

Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

Διαχείριση και Τεχνολογία Ποιότητας



Διπλωματική Εργασία

«Ανάλυση του κύκλου ζωής των μπαταριών λιθίου και αξιολόγηση  
του ανθρακικού τους αποτυπώματος και των αντίστοιχων  
οικολογικών δεικτών»

Ιακωβίδου Φανή

Επιβλέπων καθηγητής: Κούτρας Βασίλειος

Πτολεμαΐδα, Σεπτέμβριος, 2024

© Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2024

Η παρούσα Εργασία καθώς και τα αποτελέσματα αυτής, αποτελούν συνιδιοκτησία του ΕΑΠ και του φοιτητή, ο καθένας από τους οποίους έχει το δικαίωμα ανεξάρτητης χρήσης, αναπαραγωγής και αναδιανομής τους (στο σύνολο ή τμηματικά) για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, σε κάθε περίπτωση αναφέροντας τον τίτλο και το συγγραφέα της Εργασίας καθώς και το όνομα του ΕΑΠ όπου εκπονήθηκε.



Ανάλυση του κύκλου ζωής των μπαταριών λιθίου και αξιολόγηση  
του ανθρακικού τους αποτυπώματος και των αντίστοιχων  
οικολογικών δεικτών

Φανή Ιακωβίδου

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Βασίλειος Κούτρας

Καθηγητής Σύμβουλος – Ελληνικό  
Ανοιχτό Πανεπιστήμιο

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Πρόδρομος Σκενδερίδης

Καθηγητής Σύμβουλος – Ελληνικό  
Ανοιχτό Πανεπιστήμιο

Πτολεμαΐδα, Σεπτέμβριος, 2024

*Αφιέρωση*

*Η εργασία αυτή αφιερώνεται στον Λευτέρη μου, με την βοήθεια του οποίου κατάφερα να ανταπεξέλθω στις δυσκολίες που συνάντησα, να βγω δυνατότερη και να γίνω αυτό που είμαι σήμερα.*

## Περίληψη

Η πράσινη μετάβαση αποτελεί τον πυρήνα της βιώσιμης ανάπτυξης. Οι χώρες σε όλο τον κόσμο προωθούν την ηλεκτροκίνηση στις οδικές μεταφορές για να μετριάσουν το πρόβλημα των εκπομπών άνθρακα. Η προώθηση των ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) τα οποία χρησιμοποιούν μπαταρίες λιθίου και η αυξανόμενη ζήτηση τους, η κατανάλωση ενέργειας για την εξόρυξη πρώτων υλών, η παραγωγή και η ανακύκλωση τους, δείχνουν ότι τα ηλεκτρικά οχήματα δεν είναι τόσο φιλικά προς το περιβάλλον όσο θεωρείται. Η αξιολόγηση και η ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής των μπαταριών ιόντων λιθίου (LIBs) των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, γίνεται προκειμένου να αναγνωριστούν τα στάδια που συνεισφέρουν περισσότερο στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα και να εντοπιστούν τρόποι αποτελεσματικής μείωσής του. Το υψηλότερο ποσοστό ανθρακικού αποτυπώματος των μπαταριών παρατηρήθηκε κατά το στάδιο της παραγωγής τους. Οι επαναχρησιμοποιούμενες μπαταρίες λιθίου περιέχουν το 70%-80% της αρχικής τους χωρητικότητας κατά το στάδιο της απόσυρσής τους από τα ηλεκτρικά οχήματα και πριν αρχίσει το στάδιο της ανακύκλωσής τους. Η επαναχρησιμοποίησή τους για οικιακή χρήση και άλλες εφαρμογές αποθήκευσης, όχι μόνο παρατείνει τη ζωή των χρησιμοποιημένων μπαταριών αλλά αποτρέπει και την παραγωγή νέων, μειώνοντας έτσι τις εκπομπές άνθρακα καθώς δεν μεσολαβεί το στάδιο της εξόρυξης πρώτων υλών και της συναρμολόγησης των υλικών τους. Επιπλέον, οι μπαταρίες μετά τη επαναχρησιμοποίησή τους περιέχουν ακόμη πολύτιμα υλικά και η απευθείας απόρριψή τους σε χωματερές προκαλεί ρύπανση στο περιβάλλον και απώλεια πόρων. Για τον λόγο αυτό, η ανακύκλωση των μπαταριών λιθίου και η βελτίωση των διαδικασιών της κρίνεται πιο αναγκαία από ποτέ. Επίσης, από την πλευρά του συνολικού κύκλου ζωής των μπαταριών λιθίου, οι εκπομπές άνθρακα ποικίλουν ανάλογα με το στάδιο του κύκλου και του τύπου της μπαταρίας. Οι βελτιώσεις όσον αφορά στην τεχνολογία και στην απόδοση της ανακύκλωσης, είναι απαραίτητες για τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος. Ως στόχος της παρούσας εργασίας ορίζεται η αξιολόγηση και η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής των μπαταριών λιθίου. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο της ανάλυσης του κύκλου ζωής στις μπαταρίες λιθίου, θα αναδειχθούν οι τύποι των μπαταριών που επιβαρύνουν περισσότερο το περιβάλλον, ποιο στάδιο είναι εκείνο που έχει το μεγαλύτερο ανθρακικό αποτύπωμα και έπειτα θα γίνει η

παράθεση των συμπερασμάτων αλλά και των προτάσεων για τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος.

### **Λέξεις – Κλειδιά**

Ανθρακικό αποτύπωμα, μπαταρίες λιθίου, ανάλυση του κύκλου ζωής, ανακύκλωση μπαταριών λιθίου

## Abstract

The green transition is at the heart of sustainable development. Countries around the world are promoting the electrification of road transport to mitigate carbon emissions. However, the promotion of electric vehicles (EVs) using lithium-ion batteries, the growing demand for these materials, and the energy consumption involved in their extraction, production, and recycling suggest that EVs are less environmentally friendly than commonly believed. An assessment and quantification of the environmental impacts throughout the lifecycle of lithium-ion batteries (LIBs) used in electric vehicles have been conducted to identify key phases contributing to the overall carbon footprint and to identify effective reduction strategies. The highest carbon footprint of batteries is observed during their production phase. Used lithium batteries retain 70%-80% of their initial capacity at the end of their lifecycle before being reused in other applications. Reusing them not only extends their life but also avoids the production of new batteries with the same capacity, thereby reducing carbon emissions by skipping the extraction and assembly stages of their materials. Furthermore, reuse batteries still contain valuable materials, and their direct disposal in landfills could lead to environmental pollution and resource loss. Therefore, recycling lithium batteries and improving recycling processes are now more critical than ever. Additionally, concerning the overall lifecycle of lithium batteries, carbon emissions vary depending on the battery type, necessitating technological and performance improvements to reduce the carbon footprint. The objective of this study is to evaluate and assess the environmental impacts of the life cycle of lithium batteries. By using life cycle assessment (LCA) methods on lithium batteries, the study will highlight which types of lithium batteries have the greatest environmental impact, identify which stage of the life cycle has the largest carbon footprint, and then provide recommendations for reducing carbon footprint.

## Keywords

Carbon footprint, lithium batteries, life cycle analysis, lithium battery recycling

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	v
Abstract .....	vii
Περιεχόμενα .....	viii
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων .....	x
Κατάλογος Πινάκων .....	xi
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια .....	xii
1. Εισαγωγή .....	1
1.1 Κλιματική Αλλαγή .....	2
1.1.1 Αίτια της κλιματικής αλλαγής .....	2
1.1.2 Συνέπειες της κλιματικής αλλαγής .....	5
1.2 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα .....	7
1.2.1 Τι είναι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα; .....	7
1.2.2 Κατηγορίες περιβαλλοντικού αποτυπώματος .....	8
1.2.3 Μέτρηση περιβαλλοντικού αποτυπώματος .....	8
1.2.3.1 Μέτρηση οικολογικού αποτυπώματος .....	8
1.2.3.2 Μέτρηση του ανθρακικού αποτυπώματος .....	9
1.3 Περιβαλλοντική Νομοθεσία .....	11
1.3.1 Διεθνής Νομοθεσία .....	11
1.3.2 Ευρωπαϊκή Νομοθεσία .....	12
1.3.3 Εθνική Νομοθεσία .....	13
1.3.4 Πράσινη Συμφωνία .....	14
2. Περιβαλλοντική Διαχείριση και Συστήματα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης .....	19
2.1 Περιβαλλοντική Διαχείριση .....	19
2.2 Συστήματα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης .....	20
2.2.1 Διεθνής σειρά προτύπων ISO 14001 .....	21
2.2.2 Περιβαλλοντική Πολιτική – Κανονισμός EMAS .....	23
2.2.3 Ευρωπαϊκό οικολογικό σήμα (ECOLABEL) .....	24
2.3 Οφέλη από την εφαρμογή ΣΠΔ .....	25
3. Ανάλυση του Κύκλου Ζωής και Εφαρμογή της στις Μπαταρίες Λιθίου (AKZ) .....	27
3.1. Ιστορική εξέλιξη της AKZ .....	28
3.2. Η σειρά προτύπων ISO14000 και ISO 14044 .....	28
3.3 Φάσεις της AKZ .....	30
3.4 Στόχος της μελέτης .....	35
3.5 Πεδίο εφαρμογής μελέτης .....	36
3.6 Περιγραφή προϊόντος - Λειτουργική μονάδα .....	36
3.8 Όρια του συστήματος .....	36
3.9 Εκτίμηση ποιότητας δεδομένων .....	37
4. Ανθρακικό αποτύπωμα των μπαταριών λιθίου ανά στάδιο του κύκλου ζωής και οι οικολογικοί δείκτες .....	38
4.1 Μπαταρίες λιθίου .....	38
4.2 Ανθρακικό αποτύπωμα των μπαταριών λιθίου .....	41
4.3 Οικολογικοί δείκτες των μπαταριών λιθίου .....	46
4.4 Κύκλος ζωής μιας μπαταρίας λιθίου .....	52



4.4.1 Παραγωγή μπαταριών λιθίου.....	52
4.4.2 Χρήση των μπαταριών λιθίου.....	57
4.4.3 Απόσυρση και επαναχρησιμοποίηση μπαταριών λιθίου.....	57
4.4.4 Ανακύκλωση μπαταριών λιθίου .....	61
4.5 Σύγκριση μπαταριών λιθίου και συμπεράσματα .....	67
5. Μείωση ανθρακικού αποτυπώματος – Αύξηση της ποιότητας ζωής .....	69
5.1 Οφέλη – Αποτελέσματα από την AKZ των μπαταριών λιθίου .....	69
5.2 Οφέλη από την μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος .....	72
5.3 Προτάσεις για τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος .....	73
5.4 Τι άλλο πρέπει να φροντίσουμε;.....	74

## Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1 Πλαίσιο αξιολόγησης Κύκλου Ζωής.....	27
Εικόνα 2 Ανάλυση του Κύκλου Ζωής των οχημάτων εσωτερικής καύσης, των ηλεκτρικών οχημάτων και των μπαταριών τους .....	31
Εικόνα 3 Οι φάσεις της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής.....	35
Εικόνα 4 Σύγκριση των οικολογικών δεικτών διαφόρων τύπων μπαταριών .....	44
Εικόνα 5. Σύγκριση οικολογικών δεικτών διαφόρων τύπων μπαταριών.....	51

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Εκπομπές αερίων του θερμοκήπιου ( $\text{KgCO}_2\text{-eq/KWh}$ ) κατά την παραγωγή μπαταριών λιθίου στις κύριες περιοχές παραγωγής τους .....	56
Πίνακας 2 Σύγκριση των κύριων μεθόδων ανακύκλωσης .....	66
Πίνακας 3 Υλικά ανάκτησης ανάλογα με τη μέθοδο ανακύκλωσης .....	67

## Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

AKZ	Ανάλυση του Κύκλου Ζωής
ΣΠΔ	Σύστημα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης
EVs	Electric Vehicles (Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα)
LIBs	Lithium-Ion Batteries (Μπαταρίες Λιθίου)
LABs	Lithium Air Batteries (Μπαταρίες Λιθίου-Αέρα)
LCA	Life Cycle Assessment (Ανάλυση του Κύκλου Ζωής)
EC	European Commission (Ευρωπαϊκή Επιτροπή)
GHGs	Greenhouse Gases (Αέρια του Θερμοκηπίου)
CFCs	Chlorofluorocarbons (Χλωροφθοράνθρακες)
EF	Ecological Footprint (Οικολογικό Αποτύπωμα)
EGD	European Green Deal (Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία)
EMAS	Eco-Management and Audit Scheme (Σύστημα Οικολογικής Διαχείρισης και Οικολογικού Ελέγχου)
ICEVs	Internal Combustion Engine Vehicles (Οχήματα με μηχανή εσωτερικής καύσης)

## 1. Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η περιγραφή της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής, επισημαίνοντας την αξία του συγκεκριμένου εργαλείου στην ανάδειξη του ανθρακικού αποτυπώματος σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής των μπαταριών λιθίου και συμβάλλοντας στην περαιτέρω μελέτη από κάθε ενδιαφερόμενο. Ως στόχος της παρούσας εργασίας ορίζεται η αξιολόγηση και η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για κάθε στάδιο του κύκλου ζωής των μπαταριών λιθίου. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο της ανάλυσης του κύκλου ζωής των μπαταριών λιθίου θα αναδειχθούν οι τύποι των μπαταριών που επιβαρύνουν περισσότερο το περιβάλλον, το στάδιο που έχει το μεγαλύτερο ανθρακικό αποτύπωμα και έπειτα θα γίνει η παράθεση προτάσεων για τη μείωση των εκπομπών άνθρακα.

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα της εποχής που διανύουμε αναφέρονται στο Κεφάλαιο 1 της παρούσας μελέτης και υποδεικνύουν την αναγκαιότητα για τη βελτίωση των σχετικών διαδικασιών, θεσπίζοντας κανόνες και νόμους σε εθνικό, ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο. Οι νόμοι και οι κανόνες οι οποίοι θα στοχεύουν στην βελτίωση των διαδικασιών θα πρέπει να ακολουθούνται από τον καθέναν από εμάς, ατομικά και συλλογικά, ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα για την προστασία του περιβάλλοντος. Επιχειρήσεις ιδιωτικές ή δημόσιες, φορείς κρατικοί ή μη, κράτη, τοπικές διοικήσεις και πολίτες θα πρέπει να εναρμονιστούν με την νομοθεσία ώστε να συμβάλλουν στην εξομάλυνση των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Στο Κεφάλαιο 2 αναφέρονται η περιβαλλοντική διαχείριση και τα συστήματα αυτής, τα οποία έχουν ως στόχο για καταναλωτές και επιχειρήσεις, την απόκτηση οικολογικής συνείδησης και την ενσωμάτωση πράσινων πρακτικών στην καθημερινότητα τους. Η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής προϊόντων ή διεργασιών των μπαταριών λιθίου παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3 το οποίο εμβαθύνει στην μεθοδολογία και την εφαρμογή της. Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται το ανθρακικό αποτύπωμα γενικά, αλλά και ειδικά για τις μπαταρίες λιθίου σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής τους. Χρησιμοποιείται το εργαλείο της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μιας μπαταρίας λιθίου και παρατίθενται τα στάδια του κύκλου ζωής της, από την εξόρυξη των πρώτων υλών και την συναρμολόγηση των υλικών της μέχρι την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση της, λαμβάνοντας υπόψη τους οικολογικούς δείκτες που επηρεάζονται. Έπειτα, καταγράφονται τα οφέλη και τα

αποτελέσματα από την εφαρμογή της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής, καθώς και τα οφέλη από την μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος των μπαταριών λιθίου. Τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές προοπτικές έρευνας δίνονται στο Κεφάλαιο 6, στο οποίο εισάγεται μία νέα τεχνολογία στις μπαταρίες, η μπαταρία λιθίου-αέρα (LAB).

## 1.1 Κλιματική Αλλαγή

Η κλιματική αλλαγή είναι πλέον ορατή σε κάθε σημείο του πλανήτη. Η άρνηση της κλιματικής αλλαγής δεν συνεπάγεται τη μη ύπαρξη της. Ως κλιματική αλλαγή ορίζεται η μεταβολή στο κλίμα που οφείλεται άμεσα ή έμμεσα σε ανθρώπινες δραστηριότητες και διακρίνεται από τον όρο «κλιματική μεταβλητότητα», η οποία έχει φυσικά αίτια (ορισμός Σύμβασης – Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για τις κλιματικές μεταβολές UNFCCC). Η επιστημονική κοινότητα αναφέρεται συνεχώς σε ορολογίες όπως «φαινόμενο του θερμοκηπίου», «υπερθέρμανση του πλανήτη», «εξάντληση φυσικών πόρων», «ρύπανση του υδροφόρου ορίζοντα», κ.α.

### 1.1.1 Αίτια της κλιματικής αλλαγής

#### Φαινόμενο του θερμοκηπίου

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου αποτελεί μία φυσική διαδικασία κατά την οποία η Γη διατηρεί την θερμοκρασία της σε επίπεδα ζέστης κατάλληλα για την ανάπτυξη και την επιβίωση όλων των οργανισμών (Europa EU, [https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change\\_el](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_el)). Χωρίς την ύπαρξη του φαινομένου του θερμοκηπίου η θερμοκρασία της Γης θα κυμαινόταν στους  $-18^{\circ}\text{C}$ . Ωστόσο, η ύπαρξη του φαινομένου του θερμοκηπίου διατηρεί τη θερμοκρασία της Γης στους  $15^{\circ}\text{C}$  επιτρέποντας έτσι την ύπαρξη κάθε ζωής σε αυτή.

Κατά τη θέρμανση της Γης από τον Ήλιο, η ηλιακή ακτινοβολία που θερμαίνει την επιφάνεια της αλλά και η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια και την ατμόσφαιρά της Γης προς το διάστημα, πρέπει να βρίσκονται ισορροπία. Η διατάραξη της ισορροπίας αυτής θα επιφέρει αύξηση της θερμοκρασίας της Γης. Η θερμική ακτινοβολία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη θερμοκρασία της Γης. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία της Γης, τόσο πιο ισχυρή είναι η ακτινοβολία που εκπέμπεται από αυτήν.

Κατά τη διαδικασία αυτή, και με την παρουσία ατμοσφαιρικού στρώματος αποτελούμενο από αέρια όπως διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), υποξείδιο του αζώτου ( $\text{N}_2\text{O}$ ), μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ), όζον ( $\text{O}_3$ ), φθοριούχα και ευγενή αέρια, μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας συγκρατείται και αντανακλάται με τη μορφή θερμικής ενέργειας (Europa EU, [https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change\\_el](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_el)). Ορισμένα από τα προαναφερθέντα αέρια λειτουργούν σαν "γυαλί" παγιδεύοντας τη θερμότητα του ήλιου και εμποδίζοντας τη διάχυσή της στο διάστημα, προκαλώντας έτσι την υπερθέρμανση του πλανήτη. Πολλά από τα αέρια αυτά προϋπήρχαν στη φύση, ωστόσο με την βιομηχανοποίηση και την αλόγιστη εκμετάλλευση της φύσης από τον άνθρωπο, το αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν η αύξηση των συγκεντρώσεων κάποιων εξ αυτών, τα οποία είναι:

- Το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ )
- Το υποξείδιο του αζώτου ( $\text{N}_2\text{O}$ )
- Το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ )
- Τα φθοριούχα αέρια

Ο κυριότερος παράγοντας που συμβάλλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη είναι το διοξείδιο του άνθρακα. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα οφείλονται κυρίως σε ανθρώπινες δραστηριότητες όπως είναι η καύση ορυκτών καυσίμων, η αποψίλωση των δασών, η αύξηση της κτηνοτροφίας, η χρήση αζωτούχων λιπασμάτων αλλά και σε τομείς δραστηριοτήτων όπως είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης και οι μεταφορές. Άλλοι τομείς που συμβάλλουν στην αύξηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα είναι η γεωργία, η βιομηχανία και τα απορρίμματα. Κάποια εξ' αυτών παραμένουν στην ατμόσφαιρα από μερικά έως χιλιάδες χρόνια.

### **Υπερθέρμανση του πλανήτη**

Η υπερθέρμανση του πλανήτη σημαίνει κλιματική μεταβολή και μεταφράζεται σε αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας και των ωκεανών της Γης. Η ανθρώπινη παρέμβαση στο περιβάλλον και η απότομη βιομηχανοποίηση με στόχο την αύξηση των κερδών των εταιριών και την κάλυψη των αυξανόμενων αναγκών, είναι οι κύριοι λόγοι για την υπερθέρμανση του πλανήτη (Europa EU, [https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change\\_el](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_el)). Κάθε χρόνο παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας

της Γης, σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Μία αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας του πλανήτη της τάξης των 2°C, θα επιφέρει δυσμενείς επιπτώσεις στη διαβίωση των ανθρώπων και στο περιβάλλον, με αποτέλεσμα τις απότομες μεταβολές του καιρού και κατ' επέκταση τις καταστροφικές αλλαγές σε όλα τα έμβια όντα αλλά και στο περιβάλλον.

Σύσσωμη η διεθνής επιστημονική κοινότητα έχει τονίσει την ανάγκη για τη διατήρηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας κάτω από τους 2°C, ακόμη και κάτω από 1,5°C, λαμβάνοντας μέτρα όπως είναι η απανθρακοποίηση, η στροφή στην πράσινη ενέργεια, η χρήση ηλεκτρικών οχημάτων, η χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας, η μείωση των πλαστικών κ.α. (Europa EU, [https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change\\_el](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_el) ).

### **Εξάντληση φυσικών πόρων**

Η αγοραστική δύναμη αυξάνεται ολοένα και περισσότερο σε παγκόσμιο επίπεδο, καθιστώντας την κάλυψη της ζήτησης για ορυκτά καύσιμα δυσκολότερη από ποτέ. Η αλόγιστη χρήση των ορυκτών καυσίμων και των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συνέβαλλαν στην κλιματική αλλαγή, δημιουργώντας προβλήματα όπως είναι η αύξηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και η μείωση της βιοποικιλότητας (EuropaEU, [https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change\\_el](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_el)). Με την απότομη αύξηση του πληθυσμού, αυξήθηκε η κατανάλωση των πόρων και η ζήτηση για τρόφιμα, για νερό, για ενέργεια και για πρώτες ύλες.

### **Ρύπανση του υδροφόρου ορίζοντα**

Οι γεωργικές δραστηριότητες και η χρήση λιπασμάτων, οι βιομηχανίες και η απόρριψη των αστικών αποβλήτων είχαν ως αποτέλεσμα τη ρύπανση του υδροφόρου ορίζοντα. Οι μεγάλες απαιτήσεις για τρόφιμα οδήγησαν στην ελκυστική λύση της χρήσης των ζιζανιοκτόνων, φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων. Οι βιομηχανίες χρησιμοποιούν τις λίμνες, τα ποτάμια και τις θάλασσες για την απόρριψη εκατοντάδων χημικών και τοξικών ουσιών, βαρέων μετάλλων και βιομηχανικών αποβλήτων (Europa EU, [https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change\\_el](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_el)). Τα αστικά λύματα περιλαμβάνουν μικροβιακό φορτίο το οποίο μπορεί να προκαλέσει σοβαρές επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό. Όλα τα παραπάνω έχουν ως συνέπεια την ρύπανση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, τον



ευτροφισμό τους και άλλα φαινόμενα όπως είναι η όξινη βροχή, η οποία έχει επίδραση σε φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς.

### **Τρύπα του όζοντος**

Το όζον ( $O_3$ ) είναι μία χημική ένωση αποτελούμενη από τρία άτομα οξυγόνου και είναι απαραίτητο στοιχείο της ατμόσφαιρας καθώς απορροφά μεγάλο μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας του ήλιου (<https://chem.noesis.edu.gr/i-trypa-tou-ozontos>). Η υπεριώδης ακτινοβολία είναι ιδιαίτερα επιβλαβής καθώς σε μεγάλες τιμές προκαλεί καρκίνο του δέρματος, οφθαλμολογικές παθήσεις, εξασθένηση του ανοσοποιητικού συστήματος, καταστροφή φυτικών και ζωικών οργανισμών ακόμη και αλλοιώσεις του γενετικού υλικού κάθε έμβιου όντος (Europa EU, [https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change\\_el](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_el)). Το στρώμα του όζοντος στη στρατόσφαιρα λειτουργεί ως «ασπίδα προστασίας», προστατεύοντας τον πλανήτη από την υπεριώδη ακτινοβολία.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1970, οι καθηγητές Paul Crutzen και Mario Molina, οι οποίοι βραβεύτηκαν με Νόμπελ Χημείας το 1995, ανακάλυψαν ότι ορισμένες συνθετικές χημικές ενώσεις περιείχαν χλώριο και βρώμιο και συμπέραναν ότι οι ενώσεις αυτές καταστρέφουν την στοιβάδα του όζοντος. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν από την επιστημονική κοινότητα, η οποία κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το φαινόμενο της «τρύπας του όζοντος» οφείλεται στην απελευθέρωση χλωροφθορανθράκων (CFCs). Οι χλωροφθοράνθρακες χρησιμοποιούνται ευρέως ως ψυκτικές ουσίες για ψυγεία και κλιματιστικά, σε προϊόντα καθαρισμού και ως προωθητικά αέρια σε δοχεία αερολυμάτων. Επίσης, ενώσεις του βρωμίου χρησιμοποιούνται για τον εξοπλισμό πυρόσβεσης.

Ο έλεγχος των παραπάνω ουσιών διασφαλίστηκε με το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ θεσπίζοντας κανόνες και περιορισμούς, υποχρεωτικούς για τις χώρες της διεθνούς κοινότητας, με στόχο τη μείωση των επιβλαβών ουσιών και την προστασία της στοιβάδας του όζοντος.

#### **1.1.2 Συνέπειες της κλιματικής αλλαγής**

Η κλιματική αλλαγή φτάνει σε κάθε σημείο του πλανήτη. Από το λιώσιμο των πάγων στους δύο πόλους της Γης μέχρι τις έντονες βροχοπτώσεις και τις ξηρασίες, η κλιματική αλλαγή

ήρθε για να μείνει. Αποτελεί σοβαρή απειλή για κάθε ον του πλανήτη και οι συνέπειες της επηρεάζουν άμεσα τη ζωή όλων.

Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη είναι αποτέλεσμα της κλιματικής κρίσης η οποία οδηγεί σε ακραίες συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών όπως είναι οι καύσωνες. Η κλιματική αλλαγή θα έχει αντίκτυπο και στη διαθεσιμότητα του νερού. Η άνοδος της θερμοκρασίας των υδάτων και οι έντονες και συχνές ξηρασίες αναμένεται να προκαλέσουν μείωση της ποιότητας και της διαθεσιμότητας των υδάτων (Europa EU, [https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change\\_el](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_el)). Με την άνοδο της θερμοκρασίας σε ποτάμια και λίμνες, εκτός από την ποιότητα τους, επηρεάζονται και τα οικοσυστήματα αυτών. Όσον αφορά στη θάλασσα, η αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνειά της προκαλεί οξίνιση των ωκεανών και αλλαγές στα ρεύματά τους, τα οποία μεταβάλλουν σημαντικά τη φυσική και βιολογική σύνθεση των ωκεανών. Οι υψηλές θερμοκρασίες προκαλούν αυξημένη θνησιμότητα σε ευάλωτες ομάδες, όπως τα βρέφη και οι ηλικιωμένοι. Προκαλούν ακόμη την μείωση της παραγωγής και της βιωσιμότητας των γεωργικών και κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων αλλά και τη μείωση των αγαθών που παρέχει η φύση, όπως είναι το νερό και ο καθαρός αέρας. Τέλος, οι υψηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με την έλλειψη βροχοπτώσεων έχουν ως αποτέλεσμα την εξάτμιση των υδάτων, η οποία με τη σειρά της επιφέρει έντονες περιόδους ξηρασίας (Europa EU, [https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change\\_el](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_el)). Οι επιπτώσεις των ξηρασιών είναι εμφανείς στην γεωργία, στην κτηνοτροφία, στα υδροφόρα ορίζοντα, στη βιοποικιλότητα, στις υποδομές αλλά και στον πληθυσμό. Η μείωση της στάθμης των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων έχει ως αποτέλεσμα την δυσκολία ανάπτυξης καλλιεργειών και την έλλειψη νερού για την εκτροφή και την εκμετάλλευση των παραγωγικών ζώων.

Από την άλλη μεριά, η κλιματική αλλαγή αναμένεται να οδηγήσει σε έντονα φαινόμενα βροχοπτώσεων για παρατεταμένες περιόδους με αποτέλεσμα τις πλημμύρες και την υπερχειλίση των ποταμών, φαινόμενα τα οποία εκτός από τους εκατοντάδες θανάτους, προκαλούν οικονομικές ζημιές στις υποδομές, στη γεωργία, στην κτηνοτροφία, στον πληθυσμό και στα κράτη. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι ακραίες βροχοπτώσεις επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα και τη διαθεσιμότητα των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων καθώς εισέρχονται σε αυτά ακαθάριστα λύματα.

Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει πολλά είδη φυτών και ζώων, τα περισσότερα εκ των οποίων δίνουν μάχη επιβίωσης. Άμεσες επιπτώσεις είναι αλλαγές στην αφθονία και την κατανομή των ειδών, στη δομή και στις διαδικασίες των οικοσυστημάτων και στη φαινολογία (διακύμανση των χαρακτηριστικών και του κύκλου ζωής ζωικών και φυτικών ειδών). Επιδείνωση της διάβρωσης, αλάτωση, απώλεια βιοποικιλότητας εδάφους και πλημμύρες είναι κάποιες από τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής στα εδάφη.

Οι αυξημένες θερμοκρασίες και οι μεταβαλλόμενες βροχοπτώσεις έχουν ως αποτέλεσμα την αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα στο έδαφος. Η υποβάθμιση του εδάφους σχετίζεται όχι μόνο με τις ακραίες βροχοπτώσεις, τους υψηλούς όγκους ροής των ποταμών και τις αυξημένες ξηρασίες αλλά και με την αποψίλωση των δασών και την γεωργία.

## 1.2 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα

### 1.2.1 Τι είναι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα;

Τα τελευταία χρόνια και με κυρίαρχο παράγοντα την κλιματική αλλαγή αναφερόμαστε συχνά στο περιβαλλοντικό ή οικολογικό αποτύπωμα ενός προϊόντος, μιας υπηρεσίας, μιας παραγωγής, μιας δραστηριότητας ακόμη και των αποβλήτων. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα είναι ένας τρόπος μέτρησης των συνολικών επιπτώσεων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στο νερό, στην ατμόσφαιρα και στη γη. Συναντάται παντού, από την εξόρυξη και την παραγωγή προϊόντων, τη διάθεση των αποβλήτων, τις μεταφορές μέχρι και στην ανακύκλωση. Όσο μεγαλύτερο είναι το ανθρακικό αποτύπωμα τόσο μεγαλύτερη είναι και η χρήση των φυσικών πόρων. Η εξάντληση των φυσικών πόρων από την ανθρωπότητα γίνεται αλόγιστα, μη σκεπτόμενη τη διαβίωση της, πόσο μάλλον την παρακαταθήκη για τις επόμενες γενιές. Είναι πλέον επιτακτική ανάγκη, η συμβολή ολόκληρης της ανθρωπότητας για την επίτευξη της μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος θα ωφελήσει κάθε έμβιο οργανισμό του πλανήτη αλλά και την ίδια τη φύση. Η μείωση αυτή επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους όπως είναι η μείωση κατανάλωσης ενέργειας και νερού, η μείωση της εξόρυξης ορυκτών πόρων, η αγορά προϊόντων που έχουν κατασκευαστεί ώστε να έχουν μηδενικό ή ελάχιστο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, η έγκαιρη συντήρηση μονάδων ψύξης και θέρμανσης, η

αντικατάσταση των κλασσικών λαμπτήρων με λαμπτήρες LED , η χρήση ποδηλάτων, μέσων μαζικής μεταφοράς και ηλεκτρικών οχημάτων.

### 1.2.2 Κατηγορίες περιβαλλοντικού αποτυπώματος

Οι τύποι του περιβαλλοντικού αποτυπώματος είναι πολλοί και διαφέρουν μεταξύ τους. Οι Galli et al (2012) αναφέρονται στην οικογένεια των αποτυπωμάτων η οποία περιλαμβάνει το οικολογικό αποτύπωμα, το αποτύπωμα άνθρακα και το αποτύπωμα νερού. Οι τρεις δείκτες χαρακτηρίζονται από την ικανότητα τους να παρουσιάζουν τις συνέπειες των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Κάθε δείκτης έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών καθώς συναντάται σε ένα μεμονωμένο προϊόν, σε μία διαδικασία, σε μεμονωμένα άτομα, σε επιχειρήσεις ακόμη και σε πόλεις ή χώρες ανά τον κόσμο (Galli et al, 2012).

Κατόπιν βιβλιογραφικής ανασκόπησης παρατηρήθηκαν διάφοροι τύποι αποτυπωμάτων, όπως είναι:

- Αποτύπωμα άνθρακα (2000)
- Αποτύπωμα αζώτου (2012)
- Αποτύπωμα γης
- Αποτύπωμα νερού (2000)
- Αποτύπωμα φωσφόρου
- Ενεργειακό Αποτύπωμα
- Αποτύπωμα βιοποικιλότητας (2012)

### 1.2.3 Μέτρηση περιβαλλοντικού αποτυπώματος

#### 1.2.3.1 Μέτρηση οικολογικού αποτυπώματος

Η μεθοδολογία του οικολογικού αποτυπώματος (Ecological Footprint, EF) εφαρμόζεται σε ποικίλους τομείς (Ortegon K., Acosta P., 2019) και συμβάλλει στην περιβαλλοντική διαχείριση. Οι Wackernagel και Rees στο Πανεπιστήμιο της Βρετανικής Κολομβίας (1990) όρισαν το οικολογικό αποτύπωμα ως ένα συνολικό δείκτη που αντιπροσωπεύει την ποσότητα της παραγωγικής έκτασης γης και νερού που απαιτούνται ώστε να παρέχει τους απαραίτητους πόρους για την διαβίωση του ανθρώπινου πληθυσμού και της έκτασης εκείνης που θα αφομοιώνει τα παραγόμενα απόβλητα που απορρίπτονται (Wackernagel and

Rees, 1996; Wackernagel et al., 1999). Αργότερα, οι Gottlieb et al. (2012) διευκρίνισαν ότι το οικολογικό αποτύπωμα είναι ένα ποσοτικό μέτρο το οποίο χρησιμοποιεί τις ροές υλικών και ενέργειας για την εκτίμηση του φορτίου του ανθρώπινου πληθυσμού ή των βιομηχανικών διεργασιών. Ουσιαστικά, το οικολογικό αποτύπωμα μετρά το πόσο γρήγορα καταναλώνουμε πόρους (ενέργεια, φαγητό, νερό, χαρτί) και παράγουμε απόβλητα, σε σύγκριση με το πόσο γρήγορα μπορεί η φύση να αφομοιώσει τα απόβλητα μας και να παράγει νέους πόρους (Footprint Network, <https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/>). Τόσο το οικολογικό αποτύπωμα όσο και η βιοχωρητικότητα χρησιμοποιούν μια τυπική μέτρηση έκτασης η οποία ονομάζεται «παγκόσμιο εκτάριο» (Footprint Network, <https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/>). Εάν το οικολογικό αποτύπωμα ενός πληθυσμού υπερβαίνει τη βιοχωρητικότητα της περιοχής, αυτή η περιοχή παρουσιάζει έλλειμα βιο-ικανότητας.

Οικολογικό έλλειμα υπάρχει όταν η ζήτηση για αγαθά και υπηρεσίες όπως είναι λαχανικά και φρούτα, ψάρι, κρέας, ξύλο, βαμβάκι για ρούχα ακόμη και η απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα ξεπερνά την δυνατότητα αναγέννησης αυτών των πόρων από τα οικοσυστήματα της περιοχής. Μία περιοχή με οικολογικό έλλειμα, μη μπορώντας να ανταπεξέλθει στις ανάγκες του πληθυσμού της (υπεραλίευση, αποψίλωση δασών κ.α.) εκπέμπει το παραγόμενο διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (Footprint Network, <https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/>). Εάν η βιοχωρητικότητα μιας περιοχής υπερβαίνει το οικολογικό αποτύπωμα, τότε η περιοχή έχει απόθεμα βιοχωρητικότητας (Footprint Network, <https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/>).

Το οικολογικό αποτύπωμα των Wackernagel και Rees χρησιμοποιείται ευρέως από επιστήμονες, επιχειρήσεις, κυβερνήσεις, επιστήμονες και ιδρύματα που εργάζονται για την παρακολούθηση της οικολογίας, της χρήσης των πόρων και της αειφόρου ανάπτυξης.

### 1.2.3.2 Μέτρηση του ανθρακικού αποτυπώματος

Ο όρος «αποτύπωμα του άνθρακα» χρησιμοποιείται συχνά ως συντομογραφία και εκφράζει την ποσότητα του άνθρακα που εκπέμπεται από μία δραστηριότητα, ένα προϊόν ή έναν οργανισμό. Το αποτύπωμα άνθρακα αποτελεί μέρος του οικολογικού αποτυπώματος.

Οι εκπομπές άνθρακα από την καύση ορυκτών καυσίμων, στην περίπτωση που δεν υπάρχει αρκετή βιοχωρητικότητα ώστε να απορροφήσει τις εκπομπές αυτές, συσσωρεύονται στην

ατμόσφαιρα. Όταν το αποτύπωμα άνθρακα αναφέρεται στο συνολικό οικολογικό αποτύπωμα, τότε οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα εκφράζονται ως ποσότητα της παραγωγικής έκτασης που απαιτείται για τη δέσμευση αυτών των εκπομπών.

Η ανθρωπότητα απαιτεί περισσότερα από όσα μπορεί η Γη να προσφέρει. Το αποτύπωμα του άνθρακα αποτελεί το 60% του συνολικού οικολογικού αποτυπώματος της ανθρωπότητας, ποσοστό το οποίο ολοένα και αυξάνεται (Footprint Network, <https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/>).

Στην πραγματικότητα, το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής εντείνεται επειδή ο πλανήτης δεν έχει αρκετή βιοχωρητικότητα για να απορροφήσει το εκπεμπόμενο διοξείδιο του άνθρακα που προέρχεται από την καύση των ορυκτών καυσίμων (Footprint Network, <https://www.footprintnetwork.org/resources/footprint-calculator/>). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή του κλίματος σε ένα ευρύτερο πλαίσιο στο οποίο ενώνονται όλες οι οικολογικές απειλές που αντιμετωπίζουμε σήμερα όπως είναι η συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, η αποψίλωση των δασών, η υπερβόσκηση, η υπεραλίευση, η επισιτιστική κρίση και η βίαιη εξαφάνιση ειδών από την τροφική αλυσίδα.

Τα προαναφερόμενα εκλύουν μεγάλες συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση του πλανήτη.

Τα κύρια εκκλύόμενα αέρια του θερμοκηπίου είναι τα εξής:

- Διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ )
- Μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ )
- Υποξείδιο του αζώτου ( $\text{N}_2\text{O}$ )
- Όζον ( $\text{O}_3$ )
- Φθοριούχα αέρια του θερμοκηπίου (F-gases), όπως είναι χλωροφθοράνθρακες (CFC), υδροφθοράνθρακες (HFCs), υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFCs),
- Υπερφθοράνθρακες (PFCs), εξαφθοριούχο θείο ( $\text{SF}_6$ ) και τριφθοριούχο άζωτο ( $\text{NF}_3$ )

Σε μετρήσεις του 2021, το διοξείδιο του άνθρακα αντιπροσώπευε το 80% του όγκου όλων των εκπομπών του θερμοκηπίου στη ΕΕ, με το μεθάνιο να ακολουθεί με περισσότερο από 12%. Η «διάρκεια ζωής» του μεθανίου είναι μικρότερη από αυτή του διοξειδίου του άνθρακα, αλλά η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας από αυτό είναι περισσότερη από κάθε άλλο ρύπο, γεγονός που καθιστά το μεθάνιο έναν επικίνδυνο ατμοσφαιρικό ρύπο καθώς



τυχόν διαρροές του μπορούν να προκαλέσουν έκρηξη. Όλα τα φθοριούχα αέρια αντιπροσωπεύουν μόνο το 2,5% των αερίων του θερμοκηπίου της ΕΕ.

### 1.3 Περιβαλλοντική Νομοθεσία

Η προστασία του περιβάλλοντος είναι τώρα πιο απαραίτητη από ποτέ. Διασφαλίζεται από νομικά εργαλεία που διαθέτει η παγκόσμια κοινότητα, η Ευρωπαϊκή ένωση και η κάθε χώρα ξεχωριστά. Η περιβαλλοντική δικαιοσύνη επιτάσσει την εφαρμογή και την τήρηση της περιβαλλοντικής νομοθεσίας και απαιτεί τον συγχρονισμό όλων των ανθρώπων σε κάθε σημείο του πλανήτη, ανεξάρτητα των διαφορετικών χαρακτηριστικών τους, της πολιτικής τους πεποίθησης ή του χρώματός τους. Η περιβαλλοντική νομοθεσία χωρίζεται σε διεθνή, ευρωπαϊκή και εθνική νομοθεσία.

#### 1.3.1 Διεθνής Νομοθεσία

Το διεθνές περιβαλλοντικό δίκαιο αποτελεί έναν τρόπο ελέγχου των ενεργειών που αφορούν στο περιβάλλον και στην προστασία του, και μπορεί να εφαρμοστεί σε διεθνές επίπεδο και σε κάθε σημείο του πλανήτη. Η διεθνής νομοθεσία χωρίζεται σε 4 κατηγορίες, όπως αυτές τέθηκαν από το Γραφείο Ηνωμένων Εθνών:

- Διεθνές Δίκαιο, περιλαμβάνει συμβάσεις και συνθήκες οι οποίες είναι νομικά δεσμευτικές συμφωνίες μεταξύ των χωρών
- Εθνικό Διεθνές Δίκαιο, συνήθειες ή έθιμα μιας χώρας τα οποία γίνονται κανόνες
- Αρχές Διεθνούς Δικαίου, κανόνες και πρότυπα τα οποία ενημερώνουν το διεθνές δίκαιο και τη δράση του
- Ακαδημαϊκό Έργο, η ερμηνεία του νόμου από ειδικούς ανά τον κόσμο

Το διεθνές δίκαιο αποτελείται από σκληρούς νόμους οι οποίοι αποτελούν νομικά δεσμευτικές υποχρεώσεις, και από ήπιους νόμους οι οποίοι είναι διεθνή έγγραφα όπως δηλώσεις, συμβάσεις και γενικά σχόλια. Τα προαναφερθέντα διαμορφώνουν και επηρεάζουν τις υποχρεώσεις και την πολιτική των χωρών.

Από την διεθνή περιβαλλοντική νομοθεσία έχουν προκύψει οι εξής βασικές αρχές:

- Η αρχή της πρόληψης, επιτρέπει την λήψη προληπτικών μέτρων για την πρόβλεψη και την αποφυγή της περιβαλλοντικής ρύπανσης

- Η αρχή της προφύλαξης, επιτρέπει την λήψη προληπτικών μέτρων για περιπτώσεις στις οποίες η βλάβη δεν έχει ακόμη πραγματοποιηθεί ή υπάρχει αβεβαιότητα σχετικά με τον κίνδυνο
- Η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει», με την οποία η χώρα, η επιχείρηση ή το άτομο που προκαλεί τη ρύπανση πρέπει να επιβαρυνθεί με τα έξοδα της προκαλούμενης ρύπανσης

Η πιο πρόσφατη διεθνής συμφωνία είναι η Συμφωνία του Παρισιού (2015) η οποία τέθηκε σε ισχύ τον Νοέμβριο του 2016 και περιλαμβάνει ένα σχέδιο δράσης για τον περιορισμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη και την χαμηλή εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου.

### 1.3.2 Ευρωπαϊκή Νομοθεσία

Το Ευρωπαϊκό περιβαλλοντικό δίκαιο καθορίζει τη λειτουργία των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης μέσα από ένα σύνολο νομικών κανόνων και αρχών. Επηρεάζει άμεσα ή έμμεσα τη νομοθεσία των κρατών-μελών της καθώς η εθνική τους νομοθεσία πρέπει να εναρμονίζεται σε αυτό. Η περιβαλλοντική πολιτική βασίζεται στις αρχές της προφύλαξης, της πρόληψης και της επανόρθωσης των καταστροφών του περιβάλλοντος και στην αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει». Οι βασικές θέσεις του Ευρωπαϊκού περιβαλλοντικού δικαίου εστιάζουν στη βελτίωση του επιπέδου της ποιότητας ζωής των πολιτών όλων των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Το ευρωπαϊκό δίκαιο διακρίνεται σε:

- Πρωτογενές δίκαιο, περιλαμβάνει το δίκαιο τριών ιδρυτικών Συνθηκών (Συνθήκη για την Ευρωπαϊκή Ένωση, Συνθήκη για την λειτουργία της Ευρωπαϊκής Ένωσης Συνθήκη για την ίδρυση της Ευρωπαϊκής Κοινότητας Ατομικής Ενέργειας) και γενικές αρχές του δικαίου
- Δευτερογενές ή παράγωγο δίκαιο, με βάση τις Συνθήκες
- Συμπληρωματικό δίκαιο

Τα νομικά μέσα του παράγωγου δικαίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι:

- ο κανονισμός, αποτελεί πράξη γενικής ισχύος προς όλα τα κράτη μέλη, πρέπει να εφαρμοστεί άμεσα από την έναρξη ισχύος του, δεν απαιτείται η μεταφορά του στο εθνικό δίκαιο και υπερισχύει των εθνικών νόμων οι οποίοι είναι μη συμβατοί με τις ουσιαστικές διατάξεις του



- ii. Η οδηγία, είναι δεσμευτική για κάθε κράτος μέλος στο οποίο απευθύνεται, απαιτείται μεταφορά της στο εθνικό δίκαιο, δεν ισχύει άμεσα ωστόσο τα κράτη μέλη έχουν την νομική υποχρέωση να την λαμβάνουν υπόψη τους
- iii. Οι αποφάσεις, οι συστάσεις και οι γνωμοδοτήσεις
  - Οι αποφάσεις, είναι δεσμευτικές ως προς όλα τα μέρη της, μπορούν να έχουν άμεση εφαρμογή (όπως οι οδηγίες) και είναι υποχρεωτικές μόνο για τους αποδέκτες (κράτη μέλη, φυσικά ή νομικά πρόσωπα), αποσκοπώντας στη ρύθμιση καταστάσεων που αφορούν τους συγκεκριμένους
  - Οι συστάσεις και οι γνωμοδοτήσεις, δεν ορίζουν δικαιώματα και υποχρεώσεις ωστόσο παρέχουν στοιχεία για την ερμηνεία και το περιεχόμενο του δικαίου της Ένωσης

### 1.3.3 Εθνική Νομοθεσία

Κάθε ένα από τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης διαθέτει το δικό του δίκαιο και το δικό του νομικό σύστημα. Στο δίκαιο ενός κράτους μέλους περιλαμβάνεται τόσο το δίκαιο σε εθνικό επίπεδο όσο και νόμοι που έχουν εφαρμογή σε συγκεκριμένη περιοχή, περιφέρεια ή πόλη. Το δίκαιο πηγάζει κυρίως από το Σύνταγμα, τους νόμους και άλλες νομοθετικές πράξεις. Ο νόμος Ν.1650/86 εκδόθηκε το 1986 και έκτοτε εφαρμόζεται έχοντας σκοπό τη θέσπιση θεμελιωδών κανόνων και την καθιέρωση κριτηρίων και μηχανισμών για την προστασία του περιβάλλοντος, διασφαλίζοντας έτσι ότι ο άνθρωπος ως άτομο και ως μέλος του κοινωνικού συνόλου θα ζει σε ένα περιβάλλον υψηλής ποιότητας το οποίο θα προστατεύεται, θα προστατεύει την υγεία του και θα ευνοεί την ανάπτυξη της προσωπικότητάς του.

Ο περιβαλλοντικός νόμος Ν.1650/86 μέσα από τα άρθρα του διευκρινίζει:

- Περιβαλλοντικούς όρους έργων και δραστηριοτήτων
- Μέτρα για την προστασία της ατμόσφαιρας
- Μέτρα για την προστασία των υδάτων
- Μέτρα για την προστασία του εδάφους
- Διαχείριση των στερεών αποβλήτων
- Μέτρα για την προστασία από τον θόρυβο
- Συσκευασία και επιβάρυνση προϊόντων
- Μέτρα για τη διαχείριση επικίνδυνων ή τοξικών ουσιών και παρασκευασμάτων

- Μέτρα προστασίας από τη ραδιενέργεια
- Μέτρα για την προστασία της φύσης και των τοπίων
- Μέτρα για την διαχείριση αποβλήτων από τα μέσα μεταφοράς

#### 1.3.4 Πράσινη Συμφωνία

Η Ευρωπαϊκή Ένωση μπαίνει σε τροχιά πράσινης μετάβασης με στόχο την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050. Το 2019 δρομολογείται η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία ή αλλιώς Green Deal, η οποία αποτελεί μια δέσμη πρωτοβουλιών πολιτικής και περιλαμβάνει:

- Τον μετασχηματισμό της ΕΕ σε μια δίκαιη και ευημερούσα κοινωνία με σύγχρονη και ανταγωνιστική οικονομία
- Μία ολιστική προσέγγιση κατά την οποία οι σχετικοί τομείς πολιτικής συμβάλλουν στην επίτευξη του στόχου για το κλίμα
- Αλληλένδετες πρωτοβουλίες που καλύπτουν το κλίμα, το περιβάλλον, τη βιομηχανία, τις μεταφορές, την ενέργεια, τη γεωργία και τη βιώσιμη ανάπτυξη

Η μετουσίωση σε νομοθέτημα των φιλοδοξιών της Πράσινης Συμφωνίας επιτυγχάνεται μέσω μίας δέσμης μέτρων για την αναθεώρηση της νομοθεσίας όσον αφορά στην ενέργεια, στις μεταφορές και στο κλίμα.

Οι πρωτοβουλίες που περιλαμβάνει η Πράσινη Συμφωνία είναι:

- Στρατηγική της ΕΕ για την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή

Η νέα στρατηγική της ΕΕ, η οποία προσυπογράφει από τους υπουργούς Περιβάλλοντος της ΕΕ το 2021, είναι η κοινωνία της να καταστεί ανθεκτική στην κλιματική αλλαγή και να προσαρμοστεί πλήρως στις αναπόφευκτες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Τα νέα μέτρα περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση της προσαρμογής στις μακροοικονομικές δημοσιονομικές πολιτικές, την καλύτερη συλλογή και κοινοποίηση δεδομένων για τη βελτίωση της προσβασιμότητας και της ανταλλαγής απόψεων και γνώσεων σχετικά με τις κλιματικές επιπτώσεις αλλά και λύσεις με γνώμονα τη φύση οι οποίες θα συμβάλλουν στην ανάπτυξη της ανθεκτικότητας στην κλιματική αλλαγή και στην προστασία των οικοσυστημάτων.

➤ Στρατηγική της ΕΕ για τη βιοποικιλότητα με ορίζοντα το 2030

Στόχος της ΕΕ είναι η ανάκαμψη της βιοποικιλότητας της Ευρώπης έως το 2030 η οποία θα αποφέρει πολλαπλά οφέλη για τον πλανήτη, το κλίμα και τον άνθρωπο. Οι απαιτούμενες δράσεις περιλαμβάνουν την αύξηση τη χρηματοδότησης για την αποκατάσταση υποβαθμισμένων οικοσυστημάτων μέσω της μείωσης της χρήσης επικίνδυνων φυτοφαρμάκων αλλά και την επέκταση των προστατευόμενων χερσαίων και θαλάσσιων περιοχών της Ευρώπης. Είναι επιτακτική ανάγκη να ενταθούν οι προσπάθειες μέσω της αντιμετώπισης άμεσων και έμμεσων αιτιών που έχουν ως αποτέλεσμα την απώλεια της βιοποικιλότητας και της φύσης, μέσω της ενσωμάτωσης των στόχων και σε άλλους τομείς όπως είναι η αλιεία, η δασοκομία και η γεωργία.

➤ Στρατηγική «από το αγρόκτημα στο πιάτο»

Η στρατηγική της Επιτροπής εκτός από την επισιτιστική ασφάλεια και την επάρκεια των τροφίμων, έχει ως στόχο την στήριξη της βιώσιμης παραγωγής τροφίμων, την βιώσιμη κατανάλωση τροφίμων και την προώθηση υγιεινής διατροφής και την εξασφάλιση επαρκών, οικονομικών και θρεπτικών τροφίμων βασιζόμενη στην προστασία του πλανήτη.

➤ Στρατηγική για τη βιομηχανία

Στόχος της ΕΕ είναι η βιομηχανία της Ευρώπης να ηγηθεί της μετάβασης προς την κλιματική ουδετερότητα, στηρίζοντας παράλληλα τον ρόλο της βιομηχανίας ως καταλύτη της καινοτομίας, της ανάπτυξης και της αλλαγής. Η βιομηχανία θα πρέπει να στηριχθεί στις αρχές της κυκλικής οικονομίας, της βιωσιμότητας και της προστασίας του περιβάλλοντος. Ο πράσινος και ψηφιακός μετασχηματισμός μπορεί να καταστήσει την ευρωπαϊκή βιομηχανία κινητήρια δύναμη για την μετάβαση στην ψηφιοποίηση και στην κλιματική ουδετερότητα.

➤ Σχέδιο δράσης για την κυκλική οικονομία

Για την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας σημαντικό ρόλο παίζει η αποσύνδεση της ανάπτυξης της οικονομίας από τη χρήση των πόρων και η μετάβαση προς κυκλικά συστήματα στην παραγωγή και την κατανάλωση. Το νεοεκδοθέν (2020) από την Επιτροπή

σχέδιο δράσης περιλαμβάνει 30 σημεία τα οποία αφορούν στον σχεδιασμό βιώσιμων προϊόντων, στην κυκλικότητα των μεθόδων παραγωγής και στην ενδυνάμωση αγοραστών και καταναλωτών του δημόσιου τομέα. Οι τομείς στόχευσης είναι οι μπαταρίες, οι συσκευασίες, τα πλαστικά, τα ηλεκτρονικά προϊόντα, ο κατασκευαστικός τομέας, ο τομέας της κλωστοϋφαντουργίας, οι κτιριακές υποδομές καθώς και τα τρόφιμα.

➤ Μπαταρίες και απόβλητα μπαταριών

Λόγω της ανάπτυξης της ηλεκτροκίνησης, η ζήτηση για μπαταρίες αναμένεται να υπερδεκαπλασιαστεί έως το 2030 και για αυτό η ΕΕ εξέδωσε κανονισμό στοχεύοντας στη δημιουργία κυκλικής οικονομίας για τον τομέα των μπαταριών και για όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους, από τον σχεδιασμό μέχρι την επεξεργασία των αποβλήτων τους. Η έκδοση του νέου κανονισμού (2023) έρχεται να αντικαταστήσει την ισχύουσα νομοθεσία για τις μπαταρίες του 2006, με στόχο την προώθηση της κυκλικής οικονομίας και τη βελτίωση της λειτουργίας της αγοράς των μπαταριών, καθιστώντας τον ανταγωνισμό δικαιότερο μέσω των απαιτήσεων βιωσιμότητας, ασφάλειας και επισήμανσης τους.

➤ Δίκαιη μετάβαση

Η επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050 δεν είναι η ίδια για όλα τα κράτη μέλη, καθώς κάποια από αυτά εξαρτώνται περισσότερο από ορυκτά καύσιμα και βιομηχανίες άνθρακα, απασχολώντας παράλληλα μεγάλο αριθμό ατόμων. Η θέσπιση ενός μηχανισμού δίκαιης μετάβασης από την ΕΕ παρέχει χρηματοδοτική και τεχνική στήριξη για οποιοδήποτε κράτος, περιφέρεια ή πόλη αντιμετωπίζει δυσκολίες ως προς την επίτευξη χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Η χρηματοδότηση των 55 δις ευρώ από την ΕΕ για το διάστημα 2021-2027 όχι μόνο επενδύει σε νέες και πράσινες θέσεις εργασίας, στην ψηφιακή συνδεσιμότητα, στη καθαρή ενέργεια, σε υποδομές και σε βιώσιμες μεταφορές αλλά ταυτόχρονα προσφέρει και δυνατότητες απασχόλησης και επανειδίκευσης. Επίσης, ελκύει τις επενδύσεις σε τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα, παρέχοντας οικονομική στήριξη και επενδύσεις στην έρευνα και στην καινοτομία.

➤ Καθαρή, ασφαλής και πιο οικονομική ενέργεια

Τα μεγαλύτερα ποσοστά εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου προέρχονται από την παραγωγή και την χρήση ενέργειας. Επομένως είναι σημαντική η μείωση και η απαλλαγή από τις εκπομπές άνθρακα στον τομέα της ενέργειας. Η Ευρωπαϊκή Ένωση για την επίτευξη των στόχων αυτών προσαρμόζει και αναθεωρεί την ισχύουσα νομοθεσία με βάση τους στόχους που έχουν τεθεί έως το 2030, στηρίζοντας και χρηματοδοτώντας την ανάπτυξη και την υιοθέτηση καθαρότερων πηγών ενέργειας όπως είναι το υδρογόνο και η υπεράκτια ενέργεια.

➤ Στρατηγική της ΕΕ για τη βιωσιμότητα των χημικών προϊόντων

Οι σύγχρονες ανάγκες της κοινωνίας και της οικονομίας απαιτούν την υψηλή κατανάλωση χημικών προϊόντων τα οποία περιλαμβάνουν ουσίες που μπορεί να είναι επιβλαβείς για τους ανθρώπους. Η στρατηγική της ΕΕ στον τομέα των χημικών προϊόντων περιλαμβάνει την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας στη βιομηχανία, την αποτελεσματικότερη προστασία της ανθρώπινης υγείας καθώς και την εξασφάλιση ενός περιβάλλοντος χωρίς τοξικές ουσίες.

➤ Δασική στρατηγική και αποψίλωση των δασών

Τα μέτρα της ΕΕ για την προσπάθεια της μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου περιλαμβάνουν τη βελτίωση του μεγέθους και της βιοποικιλότητας των δασών, τη δενδροφύτευση, την υιοθέτηση φιλικών προς το περιβάλλον πρακτικών από τους διαχειριστές των δασών και τέλος την προώθηση μιας βιώσιμης διαχείρισης τους.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει δεσμευτεί να μετατρέψει την Ευρώπη σε μια αποδοτική (από πλευράς πόρων) και ανταγωνιστική οικονομία και πράσινη προς το περιβάλλον σύμφωνα με τους στόχους της Συμφωνίας του Παρισιού (European Commission). Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal, EGD) αποτελεί πυξίδα της ΕΕ και πρώτη παγκόσμια δημόσια δέσμευση για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 55% μέχρι το 2030, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία στοχεύει στη μείωση της εγχώριας παραγωγής αερίων του θερμοκηπίου κατά 55% και στην επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050 (European Commission-EC, 2019-a). Παράλληλα, αποτελεί πολυεπίπεδο σχέδιο και καλύπτει μια σειρά πολιτικών που στόχο έχουν την προώθηση της «πράσινης» ανάπτυξης, τη δέσμευσή της για απανθρακοποίηση

και την αποσύνδεση της από τις εκπομπές άνθρακα αλλά και από άλλες οικολογικές επιπτώσεις.

Τον Φεβρουάριο του 2023 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ενέκρινε το Βιομηχανικό Σχέδιο Πράσινης Συμφωνίας το οποίο περιλαμβάνει τον νόμο περί εναλλακτικών πρώτων υλών και τον νόμο Net-Zero Industry Act, δημιουργώντας ένα απλουστευμένο περιβάλλον για τους αντίστοιχους τομείς και δράσεις ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει την ανάπτυξη υποδομών και καινοτόμων τεχνολογιών με στόχο τη μείωση των εκπομπών. Η πρόεδρος της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Ursula von der Leyen δήλωσε ότι η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία αποτελεί την «στιγμή της Σελήνης» της Ευρώπης καθώς έτσι η Ευρώπη θα καταστεί η πρώτη ουδέτερη ήπειρος όσον αφορά στον άνθρακα. Επίσης τόνισε ότι η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία είναι η νέα στρατηγική της ΕΕ για την πράσινη ανάπτυξη, τη μείωση των εκπομπών άνθρακα και παράλληλα για τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας.

## 2. Περιβαλλοντική Διαχείριση και Συστήματα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης

Τα Συστήματα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης (ΣΠΔ) είναι συστηματικές προσεγγίσεις που υιοθετούν οι οργανισμοί για την αποτελεσματική διαχείριση του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος, για τη μείωση της κατανάλωσης πόρων και για τη συμμόρφωση τους με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς. Αυτά τα συστήματα παρέχουν ένα δομημένο πλαίσιο για τον εντοπισμό, την αξιολόγηση και τον μετριασμό των περιβαλλοντικών κινδύνων καθώς και για τη συνεχή βελτίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεων. Με την εφαρμογή ενός ΣΠΔ οι οργανισμοί μπορούν να διασφαλίσουν τη δέσμευσή τους για τη σωστή περιβαλλοντική διαχείριση, να ενισχύσουν τη φήμη τους και να επιτύχουν τους στόχους για βιώσιμη ανάπτυξη (Delmas, M. A., Toffel, M.W., 2004).

Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO) ανέπτυξε το πρότυπο ISO 14001 το οποίο καθορίζει τα κριτήρια για την αποτελεσματική εφαρμογή ενός ΣΠΔ. Το ISO 14001 παρέχει στους οργανισμούς κατευθυντήριες γραμμές για τη δημιουργία, την εφαρμογή, τη συντήρηση και τη βελτίωση των συστημάτων περιβαλλοντικής διαχείρισης. Η πιστοποίηση της υιοθέτησης του ISO 14001 από έναν τρίτο φορέα, δείχνει μια αξιόπιστη δέσμευση για περιβαλλοντική προστασία και βοηθά στη βελτίωση της εικόνας μιας επιχείρησης. Το πρότυπο αυτό είναι ευρέως αναγνωρισμένο και έχει υιοθετηθεί από επιχειρήσεις και ιδρύματα παγκοσμίως.

### 2.1 Περιβαλλοντική Διαχείριση

Ο όρος περιβαλλοντική διαχείριση περιλαμβάνει τα όρια για τις ανθρώπινες δράσεις, τον έλεγχο μιας διαδικασίας, την θέσπιση εργαλείων για την επιτυχή εφαρμογή της, τον στόχο με σεβασμό στο περιβάλλον και στην κοινωνία, τον έλεγχο της κατανάλωσης της ενέργειας και πολλά ακόμη. Παράλληλα, επιδιώκει την εισαγωγή της έννοιας της αειφόρου ανάπτυξης στις διαδικασίες παραγωγής αγαθών και υπηρεσιών, μέσω μηχανισμών που συνδυάζουν αποτελεσματικά την τεχνολογία, την οικονομική ανάπτυξη και τη βιωσιμότητα (Sena da Silva et al., 2004). Η περιβαλλοντική διαχείριση είναι σημαντική προϋπόθεση για μία εύρωστη κοινωνία απαλλαγμένη από κάθε μορφή υποβάθμισης του περιβάλλοντος, έχοντας ως όραμα την βελτίωση του επιπέδου ποιότητας και της ευημερίας για κάθε ζωή του πλανήτη.



## 2.2 Συστήματα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης

Το 1990 ήρθε η παγκοσμιοποίηση και το οικονομικό άνοιγμα των αγορών. Η διαχείριση και η διατήρηση του περιβάλλοντος είναι μέρος των επιχειρήσεων και αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την χάραξη των πολιτικών της. Οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις της εποχής για φιλικά προς το περιβάλλον προϊόντα, καθιστούν την περιβαλλοντική διαχείριση πιο σημαντική από ποτέ. Η επίτευξη των προσδοκώμενων αποτελεσμάτων γίνεται μέσω των Συστημάτων Περιβαλλοντικής Διαχείρισης (ΣΠΔ). Τα ΣΠΔ παρέχουν ένα πλαίσιο για τις επιχειρήσεις που θέλουν να τα εφαρμόσουν και βοηθούν στην ενσωμάτωση των περιβαλλοντικών όρων και πολιτικών, στις διαδικασίες και στα προϊόντα τους. Επίσης, τα ΣΠΔ βοηθούν μια επιχείρηση στην μείωση του περιβαλλοντικού της αποτυπώματος και στην εξοικονόμηση πόρων, στη πρόληψη της ρύπανσης και καθώς ενισχύεται η εικόνα της με φιλικά προς το περιβάλλον προϊόντα, στην προσέλκυση νέων πελατών. Αποτελούν έναν διεθνή κώδικα για την τήρηση πρακτικών για την προστασία του περιβάλλοντος, για την εφαρμογή των περιβαλλοντικών όρων και για την περιβαλλοντική διαχείριση προϊόντων και υπηρεσιών. Ένα διεθνές ΣΔΠ βασίζεται στα διεθνή πρότυπα ISO 14001, ενώ ένα ευρωπαϊκό στον Ευρωπαϊκό Κανονισμό EMAS.

Με την εφαρμογή ενός συστήματος διαχείρισης ποιότητας επιτυγχάνεται:

- ✓ Η προστασία του περιβάλλοντος και η διαχείριση κινδύνων σχετικών με αυτό
- ✓ Η βελτίωση της εικόνας αλλά και της φήμης μιας επιχείρησης
- ✓ Η ικανοποίηση των πελατών
- ✓ Η πλήρης νομοθετική συμμόρφωση
- ✓ Η εκπαίδευση του εμπλεκόμενου προσωπικού και ο καθορισμός των υπευθυνοτήτων και των αρμοδιοτήτων τους
- ✓ Η μείωση του κόστους, καθώς προλαμβάνονται διορθωτικές ενέργειες

Η υιοθέτηση του συστήματος ISO 14001 επιφέρει κόστος αλλά και πολλά οφέλη (Bansal, P.; Bogner, W. C.; 2002). Το κόστος περιλαμβάνει, το κόστος δημιουργίας ενός ΣΠΔ ή τροποποίησης του υπάρχοντος, τον έλεγχο του από τρίτους και το ετήσιο κόστος πιστοποίησης του. Τα προαναφερόμενα κόστη είναι σε επίπεδο εγκατάστασης, επομένως για μια μεγάλη επιχείρηση είναι πολύ σημαντικά.



Η υιοθέτηση του ISO 14001 παρέχει επίσης τα ακόλουθα οφέλη:

- I. Επιτρέπει στις επιχειρήσεις να αποδείξουν τη δέσμευσή τους για την προστασία του περιβάλλοντος με αξιόπιστο τρόπο, γεγονός που βελτιώνει την εικόνα τους και τους βοηθά να δημιουργήσουν φιλικές σχέσεις με τους ενδιαφερόμενους (King et al., 2005). Στην περίπτωση μεγάλων επιχειρήσεων, η επίτευξη μιας καλής εικόνας απαιτεί ισχυρό συντονισμό μεταξύ των εγκαταστάσεων. Η έλλειψη εφαρμογής του ISO 14001 σε μια εγκατάσταση μπορεί να βλάψει την φιλική προς το περιβάλλον εικόνα ολόκληρης της επιχείρησης.
- II. Η υιοθέτηση του ISO 14001 αυξάνει τη διαφάνεια των λειτουργιών της επιχείρησης, γεγονός που μειώνει τις ασυμμετρίες πληροφόρησης και με τη σειρά του, ευνοεί στο συντονισμό με τους ενδιαφερόμενους (Heras-Saizarbitoria, I.; Boiral, O.; 2013). Για τις μεγάλες επιχειρήσεις, η τυποποίηση των εσωτερικών λειτουργιών μέσω του προτύπου ISO 14001, διευκολύνει στον συντονισμό προσωπικού και εγκαταστάσεων, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη οργάνωση και αποτελεσματικότητα.
- III. Η υιοθέτηση του ISO 14001 καθοδηγεί τους διαχειριστές του προς την ανάπτυξη μιας περιβαλλοντικής πολιτικής και καθορίζει τις πολιτικές που πρέπει να εφαρμόζονται για τον έλεγχο του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της επιχείρησης (Delmas, M. A.; Montes-Sancho, M. J.; 2011).

### **2.2.1 Διεθνής σειρά προτύπων ISO 14001**

Η ανησυχία για το περιβάλλον και την υποβάθμισή του άρχισε να γίνεται αντιληπτή από την δεκαετία του 1960. Μέχρι το 1990, λαμβάνονταν μέτρα για τη ρύπανση και την προστασία του περιβάλλοντος τα οποία διασφαλιζόνταν από την νομοθεσία, η οποία όμως δεν τηρούνταν από όλους. Το 1992, ο ΟΗΕ υιοθέτησε ένα παγκόσμιο σχέδιο δράσης για την ανάπτυξη και για το περιβάλλον, με στόχο τη διάσωση του πλανήτη. Η Διάσκεψη Κορυφής των Ηνωμένων Εθνών (Ρίο της Βραζιλίας), όπου συναντήθηκαν 197 έθνη και συμμετείχαν αντιπρόσωποι του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης (ISO), είχε ως στόχο την προώθηση των αρχών της αειφόρου ανάπτυξης της Ατζέντας 21. Οι συμμετέχοντες στη Σύνοδο υιοθέτησαν τη Διακήρυξη του Ρίο και την Ατζέντα 21, τα οποία αποτελούν ένα ολοκληρωμένο σχέδιο δράσης που στόχο έχει την ενημέρωση για την κρισιμότητα της

δεδομένης κατάστασης και την ανάγκη για βιώσιμη ανάπτυξη. Στη Σύνοδο συζητήθηκε επίσης, η δημιουργία διεθνών περιβαλλοντικών προτύπων ώστε να υπάρχει ένας κοινός κώδικας για κάθε σημείο του πλανήτη. Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης, βασισμένος στο πρώτο βρετανικό πρότυπο περιβαλλοντικής διαχείρισης BS7750, το οποίο εκδόθηκε το 1992, αλλά και σε προηγούμενη σειρά προτύπων ISO 9000, δημιούργησε τη σειρά προτύπων ISO 14000.

Το διεθνές πρότυπο ISO 14001, γνώρισε ευρεία αποδοχή και αφορά στη θέσπιση Συστημάτων Περιβαλλοντικής Διαχείρισης. Βασίζεται στην αντίληψη ότι τα περιβαλλοντικά ζητήματα μπορούν να αναγνωρίζονται και να διαχειρίζονται ανάλογα. Η σειρά των προτύπων ISO 14000 παρέχει «πρακτικά εργαλεία για εταιρείες και οργανισμούς κάθε είδους, οι οποίοι επιθυμούν να διαχειριστούν τις περιβαλλοντικές τους ευθύνες». Στα πρότυπα ISO 14000 περιλαμβάνεται το πρότυπο ISO 14001, το οποίο εγκρίθηκε το 1996 από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (Chan and Hawkins, 2012) και αποτελεί το βασικό σύνολο προτύπων που χρησιμοποιούνται από οργανισμούς, καθορίζοντας τον σχεδιασμό και την εφαρμογή ενός αποτελεσματικού συστήματος περιβαλλοντικής διαχείρισης (ΣΠΔ). Επίσης, το πρότυπο ISO 14001:

- ✓ Παρέχει οδηγίες για τη δημιουργία ή τη βελτίωση ενός ΣΠΔ ή και ορίζει τα κριτήρια του
- ✓ Χαράσσει την πορεία για ένα αποτελεσματικό ΣΠΔ
- ✓ Διαβεβαιώνει για την παρακολούθηση, την μέτρηση και τη βελτίωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- ✓ Βοηθά στην επίτευξη περιβαλλοντικών και οικονομικών στόχων
- ✓ Βελτιώνει την αποδοτικότητα των πόρων
- ✓ Επιτυγχάνει μείωση των αποβλήτων
- ✓ Επιτυγχάνει μείωση του κόστους
- ✓ Συμβάλλει στη συμμόρφωση με την ισχύουσα νομοθεσία
- ✓ Ενθαρρύνει για τη βελτίωση περιβαλλοντικών επιδόσεων

Τα προαναφερόμενα συμβάλλουν σημαντικά στην επίτευξη βιώσιμων πρακτικών μέσω της πρόληψης της ρύπανσης, της βελτίωσης της περιβαλλοντικής απόδοσης και της συμμόρφωσης προς τις νομικές απαιτήσεις. Τέλος, το ISO 14001 μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη διασφάλιση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

### 2.2.2 Περιβαλλοντική Πολιτική – Κανονισμός EMAS

Με γνώμονα την προστασία του περιβάλλοντος, κάθε δραστηριότητα θα πρέπει να βασίζεται σε ένα πλαίσιο, βάση του οποίου θα επικρατεί η περιβαλλοντική πολιτική. Η ανάγκη αυτή δημιούργησε τα Συστήματα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης και Οικολογικού Ελέγχου. Τα συστήματα αυτά βασίζονται στον προληπτικό έλεγχο και όχι στην εκ των υστέρων αντιμετώπιση των προβλημάτων. Το συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης στις 29 Ιουνίου του 1993 (Κανονισμός της Ε.Ε. αριθ. 1836/93 για την εκούσια συμμετοχή των επιχειρήσεων του βιομηχανικού τομέα σε κοινοτικό σύστημα οικολογικής διαχείρισης και οικολογικού ελέγχου) και ακολουθώντας το βρετανικό πρότυπο BS7750, υιοθέτησε τον Κανονισμό EMAS και άνοιξε τις πόρτες για τη συμμετοχή της βιομηχανίας. Το 2009, δημιουργήθηκε ο κανονισμός της ΕΚ αριθ.1221/2009 ο οποίος θέσπιζε το σύστημα οικολογικής διαχείρισης και οικολογικού ελέγχου (Eco-Management and Audit Scheme, EMAS).

Ο κανονισμός EMAS αποτελεί ένα εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης υψηλών προδιαγραφών, απευθύνεται σε οποιοδήποτε οργανισμό ο οποίος αποτελεί χώρο διεργασιών, επιθυμεί να αξιολογήσει ή να βελτιώσει τις περιβαλλοντικές επιδόσεις του οργανισμού και να καταρτίσει εκθέσεις. Σύμφωνα με τον Κανονισμό της Ε.Ε. αριθ.1836/93 ως "χώρος δραστηριοτήτων" αναφέρεται η έκταση γης στην οποία ασκούνται βιομηχανικές δραστηριότητες υπό τον έλεγχο μιας επιχείρησης, συμπεριλαμβανομένης κάθε συναφούς ή σχετικής αποθήκευσης πρώτων υλών, υποπροϊόντων, ενδιάμεσων προϊόντων, τελικών προϊόντων και αποβλήτων, καθώς και του εξοπλισμού και της υποδομής που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια των διεργασιών και ανεξάρτητα της μόνιμης ή μη εγκατάστασής τους.

Οι απαιτήσεις του Κανονισμού EMAS (Άρθρο 2) είναι οι ακόλουθοι:

- I. Περιβαλλοντική Πολιτική
- II. Περιβαλλοντική Ανάλυση
- III. Περιβαλλοντικό Πρόγραμμα
- IV. Περιβαλλοντικοί Αντικειμενικοί Σκοποί
- V. Σύστημα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης
- VI. Περιβαλλοντικός Έλεγχος

### 2.2.3 Ευρωπαϊκό οικολογικό σήμα (ECOLABEL)

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί μείζονα πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί από κοινού από κυβερνήσεις, βιομηχανίες και από την ακαδημαϊκή κοινότητα (IPCC, 2018). Δεδομένου ότι μία από τις κύριες αιτίες της υπερθέρμανσης του πλανήτη είναι η μη βιώσιμη ανάπτυξη, οι πράσινες διαδικασίες εντός των επιχειρήσεων κερδίζουν ολοένα και περισσότερο έδαφος. Οι Dumas et al το 2018 αναφέρουν ότι «η τέχνη και η επιστήμη της εποπτείας είναι ο τρόπος με τον οποίο εκτελείται η εργασία σε έναν οργανισμό ώστε να διασφαλιστούν σταθερά αποτελέσματα και να αξιοποιηθούν οι ευκαιρίες βελτίωσης».

Οι εταιρείες υιοθετούν επίσης περιβαλλοντικές πρακτικές διαχείρισης που επικεντρώνονται στα προϊόντα (Evangelinos et al., 2014; Hasan et al., 2019). Για παράδειγμα, περιβαλλοντικά εργαλεία όπως είναι τα οικολογικά σήματα (ecolabels) βοηθούν τους οργανισμούς να παράγουν πράσινα προϊόντα και υπηρεσίες, παρέχοντας τους κριτήρια βιωσιμότητας (Dangelico, R.M., 2017).

Τα οικολογικά σήματα εισήχθησαν για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1970 και επεκτάθηκαν τις επόμενες δεκαετίες σε διάφορες χώρες (π.χ. το γερμανικό Blue Angel (1977), το Nordic Swan (1989), το US Energy Star (1992) και το EU Eco-label (1992). Τα τελευταία 20 χρόνια παρατηρείται μια αύξηση των οικολογικών σημάτων, με το εύρος, το μέγεθος και τη φύση αυτών να διαφέρουν (Iraldo et al., 2020). Για παράδειγμα, τον Ιανουάριο του 2021 ο δείκτης Ecolabel ανέφερε 456 οικολογικά σήματα σε 199 χώρες μεταξύ 25 βιομηχανιών (Big Room Inc., 2021). Το Ecolabel Index είναι ο μεγαλύτερος κατάλογος παγκοσμίως και περιέχει πληροφορίες για τα οικολογικά σήματα.

Οι οικολογικές ετικέτες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στο να παρέχουν πληροφορίες στους καταναλωτές σχετικά με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των προϊόντων, επιτρέποντάς τους να κάνουν αγοραστικές επιλογές με γνώμονα την ευαισθησία τους για την προστασία του περιβάλλοντος. Παράλληλα, προωθούν τη βιωσιμότητα καθιστώντας τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά των προϊόντων και των υπηρεσιών πιο διαφανή για τους καταναλωτές, μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος αναζήτησης πληροφοριών για αυτούς.

Το πρότυπο που εντάσσει τις οικολογικές ετικέτες, είναι το πρότυπο ISO 14024 που αναπτύχθηκε από τον Διεθνή Οργανισμό Προτύπων (ISO). Αυτό το πρότυπο περιγράφει τις αρχές και τις διαδικασίες για την ανάπτυξη, την αξιολόγηση και την επαλήθευση των περιβαλλοντικών προγραμμάτων επίσημησης τύπου 1, συμπεριλαμβανομένης της

επιλογής των κατηγοριών προϊόντων, των περιβαλλοντικών κριτηρίων και των λειτουργικών χαρακτηριστικών τους. Τέλος, περιγράφει τις διαδικασίες πιστοποίησης για την έκδοση της οικολογικής ετικέτας.

## 2.3 Οφέλη από την εφαρμογή των ΣΠΔ

Τα περιβαλλοντικά ζητήματα που προκύπτουν τα τελευταία χρόνια κατέστησαν τον έλεγχο και την αντιμετώπιση τους, καίριας σημασίας για την εποχή που διανύουμε. Με σκοπό την επίτευξη της προστασίας του περιβάλλοντος, δημιουργήθηκαν τα Συστήματα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης (ΣΠΔ).

Η εφαρμογή των ΣΠΔ προσφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων, όπως είναι:

### ❖ Μείωση του κόστους

Τα ΣΠΔ παροτρύνουν τη χρήση εναλλακτικών πρώτων υλών και ενέργειας και προτρέπουν στην μείωση των αποβλήτων. Έτσι, επιτυγχάνεται η εξοικονόμηση πόρων, η χρήση εναλλακτικής ενέργειας φιλικότερης προς το περιβάλλον και η μείωση του κόστους μέσω διαδικασιών ανακύκλωσης ή επαναχρησιμοποίησης των αποβλήτων.

### ❖ Τήρηση της νομοθεσίας

Με την τήρηση της νομοθεσίας και των περιβαλλοντικών ορίων για τον εκάστοτε ρύπο και ανάλογα με την περιοχή, επιτυγχάνεται η αποφυγή όχι μόνο διορθωτικών ενεργειών για την παράβαση των ορίων αλλά και υψηλών περιβαλλοντικών προστίμων.

### ❖ Αναβάθμιση της εικόνας και της φήμης της επιχείρησης - Ανταγωνιστικότητα

Τα φιλικά προς το περιβάλλον προϊόντα ή υπηρεσίες προσδίδουν κύρος στην επιχείρηση, καθιστώντας την ανταγωνιστική έναντι άλλων που δεν εφαρμόζουν τα ΣΠΔ. Ο πελάτης-καταναλωτής προτιμά τέτοια προϊόντα καθώς με αυτόν τον τρόπο συμβάλλει στη προστασία του περιβάλλοντος.

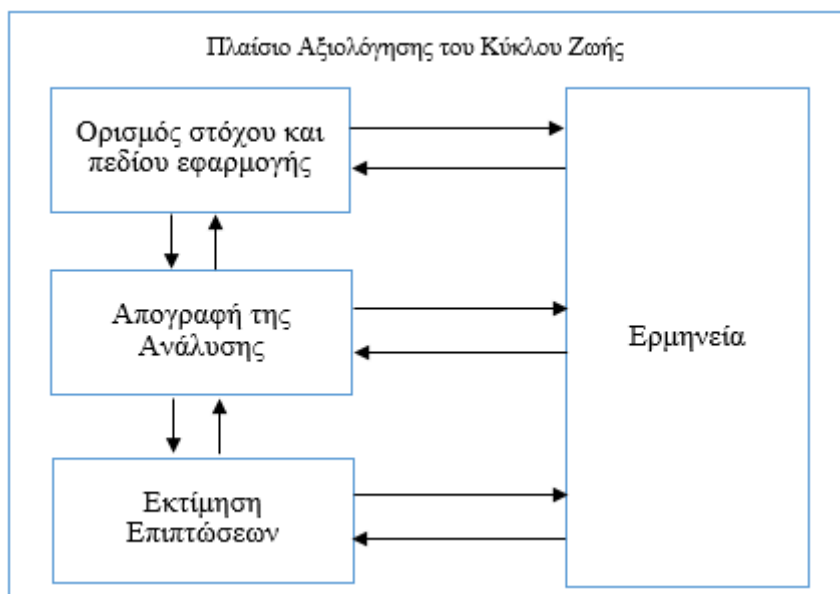
❖ Μείωση περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Η τήρηση των διαδικασιών των ΣΠΔ συμβάλλει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σημειώνονται κατά την παραγωγή, τη διάθεση ή την ανακύκλωση των προϊόντων.

### 3. Ανάλυση του Κύκλου Ζωής και Εφαρμογή στις Μπαταρίες Λιθίου (ΑΚΖ)

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για τις μπαταρίες λιθίου και η χρήση τους σε ολοένα και περισσότερα προϊόντα, κατέστησε σημαντική και την γνώση των επιπτώσεων τους σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής τους, από την εξόρυξη πρώτων υλών και την παραγωγή τους μέχρι την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση τους. Τα προαναφερόμενα αποτελούν τα στάδια του κύκλου ζωής των μπαταριών λιθίου.

Η ανάλυση του κύκλου ζωής μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες περιπτώσεις, αποτελώντας ένα σημαντικό εργαλείο που συμβάλλει στην επιτακτική πλέον ανάγκη για πράσινη ανάπτυξη που έχει ανάγκη ο πλανήτης. Ποσοτικοποιεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και βοηθάει στην ανάλυση καθώς και στον έλεγχο και τη μείωση αυτών, για όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας. Τα αποτελέσματα της ΑΚΖ συμβάλλουν στην λήψη αποφάσεων από τα κράτη, την ΕΕ, τις κυβερνήσεις ακόμη και τους δήμους και τις περιφέρειες, βοηθώντας τους να φτάσουν πιο κοντά στην βιώσιμη ανάπτυξη.



Εικόνα 1. Πλαίσιο Αξιολόγησης του Κύκλου Ζωής (Πηγή: ISO 14040)

Στην Εικόνα 1 βλέπουμε τα στάδια της Αξιολόγησης του Κύκλου Ζωής, τα οποία θα αναλυθούν εκτενέστερα παρακάτω.



Οι περισσότερες μελέτες που επιλέχθηκαν, εφαρμόζουν την μέθοδο της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής για να εξετάσουν τις εκπομπές άνθρακα σε όλα τα στάδια ζωής των μπαταριών λιθίου (Wang C. et al., 2017; Wu et al., 2021; Wang L. Et al., 2020; Jursova et al., 2019). Μέσω της συλλογής δεδομένων, η LCA μπορεί να υπολογίσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) των μπαταριών από την "γέννηση έως τον τάφο" (δηλαδή, από την εξόρυξη των πρώτων υλών, τη συναρμολόγηση των υλικών, την παραγωγή, τη χρήση, τη δευτερογενή χρήση και την ανακύκλωση), μετρώντας το CO<sub>2</sub>-eq (ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα) και παρέχοντας κατευθύνσεις για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών, τη μείωση των εκπομπών άνθρακα των μπαταριών και κατ'επέκταση, την επίτευξη του στόχου των μηδενικών εκπομπών άνθρακα (Wang C. et al., 2017; Wang L. Et al., 2020; Brown et al., 2014; Hellweg et al., 2014).

### 3.1. Ιστορική εξέλιξη της AKZ

Η αρχική σύλληψη της AKZ έγινε το 1960 στο Ινστιτούτο Περιβαλλοντικών Επιστημών του Πανεπιστημίου της Κοπεγχάγης, με αφορμή την χρήση καυσίμων πετρελαίου και άνθρακα. Τότε αφορούσε στα συγκεκριμένα καύσιμα. Ωστόσο με την πάροδο των χρόνων χρησιμοποιήθηκε και σε άλλους τομείς προϊόντων, υπηρεσιών ή διαδικασιών. Το 1992 στο Ρίο ντε Τζανέιρο και στη διάσκεψη για το περιβάλλον και την ανάπτυξη των Ηνωμένων Εθνών, έγινε η επίσημη αναγνώριση της AKZ ως ένα σημαντικό εργαλείο για την επίτευξη της αειφόρου ανάπτυξης. Η AKZ αξιολογεί την περιβαλλοντική απόδοση, μέσα από δείκτες όπως είναι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG), η κατανάλωση ενέργειας ή ο ευτροφισμός, που σχετίζονται με κάθε στάδιο της ζωής ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας (Muralikrishna et al., 2017).

### 3.2. Η σειρά προτύπων ISO14000 και ISO 14044

Για την διασφάλιση της συγκρισιμότητας των αποτελεσμάτων σε όλα τα μήκη και τα πλάτη του πλανήτη, ο οργανισμός ISO δημιούργησε δύο συμπληρωματικά πρότυπα της σειράς ISO 14000, τα ISO 14040 και ISO 14044. Στο πρώτο περιέχονται οι γενικές αρχές καθώς και το πλαίσιο αξιολόγησης του κύκλου ζωής. Στο ISO 14044, περιέχονται λεπτομερείς οδηγίες για την επίτευξη της AKZ.



Τα πρότυπα της σειράς ISO 14000 είναι:

- ISO 14001 – Συστήματα περιβαλλοντικής διαχείρισης – Απαιτήσεις με οδηγίες χρήσης
- ISO 14004 – Συστήματα περιβαλλοντικής διαχείρισης – Γενικές κατευθύνσεις σε αρχές, συστήματα και υποστηρικτικές τεχνικές
- ISO 14005 – Συστήματα περιβαλλοντικής διαχείρισης – Κατευθυντήριες γραμμές για μια ευέλικτη προσέγγιση στη σταδιακή εφαρμογή της
- ISO 14006 – Συστήματα περιβαλλοντικής διαχείρισης – Οδηγίες για την ενσωμάτωση του οικολογικού σχεδιασμού
- ISO 14010 – Οδηγός για τα Συστήματα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης και Γενικού Περιβαλλοντικού Ελέγχου
- ISO 14011 – Ειδικός Οδηγός για τον έλεγχο Συστημάτων Περιβαλλοντικής Διαχείρισης
- ISO 14012 – Οδηγός για Εσωτερικούς και Εξωτερικούς Ελεγκτές των Συστημάτων Περιβαλλοντικής Διαχείρισης
- ISO 14015 - Περιβαλλοντική διαχείριση - Περιβαλλοντική αξιολόγηση τοποθεσιών και οργανισμών (EASO)
- ISO 14020 έως 14025 - Περιβαλλοντικές ετικέτες και δηλώσεις – Στόχοι και αρχές των Οικολογικών Σημάτων
- ISO/NP 14030 - Πράσινα ομόλογα - Περιβαλλοντικές επιδόσεις των προτεινόμενων έργων και περιουσιακών στοιχείων, περιβαλλοντική εκτίμηση μετά την παραγωγή
- ISO 14031 - Περιβαλλοντική διαχείριση - Αξιολόγηση περιβαλλοντικών επιδόσεων – Οδηγίες για την ανάπτυξη και χρήση δεικτών
- ISO 14040 – Αρχές και Πλαίσιο - Χρήση, πλεονεκτήματα και περιορισμοί της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής
- ISO 14041 – Καθορισμός Στόχου και Πλαισίου - Σύντομη περιγραφή των απαιτήσεων της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής και οδηγίες για την εκτίμηση των δεδομένων της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής
- ISO 14042 – Αξιολόγηση της επίδρασης του Κύκλου Ζωής - Οδηγός για την εκτίμηση της σημαντικότητας των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που δεν έχουν συμπεριληφθεί από την εκτίμηση των δεδομένων της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής

- ISO 14043 – Οδηγός για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής σε σχέση με τους Αρχικούς Στόχους
- ISO 14044-14049 – Περιβαλλοντική διαχείριση - Αξιολόγηση κύκλου ζωής - Προγραμματισμός πριν από την παραγωγή και καθορισμός περιβαλλοντικών στόχων – Απαιτήσεις και Οδηγίες
- ISO 14045 – Περιβαλλοντική διαχείριση - Εκτίμηση οικολογικής απόδοσης συστημάτων προϊόντων - Αρχές, απαιτήσεις και κατευθυντήριες γραμμές
- ISO 14046 – Περιβαλλοντική διαχείριση - Αποτύπωμα νερού - Αρχές, απαιτήσεις και κατευθυντήριες γραμμές
- ISO 14047 – Παραδείγματα εφαρμογής του ISO 14042
- ISO 14048 – Τεκμηρίωση των Δεδομένων της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής
- ISO 14049 – Παραδείγματα εφαρμογής του ISO 14041
- ISO 14050 – Περιβαλλοντική διαχείριση – Λεξιλόγιο, όροι και ορισμοί που χρησιμοποιούνται από την σειρά προτύπων ISO14000
- ISO/TR 14062 – Περιβαλλοντική διαχείριση - Ενσωμάτωση περιβαλλοντικών πτυχών στο σχεδιασμό και στην ανάπτυξη προϊόντων
- ISO 14063 – Περιβαλλοντική διαχείριση - Περιβαλλοντική επικοινωνία - Οδηγίες και παραδείγματα
- ISO 14064 – Αέρια του θερμοκηπίου - Μέτρηση, ποσοτικοποίηση και μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου
- ISO 14090 – Προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή - Αρχές, απαιτήσεις και κατευθυντήριες γραμμές

### 3.3 Φάσεις της ΑΚΖ

Σε έναν κόσμο που χαρακτηρίζεται από τα προβλήματα της κλιματικής αλλαγής, η ανάλυση του ανθρακικού αποτυπώματος μιας μπαταρίας λιθίου θα έχει ακόμη μεγαλύτερη σημασία για την κατανάλωση ενέργειας, ειδικά καθώς οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας γίνονται ολοένα και περισσότερο απαραίτητες. Το ανθρακικό αποτύπωμα των μπαταριών λιθίου πρέπει να ποσοτικοποιηθεί με βάση ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους, ώστε να αναδειχθούν με σαφήνεια οι περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις. Η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής είναι μια τυποποιημένη μέθοδος για την εκτίμηση της περιβαλλοντικής απόδοσης ενός προϊόντος ή ενός συστήματος, καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του.

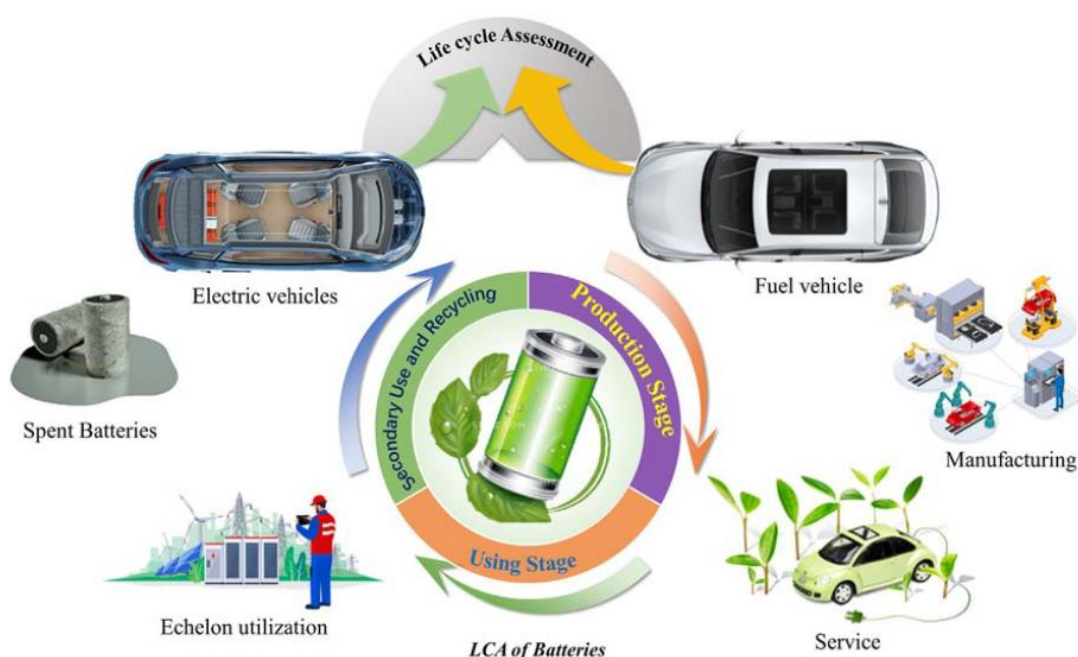
Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO), τα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044 χρησιμοποιούνται ευρέως για τη διεξαγωγή της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής. Η μέθοδος αυτή, διαιρείται σε τέσσερα στάδια:

- τον ορισμό του στόχου και του πεδίου εφαρμογής
- την ανάλυση αποθέματος κύκλου ζωής
- την εκτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής
- την ερμηνεία κύκλου ζωής

Η μεθοδολογία και τα στάδια της ΑΚΖ διασφαλίστηκαν μέσω των προτύπων ISO14040. Με τον τρόπο αυτό η ανάλυση κάθε πεδίου στο οποίο εφαρμόζεται, όπως είναι προϊόντα, διεργασίες ή υπηρεσίες, θα μπορεί εύκολα να συγκριθεί και να μελετηθεί ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα και να καθοριστούν βελτιώσεις.

Τα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας είναι:

- Πρώτες ύλες, εξόρυξη και προμήθεια
- Συναρμολόγηση προϊόντος/Παραγωγή προϊόντος
- Διανομή προϊόντος ή υπηρεσίας στον τελικό αποδέκτη
- Χρήση προϊόντος ή υπηρεσίας
- Τέλος ζωής προϊόντος ή υπηρεσίας / Απόρριψη προϊόντος και ανακύκλωση



Εικόνα 2. Ανάλυση του κύκλου ζωής οχημάτων εσωτερικής καύσης, ηλεκτρικών οχημάτων και των μπαταριών τους (Xia et al., 2022)

Τα βασικά χαρακτηριστικά της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής, βάσει του προτύπου ISO 14040 είναι:

- i. Η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής εκτιμά τις περιβαλλοντικές πλευρές και τις επιδράσεις των συστημάτων από την αγορά/απόκτηση των πρώτων υλών μέχρι την τελική απόρριψη, σύμφωνα με τον δηλωθέντα στόχο και το πεδίο εφαρμογής
- ii. Η σχετική φύση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) οφείλεται στο χαρακτηριστικό της λειτουργικής μονάδας της μεθοδολογίας
- iii. Το βάθος της λεπτομέρειας και το χρονικό πλαίσιο μιας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) μπορεί να ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό, ανάλογα με τον ορισμό του στόχου και του πεδίου εφαρμογής.
- iv. Λαμβάνονται μέτρα, ανάλογα με την προοριζόμενη εφαρμογή της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA), για την τήρηση της εμπιστευτικότητας
- v. Η μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) είναι ανοιχτή στην ενσωμάτωση νέων επιστημονικών ευρημάτων ακόμη και βελτιώσεων της τρέχουσας κατάστασης
- vi. Στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) εφαρμόζονται συγκεκριμένες απαιτήσεις που προορίζονται για χρήση σε συγκριτικές δηλώσεις και πρόκειται να δημοσιοποιηθούν.
- vii. Δεν υπάρχει μια μοναδική μέθοδος για τη διενέργεια Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA). Οι οργανισμοί έχουν την ευελιξία να εφαρμόζουν την LCA όπως αυτή ορίζεται από το Διεθνές Πρότυπο, σύμφωνα με την προοριζόμενη εφαρμογή και τις απαιτήσεις του οργανισμού.
- viii. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) διαφέρει από πολλές άλλες τεχνικές (όπως η αξιολόγηση περιβαλλοντικής απόδοσης, η εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων και η εκτίμηση κινδύνου) καθώς είναι μια σχετική προσέγγιση που βασίζεται σε μια λειτουργική μονάδα. Η LCA μπορεί, ωστόσο, να χρησιμοποιεί πληροφορίες που συλλέγονται από αυτές τις άλλες τεχνικές.
- ix. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) αντιμετωπίζει τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η LCA δεν προβλέπει απόλυτες ή ακριβείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις, λόγω της σχετικής έκφρασης των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε μια μονάδα αναφοράς, της ολοκλήρωσης των περιβαλλοντικών δεδομένων στο χώρο

- και στο χρόνο, της ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στην προσομοίωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και του γεγονότος ότι ορισμένες πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι πιθανόν μελλοντικές
- x. Η φάση της Αξιολόγησης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (LCIA), σε συνδυασμό με τις άλλες φάσεις της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA), παρέχει μια συστημική προοπτική σε θέματα περιβάλλοντος και πόρων για ένα ή περισσότερα συστήματα προϊόντων.
  - xi. Η Αξιολόγηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (LCIA) αντιστοιχεί τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCI) σε κατηγορίες επιπτώσεων. Για κάθε κατηγορία επιπτώσεων επιλέγεται ένας δείκτης επιπτώσεων του κύκλου ζωής και υπολογίζεται το αποτέλεσμα του δείκτη. Η συλλογή των αποτελεσμάτων των δεικτών (αποτελέσματα LCIA) ή το προφίλ LCIA παρέχει πληροφορίες σχετικά με τα περιβαλλοντικά ζητήματα που συνδέονται με τις εισόδους και εξόδους του συστήματος προϊόντος.
  - xii. Δεν υπάρχει επιστημονική βάση για τον καθορισμό των αποτελεσμάτων της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) σε ένα μόνο συνολικό σκορ ή αριθμό, καθώς η στάθμιση απαιτεί επιλογές αξιών.
  - xiii. Η ερμηνεία του κύκλου ζωής χρησιμοποιεί ένα συστηματικό διαδικαστικό τρόπο για την αναγνώριση, την πιστοποίηση, τον έλεγχο, την αξιολόγηση και την παρουσίαση των συμπερασμάτων που βασίζονται στα ευρήματα μιας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA), προκειμένου να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της εφαρμογής όπως αυτές περιγράφονται στο στόχο και στο πεδίο της μελέτης
  - xiv. Η ερμηνεία του κύκλου ζωής χρησιμοποιεί μια επαναληπτική διαδικασία τόσο εντός της φάσης της ερμηνείας όσο και στις άλλες φάσεις μιας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA).
  - xv. Η ερμηνεία του κύκλου ζωής προβλέπει συνδέσεις μεταξύ της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) και άλλων τεχνικών διαχείρισης του περιβάλλοντος, εστιάζοντας στα πλεονεκτήματα και στα όρια της LCA, σε σχέση με τον ορισμό του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της.

Όπως αναφέρεται στα πρότυπα ISO14040/44, η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής αποτελείται από τέσσερις φάσεις:

### **1. ΦΑΣΗ I - Ορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής (Phase I – Goal and Scope Definition)**

Η φάση αυτή είναι η πιο κρίσιμη της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής (AKZ). Ο ορισμός του στόχου διευκρινίζει το σκοπό εφαρμογής της AKZ. Περιγράφει τις λειτουργικές μονάδες, τα όρια του συστήματος αλλά και την ποσότητα και την ποιότητα των δεδομένων.

### **2. ΦΑΣΗ II – Απογραφή της ανάλυσης του κύκλου ζωής (Phase II – Life Cycle Inventory Analysis)**

Κατά τη φάση αυτή καταγράφονται οι εισροές και οι εκροές του συστήματος που μελετάται. Η συλλογή των δεδομένων γίνεται μέσω της βιβλιογραφίας (επιστημονικά άρθρα, εκθέσεις, βάσεις δεδομένων) ή μέσω της πρακτικής συλλογής δεδομένων (μετρήσεις ή παρατηρήσεις) ή και των δύο.

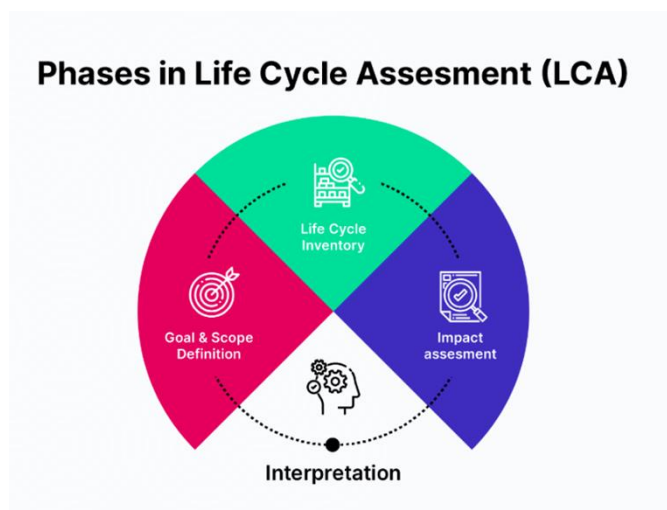
### **3. ΦΑΣΗ III - Αποτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής (Phase III – Life Cycle Impact Assessment)**

Η αποτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας βάσει των αποτελεσμάτων της απογραφής της Φάσης II, έχει ως στόχο την αξιολόγηση και την ερμηνεία των δεδομένων που βρέθηκαν από τις εισροές και τις εκροές του συστήματος. Τα δεδομένα αυτά μετατρέπονται σε κατηγορίες επιπτώσεων και σε δείκτες.

### **4. ΦΑΣΗ IV - Ερμηνεία αποτελεσμάτων (Phase IV – Life Cycle Interpretation)**

Το τελευταίο στάδιο της AKZ είναι η ερμηνεία. Το στάδιο αυτό στοχεύει στην ανάδειξη των σημαντικών σημείων της AKZ, στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και έπειτα οδηγεί σε συμπεράσματα ή ακόμη και σε περιορισμούς ή βελτιώσεις





Εικόνα 3. Οι φάσεις της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής (C. Ouellet-Plamondon, G. Habert)

### 3.4 Στόχος της μελέτης

Ως στόχος της παρούσας εργασίας ορίζεται η αξιολόγηση και η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής των μπαταριών λιθίου. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο της ανάλυσης του κύκλου ζωής στις μπαταρίες λιθίου, θα αναδειχθούν οι τύποι των μπαταριών λιθίου που επιβαρύνουν περισσότερο το περιβάλλον, ποιο στάδιο είναι εκείνο που έχει το μεγαλύτερο ανθρακικό αποτύπωμα και έπειτα θα γίνει η παράθεση προτάσεων για τη μείωση των εκπομπών άνθρακα. Η αξιολόγηση και η ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής των μπαταριών λιθίου των ηλεκτρικών οχημάτων είναι χρήσιμες για την αναγνώριση των σταδίων του μεγαλύτερου περιβαλλοντικού φορτίου των μπαταριών και για την εύρεση αποτελεσματικών τρόπων μείωσης αυτών των επιπτώσεων, προωθώντας έτσι τη βιώσιμη ανάπτυξη των μπαταριών (Sun et al., 2020)

Τα στάδια του κύκλου ζωής των μπαταριών λιθίου που μελετώνται είναι:

- Εξόρυξη πρώτων υλών
- Παραγωγή υλικών/Συναρμολόγηση
- Παραγωγή προϊόντος (μπαταρίας λιθίου)
- Χρήση προϊόντος (μπαταρίας λιθίου)
- Τέλος ζωής προϊόντος (επαναχρησιμοποίηση, απόρριψη, ανακύκλωση)

### 3.5 Πεδίο εφαρμογής μελέτης

Η παρούσα εργασία εκτιμά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε κάθε στάδιο ζωής των μπαταριών λιθίου, από την γέννηση ως τον θάνατο, όπως συχνά αναφέρεται «from cradle to gate». Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Η αναζήτηση των άρθρων έγινε μέσω των βιβλιοθηκών Science Direct, Emerald και Taylor & Francis. Οι λέξεις κλειδιά που αναζητήθηκαν ήταν “Life Cycle Assessment of LIBs”, “carbon footprint of LIBs”, “Recycling of LIBs”, “Production of LIBs”, “Assembly of LIBs”, “review of LCA of LIBs” “End of life of LIBs” και “Reducing carbon footprint of LIBs”. Συνολικά, μελετήθηκαν 78 άρθρα, από τα οποία αφαιρέθηκαν τα 12 λόγω μη σχετικότητας με το υπό μελέτη αντικείμενο. Η εναπομείνουσα βιβλιογραφία που μελετήθηκε, αντλούσε δεδομένα μετρήσεων από βάσεις δεδομένων όπως είναι οι “Ecoinvent”, “CCaLC2”, “NAATBatt”, “Gabi”, “Simapro”, “Mobius” και “Open LCA”. Συγκεντρώθηκαν δεδομένα μετρήσεων και συμπεράσματα για κάθε στάδιο του κύκλου ζωής μιας μπαταρίας λιθίου.

### 3.6 Περιγραφή προϊόντος - Λειτουργική μονάδα

Το προϊόν στην παρούσα εργασία είναι η μπαταρία λιθίου των ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων. Έγινε σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών τύπων των μπαταριών λιθίου και των διαφορετικών υλικών τους στην άνοδο και στην κάθοδο και αναλύθηκε το ανθρακικό αποτύπωμα των μπαταριών.

Στόχος της λειτουργικής μονάδας είναι να υπάρχει μία αναφορά, βάση του προτύπου ISO 14040. Στην προκειμένη περίπτωση είναι η ανάλυση του κύκλου ζωής των μπαταριών λιθίου η οποία αποτελεί την βάση για την ευκολότερη σύγκριση μεταξύ των δεδομένων και των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του κύκλου ζωής από οποιαδήποτε χώρα.

### 3.8 Όρια του συστήματος

Τα όρια του συστήματος της ανάλυσης του κύκλου ζωής των μπαταριών λιθίου είναι από τη γέννηση στον θάνατο, όπως αναφέρεται “from cradle to gate” και είναι τα στάδια της εξόρυξης των πρώτων υλών, της παραγωγής των υλικών, της συναρμολόγησης και έπειτα της παραγωγής του προϊόντος, το στάδιο κατά τη χρήση του προϊόντος, η φυσιολογική φθορά της μπαταρίας που οδηγεί στην απόρριψη και την επαναχρησιμοποίηση της σε άλλες εφαρμογές και τέλος, η ανακύκλωση της.



### **3.9 Εκτίμηση ποιότητας δεδομένων**

Τα δεδομένα της εργασίας προέρχονται από δευτερογενή δεδομένα, δηλαδή πηγές βιβλιογραφίας και βάσεις δεδομένων που έχουν αναφερθεί και από προγενέστερες αναλύσεις του κύκλου ζωής των μπαταριών λιθίου. Η χρονική περίοδος της βιβλιογραφίας που επιλέχθηκε είναι για τα έτη 2019-2024.

## 4. Ανθρακικό αποτύπωμα των μπαταριών λιθίου ανά στάδιο του κύκλου ζωής και οι οικολογικοί δείκτες

### 4.1 Μπαταρίες λιθίου

Η γρήγορη ανάπτυξη της οικονομίας βάσει των απαιτήσεων της κοινωνίας, έχει προωθήσει την αστικοποίηση σε παγκόσμιο επίπεδο, η οποία έχει αυξήσει περαιτέρω τη ζήτηση για αυτοκίνητα (Nimesh et al., 2021). Ωστόσο, τα περισσότερα συμβατικά αυτοκίνητα είναι εσωτερικής καύσης (ICEVs) και κινούνται κυρίως με ορυκτά καύσιμα. Η μαζική χρήση των ICEVs έχει προκαλέσει ενεργειακά και περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση, η εξάντληση των ορυκτών πόρων και η έλλειψη ενέργειας (Marmioli et al., 2020). Για τον λόγο αυτόν, πολλές χώρες προωθούν ενεργά την ηλεκτροκίνηση στον τομέα των μεταφορών και ενθαρρύνουν τη χρήση ηλεκτρικών ως εναλλακτική λύση έναντι των συμβατικών οχημάτων (Verma et al., 2021).

Η μπαταρία που χρησιμοποιείται στα ηλεκτρικά οχήματα είναι η μπαταρία λιθίου. Οι μπαταρίες λιθίου κυκλοφόρησαν στην αγορά το 1990 και έκτοτε χρησιμοποιούνται ευρέως σε πλήθος εφαρμογών, όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα, τα tablets, τα ηλεκτρικά ποδήλατα, οι ψηφιακές κάμερες, οι φορητοί υπολογιστές, οι ιατρικές συσκευές, η αποθήκευση ενέργειας και τα τελευταία χρόνια στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (LIBs) έχουν σημειώσει σημαντική πρόοδο την τελευταία δεκαετία και αποτελούν πλέον μια αξιόπιστη τεχνολογία. Για κινητές εφαρμογές, είναι ήδη η κυρίαρχη τεχνολογία και το μερίδιο τους για σταθερά ενεργειακά συστήματα αυξάνεται συνεχώς (Europa Eu, <https://www.europarl.europa.eu/topics/el/article/20190313STO31218/ekpompes-co2-oso-kathara-einai-ta-ilektrika-autokineta-grafima>).

Στον τομέα των μεταφορών, η παγκόσμια μετάβαση από οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης (ICEVs) σε ηλεκτρικά οχήματα (EVs) έχει αναγνωριστεί ευρέως ως ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους για την αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης (Kumar and Alok, 2020). Η Διεθνής Υπηρεσία Ενέργειας (IEA, International Energy Agency) εκτίμησε ότι ο παγκόσμιος στόλος ηλεκτρικών οχημάτων για το 2021 ανήλθε στα 10 εκατομμύρια και αναμένεται να φτάσει στα 124-199 εκατομμύρια έως το 2030 (IEA, 2022). Λόγω των πρόσφατων πολιτικών κινήτρων που δόθηκαν και της συνεχούς καινοτομίας στην τεχνολογία των μπαταριών και στα επιχειρηματικά μοντέλα, αναμένεται ότι το μέγεθος του παγκόσμιου στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων θα αυξηθεί στα 970-1940 εκατομμύρια EVs μέχρι το 2050 (Xu et al., 2020). Η Κίνα αποτελεί παγκοσμίως τον μεγαλύτερο πωλητή

ηλεκτρικών οχημάτων και ακολουθούν οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Γερμανία, η Νορβηγία, η Γαλλία και το Ηνωμένο Βασίλειο (IEA, 2021).

Με την αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρικά οχήματα αυξήθηκε και η ζήτηση για τις μπαταρίες λιθίου. Η μπαταρία ιόντων λιθίου αποτελεί την επικρατέστερη τεχνολογία, λόγω των χαρακτηριστικών της όπως είναι η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα (αποθήκευση μεγάλης ποσότητας ενέργειας), η υψηλή απόδοση, οι γρήγοροι ρυθμοί φόρτισης, η μεγάλη διάρκεια ζωής, το χαμηλό κόστος και το μικρό βάρος της. Η επικράτηση τους στην αγορά κατέστησε αναγκαία την μελέτη των περιβαλλοντικών της επιπτώσεων, οι οποίες αποτυπώνονται με τη μέθοδο της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής.

Μια μπαταρία λιθίου αποτελείται από:

- Το θετικό ηλεκτρόδιο ή υλικό καθόδου
- Το αρνητικό ηλεκτρόδιο ή υλικό ανόδου
- Τον ηλεκτρολύτη και
- Τους διαχωριστές

#### Θετικό ηλεκτρόδιο ή υλικό καθόδου

Για την ενεργό ύλη ενός θετικού ηλεκτροδίου ή καθόδου χρησιμοποιείται ένα οξείδιο μετάλλου, το οποίο μπορεί να είναι  $\text{LiCoO}_2$  (LCO),  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  (LMO),  $\text{LiFePO}_4$  (LFP),  $\text{LiNiCoMnO}_2$  (NMC) και  $\text{LiNiCoAlO}_2$  (NCA). Τα προαναφερόμενα επικολλώνται με συνδετικό υλικό το οποίο συνήθως είναι άνθρακας ή γραφίτης σε φύλλο αλουμινίου το οποίο αποτελεί τον συλλέκτη ρεύματος.

#### Αρνητικό ηλεκτρόδιο ή υλικό ανόδου

Για την ενεργό ύλη ενός αρνητικού ηλεκτροδίου ή ανόδου χρησιμοποιούνται ενώσεις του γραφίτη, οι οποίες επικολλώνται με συνδετικό υλικό σε φύλλο χαλκού και αποτελούν τον συλλέκτη ρεύματος.

#### Ηλεκτρολύτης

Ο ηλεκτρολύτης (σε υγρή μορφή) στις μπαταρίες λιθίου αποτελείται από άλατα λιθίου όπως είναι το  $\text{LiPF}_6$  (εξαφθοροφωσφορικό λίθιο),  $\text{LiBF}_4$  (τετραφθοροβορικό λίθιο) ή  $\text{LiClO}_4$  (υπερχλωρικό λίθιο) σε οργανικό διαλύτη όπως είναι το ανθρακικό αιθυλένιο (ethylene

carbonate ή EC), το ανθρακικό διμεθύλιο (dimethyl carbonate ή DMC) και το ανθρακικό διαιθύλιο (diethylene carbonate ή DEC) (Younesi et al., 2015).

### Διαχωριστής

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου χρησιμοποιούν μικροπορώδεις μεμβράνες υψηλής αντοχής με βάση την πολυολεφίνη. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι διαχωριστές περιλαμβάνουν μικροπορώδεις διαχωριστές πολυπροπυλενίου (PP) και πολυαιθυλενίου (PE) καθώς και συνδυασμούς προπυλενίου και αιθυλενίου.

Μια μπαταρία ιόντων λιθίου αποτελεί μια επαναφορτιζόμενη συσκευή αποθήκευσης ενέργειας, όπου τα ιόντα λιθίου μετακινούνται από το αρνητικό ηλεκτρόδιο μέσω ενός ηλεκτρολύτη προς το θετικό ηλεκτρόδιο κατά την εκφόρτιση, και στην αντίθετη κατεύθυνση κατά τη φόρτιση (Qiao & Wei, 2012). Ανάμεσα στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας και της χαμηλού ρυθμού αυτοεκφόρτισης (Sasaki et al., 2013).

Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι τύποι μπαταριών ιόντων λιθίου διαχωρίζονται με βάση το υλικό που χρησιμοποιείται στο θετικό ηλεκτρόδιο ή υλικό καθόδου και είναι:

- LMO - Μπαταρίες οξειδίου μαγγανίου λιθίου ( $\text{LiMnO}_4$ )
- NMC - Μπαταρίες οξειδίου νικελίου κοβαλτίου μαγγανίου λιθίου ( $\text{LiNiCoMnO}_2$ )
- LFP - Μπαταρίες φωσφορικού σιδήρου λιθίου ( $\text{LiFePO}_4$ )
- NCA - Μπαταρίες οξειδίου νικελίου κοβαλτίου αλουμινίου λιθίου ( $\text{LiNiCoAlO}_2$ )

Ο παραπάνω διαχωρισμός γίνεται βάσει των διαφορετικών αναλογιών των υλικών από τα οποία κατασκευάζονται. Η διαφορά αυτή έχει ως αποτέλεσμα τις διαφορετικές ιδιότητες τους που συνεπάγονται και διαφορετικές αποδόσεις (διάρκεια ζωής, ενεργειακή πυκνότητα κ.α.) (Zhao et al., 2019).

Σε σύγκριση με προηγούμενες τεχνολογίες μπαταριών, όπως νικελίου-καδμίου (Ni-Cd), μολύβδου-οξέος (Pb-Ac) και υδριδίου νικελίου-μετάλλου (NiMH) (Matheys et al., 2009; Matheys et al., 2007; Steele and Allen, 1998), οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (LIBs) έχουν το πλεονέκτημα τόσο της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας και της υψηλής αξιοπιστίας όσο και το ότι είναι φιλικές προς το περιβάλλον (Fan et al., 2020; Hua et al., 2021). Έτσι, οι

μπαταρίες λιθίου, όπως οι μπαταρίες φωσφορικού λιθίου (LFP), οι λιθίου-νικελίου-κοβαλτίου-μαγγανίου (NMC) και οι λιθίου-μαγγανίου (LMO) χρησιμοποιούνται ευρέως στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα (Cusenza et al., 2019; Hao et al., 2017; Marques et al., 2019; Shu et al., 2021). Βάσει της πυκνότητας του υλικού μιας μπαταρίας λιθίου, οι Kushnir και Sandén (2012) εκτιμούν ότι τα 200 γραμμάρια λιθίου ανά kWh χωρητικότητας της μπαταρίας είναι μια λογική προσέγγιση για την απαιτούμενη ποσότητα λιθίου για τις τρέχουσες σχεδιάσεις μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων. Με την πρόοδο της τεχνολογίας, αναμένεται να μειωθεί στα 160 γραμμάρια λιθίου ανά kWh (Kushnir et al., 2012). Προς το παρόν, για την μπαταρία ενός υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος με χωρητικότητα 9 kWh απαιτούνται περίπου 1,8 κιλά λιθίου ενώ για ένα ηλεκτρικό όχημα (EV) με χωρητικότητα 36 kWh απαιτούνται 7,2 κιλά λιθίου.

Ενώ ορισμένοι συγγραφείς (Evans, 2014; Gruber et al., 2011) διαβεβαιώνουν ότι η εξάντληση του λιθίου δεν αποτελεί σοβαρή απειλή, άλλοι τονίζουν τη σημασία της ταχείας εισαγωγής αποδοτικών μέτρων ανακύκλωσης του (Grosjean et al., 2012; Mohr et al., 2012). Άλλοι (Tahil, 2007; Vikström et al., 2013) δηλώνουν ότι δεν έχει εξασφαλιστεί η διαθεσιμότητα του λιθίου και ότι οι ρυθμοί εξόρυξης του μπορεί να θέσουν σοβαρά προβλήματα ανταγωνιστικότητας μεταξύ των αγορών.

#### 4.2 Ανθρακικό αποτύπωμα των μπαταριών λιθίου

Η ηλεκτροκίνηση στον τομέα των μεταφορών είναι καθοριστική για τη μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2017). Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου βρίσκονται στο επίκεντρο της ηλεκτροκίνησης, απαιτώντας πόρους λιθίου με υψηλή καθαρότητα (πάνω από 99,5%) που θα τις καθιστούν κατάλληλες για τα ηλεκτρικά οχήματα (Choe et al., 2024; Quinteros-Condoretti et al., 2021).

Το ανθρακικό αποτύπωμα αποτελεί υποσύνολο του οικολογικού αποτυπώματος (Johnson, 2008). Το οικολογικό αποτύπωμα εκφράζει τις εκπομπές άνθρακα και χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHGs) οι οποίες προέρχονται από προϊόντα, διεργασίες, άτομα ή οργανισμούς. Οι Wiedmann και Minx (2007) ορίζουν το ανθρακικό αποτύπωμα ως τις εκπομπές CO<sub>2</sub> που προκαλούνται από διεργασίες κατά τη διάρκεια ολόκληρου του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας. Οι περισσότερες διεργασίες εκπέμπουν και άλλες μορφές αερίων θερμοκηπίου (N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, HFC) που επίσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Το αποτύπωμα άνθρακα χρησιμοποιείται συχνά και

αναφέρεται στις συνολικές άμεσες και έμμεσες εκπομπές CO<sub>2</sub> και άλλων αερίων του θερμοκηπίου, ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας.

Ο υπολογισμός των αερίων του θερμοκηπίου βασίζεται σε πρότυπα και οδηγίες. Τα συνηθέστερα είναι (Pandey et al.,2010):

- Το Πρωτόκολλο των αερίων του θερμοκηπίου ή Πρωτόκολλο GHG του World Resource Institute (WRI)/World Business Council on Sustainable Development (WBCSD)
- Οι οδηγίες ISO 14064
- Οι οδηγίες ISO 14067
- Οι απαιτήσεις Publicly Available Specification (PAS) 2050 - Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services του British Standard Institution (BSI)
- Οι οδηγίες ISO 14025 – Περιβαλλοντική Δήλωση Προϊόντων
- Κατευθυντήριες οδηγίες της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) για τις εθνικές απογραφές αερίων του θερμοκηπίου

Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο είναι το Πρωτόκολλο για τα αέρια του θερμοκηπίου ή αλλιώς Πρωτόκολλο GHG το οποίο διαχωρίζει τις εκπομπές σε τρεις κατηγορίες τα οποία ονομάζει πεδία αναφοράς (scope).

Για την ολοκληρωμένη εικόνα των εκλυόμενων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και τα τρία πεδία αναφοράς, τα οποία είναι:

- Πεδίο αναφοράς 1 : Άμεσες εκπομπές

Περιλαμβάνει τις πηγές των αερίων του θερμοκηπίου που ανήκουν ή λειτουργούν από το προϊόν ή την δραστηριότητα. Τέτοια είναι η άμεση κατανάλωση των καυσίμων, που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία ή την τροφοδοσία (κλίβανοι, λέβητες) αλλά και από τα οχήματα που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά των υλικών και τη διανομή του προϊόντος.

- Πεδίο αναφοράς 2 : Έμμεσες εκπομπές

Περιλαμβάνει τις πηγές αερίων του θερμοκηπίου που εκλύονται από την ενέργεια που καταναλώνεται για άμεση χρήση ή για την παραγωγή. Τέτοιες είναι η ηλεκτρική ενέργεια, η ψύξη, η θερμότητα ή ο ατμός

- Πεδίο αναφοράς 3 : Άλλες έμμεσες εκπομπές

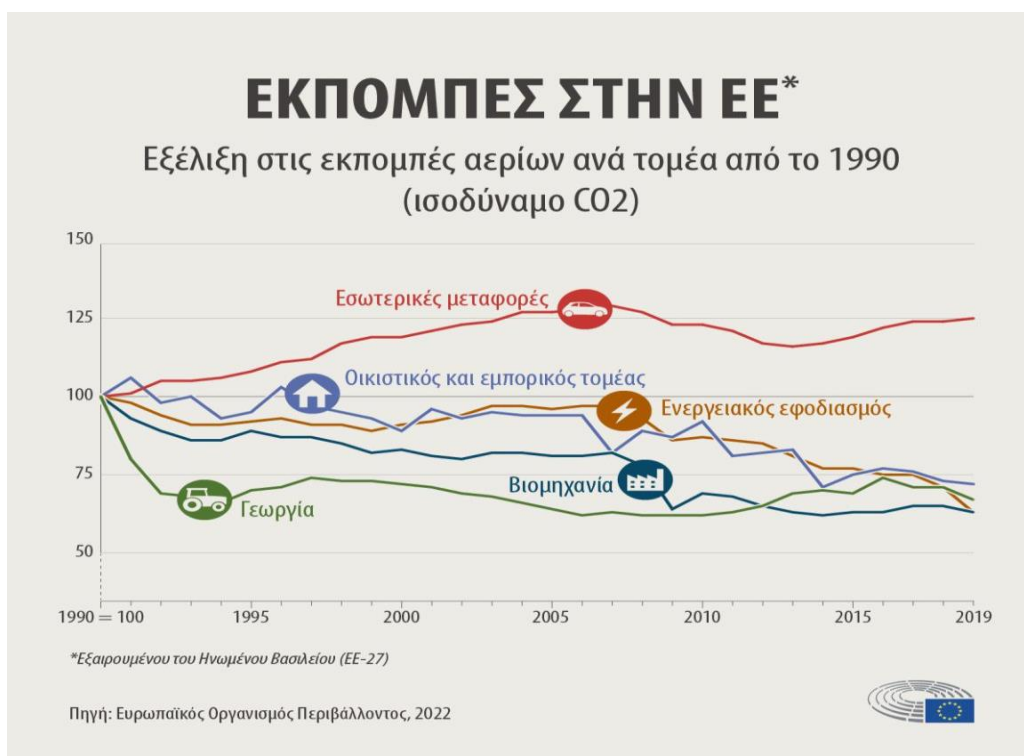
Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται εκπομπές που εκλύονται κατά τη μεταφορά και την κατασκευή του προϊόντος ή της διεργασίας. Οι εκπομπές αυτές προέρχονται από την μετακίνηση των εργαζομένων από και προς την εργασία, πιθανά επαγγελματικά ταξίδια, διάφορες προμήθειες (χημικά αντιδραστήρια, γραφική ύλη κ.α.) και υπηρεσίες, συσκευασία και μεταφορά αγαθών.

Ο υπολογισμός του ανθρακικού αποτυπώματος γίνεται με την ποσοτικοποίηση των εκλυόμενων εκπομπών άνθρακα σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής ώστε να υπολογιστεί το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα των μπαταριών λιθίου (Chen et al., 2023). Η μονάδα αναφοράς που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση είναι το κιλό ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα ανά κιλοβατώρα ( $\text{kgCO}_2\text{eq/kWh}$ ) (Chen et al., 2023). Ο όρος ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2\text{-eq}$ ) που χρησιμοποιείται ευρέως στις αξιολογήσεις του ανθρακικού αποτυπώματος, αποτελεί παγκόσμια μονάδα μέτρησης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και εκφράζει το διαφορετικό δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη που έχει κάθε αέριο. Η ποσότητα κάθε εκπεμπόμενου αερίου μετατρέπεται σε ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2\text{-eq}$ ), ώστε να μπορεί να εκφραστεί ως ένας ενιαίος αριθμός, ο συνολικός αντίκτυπος από όλες τις πηγές (EuropaEU, [https://www.eca.europa.eu/lists/ecadocuments/sr14\\_14/qjab14014elc.pdf](https://www.eca.europa.eu/lists/ecadocuments/sr14_14/qjab14014elc.pdf)).

Για να επιτευχθεί μια άρτια αξιολόγηση του παγκόσμιου ανθρακικού αποτυπώματος, θα πρέπει να συνυπολογιστούν παράγοντες όπως είναι η χημική σύνθεση των μπαταριών, η περιοχή κατασκευής τους, οι εφαρμογές τους, οι μέθοδοι επεξεργασίας τους, το ενεργειακό μείγμα το οποίο χρησιμοποιείται για τις απαραίτητες διεργασίες αλλά και το ποσοστό ανάκτησης των χρησιμοποιούμενων υλικών κατά την ανακύκλωση τους. Ο υπολογισμός του ανθρακικού αποτυπώματος συμβάλλει στη χάραξη στρατηγικών για την επίτευξη



μείωσης ή μηδενισμού του και οι μετρήσεις είναι εύκολα συγκρίσιμες σε οποιοδήποτε χρόνο και σε οποιαδήποτε χώρα.



**Εικόνα 4. Εξέλιξη των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά τομέα από στην ΕΕ (1990-2019) (Πηγή: (Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος, 2022))**

Στην εικόνα 4 απεικονίζεται η συνεισφορά των εσωτερικών μεταφορών στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, καθώς είναι ο μοναδικός τομέας που σημείωσε αύξηση κατά 35% από το 1990 έως το 2019. Βάσει των μετρήσεων του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος, σχεδόν το 67% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου οφείλονται στα αυτοκίνητα. Επίσης, σύμφωνα με τις προβλέψεις του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος, η μείωση των εκλυόμενων εκπομπών από τις μεταφορές, αναμένεται να μειωθούν μόνο κατά 21% έως το 2050. Υπό τις τρέχουσες τεχνικές συνθήκες, ο αντίκτυπος των μπαταριών λιθίου στην περιβαλλοντική απόδοση των ηλεκτρικών οχημάτων δεν είναι σαφής.

Για την εξόρυξη των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες λιθίου, αξίζει να σημειωθεί ότι το ανθρακικό αποτύπωμα επηρεάζεται από παράγοντες όπως είναι όπως η πηγή του ορυκτού και των πρώτων υλών, η διαδικασία εξόρυξής τους, το μείγμα της



ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται, η ποσότητα των ορυκτών καυσίμων που απαιτούνται για την παραγωγή, τα υλικά και τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιούνται, καθώς και η μεταφορά.

Όσον αφορά στα υλικά των μπαταριών λιθίου, το ενεργό υλικό της καθόδου (οξείδια μετάλλου) της μπαταρίας και το αλουμίνιο εκλύουν μεγάλες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου (Dai et al., 2019) και κάποιες διαδικασίες ανακύκλωσής τους απαιτούν μεγάλα ποσά ενέργειας (Yuan et al., 2017).

Στη φάση παραγωγής, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> των ηλεκτρικών οχημάτων κυμαίνονται μεταξύ 14,6 και 14,7 τόνων CO<sub>2</sub>, που είναι 50-60% υψηλότερες έναντι των συμβατικών αυτοκινήτων, οι οποίες ανέρχονται στους 9,2 τόνους CO<sub>2</sub> (Qiao κ.ά., 2017). Η παραγωγή των μπαταριών λιθίου είναι ο κύριος συνεισφέρων στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα (Kim κ.ά., 2016). Οι Girardi et al (2015) υπογράμμισαν ότι η παραγωγή των μπαταριών λιθίου των ηλεκτρικών οχημάτων έχει μεγαλύτερη επίδραση στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από ότι τα συμβατικά αυτοκίνητα. Επομένως, το στάδιο της παραγωγής των μπαταριών λιθίου έχει το μεγαλύτερο ανθρακικό αποτύπωμα. Τα δίκτυα ισχύος που χρησιμοποιούν την πράσινη ενέργεια βοηθούν στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος των ηλεκτρικών οχημάτων, γεγονός που αντισταθμίζει την περιβαλλοντική τους επίδραση κατά τη φάση παραγωγής.

Κατά τη φάση χρήσης, τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν τις λιγότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου άρα το μικρότερο ανθρακικό αποτύπωμα, αν και αυτό σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με το μείγμα της ισχύος που χρησιμοποιείται.

Επιπλέον, κατά την ανακύκλωση των μπαταριών λιθίου ανακτώνται πολύτιμα μέταλλα όπως και το λίθιο, γεγονός που μειώνει την ποσότητα των απαραίτητων για τις μπαταρίες πόρων και μειώνει αποτελεσματικά τις εκπομπές CO<sub>2</sub> και SO<sub>2</sub>, αφού δεν απαιτείται η εξόρυξη πρώτων υλών.

Συνολικά για τον κύκλο ζωής, η χρήση ορυκτών καυσίμων και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου των ηλεκτρικών οχημάτων έχουν χαμηλότερες εκπομπές άρα μικρότερο ανθρακικό αποτύπωμα έναντι των συμβατικών αυτοκινήτων με κινητήρα εσωτερικής καύσης, ενώ έχουν υψηλότερες εκπομπές σε σχέση με τα συμβατικά αυτοκίνητα όσον αφορά στους δείκτες του Ευτροφισμού Υδάτων/Εδάφους (EP), των τοξικών/καρκινογόνων ουσιών για τον άνθρωπο (HT) και της δημιουργίας επιβλαβών για το οικοσύστημα

αιωρούμενων σωματιδίων (PM) (Burchart-Korol κ.ά., 2018; Qiao κ.ά., 2020). Οι προαναφερθέντες δείκτες, θα αναλυθούν εκτενέστερα στην επόμενη ενότητα.

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) είναι η προτιμώμενη μέθοδος για την επιστημονική κοινότητα όσον αφορά στην αξιολόγηση του περιβαλλοντικού φορτίου που εκλύει ένα προϊόν ή μια διεργασία σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους (European EU).

#### 4.3 Οικολογικοί δείκτες των μπαταριών λιθίου

Ένα σημαντικό βήμα για την μέθοδο της AKZ είναι η φάση χαρακτηρισμού, η οποία αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα και αναθέτει τα αποτελέσματα της Ανάλυσης των Επιπτώσεων του Κύκλου Ζωής (Life Cycle Impact Analysis, LCIA) στις αντίστοιχες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, εκφρασμένες ως διαφορετικές κατηγορίες επιπτώσεων με τους αντίστοιχους δείκτες (Van Den Heede & De Belie, 2012).

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες των παραγόντων της ανάλυσης των επιπτώσεων στον κύκλο ζωής (Zhou et al):

- Παράγοντες προσανατολισμένοι στο μέσο πρόβλημα (midpoint)
- Παράγοντες τελικού σημείου προσανατολισμένοι στη βλάβη (endpoint)

Οι παράγοντες τελικού σημείου προσανατολισμένοι στη βλάβη (endpoint) παρέχουν μία λεπτομερή ανάλυση των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία ή στο περιβάλλον ενώ οι παράγοντες μέσου σημείου περιγράφουν τα προβλήματα που παράγονται από το σύστημα (Zhou et al).

Κάποιοι από τους δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων που χρησιμοποιούνται συνήθως για να μετρήσουν τον αντίκτυπο ενός προϊόντος ή μιας δραστηριότητας στο περιβάλλον είναι (McClelland et al., 2018):

1. Δυναμικό Παγκόσμιας θέρμανσης ή αλλαγή του κλίματος (Climate change or global warming potential)
2. Μείωση του στρώματος του όζοντος (Ozone depletion)
3. Δημιουργία όζοντος (OF)
4. Οικοτοξικότητα (Ecotoxicity)
5. Αιωρούμενα Σωματίδια (Particulate matter)
6. Ευτροφισμός (Eutrophication)
7. Ιοντίζουσα ακτινοβολία (Ionizing radiation)

8. Εξάντληση πόρων (συμπεριλαμβανομένων βιωτικών και αβιωτικών πόρων, όπως ορυκτά καύσιμα, ηλεκτρισμός, νερό κ.λπ.) (Resource depletion)
9. Οξίνιση (Acidification)
10. Βιοποικιλότητα (Biodiversity)
11. Τοξικών/καρκινογόνων ουσιών για τον άνθρωπο (Human toxicity)
12. Χρήση γης (Land Use)
13. Χρήση νερού (Water Use)
14. Δυναμικό δημιουργίας φωτοχημικού όζοντος ή δημιουργία φωτο-οξειδωτικών (Photochemical ozone formation or photo-oxidant formation)
15. Ενεργειακή κατανάλωση (Energy Consumption)

Παρακάτω αναλύονται οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

#### 1. Δυναμικό Παγκόσμιας θέρμανσης ή αλλαγή του κλίματος

Τα λεγόμενα «φυσικά αέρια του θερμοκηπίου» είναι τα αέρια που υπάρχουν ήδη στην ατμόσφαιρα όπως είναι το διοξείδιο του άνθρακα, οι υδρατμοί, το όζον, το μεθάνιο και το υποξείδιο του αζώτου και συγκρατούν τη θερμική ακτινοβολία ώστε να μην διαφύγει στο διάστημα. Σε μία τέτοια περίπτωση ο πλανήτης θα γινόταν ψυχρότερος. Η ανθρώπινη δραστηριότητα και η χρήση ορυκτών καυσίμων απελευθερώνουν τα ανθρωπογενή αέρια του θερμοκηπίου, με αποτέλεσμα η ατμόσφαιρα να απορροφά περισσότερη θερμική ακτινοβολία από ότι πριν, συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη είναι ένας συντελεστής που μετρά την ικανότητα του αερίου να δεσμεύει τη θερμότητα στην ατμόσφαιρα της Γης και για πόσο χρόνο μένουν στην ατμόσφαιρα. Μετατρέπεται συνήθως σε ισοδύναμο του CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>-eq) ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Ο δείκτης της παγκόσμιας υπερθέρμανσης έχει τη μεγαλύτερη συμβολή στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα.

#### Οξίνιση

Η οξίνιση είναι ένα δείκτης αξιολόγησης για τη μέτρηση των εκπεμπόμενων ενώσεων οι οποίες συμβάλλουν στη σύσταση της όξινης βροχής. Οι ενώσεις αυτές είναι το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>), τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>), το διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>), μονοξείδιο του αζώτου (NO) και άλλες (AlShafi και Bicer, 2021). Τα προαναφερόμενα εκλύονται στην

ατμόσφαιρα μέσω των αέριων εκπομπών και των βιομηχανικών αποβλήτων και έχουν σοβαρές επιπτώσεις όχι μόνο για το έδαφος και τα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα αλλά και για τους οργανισμούς και τα οικοσυστήματα. Η επίδραση της οξίνισης εκφράζεται με τη μονάδα ισοδύναμου  $\text{SO}_2$  ( $\text{kg SO}_2\text{-eq/kWh}$ ). Η μεγαλύτερη συνεισφορά του δείκτη της οξίνισης σημειώνεται κατά την παραγωγή της καθόδου και αυτό συμβαίνει γιατί η παρασκευή των πρώτων υλών (όπως το θειϊκό νικέλιο και το θειϊκό κοβάλτιο) απαιτεί μεγάλες συγκεντρώσεις θειϊκού οξέος. Το συγκεντρωμένο θειϊκό οξύ θα παράγει  $\text{SO}_2$  στη χημική αναγωγή, το οποίο είναι το κύριο υλικό για τη δημιουργία της όξινης βροχής. Οι μπαταρίες LFP χρησιμοποιούν λιγότερο θειϊκό οξύ κατά την παρασκευή τους. Συνεπώς, ο δείκτης οξίνισης κατά το στάδιο της παραγωγής των μπαταριών LFP είναι πολύ μικρότερος ( $0,472 \text{ kg SO}_2\text{-eq/kWh}$ ) από εκείνον των μπαταριών NCM. Για τις μπαταρίες NCM, ο δείκτης οξίνισης από την παραγωγή της καθόδου αυξάνεται με την αύξηση της ποσότητας του θειϊκού νικελίου. Οι υπολογισμοί μας δείχνουν ότι το  $\text{SO}_2$  που παράγεται από 1 τόνο θειϊκού νικελίου, θειϊκού κοβαλτίου και θειϊκού μαγγανίου είναι αντίστοιχα 14,459 kg, 11,221 kg και 5,986 kg. Με την εξέλιξη των μπαταριών και χρησιμοποιώντας υψηλές συγκεντρώσεις νικελίου, ο δείκτης οξίνισης που προκύπτει από την παραγωγή των μπαταριών χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή.

### Ευτροφισμός

Ο δείκτης ευτροφισμού αντικατοπτρίζει το δείκτη εμπλουτισμού θρεπτικών στοιχείων σε εδάφη ή νερά τα οποία είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη και τη διαβίωση κάθε οργανισμού στον πλανήτη. Ο δείκτης ευτροφισμού οφείλεται στον υπέρμετρο εμπλουτισμό του υδάτινου οικοσυστήματος ή του εδάφους με άζωτο και φώσφορο (Nazari-Sharabian et al., 2018) και είναι αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας (γεωργία, κτηνοτροφία, λιπάσματα κ.α.). Η επίδραση του δείκτη ευτροφισμού αξιολογείται με τη μονάδα ισοδύναμου φωσφόρου ( $\text{kg P-eq/kWh}$ ). Η παραγωγή των υλικών της ανόδου αποτελεί περίπου το 50% του συνολικού δείκτη ευτροφισμού κατά την παραγωγή της μπαταρίας. Αυτό συμβαίνει διότι η παρασκευή των πρώτων υλών των υλικών της καθόδου παράγει υγρά απόβλητα τα οποία περιέχουν αμμωνία και η αμμωνία είναι ο κύριος παράγοντας που οδηγεί στον ευτροφισμό. Επιπλέον, υπάρχουν παρόμοια χημικά και κατά την παραγωγή των υλικών της καθόδου και των ηλεκτρολυτών, τα οποία επίσης οδηγούν στον ευτροφισμό. Παρατηρείται ότι ο δείκτης ευτροφισμού για την μπαταρία LFP είναι ελαφρώς

μεγαλύτερος από αυτόν της μπαταρίας NCM, καθώς για την παραγωγή της καθόδου της μπαταρίας LFP απαιτούνται φωσφορικό οξύ και άλλα υλικά.

#### Δυναμικό δημιουργίας φωτοχημικού όζοντος

Το όζον συναντάται στην ατμόσφαιρα και είναι απαραίτητο για την απορρόφηση επιβλαβών για τον πλανήτη ακτινοβολιών (υπεριώδης ακτινοβολία), αποτρέποντάς τες να εισέλθουν στην ατμόσφαιρα. Το όζον επίσης επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την ανθρώπινη δραστηριότητα καθώς η εξάντληση του στρώματος οφείλεται σε ποσοστό 80% στην εκπομπή χλωροφθορανθράκων (πτητικές ενώσεις-υγρά ψυγείων και κλιματιστικών). Άλλες εκλυόμενες ουσίες που συμβάλλουν στην καταστροφή του στρώματος του όζοντος είναι οι πτητικές ενώσεις και οι υδροφθοράνθρακες. Το δυναμικό δημιουργίας φωτοχημικού όζοντος είναι ένας δείκτης αξιολόγησης του βαθμού φωτοχημικού οξειδωτικού άντλησης εκπομπών αερίων εκπομπών (Andersson-Skold και Holmberg, 2000). Όταν η συγκέντρωση του όζοντος φτάσει σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, δημιουργεί τοξικότητα η οποία μπορεί να επηρεάσει άμεσα την ανθρώπινη υγεία, δημιουργώντας προβλήματα όπως είναι η αναπνευστική παράλυση, η δυσλειτουργία των πνευμόνων ακόμα και την καταστροφή του οικοσυστήματος (Holm και Balmes, 2021). Η επίδραση του δυναμικού δημιουργίας φωτοχημικού όζοντος αξιολογείται με μονάδα ισοδύναμου αιθανίου ( $\text{kg αιθανίου-eq/kWh}$ ). Με την αύξηση του περιεχομένου νικελίου στις μπαταρίες NCM, ο δείκτης αυξάνεται επίσης ενώ για την μπαταρία LFP είναι πολύ μικρότερο. Αυτό συμβαίνει διότι η ρύπανση φωτοχημικής οξείδωσης που προκαλείται από την παραγωγή θειϊκού νικελίου είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από εκείνη που προκαλείται από το θειϊκό κοβάλτιο και το θειϊκό μαγγάνιο.

#### Δημιουργία αιωρούμενων σωματιδίων

Ο δείκτης των αιωρούμενων σωματιδίων αντιπροσωπεύει τη δημιουργία διαφόρων στερεών ή υγρών σωματιδίων που διασπώνται ομοιόμορφα στο σύστημα (Shafique και Luo, 2022). Προηγούμενες μελέτες (Ciabattini et al., 2021., Yang, S. et al., 2021) έχουν δείξει ότι η μακροπρόθεσμη έκθεση στα αιωρούμενα σωματίδια αυξάνει τον κίνδυνο καρκίνου του πνεύμονα. Ο δείκτης αυτός μετρείται σε ισοδύναμο PM2.5 ( $\text{kg PM2.5-eq/kWh}$ ). Αντίθετα, το FPMF των μπαταριών LFP είναι σχετικά μικρό επειδή τα υλικά της καθόδου χρησιμοποιούν ελάχιστα άλατα βαρέων μετάλλων. Επιπλέον, ο δείκτης των αιωρούμενων

σωματιδίων των μπαταριών NCM αυξάνεται με την αύξηση του περιεχομένου νικελίου στα υλικά της καθόδου.

#### Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων

Ο δείκτης της οικοτοξικότητας γλυκών υδάτων αντικατοπτρίζει την επίδραση των ρύπων στην οικολογία των γλυκών υδάτων. Ο δείκτης μετριέται με ισοδύναμο διχλωροβενζόλης (kg DCB-eq/kWh) και παρατηρείται ότι συγκεντρώνεται κυρίως στα στάδια παραγωγής και συναρμολόγησης των υλικών καθόδου, πράγμα που πιθανολογείται ότι οφείλεται σε ρυπαντές βαρέων μετάλλων κατά την παραγωγή της καθόδου και σε τοξικούς ρυπαντές που παράγονται κατά το στάδιο της συναρμολόγησης.

#### Δείκτης ευτροφισμού γλυκών υδάτων

Ο δείκτης ευτροφισμού γλυκών υδάτων ορίζεται ως την συνεχή εισαγωγή θρεπτικών ουσιών στα επιφανειακά ύδατα σε μεγάλο βαθμό. Ο δείκτης αυτός επηρεάζει την ποιότητα του νερού, μειώνει τη διαφάνειά του και δυσκολεύει τη διείσδυση του ηλιακού φωτός επηρεάζοντας έτσι τη φωτοσύνθεση των φυτών που βρίσκονται μέσα σε αυτό. Ο δείκτης αξιολογείται με ισοδύναμο φωσφόρου (kg P-eq/kWh). Κατά τη διάρκεια της παραγωγής των μπαταριών ο δείκτης αυτός είναι παρόμοιος με αυτόν της οικοτοξικότητας των γλυκών υδάτων και συγκεντρώνεται κυρίως κατά την παραγωγή της καθόδου και την συναρμολόγηση των μπαταριών.

#### Ανθρώπινη Τοξικότητα

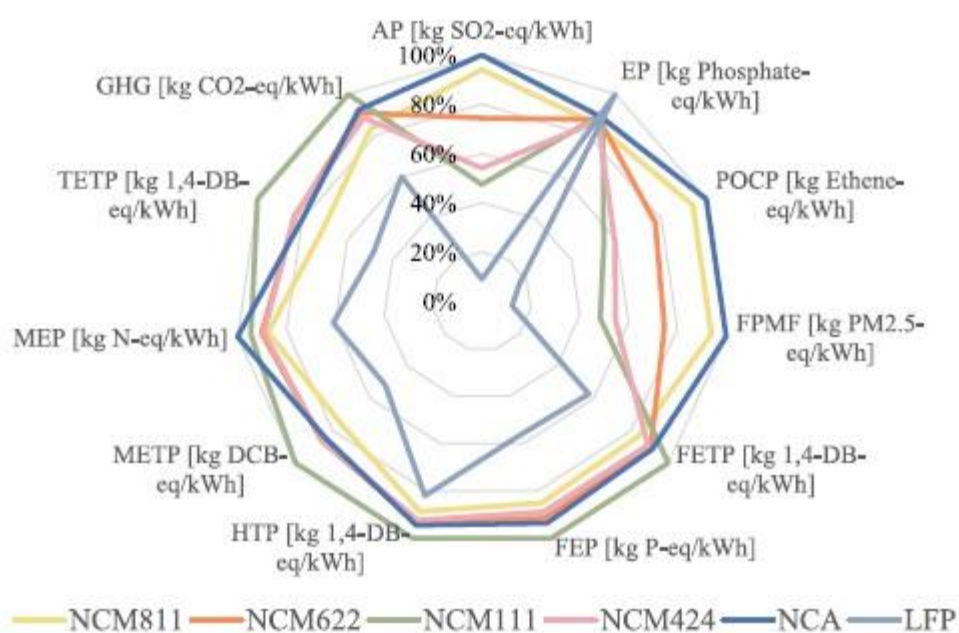
Ο δείκτης της ανθρώπινης τοξικότητας περιγράφει την έκθεση και τις επιπτώσεις των τοξικών ουσιών στο ανθρώπινο σώμα (Singh κ.ά., 2018). Προηγούμενες μελέτες (Hawkins κ.ά., 2013· Senecal και Leach, 2019) έχουν δείξει ότι ο δείκτης της ανθρώπινης τοξικότητας στα ηλεκτρικά οχήματα κατά τη διάρκεια ολόκληρου του κύκλου ζωής τους είναι 180%–290% υψηλότερος σε σύγκριση με αυτόν των οχημάτων εσωτερικής καύσης. Αυτό συμβαίνει γιατί τα ηλεκτρικά οχήματα περιλαμβάνουν σημαντική ποσότητα χαλκού στο σώμα του οχήματος και η μπαταρία περιέχει βαρέα μέταλλα όπως λίθιο, νικέλιο, κοβάλτιο και μαγγάνιο. Ο δείκτης της ανθρώπινης τοξικότητας παρατηρείται κατά την παραγωγή υλικών της καθόδου, κατά τη συναρμολόγηση της μπαταρίας και των αλουμινένιων θηκών των μπαταριών. Ανάμεσα σε αυτά, ο δείκτης που παράγεται κατά την παραγωγή των



καθόδων και των αλουμινένιων θηκών οφείλεται στη ρύπανση από βαρέα μέταλλα, ενώ ο δείκτης που παράγεται κατά τη συναρμολόγηση της μπαταρίας προέρχεται από την κατανάλωση ενέργειας.

#### Δείκτης για την οικοτοξικότητα της Γης

Ο δείκτης αυτός αναφέρεται στη ζημιά που προκαλούν διάφοροι τοξικοί και βλαβεροί παράγοντες στο έδαφος και αποκαλύπτει την επίδραση αυτών των παραγόντων στο οικοσύστημα του (Haye κ.ά., 2007). Παρατηρείται ότι ο δείκτης προέρχεται κυρίως από την παραγωγή των καθόδων και τη συναρμολόγηση της μπαταρίας, ενώ ο δείκτης των μπαταριών LFP προέρχεται κυρίως από τη συναρμολόγηση της μπαταρίας. Τα βαρέα μέταλλα που προκύπτουν από την παραγωγή των καθόδων εισέρχονται στο έδαφος μέσω υδάτινων ρευμάτων και βροχής, οδηγώντας σε διαταραχές του εδάφους. Επιπλέον, η τιμή του δείκτη που προέρχεται από άλλα στάδια είναι πολύ μικρή.



Εικόνα 5. Σύγκριση οικολογικών δεικτών διαφόρων τύπων μπαταριών (Lai et al., 2022)

Η εικόνα 5 δείχνει τη σύγκριση των οικολογικών δεικτών κάποιων τύπων μπαταριών λιθίου κατά το στάδιο παραγωγής. Παρατηρείται ότι οι οικολογικοί δείκτες της παραγωγής μπαταριών λιθίου LFP είναι πολύ μικρότεροι από τους δείκτες των άλλων τύπων μπαταριών

λιθίου. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η τεχνολογία των μπαταριών λιθίου LFP και η παραγωγή τους είναι περισσότερο φιλική προς το περιβάλλον συγκριτικά με τις υπόλοιπες μπαταρίες λιθίου NCM και NCA. Επίσης, η εξέλιξη των μπαταριών λιθίου έναντι των μπαταριών νικελίου μειώνουν τους περιβαλλοντικούς δείκτες και τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον. Τέλος, η μέση συνολική ενεργειακή απαίτηση (CED) και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) για την παραγωγή μπαταριών σε όλες τις χημικές συνθέσεις είναι 328 kWh και 110 kg CO<sub>2</sub>eq ανά kWh χωρητικότητας αποθήκευσης, αντίστοιχα.

#### 4.4 Κύκλος ζωής μιας μπαταρίας λιθίου

Η αυξανόμενη ζήτηση για μπαταρίες λιθίου έχει επιταχύνει την εξόρυξη και την επεξεργασία πολλών κρίσιμων ορυκτών που περιλαμβάνουν λίθιο, κοβάλτιο, μαγγάνιο, νικέλιο και γραφίτη. Η εξόρυξη αυτών των στοιχείων από το φλοιό της Γης συνδέεται αναπόφευκτα με την παραγωγή παραπροϊόντων, οδηγώντας σε διάφορες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση τέτοιων παραπροϊόντων σε μια «αλυσίδα ελέγχου» ώστε να αναδειχθούν οι περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις (Zhou et al., 2024). Ο έλεγχος αυτός μπορεί να επιτευχθεί με την αξιολόγηση του κύκλου ζωής, η οποία παρέχει μια συστηματική προσέγγιση για την ανάλυση της ενσωμάτωσης των παραπροϊόντων σε μια κυκλική οικονομία και την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του προϊόντος. (Zhou et al., 2024). Σύμφωνα με τα παραπάνω, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση του περιβαλλοντικού φορτίου των μπαταριών ιόντων λιθίου (LIBs).

Ο κύκλος ζωής που ακολουθεί μια μπαταρία λιθίου είναι:

1. Η εξόρυξη πρώτων υλών
2. Παραγωγή και συναρμολόγηση
3. Χρήση
4. Απόσυρση και επαναχρησιμοποίηση
5. Ανακύκλωση

##### 4.4.1 Παραγωγή μπαταριών λιθίου

Οι στρατηγικές κυκλικής οικονομίας ορίζουν ότι η εξόρυξη πρώτων υλών πρέπει να περιορίζεται στο ελάχιστο και όσο το δυνατόν περισσότερο υλικό να ανακυκλώνεται



(Gutsch et al., 2019). Η παραγωγή των μπαταριών ιόντων λιθίου απαιτεί κρίσιμες εισροές υλικών, όπως λίθιο, νικέλιο, κοβάλτιο και γραφίτη και περιλαμβάνει κυρίως δύο σημαντικά στάδια: την παραγωγή των εξαρτημάτων της μπαταρίας (υλικά ανόδου, υλικά καθόδου, ηλεκτρόδια, ηλεκτρολύτες, διαχωριστές, θήκη, κλπ.) και τη συναρμολόγηση της μπαταρίας (Degen και Schutte, 2022).

Αξίζει να σημειωθεί ότι με την ταχεία ανάπτυξη της αυτοκινητοβιομηχανίας, η παγκόσμια παραγωγή οχημάτων το 2015 έφτασε στα 90,8 εκατομμύρια και συνέβαλε με περίπου 5,6 δισεκατομμύρια τόνους εκπομπών CO<sub>2</sub> στο συνολικό επίπεδο του τομέα της βιομηχανίας, το οποίο αντιπροσώπευε πάνω από το ένα τρίτο των εκπομπών CO<sub>2</sub> που σχετίζονται με την ενέργεια. Πρώτες ύλες, όπως το λίθιο, το νικέλιο και το κοβάλτιο υφίστανται επεξεργασία για να φτάσουν στα επίπεδα καθαρότητας που απαιτούνται για τις μπαταρίες (Gutsch et al., 2019). Περαιτέρω έρευνα σχετικά με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της διαδικασίας κατασκευής της μπαταρίας αποκάλυψε ότι τα ενεργά υλικά του καθόδου, το αλουμίνιο και ο ηλεκτρολύτης ήταν οι κυρίαρχοι συνεισφέροντες, επομένως και αυτά που συνέβαλλαν περισσότερο στην αύξηση του ανθρακικού αποτυπώματος. Ωστόσο, ο αντίκτυπος του υλικού του καθόδου στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου διαφορετικών τύπων μπαταριών λιθίου από την αρχή έως την τέλος μιας μπαταρίας λιθίου είναι διαφορετικό. Για παράδειγμα, η παραγωγή των υλικών για το θετικό ηλεκτρόδιο των μπαταριών NMC και LFP ευθύνεται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 35% του δείκτη Παγκόσμιας Υπερθέρμανσης (GWP), ενώ η παραγωγή της καθόδου αποτελεί μόλις το 12% των συνολικών επιπτώσεων από την παραγωγή της μπαταρίας NiMH (είναι τύπος της μπαταρίας νικελίου- καδμίου, Ni-Cd).

Οι κοινές μπαταρίες λιθίου περιλαμβάνουν κυρίως τις μπαταρίες οξειδίου λιθίου-νικελίου-κοβαλτίου-μαγγανίου (NMC), τις μπαταρίες λιθίου νικελίου κοβαλτίου και αλουμινίου (NCA) και τις μπαταρίες φωσφορικού σιδήρου λιθίου (LFP) (Su et al., 2021; Turcheniuk et al., 2021). Το υλικό της καθόδου των μπαταριών NCM αποτελείται από νικέλιο, κοβάλτιο και μαγγάνιο σε συγκεκριμένη αναλογία (Zhang and Zhang, 2021). Το υλικό της καθόδου των μπαταριών NCA είναι νικέλιο, κοβάλτιο και αλουμίνιο, ενώ το υλικό της καθόδου των μπαταριών LFP είναι λίθιο, φώσφορος και σίδηρος (Yang, X.G. et al., 2021). Η επιλογή του υλικού της ανόδου έχει σημαντική επίπτωση στα χαρακτηριστικά των μπαταριών λιθίου όπως είναι η ειδική ενέργεια και η διάρκεια ζωής τους.

Σύμφωνα με ορισμένες εκτιμήσεις διαφόρων τύπων μπαταριών, το NMC811 (ο χαρακτηρισμός αυτός δείχνει την αναλογία των υλικών, δηλαδή αποτελείται από 80% Νικέλιο, 10% Κοβάλτιο, 10% Μαγγάνιο) αναμένεται να γίνει το κυρίαρχο υλικό της ανόδου τα επόμενα χρόνια (Gutsch et al., 2019). Για μπαταρίες με υψηλή περιεκτικότητα νικελίου (π.χ. NMC811) ως πηγή λιθίου χρησιμοποιείται το  $\text{LiOH}$ . Τα υλικά με χαμηλή σε περιεκτικότητα νικελίου (π.χ. NMC111) μπορούν να χρησιμοποιήσουν μία φθηνότερη ένωση λιθίου, την  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  (Gutsch et al., 2019).

Το ανθρακικό αποτύπωμα κατά τη φάση παραγωγής των μπαταριών NMC111 είναι υψηλότερο από εκείνο των μπαταριών νικελίου-χλωριδίου νατρίου λόγω των διαφορετικών επιπτώσεων των ενεργών υλικών της καθόδου, του αλουμινίου, του χαλκού και της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διαδικασία παραγωγής της μπαταρίας. Η καύση είναι μια διαδικασία με υψηλή κατανάλωση ενέργειας, θερμοκρασίες πάνω από  $750^\circ\text{C}$  και πολύωρη επεξεργασία (Gutsch et al., 2019).

Το κόστος για τη βιομηχανική παραγωγή του υλικού ανόδου των μπαταριών λιθίου NMC στις Ηνωμένες Πολιτείες έχει υπολογιστεί σε 23\$ ανά κιλό (NMC111) και σε 21.5\$ ανά κιλό (NMC811). Το Δυναμικό Παγκόσμιας Θέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential, GWP) που συνδέεται με την παραγωγή 1 κιλού NMC111 υλικού ανόδου στις Ηνωμένες Πολιτείες, αναφέρθηκε ως 16  $\text{kgCO}_2\text{eq}$  από το Argonne National Laboratory (ANL). Το 2015, οι Wood et al εκτίμησαν το κόστος για τις μπαταρίες λιθίου NMC111 που παράγονται στις Ηνωμένες Πολιτείες στα 271\$ ανά kWh και σημαντική συνεισφορά είχαν τα υλικά των ηλεκτροδίων, οι συλλέκτες ρεύματος, ο διαχωριστής και η επεξεργασία.

Εκτός από τις περιοχές παραγωγής, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου εξαρτώνται και από τη χημεία της μπαταρίας καθώς χρησιμοποιούνται διαφορετικά υλικά και διαφορετικές διαδικασίες παραγωγής. Για παράδειγμα, η μπαταρία λιθίου LFP δεν απαιτεί νικέλιο, κοβάλτιο και αλουμίνιο, η παραγωγή των οποίων είναι ενεργειακά επιβαρυντική και προκαλεί σημαντικές ποσότητες ρυπογόνων εκπομπών. Ωστόσο τα προαναφερθέντα μέταλλα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μπαταριών λιθίου NCM και NCA. Για αυτό το λόγο, η παραγωγή μπαταριών LFP έχει ανθρακικό αποτύπωμα ανά kWh παραγωγής 20%-28% χαμηλότερο από εκείνο των μπαταριών NCA και NCM, λαμβάνοντας πάντα υπόψη την περιοχή παραγωγής τους.

Επιπλέον, η χρήση διαφορετικών λειτουργικών μονάδων μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα. Οι λειτουργικές μονάδες των μπαταριών LFP παρουσίασαν

μικρότερο περιβαλλοντικό βάρος (σε μονάδες μάζας) από τις λειτουργικές μονάδες των μπαταριών NMC, ενώ προέκυψε μεγαλύτερο περιβαλλοντικό βάρος (σε μονάδες ενέργειας) των μπαταριών LFP έναντι των NMC λόγω των διαφορετικών ενεργειακών πυκνοτήτων.

Η θερμοκρασία λειτουργίας και το μέσο επίπεδο φόρτισης/αποφόρτισης κατά λειτουργία της μπαταρίας λιθίου επηρεάζουν επίσης τη διάρκεια ζωής της, η οποία με τη σειρά της έχει σημαντική επίδραση στο ανθρακικό της αποτύπωμα.

Επιπλέον, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου των ηλεκτρικών οχημάτων προκαλούν όχι μόνο τεράστιες καταναλώσεις ενέργειας αλλά και υψηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Στην πραγματικότητα, οι τιμές για τις μπαταρίες λιθίου NMC και LFP είναι 10,117 MJ και 2896 kgCO<sub>2</sub>-eq και 12,066 MJ και 3066kgCO<sub>2</sub>-eq αντίστοιχα, συμπεραίνοντας ότι η παραγωγή ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου καταναλώνει περισσότερη ενέργεια και εκλύει περισσότερα αέρια του θερμοκηπίου. Επιπρόσθετα, η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι μεγαλύτερες από εκείνες ενός συμβατικού, λόγω του μεγαλύτερου βάρους των υπόλοιπων εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται κατά τη συναρμολόγηση του οχήματος.

Όσον αφορά στα υλικά, το ατσάλι που χρησιμοποιείται κυριαρχεί λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης τόσο στα ηλεκτροκίνητα όσο και στα συμβατικά αυτοκίνητα. Η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για το ατσάλι είναι 38,881 MJ και 5048 kgCO<sub>2</sub>-eq για ένα συμβατικό αυτοκίνητο, 53,498 MJ και 6946 kg CO<sub>2</sub>-eq για ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο με μπαταρία NMC, και 53,549 MJ και 6952 kgCO<sub>2</sub>-eq για ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο με μπαταρία LFP, γεγονός που δείχνει τις τιμές των ηλεκτρικών οχημάτων μεγαλύτερες έναντι των συμβατικών. Το αλουμίνιο είναι επίσης ένα σημαντικό υλικό καθώς χρησιμοποιείται σε αρκετά ελαφριά εξαρτήματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ενεργά υλικά που χρησιμοποιούνται σε μπαταρίες λιθίου NMC και LFP έχουν ως αποτέλεσμα την κατανάλωση ενέργειας 6,016 MJ και 6334 MJ και τις εκπομπές του δείκτη GHG 1,866 kgCO<sub>2</sub>-eq και 1641 kgCO<sub>2</sub>-eq αντίστοιχα.

Το Εθνικό Εργαστήριο Argonne εκτίμησε τα επίπεδα του εκλυόμενου άνθρακα στις ΗΠΑ και αποκάλυψε ότι οι εκπομπές για τον δείκτη GHG ενός συμβατικού οχήματος είναι 7052 KgCO<sub>2</sub>-eq, ενώ για ένα ηλεκτροκίνητο με μπαταρίες λιθίου NMC και LFP ήταν 9450 KgCO<sub>2</sub>-eq και 9222 KgCO<sub>2</sub>-eq αντίστοιχα, τιμές πολύ χαμηλότερες από εκείνες της Κίνας. Αντίθετα, η κατάσταση στην Ευρώπη ήταν διαφορετική. Ο Hawkins εκτίμησε το ανθρακικό αποτύπωμα της παραγωγής ενός μεσαίου μεγέθους συμβατικού οχήματος και ενός

ηλεκτροκίνητου, βασισμένος στη βάση δεδομένων Ecoinvent v2.2, και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το ανθρακικό αποτύπωμα του ηλεκτροκίνητου με μπαταρίες λιθίου NMC και LFP ήταν 13 tnCO<sub>2</sub>-eq και 14 tnCO<sub>2</sub>-eq, ενώ το συμβατικό εκπέμπει μόνο 6,5 tnCO<sub>2</sub>-eq (Helmerts et al., 2020a). Στην Αυστραλία, η κατάσταση ήταν ακόμα χειρότερη λόγω του μεγάλου ανθρακικού αποτυπώματος το οποίο οφειλόταν στις πηγές της ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα ηλεκτροκίνητο όχημα μεσαίου μεγέθους που παράγεται στην Αυστραλία θα δημιουργούσε περίπου 13 tnCO<sub>2</sub>-eq, ενώ ένα ισοδύναμο συμβατικό περίπου 8 tnCO<sub>2</sub>-eq.

Η παραγωγή μιας μπαταρίας με χωρητικότητα 52 kWh στην Κίνα, χρησιμοποιώντας κυρίως ηλεκτρική ενέργεια από άνθρακα, μπορεί να εκπέμπει 8tnCO<sub>2</sub>-eq ενώ οι εκπομπές θα μπορούσαν να είναι μόλις πάνω από 2tn αν κατά την παραγωγή χρησιμοποιούταν ηλεκτρική ενέργεια προερχόμενη από τον άνεμο (Helmerts et al., 2020a).

Η μεγαλύτερη τιμή του ανθρακικού αποτυπώματος αποδόθηκε στη διαμόρφωση των κυψέλων και ήταν 3,04 kgCO<sub>2</sub>-eq/kWh χωρητικότητας κυψέλης μπαταριών (~30% του συνολικού αριθμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου). Τα δωμάτια στεγνώματος και οι διαδικασίες επίστρωσης και ξήρανσης ευθύνονταν για περίπου 22% (2,3 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh χωρητικότητας κυψέλης μπαταριών) του συνόλου του ανθρακικού αποτυπώματος. Αυτά τα τρία στάδια είχαν συνολικό ποσοστό 73,90% (7,63 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh χωρητικότητας κυψέλης μπαταριών) του ανθρακικού αποτυπώματος και ήταν επίσης οι μεγαλύτεροι καταναλωτές ενέργειας. Τα υπόλοιπα στάδια παραγωγής είχαν μερίδια <6% (0,6 kg ή λιγότερα CO<sub>2</sub>-eq/kWh χωρητικότητας κυψέλης μπαταριών).

ΤΥΠΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	ΕΥΡΩΠΗ	ΗΠΑ	ΚΙΝΑ	ΝΟΤΙΑ ΚΟΡΕΑ	ΙΑΠΩΝΙΑ
<i>NCM111</i>	56	60	101	69	73
<i>NC0622</i>	54	57	89	64	68
<i>NCM811</i>	53	55	78	63	67
<i>NCA</i>	57	59	90	67	70
<i>LFP</i>	34-39	37-42	41	46-50	50-55

**Πίνακας 1.** Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (KgCO<sub>2</sub>-eq/kWh) κατά την παραγωγή μπαταριών στις κύριες περιοχές παραγωγής τους (Lai et al., 2022a).

#### 4.4.2 Χρήση των μπαταριών λιθίου

Κατά τη φάση της χρήσης μιας μπαταρίας λιθίου, οι συνθήκες λειτουργίας της, οι παράμετροι σχεδιασμού (π.χ. πάχος ηλεκτροδίου, ρυθμός εκφόρτισης, κ.α.), η αποδοτικότητα, το βάρος και η ένταση των εκλυόμενων εκπομπών άνθρακα της ισχύος της, επηρεάζουν την ενεργειακή πυκνότητα και τη διάρκεια ζωής της, γεγονός που με τη σειρά του επηρεάζει τον δείκτη του Παγκόσμιου Δυναμικού Υπερθέρμανσης (GWP). Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι η σωστή διαχείριση μιας μπαταρίας λιθίου μπορεί να επεκτείνει αποτελεσματικά την διάρκεια του κύκλου ζωής της, μειώνοντας έτσι το ανθρακικό της αποτύπωμα.

Οι εκλυόμενες εκπομπές άνθρακα των μπαταριών λιθίου κατά τη φάση χρήσης τους είναι αμελητέες ή μηδενικές. Για την περίπτωση στην οποία οι μπαταρίες φορτίζονται με καθαρή ενέργεια, οι εκπομπές άνθρακα των ηλεκτρικών οχημάτων είναι χαμηλότερες. Όταν όμως φορτίζονται με ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την καύση άνθρακα, τότε οι εκλυόμενες εκπομπές των ηλεκτρικών αυτοκινήτων μπορεί να είναι υψηλότερες από αυτές των συμβατικών.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου με απόδοση κυκλικής φόρτισης 90% έχουν τις χαμηλότερες εκπομπές κατά τη φάση χρήσης (739 kg CO<sub>2</sub>-eq/MW για τον δείκτη GWP). Επιπλέον, οι Jursona και οι συνεργάτες (2019), από το 2015 έως το 2050, εκτίμησαν την επίδραση των διαφορετικών πηγών ενέργειας στο ανθρακικό και στο υδατικό αποτύπωμα των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τη φόρτιση των μπαταριών είναι ο κύριος παράγοντας του ανθρακικού αποτυπώματος και του αποτυπώματος νερού των ηλεκτρικών οχημάτων στην Τσεχία. Παράλληλα, η Burchart-Korol και η Folga (2020) δήλωσαν ότι το ανθρακικό αποτύπωμα και το αποτύπωμα νερού των ηλεκτρικών επιβατικών αυτοκινήτων στην Πολωνία σχετίζεται κυρίως με τον τύπο της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση των μπαταριών των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η μείωση του μεριδίου της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από στερεά καύσιμα (λιγνίτη και άνθρακα).

#### 4.4.3 Απόσυρση και επαναχρησιμοποίηση μπαταριών λιθίου

Η αύξηση της ζήτησης για ηλεκτρικά οχήματα επέφερε την αύξηση της χρήσης των μπαταριών λιθίου. Η ετήσια ζήτηση για μπαταρίες λιθίου, εκτιμώμενη βάσει της χωρητικότητας, αναμένεται να φτάσει παγκοσμίως τα 4.400 GWh το 2030, τα 8.300 GWh

το 2040 και πάνω από 11.000 GWh το 2050. Παράλληλα, η χωρητικότητα των αποσυρθέντων μπαταριών αναμένεται να φτάσει παγκοσμίως τα 330 GWh το 2030, τα 2.400 GWh το 2040 και τα 4.900 GWh το 2050. Στο πλαίσιο αυτό, τα προβλήματα της κλιματικής αλλαγής, της έλλειψης πόρων και της ρύπανσης του περιβάλλοντος θα ενταθούν εάν δεν γίνει σωστή απόρριψη των χρησιμοποιούμενων μπαταριών.

Οι μπαταρίες λιθίου, αφού χάσουν περίπου το 20-30% της αρχικής τους χωρητικότητας είναι ανεπαρκής για χρήση στα ηλεκτρικά οχήματα (Hua κ.ά., 2021). Ωστόσο, υπολειπόμενης χωρητικότητας τους (70-80%), είναι σημαντικό να επαναχρησιμοποιηθούν πριν την ανακύκλωσή τους (Schneider κ.ά., 2009).

Η επανακατασκευή των μπαταριών λιθίου αφορά στην επισκευή ή την ανακατασκευή των πακέτων τους για επαναχρησιμοποίηση σε άλλες εφαρμογές. Για να επαληθευτεί η εφικτότητα της επανακατασκευής των μπαταριών λιθίου, ο Xiong κ.ά. (2020) ποσοτικοποίησαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το κόστος της επανακατασκευής των μπαταριών NMC και σύγκριναν τα αποτελέσματα με μπαταρίες που παράγονται από την αρχή. Η μελέτη έδειξε ότι τόσο η κατανάλωση ενέργειας όσο και οι εκπομπές άνθρακα μειώνονται με την επανακατασκευή των μπαταριών και επιτυγχάνεται δυνητική εξοικονόμηση κόστους. Για παράδειγμα, η εκμετάλλευση των επαχρησιμοποιούμενων μπαταριών λιθίου σε μια κατοικία μπορεί να αυξήσει την ενεργειακή απόδοση και να μειώσει το κόστος, έχοντας σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη (Bobba κ.ά., 2018; Faria κ.ά., 2014; Sun κ.ά., 2020a).

Η εφαρμογή των επαναχρησιμοποιούμενων μπαταριών σε άλλες διεργασίες επεκτείνει τη διάρκεια ζωής των μπαταριών λιθίου και διπλασιάζει τα περιβαλλοντικά οφέλη μέσω της καλύτερης χρήσης φθηνής καθαρής ενέργειας (Ahmadi κ.ά., 2017).

Η κατάσταση της υγείας μιας μπαταρίας λιθίου (αποτελεί μια μέτρηση της ικανότητας της μπαταρίας να αποθηκεύει και να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια, συγκριτικά με μια νέα) όταν πέφτει κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο (70-80% της αρχικής χωρητικότητας) τότε η μπαταρία δεν μπορεί να παρέχει επαρκή ισχύ ή ενέργεια ώστε να εκπληρώσει την προβλεπόμενη λειτουργία της όσον αφορά στα ηλεκτρικά οχήματα, φτάνοντας έτσι στο τέλος ζωής της. Οι μπαταρίες λιθίου που βρίσκονται στο τέλος της ζωής τους είναι ιδανικές για λιγότερο απαιτητικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, οδηγώντας στην επαναχρησιμοποίηση-δεύτερη ζωή τους.



Όσον αφορά στις μπαταρίες NMC (νικελίου-μαγγανίου-κοβαλτίου) και εάν δεν ληφθεί υπόψη το σενάριο δευτερογενούς χρήσης τους, σημειώνεται ότι εκλύουν τις μεγαλύτερες ποσότητες άνθρακα από όλους τους τύπους μπαταριών ιόντων λιθίου (ο δείκτης GWP των μπαταριών NMC είναι διπλάσιος από αυτόν των μπαταριών LMO). Ειδικότερα, η διαφορά μεταξύ του ανθρακικού αποτυπώματος του των μπαταριών NMC και LMO μειώθηκε από τα 0.092-0.188 kgCO<sub>2</sub>-eq στα 0.009-0.023 kg CO<sub>2</sub>-eq. Ανάμεσα σε όλες τις διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν κερδίσει σημαντική θέση σε διάφορες εφαρμογές λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής και της υψηλής απόδοσής τους (Ritchie, 2021).

### **Επανεξέταση του ρόλου των μπαταριών δευτερογενούς χρήσης (Second Life Batteries, SLBs) και σύγκριση με τις καινούργιες μπαταρίες**

Για να διευκρινιστεί εάν οι μπαταρίες δεύτερης ζωής (SLBs) θα είναι καλύτερες από τις νέες μπαταρίες και αν οι SLBs θα παρέχουν παρόμοια μείωση κόστους και εκπομπών άνθρακα για τις διάφορες εφαρμογές σταθερής αποθήκευσης σε όλες τις τοποθεσίες, οι Kamath et al. (2020) σύγκριναν το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και τις εκπομπές άνθρακα στον κύκλο ζωής κατά τη χρήση των μπαταριών δευτερογενούς χρήσης και των νέων μπαταριών ιόντων λιθίου στις ΗΠΑ σε άλλες εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας, όπως η αποθήκευση ενέργειας σε κατοικίες με φωτοβολταϊκά στις στέγες. Διαπιστώθηκε ότι οι SLBs μείωσαν το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας κατά 12%-57% και τις εκπομπές άνθρακα κατά 7%-31%, σε σύγκριση με τις νέες μπαταρίες ιόντων λιθίου στις εξεταζόμενες εφαρμογές. Σε σύγκριση με τα φωτοβολταϊκά στις στέγες, οι SLBs παρείχαν επίσης οφέλη σε οικιακό επίπεδο, μειώνοντας το κόστος κατά 15%-25% και τις εκπομπές άνθρακα κατά 22%-51%, καθιστώντας τις SLBs συμφέρουσες και για τους οικιακούς καταναλωτές.

Η αξιοποίησή τους για δευτερεύουσα χρήση, όπως σε σταθμούς αποθήκευσης ενέργειας (π.χ. για την εξισορρόπηση των διακυμάνσεων στη διαθεσιμότητα της πράσινης ενέργειας), μπορεί να μειώσει τις εκπομπές GHG κατά 50% όπως επίσης να μειώσει κατά 50% τις επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή που αποδίδονται στο ηλεκτρικό όχημα (Helmerts et al., 2020a).

Οι Ioakimidis et al. (2019) αξιολόγησαν τέσσερις εφαρμογές των μπαταριών ιόντων λιθίου LFP δευτερογενούς χρήσης:

- I. την επαναχρησιμοποίηση των μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων
- II. την χρήση των αποσυρθέντων από τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταριών στην κατασκευή μονάδων αποθήκευσης ενέργειας σε κτίρια
- III. τη χρήση του ισπανικού μίγματος ηλεκτρικής ενέργειας και
- IV. την παροχή ενέργειας από φωτοβολταϊκά πάνελ.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επαναχρησιμοποίηση των αποσυρθέντων από τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταριών σε δευτερογενείς εφαρμογές αντί για την κατασκευή νέων για τον ίδιο σκοπό, έχει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη. Οι Wilson et al. (2021) σύγκριναν τις εκπομπές άνθρακα που παράγονται από μια επαναχρησιμοποιημένη μπαταρία ηλεκτρικού οχήματος και από μια νέα μπαταρία σταθερής αποθήκευσης της ίδιας χωρητικότητας στην Αυστραλία και διαπίστωσαν ότι η επαναχρησιμοποιούμενη μπαταρία έχει μικρότερο ανθρακικό αποτύπωμα, υπό την προϋπόθεση ότι λειτουργεί για τουλάχιστον έξι χρόνια. Η ανάλυση ευαισθησίας έδειξε ότι η επαναχρησιμοποίηση της μπαταρίας μπορεί να επιτύχει μειώσεις άνθρακα εάν η διάρκεια ζωής της επαναχρησιμοποιημένης μπαταρίας ηλεκτρικού οχήματος υπερβαίνει τα 4,25 χρόνια. Προς το παρόν, η Γερμανία φαίνεται να είναι ιδανική τοποθεσία για την ίδρυση εργοστασίου επαναχρησιμοποίησης μπαταριών λόγω της εγγύτητάς της στους κατασκευαστές ηλεκτρικών οχημάτων και της δυναμικής αγοράς ηλεκτρικών οχημάτων στην Ευρώπη.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, η ακατάλληλη απόρριψη των χρησιμοποιούμενων μπαταριών λιθίου θα προκαλέσει τόσο προβλήματα ασφάλειας, όπως ηλεκτροπληξία, έκρηξη αλλά και κινδύνους διάβρωσης, όσο και προβλήματα περιβαλλοντικής ρύπανσης, όπως είναι η ρύπανση από βαρέα μέταλλα και οξέα ηλεκτρολύτη, απειλώντας το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία.

Η χρήση των μπαταριών δευτερογενούς χρήσης, δηλαδή των επαναχρησιμοποιούμενων μπαταριών, περιλαμβάνει τη βιωσιμότητα των πόρων και του περιβάλλοντος, καθώς επεκτείνεται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας εξυπηρετώντας έτσι και την αυξανόμενη αγορά συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Επιπλέον, με την εκμετάλλευση των μπαταριών δευτερογενούς χρήσης αποφεύγεται η παραγωγή νέων μπαταριών της ίδιας χωρητικότητας, μειώνοντας έτσι την εξόρυξη και τη χρήση πρώτων υλών, νερού, ενέργειας αλλά και ηλεκτρικού ρεύματος. Επομένως, οι SLB είναι σημαντικές για την μείωση της



ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των εκλυόμενων εκπομπών άνθρακα. Ωστόσο, όταν αναφερόμαστε στην εφικτότητα της δευτερογενούς χρήσης των χρησιμοποιούμενων μπαταριών, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι οικονομικοί και τεχνικοί περιορισμοί. Από οικονομικής απόψεως, εάν η τιμή των νεοπαραγόμενων μπαταριών (LIBs) πέσει στα επίπεδα που καθορίζονται από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ και το Προηγμένο Πρόγραμμα Κοινοπραξίας Μπαταριών των ΗΠΑ (\$100/kWh και \$150/kWh, αντίστοιχα), οι μπαταρίες δευτερογενούς χρήσης δεν θα είναι ανταγωνιστικές. Από τεχνικής απόψεως, η επαναχρησιμοποίηση των μπαταριών αντιμετωπίζει επίσης μια σειρά τεχνικών προκλήσεων, συμπεριλαμβανομένων των ζητημάτων ασφαλείας, των μεθόδων αξιολόγησης, των τεχνικών ελέγχου και της ολοκληρωμένης διαχείρισης της διαδικασίας επαναχρησιμοποίησης. Συμπερασματικά, πρέπει να ξεπεραστούν τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις για να επιτευχθεί η βιωσιμότητα στη δευτερογενή χρήση των αποσυρόμενων μπαταριών.

#### 4.4.4 Ανακύκλωση μπαταριών λιθίου

Η αυξημένη ζήτηση για τις μπαταρίες λιθίου επιβάλλει την σωστή ανακύκλωση αυτών, μέσω της οποίας οι εκλυόμενες εκπομπές άνθρακα μπορούν να μειωθούν καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους. Μετά και από τη δευτερογενή χρήση, η μπαταρία μπορεί να υποβληθεί σε περαιτέρω ανακύκλωση.

Μέσω της ανακύκλωσης των πολύτιμων υλικών της καθόδου και της χρήσης αυτών στην κατασκευή νέων μπαταριών, μπορεί να μειωθεί η ζήτηση για φυσικούς πόρους (Aichberger και Jungmeier, 2020; Hua et al., 2021). Η ενσωμάτωση της ανακύκλωσης στο πλαίσιο των Gigafactories, τα οποία παράγουν μπαταρίες λιθίου με ετήσια χωρητικότητα άνω του ενός GWh, είναι ελπιδοφόρα. Για παράδειγμα, η Northvolt, μια Σουηδική εταιρεία μπαταριών, κατά τον σχεδιασμό του Gigafactory της εργάστηκε για την ενσωμάτωση μιας εργοστασιακής μονάδας ανακύκλωσης (Gutsch et al.).

Τα Σημεία Κλειδιά για τη διαδικασία της ανακύκλωσης:

- ✓ Ποσοστά Ανάκτησης: Υψηλά ποσοστά ανάκτησης υλικών, ιδίως για το λίθιο, το κοβάλτιο, το νικέλιο και τον γραφίτη, είναι κρίσιμα για την απόδοση οικονομικών και περιβαλλοντικών πιστώσεων.

- ✓ Οικονομικές Πιστώσεις: Η ανακύκλωση μπορεί να αποδώσει οικονομικές πιστώσεις 30\$ έως 56\$/kWh, με την ανακύκλωση απορριμμάτων υλικού να προσθέτει σημαντικά στις πιστώσεις.
- ✓ Περιβαλλοντικές Πιστώσεις: Οι διαδικασίες ανακύκλωσης μπορούν να μειώσουν το GWP κατά 30 έως 35 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh, ανάλογα με την απόδοση της διαδικασίας και τη συμμετοχή της ανακύκλωσης απορριμμάτων υλικού. (Gutsch et al.)

Η πυρομεταλλουργία, η υδρομεταλλουργία, η άμεση ανακύκλωση και η βιοέκπλυση (Hua et al., 2021) είναι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ανακύκλωση των μπαταριών λιθίου. Προς το παρόν, δύο τεχνολογίες (η ανακύκλωση μέσω της πυρομεταλλουργίας και υδρομεταλλουργίας) είναι διαθέσιμες για εταιρείες ανακύκλωσης μπαταριών σε όλο τον κόσμο (Sommerville et al., 2021).

Η ανακύκλωση μέσω της πυρομεταλλουργίας, όντας απλή στη λειτουργία και έχοντας υψηλή παραγωγικότητα (Chen et al., 2019), κυριαρχεί ευρέως σε εταιρείες όπως η Umicore, η Inmetco, η Accurec και η Glencore. Η πυρομεταλλουργία, αποτελώντας μια εδραιωμένη τεχνολογία, έχει χαμηλές απαιτήσεις κατά την προεπεξεργασία των μπαταριών λιθίου αλλά η ανάκτηση του αλουμινίου και του λιθίου αποτελεί πρόκληση. Τέλος, η πυρομεταλλουργία ως μέθοδος ανακύκλωσης μειώνει τα κόστη καθώς οι λειτουργικές δαπάνες είναι χαμηλότερες (Gutsch et al.).

Η μέθοδος της υδρομεταλλουργίας έχει υψηλή αποδοτικότητα ανάκτησης των υλικών και απαιτεί περιβάλλον χαμηλής θερμοκρασίας, γι' αυτό χρησιμοποιείται ευρέως από τις μεγάλες εταιρείες ανακύκλωσης στην Κίνα (Brunp, Huayou Cobalt, GEM και GHTECH) (Jiang et al., 2021). Παράλληλα, έχει το πλεονέκτημα ότι το αλουμίνιο και το λίθιο μπορούν να ανακτηθούν και από αχρησιμοποίητες μπαταρίες λιθίου.

Σύμφωνα με την κατάσταση της ανακύκλωσης μπαταριών στην Κίνα, οι πυρομεταλλουργικές και υδρομεταλλουργικές μέθοδοι ανακύκλωσης επιλέγονται ως μέθοδοι ανακύκλωσης για τις μπαταρίες NCM, ενώ οι υδρομεταλλουργικές και η άμεση μέθοδος ανακύκλωσης επιλέγονται για τις μπαταρίες LFP. Τα ανακυκλωμένα προϊόντα περιλαμβάνουν κυρίως υλικά καθόδου, υλικά ανόδου, αλουμίνιο, χαλκό, κ.α. Η πυρομεταλλουργική μέθοδος ανακύκλωσης επιλέγεται για τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος και τα ανακτηθέντα προϊόντα περιλαμβάνουν κράματα μολύβδου, θειϊκό οξύ, πλαστικό, κ.α.

Το επίπεδο προεπεξεργασίας εξαρτάται από την επιλεγμένη τεχνολογία ανακύκλωσης. Η προεπεξεργασία αποτελείται από την σταθεροποίηση, το άνοιγμα και τον διαχωρισμό βάσει μεγέθους, πυκνότητας ή μαγνητικών ιδιοτήτων των μπαταριών λιθίου. Κατά τη σταθεροποίηση, οι μπαταρίες λιθίου αποφορτίζονται ώστε να περιοριστούν πιθανά βραχυκυκλώματα στα επόμενα στάδια της διαδικασίας. Είναι κρίσιμη η θέσπιση ενός κατάλληλου επιπέδου αποφόρτισης, λόγω της επίδρασής της στις ιδιότητες των υλικών των μπαταριών κατά τα επόμενα στάδια ανακύκλωσης. Συχνά, χρησιμοποιούνται τα ανόργανα οξέα, για παράδειγμα το  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ , λόγω της υψηλής αποδοτικότητας διάλυσης τους. Με αυτούς τους παράγοντες διάλυσης, έχει επιτευχθεί αποδοτικότητα ανάκτησης >99% για Li, Ni, Mn και Co. Ενδιαφέρουσα κρίνεται η διάλυση με οργανικά οξέα ή η βιοδιάλυση ώστε να αποφευχθούν ορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούνται από τα ανόργανα οξέα.

Η μέθοδος της άμεσης ανακύκλωσης επιτρέπει την άμεση επαναχρησιμοποίηση του υλικού της καθόδου, καθώς η μορφολογία του διατηρείται. Ωστόσο, τα μειονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι η χαμηλή επάρκεια της μέχρι τώρα τεχνολογίας και οι υψηλές απαιτήσεις προεπεξεργασίας. Παρόλα αυτά, οι μέθοδοι της άμεσης ανακύκλωσης και της υδρομεταλλουργίας για τις μπαταρίες λιθίου φαίνεται να έχουν καλύτερες οικονομικές προοπτικές από την πυρομεταλλουργία.

Σε βιομηχανική κλίμακα, η ανακύκλωση με την χρήση της υδρομεταλλουργίας των μπαταριών λιθίου NMC και NCA είναι κερδοφόρα στις Η.Π.Α., το Ηνωμένο Βασίλειο και την Κίνα, με τα έσοδα από την πώληση του ανακυκλωμένου υλικού των μπαταριών λιθίου να είναι υψηλότερα από τα κόστη ανακύκλωσης τους.

Το μεγαλύτερο μέρος των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των μπαταριών λιθίου συνδέεται με τα υλικά, κυρίως με τον χαλκό, το νικέλιο και το κοβάλτιο. Αυτά τα υλικά είναι γνωστά για την ρύπανση των επιφανειακών υδάτων, την εκπομπή τοξικών αερίων, την υπερβολική κατανάλωση ενέργειας για την εξόρυξη τους και την παραγωγή των μπαταριών, την υποβάθμιση του οικοσυστήματος προκαλώντας σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η ανάκτηση των κρίσιμων αυτών πρωτογενών υλικών μειώνει το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα των μπαταριών κατά 67–73%. Τα υψηλά ποσοστά ανάκτησης για αυτά τα τρία υλικά εξασφαλίζουν ότι ένα μεγάλο ποσοστό του ανακυκλωμένου υλικού μπορεί όχι μόνο να αντικαταστήσει τις πρώτες ύλες αλλά και να αποφευχθεί η εξόρυξή τους.

Η επεξεργασία των κυψελών στο τέλος της διάρκειας ζωής τους μέσω της ανακύκλωσης συνεισφέρει με μειώσεις :

- στο κόστος των κυψελών κατά 7%,
- στην εκπομπή CO<sub>2</sub> σε μορφή KgCO<sub>2</sub>-eq κατά 9% και
- στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά 3%.

Η διαχείριση αποβλήτων αποτελεί την κύρια ανησυχία για τις βιομηχανίες εξόρυξης, εξαγωγής και επεξεργασίας. Λόγω των πολλών εύφλεκτων οργανικών (ηλεκτρολύτης και διαχωριστής) και τοξικών ουσιών (κοβάλτιο) στις επαναχρησιμοποιούμενες μπαταρίες λιθίου, μια απλή υγειονομική ταφή τους, θα αποτελούσε σημαντική απειλή για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Οι επαναχρησιμοποιούμενες μπαταρίες λιθίου περιέχουν πολλά πολύτιμα μέταλλα, όπως κοβάλτιο, χαλκό, αλουμίνιο, νικέλιο και λίθιο επομένως η ανακύκλωση τους είναι κρίσιμη για τη βιώσιμη ανάπτυξη της βιομηχανίας των μπαταριών λιθίου.

Ανεξάρτητα από τη διαδικασία ανακύκλωσης, η αύξηση του ποσοστού ανάκτησης πρωτογενών υλικών είναι ζωτικής σημασίας. Μελέτες έχουν δείξει ότι αν το ποσοστό ανακύκλωσης αυξηθεί από 25% σε 90%, οι εκλυόμενες εκπομπές άνθρακα των μπαταριών Ni-Cd θα μειωθούν κατά 30%, επιτυγχάνοντας έτσι μείωση του ανθρακικού τους αποτυπώματος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το 3,5% των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) του κύκλου ζωής για μια ανακυκλωμένη μπαταρία παράγεται κατά τη διαδικασία συλλογής και μεταφοράς (Slattery et al., 2021).

### **Σύγκριση των μεθόδων ανακύκλωσης των μπαταριών**

Η άμεση ανάκτηση, συγκριτικά με τις διαδικασίες ανακύκλωσης της πυρομεταλλουργίας και της υδρομεταλλουργίας, αποφεύγει τις ενεργοβόρες διαδικασίες και την αναπαραγωγή του υλικού της καθόδου, μειώνοντας αποτελεσματικά το ανθρακικό αποτύπωμα των μπαταριών λιθίου (Bai et al., 2020). Σε μια σύγκριση των διαδικασιών υδρομεταλλουργίας και πυρομεταλλουργίας για την ανακύκλωση των μπαταριών λιθίου στην Καλιφόρνια, οι Hendrickson et al. (2015) διαπίστωσαν ότι η ανακύκλωση υλικών από πυρομεταλλουργία μπορεί να αντισταθμίσει το περιβαλλοντικό φορτίο που συνδέεται με το στάδιο της παραγωγής των μπαταριών λιθίου, δηλαδή μειώνονται τόσο η απαίτηση ενέργειας όσο και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με την παραγωγή από πρώτες ύλες.

Οι διαδικασίες ανακύκλωσης πυρομεταλλουργίας και υδρομεταλλουργίας δεν μειώνουν σημαντικά τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά τον κύκλο ζωής των μπαταριών οξειδίου νικελίου μαγγανίου κοβαλτίου (NMC-622), NCA και LFP, αλλά η άμεση ανακύκλωση έχει την δυνατότητα να μειώσει τις εκπομπές και να είναι οικονομικά ανταγωνιστική. Οι Sun et al το 2016, χρησιμοποιώντας τις μπαταρίες LMO, NMC και NCA, διαπίστωσαν ότι η άμεση ανακύκλωση του υλικού της καθόδου, έναντι των μεθόδων της πυρομεταλλουργίας και της υδρομεταλλουργίας, ήταν αποδοτικότερη ανεξάρτητα από τη χημεία των μπαταριών.

Μέθοδος Ανακύκλωσης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<b>Πυρομεταλλουργία</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Απλή και σύντομη διαδικασία</li> <li>Υψηλή απόδοση</li> <li>Ανάκτηση διαφορετικών συστατικών</li> <li>Υψηλό ποσοστό ανάκτησης</li> <li>Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας</li> <li>Ικανότητα παραγωγής μεγάλης κλίμακας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Υψηλή κατανάλωση ενέργειας</li> <li>Υψηλό κόστος εγκατάστασης</li> <li>Μη ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων</li> <li>Εκπομπή περισσότερων αέριων αποβλήτων</li> </ul>
<b>Υδρομεταλλουργία</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Υψηλή ανάκτηση καθαρών υλικών</li> <li>Υψηλό ποσοστό ανάκτησης</li> <li>Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας</li> <li>Λιγότερα αέρια απόβλητα</li> <li>Υψηλή καθαρότητα υλικών ανακύκλωσης</li> <li>Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας – Χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Περίπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία</li> <li>Τεράστιες καταναλώσεις αντιδραστηρίων – Υψηλό κόστος αντιδραστηρίων</li> <li>Μεγάλη διάρκεια της διαδικασίας</li> <li>Εκπομπή περισσότερων υγρών αποβλήτων</li> </ul>
<b>Άμεση Ανακύκλωση</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Χαμηλό κόστος</li> <li>Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας</li> <li>Χαμηλή ρύπανση περιβάλλοντος</li> <li>Υψηλό ποσοστό ανάκτησης</li> <li>Μέγιστη διατήρηση της ίδιας της μπαταρίας</li> <li>Απλή και σύντομη διαδικασία</li> <li>Διατήρηση αρχικής χημικής δομής υλικού</li> <li>Ελάχιστη απαίτηση για προσθήκη νέων υλικών (για δευτερογενή χρήση)</li> <li>Μεγάλης κλίμακας ανακύκλωση και επεξεργασία</li> <li>Μείωση κόστους διαδικασίας επανακατασκευής των μπαταριών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Χρειάζεται και άλλος χρόνος για την ωρίμανση και εισαγωγή της διαδικασίας στην αγορά</li> <li>Μη ανάκτηση υλικών</li> <li>Εκπομπή περισσότερων αέριων αποβλήτων</li> <li>Υψηλό κόστος εξοπλισμού και λειτουργίας της μονάδας</li> </ul>
<b>Βιοέκπλυση</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Φιλική προς το περιβάλλον</li> <li>Χαμηλό κόστος</li> <li>Υψηλή αποδοτικότητα</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Μεγάλη διάρκεια της διαδικασίας</li> <li>Εύκολη μόλυνση μικροβιακών παραγόντων</li> </ul>

Πίνακας 2. Σύγκριση των κύριων μεθόδων ανακύκλωσης (Liu et al., 2019; Hua et al., 2021; Zhou et al., 2020; Yun et al., 2018; Costa et al., 2021; Colledani et al., 2023; Yanamandra et al., 2022; Abdalla et al., 2023; Vieceli et al., 2021; Jiang et al., 2023; Dolotko et al., 2023; Steward et al., 2019; ).

Η σύγκριση μεταξύ των μεθόδων ανακύκλωσης, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα καθεμιάς από τις μεθόδους, αναλύονται εκτενέστερα στον Πίνακα 2.

Υλικό	Διαδικασία ανακύκλωσης	Βιβλιογραφία
Αργίλιο	Υδρομεταλλουργία	<i>Li et al., 2011</i>
Χαλκός	Πυρομεταλλουργία	<i>Cheret et al., 2007, Yan et al., 2021; Zhang et al., 2018</i>
Λίθιο	Υδρομεταλλουργία	<i>Li et al., 2011</i>
Κοβάλτιο	Υδρομεταλλουργία	<i>Li et al., 2011, Yan et al., 2021; Zhang et al., 2018</i>
Μαγγάνιο	Υδρομεταλλουργία	<i>Li et al., 2011</i>
Νικέλιο	Πυρομεταλλουργία	<i>Cheret et al., 2007</i>

Πίνακας 3. Υλικά ανάκτησης ανάλογα με τη μέθοδο ανακύκλωσης

#### 4.5 Σύγκριση μπαταριών λιθίου και συμπεράσματα

Η σύγκριση της ανάλυσης του κύκλου ζωής των μπαταριών LFP και LMO έδειξε ότι οι μπαταρίες LFP έχουν μεγαλύτερο κύκλο ζωής από τις μπαταρίες LMO. Ωστόσο, οι μπαταρίες LFP έχουν καλύτερη λειτουργική απόδοση. Επιπλέον, η παραγωγή των μπαταριών λιθίου αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα επιπτώσεων σε χώρες όπου η το μείγμα της ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι βασισμένο σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενώ η φάση χρήσης αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα επιπτώσεων σε χώρες όπου η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι βασισμένη κυρίως από ορυκτές πηγές όπως ο άνθρακας και ο λιγνίτης (Marques κ.ά., 2019).

Η σύγκριση της ανάλυσης του κύκλου ζωής των μπαταριών μεταξύ LFP και NMC έδειξε ότι οι δύο μπαταρίες εμφανίζουν διαφορετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά στάδιο ζωής. Οι μπαταρίες LFP έχουν μικρότερο ανθρακικό αποτύπωμα κατά τη φάση παραγωγής ενώ οι μπαταρίες NMC κατά τις φάσεις της χρήσης και της μεταφοράς. Σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής, οι μπαταρίες LFP εμφανίζουν το μικρότερο ανθρακικό αποτύπωμα.



Η σύγκριση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου των τριών τύπων παραγωγής μπαταριών έδειξε ότι, οι εκπομπές για 28 kWh μπαταριών LFP, LMO και NMC ήταν 3061 kgCO<sub>2</sub>-eq, 2912 kgCO<sub>2</sub>-eq και 2705 kgCO<sub>2</sub>-eq αντίστοιχα. Αυτό υποδεικνύει την αύξηση των εκπομπών GHG από την παραγωγή μπαταριών λιθίου κατά 30% σε σύγκριση με τα συμβατικά αυτοκίνητα. Σύμφωνα με τις περισσότερες μελέτες, η παραγωγή των υλικών της καθόδου και το αλουμίνιο είναι τα υλικά που αυξάνουν τις εκπομπές GHG κατά 75% των συνολικών εκπομπών (Hao κ.ά., 2017a).

Οι διαφορετικοί τύποι μπαταριών που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα μέχρι σήμερα παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και είναι δύσκολο να συμπεράνουμε ποιος τύπος μπαταρίας είναι καλύτερος.

Κατά το στάδιο της παραγωγής των μπαταριών, και συγκεκριμένα κατά την επεξεργασία των υλικών της καθόδου, η κατανάλωση ενέργειας και οι εκλυόμενες εκπομπές άνθρακα είναι μεγάλες (Kim κ.ά., 2016; Notter κ.ά., 2010). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι μπαταρίες αυτοκινήτων NMC 27 kWh εκλύουν 65 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh όταν παράγονται στην Ευρώπη, ενώ εκλύουν 100 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh όταν παράγονται στην Κίνα. Επιπλέον, υπάρχουν σημαντικές διαφορές στους ρύπους που σχετίζονται με τις LIBs, ιδιαίτερα στις εκπομπές SO<sub>x</sub> που εκλύονται κατά την παραγωγή νικελίου. Ένας πιο αποτελεσματικός τρόπος για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου είναι η παραγωγή μπαταριών με ηλεκτρική ενέργεια από ένα πιο καθαρό μείγμα ενέργειας (Dai κ.ά., 2019; Ellingsen κ.ά., 2014)

Κατά τη φάση χρήσης των μπαταριών, διαφορετικοί συνδυασμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να επιτύχουν μείωση των εκπομπών του άνθρακα έως και 60%. Οι βελτιώσεις στην τεχνολογία των μπαταριών λιθίου και η χρήση καθαρής ενέργειας για τις διεργασίες της (εξόρυξη πρώτων υλών, συναρμολόγηση, ανακύκλωση) είναι ιδιαίτερα σημαντικές όχι μόνο για την προώθηση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και την ένταξη τους στην καθημερινότητα μας αλλά και για τη μείωση του ανθρακικού τους αποτυπώματος.

Κατά τη φάση του τέλους ζωής τους, ενδέχεται να υπάρχουν οφέλη από την επαναχρησιμοποίηση ή την ανακύκλωση συστατικών ή υλικών, αλλά αυτά τα σενάρια και συνεπώς τα περιβαλλοντικά οφέλη, είναι αβέβαια (Chengjian et al., 2022).

## 5. Μείωση ανθρακικού αποτυπώματος – Αύξηση της ποιότητας ζωής

Η χρησιμότητα της Ανάλυσης του Κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας δραστηριότητας είναι πλέον εμφανής. Η AKZ είναι ένα διαδεδомένο εργαλείο εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που στόχο έχει έναν κοινό κώδικα επικοινωνίας για κάθε σημείο του πλανήτη, ώστε τα αποτελέσματα της να είναι συγκρίσιμα και να εντοπίζονται τυχόν σφάλματα.

### 5.1 Οφέλη – Αποτελέσματα από την AKZ των μπαταριών λιθίου

Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης του κύκλου ζωής «από την γέννηση έως τον θάνατο» (cradle-to-grave) γίνεται ανάλυση ολόκληρης της αλυσίδας εφοδιασμού της μπαταρίας, από τη χρήση μιας μπαταρίας λιθίου μέχρι τη διαχείριση του τέλους της ζωής της (End of Life, EoL) με διαδικασίες όπως είναι η καύση, η απόρριψη σε χωματερή και η ανακύκλωση (Wang et al., 2022).

Η Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής εκτίμησε τον δείκτη του δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη στα 64,5 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh κατά την παραγωγή κυψελών στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ενώ τα υψηλού κόστους υλικά, όπως το νικέλιο, το κοβάλτιο και το λίθιο συμβάλλουν σημαντικά στο συνολικό δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη, η ενέργεια που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εξόρυξής του και μετέπειτα παραγωγής της μπαταρίας ευθύνεται για σχεδόν το μισό της συνολικής τιμής του δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη.

Μεταξύ αυτών των υλικών, υπάρχουν κάποια που μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές ανησυχίες αν απορριφθούν στο περιβάλλον μετά τη χρήση τους, όπως είναι τα βαρέα μέταλλα, τα οργανικά διαλύματα και οι πολυμερείς ενώσεις. Επιπλέον, για κάποια από τα υλικά των μπαταριών ιόντων λιθίου μελλοντικά, θα προκύψουν κίνδυνοι ως προς την επάρκειά τους και αυτό λόγω της αυξημένης χρήσης τους, της έλλειψής τους σε ορισμένες χώρες και της γεωπολιτικής αστάθειας σε περιοχές όπου εξορύσσονται.

Την δεδομένη στιγμή, υπάρχουν ορισμένα υλικά που ταξινομούνται ως κρίσιμα για την παραγωγή των μπαταριών λιθίου: το λίθιο, το κοβάλτιο, ο γραφίτης και το πυρίτιο. Συγκεκριμένα, το λίθιο έχει χαρακτηριστεί ως "κρίσιμο ενεργειακά στοιχείο" λόγω του ρόλου του σε διάφορες πηγές ενέργειας και του γεγονότος ότι μπορεί να αντιμετωπίσει

κινδύνους επάρκειας, με αποτέλεσμα η περιορισμένη διαθεσιμότητά του να επηρεάσει σημαντικά τη διάδοση των ενεργειακά νέων τεχνολογιών (Hurd et al., 2012).

Λόγω της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας και των υψηλών εκλυόμενων εκπομπών άνθρακα κατά τη φάση παραγωγής των μπαταριών λιθίου, η επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων στην ανθρώπινη τοξικότητα και στον ευτροφισμό είναι υψηλότερη από αυτήν των συμβατικών αυτοκινήτων (Del Duce et al., 2016; Pero et al., 2018; Qiao et al., 2017; Samaras and Meisterling, 2008; Sisani et al., 2022). Κατά τη φάση της χρήσης των μπαταριών, η περιβαλλοντική απόδοση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων επηρεάζεται σημαντικά από το ενεργειακό μείγμα. Ειδικότερα, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που σχεδιάζονται και λειτουργούν με καθαρή ενέργεια είναι σύμφωνα με τις περιβαλλοντικές μας προσδοκίες, ενώ τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα τα οποία "τροφοδοτούνται" με ενέργεια από τον άνθρακα μπορεί να προκαλέσουν σοβαρότερες ενεργειακές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις από ότι τα συμβατικά (Wang et al., 2013).

Επιπλέον, οι Dai κ.ά. (2019) σημείωσαν ότι οι επιπτώσεις στο ανθρακικό αποτύπωμα μπορεί να αλλάξουν σημαντικά ανάλογα από τον τόπο παραγωγής των μπαταριών λιθίου αλλά και από τον τόπο και τον τρόπο εξόρυξης των πρώτων υλών τους. Έτσι, οι Kelly κ.ά. (2020) τόνισαν ότι η εξόρυξη πρώτων υλών και η παραγωγή υλικών και στοιχείων των μπαταριών λιθίου σε διαφορετικές περιοχές ανά τον πλανήτη επηρεάζει στον κύκλο ζωής της μπαταρίας, στις εκπομπές ρύπων, στη συνολική κατανάλωση ενέργειας και στην κατανάλωση νερού, επομένως στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του κύκλου ζωής των μπαταριών λιθίου.

Συνοψίζοντας, κατά τη φάση χρήσης μιας μπαταρίας λιθίου υπάρχουν έμμεσες εκπομπές. Ως απάντηση στις επιπτώσεις των συνθηκών λειτουργίας, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μπορεί να επεκταθεί μέσω της αποτελεσματικής θερμικής διαχείρισης, μειώνοντας έτσι το ανθρακικό της αποτύπωμα. Όσον αφορά στις απώλειες ενέργειας λόγω των παραμέτρων σχεδιασμού, της αποδοτικότητας και του βάρους της μπαταρίας, οι εκπομπές άνθρακα μπορούν να μειωθούν έμμεσα βελτιώνοντας τον σχεδιασμό της μπαταρίας και επιδιώκοντας τη χρήση υλικών υψηλής απόδοσης που μειώνουν το βάρος της μπαταρίας και επιτυγχάνουν καλύτερη χρήση της χαμηλού κόστους καθαρής ενέργειας ή διακοπτόμενης ανανεώσιμης ενέργειας κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης.

Οι μπαταρίες δευτερογενούς χρήσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων εξακολουθούν να περιέχουν 70–80% της χωρητικότητας τους (Kamath et al., 2020). Η δευτερογενής χρήση

των αποσυρθέντων μπαταριών, όπως σε έξυπνα κτίρια, για την αποθήκευση ενέργειας από φωτοβολταϊκά ακόμη και ως οικιακές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, είναι φιλική προς το περιβάλλον και μειώνει το ανθρακικό αποτύπωμα των μπαταριών λιθίου (Cusenza et al., 2019b; Genikomsakis et al., 2013). Οι Tao και You (2021) έδειξαν επίσης ότι το ανθρακικό αποτύπωμα των μπαταριών λιθίου LMO, NMC και NCA κατά τη δευτερογενή τους χρήση μειώνεται κατά 9-15%, 31-44% και 19-30% αντίστοιχα. Η ανακύκλωση των μπαταριών λιθίου μετά από τη δευτερογενή τους χρήση μπορεί να μειώσει το ανθρακικό τους αποτύπωμα κατά 8% έως 17%.

Γενικά, οι μέθοδοι διαχείρισης των αποσυρθέντων μπαταριών ιόντων λιθίου (LIBs) περιλαμβάνουν κυρίως την επαναχρησιμοποίηση, την απόρριψη και την ανακύκλωση.

Η επαναχρησιμοποίηση σημαίνει τη δευτερογενή εφαρμογή των αποσυρθέντων μπαταριών σε περιπτώσεις όπως η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, η οικιακή χρήση και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επομένως, η επαναχρησιμοποίηση των μπαταριών λιθίου και εφόσον έχουν αποσυρθεί από τα ηλεκτρικά οχήματα, θα πρέπει να προτιμάται από την απόρριψη και την ανακύκλωση, καθώς περιλαμβάνει ακόμη το 70-80% της αρχικής τους χωρητικότητας. Μετά τη διαδικασία επαναχρησιμοποίησης, οι αποσυρόμενες μπαταρίες ιόντων λιθίου με ανεπαρκείς πλέον επιδόσεις μπορούν να ανακυκλωθούν για την ανάκτηση πολύτιμων υλικών ή να απορριφθούν.

Η απόρριψη αναφέρεται είτε στην άμεση απόρριψη είτε στην ταφή των αποσυρθέντων μπαταριών λιθίου, κάτι που όχι μόνο σπαταλά πόρους αλλά προκαλεί ανεπανόρθωτη ζημιά στο περιβάλλον. Τα βαρέα μέταλλα και άλλες χημικές ενώσεις εισχωρούν στον υδροφόρο ορίζοντα με ανεπιθύμητες συνέπειες για ολόκληρη την τροφική αλυσίδα και φυσικά για τον άνθρωπο.

Η ανακύκλωση περιλαμβάνει κυρίως τη ανάκτηση πολύτιμων υλικών από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου και την ένταξη αυτών σε άλλες χρήσεις. Ωστόσο, η εύρεση μιας οικονομικά αποδοτικής και φιλικής προς το περιβάλλον διαδικασίας ανακύκλωσης αποτελεί πρόκληση λόγω της ποικιλίας των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κάθοδο.

Οι χρησιμοποιούμενες μπαταρίες λιθίου περιέχουν εύφλεκτες οργανικές ενώσεις και κάποια άλατα λιθίου, τα οποία είναι τοξικά και η εισροή τους στο περιβάλλον προκαλεί ρύπανση. Επιπλέον, με την ταχεία επέκταση της αγοράς για οχήματα καθαρής ενέργειας, η επάρκεια των πρώτων υλών από φυσικούς πόρους θα μειωθεί σημαντικά, μη μπορώντας να καλύψει τη μελλοντική ζήτηση.

Επομένως, η εύρεση και η βελτίωση μιας κατάλληλης μεθόδου ανακύκλωσης των χρησιμοποιούμενων μπαταριών λιθίου κρίνεται αναγκαία. Οι χρησιμοποιούμενες μπαταρίες λιθίου περιέχουν πολλά στοιχεία υψηλής αξίας όπως είναι το κοβάλτιο (5%–20%), το λίθιο (5%–7%) και το νικέλιο (5%–7%). Επομένως, η ανακύκλωση των αποσυρθέντων μπαταριών λιθίου είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία του περιβάλλοντος και την επαναχρησιμοποίηση των πολύτιμων πόρων.

Η τιμή του ανθρακικού αποτυπώματος κατά τη φάση της παραγωγής είναι 216,2 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh, κατά τη φάση της χρήσης είναι 94,2 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh, και κατά τη φάση της ανακύκλωσης είναι -17,18 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh (αρνητική τιμή η οποία υποδηλώνει ότι η φάση της ανακύκλωσης συνεισφέρει στα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα). Αυτό σημαίνει ότι η ανακύκλωση ή ανάκτηση των πολύτιμων υλικών στο τέλος ζωής μιας μπαταρίας λιθίου μπορεί να επιφέρει σημαντικά οφέλη και να μειώσει το ανθρακικό της αποτύπωμα. Ανάλογα με τη χημική σύνθεση των μπαταριών μπαταρίες θα πρέπει να επιλεγεί και η κατάλληλη διαδικασία ανακύκλωσης ώστε να επιτευχθεί καλύτερη ανακύκλωση και υψηλότερα περιβαλλοντικά οφέλη. Η ενθάρρυνση της ανακύκλωσης των χρησιμοποιημένων μπαταριών και η αύξηση των ποσοστών ανακύκλωσης είναι σημαντικές για τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των μπαταριών λιθίου.

## 5.2 Οφέλη από την μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος

Τα οφέλη από την μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος ποικίλλουν. Ωστόσο, με την ραγδαία αύξηση της τεχνολογίας και την αλόγιστη χρήση των πρώτων υλών που υπάρχουν στη φύση, το σημαντικότερο όφελος είναι η συμβολή σε μια παγκόσμια προσπάθεια για την κλιματική αλλαγή. Είναι αναγκαίο να γίνει αυστηροποίηση των μέτρων που αφορούν στο περιβάλλον και είναι απαραίτητη η ενημέρωση και η ευαισθητοποίηση όλων. Η συμμόρφωση κάθε χώρας με την εθνική της νομοθεσία, η μείωση του λειτουργικού κόστους αλλά και κατ' επέκταση του ανθρακικού αποτυπώματος, έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση των παραβάσεων της νομοθεσίας και της επιβολής προστίμων.

Επίσης, η μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος επιφέρει μία διεύρυνση του πελατολογίου των επιχειρήσεων, καθώς σημειώνεται συνεχώς αύξηση των ευαισθητοποιημένων για την προστασία του περιβάλλοντος πολιτών, συμβάλλοντας ακόμη και με αυτόν τον τρόπο στην προσπάθεια που γίνεται για την επιβράδυνση της κλιματικής αλλαγής.

Ένα ακόμη όφελος για τις επιχειρήσεις και τους οργανισμούς οι οποίοι λαμβάνουν σοβαρά υπόψη τους και μειώνουν το ανθρακικό τους αποτύπωμα, είναι προτίμηση των πελατών και η υπεροχή τους έναντι των ανταγωνιστών. Η μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος όχι μόνο των μπαταριών λιθίου αλλά και άλλων προϊόντων και υπηρεσιών, καθιστώντας τη σαν "στάση ζωής", θα εξοικονομήσει πόρους στα ταμεία των κρατών καθώς θα μειωθούν ακόμη και οι δαπάνες υγείας. Ωστόσο, το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της προσπάθειας αυτής, είναι η διάσωση του πλανήτη, η οποία αποτελεί χρέος όλων προς τις επόμενες γενιές.

### 5.3 Προτάσεις για τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος

Για να επιτευχθούν περιβαλλοντικά οφέλη από την ανακύκλωση οχημάτων, πρέπει να ληφθούν μια σειρά από μέτρα. Πρώτα απ' όλα, κρίνεται αναγκαία η θέσπιση ενός αποτελεσματικού συστήματος νόμων και κανονισμών. Παγκοσμίως, η ανακύκλωση οχημάτων έχει προσελκύσει την προσοχή πολλών ανεπτυγμένων χωρών. Στις ΗΠΑ, χάρη στις αυστηρές ρυθμίσεις αλλά και στα κέρδη, πάνω από το 95% των μπαταριών δευτερογενούς χρήσης ανακυκλώνονται από συγκεκριμένες επιχειρήσεις, και περίπου το 80% των υλικών τους μπορεί να ανακτηθεί. Στην ΕΕ, όλα τα κράτη μέλη της Ευρώπης υποχρεώνονται από την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000/53/ΕΚ να διασφαλίζουν κατά 85% ανακύκλωση για τις μπαταρίες δευτερογενούς χρήσης, και κατά 95% ανάκτηση των χρησιμοποιούμενων υλικών. Στην Ιαπωνία, μια σειρά κανονισμών εστιάζει στη διαχείριση των μπαταριών δευτερογενούς χρήσης ενώ έχουν τεθεί σε εφαρμογή από το 2005. Άτυπες συμμαχίες, οι οποίες αποτελούνται από κατασκευαστές μπαταριών, επιχειρήσεις ανακύκλωσης και μη κερδοσκοπικούς οργανισμούς, παίζουν σημαντικό ρόλο στη βιομηχανία ανακύκλωσης μπαταριών. Η ακατάστατη αγορά και η αδύναμη ρυθμιστική εξουσία καθιστούν δύσκολη την επιβίωση των επιχειρήσεων ανακύκλωσης. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραδείγματα των ανεπτυγμένων χωρών, κάθε χώρα αναμεσα τους και η κινεζική κυβέρνηση, θα πρέπει να ορίσει τις ευθύνες κάθε συμμετέχοντα στη βιομηχανία ανακύκλωσης μπαταριών.

Άλλοι τρόποι μείωσης του ανθρακικού αποτυπώματος είναι: πρώτον, οι τεχνικές κατασκευής, ειδικά οι ενεργοβόρες διαδικασίες, να βελτιωθούν ώστε να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας και παράλληλα οι εκλυόμενες εκπομπές άνθρακα. Για παράδειγμα, μια μπαταρία λιθίου που παράγεται στις Η.Π.Α. εκπέμπει μόνο το ένα τρίτο των εκπομπών άνθρακα σε σχέση με μια μπαταρία που παράγεται στην Κίνα.



Δεύτερον, η ανακύκλωση των μπαταριών να είναι αποδοτική ως προς τη μείωση της κατανάλωσης υλικών, γεγονός που θα μειώνει έμμεσα την κατανάλωση ενέργειας και τις εκλύόμενες εκπομπές άνθρακα. Αν όλα τα υλικά των οχημάτων μπορούν να ανακυκλωθούν για την παραγωγή νέων, τότε μπορεί να εξοικονομηθεί περίπου το 30% της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών άνθρακα.

Επίσης, χρειάζεται η βελτίωση της ενεργειακής δομής παγκοσμίως. Τα ορυκτά καύσιμα θα πρέπει να αντικατασταθούν από ανανεώσιμες και καθαρές πηγές ενέργειας όπως είναι η ηλιακή ενέργεια, η αιολική κ.α. οι οποίες βοηθούν στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος των μπαταριών λιθίου, καθώς δεν θα χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια παραγόμενη από τον άνθρακα, σε κανένα στάδιο του κύκλου ζωής τους, ούτε κατά την εξόρυξη και τη συναρμολόγηση αλλά ούτε κατά την ανακύκλωση. Έτσι, θα επιτευχθεί η μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος και στην παραγωγή, στάδιο το οποίο έχει τις υψηλότερες εκπομπές άνθρακα.

Τέλος, θα πρέπει να γίνει αναζήτηση νέων τεχνολογιών μπαταριών, οι οποίες θα χρησιμοποιούν λιγότερα ή και καθόλου μέταλλα, ώστε να αποφευχθεί η εξόρυξη πολύτιμων μετάλλων και να μην υπάρχει άμεση εξάρτηση από αυτά. Η νέα αυτή τεχνολογία επιβάλλεται να είναι βιώσιμη, στοχεύοντας στο καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα τόσο για τον άνθρωπο και το περιβάλλον όσο και για την οικονομία, για τώρα, για αύριο, για το μέλλον.

#### **5.4 Τι άλλο πρέπει να φροντίσουμε;**

Η επίδραση της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής που προκαλείται από τις εκπομπές άνθρακα και η ρύπανση του περιβάλλοντος έχει αναδειχθεί και αποτελεί σημαντική απειλή για την αειφόρο ανάπτυξη, την κοινωνία και το περιβάλλον (Pfeifer et al., 2020; Qerimi et al., 2020; Zhao et al., 2022). Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας, οι εκπομπές άνθρακα παγκοσμίως ήταν πολύ υψηλές και ανέρχονταν στα 31,5 δισεκατομμύρια τόνοι για το 2020 και συνεχίζουν να αυξάνονται (Kabeyi and Olanrewaju, 2022). Η μείωση των εκπομπών άνθρακα και η ρύπανση του περιβάλλοντος έχει γίνει το επίκεντρο των περισσότερων χωρών και των πολιτικών τους.

Παρόλο που τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να προσφέρουν πολύ χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου υπό συγκεκριμένες συνθήκες, δεν είναι οχήματα μηδενικών εκπομπών. Για να επιτευχθούν μηδενικές εκπομπές, απαιτούνται πρόσθετα μέτρα, όπως η μείωση των συνολικών εκπομπών από την κυκλοφορία και η εφαρμογή στρατηγικών για



την αντιστάθμιση του άνθρακα. Ακόμη πιο σημαντικό, είναι να ελαχιστοποιηθούν οι εκπομπές CO<sub>2</sub> των ηλεκτρικών οχημάτων όχι μόνο φορτίζοντας τα με πράσινη ηλεκτρική ενέργεια αλλά και βελτιώνοντας τις διαδικασίες παραγωγής των μπαταριών και προωθώντας την επαναχρησιμοποίηση τους. Αυτές οι προσπάθειες είναι κρίσιμες για τη μέγιστη αξιοποίηση των περιβαλλοντικών οφελών της ηλεκτρικής κινητικότητας.

Η ανακύκλωση των μπαταριών ιόντων λιθίου (LIBs) αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις για αρκετούς λόγους, συμπεριλαμβανομένης της έλλειψης τυποποίησης στον σχεδιασμό και τη χημεία των LIBs, την ανάπτυξη των διαδικασιών ανακύκλωσης και την ανεπαρκή υποδομή ανακύκλωσης. Επιπλέον, οι μπαταρίες λιθίου περιέχουν αρκετά επικίνδυνα υλικά και λόγω των υψηλών ποσοτήτων υπολειπόμενης ενέργειας που περιέχονται σε αυτές, ιδιαίτερα στην περίπτωση που έχουν υποστεί ζημιά, τις καθιστούν επικίνδυνες στο να προκαλέσουν έκρηξη, πυρκαγιά αλλά και ανεξέλεγκτη εκπομπή τοξικών αερίων και ουσιών. Έτσι αποτελούν σημαντική απειλή για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον εάν δεν ανακυκλωθούν ή απορριφθούν σωστά.

Μέσα στους στόχους της κυκλικής οικονομίας, θα ήταν ο οικολογικός σχεδιασμός των μπαταριών λιθίου των ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς οι κατασκευαστές θα είχαν άμεσο οικονομικό όφελος από τον σχεδιασμό μπαταριών που είναι πιο εύκολες στην αφαίρεση και αποσυναρμολόγηση (η δυσκολία αφαίρεσης και αποσυναρμολόγησης των μπαταριών EV αποτελεί σήμερα σημαντικό εμπόδιο για την ανακύκλωση των LIBs).

Επίσης, η μεταφορά των μπαταριών για ανακύκλωση θα πρέπει να γίνεται χρησιμοποιώντας μείγμα ενέργειας στην οποία το μεγαλύτερο ποσοστό, και γιατί όχι ολόκληρο το ποσοστό, θα βασίζεται στην πράσινης ενέργεια, καθώς το κομμάτι της μεταφοράς αποτελεί μεγάλο ρυπαίνων κατά τον κύκλο ζωής των μπαταριών. Μία λύση για τη μείωση των εκπομπών κατά τη μεταφορά θα ήταν ο σχεδιασμός των εγκαταστάσεων ανακύκλωσης δίπλα στα σημεία συλλογής των μπαταριών.

Κάποια άμεσα μέτρα που μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν είναι ο εξηλεκτρισμός όλων των οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων των επιβατικών, η μείωση του μέγιστου ορίου ταχύτητας στους οδικούς άξονες, να προταθεί και να καθιερωθεί ο συνεπιβατισμός και η τηλεργασία όπου κρίνεται εφικτό. Ακόμη, θα πρέπει να δοθούν κρατικές επιδοτήσεις στους πολίτες για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα οποία σε συνδυασμό με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας από μπαταρίες δευτερογενούς χρήσης, θα παρέχουν και θα καταφέρουν να μειώσουν την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου.

Είναι πιο αναγκαίο από ποτέ να εγκαταλειφθεί η εξάρτηση μας από τον άνθρακα, να σχεδιαστούν και να μελετηθούν νέες προτάσεις και λύσεις, λιγότερο κοστοβόρες και λιγότερο επιβλαβείς για το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

## 6. Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές έρευνας

Η αξιολόγηση κύκλου ζωής (LCA) είναι μια συστηματική μέθοδος ανάλυσης για την ποσοτικοποίηση ολόκληρης της διαδικασίας προϊόντων, διεργασιών ή δραστηριοτήτων, συμπεριλαμβανομένης της εξόρυξης πρώτων υλών, της παραγωγής, της μεταφοράς, της χρήσης, της απόρριψης αποβλήτων, των πόρων που καταναλώνονται και των δυνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούνται από την εκπομπή ρύπων (Arshad et al., 2022; Perčić et al., 2022). Ο σκοπός της είναι να εντοπίσει κρίσιμα σημεία, να αποφύγει ή να επιβραδύνει αποτελεσματικά τη δευτερογενή ρύπανση ή τη μεταφορά της, να πραγματοποιήσει βέλτιστο έλεγχο στην πηγή και στη συνέχεια να διεξαγάγει επιστημονική, αποτελεσματική και συστηματική περιβαλλοντική διαχείριση (Xia και Li, 2022). Τα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044 καθορίζουν βασικές αρχές και απαιτήσεις για τον παραπάνω υπολογισμό και ανάλυση και περιγράφουν συνοπτικά τη συλλογή δεδομένων για τις μονάδες διεργασίας. Πολλοί επιστήμονες έχουν εφαρμόσει τη μέθοδο της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής για να εστιάσουν στην κατανάλωση πόρων και στη ρύπανση του περιβάλλοντος από τις μπαταρίες λιθίου (Liu et al., 2021; Lybbert et al., 2021).

Στο πλαίσιο για την παγκόσμια επίτευξη της απανθρακοποίησης, χώρες σε όλο τον κόσμο αναπτύσσουν τα ηλεκτρικά οχήματα για να εξομαλύνουν το πρόβλημα των υψηλών εκπομπών άνθρακα στον τομέα των μεταφορών. Ωστόσο, εάν τα ηλεκτρικά οχήματα είναι πραγματικά χαμηλού άνθρακα και φιλικά προς το περιβάλλον, εξαρτάται κυρίως από το ανθρακικό αποτύπωμα των μπαταριών που χρησιμοποιούν και των υλικών τους. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τον κύκλο ζωής των μπαταριών λιθίου οδήγησε στην αναγνώριση των βασικών παραγόντων που επηρεάζουν στις εκλυόμενες εκπομπές άνθρακα των μπαταριών. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν, τονίζουν ότι το μεγαλύτερο ανθρακικό αποτύπωμα μιας μπαταρίας λιθίου εμφανίζεται κυρίως κατά τη φάση παραγωγής της, ενώ η επαναχρησιμοποίηση των μπαταριών σε άλλες εφαρμογές και η κατάλληλη ανακύκλωση τους μπορούν να μειώσουν σε κάποιο βαθμό τις εκπομπές άνθρακα. Συγκεκριμένα, η φάση παραγωγής της μπαταρίας είναι ο κύριος συνεισφέρων άνθρακα στον κύκλο ζωής των μπαταριών, και η προετοιμασία υλικών όπως τα υλικά της ανόδου και της καθόδου, ο ηλεκτρολύτης και το αλουμίνιο που χρησιμοποιείται είναι οι παράγοντες που έχουν την κύρια επίδραση στο ανθρακικό αποτύπωμα. Επίσης, το ανθρακικό αποτύπωμα επηρεάζεται και από την τοποθεσία παραγωγής των μπαταριών και είναι

αποτέλεσμα των διαφορών στο μείγμα ενέργειας που χρησιμοποιείται. Έτσι προτείνονται μείγματα τα οποία να προέρχονται από την αιολική ή την ηλιακή.

Κατά τη χρήση των μπαταριών λιθίου, παράγοντες όπως το βάρος της μπαταρίας, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, οι λειτουργικές συνθήκες και η απόδοση επηρεάζουν τις ενεργειακές απώλειες της μπαταρίας και τον κύκλο ζωής της, με έμμεσο αποτέλεσμα στο ανθρακικό αποτύπωμα.

Οι μπαταρίες λιθίου διαθέτουν υψηλή πυκνότητα ενέργειας, υψηλή απόδοση, μεγάλη διάρκεια ζωής και φιλικότητα προς το περιβάλλον. Ωστόσο, σε χαμηλές θερμοκρασίες, η πυκνότητα ενέργειας και ισχύος των μπαταριών λιθίου υποβαθμίζονται δραματικά.

Το υψηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα, παρατηρήθηκε κατά την παραγωγή των μπαταριών λιθίου. Κρίνεται λοιπόν αναγκαία, η εύρεση μιας νέας τεχνολογίας, η οποία θα έχει μικρότερο ή μηδενικό ανθρακικό αποτύπωμα.

Οι πρόσφατες έρευνες αφορούν στον τύπο της μπαταρίας και τη βελτίωση της, με ένα νέο παίκτη να μπαίνει στην αγορά. Ο λόγος γίνεται για τις μπαταρίες λιθίου-αέρος (Li-air). Οι μπαταρίες λιθίου-αέρος (Li-air) έχουν μικρότερο αποτύπωμα άνθρακα από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου (LIBs) και τις μπαταρίες νατρίου-ιόντων (Na-ion), και αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της πολύ υψηλής ενεργειακής πυκνότητας τους κατά την εκφόρτιση 3500 Wh/ kg και κατά τη φόρτιση 11600 Wh/kg, η οποία είναι υψηλότερη από την τρέχουσα απόδοση της υπάρχουσας τεχνολογίας των LIBs.

Κατά την βιβλιογραφική ανασκόπηση, σημειώθηκε ότι η κάθοδος των μπαταριών λιθίου αποτελείται από βαρέα μέταλλα. Ωστόσο, στη νέα τεχνολογία, αυτή της μπαταρίας λιθίου-αέρα, τα βαρέα μέταλλα της καθόδου αντικαθίστανται με οξυγόνο. Είναι η νέα τεχνολογία η λύση για τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος των ηλεκτρικών αυτοκινήτων;

Ως εκ τούτου, προβλέπεται ότι η τεχνολογία των μπαταριών λιθίου αέρα Li-air θα είναι η κύρια πηγή ενέργειας για τις ηλεκτρονικές συσκευές, τα ηλεκτρικά οχήματα και αποθήκευση ενέργειας του μέλλοντος. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των μπαταριών λιθίου-αέρα, θα αντικαταστήσει την παραδοσιακή τεχνολογία μπαταριών λιθίου καθώς είναι περισσότερο ελαφριές, χαμηλού κόστους και φιλικές προς το περιβάλλον.

Τελικά, βάσει των προαναφερόμενων, αποτελούν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα τη λύση για τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος; Είναι οι εκπομπές των αυτοκινήτων ο μοναδικός συνεισφέρων στις εκπομπές άνθρακα; Θα υπάρξει στο μέλλον μια τεχνολογία, με μηδενικό ανθρακικό αποτύπωμα από την «γέννηση έως τον θάνατο

της; Είναι τελικά κύριο μέλημα της επιστημονικής κοινότητας και των κυβερνήσεων η ανακάλυψη πραγματικά πράσινων τεχνολογιών;

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

- Bansal, P., Bogner, W.C., 2002. "Deciding on ISO 14001: economics, institutions, and context". *Long. Range Plan.* 35 (3), 269–290.
- Big Room Inc. (2021), "Ecolabel index", available at: <http://www.ecolabelindex.com/>.
- Boiral, O., 2007. Corporate greening through ISO 14001: a rational myth? *Organ. Sci.* 18 (1), 127–146
- Brown C., Templin J., Cohen A., (2014) "Comparing the two and three parameter logistic models via likelihood ratio tests: A commonly misunderstood problem", *Appl. Psych. Meas.* 39 335–348, <https://doi.org/10.1177/0146621614563326>
- Chan, E.S.W., Hawkins, R., 2012. Application of EMS in a hotel context: a case study. *Int. J. Hospit. Manag.* 31 (2), 405–418.
- Cheret, D.; Santen, S. Battery Recycling. US 7,169,206, 2007
- Chen, M., Ma, X., Chen, B., Arsenault, R., Karlson, P., Simon, N., Wang, Y., 2019. Recycling end-of-life electric vehicle lithium-ion batteries. *Joule* 3 (11), 2622–2646.
- Chen, W-H., Hsieh. I-Y.L., 2023 "Techno-economic analysis of lithium-ion battery price reduction considering carbon footprint based on life cycle assessment", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 425
- Choe, G., Kim, H., Kwon, J., Jung, W., Park, K.-Y., Kim, Y.-T., 2024. Re-evaluation of battery-grade lithium purity toward sustainable batteries. *Nat. Commun.* 15 <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44812-3>.
- Commission. Retrieved from [https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf).
- Dangelico, R.M. (2017), "What drives green product development and how do different antecedents affect market performance? A survey of Italian companies with eco-labels", *Business Strategy and the Environment*, Vol. 26 No. 8, pp. 1144-1161, doi: 10.1002/bse.1975.
- Delmas, M. A., & Toffel, M. W. (2004). Stakeholders and environmental management

- practices: An institutional framework. *Business Strategy and the Environment*, 13(4), pp.209-222.
- Delmas, M.A., Montes-Sancho, M.J., 2011. "An institutional perspective on the diffusion of international management system standards: the case of the environmental management standard ISO 14001". *Bus. Ethics Q.* 21 (1), 103–132.
- EC-European Commission. (2019a). The Euro European Commission, 2017. Delivering on Low-Emission Mobility: A European Union that Protects the Planet, Empowers its Consumers and Defends its Industry and Workers, vol. 13. pean green deal. Brussels: European
- EC-European Commission. (2019b). 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. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>.
- Evangelinos, K.I., Allan, S., Jones, K. and Nikolaou, I.E. (2014), "Environmental management practices and engineering science: a review and typology for future research", *Integrated Environmental Assessment and Management*, Vol. 10 No. 2, pp. 153-162, doi: 10.1002/ieam.1504.
- Gutsch M., Leker J., (2023) "Costs, carbon footprint, and environmental impacts of lithium-ion batteries – From cathode active material synthesis to cell manufacturing and recycling". *Applied Energy* 353
- Hasan, M.M., Nekmahmud, M., Yajuan, L. and Patwary, M.A. (2019), "Green business value chain: a systematic review", *Sustainable Production and Consumption*, Elsevier B.V, Vol. 20, pp. 326-339, doi: 10.1016/j.spc.2019.08.003.
- Helmers, E. (2022). "The energy and emissions case and the lifecycle impact of electric cars" *Transport and Sustainability*, Volume 15, 33–50
- Hellweg S., Mil' a i Canals L., (2014) "Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment", *Science* 344 pp. 1109-1113. <https://doi.org/10.1126/science.1248361>



- Heras-Saizarbitoria, I., Boiral, O., 2013. "ISO 9001 and ISO 14001: towards a research agenda on management system standards". *Int. J. Manag. Rev.* 15 (1), 47–65.
- Hund, K., Porta, D. La, Fabregas, T. P., Laing, T., & Drexhage, J. (2020). "Minerals for climate action: The mineral intensity of the clean energy transition". [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org).
- IPCC (2018), "Global warming of 1.58C: an IPCC special report", available at: <https://www.ipcc.ch/sr15/>. *Green business process maturity* 2015
- Iraldo, F., Griesshammer, R. and Kahlenborn, W. (2020), "The future of ecolabels", *International Journal of Life Cycle Assessment*, Springer, Vol. 25 No. 5, pp. 833-839, doi: 10.1007/s11367-020-01741
- ISO 14000 family - Environmental management. [www.iso.org](http://www.iso.org).
- Jursova S., Burchart-Korol D., Pustejovska P., (2019) "Carbon footprint and water footprint of electric vehicles and batteries charging in view of various sources of power supply in the Czech Republic", *Environments* 6 (3) 38, <https://doi.org/10.3390/environments6030038>.
- King, A.A., Lenox, M.J., Terlaak, A., 2005. "The strategic use of decentralized institutions: exploring certification with the ISO 14001 management standard". *Acad. Manag. J.* 48 (6), 1091–1106
- Lamport L., (1994). *LaTeX: A Document Preparation System.*, Addison-Wesley Professional, 2nd Edition.
- Li, L.; Zhang, Z.; Li, B.; Gao, F.; Li, L. Q.; Jonas, J. B. Ecadherin and beta-catenin expression in sebaceous eyelid adenocarcinomas. *Graefe's Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.* 2011, 249 (12), 1867– 1873.
- Galli, A., Wiedmann, T., Ercin, E., Knoblauch, D., Ewing, B., Giljum, S., 2012. Integrating ecological, carbon, and water Footprint into a "Footprint Family" of indicators: definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecological Indicators* 16, 100–112
- Global Footprint Network (2017), "National footprint accounts 2017 edition", available at: [www.footprintnetwork.org/licenses/public-data-package-free-edition-copy/](http://www.footprintnetwork.org/licenses/public-data-package-free-edition-copy/)

- Gottlieb, D., Kissinger, M., Vigoda-Gadot, E. and Haim, A. (2012), “Analyzing the ecological footprint at the institutional scale - the case of an Israeli high-school”, *Ecological Indicators*, Vol. 18, pp. 91-97
- Grunert, K.G. and Wills, J.M. (2007), “A review of European research on consumer response to nutrition information on food labels”, *Journal of Public Health*, Vol. 15, pp. 385-99.
- Iraldo, F., Lanzini, P., Melis, M., Kahlenborn, W., Freier, I., Rubik, F., Ankele, K., Scheer, D. and Hertin, J. (2005), “EVER: Evaluation of Emas and Eco-Label for Their Revision”. Report 2: *Research Findings*, IEFÉ – Università Bocconi, Adelphi Consult, IOEW, SPRU Sussex University, and Valor & Tinge A/S, Milan
- Moro, A., & Helmers, E. (2017). A new hybrid method reducing the gap between WTW and LCA in the carbon footprint assessment of electric vehicles. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(1), 4–14.  
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11367-015-0954-z>
- Muralikrishna, I.V., Manickam, V., 2017. Chapter five - life cycle assessment. In: Muralikrishna, I.V., Manickam, V. (Eds.), *Environmental Management*. Butterworth-Heinemann, pp. 57–75. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811989-1.00005-1>.
- Nunes, L.M., Catarino, A., Ribau Teixeira, M. and Cuesta, E.M. (2013), “Framework for the intercomparison of ecological footprint of universities”, *Ecological Indicators*, Vol. 32, pp. 276-284
- Ouellet-Plamondon C., Hambert G., (2015). “*Life cycle assessment (LCA) of alkali-activated cements and concretes*”, Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes, 663-686, <https://doi.org/10.1533/9781782422884.5.663>
- Pandey D., Agrawal M., Pandey J.S. (2010). Carbon footprint: current methods of estimation. *Environ Monit Assess* DOI 10.1007/s10661-010-1678
- Qiao, H., Wei, Q., 2012. Functional nanofibers in lithium-ion batteries. In: *Functional Nanofibers and Their Applications*. Woodhead Publishing, pp. 197–208.
- Quinteros-Condorety, A.R., Golroudbary, S.R., Albareda, L., Barbiellini, B., Soyer, A.,

2021. Impact of circular design of lithium-ion batteries on supply of lithium for electric cars towards a sustainable mobility and energy transition., pp. 73–78.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.012>
- Sasaki, T., Ukyo, Y., Novák, P., 2013. Memory effect in a lithium-ion battery. *Nat. Mater.* 12 (6), 569–575. <https://doi.org/10.1038/nmat3623>.
- Ramachandra Rao, S., 2006. Chapter 1 - Introduction. In: Rao, S.R. (Ed.), *Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes*, Vol. 7., pp. 1–12.
- Ritchie, H., 2021. The price of batteries has declined by 97% in the last three decades.  
<https://ourworldindata.org/battery-price-decline>.
- Sena da Silva G. C., Dumke de Medeiros D., (2004), “Environmental management in Brazilian companies”, *Management of Environmental Quality: An International Journal*, Vol. 15, No.4, pp. 380-388
- Sommerville, R., Zhu, P., Rajaeifar, M.A., Heidrich, O., Goodship, V., Kendrick, E., 2021. A qualitative assessment of lithium ion battery recycling processes. *Resour. Conserv. Recycl.* 165, 105219
- Tao, Y., Rahn, C.D., Archer, L.A., You, F., 2021. Second life and recycling: energy and environmental sustainability perspectives for high-performance lithium-ion batteries. *Sci. Adv.* 7, eabi7633. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abi7633>.
- Thøgersen, J. (2002), “Promoting green consumer behavior with eco-labels”, in Dietz, T. and Stern, P. (Eds), “New Tools for Environmental Protection: Education, Information, and Voluntary Measures”, *National Academy Press*, Washington, DC, pp. 83-104.
- Van Den Heede, P., Maes, M., De Belie, N., 2014. Influence of active crack width control on the chloride penetration resistance and global warming potential of slabs made with fly ash + silica fume concrete. *Constr. Build. Mater.* 67, 74–80.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.032> .
- Vela Almeida, D., Kolinjivadi V., Ferrando T., Roy B., Herrera H., Goncalves V. M., Van Hecken G., (2023). The “Greening” of Empire: The European Green Deal as the EU first agenda. *Political Geography* 105, 1-10.

- Wackernagel, M. and Rees, W.E. (1996), *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*, New Society Publishers, Gabriola Island, BC.
- Wackernagel, M., Onisto, L., Bello, P., Callejas Linares, A., Susana Lopez Falfán, I., Méndez García, J., Isabel Suárez Guerrero, A. and Guadalupe Suárez Guerrero, M. (1999), "National natural capital accounting with the ecological footprint concept", *Ecological Economics*, Vol.29 No.3, pp.375-390, [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(98\)90063-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(98)90063-5)
- Wang C., B. Chen, Y. Yu, Wang Y., Zhang W., (2017) "Carbon footprint analysis of lithium ion secondary battery industry: two case studies from China", *J. Clean. Prod.* 163 241–251, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.057>.
- Wang L., Hu J., Yu Y., Huang K., Hu Y., (2020), "Lithium-air, lithium-sulfur, and sodiumion, which secondary battery category is more environmentally friendly and promising based on footprint family indicators?" *J. Clean. Prod.* 276 124244 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124244>.
- Wang, Y., Tang, B., Shen, M., Wu, Y., Qu, S., Hu, Y., et al., 2022. Environmental impact assessment of second life and recycling for LiFePO<sub>4</sub> power batteries in China. *J. Environ. Manag.* 314, 115083 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115083>.
- Wiedmann T. & Minx J. (2007). A definition of carbon footprint. ISAUK Research report 07-01, Durham ISAUK Research & Consulting.
- WRI/WBCSD (2004). *The Greenhouse gas protocol: A corporate accounting and reporting standard revised edition*. Geneva: World Business Council for Sustainable Development and World Resource Institute.
- WRI/WBCSD (2005). *The Greenhouse gas protocol: Project accounting*. Geneva: World Business Council for Sustainable Development and World Resource Institute.
- WRI/WBCSD (2006). *The Greenhouse gas protocol: Designing a customized greenhouse gas calculation tool*. Geneva: World Business Council for Sustainable Development and World Resource Institute.
- Wu H., Hu Y., Yu Y., Huang K., Wang L., (2021) "The environmental footprint of electric vehicle battery packs during the production and use phases with different functional

units", *Inter. J. Life Cycle Assess.* 26 97–113, <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01836-3>.

Yekini Suberu, M., Wazir Mustafa, M., Bashir, N., 2014. Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency. *Renew.Sustain. Energy Rev.* 35, 499–514. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.009>

Younesi, R., Veith, Gabriel M., Johansson, P., Edstrom K., Vegge, T., (2015). “Lithium salts for advanced lithium batteries: Li-metal, Li-O<sub>2</sub>, and Li-S”, *Energy and Environmental Science* 8, 1905-1922

Yu, A., Sumangil, M., 2022. Top electric vehicle markets dominate lithium-ion battery capacity growth. <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/blog/top-electric-vehicle-markets-dominate-lithium-ion-battery-capacity-growth>.

Zhou H., Li W., Poulet T., Basarir H., Karrech A., (2024). “Life cycle assessment of recycling lithium-ion battery related mineral processing by-products: A review”, *Minerals Engineering* 208

Zhou, L.-F., Yang, D., Du, T., Gong, H., Luo, W.-B., 2020. The current process for the recycling of spent lithium ion batteries. *Front. Chem.* 8.

Κανονισμός 761/2001/EK (2001). Για την εκούσια συμμετοχή οργανισμών σε κοινοτικό σύστημα οικολογικής διαχείρισης και οικολογικού ελέγχου (EMAS), Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης 24/04/2001.

Κανονισμός 1221/2009/EK (2009). Περί της εκούσιας συμμετοχής οργανισμών σε κοινοτικό σύστημα οικολογικής διαχείρισης και οικολογικού ελέγχου (EMAS), Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης 25/11/2009

## Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

<https://www.footprintnetwork.org/our-work/climate-change/>

<https://www.europarl.europa.eu/topics/el/article/20230316STO77629/klimatiki-allagita-aeria-thermokiou-pou-prokaloun-planitiki-uperthermansi>

<https://quno.org/sites/default/files/resources/International%20Environmental%20Law.pdf>

<https://www.consilium.europa.eu/el/policies/climate-change/paris-agreement/>

[https://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/el/FTU\\_1.2.1.pdf](https://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/el/FTU_1.2.1.pdf)

<https://www.consilium.europa.eu/el/policies/green-deal/>

[https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/859151/What is the European Green Deal el.pdf.pdf](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/859151/What_is_the_European_Green_Deal_el.pdf.pdf)

<https://eur-lex.europa.eu/EL/legal-content/summary/better-environmental-performance-community-eco-management-and-audit-scheme-emas.html>

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=CELEX%3A31993R1836>

[https://www.emas.de/fileadmin/user\\_upload/4-pub/UGA\\_Infosheet From-ISO-14001-to-EMAS.pdf](https://www.emas.de/fileadmin/user_upload/4-pub/UGA_Infosheet_From-ISO-14001-to-EMAS.pdf)

Υπέθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον.