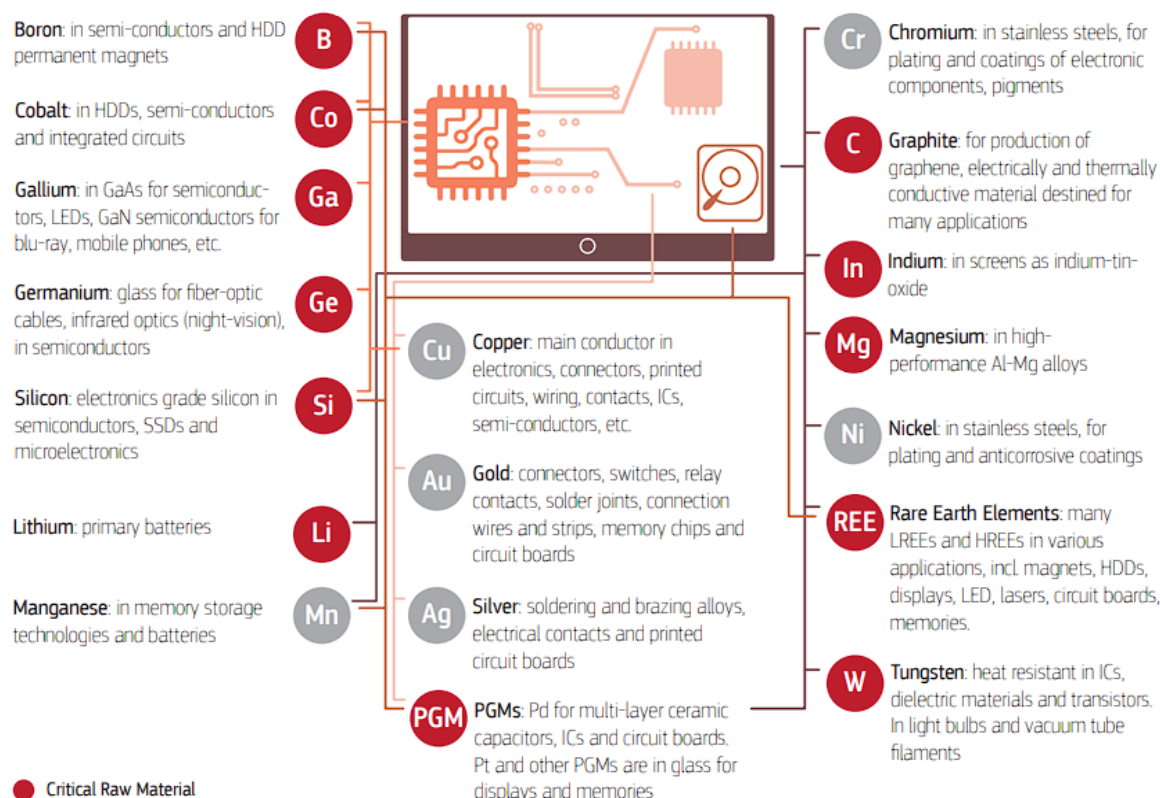
Η παγκόσμια επέκταση των ψηφιακών δικτύων και υπηρεσιών συνεπάγεται ότι περισσότεροι άνθρωποι έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο, ενθαρρύνοντας έτσι την ανάγκη για συνδεδεμένο εξοπλισμό και οπτικές ίνες που η ΕΕ θα μπορούσε να παράγει και να εξάγει. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις μελλοντικές τάσεις περιλαμβάνουν την σμίκρυνση των εξαρτημάτων, μέτρα κατά του προγραμματισμένου ερείσματος και περιορισμούς στις εξαγωγές ηλεκτρονικών αποβλήτων. Επιπλέον, η αναζήτηση πιο αποδοτικών και φθηνότερων υλικών ή εξαρτημάτων ηλεκτρονικών συσκευών ενθαρρύνει την αντικατάσταση, κάνοντας τις μελλοντικές απαιτήσεις πιο απρόβλεπτες στον τομέα. Η ζήτηση για κρίσιμα μέταλλα σε αυτόν τον τομέα μπορεί είτε να σταθεροποιηθεί είτε να συνεχίσει να αυξάνεται (π.χ. σπάνιες γαίες, ταντάλιο, παλλάδιο για ηλεκτρονικές συσκευές και οικιακές συσκευές, γερμάνιο για οπτικές ίνες) (Tercero, 2019).

Η ψηφιοποίηση θα συνοδευτεί επίσης από την πρόοδο στις πωλήσεις συσκευών (ΤΠΕ), κυρίως κινητών τηλεφώνων, τα οποία αναμένεται να αυξηθούν σταθερά από 130 εκατομμύρια πωλήσεις το 2018 σε 180 εκατομμύρια το 2035 (Monnet & Ait Abderrahim, 2018). Οι πωλήσεις φορητών και επιτραπέζιων υπολογιστών εκτιμάται ότι θα παραμείνουν σχεδόν σταθερές.

Παρά την αύξηση των πωλήσεων ορισμένων ηλεκτρονικών συσκευών, η αναμενόμενη χρήση σχετικών κρίσιμων εξαρτημάτων θα μείνει είτε στάσιμη είτε θα αυξηθεί σε σχετικά περιορισμένες αναλογίες (παλλάδιο, γάλλιο, δυσπρόσιο, νεοδύμιο). Η περίπτωση του τανταλίου, για το οποίο τα ηλεκτρονικά αποτελούν αυτήν τη στιγμή την κύρια εφαρμογή, είναι

ενδιαφέρουσα: η χρήση του τανταλίου στις ηλεκτρονικές εφαρμογές μόνη της μπορεί να υπερβεί την τρέχουσα συνολική χρήση αυτού του υλικού σε όλες τις εφαρμογές. Επίσης, η ανάπτυξη των ψηφιακών τεχνολογιών και ιδιαίτερα των ηλεκτρονικών οθονών (συμπεριλαμβανομένων των επίπεδων οθονών και οθονών αφής) έχει αυξήσει την κατανάλωση του γαλλίου που χρησιμοποιείται σε λεπτές μεμβράνες ινδίου-οξειδίου του κασσιτέρου (ITO). Στο παρελθόν, το ίνδιο εμφάνισε υπερπενταπλάσια αύξηση στην παραγωγή (πρωτογενή) μεταξύ του 1993 και του 2013 (Tercero, 2019). Το ίνδιο είναι ανάμεσα στα στοιχεία που προσελκύουν αυξανόμενο ενδιαφέρον λόγω της σχετικά υψηλής οικονομικής σημασίας, της έλλειψης υποκατάστατων, της εξόρυξης ως υποπροϊόν από μεταλλεύματα, της χαμηλής αποδοτικότητας ανάκτησης κατά την επεξεργασία και της μη ύπαρξης ανακύκλωσης στο τέλος της ζωής (Ciacci et al., 2019).

Οι τάσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω λαμβάνουν υπόψη μια σχετικά συντηρητική και τεχνολογικά σταθερή προσέγγιση της ψηφιοποίησης. Άλλοι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι αναμένεται πολύ μεγαλύτερη αύξηση της κατανάλωσης αυτών των υλικών στο μέλλον λόγω αναβάθμισης των υποδομών παραγωγής και της μεγάλης κατανάλωσης νέων συσκευών, συμπεριλαμβανομένων αισθητήρων και ενεργοποιητών (Bonilla et al., 2018).



Σχήμα 12. Ορυκτές πρώτες ύλες στις ψηφιακές τεχνολογίες (BGC, 2018).

Οι κίνδυνοι εφοδιασμού μπορεί επίσης να επηρεαστούν από το γεγονός ότι η ανακύκλωση πιθανών CRMs από τεχνολογίες ΤΠΕ θα είναι σε μεγάλο βαθμό περιορισμένη ή μη εφικτή να πραγματοποιηθεί στο μέλλον (Marscheider-Weidemann κ.α., 2016).

Οι τεχνολογίες ΤΠΕ μπορούν επίσης να λειτουργήσουν ως καταλύτες για μια πιο αποδοτική χρήση περιορισμένων μετάλλων, πχ υποστηρίζοντας τη διαχείριση και την παρακολούθηση όλο και πιο περίπλοκων αλυσίδων προμήθειας (βελτίωση της ανιχνευσιμότητας) και ως νέες τεχνολογίες που υποστηρίζουν την ανακύκλωση (Widmer & Wäger, 2013). Τέλος, η ανάπτυξη της ψηφιοποίησης μπορεί να αποκαλύψει νέους κινδύνους ασφάλειας.

Σε έναν κόσμο με απεριόριστη συνδεσιμότητα μεταξύ όλων των πραγμάτων, τα τρωτά σημεία θα αυξηθούν εκθετικά. Καθώς οι αισθητήρες, οι αλγόριθμοι και οι ροές δεδομένων γίνονται αναπόσπαστο μέρος της ζωής μας, η δυσπιστία των πολιτών στις τεχνολογίες προέρχεται κυρίως από ανησυχίες ασφάλειας (European Political Strategy Centre, 2019).



Σχήμα 13. Ψηφιακή τεχνολογία: μια εκτίμηση των κύριων προμηθευτών (Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU, 2020). Κόκκινο χρώμα: εντοπίζεται υψηλό ρίσκο, Κίτρινο / Πορτοκαλί χρώμα: εντοπίζεται ρίσκο μεσαίας / χαμηλής αυτοπεποίθησης, Πράσινο / Μπλε χρώμα: δεν εντοπίζεται ρίσκο.

Τέτοια ζητήματα ιδιωτικότητας και ασφάλειας δεδομένων θα μπορούσαν να έχουν στο μέλλον αντίκτυπο ακόμα και στην αποδοτικότητα και κυκλικότητα των προϊόντων Πληροφορικής και Επικοινωνιών (Polverini et al., 2018), καθώς εμποδίζουν την ανάπτυξη της

επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης ως επιλογές αποδοτικής διαχείρισης πόρων. Στο Σχήμα 12 παρουσιάζονται οι κύριες πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για τις ψηφιακές τεχνολογίες και η λειτουργικότητά τους, ενώ στο Σχήμα 13 δίνεται μια επισκόπηση των κύριων φορέων που εμπλέκονται.

6.3. Βασικές παρατηρήσεις και προτάσεις

Οι ψηφιακές τεχνολογίες είναι στρατηγικές τεχνολογίες που όχι μόνο συντηρούν τον τεράστιο ψηφιακό τομέα αλλά είναι επίσης τεχνολογίες που υποστηρίζουν όλους τους τομείς και τις τεχνολογίες που συζητούνται σε αυτήν την εργασία. Η ποσοτική ανάλυση δείχνει ότι είναι πιθανό να υπάρξει αύξηση της κατανάλωσης της ΕΕ σε ορισμένες CRMs (π.χ. παλλάδιο, γάλλιο, δυσπρόσιο και νεοδύμιο) για αυτές τις τεχνολογίες.

Είναι πρόωρο να γίνουν λεπτομερείς παρατηρήσεις και συστάσεις στην απουσία μιας δομημένης ανάλυσης των σημείων αδυναμίας, όπως για τις άλλες τεχνολογίες. Παρ' όλα αυτά, η ΕΕ φαίνεται να εξαρτάται κατά κύριο λόγο από άλλες χώρες (κυρίως από την Ασία και την Αφρική) για υψηλής τεχνολογίας εξαρτήματα και συστατικά. Φυσικά, εάν η ΕΕ επιθυμεί να παραμείνει προσαρμοσμένη στην ψηφιακή εποχή και να επιτύχει την τεχνολογική κυριαρχία σε κρίσιμους τομείς τεχνολογίας, θα πρέπει να αναπτύξει δυναμικά τις δυνατότητες κατασκευής για εξαρτήματα και συστατικά. Προϋπόθεση για αυτήν την ψηφιακή εκβιομηχάνιση θα είναι η εξασφάλιση της πρόσβασης σε βασικές πρώτες ύλες που είναι ουσιώδεις για αυτές τις τεχνολογίες (π.χ. REEs, γάλλιο, γερμάνιο και PGMs) και η ανάπτυξη ικανοτήτων στα επεξεργασμένα υλικά.

Ο ηγετικός ρόλος της ΕΕ όσον αφορά τη συλλογή και διαχείριση των Αποβλήτων Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού ή τυποποίηση (σχετικά με την αποτελεσματικότητα των υλικών στις ηλεκτρονικές συσκευές) μπορεί επίσης να αποτελέσει πλεονέκτημα για τη μείωση του κινδύνου προμήθειας πρώτων υλών για ψηφιακές τεχνολογίες.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η Ευρωπαϊκή Ένωση χρειάζεται αδιάκοπη πρόσβαση σε κρίσιμες ανόργανες πρώτες ύλες και σε πολλά προϊόντα που τις περιέχουν, προκειμένου να επιτύχει τους στόχους της για τη διττή ψηφιακή και πράσινη μετάβαση, τη βιομηχανική της στρατηγική και το πρόγραμμα ασφάλειάς της. Αυτή η πρόκληση αντιμετωπίζεται σε ένα μεταβαλλόμενο γεωπολιτικό πλαίσιο, χαρακτηρισμένο από ελλείψεις εφοδιασμού κατά τη διάρκεια και μετά την πανδημία COVID-19, τις επιπτώσεις στις αλυσίδες εφοδιασμού από τη ρωσική εισβολή στην Ουκρανία

και τον ανταγωνισμό μεταξύ πολλών τομέων και χωρών για τις ίδιες ανόργανες πρώτες ύλες και επεξεργασμένες ύλες. Καθώς οι χώρες σε όλον τον κόσμο κινούνται προς την απανθρακοποίηση και τη ψηφιοποίηση των οικονομιών τους, η ζήτηση για αυτές τις ύλες αναμένεται να αυξηθεί γρήγορα στο μέλλον. Οι τεχνολογίες πράσινης μετάβασης χρησιμοποιούν πολύ περισσότερο τις ύλες και τα μέταλλα από τις αντίστοιχες τεχνολογίες που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα. Στο μακροπρόθεσμο μέλλον, αυτές οι ύλες έχουν το πλεονέκτημα να μην καταναλώνονται κατά τη χρήση και, συνεπώς, να παραμένουν διαθέσιμες για ανακύκλωση. Στο βραχυπρόθεσμο, η Ευρωπαϊκή Ένωση πρέπει να βρει τρόπο να διασφαλίσει την πρόσβαση στα υλικά που απαιτούνται για τη μαζική ανάπτυξη βασικών τεχνολογιών όπως ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, μπαταρίες και ηλεκτρολύτες.

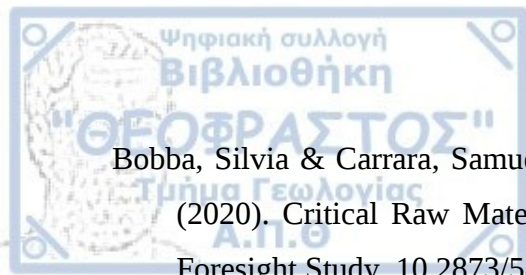
Συμπληρωματικές στρατηγικές που μπορούν να ληφθούν υπόψη για περαιτέρω μείωση των εξαρτήσεων της ΕΕ περιλαμβάνουν:

Διαφοροποίηση του εφοδιασμού υλικών και θέσπιση μακροπρόθεσμων συμφωνιών/συνεργασιών, αύξηση της χωρητικότητας κατασκευής εξαρτημάτων στην ΕΕ, ενίσχυση της ανακύκλωσης και της επαναχρησιμοποίησης για μια πιο ανθρώπινη κυκλική οικονομία και αντικαταστάσεις των υλικών και εναλλακτικές λύσεις.

Είναι προφανές ότι δεν υπάρχει μια λύση που να ταιριάζει σε όλα τα προβλήματα. Κάθε αλυσίδα εφοδιασμού που αναλύθηκε έχει τα δικά της θέματα και απαιτεί εξατομικευμένες λύσεις για την ενίσχυση σε μακροπρόθεσμο και βραχυπρόθεσμο επίπεδο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alaswad A., Palumbo, A., Dassisti, M., Abdelkareem, M.A., Olabi, A., (2009), 'Fuel Cell Technologies, Applications, and State of the Art. A Reference Guide', Encyclopedia of Smart Materials, Elsevier, 2022, pp. 315-333.
- Batteries Europe (ETIP), 'Roadmap on new and emerging technologies', 2021a (<https://www.divaportal.org/smash/get/diva2:1629368/FULLTEXT01.pdf>). Batteries Europe (ETIP), 'Roadmap on raw materials and recycling', 2021b (<https://energy.ec.europa.eu/system/files/2021-12/vol-2-009.pdf>).
- BCG, 'Additive Manufacturing', 2018.
- BloombergNEF, 'Equipment Manufacturers', 2020.



Bobba, Silvia & Carrara, Samuel & Huisman, Jaco & Mathieux, Fabrice & Pavel, Claudiu. (2020). Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU - A Foresight Study. 10.2873/58081.

Bonilla, S.H., H.R.O. Silva, M.T. da Silva, R.F. Gonçalves, and J.B. Sacomano, 'Industry 4.0 and Sustainability Implications: A Scenario-Based Analysis of the Impacts and Challenges', Sustainability, Vol. 10, No. 10, 2018.

Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D., Alves Dias, P., Cavalli, A., Georgitzikis, K., Grohol, M., Itul, A., Kuzov, T., Latunussa, C., Lyons, L., Malano, G., Maury, T., Prior Arce, Á., Somers, J., Telsnig, T., Veeh, C., Wittmer, D., Black, C., Pennington, D., Christou, M., Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/386650, JRC132889.

Ciacchi, L., T.T. Werner, I. Vassura, and F. Passarini, 'Backlighting the European Indium Recycling Potentials', Journal of Industrial Ecology, Vol. 23, No. 2, 2019, pp. 426–437.

E4tech, 'Study on Value Chain and Manufacturing Competitiveness Analysis for Hydrogen and Fuel Cells Technologies', 2019 (webpage missing).

EC, Digitisation Research and Innovation. Transforming European Industry and Services, 2017.

European Commission (2019), Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal, COM(2019) 640.

European Commission, The European Green Deal, COM(2019) 640 final, 2019.

European Commission (EC) (2020), Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., et al., Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU: a foresight study, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

European Political Strategy Centre, Rethinking Strategic Autonomy in the Digital Age, 2019. Fraunhofer ISI, Photovoltaics Report, 2019.

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Stakeholder Forum marks 10 years of significant progress, Fuel Cells Bulletin, Vol. 2017, No. 12, 2017, pp. 10.

Hao, H., Y. Geng, J.E. Tate, F. Liu, X. Sun, Z. Mu, D. Xun, Z. Liu, and F. Zhao, 'Securing Platinum-Group Metals for Transport Low-Carbon Transition', *One Earth*, Vol. 1, No. 1, 2019, pp. 117–125.

IEA (2021), *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, IEA, Paris
<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>,
License: CC BY 4.0.

International Energy Agency (IEA) (2022), 'Digitalisation', Tracking Report.
(<https://www.iea.org/reports/digitalisation>)

International Energy Agency (IEA) (2022), *Solar PV Global Supply Chains*, Paris.

Jean, J., P.R. Brown, R.L. Jaffe, T. Buonassisi, and V. Bulović, 'Pathways for Solar Photovoltaics', *Energy and Environmental Science*, Vol. 8, No. 4, 2015, pp. 1200–1219.

JRC, Batteries: global demand, supply, and foresight', 2022b
(<https://rmis.jrc.ec.europa.eu/analysis-of-supply-chain-challenges-49b749>).

JRC, Cobalt: Demand-Supply Balances in the Transition to Electric Mobility, Joint Research Centre (JRC). Authors: Alves Dias, P., D. Blagoeva, C.C. Pavel, and N. Arvanitidis. JRC112285, 2018c.

JRC, Cost Development of Low Carbon Energy Technologies - Scenario-Based Cost Trajectories to 2050, authors: Tsiropoulos, I., D. Tarvydas, and A. Zucker, 2017 Edition, EUR 29034 EN, JRC109894, Luxembourg, 2018a.

JRC, Critical Raw Materials and the Circular Economy - Background Report, Authors: Mathieux, F., F. Ardente, S. Bobba, P. Nuss, G.A. Blengini, P. Alves Dias, D. Blagoeva, et al., JRC-EC (Joint Research Centre - European Commission) Science-for-policy report, EUR 28832 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017b.

JRC, Materials Impact on the EU's Competitiveness of the Renewable Energy, Storage and e-Mobility Sectors – Wind Power, Solar Photovoltaic and Battery Technologies, Joint Research Centre (JRC, Authors: Claudiu Pavel, Darina Blagoeva. EUR 28774 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-73491, 2017a.

JRC, Raw Materials in the European Defence Industry, Joint Research Centre (JRC), Authors: Pavel, C.C., and E. Tzimas. Pavel, C.C., and E. Tzimas, 2016b.

Joint Research Centre (JRC) (2019), Blagoeva, D., Pavel, C., Wittmer, D., Huisman, J. and Pasimeni, F., Materials dependencies for dual-use technologies relevant for Europe's defence sector: summary report, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

- Joint Research Centre (JRC) (2022), Telsnig, T., Georgakaki, A., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Ince, E., Shtjefni, D., Joanny Ordonez, G., Eulaerts, O. and Grabowska, M., Clean Energy Technology Observatory: 203 Wind Energy in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Joint Research Centre (JRC), ‘Batteries: global demand, supply, and foresight’, 2022b (<https://rmis.jrc.ec.europa.eu/analysis-of-supply-chain-challenges-49b749>).
- Kaya, E.E.; Kaya, O.; Stopic, S.; Gürmen, S.; Friedrich, B. NdFeB magnets recycling process: An alternative method to produce mixed rare earth oxide from scrap NdFeB magnets. *Metals* 2021, 11, 716.
- Ku, A.Y., ‘Anticipating Critical Materials Implications from the Internet of Things (IOT): Potential Stress on Future Supply Chains from Emerging Data Storage Technologies’, *Sustainable Materials and Technologies*, Vol. 15, No. October 2017, 2018, pp. 27–32.
- Leader, A., G. Gaustad, and C. Babbitt, ‘The Effect of Critical Material Prices on the Competitiveness of Clean Energy Technologies’, *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 8, No. 2, 2019, pp. 1–17.
- Leena Grandell, Antti Lehtilä, Mari Kivinen, Tiina Koljonen, Susanna Kihlman, Laura S. Lauri, Role of critical metals in the future markets of clean energy technologies, *Renewable Energy*, Volume 95, 2016, Pages 53-62 ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.102>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116302816>)
- Lucas, J.; Lucas, P.; le Mercier, T.; Rollat, A.; Davenport, W. Rare earth production, use and price. In *Rare Earths*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2015; pp. 15–29.
- Marscheider-Weidemann, F., S. Langkau, T. Hummen, L. Erdmann, and L. Tercero Espinoza, *Raw Materials for Emerging Technologies 2016*, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2016.
- Monnet, A., and A. Ait Abderrahim, Report on Major Trends Affecting Future Demand for Critical Raw Materials. SCREEN Project D.2.2, 2018.
- Negreiro M., Madiega, T., ‘European Parliament Briefing: Digital transformation’, 2019. ([https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/633171/EPRS_BRI\(2019\)633171_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/633171/EPRS_BRI(2019)633171_EN.pdf))
- Önal, M.A.R.; Aktan, E.; Borra, C.R.; Blanpain, B.; Van Gerven, T.; Guo, M. Recycling of NdFeB magnets using nitration, calcination and water leaching for REE recovery. *Hydrometallurgy* 2016, 167, 115–123.

Patil, A.B.; Paetzel, V.; Struis, R.P.W.J.; Ludwig, C. Separation and Recycling Potential of Rare Earth Elements from Energy Systems: Feed and Economic Viability Review. *Separations* 2022, 9, 56.

Polverini, D., F. Ardente, I. Sanchez, F. Mathieux, P. Tecchio, and L. Beslay, 'Resource Efficiency, Privacy and Security by Design: A First Experience on Enterprise Servers and Data Storage Products Triggered by a Policy Process', *Computers and Security*, Vol. 76, 2018, pp. 295–310.

PwC, Copernicus ex-ante benefits assessment, Executive Summary. 2017b. Retrieved from: <https://www.copernicus.eu/sites/default/files/documents/Copernicus-Ex-Ante-Executive-Summary.pdf>

PwC, Innovation for the Earth Harnessing Technological Breakthroughs for People and the Planet, 2017a.

Research and Markets, 'Global and China Polysilicon Industry Report 2019-2023', 2019.

Reuters Business News, 'Platinum's Days as Fuel Cell Car Component May Be Numbered', 2018.

Reinsel, D., J. Gantz, and J. Rydning, 'Data Age 2025: The Digitization of the World From Edge to Core', International Data Corporation, No. November, 2018, p. 28.

Roskill, Lithium-Ion Batteries Market Development & Raw Materials, Second Edition, 2018.

Ryan, J., and C. Martin, 'Solar Companies Are Scrambling to Find a Critical Raw Material', Bloomberg, 2017.

Tercero, L., Report on the Future Use of Critical Raw Materials. SCRREEN Project D.2.3, 2019.

Widmer, J.D.; Martin, R.; Kimiabeigi, M. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. *Sustain. Mater. Technol.* 2015, 3, 7–13.

Widmer, R., and P. Wäger, 'ICT Hardware - Materials: Scarce Metals as Raw Materials for ICTs: Do We Care Enough?', 2013.

Yang, Y.; Walton, A.; Sheridan, R.; Güth, K.; Gauß, R.; Gutfleisch, O.; Buchert, M.; Steenari, B.M.; Van Gerven, T.; Jones, P.T.; et al. REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. *J. Sustain. Metall.* 2017, 3, 122–149.