



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος**

Σχεδιασμός δικτύου ανακύκλωσης μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων

Αριστοτέλης Λυγίζος

Δεκέμβριος 2023



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος**

Σχεδιασμός δικτύου ανακύκλωσης μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

του

**ΛΥΓΙΖΟΥ ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΗ**

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

Απόστολος Γιαννής (Επιβλέπων)

Γεώργιος Καρατζάς

Νικόλαος Διαγγελάκης

"Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό.

Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης.

Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης".

## **Ευχαριστίες**

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένεια μου για τη στήριξη κατά τη διάρκεια των ακαδημαϊκών μου σπουδών.

Ιδιαίτερα σημαντική υπήρξε η συνεισφορά του επιβλέποντος καθηγητή μου, κυρίου Απόστολου Γιαννή. Τον ευχαριστώ θερμά για την επιστημονική και συμβουλευτική καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια εκπόνησης της εργασίας με τις εύστοχες και πολύ εποικοδομητικές παρατηρήσεις του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Ελένη Καστανάκη για την πολύτιμη συμβολή της και τα στοιχεία που μου προσέφερε.

## Περίληψη

Η διαχείριση μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων, μετά το πέρας της ζωής τους, είναι ένα ζήτημα που θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα στο εγγενές μέλλον. Εκτιμάται πως η διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας λιθίου (LIB) ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι δέκα με δεκαπέντε χρόνια. Μετά το πέρας του κύκλου ζωής (EoL) τους θεωρούνται απόβλητα. Η ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση και επανασυναρμολόγηση, είναι τακτικές που χρησιμοποιούνται και θα πρέπει να μελετηθούν από οικονομικής αλλά και περιβαλλοντικής σκοπιάς. Στην Ελλάδα, την παρούσα χρονική στιγμή δεν υπάρχει κάποιο δίκτυο για την συλλογή και διαχείριση του συγκεκριμένου αποβλήτου, καθώς μέχρι στιγμής δεν είναι ικανές οι ποσότητες να το υποστηρίξουν. Στην παρούσα εργασία σχεδιάζεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής, ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης μπαταριών ιόντων λιθίου, προερχόμενες από ηλεκτρικά οχήματα, στην Περιφέρεια Αττικής. Λαμβάνοντας υπόψιν τα Εθνικά και Ευρωπαϊκά σχέδια με σκοπό την προώθηση της ηλεκτροκίνησης, καθώς και το ιστορικό πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων στη Ελλάδα, προσεγγίστηκαν οι ποσότητες που αναμένεται να παράγονται, αρχικά σε Πανελλήνιο επίπεδο και έπειτα σε επίπεδο Αττικής. Αφού υπολογίστηκαν οι ποσότητες του αποβλήτου για δύο σενάρια μέχρι το 2040, ήταν εφικτή η μελέτη χωροθέτησης των εγκαταστάσεων του δικτύου, που θα είχαν σημαντική επίδραση στη συνολική οικονομική ανάλυση του. Βάσει των δύο σεναρίων παραγωγής αποβλήτου, προβλέπεται πως στην Αττική θα πρέπει να διαχειριστούν μεταξύ 4.300 και 7.300 τόνων EoL LIBs. Αρχικά δημιουργήθηκαν και αναλύθηκαν τέσσερα σενάρια χωροθέτησης των υποδομών από τα οποία επιλέχθηκε το οικονομικά και περιβαλλοντικά βέλτιστο. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα λειτουργικά κόστη, τα κόστη μεταφοράς και επεξεργασίας αλλά και το κόστος του φόρου εκπομπών CO<sub>2</sub> που ορίζεται από την Ευρωπαϊκή Ένωση, με σκοπό τη λήψη μίας ολοκληρωμένης εικόνας του δικτύου. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για την εύρεση των εσόδων του δικτύου, τα οποία προέρχονται από την ανάκτηση των πολύτιμων μετάλλων που βρίσκονται στις μπαταρίες λιθίου καθώς και από την πώληση των επανασυναρμολογημένων μπαταριών εφόσον πληρούν τις κατάλληλες προδιαγραφές. Εφόσον υπολογίστηκαν οι παραπάνω παράμετροι και προσεγγίστηκε το κόστος επένδυσης που απαιτείται για την υλοποίηση του δικτύου, πραγματοποιήθηκε οικονομική ανάλυση. Στην οικονομική ανάλυση, υπολογίστηκαν χρήσιμοι οικονομικοί συντελεστές, με σκοπό την αξιολόγηση της παραπάνω επένδυσης. Η περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης του δικτύου υπολογίστηκε μεταξύ 6 και 8 ετών, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα συμφέρουσα, καθώς είναι πολύ μικρότερη από τον ορίζοντα σχεδιασμού μίας τέτοιας εγκατάστασης. Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι πολύπλευρη καθώς λαμβάνει υπόψιν πολλούς παράγοντες και δεδομένα και παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο δίκτυο για την διαχείριση των μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων στην Αττική.

## Abstract

The management of electric vehicle batteries at the end of their life (EoL EVBs) is a matter that will require particular attention in the near future. According to estimates, lithium batteries in electric vehicles have a lifespan of ten to fifteen years. Once they reach the end of their life cycle, these batteries are classified as waste. The implementation of strategies such as recycling, reuse, and remanufacturing should be considered from both an economic and environmental standpoint. In Greece, there is no network for the collection and management of this waste due to insufficient quantities to support such infrastructure. This final year project presents an integrated system for the collection, recycling, and remanufacturing of lithium-ion batteries from electric vehicles in the Region of Attica. Considering the national and European initiatives focused on advancing electromobility and taking into consideration the historical data of electric vehicle sales in Greece, the projected production quantities were estimated. Initially, this approximation was made on a nationwide scale and subsequently refined to the region of Attica. Upon completion of the waste quantity calculations for two different scenarios up until the year 2040, an investigation was conducted to determine the optimal locations for collection network facilities. Such facilities would undoubtedly exert a substantial influence on the comprehensive economic analysis. Based on two waste production scenarios, it is anticipated that the region of Attica will have to manage between 4,300 and 7,300 tonnes of End-of-Life Lithium-ion Batteries (EoL LIBs). Initially, four scenarios for the location of infrastructure were formulated and examined, ultimately leading to the selection of the most economically and environmentally advantageous option. Subsequently, the operational costs, transport and processing costs, as well as the CO<sub>2</sub> emission tax imposed by the European Union, were computed to present a comprehensive overview of the network. Finally, calculations were performed to determine the network's revenue, derived from the recovery of valuable metals present in lithium batteries and the sale of reassembled batteries meeting the required specifications. After computing the aforementioned parameters and approximating the investment costs needed for implementing the network, a comprehensive economic analysis was conducted. This analysis entailed the calculation of significant economic factors to assess the investment. The payback period for the network investment falls within the range of 6 to 8 years, which proves highly advantageous since it is considerably shorter than the planning period for such an installation. This research is characterized by its multifaceted nature as it takes into consideration numerous factors and data, ultimately presenting an integrated network for managing electric vehicle batteries in Attica.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	4
Περίληψη .....	5
Abstract .....	6
Πίνακας συντομογραφιών.....	10
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή .....	11
Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό μέρος.....	13
2.1 Ηλεκτροκίνηση .....	13
2.2.1 Παγκόσμια αγορά .....	13
2.2.2 Ελληνική/Εγχώρια αγορά .....	14
2.2.3 Ευρωπαϊκοί και εθνικοί στόχοι ηλεκτροκίνησης.....	15
2.3 Μπαταρίες.....	16
2.3.1 Μπαταρίες Μολύβδου - οξέος .....	17
2.3.2 Μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου (Ni-MH) .....	18
2.3.3 Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-Io) .....	18
2.3.4 Χλωριδίου Νικελίου – Νατρίου (Na/NiCl <sub>2</sub> ) .....	20
2.4 Ανακύκλωση μπαταριών .....	20
2.4.1 Τεχνολογίες ανακύκλωσης μπαταριών (Λιθίου) .....	21
2.4.1.1 Υδρομεταλλουργία (Hydrometallurgy) .....	22
2.4.1.2 Πυρομεταλλουργία (Pyrometallurgy).....	23
2.4.1.3 Άμεσες μέθοδοι (Direct recycling) .....	24
2.6 Αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα.....	24
Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία σχεδιασμού συστήματος .....	26
3.1 Πρόβλεψη μελλοντικής ανάπτυξης ηλεκτροκίνησης .....	26
3.2 Εκτίμηση μελλοντικής παραγωγής αποβλήτου .....	26
3.2.1 Ανάλυση ροής υλικών .....	26
3.2.2 Διάρκεια ζωής μπαταριών .....	28
3.2.3 Διαθέσιμες BEV για ανακατασκευή και επαναχρησιμοποίηση .....	29
3.2.4 Ανάκτηση υλικών .....	30
3.3 Επιλογή κέντρων συλλογής .....	32
3.4 Λογισμικό βελτιστοποίησης RELOG .....	32
3.5 Οικονομική ανάλυση .....	33
3.6 Μοντέλο σχεδιασμού συστήματος συλλογής μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων μετά το τέλος του κύκλου ζωής στην Αττική .....	35
3.6.1 Σχεδιασμός δικτύου ανακύκλωσης.....	35

3.6.2 Κύριες παραδοχές μοντέλου .....	36
3.6.3 Προτεινόμενο μοντέλο .....	37
3.6.3.1 Λειτουργικά κόστη .....	38
3.6.3.2 Κόστος εκπομπών CO <sub>2</sub> .....	40
3.6.4 Σενάρια χωροθέτησης εγκαταστάσεων δικτύου .....	42
3.6.4.1 Σενάριο 1 (Βασικό σενάριο) .....	42
3.6.4.2 Σενάριο 2.....	44
3.6.4.3 Σενάριο 3.....	46
3.6.4.4 Σενάριο 4.....	47
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα και Συζήτηση .....	49
4.1 Ετήσια ροή αποβλήτου .....	49
4.2 Εφαρμογή μοντέλου.....	52
4.2.1 Υπολογισμός εκπομπών CO <sub>2</sub> .....	53
4.3 Βέλτιστη χωροθέτηση εγκαταστάσεων ανακύκλωσης .....	55
4.3.1 Βέλτιστο σενάριο .....	55
4.4 Οικονομική ανάλυση .....	59
4.4.1 Υπολογισμός εξόδων .....	59
4.4.2 Υπολογισμός εσόδων.....	61
4.4.3 Υπολογισμών οικονομικών παραμέτρων .....	65
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις .....	67
5.1 Συμπεράσματα .....	67
5.2 Μελλοντικές προτάσεις .....	68
6. Βιβλιογραφία .....	69
7. Παραρτήματα.....	71
Παράρτημα 1.....	71
Παράρτημα 2.....	73
Παράρτημα 3.....	73
Παράρτημα 4.1.....	74
Παράρτημα 4.2.....	74
Παράρτημα 5.1.....	75
Παράρτημα 5.2.....	75
Παράρτημα 6.1.....	76
Παράρτημα 6.2.....	76
Παράρτημα 7.1.....	77
Παράρτημα 7.2.....	77
Παράρτημα 8.1.....	77



Παράρτημα 8.2.....	78
Παράρτημα 9.1.....	78
Παράρτημα 9.2.....	79

## Πίνακας συντομογραφιών

BEV	Battery electric vehicle (Αμιγώς ηλεκτρικό όχημα)
EVB	Electric vehicle battery
EoL	End of Life
LL Scenario	Low Lifetime Scenario
HL Scenario	High Lifetime Scenario
NPV	Net Present Value
PB	Payback Period
IRR	Internal Rate of Return
EV	Electric Vehicle
LIB	Lithium – ion battery

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η σταδιακή μετάβαση των μετακινήσεων από οχήματα με συμβατικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης σε κάθε είδους ηλεκτρικά οχήματα, έχει πλέον γίνει παγκόσμια επιτακτική ανάγκη. Οι μεταφορές ευθύνονται για το ένα πέμπτο των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ε.Ε. [1].

Τα τελευταία χρόνια, η αυξανόμενη ανησυχία για το περιβάλλον και τη κλιματική αλλαγή έχει προωθήσει την ταχεία ανάπτυξη και διάδοση των ηλεκτρικών οχημάτων (EVs). Η ραγδαία αυτή ανάπτυξη συνεπάγεται την ανάλογη αύξηση αποβλήτου LIBs που αποτελεί το κύριο στοιχείο των ηλεκτρικών οχημάτων.

Τα απόβλητα μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων περιέχουν επικίνδυνες ουσίες, και ο ακατάλληλος χειρισμός αλλά και η ανεξέλεγκτη διάθεση τους, μπορεί να αποτελέσει περιβαλλοντικό και υγειονομικό κίνδυνο.

Το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης εξέδωσε νέα οδηγία που ενισχύει τους κανόνες βιωσιμότητας για τις μπαταρίες και τα απόβλητα μπαταριών. Ο κανονισμός θα ρυθμίζει ολόκληρο τον κύκλο ζωής των μπαταριών, από την παραγωγή έως την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση και θα διασφαλίζει ότι είναι ασφαλείς, βιώσιμες και ανταγωνιστικές [19].

Είναι ευρέως γνωστό πως η ανάκτηση μετάλλων υψηλής αξίας δεν έχει αναπτυχθεί πλήρως σε εμπορική κλίμακα εξαιτίας της έλλειψης δικτύων συλλογής και βιώσιμων επενδύσεων. Είναι αναγκαία λοιπόν η ανάπτυξη αποτελεσματικών εφοδιαστικών συστημάτων για την συλλογή και διαχείριση των LIBs. Απαιτείται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την θέσπιση ορθών στρατηγικών ανακύκλωσης με στόχο την επίτευξη ενός σωστού συστήματος αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας.

Απαιτείται η συνολική κατανόηση των διαδικασιών λαμβάνοντας υπόψη τη συλλογή, επεξεργασία, μεταφορά και ανάπτυξη δικτύου. Συνεπώς, ο σχεδιασμός ενός συστήματος ανακύκλωσης πρέπει να είναι επαρκής από οικονομική, περιβαλλοντική και λειτουργική άποψη. Ένας σημαντικός παράγοντας είναι η ελαχιστοποίηση της απόστασης μεταφοράς που συμπεριλαμβάνεται στην διαδικασία ανακύκλωσης επομένως πρέπει να αξιολογηθεί συνολικά λαμβάνοντας υπόψη τα σημεία συλλογής και την ποσότητα των αποβλήτων που πρόκειται να παραχθούν.

Η παρούσα διπλωματική εργασία σκοπεύει στην ανάπτυξη μιας δομημένης και τεκμηριωμένης προσέγγισης για την αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα διαχείρισης μπαταριών ιόντων λιθίου από ηλεκτρικά οχήματα, στην Αττική. Στη μελέτη αυτή γίνεται ολοκληρωμένη προσέγγιση λαμβάνοντας υπόψη κρίσιμες μεταβλητές όπως η τοποθεσία των κέντρων συλλογής και εγκαταστάσεων ανακύκλωσης, οι μεταφορές, οι όγκοι αποβλήτων, η μελλοντική ανάπτυξη της αγοράς καθώς και οικονομικοί και τεχνικοί παράγοντες. Μείζονος σημασίας κρίνεται και η βελτιστοποίηση όλων αυτών των παραμέτρων, με σκοπό την περιβαλλοντική και οικονομική βιωσιμότητα. Αρχικά παρουσιάζονται οι τεχνολογίες μπαταριών, οι τεχνολογίες ανακύκλωσης και τα υλικά

και μέταλλα που μπορούν να ανακτηθούν από αυτές. Έπειτα παρουσιάζεται ενδελεχώς η μεθοδολογία και η στρατηγική σχεδιασμού του συστήματος αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας στην Αττική. Τέλος, εξετάζεται η βελτιστοποίηση του δικτύου μέσω εξειδικευμένου λογισμικού και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

## Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό μέρος

### 2.1 Ηλεκτροκίνηση

Με τη σταθερή ανάπτυξη της παγκόσμιας οικονομίας, η ζήτηση για ενέργεια συνεχίζει να αυξάνεται. Λόγω της αδυναμίας αναγέννησης των παραδοσιακών ορυκτών καυσίμων έχει οδηγήσει στη σταδιακή εξάντληση της ενέργειας, επιδεινώνοντας περαιτέρω το παγκόσμιο πρόβλημα της ενεργειακής έλλειψης. Ταυτόχρονα, η χρήση ορυκτών καυσίμων έχει σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον, λόγω των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, με αποτέλεσμα περιβαλλοντικά ζητήματα όπως η υπερθέρμανση του πλανήτη να βρίσκονται σταδιακά στο επίκεντρο της παγκόσμιας προσοχής. Στο πλαίσιο αυτό, η ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ραγδαία. Η αλλαγή στις παγκόσμιες μορφές ενέργειας και η αυξανόμενη προσοχή που δίνεται στα περιβαλλοντικά ζητήματα έχουν οδηγήσει στη διάδοση και την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων [\[3\]](#).

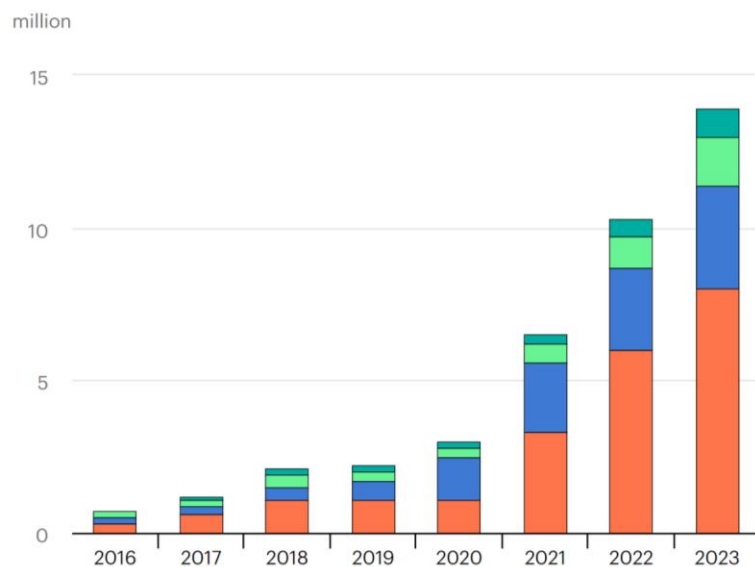
Τα ηλεκτρικά οχήματα, χρησιμοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύουν σε συσσωρευτές (μπαταρίες) για την κίνηση τους. Το μέσο προώθησης τους αποτελεί ο ηλεκτροκινητήρας, σε αντίθεση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης των συμβατικών οχημάτων.

### 2.2 Προοπτικές ανάπτυξης ηλεκτροκίνησης

#### 2.2.1 Παγκόσμια αγορά

Η παγκόσμια αγορά ηλεκτρικών οχημάτων τα τελευταία χρόνια σημειώνει εκθετική αύξηση, καθώς οι πωλήσεις ξεπέρασαν τα 10 εκατομμύρια το 2022 (Διάγραμμα 2.1). Τα τελευταία τρία έτη, το μερίδιο αγοράς των ηλεκτρικών οχημάτων, αυξήθηκε από 4% το 2020 σε 14% το 2022 [\[4\]](#).

Οι πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων αναμένεται μέχρι το τέλος του 2023 να ξεπεράσουν τις 14 εκατομμύρια, γεγονός που αντιπροσωπεύει αύξηση 35% σε σχέση με την περσινή χρονιά [\[4\]](#).



IEA. Licence: CC BY 4.0

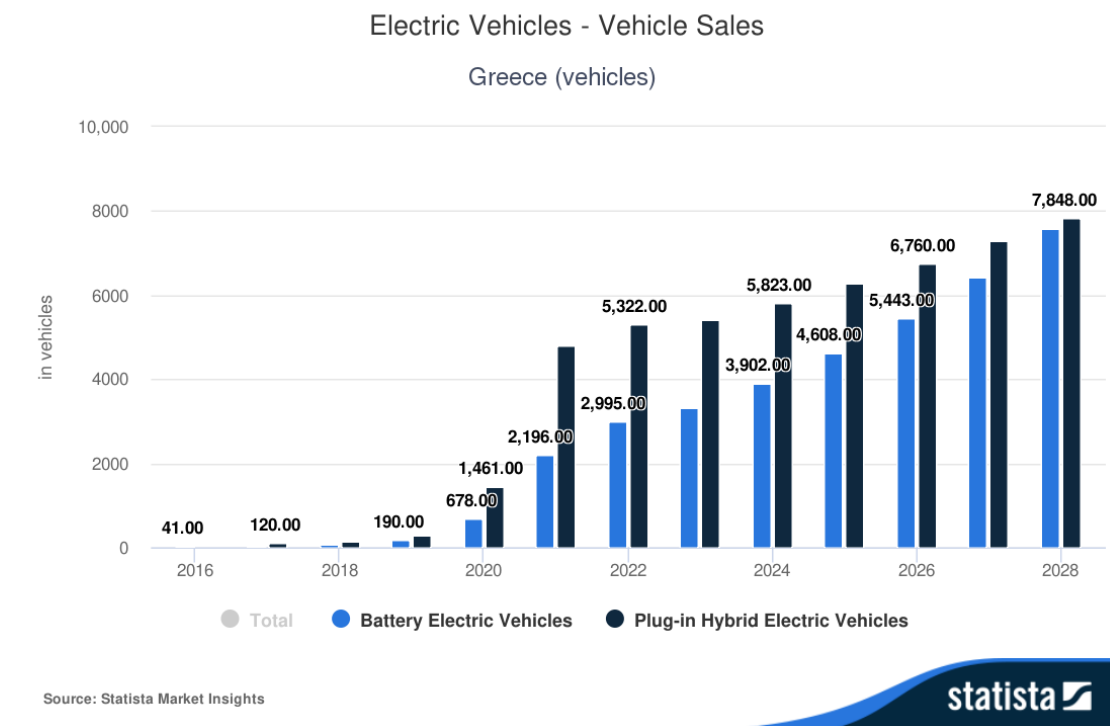
● China ● Europe ● United States ● Other

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2.1: Παγκόσμιες πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων, στις τρεις ισχυρότερες αγορές

Πηγή: IEA, *Electric car sales, 2016-2023*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-car-sales-2016-2023>, IEA. Licence: CC BY 4.0

### 2.2.2 Ελληνική/Εγχώρια αγορά

Στην Ελλάδα, τα τελευταία τέσσερα χρόνια έχει σημειωθεί σημαντική αύξηση στην αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων. Πιο συγκεκριμένα, στον αριθμό των ταξινομήσεων των ηλεκτρικών οχημάτων στη χώρα, το μερίδιο των ηλεκτρικών επί του συνόλου των νέων ταξινομήσεων επιβατηγών οχημάτων αυξήθηκε από 0.4% το 2019 σε 7.9% το 2022 [5] (Διάγραμμα 2.2).



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2.2: Πωλήσεις αμιγώς ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων στην Ελλάδα



### 2.2.3 Ευρωπαϊκοί και εθνικοί στόχοι ηλεκτροκίνησης

Η Ευρωπαϊκή Ένωση και η Ελληνική Κυβέρνηση έχουν καθορίσει συγκεκριμένους στόχους για το 2025, το 2030 και το 2050 σχετικά με τον εξηλεκτρισμό των οδικών και θαλάσσιων μεταφορών και την ανάπτυξη υποδομών φόρτισης

Οι σχετικές πολιτικές και οδηγίες της ΕΕ για την ηλεκτροκίνηση είναι η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, η δέσμη μέτρων "Fit for 55", η Οδηγία για τα Καθαρά Οχήματα (CVD - Clean Vehicle Directive), η Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων που βρίσκεται σε στάδιο επικαιροποίησης, καθώς και ο Κανονισμός για τις υποδομές εναλλακτικών καυσίμων που βρίσκεται σε στάδιο επικαιροποίησης. Επιπλέον, ο εθνικός κλιματικός νόμος και το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα περιλαμβάνουν επίσης λεπτομερείς στόχους για τον εξηλεκτρισμό των στόλων οχημάτων έως το 2030 [5].

Στην Εικόνα 1, παρουσιάζονται οι βασικοί στόχοι όπως αυτοί έχουν ορισθεί από τις Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, τον εθνικό κλιματικό νόμο και το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: Βασικοί στόχοι για την επίτευξη της ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα μέχρι το 2050 (Εθνικό Σχέδιο Ηλεκτροκίνησης ΥΠΕΝ)

	2025	2030	2050
 <b>Ανάπτυξη υποδομών φόρτισης</b>	<b>Ευρωπαϊκός Κανονισμός για τις υποδομές εναλλακτικών καυσίμων</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>600 kW κάθε 60 χλμ για ελαφρά οχήματα με ένα τουλάχιστον σημείο με έξοδο 150kW στο ΔΕΔ-Μ</li> <li>2,000 kW ανά 60 km/ 100 km για βαρέα οχήματα για το κεντρικό/εκτεταμένο ΔΕΔ-Μ με τουλάχιστον 2 σημεία εξόδου 800kW</li> </ul>	<b>Ευρωπαϊκός Κανονισμός για τις υποδομές εναλλακτικών καυσίμων</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>900 kW κάθε 60 km για ελαφρά</li> <li>5,000 kW ανά 60 km/ 100 km (κεντρικό/ εκτεταμένο ΔΕΔ-Μ) για βαρέα</li> </ul> <b>ΕΣΕΚ:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Όλα τα νησιά είναι διασυνδεδεμένα με το δίκτυο ενέργειας</li> <li>Ποσοστό ανανεώσιμης ενέργειας στην μεταφορές= 19%</li> </ul> <b>Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία :</b> <b>13% Μείωση εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα από καύσιμα</b>	<b>Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία:</b> <b>Κλιματική Ουδετερότητα</b> π.χ. χρήση πράσινης ενέργειας στις μεταφορές
 <b>Εξηλεκτρισμός Μεταφορών</b>	<b>Εθνικός Κλιματικός Νόμος:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>25 % των νέων εταιρικών αυτοκινήτων θα είναι ηλεκτρικά ή υβριδικά (&lt; 50 g/km)</li> <li>Τουλάχιστον 2,000 ηλεκτρικά ταξί</li> <li>Όλα τα νέα ταξί και το 1/3 των ενοικιαζόμενων αυτοκινήτων σε Αθήνα και Θεσσαλονίκη θα είναι ηλεκτρικά</li> </ul> <b>Ευρωπαϊκή Οδηγία για τα Καθαρά Οχήματα:</b> Ποσοστό καθαρών οχημάτων: 25 % για ελαφρά, 8 % για βαρέα, 33% για λεωφορεία (50 % μηδενικών εκπομπών)	<b>Εθνικός Κλιματικός Νόμος:</b> Όλα τα νέα αυτοκίνητα πρέπει να είναι μηδενικών εκπομπών → ο στόχος ίσως ισχύει από το 2035.  <b>Ευρωπαϊκή Οδηγία για τα Καθαρά Οχήματα:</b> Ποσοστό καθαρών οχημάτων: 25 % για ελαφρά, 10% για βαρέα, 47% για λεωφορεία (50 % μηδενικών εκπομπών)  <b>Δέσμη «Fit for 55» (Προσχέδιο):</b> Ταξινόμηση μόνο οχημάτων μηδενικών εκπομπών (επιβατικά και ελαφρά επαγγελματικά) από το 2035.	<b>Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία :</b> Ο συνολικός στόλος αποτελείται κυρίως από οχήματα μηδενικών εκπομπών

## 2.3 Μπαταρίες

Η μπαταρία είναι μια συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια που περιέχεται στα υλικά της απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης οξειδωσης-αναγωγής (οξειδοαναγωγής). Αυτός ο τύπος αντίδρασης περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από ένα υλικό σε ένα άλλο μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος.

Αν και συχνά χρησιμοποιείται ο όρος μπαταρία, η κυψέλη (cell) είναι η πραγματική ηλεκτροχημική μονάδα που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ή την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.

Για την κατανόηση των διαφορών μεταξύ μιας κυψέλης και μιας μπαταρίας, θα πρέπει να σκεφτεί κανείς ότι μια μπαταρία είναι μία ή περισσότερες από αυτές τις κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά ή παράλληλα ή και τα δύο, ανάλογα με την επιθυμητή τάση εξόδου και τη χωρητικότητα [6].

Οι τεχνολογίες μπαταριών που έχουν επικρατήσει, για χρήση σε ηλεκτρικά οχήματα είναι οι εξής:

- Μολύβδου – οξέος
- Νικελίου – Υδριδίου μετάλλου (Ni-MH)
- Ιόντων Λιθίου (Li-Ion)
- Χλωριδίου Νικελίου – Νατρίου (Na/NiCl<sub>2</sub>)

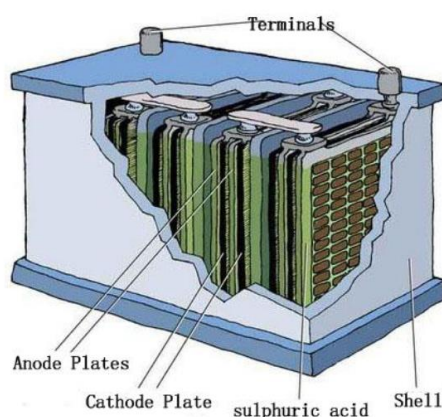


Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και η βελτίωση των ήδη καθιερωμένων, αναδεικνύει τις μπαταρίες ιόντων λιθίου σε αποκλειστικό «συνεργάτη» για τα υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα.

### 2.3.1 Μπαταρίες Μολύβδου - οξέος

Μια μπαταρία μολύβδου - οξέος αποτελείται από ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο από σπογγώδη ή πορώδη μόλυβδο. Ο μόλυβδος είναι πορώδης για να διευκολύνει το σχηματισμό και τη διάλυση του. Το θετικό ηλεκτρόδιο αποτελείται από οξείδιο του μολύβδου. Και τα δύο ηλεκτρόδια βυθίζονται σε ηλεκτρολυτικό διάλυμα θεικού οξέος και νερού. Σε περίπτωση που τα ηλεκτρόδια έρθουν σε επαφή μεταξύ τους μέσω φυσικής κίνησης της μπαταρίας ή μέσω αλλαγών στο πάχος των ηλεκτροδίων, μια ηλεκτρικά μονωμένη, αλλά χημικά διαπερατή μεμβράνη διαχωρίζει τα δύο ηλεκτρόδια. Η μεμβράνη αυτή εμποδίζει επίσης το ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα μέσω του ηλεκτρολύτη [20].

Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει χαμηλή ειδική ενέργεια, συνήθως μεταξύ 20Wh/kg και 40Wh/kg. Ο κύκλος ζωής τους είναι χαμηλός, συγκριτικά με τα υπόλοιπα είδη. Επιπλέον, η παρούσα τεχνολογία, λόγω της μακροχρόνιας παρουσίας της στην αγορά, είναι ώριμη και δεν υπάρχουν μεγάλα περιθώρια βελτίωσης. Γι' αυτό, δεν εξετάζεται η χρήση της σε μελλοντικά ηλεκτρικά οχήματα. Τέλος, το χαμηλό κόστος της την καθιστά κατάλληλη για χρήση σε οχήματα με χαμηλή επίδοση και μικρή εμβέλεια [7].



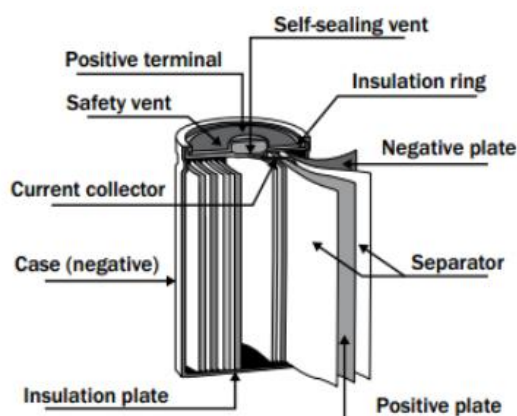
ΕΙΚΟΝΑ 2.1: Δομή μπαταρίας Μολύβδου – οξέος

Πηγή: Accurate circuit model for predicting the performance of lead-acid AGM batteries, Peng, 2011

### 2.3.2 Μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου (Ni-MH)

Η μπαταρία νικελίου-υδριδίου μετάλλου (Ni-MH) είναι ένας τύπος επαναφορτιζόμενης μπαταρίας. Το σύστημα αυτό είναι ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που βασίζεται σε ηλεκτροχημικές αντιδράσεις φόρτισης/εκφόρτισης που λαμβάνουν χώρα μεταξύ ενός θετικού ηλεκτροδίου (κάθοδος) και ενός αρνητικού ηλεκτροδίου (άνοδος). Τα ηλεκτρόδια διαχωρίζονται από μια διαπερατή μεμβράνη που επιτρέπει την ροή ηλεκτρονίων και ιόντων μεταξύ τους και είναι βυθισμένη σε ηλεκτρολύτη που είναι που αποτελείται από υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του καλίου το οποίο δεν υφίσταται σημαντικές μεταβολές κατά τη διάρκεια της λειτουργίας [21].

Οι μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου (Ni-MH) έχουν μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα, από εκείνη των μπαταριών μολύβδου, δηλαδή περίπου 70 Wh/kg. Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει το μειονέκτημα ότι η απόδοσή τους επηρεάζεται αρνητικά στις υψηλές θερμοκρασίες. Τα πλεονεκτήματά τους είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής, η αξιοπιστία τους, ενώ το κόστος τους είναι χαμηλότερο από εκείνο των μπαταριών λιθίου [8].



ΕΙΚΟΝΑ 2.2: Δομή μπαταρίας νικελίου-υδριδίου μετάλλου

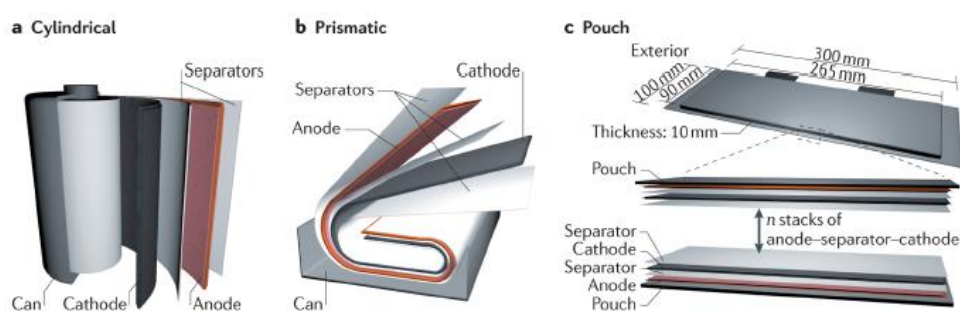
Πηγή: Nickel Metal Hydride battery: Structure, chemical reaction, and circuit model, Tarabay, 2015

### 2.3.3 Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-Io)

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου θεωρούνται οι πλέον αποδοτικότερες για τον τομέα της ηλεκτροκίνησης. Διαθέτουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα η οποία οφείλεται στις χημικές ιδιότητες του λιθίου. Η τεχνολογία αυτή, διακρίνεται από την υψηλή απόδοση και τη μεγάλη διάρκεια ζωής, ενώ οι δυνατότητες βελτίωσης είναι πολύ υψηλές. Ωστόσο, το κόστος παραγωγής των μπαταριών λιθίου είναι υψηλό, ενώ παρουσιάζει προβλήματα ασφάλειας σε περίπτωση υπερφόρτισης. Τέλος, λόγω της αυξανόμενης ζήτησης, έχουν τεθεί προβληματισμοί σχετικά με τη διαθεσιμότητα των υλικών και την

ορθολογική χρήση τους [7]. Όπως όλες οι μπαταρίες, έτσι και οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελούνται από 3 συστατικά:

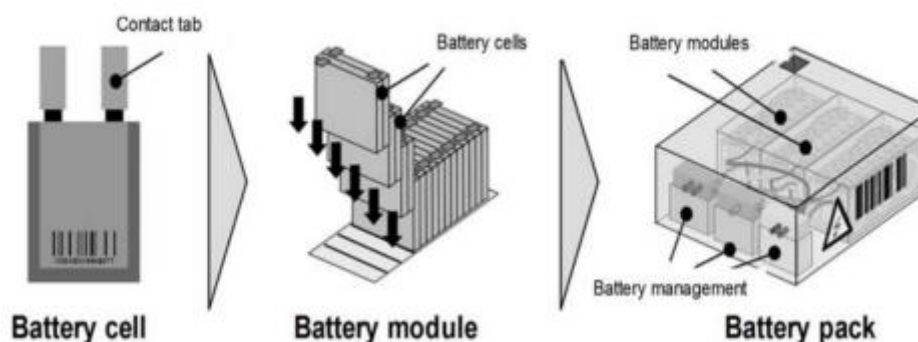
- Θετικό ηλεκτρόδιο – κάθοδος, που αποτελείται από οξείδιο λιθίου-κοβαλτίου ( $\text{LiCoO}_2$ ) ή από φωσφορικό άλας λιθίου σιδήρου
- Αρνητικό ηλεκτρόδιο -άνοδος αποτελείται από γραφίτη
- Ηλεκτρολύτης ποικίλει από μπαταρία σε μπαταρία. Οι υγροί ηλεκτρολύτες στις μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελούνται από άλατα λιθίου, όπως το  $\text{LiPF}_6$ ,  $\text{LiBF}_4$  ή  $\text{LiClO}_4$  σε οργανικό διαλύτη, όπως ανθρακικό αιθυλένιο, ανθρακικό διμεθύλιο και ανθρακικό διαιθύλιο. Ένας υγρός ηλεκτρολύτης δρα ως αγωγίμη οδός για την κίνηση κατιόντων που περνούν από τα αρνητικά προς τα θετικά ηλεκτρόδια κατά την εκφόρτιση [8].



ΕΙΚΟΝΑ 2.3: Απεικόνιση των τυπικών δομών μπαταριών ιόντων λιθίου- κυλινδρικές, πρισματικές και κυψέλες θήκης

Πηγή: Mapping the European reverse logistics of electric vehicle batteries, Bergh, 2020

Στην Εικόνα 2.4 απεικονίζεται η δομή μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου, από το βασικό της στοιχείο, την κυψέλη, έως και ολόκληρη τη μονάδα.



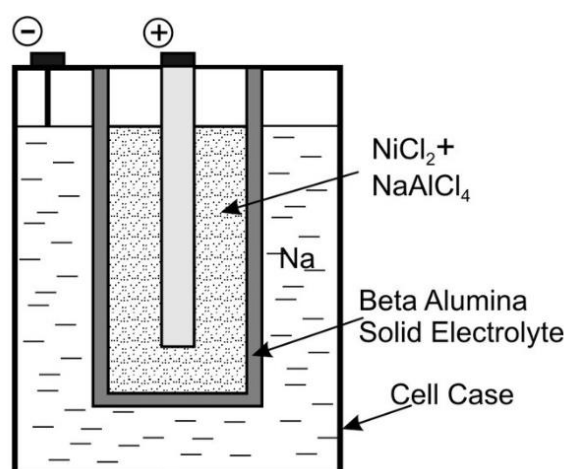
ΕΙΚΟΝΑ 2.4: Τα μέρη μιας μπαταρίας λιθίου, από τις κυψέλες έως ολόκληρη την μπαταρία

Πηγή: The operational environment for repurposing electric vehicle lithium-ion batteries for energy storage applications in the EU, McDougall, 2023

### 2.3.4 Χλωριδίου Νικελίου – Νατρίου (Na/NiCl<sub>2</sub>)

Η μπαταρίες Χλωριδίου Νικελίου - Νατρίου είναι ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που βασίζεται σε ηλεκτροχημικές αντιδράσεις φόρτισης/εκφόρτισης που λαμβάνουν χώρα μεταξύ ενός θετικού ηλεκτροδίου (κάθοδος) που αποτελείται κυρίως από νικέλιο (Ni) και χλωριούχο νάτριο (NaCl) και ενός αρνητικού ηλεκτροδίου (άνοδος) που συνήθως αποτελείται από νάτριο (Na). Τα ηλεκτρόδια χωρίζονται από ένα κεραμικό τοίχωμα beta - alumina που είναι αγωγίμο για τα ιόντα νατρίου αλλά απομονωτικό για τα ηλεκτρόνια. Αυτό το κεραμικό τοίχωμα beta - alumina λειτουργεί ως ηλεκτρολύτης και επιτρέπει την αγωγή των ιόντων νατρίου μεταξύ της ανόδου και της καθόδου των κυψελών. Η θερμοκρασία της μπαταρίας διατηρείται μεταξύ 270° C και 350° C ώστε τα ηλεκτρόδια να βρίσκονται σε υγρή κατάσταση [22].

Η παρούσα τεχνολογία θεωρείται ασφαλής και οικονομική, με κόστος σχεδόν 1/3 από αυτό μίας μπαταρίας ιόντων λιθίου. Έχει μεγάλη διάρκεια ζωής, με πάνω από 1000 κύκλους φόρτισης και μπορεί να αποφορτιστεί πλήρως, χωρίς να υποβαθμιστεί το προσδόκιμο ζωής της. Η ειδική της ενέργεια είναι συγκρίσιμη με αυτή των μπαταριών ιόντων λιθίου, ωστόσο η ειδική ισχύς της είναι πολύ χαμηλότερη με αποτέλεσμα να θεωρείται ανίκανη να τροφοδοτήσει εξολοκλήρου ένα ηλεκτρικό όχημα [7].



ΕΙΚΟΝΑ 2.5: Δομή κυψέλης μπαταρίας Χλωριδίου Νικελίου – Νατρίου

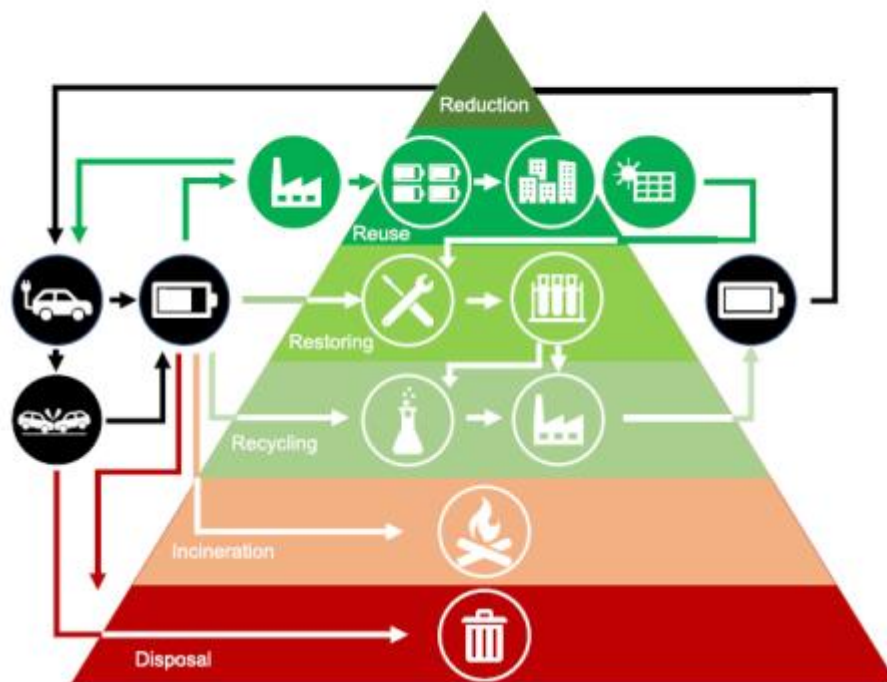
Πηγή: *Tendencies in electric and hybrid electric vehicles batteries*, Danila, 2009

## 2.4 Ανακύκλωση μπαταριών

Δεδομένης της σταθερής αύξησης των τιμών των πολύτιμων μετάλλων, όπως το κοβάλτιο και το λίθιο, και της συσχέτισης της ζήτησης αυτών από τις βιομηχανίες παραγωγής μπαταριών, καταβάλλονται ολοένα και περισσότερες προσπάθειες για την ανάκτηση αυτών των μετάλλων. Σκοπός αυτού είναι τόσο η ανάγκη κάλυψης της

μελλοντικής ζήτησης αλλά και η προσπάθεια για οικονομική βελτιστοποίηση των εν λόγω βιομηχανιών, ώστε η αγορά ηλεκτρικών οχημάτων να γίνει πιο ανταγωνιστική.

Στην Εικόνα 2.6 απεικονίζεται η ιεράρχηση των διαδικασιών καθώς και η κατάληξη που μπορεί να έχει μια κυψέλη.

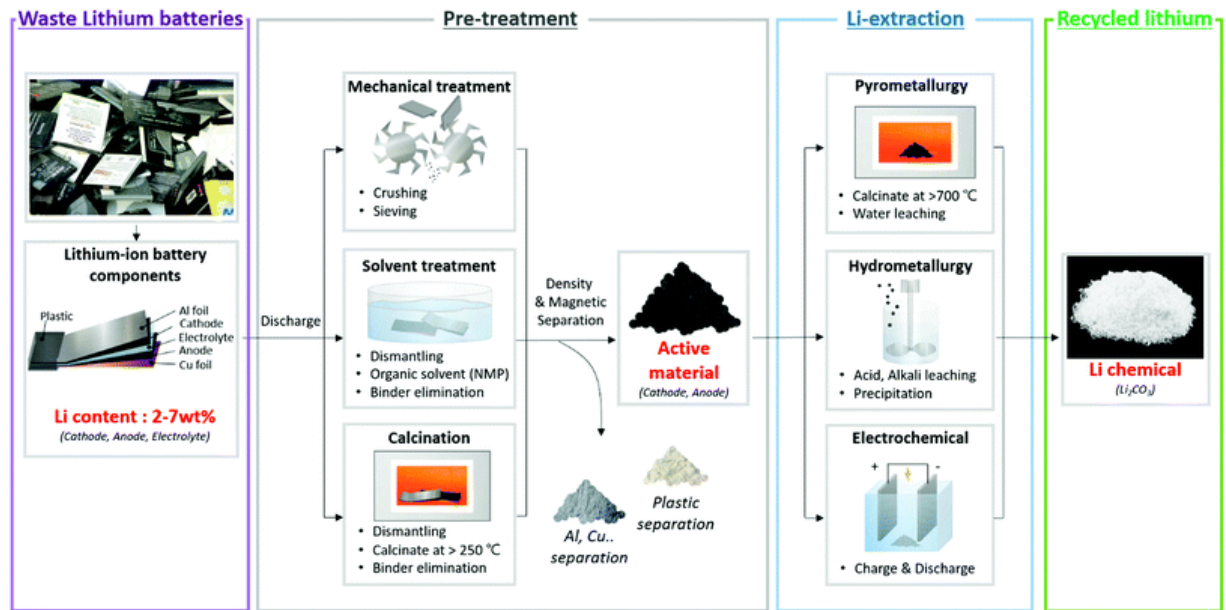


ΕΙΚΟΝΑ 2.6: Σχηματική απεικόνιση ιεράρχησης διαδικασιών και ροών EoL EVBs

Πηγή: *The operational environment for repurposing electric vehicle lithium-ion batteries for energy storage applications in the EU*, McDougall, 2023

#### 2.4.1 Τεχνολογίες ανακύκλωσης μπαταριών (Λιθίου)

Λόγω της πολύπλοκης δομής και του αριθμού των υλικών των μπαταριών ιόντων λιθίου (LIB), πρέπει να υποβληθούν σε διάφορες διεργασίες πριν από την ανακύκλωση. Οι LIBs πρέπει πρώτα να ταξινομηθούν και τις περισσότερες φορές να υποστούν προ επεξεργασία μέσω αποφόρτισης ή αδρανοποίησης, αποσυναρμολόγησης και διαχωρισμού, μετά την οποία μπορούν να υποβληθούν σε άμεση ανακύκλωση, πυρομεταλλουργία, υδρομεταλλουργία ή συνδυασμό αυτών.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2.1: Σχηματική απεικόνιση των σταδίων και τεχνικών ανακύκλωσης μπαταριών ιόντων λιθίου

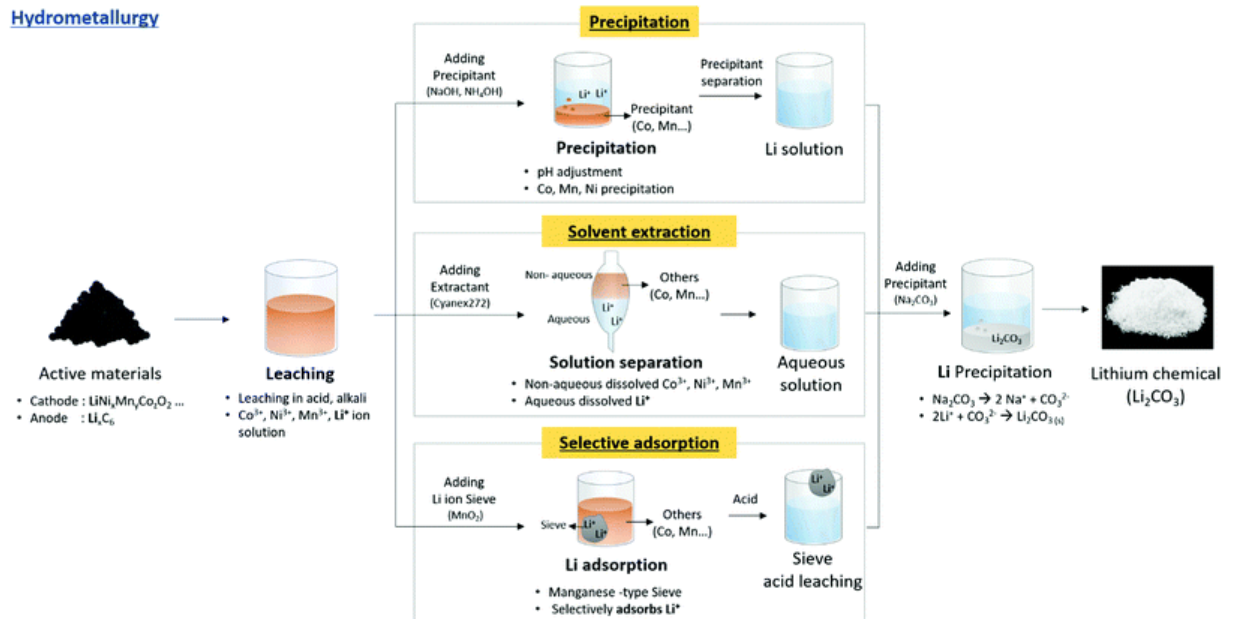
Πηγή: Technologies of lithium recycling from waste lithium ion batteries: a review, Bae, 2021

Στις περισσότερες περιπτώσεις, σήμερα χρησιμοποιούνται συνδυασμοί υδρομεταλλουργικών και πυρομεταλλουργικών μεθόδων για την επεξεργασία μπαταριών ιόντων λιθίου [9].

#### 2.4.1.1 Υδρομεταλλουργία (Hydrometallurgy)

Οι υδρομεταλλουργικές μέθοδοι χρησιμοποιούν κυρίως υδατικά διαλύματα για την εξαγωγή και τον διαχωρισμό των μετάλλων από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου (LIB). Τα προ επεξεργασμένα υλικά μπαταρίας εκχυλίζονται συχνότερα με θειικό οξύ ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) και υπεροξείδιο του υδρογόνου ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν υδροχλώριο ( $\text{HCl}$ ), νιτρικό οξύ ( $\text{HNO}_3$ ) και οργανικά οξέα, συμπεριλαμβανομένων του κιτρικού και του οξαλικού οξέος. Μόλις τα μέταλλα εξαχθούν στο διάλυμα, καταβυθίζονται επιλεκτικά ως άλατα μέσω μεταβολής του pH ή εκχυλίζονται χρησιμοποιώντας οργανικούς διαλύτες που περιέχουν φωσφονικά άλατα [9].





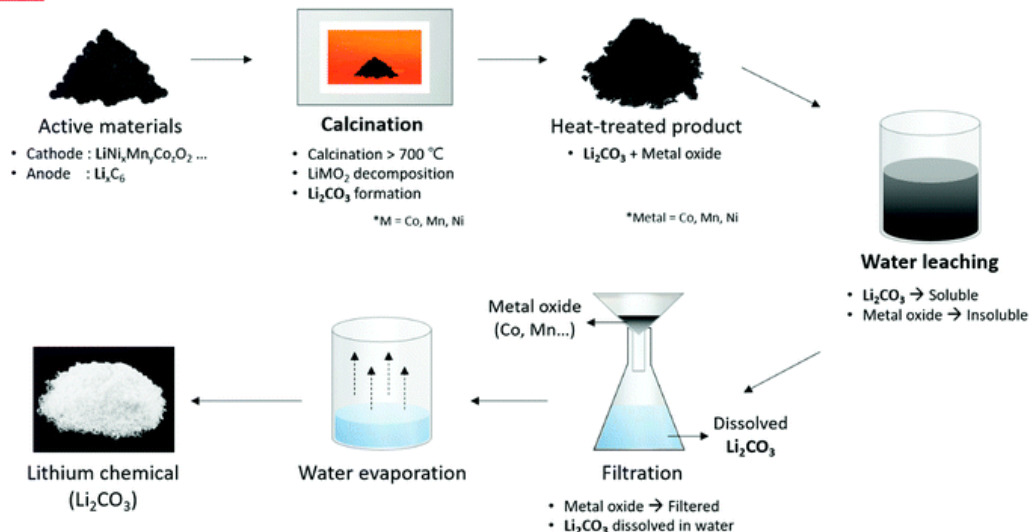
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2.2 : Τυπική διαδικασία επεξεργασίας μπαταριών ιόντων λιθίου με τη μέθοδο της υδρομεταλλουργίας

Πηγή: Technologies of lithium recycling from waste lithium ion batteries: a review, Bae, 2021

#### 2.4.1.2 Πυρομεταλλουργία (Pyrometallurgy)

Η πυρομεταλλουργία χρησιμοποιεί θερμότητα για τη μετατροπή οξειδίων των μετάλλων που χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες σε μέταλλα ή ενώσεις μετάλλων. Κατά την τήξη, τα υλικά των μπαταριών (μετά την προ επεξεργασία) θερμαίνονται υπό κενό ή αδρανή ατμόσφαιρα ώστε τα οξείδια των μετάλλων να μετατραπούν σε ένα κράμα μετάλλων που περιέχει (ανάλογα με τη σύνθεση της μπαταρίας) κοβάλτιο, νικέλιο, χαλκό, σίδηρο και σκωρία (slag) που περιέχει λίθιο και αλουμίνιο. Οι πυρομεταλλουργικές μέθοδοι απαιτούν απλούστερες μεθόδους προεπεξεργασίας (συχνότερα τεμαχισμό ή θραύση) για την προετοιμασία των μπαταριών προς ανακύκλωση και απαιτούν λιγότερες διαφορετικές μεθόδους για την ανακύκλωση LIB διαφορετικής σύνθεσης, σχήματος και μεγέθους. Το λίθιο μπορεί να ανακυκλωθεί με ορισμένες πυρομεταλλουργικές μεθόδους, αλλά οι μέθοδος αυτή είναι πιο αποτελεσματική για ιδιαίτερα πολύτιμα μέταλλα όπως το κοβάλτιο [9].

### Pyrometallurgy



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2.3 : Τυπική διαδικασία επεξεργασίας μπαταριών ιόντων λιθίου με τη μέθοδο της πυρομεταλλουργίας

Πηγή: Technologies of lithium recycling from waste lithium ion batteries: a review, Bae, 2021

#### 2.4.1.3 Άμεσες μέθοδοι (Direct recycling)

Οι άμεσες μέθοδοι, όπου το υλικό της καθόδου αφαιρείται για επαναχρησιμοποίηση ή ανακατασκευή, απαιτούν αποσυναρμολόγηση των μπαταριών για να προκύψουν τα χρήσιμα υλικά της μπαταρίας.

## 2.6 Αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα

Η αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα (RL) περιλαμβάνει την αντίστροφη διανομή των υλικών και την ανακύκλωση, όπως επίσης και τη μείωση της ποσότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγική διαδικασία. Συνολικά, η αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα μπορεί να οριστεί ως το σύνολο των διαδικασιών της εφοδιαστικής αλυσίδας που σχετίζονται με την ανακύκλωση, επανάκτηση, επαναχρησιμοποίηση και αντικατάσταση υλικών και κατά συνέπεια τη διαχείριση των αποβλήτων και των επικινδυνών υλικών [10].

Οι βασικές διεργασίες για τη λειτουργία μίας αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας είναι οι εξής:

- Η συλλογή των εμπορευμάτων προς επιστροφή από τον υπεύθυνο της εταιρείας.
- Η μεταφορά των εμπορευμάτων. Ανάλογα με το είδος της επιστροφής υπάρχουν ειδικοί κανονισμοί στην εκτέλεση της μεταφοράς.



- Η παραλαβή, στο βήμα αυτό τα επιστρεφόμενα εμπορεύματα παραλαμβάνονται από την εταιρεία και γίνεται η εισαγωγή τους στο σύστημα διαχείρισης επιστροφών της εταιρείας.
- Ο έλεγχος, στο στάδιο αυτό τα εμπορεύματα ελέγχονται σχετικά με την κατάσταση στην οποία βρίσκονται.
- Η διαλογή, κατά την οποία τα εμπορεύματα κατατάσσονται ανά κατηγορία.
- Η διαχείριση, στο τελευταίο βήμα τα εμπορεύματα ανάλογα με την κατάσταση τους, λαμβάνουν την αντίστοιχη διαχείριση. (ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση, διάθεση)

Για τη μεταφορά EoL EVBs, πρέπει να πληρούνται διάφοροι κανονισμοί για τη μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων, οι οποίοι βασίζονται στον κανονισμό ADR (United Nations, 2020). Οι κανονισμοί αυτοί περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα τομέων, όπως η συσκευασία των μπαταριών EoL, η τεκμηρίωση της μεταφοράς και οι απαιτήσεις του οχήματος μεταφοράς. Οι LIBs έχουν καταταχθεί στην κατηγορία εννέα (Class 9) της πιο πρόσφατης συμφωνίας σχετικά με τη διεθνή οδική μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων (ADR). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν ουσίες και αντικείμενα τα οποία, κατά τη διάρκεια της μεταφοράς, παρουσιάζουν κίνδυνο που δεν καλύπτεται από τις άλλες κατηγορίες (United Nations, 2022).

Προτού οι LIBs μπορούν να μεταφερθούν, πρέπει να περάσουν τη δοκιμή UN 38.3, κατά την οποία ελέγχονται, μεταξύ άλλων, σε κρούση, εξωτερικό βραχυκύκλωμα, πρόσκρουση, σύνθλιψη και αναγκαστική εκφόρτιση. Ένα σημαντικό στοιχείο που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι εάν το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας (BMS) της EVB αντικατασταθεί κατά τη διαδικασία επαναχρησιμοποίησης, η δοκιμή UN 38.3 πρέπει να επαναληφθεί, γεγονός που αυξάνει σημαντικά το κόστος. Το πρότυπο ασφαλείας IEC EN 62281: Ασφάλεια πρωτογενών και δευτερογενών κυψελών και μπαταριών λιθίου κατά τη διάρκεια Μεταφοράς, είναι επίσης σημαντικό για την επαναχρησιμοποίηση [\[23\]](#).

Για τη μεταφορά των μπαταριών απαιτείται η χρήση κιβωτίου. Τα ξύλινα κιβώτια, τα οποία πιθανώς χρησιμοποιούνται σήμερα, δεν είναι απαραίτητα επαναχρησιμοποιήσιμα. Ορισμένες εταιρείες έχουν ήδη αναπτύξει εξειδικευμένα πλαστικά κιβώτια μεταφοράς EoL EVBs πρόσφατα. Τα κιβώτια πρέπει να είναι επενδυμένα με μη εύφλεκτο υλικό, όπως PyroBubbles® ή βερμικουλίτης [\[16\]](#). Τα έξοδα για τη συσκευασία κατά τη μεταφορά δεν έχουν υπολογιστεί και δεν συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο της παρούσας εργασίας.

## Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία σχεδιασμού συστήματος

Για το σχεδιασμό ενός ολοκληρωμένου συστήματος συλλογής και ανακύκλωσης μπαταριών ιόντων λιθίου ηλεκτρικών οχημάτων, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη όλες οι παράμετροι του δικτύου και τα στάδια που το αποτελούν. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε η παρακάτω μεθοδολογία.

### 3.1 Πρόβλεψη μελλοντικής ανάπτυξης ηλεκτροκίνησης

Αρχικά, μέσω των δεδομένων των ιστορικών πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων (2010-2020) στην Ελλάδα, προβλέφθηκαν οι πωλήσεις έως και το 2040. Το σενάριο που ακολουθήθηκε ονομάζεται Sustainable Development Scenario (SDS) και λαμβάνει υπόψη τους στόχους που έχει θέσει η Ελλάδα για την προώθηση των ηλεκτρικών οχημάτων έως το 2030, σύμφωνα με τους κλιματικούς στόχους της συμφωνίας του Παρισιού [11].

Το ιστορικό πωλήσεων των BEV, προέρχεται από τα στοιχεία πωλήσεων οχημάτων της IEA (IEA, 2021) [11]. Η ανάλυση στην παρούσα μελέτη πραγματοποιείται για την Ελλάδα, παρόλο που τα δεδομένα και η μέθοδος είναι διαθέσιμα για την ΕΕ-27 τη Νορβηγία, την Ισλανδία, την Ελβετία και το Ηνωμένο Βασίλειο. Η αύξηση των ετήσιων πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων στην Ευρώπη, μεταξύ 2010 και 2020, ακολουθούν εκθετική αύξηση. Τα παραγόμενα δεδομένα περιλαμβάνουν προβλέψεις 5 ετών με βάση το σενάριο SD. Όμοια, αύξηση μεταξύ 2020 και 2030 φαίνεται να συνεχίζει να ακολουθεί εκθετική καμπύλη για τα τις BEV.

Επιπλέον, η επιρροή της πανδημίας Covid-19 στις πωλήσεις BEV το 2020-22 εξετάζεται επίσης. Φαίνεται ότι οι πωλήσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων το 2020 ήταν πιο ανθεκτικές, σε σχέση με τη συνολική αγορά αυτοκινήτων. Ένας λόγος για αυτό ήταν τα οικονομικά κίνητρα από την ΕΕ με τη μορφή επιδοτήσεων ή φορολογικών μειώσεων στις πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων [11].

### 3.2 Εκτίμηση μελλοντικής παραγωγής αποβλήτου

#### 3.2.1 Ανάλυση ροής υλικών

Ο υπολογισμός της ποσότητας EoL EVBs, δίνεται ως συνάρτηση των μπαταριών εισόδου (S) και της κατανομής πιθανότητας διάρκειας ζωής και περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση (1) [11]:

$$O_t = \sum_{i=0}^n (S_{t-i} \times f_i)$$

Όπου,

$f_i$  - η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας διάρκειας ζωής μπαταρίας

$n$  - η μέγιστη πιθανή διάρκεια ζωής

Η κατανομή της διάρκειας ζωής της μπαταρίας περιγράφεται από την κατανομή Weibull. Η κατανομή Weibull έχει αποδειχθεί πως είναι κατάλληλη για την περιγραφή της διάρκειας ζωής των ηλεκτρονικών προϊόντων, καθώς παρέχει την καλύτερη προσαρμογή για τις περισσότερες συσκευές. Αποτυπώνει επίσης τις ενεργές αλλαγές της διάρκειας ζωής λόγω της δυναμικής της φύσης [11].

Η κατανομή Weibull δύο παραμέτρων, χρησιμοποιείται ευρέως για ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό, όπως τηλεοράσεις, φορητοί υπολογιστές, μπαταρίες κ.α. και είναι απλούστερη από την κατανομή Weibull τριών παραμέτρων. Στατιστικές μελέτες για τα ηλεκτρονικά απόβλητα προτείνουν επίσης τη χρήση της κατανομής Weibull δύο παραμέτρων κατά τη μοντελοποίηση των ροών ηλεκτρονικών αποβλήτων [11].

Η κατανομή Weibull δύο παραμέτρων χρησιμοποιεί μόνο δύο παραμέτρους ( $\alpha$ : η παράμετρος μορφής και  $\beta$ : η παράμετρος κλίμακας), ενώ η κατανομή τριών παραμέτρων χρησιμοποιεί επιπλέον την παράμετρο της ελάχιστης διάρκειας ζωής,  $\gamma$ . Η πιο σύνθετη κατανομή Weibull τριών παραμέτρων, αντικατοπτρίζει καλύτερα τα δεδομένα της πραγματικής ζωής και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση (2) [11]:

$$f(t, \alpha, \beta, \gamma) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} (t - \gamma)^{\alpha-1} \exp\left(-\left[\frac{t - \gamma}{\beta}\right]^\alpha\right) \quad \text{για } t > \gamma$$
$$\text{και } f = 0 \quad \text{για } t < \gamma$$

Όπου,

$\alpha$  - η παράμετρος μορφής που περιγράφει τη σταδιακή γήρανση του προϊόντος

$\gamma$  - η ελάχιστη διάρκεια ζωής ή τιμή κατωφλίου σε έτη

$\beta$  - η παράμετρος κλίμακας που περιγράφει τη χαρακτηριστική διάρκεια ζωής του προϊόντος, δηλαδή ορίζει την ηλικία κατά την οποία το 63,2% των προϊόντων αναμένεται να έχει αποτύχει.

Εκτιμάται ότι η ελάχιστη διάρκεια ζωής των LIB (όλων των χημικών τύπων) από το 2005 έως το 2050 είναι 1 έτος σε παγκόσμια κλίμακα. Η παρούσα εργασία θεωρεί  $\gamma = 1$  έτος.

Όταν η μέση διάρκεια ζωής είναι γνωστή (ή αναμενόμενη σύμφωνα με την περίοδο εγγύησης) η παράμετρος κλίμακας υπολογίζεται ως εξής (3) :

$$\beta = (Average\_Lifetime - \gamma) / \Gamma(1 + 1/a)$$

Όπου,

$\Gamma$  – η συνάρτηση γάμμα

Η μέση διάρκεια ζωής (AL) δεν συμπίπτει με την παράμετρο κλίμακας ( $\beta$ ) όταν η ελάχιστη διάρκεια ζωής ( $\gamma$ ) λαμβάνεται ως 0. Για παράδειγμα, όταν  $\gamma = 0$ ,  $AL = 12$  έτη και  $\alpha = 3,5$ , τότε  $\beta = 13,34$  έτη. Ωστόσο, όταν  $\gamma = 1$ ,  $AL = 12$  έτη και  $\alpha = 3,5$ , τότε  $\beta = 12,23$  έτη. Στην τελευταία περίπτωση, το AL σχεδόν συμπίπτει με το  $\beta$  [11].

Για την ανάλυση της ροής υλικών, η σύνθεση του ρεύματος αποβλήτων ανακύκλωσης υπολογίζεται από τα BEV που ανακυκλώνονται μετά την πρώτη και τη δεύτερη διάρκεια ζωής των μπαταριών [11].

Για τα BEV μετά το πέρας της πρώτης τους ζωής (4) :

$$RC_{t,x}^{BEV} = \sum_{i=0}^n \{ [S_{t-i}^{BEV} \times Sh_{t-i}^{BT} \times f_i] \times sh_{t-i} \times Cap_{t-i}^{BEV} \times C_x \}$$

Όπου,

$S^{BEV}$  - οι πωλήσεις των BEV

$Sh^{BT}$  - μερίδιο της τεχνολογίας μπαταριών (NCA, LMO, LFP, NMC111, NMC523, NMC622, NMC811, NMC955)

$sh$  - μερίδιο ανακύκλωσης

$Cap^{BEV}$  – χωρητικότητα (kWh)

$C_x$  – κλάσμα μάζας του υλικού (kg/kWh)

Με παρόμοιο τρόπο, εκτιμώνται οι BEV μετά τη δεύτερη ζωή. Στην περίπτωση αυτή, όλες οι μπαταρίες μετά τη δεύτερη ζωή ανακυκλώνονται [11].

### 3.2.2 Διάρκεια ζωής μπαταριών

Η διάρκεια ζωής των μπαταριών των EV είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την εκτίμηση της ποσότητας των παρωχημένων μπαταριών. Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, π.χ. η χωρητικότητα της μπαταρίας και ο ρυθμός υποβάθμισης, η τεχνολογική πρόοδος και τα χρησιμοποιούμενα υλικά και το

πρότυπο χρήσης (οδηγική συμπεριφορά, συχνότητα φόρτισης, κατάσταση του δρόμου και συντήρηση) [11].

Οι EVBs των διαφόρων τεχνολογιών, έχουν τη δική τους διάρκεια ζωής, η οποία μπορεί να μην συμπίπτει με τη μέση διάρκεια ζωής των BEV. Η συνάρτηση κατανομής Weibull εξετάζει διάφορα πρότυπα διάρκειας ζωής των προϊόντων για να διαμορφώσει ρεαλιστικές κατανομές διάρκειας ζωής αντί να εξετάζεται μια σταθερή διάρκεια ζωής [11].

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται δύο δυναμικά σενάρια για να ληφθούν υπόψιν οι αλλαγές στο πρότυπο διάρκειας ζωής της μπαταρίας καθώς η τεχνολογία τους βελτιώνεται συνεχώς, ένα σενάριο υψηλής και ένα σενάριο χαμηλής διάρκειας ζωής (HL, LL). Στο σενάριο HL, η μέση διάρκεια ζωής των μπαταριών EV λαμβάνεται υπόψη ανάλογα με το έτος παραγωγής της μπαταρίας ως εξής: η μέση διάρκεια ζωής κατά τα έτη 2009-2016, 2017-2022, 2023-2030 είναι 4, 10 και 16 έτη, ενώ η παράμετρος μορφής είναι ίση με 3,5, με αποτέλεσμα οι παράμετροι κλίμακας να είναι 3,33, 10,00 και 16,67 αντίστοιχα [11].

Έρευνες πελατών έδειξαν ότι η διάρκεια ζωής των μπαταριών μπορεί να είναι μόλις 4-6 χρόνια στα πρώτα μοντέλα EV, ενώ η τρέχουσα διάρκεια ζωής είναι περίπου 10 χρόνια και αναμένεται να αυξηθεί στο μέλλον. Άλλες μελέτες έχουν επίσης χρησιμοποιήσει διάρκεια ζωής 5-15 ετών, ενώ η EUROBAT (Association of European Automotive and Industrial Battery Manufacturers) αναμένει ότι η διάρκεια ζωής των LIBs θα φθάσει τα 15 έτη το 2030 [24].

Σημειώστε ότι όταν  $\alpha = 3,44$  η κατανομή Weibull προσεγγίζει την κανονική συνάρτηση κατανομής. Η τιμή  $\alpha = 3,5$  έχει εκτιμηθεί από την αξιολόγηση της αξιοπιστίας του προτύπου αστοχίας πειραματικών δεδομένων των LIBs και χρησιμοποιήθηκε σε διάφορες. Η τιμή αυτή λαμβάνει υπόψη διάφορες απώλειες όπως η πρόωρη αστοχία της μπαταρίας ή τα τροχαία ατυχήματα [11].

Αφού εξετάστηκαν προσεκτικά οι περίοδοι εγγύησης που δίνονται για τις BEV από διάφορες εταιρείες [25], δημιουργήθηκε και ένα σενάριο χαμηλής διάρκειας ζωής που αντιστοιχεί σε μέση διάρκεια ζωής 4, 8, 12 ετών για τα έτη 2009-2016, 2017-2022, 2023-2030 αντίστοιχα. Τα δεδομένα του σεναρίου LL είναι παρόμοια με τη διάρκεια ζωής που θεωρείται από την Εθνική Ακαδημία Επιστημών των ΗΠΑ [11].

### 3.2.3 Διαθέσιμες BEV για ανακατασκευή και επαναχρησιμοποίηση

Στην παρούσα μελέτη, η ανακατασκευή εξετάζεται μόνο για BEV με  $\text{SoH} > 90\%$ , καθώς αυτό μπορεί να είναι οικονομικά βιώσιμο. Η ανακατασκευή μπαταριών (για επαναχρησιμοποίηση σε EV) εξετάζεται μετά το 2023 στην EE-27. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι  $\text{SoH} > 90\%$ , λαμβάνεται υπόψη μόνο το τμήμα των μπαταριών που απορρίπτονται εντός πέντε ετών από την πρώτη χρήση. Δεδομένου ότι οι BEV χάνουν περίπου το 20% της χωρητικότητάς τους σε περίπου 10 χρόνια, με αποτέλεσμα η  $\text{SoH}$

να είναι 80%, οι μπαταρίες που απορρίπτονται εντός 5 ετών θα μπορούσαν να έχουν SoH>90%. Τέλος, μόνο ένα ποσοστό 50% αυτών των μπαταριών θεωρείται τελικά κατάλληλο για ανακατασκευή λόγω διαφορών άλλων παραμέτρων [11].

Για την επαναχρησιμοποίηση (B2L), εξετάζεται ένα δυναμικό ποσοστό δεύτερης χρήσης ως εξής: 10% μέχρι το 2019, στη συνέχεια αυξάνεται γραμμικά από 10% σε 50% το 2030 και παραμένει σταθερό μετά το 2030. Η μέση διάρκεια ζωής της μπαταρίας θεωρείται 8 έτη και η παράμετρος μορφής  $\alpha = 3,5$  και  $\gamma = 0$ , επομένως, η παράμετρος κλίμακας είναι  $\beta = 8,89$ . Δεν εξετάστηκε ποσοστό μεγαλύτερο του 50% επαναχρησιμοποίησης, καθώς με την αναμενόμενη μείωση της τιμής των LIB, οι επαναχρησιμοποιούμενες μπαταρίες ενδέχεται να μην είναι.

### 3.2.4 Ανάκτηση υλικών

Για να εκτιμηθεί η δυναμική ανακύκλωσης του Li, Ni, Co και Cu, λαμβάνεται υπόψη η απόδοση ανάκτησης των μετάλλων. Αν και η απόδοση ανακύκλωσης του Co και του Ni είναι περίπου 85% μέσω πυρομεταλλουργικών και υδρομεταλλουργικών διεργασιών, η ανακύκλωση του Li είναι εξαιρετικά χαμηλή. Το 2015 δεν ανακτήθηκε ποσότητα λιθίου στην Ευρώπη, αλλά αυτό θα αλλάξει σύμφωνα με τους στόχους που τίθενται στην πρόταση του ευρωπαϊκού κανονισμού για τις μπαταρίες. Για παράδειγμα, η εν λόγω πρόταση θέτει ως στόχο την αποδοτικότητα ανακύκλωσης 35% για το Li το 2025 και 70% το 2030 για την ΕΕ, ενώ τόσο για το Ni όσο και για το Co 90% και 95% αντίστοιχα (Πίνακας 3.1). Έχουν υιοθετηθεί ειδικοί στόχοι ανακύκλωσης που ισχύουν για την ΕΕ, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τη μελλοντική βελτίωση των διαδικασιών ανακύκλωσης. Επί του παρόντος, ο γραφίτης δεν ανακυκλώνεται, καθώς η διαδικασία δεν είναι οικονομικά βιώσιμη, οπότε το υλικό αυτό δεν εξετάζεται. Ωστόσο, η πιθανή μελλοντική ανισορροπία στην προσφορά και τη ζήτηση αυτών των μετάλλων μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα της ανακύκλωσης, ιδίως για το Li. Αυτό μπορεί να προκαλέσει περαιτέρω αύξηση της αποδοτικότητας της ανακύκλωσης, η οποία θα επηρεάσει τις ποσότητες του ανακτηθέντος μετάλλου. Ωστόσο, καθώς η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στην περιοχή της ΕΕ-27, υιοθετούνται οι στόχοι ανακύκλωσης που έχει θέσει η ΕΕ.

Πίνακας 3.1: Ποσοστά ανάκτησης υλικών βάσει των στόχων της ΕΕ, από το 2013 έως το 2040

	<b>Li</b>	<b>Ni</b>	<b>Co</b>	<b>Cu</b>
2013	0.0	75.5	75.5	75.5
2014	0.0	76.7	76.7	76.7
2015	0.0	77.8	77.8	77.8
2016	0.0	79.0	79.0	79.0
2017	0.0	80.0	80.0	80.0
2018	4.4	81.3	81.3	81.3
2019	8.7	82.5	82.5	82.5
2020	13.1	83.7	83.7	83.7
2021	17.5	84.8	84.8	84.8
2022	21.9	86.0	86.0	86.0
2023	26.2	87.1	87.1	87.1
2024	30.6	88.3	88.3	88.3
2025	35.0	90.0	90.0	90.0
2026	42.0	90.6	90.6	90.6
2027	49.0	91.8	91.8	91.8
2028	56.0	93.0	93.0	93.0
2029	63.0	94.1	94.1	94.1
2030	70.0	95.0	95.0	95.0
2031	77.0	96.4	96.4	96.4
2032	84.0	97.6	97.6	97.6
2033	90.0	98.0	98.0	98.0
2034	90.0	98.0	98.0	98.0
2035	90.0	98.0	98.0	98.0
2036	90.0	98.0	98.0	98.0
2037	90.0	98.0	98.0	98.0
2038	90.0	98.0	98.0	98.0
2039	90.0	98.0	98.0	98.0
2040	90.0	98.0	98.0	98.0

Συνοψίζοντας, οι μπαταρίες που φθάνουν στο πέρας της ζωής τους, εκτιμώνται μέσω ανάλυσης ροής υλικών (material flow analysis) χρησιμοποιώντας δύο σενάρια διάρκειας ζωής: ένα χαμηλό (LL) και ένα υψηλό (HL).

Ένα μέρος των EoL LIBs θα ανακατασκευαστεί εάν απορριφθεί πρόωρα (εντός 5 ετών) και εφόσον η υγεία της μπαταρίας (SoH) είναι μεγαλύτερη του 90% της αρχικής. Ένα άλλο μέρος θα επαναχρησιμοποιηθεί σε άλλες εφαρμογές σύμφωνα με ένα δυναμικό μοτίβο επαναχρησιμοποίησης και θα υποστεί μια δεύτερη ζωή (B2L) και το υπόλοιπο θα ανακυκλωθεί (B2R).

Μετά τη χρήση των B2L σύμφωνα με το μοντέλο κατανομής δεύτερης ζωής Weibull, θα ανακυκλωθούν επίσης [\[11\]](#).

Η παραπάνω διαδικασία εκτιμά την μελλοντική παραγωγή αποβλήτου για ολόκληρη την Ελληνική επικράτεια σε GWh. Καθώς η παρούσα έρευνα στοχεύει στο σχεδιασμό ενός δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας για την Αττική, έγινε αναγωγή των ποσοτήτων αποβλήτου για την Αττική.

Πιο συγκεκριμένα, μέσω της απογραφής του 2021, υπολογίστηκε πως από τα 10.482.487 πολίτες, οι 3.814.064 κατοικούν εντός Αττικής, ποσοστό δηλαδή 36.39% [15].

Επομένως, τα αποτελέσματα υπολογισμού της μελλοντικής παραγωγής αποβλήτου ανάχθηκαν με ποσοστό 36.39%.

Με σκοπό τη μετατροπή των αποτελεσμάτων από GWh σε δεδομένα αξιοποιήσιμα από το μοντέλο που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3.6, καταγράφηκαν οι παράμετροι των μπαταριών λιθίου για την παρούσα χρονική στιγμή καθώς και προβλέφθηκαν οι παράμετροι που θα έχουν το έτος 2040. Για τον υπολογισμό του βάρους κάθε κυψέλης, θεωρήθηκε ο μέσος αριθμός κυψελών ανά μπαταρία ίσος με 96 [13] (Πίνακας 3.2).

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2: Παράμετροι μπαταριών έως το 2040

Year	Average capacity kWh/unit	Average weight kg/unit	Weight/cell
2025	45	490	5.1
2030	47.5	490	5.1
2035	50	490	5.1
2040	52.5	490	5.1

### 3.3 Επιλογή κέντρων συλλογής

Η βέλτιστη τοποθεσία των κέντρων συλλογής και των εγκαταστάσεων ανακύκλωσης μπαταριών ιόντων λιθίου είναι θεμελιώδης για να εξασφαλιστεί η δυνατότητα αντίστροφης εφοδιαστικής σε συνδυασμό με την μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος μέσω των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Υπάρχουν αβεβαιότητες σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το κόστος μίας εφοδιαστικής αλυσίδας, για την ανάκτηση υλικών, καθώς χρήζει ιδιαίτερης εξατομίκευσης. Η χωροθέτηση των εγκαταστάσεων του δικτύου έχει ιδιαίτερη σημασία για την ορθή και βιώσιμη λειτουργία του συστήματος και απαιτεί πολυπαραγοντική ανάλυση για την επιλογή της βέλτιστης επιλογής.

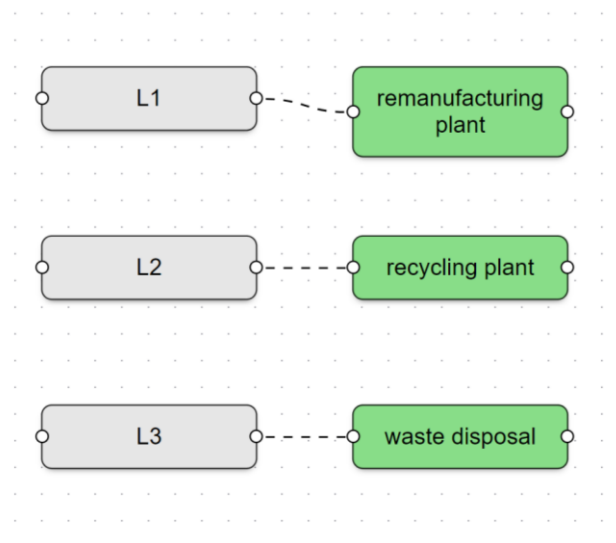
### 3.4 Λογισμικό βελτιστοποίησης RELOG

Το RELOG είναι ένα πακέτο ανοικτού κώδικα για το σχεδιασμό και την ανάλυση βέλτιστων δικτύων εφοδιαστικής αλυσίδας, αντίστροφης εφοδιαστικής και παραγωγής. Υποστηρίζει προσαρμοσμένο δίκτυο αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας με πολλαπλούς τύπους εγκαταστάσεων, πολλαπλούς τύπους προϊόντων και πολλαπλές περιόδους. Επιτρέπει επίσης την επέκταση της χωρητικότητας αποθήκευσης και των



εγκαταστάσεων και παρακολουθεί το κόστος, τις εκπομπές και τη χρήση ενέργειας. Οι βασικές αποφάσεις για την αλυσίδα εφοδιασμού περιλαμβάνουν τη θέση και το μέγεθος των εγκαταστάσεων ανακύκλωσης/επεξεργασίας, την κατανομή των πελατών και τη βέλτιστη ροή υλικών. Το πακέτο είναι γραμμένο στη γλώσσα προγραμματισμού Julia και χρησιμοποιεί Mixed-Integer Linear Optimization (MILP) για την εύρεση βέλτιστων αποφάσεων [2].

Για τη χρήση του παρόντος λογισμικού, αρχικά απαιτείται η δημιουργία ενός διαγράμματος ροής του αποβλήτου, όπου με πράσινο χρώμα απεικονίζονται οι εγκαταστάσεις του δικτύου και με γκρι οι κατηγορίες αποβλήτων (Εικόνα 3.1).



ΕΙΚΟΝΑ 3.1: Διάγραμμα ροής αποβλήτου στο λογισμικό RELOG

Έπειτα, εισάχθηκε ο ορίζοντας σχεδιασμού 15 έτη και ο πληθωρισμός της χώρας κατά το χρονικό διάστημα της έρευνας ίσος με 1.6% [12].

Τέλος, εισάχθηκαν δεδομένα σχετικά με τις συντεταγμένες των κέντρων συλλογής και ανακύκλωσης, τα κόστη απόκτησης κάθε ροής του αποβλήτου, το κόστος μεταφοράς και τις εκπομπές τόσο στην επεξεργασία όσο και στη μεταφορά του αποβλήτου.

### 3.5 Οικονομική ανάλυση

Η καταγραφή των υλικών προκύπτει από τα ποσοστά ανάκτησης της ανακύκλωσης που έχουν προσδιορισθεί βιβλιογραφικά, βάσει της εκάστοτε τεχνολογίας. Οι ποσότητες των ανακτημένων υλικών χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ετήσιων κερδών της αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας. Η οικονομική ανάλυση απαιτεί τον υπολογισμό τόσο του σταθερού όσο και του μεταβλητού κόστους που καθορίζεται από τις ανάγκες της εκάστοτε περιοχής. Επιπλέον, παράγοντες όπως το

κόστος εγκατάστασης, μεταφοράς, επεξεργασίας και διάθεσης πρέπει να αναλύονται. Αφού εκτιμηθούν τα ετήσια έσοδα και κόστη της αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας, είναι εφικτό να αξιολογηθεί η βιωσιμότητα της εγκατάστασης ανακύκλωσης μέσω ανάλυσης ευαισθησίας. Η ανάλυση αποσκοπεί στον καθορισμό οικονομικών παραμέτρων, χρήσιμων στην αξιολόγηση εγκατάστασης του δικτύου. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές αξιολόγησης για την εκτίμηση της σκοπιμότητας, όπως η μέθοδος της Περιόδου Αποπληρωμής (Payback Period, PP), η Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value, NPV) και ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (Internal Rate of Return, IRR)

Ο υπολογισμός όλων των οικονομικών συντελεστών υπολογίστηκαν με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού και οι εξισώσεις παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Για τον υπολογισμό της καθαρής παρούσας αξίας χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (5):

$$NPV = \sum_{t=0}^n TP_t / (1 + r)^t$$

Όπου,

$TP$  – οι ταμειακές ροές της επένδυσης

$r$  – το επιτόκιο προεξόφλησης εκφρασμένο σε δεκαδικό αριθμό

$t$  – τα έτη της επένδυσης

Η περίοδος αποπληρωμής είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να επιτύχει ένα έργο την αποπληρωμή του κόστους σε εισπράξεις. Εναλλακτικά, η προεξοφλημένη περίοδος αποπληρωμής αντικατοπτρίζει το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την επίτευξη του break-even point σε ένα έργο, με βάση όχι μόνο τις ταμειακές ροές που θα προκύψουν αλλά και το πότε θα προκύψουν βάσει του επιτοκίου απόδοσης στην αγορά. Αυτοί οι δύο υπολογισμοί, αν και παρόμοιοι, ενδέχεται να μην αποδίδουν το ίδιο αποτέλεσμα λόγω της προεξόφλησης των ταμειακών ροών. Για παράδειγμα, τα έργα με υψηλότερες ταμειακές ροές προς το τέλος της διάρκειας ζωής του έργου θα έχουν μεγαλύτερη προεξόφληση λόγω του ανατοκισμού.

Η περίοδος αποπληρωμής υπολογίζεται από τη σχέση (6):

$$PB = \frac{\text{Initial investment}}{\text{cash flow per year}}$$

Η προεξοφλημένη περίοδος αποπληρωμής υπολογίζεται από την εξίσωση (7):

$$DPP = \frac{-\ln(1 - \frac{\text{initial investment} \times \text{discount rate}}{\text{cash flow}})}{\ln(1 + \text{discount rate})}$$

Όπου το προεξοφλητικό επιτόκιο (discount rate) θεωρήθηκε ίσο με 4.5%, σύμφωνα με την τρέχουσα κατάσταση της αγοράς.

Τέλος, βρέθηκε ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης ο οποίος είναι ένα προεξοφλητικό επιτόκιο το οποίο καθιστά την καθαρή παρούσα αξία (NPV) των μελλοντικών ταμειακών ροών ακριβώς μηδενική. Ο υπολογισμός του γίνεται μέσω της εξίσωσης υπολογισμού της καθαρής παρούσας αξίας (5) μέσω δοκιμών μηδενισμού της NPV για διάφορα  $r$ .

$$0 = NPV = \sum_{t=0}^n TP_t / (1 + IRR)^t$$

Όπου,

$TP$  – οι ταμειακές ροές της επένδυσης

$IRR$  – ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης εκφρασμένος σε δεκαδικό αριθμό

$t$  – τα έτη της επένδυσης

### 3.6 Μοντέλο σχεδιασμού συστήματος συλλογής μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων μετά το τέλος του κύκλου ζωής στην Αττική

#### 3.6.1 Σχεδιασμός δικτύου ανακύκλωσης

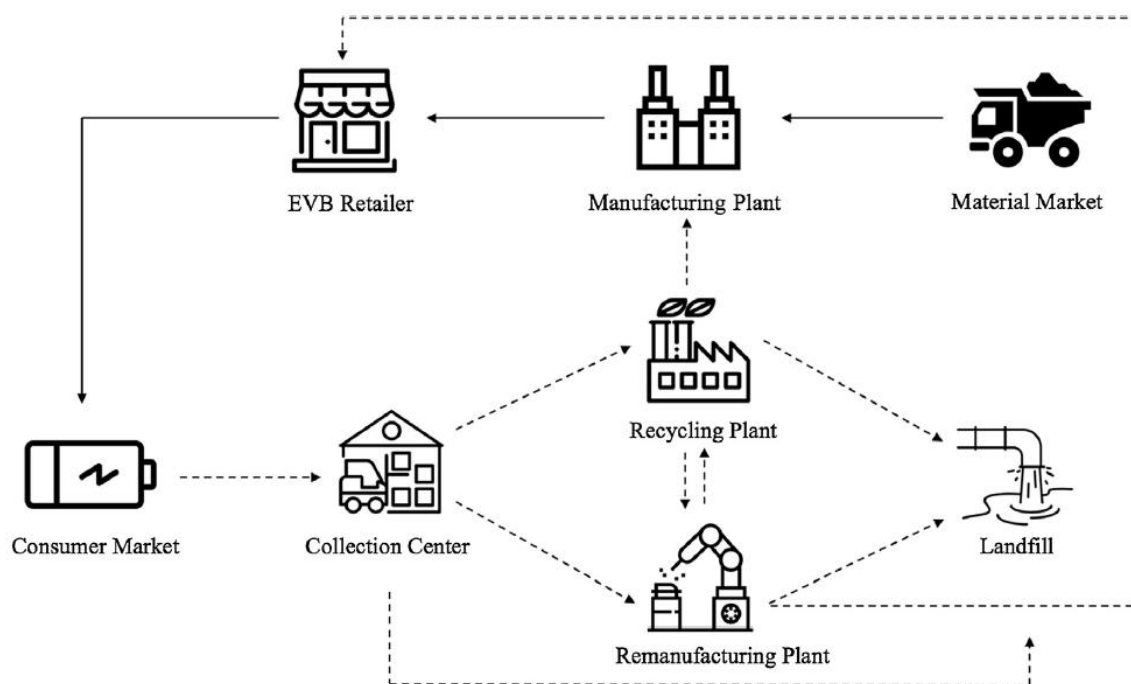
Στο μοντέλο που ακολουθήθηκε, οι χρησιμοποιημένες EVB αρχικά αποθηκεύονται στα κέντρα συλλογής και στη συνέχεια οι κυψέλες τους ελέγχονται με σκοπό τη κατηγοριοποίηση τους με βάση την ποιότητα. Οι κυψέλες των μπαταριών μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες με βάση τη χωρητικότητα τους [\[13\]](#):

- Κατηγορία 1 (L1) - η χωρητικότητα είναι μεγαλύτερη από το 80% της αρχικής χωρητικότητας,
- Κατηγορία 2 (L2) - η χωρητικότητα κυμαίνεται μεταξύ 60% και 80% της αρχικής χωρητικότητας,
- Κατηγορία 3 (L3) - η χωρητικότητα είναι μικρότερη από το 60% της αρχικής χωρητικότητας.

Οι στρατηγικές επεξεργασίας που θα υιοθετηθούν για τις τρεις κατηγορίες κυψελών είναι οι εξής [13]:

- οι κυψέλες κατηγορίας L1 θα μεταφερθούν στη μονάδα ανακατασκευής και θα επανασυναρμολογηθούν σε νέα EVB,
- οι κυψέλες κατηγορίας L2 θα μεταφερθούν στο εργοστάσιο ανακύκλωσης, όπου ορισμένες από τις κυψέλες θα μεταφερθούν και πάλι στο εργοστάσιο ανακατασκευής και θα επαναχρησιμοποιηθούν απευθείας ως μπαταρίες σε άλλες εφαρμογές. Οι κυψέλες κατηγορίας L2 στο εργοστάσιο ανακύκλωσης θα τεμαχιστούν, και μόνο τα επαναχρησιμοποιήσιμα υλικά τους θα μεταφερθούν στο εργοστάσιο ανακατασκευής. για την κατασκευή νέων κυψελών μπαταρίας,
- οι κυψέλες κατηγορίας L3 και τα απόβλητα από το εργοστάσιο ανακατασκευής και ανακύκλωσης θα μεταφερθούν απευθείας στη μονάδα διάθεσης αποβλήτων (XYTA).

Στην Εικόνα 3.2 περιγράφεται η δομή του κλειστού δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας που θα σχεδιαστεί στην παρούσα εργασία.



ΕΙΚΟΝΑ 3.2: Δομή κλειστού δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας

Πηγή: *Cost-effective supply chain for electric vehicle battery remanufacturing*, Li, 2018

### 3.6.2 Κύριες παραδοχές μοντέλου

Για την απλούστευση της ανάπτυξης του μοντέλου, εισάγονται οι ακόλουθες παραδοχές [13]:

1.  $(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y})\text{O}_2$  (NMC) είναι η πλέον καθιερωμένη τεχνολογία μπαταριών στην ηλεκτροκίνηση. Επομένως όλες οι EVB θεωρούνται αυτής της τεχνολογίας.
2. Όλα τα κέντρα έχουν περιορισμένη χωρητικότητα.
3. Οι πιθανές τοποθεσίες των εγκαταστάσεων είναι γνωστές εκ των προτέρων.
4. Οι κυψέλες (cells) των EVB θα επεξεργαστούν σε ποικίλες πιθανές στρατηγικές (ανακατασκευή, ανακύκλωση ή απόρριψη) ανάλογα με τη κατάσταση τους και ο αριθμός των κυψελών σε κάθε στρατηγική ακολουθεί κανονική κατανομή.
5. Η απόσταση μεταξύ των εγκαταστάσεων ακολουθεί το οδικό δίκτυο και όχι ευθεία γραμμή.
6. Με βάση τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) κατευθυντήριες γραμμές για τις εθνικές απογραφές αερίων θερμοκηπίου, μόνο οι εκπομπές  $\text{CO}_2$  υπολογίζεται.

### 3.6.3 Προτεινόμενο μοντέλο

Βάση των παραπάνω παραδοχών διαμορφώνεται ένα μοντέλο για τη βελτιστοποίηση των θέσεων των εγκαταστάσεων του δικτύου αντίστροφής εφοδιαστικής αλυσίδας, ελαχιστοποιώντας το συνολικό κόστος ολόκληρου του δικτύου ανακύκλωσης όπως φαίνεται στις εξισώσεις (8)-(10) [13].

$$\min F = F_{\text{operation}} + F_{\text{CO}_2\text{emission}} \quad (8)$$

Όπου,

$$F_{\text{operation}} = f_{AC} + f_{FC} + f_{PC} + f_{TC} \quad (9)$$

$$F_{\text{CO}_2\text{emission}} = f_{FEC} + f_{TEC} \quad (10)$$

Όπως υποδεικνύεται στην εξίσωση (8) το κόστος ανακύκλωσης χωρίζεται σε λειτουργικό κόστος ( $F_{\text{operation}}$  cost) και κόστος εκπομπών  $\text{CO}_2$  ( $F_{\text{CO}_2\text{ emission}}$  cost). Επιπλέον, η λειτουργία του δικτύου ανακύκλωσης EVB θα δημιουργήσει αντίστοιχο κόστος και εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, αλλά αυτά μπορούν να μειωθούν με τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του.

Το κόστος λειτουργίας αποτελεί το άθροισμα του κόστους απόκτησης των μπαταριών ( $f_{AC}$ ), του σταθερού κόστους ( $f_{FC}$ ), του κόστους επεξεργασίας ( $f_{PC}$ ) και του κόστους μεταφοράς ( $f_{TC}$ ).

Αντίστοιχα, το κόστος των εκπομπών  $\text{CO}_2$  είναι το άθροισμα του κόστους  $\text{CO}_2$  κατά την επεξεργασία και του κόστους  $\text{CO}_2$  ( $f_{FEC}$ ) κατά τη μεταφορά του αποβλήτου ( $f_{TEC}$ ).

### 3.6.3.1 Λειτουργικά κόστη

Το κόστος απόκτησης ( $f_{AC}$ ) αφορά το αντάλλαγμα που θα επωφελείται ο καταναλωτής, με σκοπό την προώθηση της ανακύκλωσης μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων.

Στον Πίνακα 3.3 αναγράφονται τα ενδεικτικά χρηματικά ανταλλάγματα που θεωρήθηκαν ότι θα λαμβάνουν οι καταναλωτές κατά την ανακύκλωση των μπαταριών.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3: Τα κόστη απόκτησης των τριών ροών αποβλήτου του δικτύου

Κόστος απόκτησης μπαταριών L1	750 €
Κόστος απόκτησης μπαταριών L2	323.4 €
Κόστος απόκτησης μπαταριών L3	0 €

Το κόστος απόκτησης των μπαταριών υπολογίζεται από την εξίσωση (11).

$$(f_{AC}) = \sum_i \sum_u QB_i \cdot r_u \cdot a_u \quad (11)$$

Όπου,

$QB_i$ - ποσότητα χρησιμοποιημένων μπαταριών που επιστρέφονται στο κέντρο συλλογής i

$r_u$ - κόστος απόκτησης μεταχειρισμένων μπαταριών EVB στα διάφορα επίπεδα ποιότητας (L1/L2/L3)

$a_u$ - ποσοστό μπαταριών σε διαφορετικά επίπεδα ποιότητας (L1/L2/L3)

Για τις εγκαταστάσεις ανακύκλωσης και ανακατασκευής του δικτύου, το συνολικό σταθερό κόστος περιγράφεται από την εξίσωση (12).

$$(f_{FC}) = \sum_i x_i FC_i + \sum_j x_j FC_j + \sum_k x_k FC_k \quad (12)$$

Όπου,

$FC_i, FC_j, FC_k$  - σταθερό κόστος του κέντρου συλλογής i, ανακύκλωσης και ανακατασκευής j και κέντρο διάθεσης αποβλήτων k, αντίστοιχα.

$x_i$  - δυαδική μεταβλητή απόφασης ίση με 1 εάν το κέντρο συλλογής i είναι ανοικτό και 0 διαφορετικά

$x_j$  - δυαδική μεταβλητή απόφασης ίση με 1 εάν το κέντρο ανακύκλωσης και ανακατασκευής j είναι ανοικτό και 0 διαφορετικά

$x_k$  - δυαδική μεταβλητή απόφασης ίση με 1 εάν το κέντρο διάθεσης αποβλήτων  $k$  είναι ανοικτό και 0 διαφορετικά.

Το κόστος επεξεργασίας κάθε κέντρου αποτελείται κυρίως από τρία μέρη, το κόστος ανίχνευσης και αποσυναρμολόγησης στο κέντρο συλλογής, το κόστος παραγωγής στα κέντρα ανακύκλωσης και ανακατασκευής, και το κόστος επεξεργασίας στο κέντρο διάθεσης αποβλήτων (XYTA).

Επομένως το κόστος αυτό μπορεί να διατυπωθεί από την εξίσωση (13).

$$f_{PC} = \sum_i pcc_i \cdot QB_i + \sum_i \sum_j pcr_j \cdot QCR_{ij} + \sum_i \sum_j pcm_j \cdot QCM_{ij} + \sum_i \sum_k pcw_k \cdot QCW_{ik} \quad (13)$$

Όπου,

$QCR_{ij}$  - ποσότητα κυψελών που διακινήθηκαν μεταξύ του κέντρου συλλογής  $i$  και ανακύκλωσης  $j$

$QCM_{ij}$  - ποσότητα κυψελών που διακινείται μεταξύ του κέντρου συλλογής  $i$  και εργοστάσιο ανακατασκευής  $j$

$QCW_{ik}$  - ποσότητα κυψελών που διακινήθηκαν μεταξύ του κέντρου συλλογής  $i$  και το κέντρο διάθεσης αποβλήτων  $k$

$pcc_i$  - κόστος επεξεργασίας του κέντρου συλλογής  $i$

$pcr_j$  - κόστος επεξεργασίας της μονάδας ανακύκλωσης

$pcm_j$  - κόστος επεξεργασίας της μονάδας ανακατασκευής

$pcw_k$  - κόστος επεξεργασίας του κέντρου διάθεσης αποβλήτων  $k$

Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται τα κόστη επεξεργασίας των κυψελών σε όλα τα στάδια του δικτύου, εκφρασμένα σε €/κυψέλη.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4: Κόστη επεξεργασίας σε όλα τα στάδια του δικτύου

Κόστος επεξεργασίας στα κέντρα συλλογής	8.3 €/cell
Κόστος επεξεργασίας στο κέντρο ανακύκλωσης	6.9 €/cell
Κόστος επεξεργασίας στο κέντρο ανακατασκευής	30 €/cell
Κόστος επεξεργασίας στον XYTA	0.08 €/cell

Τα μεταφερόμενα προϊόντα περιλαμβάνουν κυρίως κυψέλες μπαταριών και απόβλητα από διαδικασίες ανακύκλωσης και ανακατασκευής. Το κόστος μεταφοράς από έναν κόμβο σε έναν άλλο διατυπώνεται στην εξίσωση (14).

$$f_{TC} = \sum_i \sum_j D_{ij} \cdot tcc \cdot QCR_{ij} + \sum_i \sum_j D_{ij} \cdot tcc \cdot QCM_{ij} + \sum_i \sum_k D_{ik} \cdot tcc \cdot QCW_{ik} + \sum_j \sum_k D_{jk} \cdot tcw \cdot QW_{jk} \quad (14)$$

Όπου,

$tcc$  – κόστος μεταφοράς μίας κυψέλης

$tcw$  – κόστος μεταφοράς μονάδας μπαταρίας

Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζονται τα κόστη μεταφοράς από τα κέντρα συλλογής, τόσο προς τις μονάδες ανακύκλωσης και ανακατασκευής όσο και τον ΧΥΤΑ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5: Κόστη μεταφοράς εντός του δικτύου

Κόστος μεταφοράς προς τις μονάδες ανακύκλωσης και ανακατασκευής	0.08 €/cell/km
Κόστος μεταφοράς προς ΧΥΤΑ	0.012 €/cell/km

### 3.6.3.2 Κόστος εκπομπών CO<sub>2</sub>

Το κόστος των εκπομπών CO<sub>2</sub> από την επεξεργασία των κυψελών στο κέντρο συλλογής, στο εργοστάσιο ανακατασκευής και ανακύκλωσης έως τη διάθεση των αποβλήτων στον ΧΥΤΑ εκτιμώνται από την εξίσωση (15).

$$f_{FEC} = \sum_i p_{ct} \cdot fec_i \cdot QB_i + \sum_i \sum_j p_{ct} \cdot fer_j \cdot QCR_{ij} + \sum_i \sum_j p_{ct} \cdot fem_j \cdot QCM_{ij} + \sum_i \sum_k p_{ct} \cdot few_k \cdot QCW_{ik} \quad (15)$$

Όπου,

$fec_i$  - εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα στο κέντρο συλλογής i

$fer_j$  - εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα στο εργοστάσιο ανακύκλωσης

$fem_j$  - εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα στο εργοστάσιο ανακατασκευής



$f_{ew_k}$  - εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα στο κέντρο διάθεσης αποβλήτων  $k$ ,

$p_{ct}$  – φόρος εκπομπών CO<sub>2</sub>

Στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζονται τα κιλά διοξειδίου του άνθρακα που παράγονται σε όλες τις φάσεις επεξεργασίας του δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6: Εκπομπές CO<sub>2</sub> σε όλα τα στάδια του δικτύου

Εκπομπές CO <sub>2</sub> στο κέντρο συλλογής	2.43 kg CO <sub>2</sub> /cell
Εκπομπές CO <sub>2</sub> στο κέντρο ανακύκλωσης	8.55 kg CO <sub>2</sub> /cell
Εκπομπές CO <sub>2</sub> στο κέντρο ανακατασκευής	31.03 kg CO <sub>2</sub> /cell
Εκπομπές CO <sub>2</sub> στο κέντρο διάθεσης αποβλήτων (ΧΥΤΑ)	0.35 kg CO <sub>2</sub> /cell

Ο φόρος εκπομπών CO<sub>2</sub> στην Ευρωπαϊκή Ένωση κυμαίνεται στα 100 €/ton, όμως χαρακτηρίζεται από ταχείες διακυμάνσεις. Κατά τη διαδικασία των υπολογισμών της παρούσας διπλωματικής, ο φόρος εκπομπών ήταν 98 €/ton, ενώ κατά τη συγγραφή βρίσκεται στα 75 €/ton [14].



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.1: Διακύμανση της τιμής του φόρου εκπομπών CO<sub>2</sub> [14]

Το κόστος των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα της διαδικασίας μεταφοράς των κυψελών αλλά και των αποβλήτων αυτών, παρουσιάζεται στην εξίσωση (16).

$$f_{TEC} = \sum_i \sum_j p_{ct} \cdot D_{ij} \cdot t_e \cdot QCR_{ij} \cdot \omega + \sum_i \sum_j p_{ct} \cdot D_{ij} \cdot t_e \cdot QCM_{ij} \cdot \omega \\ + \sum_i \sum_k p_{ct} \cdot D_{jk} \cdot t_e \cdot QCW_{ik} \cdot \omega \\ + \sum_j \sum_k p_{ct} \cdot D_{jk} \cdot t_e \cdot QW_{jk} \cdot \omega \quad (16)$$

Όπου,

$\omega$  – ο αριθμός των αγαθών σε κάθε container

$t_e$  – οι εκπομπές CO<sub>2</sub> που παράγονται κατά τη μεταφορά ενός container ανά χιλιόμετρο

Για τη μεταφορά με φορτηγά ωφέλιμου βάρους φορτίου 9.0 τόνοι/φορτηγό, η κανονική κατανάλωση καυσίμου είναι περίπου 0.33 L/km, γεγονός που συνεπάγεται πυκνότητα εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα 0.00249 kg CO<sub>2</sub>/ton/km, με βάση την πυκνότητα εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα του ντίζελ, 0.06805 kg CO<sub>2</sub>/L [13].

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.7: Εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά τη μεταφορά των κυψελών εντός του δικτύου

Εκπομπές CO <sub>2</sub> κατά τη μεταφορά	0.00000249 ton CO <sub>2</sub> /ton/km
---	--

### 3.6.4 Σενάρια χωροθέτησης εγκαταστάσεων δικτύου

#### 3.6.4.1 Σενάριο 1 (Βασικό σενάριο)

Στο πρώτο σενάριο, τοποθετήθηκαν έξι κέντρα συλλογής, ένα σε κάθε Περιφερειακή Ενότητα της Αττικής. Στον Πίνακα 1 αναγράφονται αναλυτικά τα κέντρα συλλογής με τις κωδικές ονομασίες και την ακριβή τοποθεσία τους.

Οι εγκαταστάσεις ανακύκλωσης και ανακατασκευής χωροθετήθηκαν στην θέση Δύο Πεύκα στην περιοχή του Ασπροπύργου, ενώ το κέντρο διάθεσης των αποβλήτων θεωρήθηκε ο ΧΥΤΑ Φυλής.

Με βάση την απογραφή πληθυσμού του 2021, προβλέφθηκαν τα ποσοστά, επί του συνολικού όγκου αποβλήτου, που θα εξυπηρετεί το κάθε κέντρο συλλογής ανάλογα με την πληθυσμιακή κάλυψη της εκάστοτε Περιφερειακής Ενότητας.

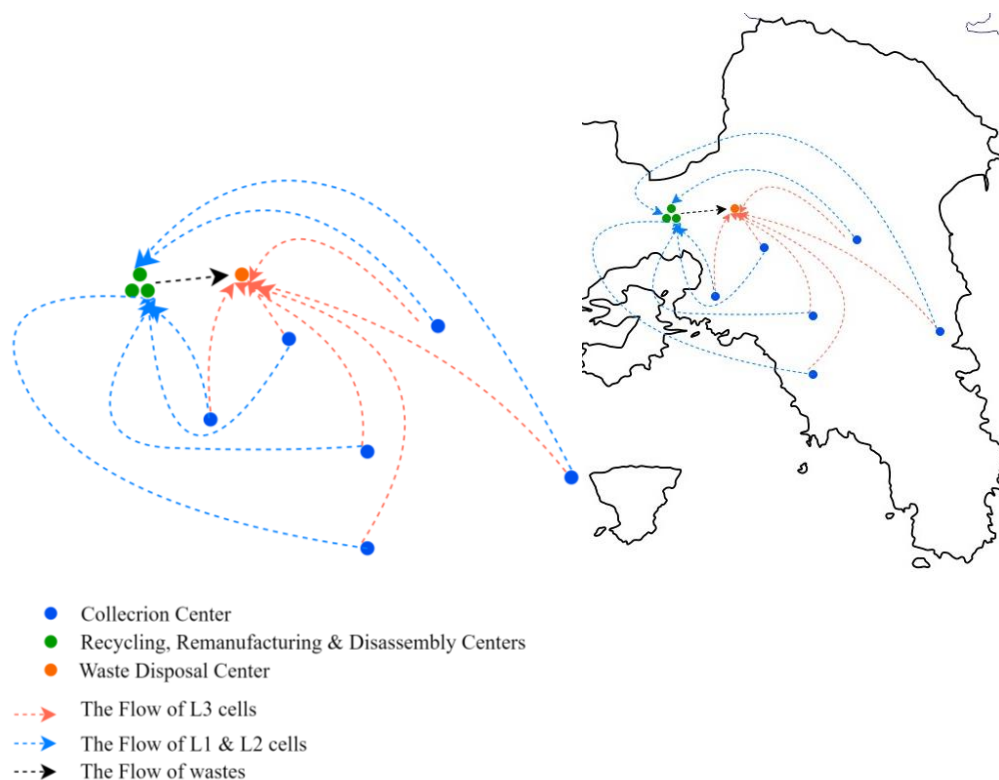
Πίνακας 3.8: Παρουσίαση κέντρων συλλογής για το Σενάριο 1

Κωδική ονομασία	Περιφερειακή Ενότητα	Τοποθεσία
<b>I1</b>	Βόρειου Τομέα Αθηνών	Μαρούσι
<b>I2</b>	Πειραιώς και Νήσων	Δραπετσώνα
<b>I3</b>	Κεντρικού Τομέα Αθηνών	Ελαιώνας
<b>I4</b>	Νότιου Τομέα Αθηνών	Γλυφάδα
<b>I5</b>	Ανατολικής Αττικής	Αρτέμιδα
<b>I6</b>	Δυτικής Αττικής	Πετρούπολη

Στον Πίνακα 3.9 αναγράφονται τα ποσοστά του συνολικού όγκου του αποβλήτου που θα διαχειρίζεται κάθε κέντρο συλλογής στην Αττική. Όπως ήταν αναμενόμενο το κέντρο συλλογής I3, που εξυπηρετεί τον Κεντρικό Τομέα Αθηνών, προβλέπεται να διαχειρίζεται τον μεγαλύτερο όγκο αποβλήτων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.9: Ποσοστό διαχείρισης επί του συνολικού όγκου αποβλήτου που θα διαχειρίζεται κάθε κέντρο συλλογής στην Αττική για το Σενάριο 1

Κέντρο συλλογής	% κάλυψη
I1	15.76%
I2	13.58%
I3	26.28%
I4	13.88%
I5	13.60%
I6	16.90%



ΕΙΚΟΝΑ 3.2: Διάγραμμα ροής των τριών ροών αποβλήτου για το Σενάριο 1

### 3.6.4.2 Σενάριο 2

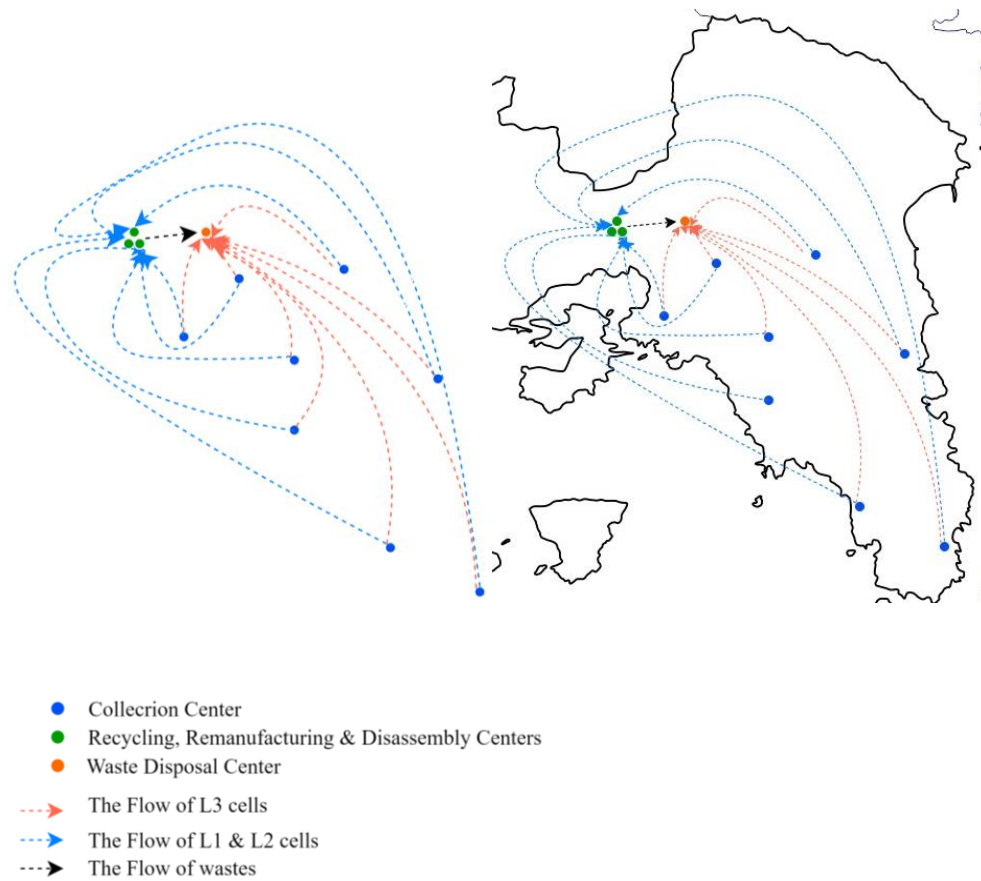
Στο δεύτερο σενάριο, πέραν των έξι ήδη χωροθετημένων κέντρων συλλογής, μελετάται το άνοιγμα δύο νέων κέντρων στις περιοχές της Σαρωνίδας και του Λαυρίου, ενώ οι εγκαταστάσεις ανακύκλωσης, ανακατασκευής και απόρριψης των αποβλήτων παραμένουν στο ίδιο σημείο. Το ποσοστό διαχείρισης των νέων κέντρων συλλογής I7 και I8 θεωρείται πως εξυπηρετούν το 1% το κάθε ένα, της συνολικής ροής, καθώς πληθυσμιακά κατοικεί το 1% της Αθήνας σε καθεμία από αυτές τις περιοχές. Επομένως τα νέα ποσοστά του όγκου προς διαχείριση καταγράφονται στον Πίνακα 3.11.

Πίνακας 3.10: Παρουσίαση κέντρων συλλογής Σεναρίου 2

Κωδική ονομασία	Περιφερειακή Ενότητα	Τοποθεσία
<b>I1</b>	Βόρειου Τομέα Αθηνών	Μαρούσι
<b>I2</b>	Πειραιώς και Νήσων	Δραπετσώνα
<b>I3</b>	Κεντρικού Τομέα Αθηνών	Ελαιώνας
<b>I4</b>	Νότιου Τομέα Αθηνών	Γλυφάδα
<b>I5</b>	Ανατολικής Αττικής	Αρτέμιδα
<b>I6</b>	Δυτικής Αττικής	Πετρούπολη
<b>I7</b>	Ανατολικής Αττικής	Σαρωνίδα
<b>I8</b>	Ανατολικής Αττικής	Λαύριο

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.11: Ποσοστό διαχείρισης επί του συνολικού όγκο αποβλήτου που θα διαχειρίζεται κάθε κέντρο συλλογής στην Αττική για το Σενάριο 2

Κέντρο συλλογής	% κάλυψη
I1	15.76%
I2	13.58%
I3	26.28%
I4	12.88%
I5	12.60%
I6	16.90%
I7	1.00%
I8	1.00%



ΕΙΚΟΝΑ 3.3: Διάγραμμα ροής των τριών ροών αποβλήτου για το Σενάριο 2

### 3.6.4.3 Σενάριο 3

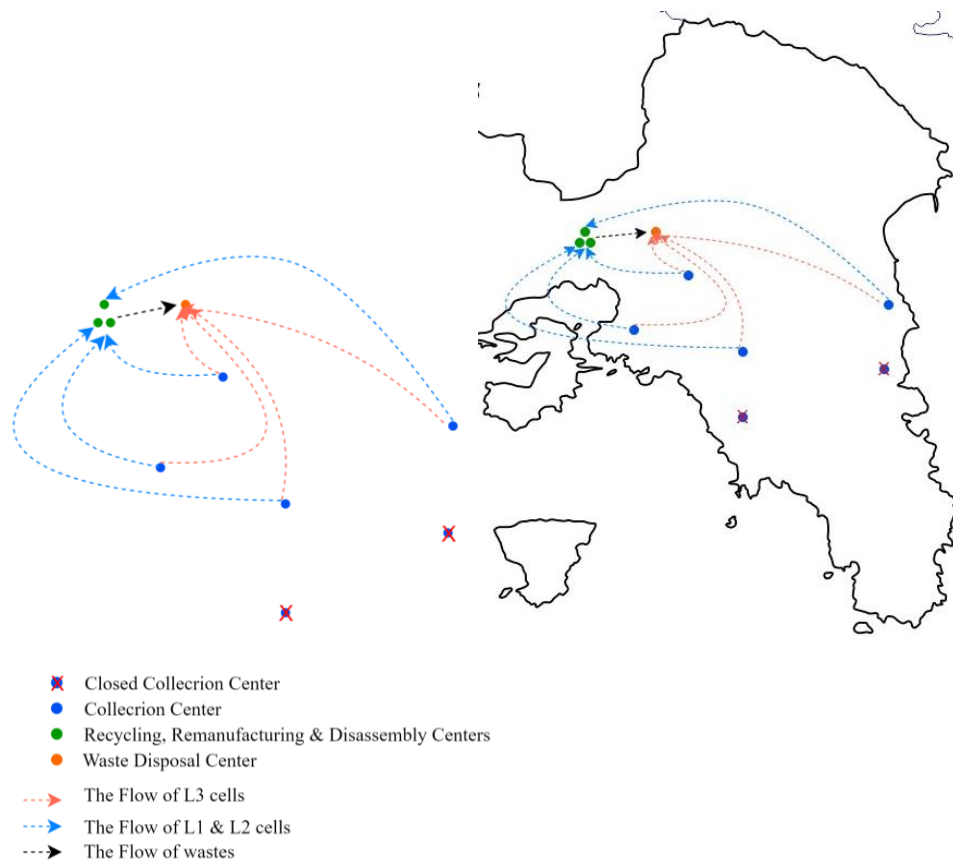
Στο παρόν σενάριο και συγκριτικά με το βασικό σενάριο, καταργούνται τα κέντρα συλλογής Νοτίου και Ανατολικού Τομέα Αθηνών. Επομένως, θεωρείται πως ο όγκος των αποβλήτων που θα λάμβαναν αυτά τα κέντρα συλλογής, μεταφέρεται στα πλησιέστερα, που είναι του Κεντρικού και Βόρειου Τομέα.

Πίνακας 3.12: Παρουσίαση κέντρων συλλογής Σεναρίου 3

Κωδική ονομασία	Περιφερειακή Ενότητα	Τοποθεσία
<b>I1</b>	Βόρειου Τομέα Αθηνών	Μαρούσι
<b>I2</b>	Πειραιώς και Νήσων	Δραπετσώνα
<b>I3</b>	Κεντρικού Τομέα Αθηνών	Ελαιώνας
<b>I6</b>	Δυτικής Αττικής	Πετρούπολη

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.13: Ποσοστό διαχείρισης επί του συνολικού όγκο αποβλήτου που θα διαχειρίζεται κάθε κέντρο συλλογής στην Αττική για το Σενάριο 3

Κέντρο συλλογής	% κάλυψη
I1	28.36%
I2	13.58%
I3	40.16%
I6	16.90%



ΕΙΚΟΝΑ 3.4: Διάγραμμα ροής των τριών ροών αποβλήτου για το Σενάριο 3

#### 3.6.4.4 Σενάριο 4

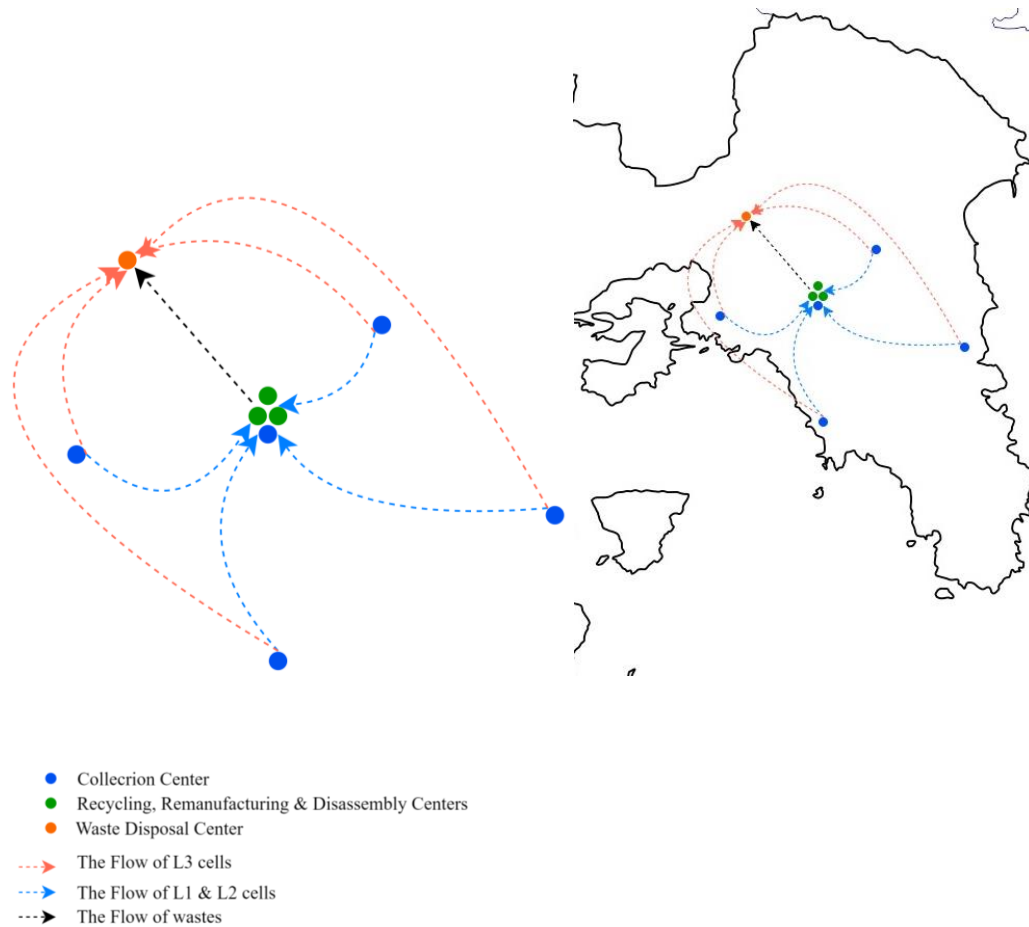
Στο τέταρτο σενάριο, οι εγκαταστάσεις ανακύκλωσης και ανακατασκευής μεταφέρονται στον Ελαιώνα, ο οποίος αποτελεί βιομηχανική περιοχή στο κέντρο Αθηνών. Επιπλέον, οι νέες εγκαταστάσεις, στεγάζουν στον ίδιο χώρο και κέντρο συλλογής, με αποτέλεσμα τον εκμηδενισμό των μεταφορών. Τα ποσοστά του αποβλήτου προς διαχείριση θεωρούνται ίσα με 20% το κάθε ένα.

Πίνακας 3.14: Παρουσίαση κέντρων συλλογής για το Σενάριο 1

Κωδική ονομασία	Περιφερειακή Ενότητα	Τοποθεσία
<b>I1</b>	Βόρειου Τομέα Αθηνών	Μαρούσι
<b>I2</b>	Πειραιώς και Νήσων	Δραπετσώνα
<b>I3</b>	Κεντρικού Τομέα Αθηνών	Ελαιώνας
<b>I4</b>	Νότιου Τομέα Αθηνών	Γλυφάδα
<b>I5</b>	Ανατολικής Αττικής	Αρτέμιδα

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.15: Ποσοστό διαχείρισης επί του συνολικού όγκο αποβλήτου που θα διαχειρίζεται κάθε κέντρο συλλογής στην Αττική για το Σενάριο 1

Κέντρο συλλογής	% κάλυψη
I1	20%
I2	20%
I3	20%
I4	20%
I5	20%



ΕΙΚΟΝΑ 3.5: Διάγραμμα ροής των τριών ροών αποβλήτου για το Σενάριο 4

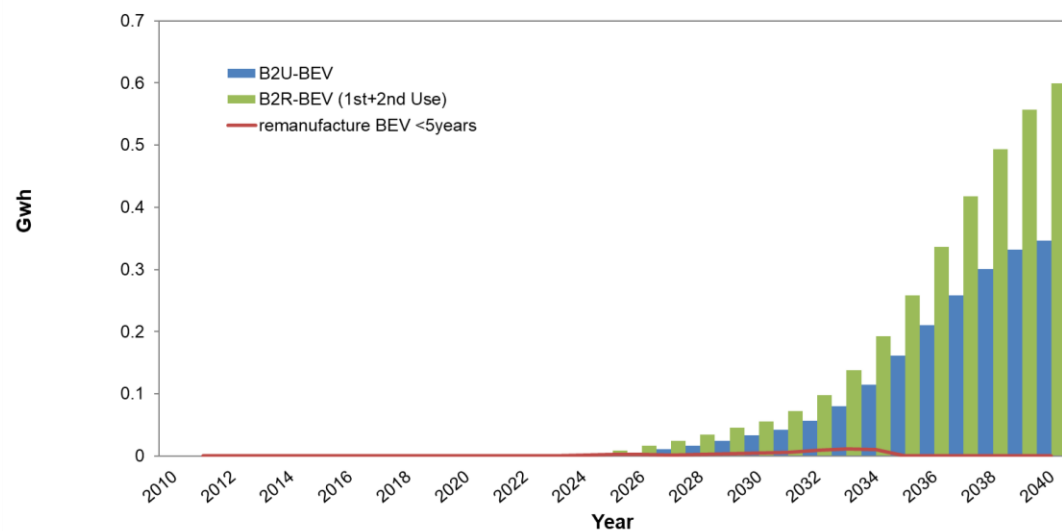


## Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα και Συζήτηση

### 4.1 Ετήσια ροή αποβλήτου

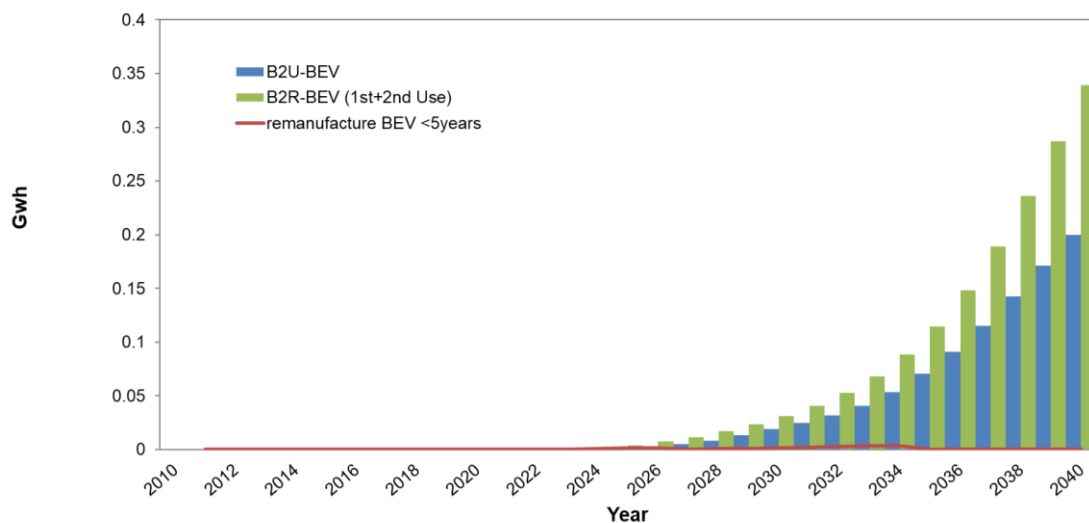
Με τα δεδομένα του Πίνακα 3.2 και βάσει του σεναρίου SDS που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.1, προβλέφθηκε η παραγωγή αποβλήτου όλων των ροών (L1, L2, L3) και των δύο σεναρίων παραγωγής, σε GWh, έως το 2040.

Στο Διάγραμμα 4.1 παρουσιάζεται η ποσότητα των EoL BEV των ροών L1 και L2 έως το 2040 για το Low Lifetime Scenario. Οι remanufacture BEV αντιστοιχούν στη ροή L1, ενώ οι B2R – BEV στη ροή L2.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1: EoL LIBs προς ανακύκλωση και ανακατασκευή έως το 2040 για το Low Lifetime Scenario

Στο Διάγραμμα 4.2 παρουσιάζεται η ποσότητα των EoL BEV των ροών L1 και L2 έως το 2040 για το High Lifetime Scenario. Όμοια, οι remanufacture BEV αντιστοιχούν στη ροή L1, ενώ οι B2R – BEV στη ροή L2

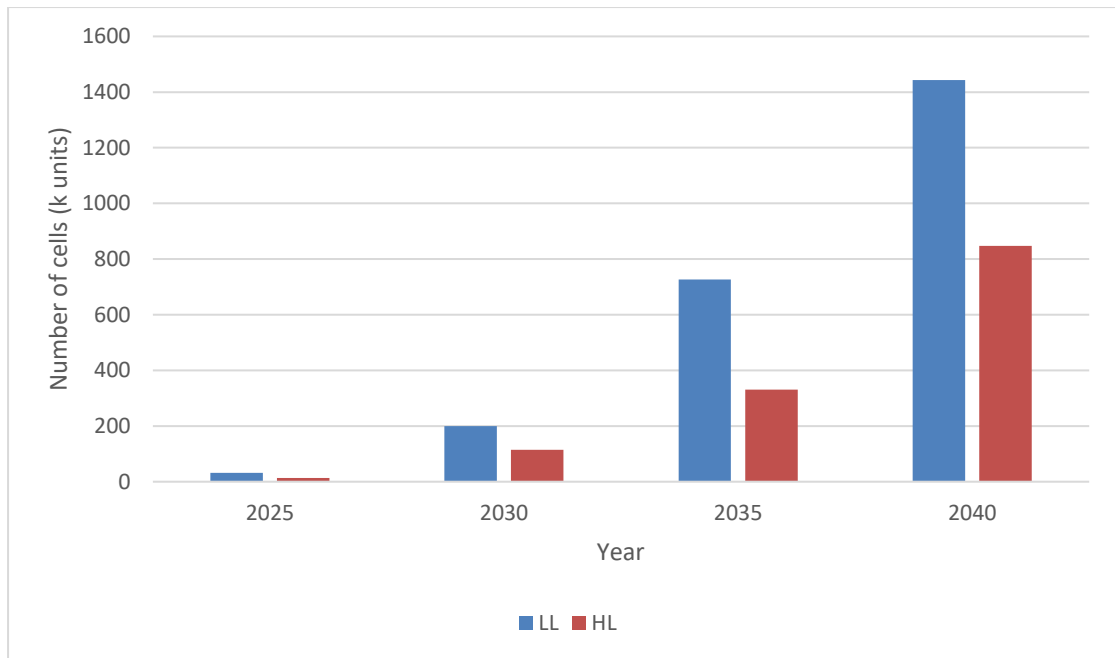


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2: EoL LIBs προς ανακύκλωση και ανακατασκευή έως το 2040 για το High Lifetime Scenario

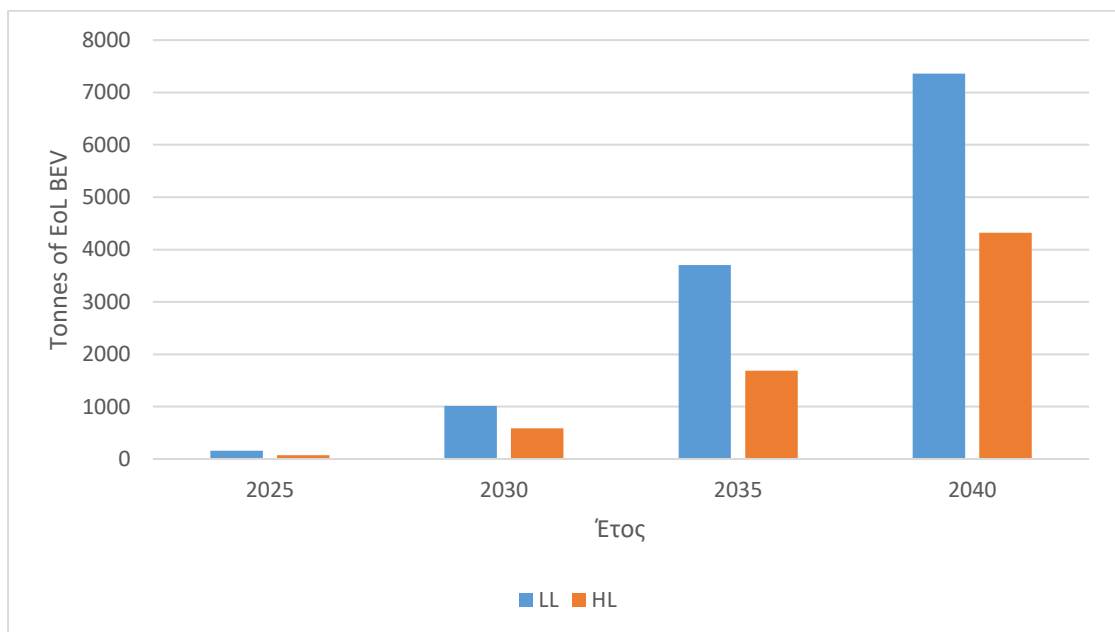
Όπως προαναφέρθηκε, τα αποτελέσματα του μοντέλου πρόβλεψης παραγωγής αποβλήτου SDS χρειάστηκε να μετατραπούν από GWh σε αριθμό κυψελών αλλά και σε τόνους αποβλήτου.

Με τη χρήση των παραμέτρων των μπαταριών, που αναγράφονται στον Πίνακα 3.2, υπολογίστηκαν τόσο ο αριθμός κυψελών προς διαχείριση, όσο και η μάζα σε τόνους.

Στο Διάγραμμα 4.3 φαίνεται η αύξηση του όγκου των αποβλήτων ανά πέντε έτη. Είναι φανερό πως το Low Lifetime Scenario προβλέπει μεγαλύτερη παραγωγή αποβλήτου, καθώς είναι πιο συντηρητικό στη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, έναντι του High Lifetime Scenario. Επίσης, παρατηρείται εκθετική αύξηση στον αριθμό των κυψελών προς επεξεργασία στη πορεία του χρόνου και στα δύο σενάρια, γεγονός που δικαιολογείται από τη ραγδαία ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης τα τελευταία έτη.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3: Συνολικός αριθμός κυψελών προς επεξεργασία για τα δύο σενάρια (High Lifetime και Low Lifetime)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.4: EoL BEV (tn) (High Lifetime και Low Lifetime)

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της ραγδαίας αυτής αύξησης είναι πως, βάσει των παραπάνω υπολογισμών, το 2040 η ποσότητα του αποβλήτου που θα πρέπει να διαχειριστεί, εντός Αττικής, κυμαίνεται μεταξύ 4323.4 και 7360.3 τόνων, ενώ το 2025 αναμένεται να είναι μεταξύ 70.4 και 159.5 τόνων (Διάγραμμα 4.4).

## 4.2 Εφαρμογή μοντέλου

Για την εύρεση του βέλτιστου οικονομικά σεναρίου αρκεί να συγκρίνουμε τις παραμέτρους του μοντέλου που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3.6.

Αρχικά, βάσει του Πίνακα 3.3 υπολογίζονται τα συνολικά κόστη απόκτησης των μπαταριών προς απόσυρση για τα έτη που εξετάζονται. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν και για τα δύο σενάρια παραγωγής του αποβλήτου μέσω της εξίσωσης (11).

Στον Πίνακα 4.1 απεικονίζονται τα συνολικά κόστη απόκτησης των μπαταριών σε συνάρτηση με το χρόνο. Είναι σαφές πως με την πάροδο των ετών, η αύξηση του κόστους απόκτησης ακολουθεί την αύξηση της παραγωγής του αποβλήτου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: Συνολικά κόστη απόκτησης των μπαταριών και για τα δύο σενάρια

	<b>LL</b>	<b>HL</b>
2025	136,562.2 €	59,325.9 €
2030	564,941.6 €	301,848.2 €
2035	2,425,499.6 €	911,461.6 €
2040	5,045,685.0 €	2,504,921.4 €

Στη συνέχεια, από την εξίσωση (13) υπολογίζεται το κόστος επεξεργασίας κάθε ροής αποβλήτου. Ο αριθμός των κυψελών κάθε κατηγορίας αποβλήτου πολλαπλασιάζεται με το αντίστοιχο κόστος επεξεργασίας του Πίνακα 3.4 και προκύπτει αθροιστικά το συνολικό κόστος που απαιτείται για την επεξεργασία όλων των μπαταριών για τα έτη 2025, 2030, 2035 και 2040.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2: Συνολικά κόστη επεξεργασίας όλων των ροών αποβλήτου και για τα δύο σενάρια

<b>Year</b>	<b>LL</b>	<b>HL</b>
2025	485,896.3 €	213,145.5 €
2030	2,589,655.2 €	1,470,748.7 €
2035	11,055,529.0 €	4,176,178.4 €
2040	21,503,594.3 €	10,686,640.9 €

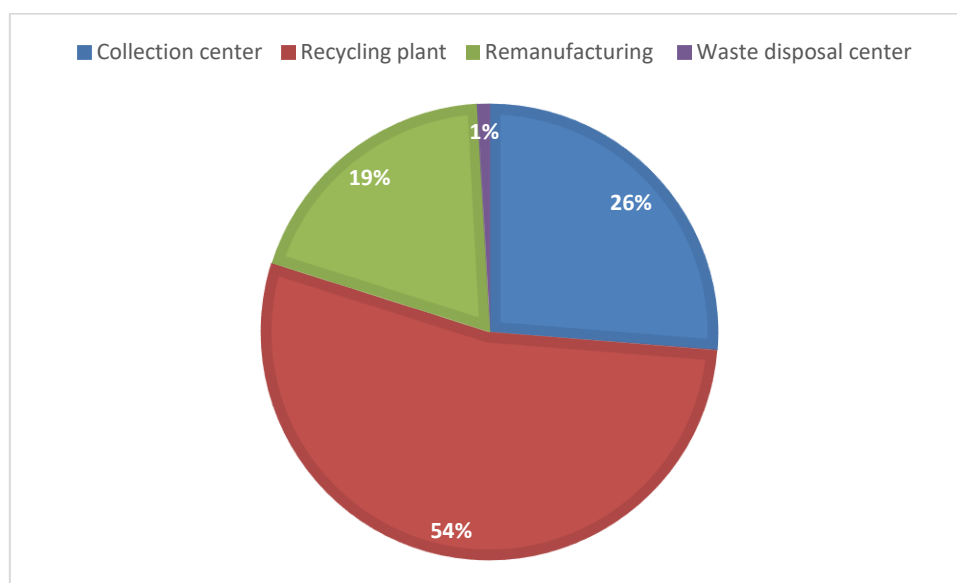
#### 4.2.1 Υπολογισμός εκπομπών CO<sub>2</sub>

Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> που εκλύονται στο παρόν δίκτυο, μπορούν να προέρχονται από την μεταφορά ή την επεξεργασία του αποβλήτου. Κάνοντας χρήση του Πίνακα 3.6, μέσω της εξίσωσης (15) υπολογίζονται οι εκπομπές CO<sub>2</sub> σε κιλά το οποία μετατράπηκαν σε τόνους ώστε να βρεθεί το κόστος του φόρου εκπομπών.

Πιο συγκεκριμένα, έχοντας υπολογίσει τη ποσότητα του αποβλήτου σε κάθε ροή (L1, L2, L3), προσδιορίστηκε η ποσότητα που εκλύεται κατά την επεξεργασία στα κέντρα συλλογής, στη μονάδα ανακύκλωσης, στο κέντρο επανασυναρμολόγησης καθώς και στον ΧΥΤΑ.

Στο Παράρτημα 3, φαίνονται αναλυτικά οι ποσότητες CO<sub>2</sub> σε κάθε στάδιο του δικτύου και το αντίστοιχο ποσό που θα πρέπει να δοθεί, ανάλογα με την παρούσα τιμή του φόρου εκπομπών CO<sub>2</sub> της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Στο Διάγραμμα 4.5 απεικονίζονται τα ποσοστά της συνολικής ποσότητας CO<sub>2</sub> που παράγονται κατά την επεξεργασία των μπαταριών. Το μεγαλύτερο ποσοστό αέριων εκπομπών παράγονται κατά την ανακύκλωση του αποβλήτου (54%), ενώ το αμέσως επόμενο αποτελεί η επεξεργασία τους στα κέντρα συλλογής με ποσοστό 26%.

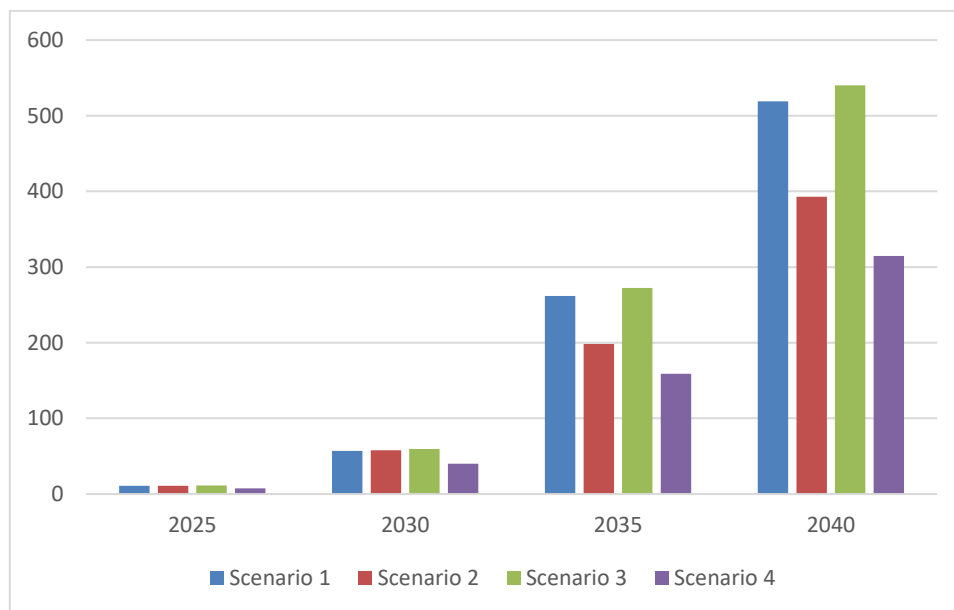


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.5: Ποσοστά συνολικών αέριων εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά την επεξεργασία του αποβλήτου

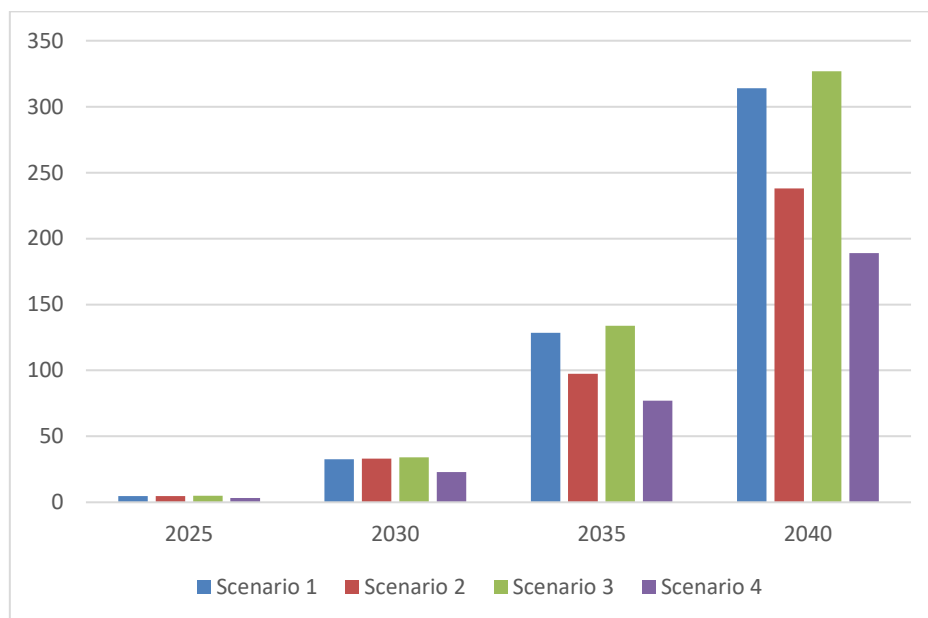
Όπως προαναφέρθηκε, συνυπολογίζονται και οι εκπομπές από τη μεταφορά των μπαταριών μέσω φορτηγών. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν και για τα τέσσερα χωροθετικά σενάρια, για την εύρεση του βέλτιστου από τη σκοπιά των εκπομπών CO<sub>2</sub>.

Στο Διάγραμμα 4.6 αναγράφονται οι ποσότητες, σε τόνους, CO<sub>2</sub> που παράγονται κατά τη μεταφορά των μπαταριών, από τις μηχανές εσωτερικής καύσης των φορτηγών για το Low Lifetime Scenario. Είναι σαφές πως το βέλτιστο σενάριο, σύμφωνα με αυτή τη

παράμετρο, αποτελεί το σενάριο 4, με σημαντικά χαμηλότερες εκπομπές σε όλον τον ορίζοντα σχεδιασμού.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.6: Ποσότητα CO<sub>2</sub> που εκλύεται κατά τη μεταφορά του αποβλήτου εντός του δικτύου και για τα τέσσερα σενάρια σε τόνους [ton] για το Low Lifetime Scenario

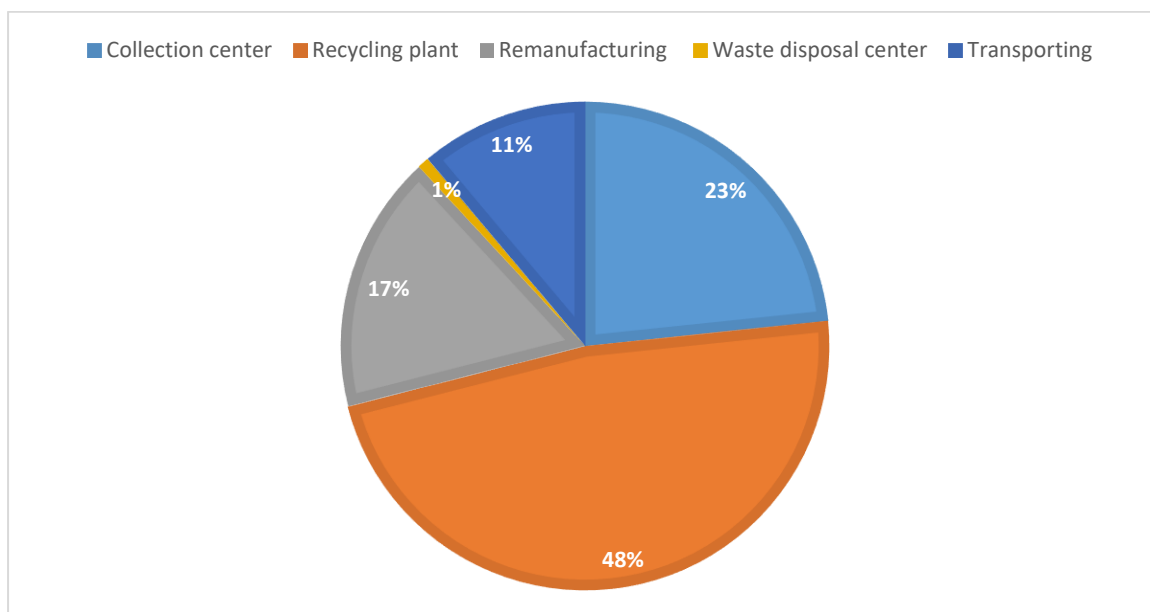


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.7: Ποσότητα CO<sub>2</sub> που εκλύεται κατά τη μεταφορά του αποβλήτου εντός του δικτύου και για τα τέσσερα σενάρια σε τόνους [ton] για το High Lifetime Scenario

Τόσο στο Low Lifetime Scenario όσο και στο High Lifetime Scenario, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> είναι λιγότερες στο σενάριο 4.

Επομένως, η παρούσα παράμετρος του μοντέλου, δείχνει πως το σενάριο 4 είναι η καλύτερη επιλογή.

Έχοντας υπολογίσει τις εκπομπές όλων των σταδίων του δικτύου, δημιουργείται το Διάγραμμα 4.8, στο οποίο φαίνονται τα ποσοστά των συνολικών εκπομπών CO<sub>2</sub> της αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας (Παράρτημα 3). Η μεταφορές, αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι αυτών, όμως η επεξεργασία του αποβλήτου στη μονάδα επεξεργασίας συνεχίζει να αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.8: Ποσοστά συνολικών αέριων εκπομπών CO<sub>2</sub> σε όλα τα στάδια του δικτύου

### 4.3 Βέλτιστη χωροθέτηση εγκαταστάσεων ανακύκλωσης

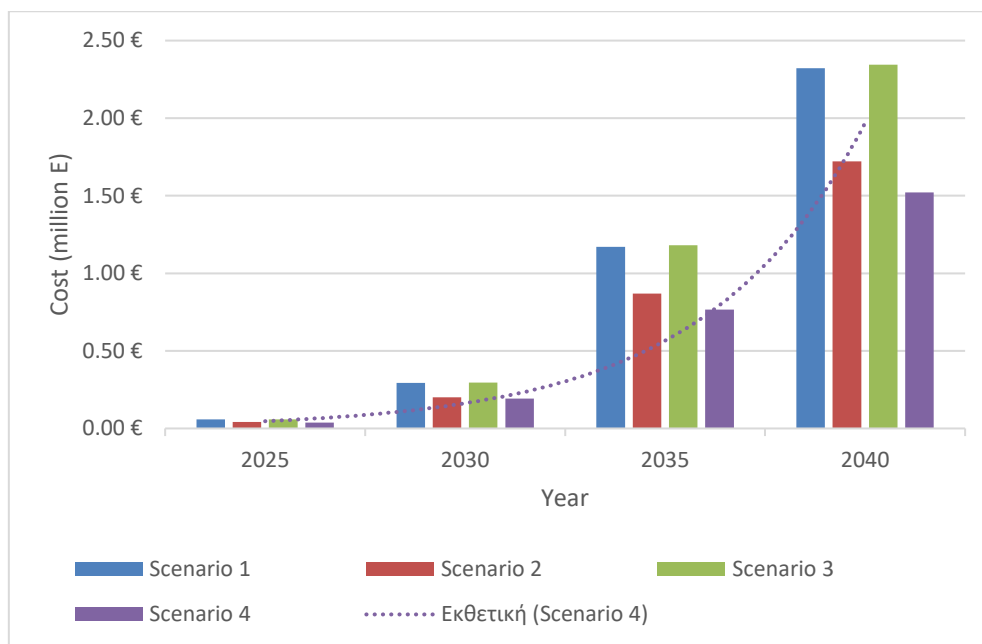
#### 4.3.1 Βέλτιστο σενάριο

Όπως προαναφέρθηκε, το κόστος μεταφοράς του προϊόντος είναι το μεγαλύτερο κόστος ενός δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας. Επομένως είναι η κύρια παράμετρος που χρήζει βελτιστοποίησης. Για αυτόν το λόγο καταστρώθηκαν τα τέσσερα σενάρια που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3.6.4. Στο Παράρτημα 1 παρουσιάζονται αναλυτικά οι διαδρομές εντός του δικτύου για τα τέσσερα σενάρια. Με τη χρήση του Πίνακα 3.4 υπολογίστηκε το κόστος μεταφοράς του αποβλήτου για όλα τα χωροθετικά σενάρια.

Καθώς τα σενάρια εξετάζουν διαφορετικές τοποθεσίες για τις εγκαταστάσεις του δικτύου, το κόστος μεταφοράς είναι αυτό που θέτει το βέλτιστο σενάριο στη παρούσα έρευνα.

Στο Διάγραμμα 4.9 απεικονίζεται το κόστος μεταφοράς όλων των ροών αποβλήτου εντός του δικτύου για τα τέσσερα σενάρια χωροθέτησης που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3.6.4 για το Low Lifetime Scenario. Από τα τέσσερα σενάρια, είναι σαφές πως το σενάριο 4 είναι αυτό που έχει το μικρότερο κόστος.

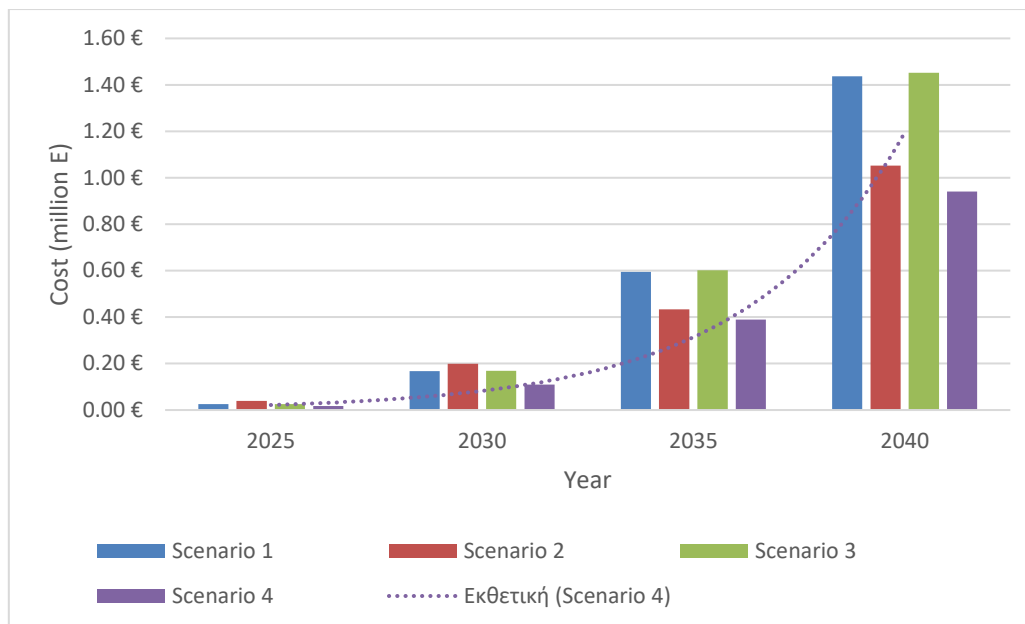
Για το έτος 2025 το κόστος μεταφοράς του τέταρτου σεναρίου υπολογίζεται κάτω από 40.000€ , ενώ για το 2040 ξεπερνά το 1.5 εκατομμύριο €, γεγονός που αποδεικνύει τη γιγάντωση που λαμβάνει το κόστος μεταφοράς, έναντι όλων των άλλων κοστών που παρουσιάστηκαν παραπάνω.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.9: Συνολικά κόστη μεταφοράς εντός του δικτύου για τα τέσσερα χωροθετικά σενάρια του Low Lifetime Scenario

Αντίστοιχα υπολογίστηκε και το κόστος μεταφοράς του High Lifetime Scenario. Στο Διάγραμμα 4.10 απεικονίζεται η διακύμανση του κόστους μεταφοράς για τα τέσσερα σενάρια. Όμοια, οικονομικότερη επιλογή αποτελεί το σενάριο 4, με σημαντικά χαμηλότερο κόστος έναντι των υπολοίπων.





ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.10: Συνολικά κόστη μεταφοράς εντός του δικτύου για τα τέσσερα χωροθετικά σενάρια του High Lifetime Scenario

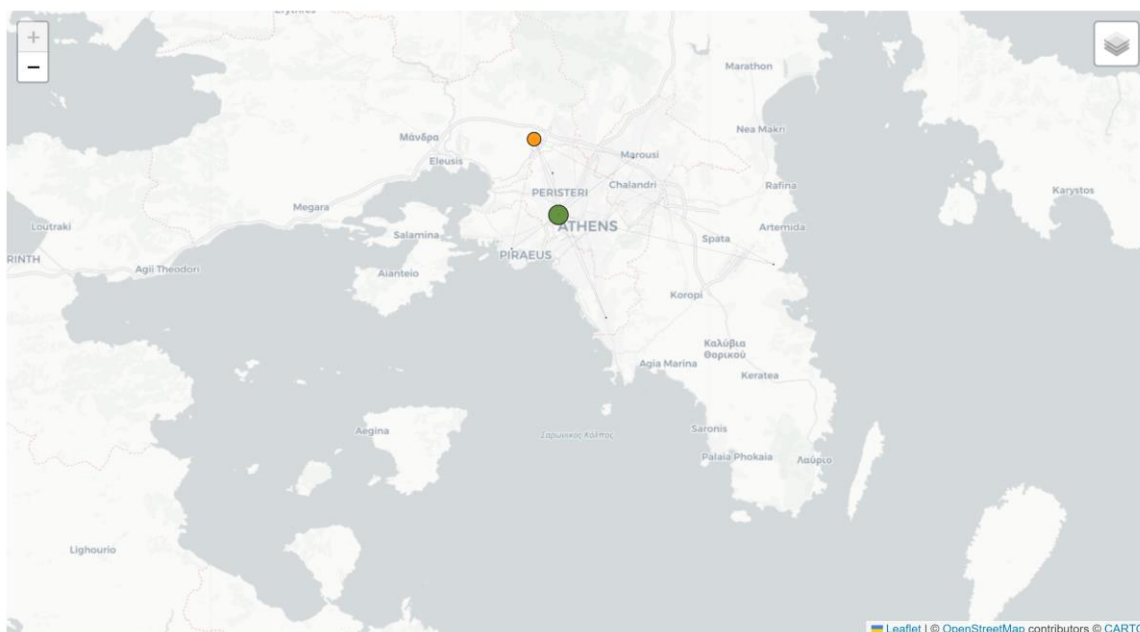
#### 4.3.2 Βελτιστοποίηση μέσω RELOG

Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3.4 εισάχθηκαν στο λογισμικό του RELOG ο αριθμός κυψελών των ροών L1, L2 και L3, οι συντεταγμένες των κέντρων διαλογής καθώς και υποψήφιες τοποθεσίες εγκατάστασης των μονάδων επεξεργασίας.

Η βελτιστοποίηση του δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής, σύμφωνα με το λογισμικό RELOG, αποτελεί ένας συνδυασμός του σεναρίου 1 και 4.

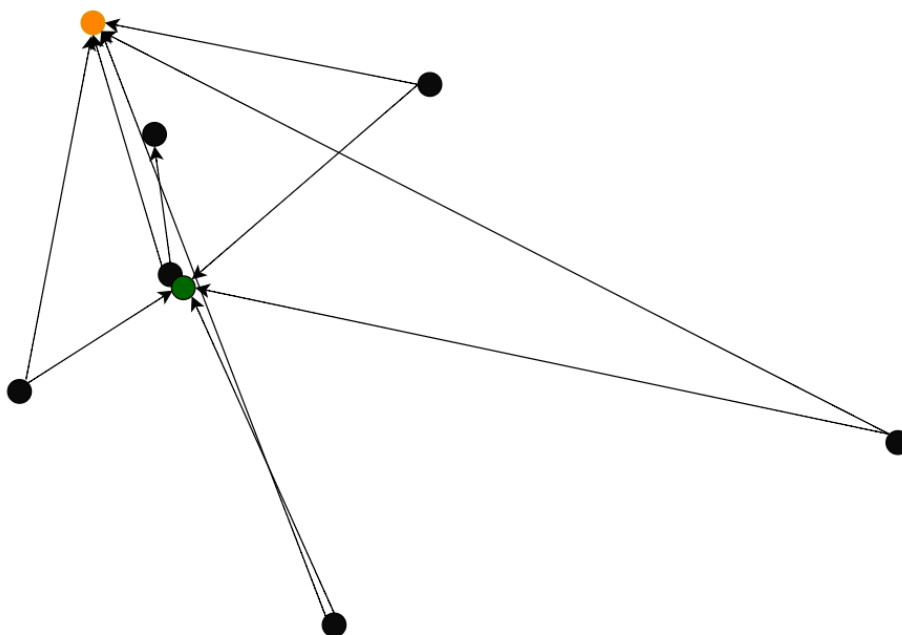
Δηλαδή, η βέλτιστη χωροθέτηση των μονάδων ανακύκλωσης και επανασυναρμολόγησης είναι στον Ελαιώνα, όπως είχε προβλεφθεί στο σενάριο 4, ενώ τα κέντρα συλλογής παραμένουν ίδια με το σενάριο 1.

Στην Εικόνα 4.1 απεικονίζεται το αποτέλεσμα του λογισμικού RELOG σχετικά με τη χωροθέτηση των κύριων εγκαταστάσεων του δικτύου αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας.



ΕΙΚΟΝΑ 4.1: Αποτέλεσμα του λογισμικού RELOG για τη χωροθέτηση των εγκαταστάσεων του δικτύου

Στην Εικόνα 4.2 φαίνεται μια γραφική απεικόνιση του αποτελέσματος του λογισμικού RELOG. Με την πορτοκαλί κουκίδα συμβολίζεται το κέντρο απόρριψης των αποβλήτων, όπου επιλέχθηκε η ήδη υπάρχουσα εγκατάσταση του ΧΥΤΑ Φυλής. Η πράσινη κουκίδα συμβολίζει τις εγκαταστάσεις ανακύκλωσης και επανασυναρμολόγησης, όπως αυτές χωροθετήθηκαν από το λογισμικό, στην περιοχή του Ελαιώνα. Οι μαύρες κουκίδες αποτελούν τα κέντρα συλλογής του δικτύου, όπως αυτά περιγράφονται στον Πίνακα 3.8. Μεταξύ όλων των εγκαταστάσεων απεικονίζονται οι γραμμές ροής του αποβλήτου.



ΕΙΚΟΝΑ 4.2 : Σχηματική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων του λογισμικού RELOG

## 4.4 Οικονομική ανάλυση

Για την ολοκλήρωση της παρούσας έρευνας κρίθηκε απαραίτητη η οικονομική ανάλυση του δικτύου. Όπως αποδεικνύεται και από του υπολογισμούς του όγκου αποβλήτου που αναμένεται να διαχειρίζεται στην Αττική, είναι απαραίτητη η υλοποίηση ενός τέτοιου δικτύου. Υπολογίζοντας τα έσοδα και έξοδα της αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας καθώς και την επένδυση αρχικού κεφαλαίου θα θεωρηθεί εάν η επένδυση είναι οικονομικά συμφέρουσα.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως ο υπολογισμός των συνολικών εσόδων και εξόδων υπολογίστηκαν ανά πέντε έτη, από το 2025 έως και το 2040.

### 4.4.1 Υπολογισμός εξόδων

Το αρχικό κεφάλαιο επένδυσης για την υλοποίηση του δικτύου προσεγγίστηκε στα 50 εκατομμύρια €, έχοντας ως γνώμονα εγκαταστάσεις μεγαλύτερης κλίμακας. Για ένα δίκτυο συλλογής και επεξεργασίας μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων στη Γερμανία, υπολογίζεται πως απαιτούνται 150 εκατομμύρια €. Το παρόν δίκτυο έχει τη δυνατότητα επεξεργασίας 18.500 τόνων ετησίως [\[16\]](#).

Η μονάδα που σχεδιάζεται στην Αττική, στο πιο δυσμενές σενάριο και για το έτος 2040, προβλέπεται να διαχειρίζεται σχεδόν το 1/3 της ποσότητας που είναι δυνατό να

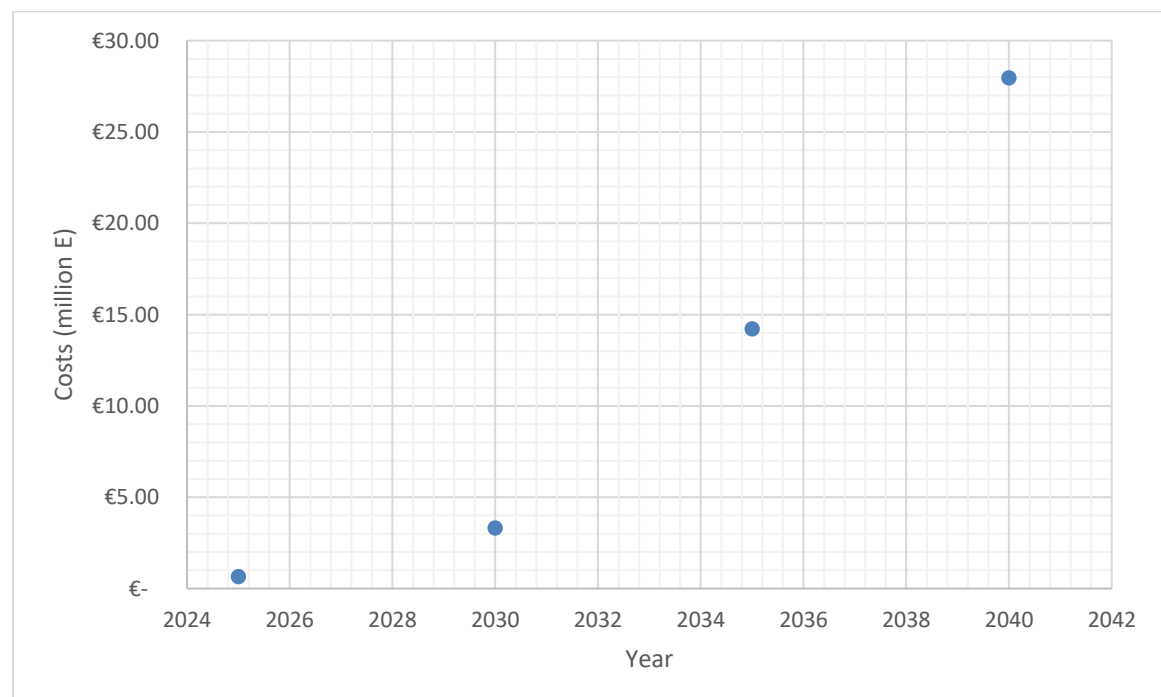
διαχειρίζεται η μονάδα στη Γερμανία. Επομένως, θεωρείται λογική η προσέγγιση, πως το κόστος εγκατάστασης μιας τέτοιας μονάδας στην Αττική θα είναι 50 εκατομμύρια €.

Αφού υπολογίστηκαν ξεχωριστά τα κόστη σε όλα τα στάδια του δικτύου, αθροίστηκαν με σκοπό το σχηματισμό των ετήσιων εξόδων.

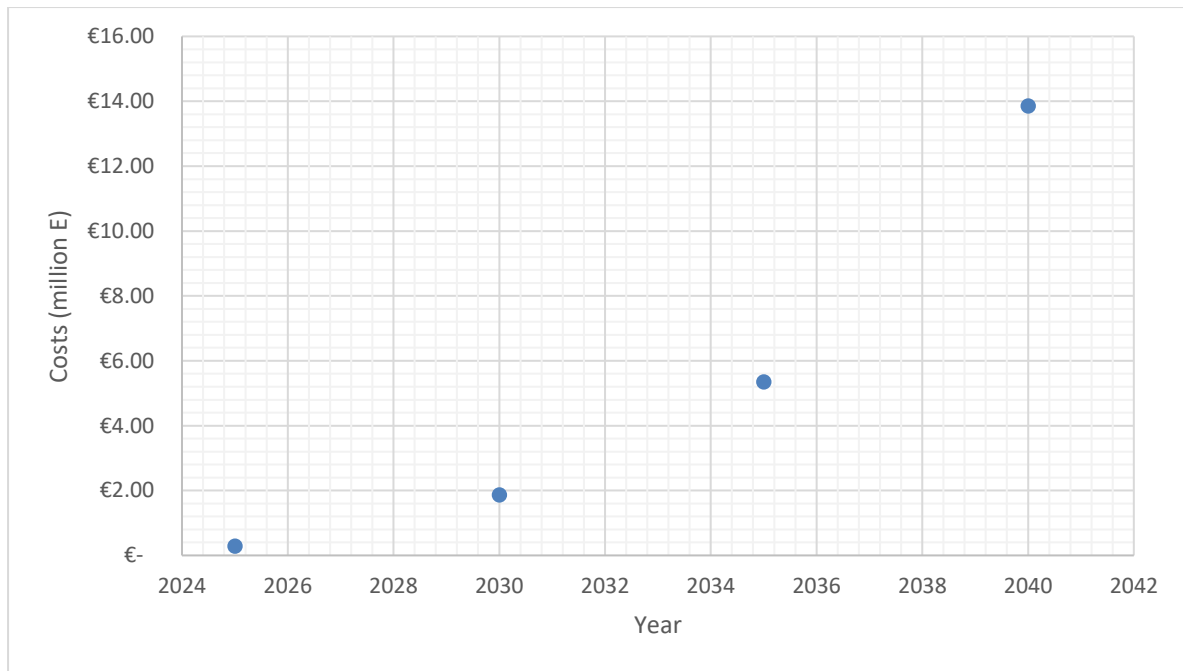
Στο Παράρτημα 2, αναγράφονται αναλυτικά τα έξοδα του δικτύου σε κάθε επίπεδο ξεχωριστά, καθώς και αθροιστικά.

Καθώς οι υπολογισμοί των εξόδων έγιναν ανά πενταετία, απαιτείται η πρόβλεψη τους και για τα υπόλοιπα έτη, με σκοπό την εύρεση των καθαρών ταμειακών ροών που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των οικονομικών συντελεστών. Έτσι, μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων, υπολογίστηκαν τα έξοδα (costs) του συστήματος (Διάγραμμα 4.8 και 4.9) των ενδιαμέσων ετών

Τα αποτελέσματα της μεθόδου αναγράφονται στο Παράρτημα 4.1, για το Low Lifetime Scenario και το Παράρτημα 4.2 για το High Lifetime Scenario αντίστοιχα.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.8: Καμπύλη εξόδων συστήματος για Low Lifetime Scenario



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.9: Καμπύλη εξόδων συστήματος για Low Lifetime Scenario

#### 4.4.2 Υπολογισμός εσόδων

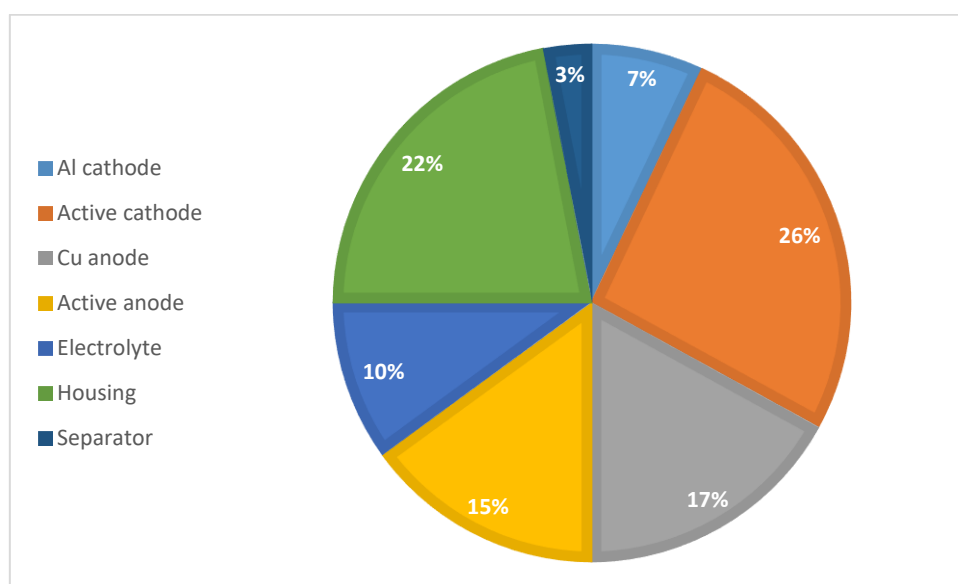
Ο προσδιορισμός των εσόδων (income) βασίζεται στον υπολογισμό των πολύτιμων μετάλλων που αναμένεται να ανακτώνται κατά την ανακύκλωση, καθώς και στις επανασυναρμολογημένες μπαταρίες που θα παράγονται στη μονάδα επανασυναρμολόγησης και θα διατίθενται στην αγορά με σημαντικά χαμηλότερο κόστος.

Στον Πίνακα 4.3 αναγράφεται η σύνθεση των υλικών μιας LIB σε % w/w.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: Σύνθεση LIBs %w/w [\[18\]](#)

Battery type	Al cathode current collector	Cathode active material	Cu anode current collector	Anode active material	Electrolyte	Housing	Separator
NMC	7	26	17	15	10	22	3

Από τον Πίνακα 4.3 προκύπτει το Διάγραμμα 4.10, το οποίο απεικονίζει τα ποσοστά της μάζας που καταλαμβάνει κάθε ένα από τα κύρια στοιχεία της LIB.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.10: Ποσοστά σύνθεσης μιας LIB

Το μεγαλύτερο ποσοστό πολύτιμων μετάλλων είναι εντός του υλικού ενεργής καθόδου. Στον Πίνακα 4.4 δίνεται η τυπική σύνθεση των υλικών που αποτελείται η κάθοδος μίας LIB σε % w/w.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4: Σύνθεση υλικών ενεργής καθόδου μίας LIB [18]

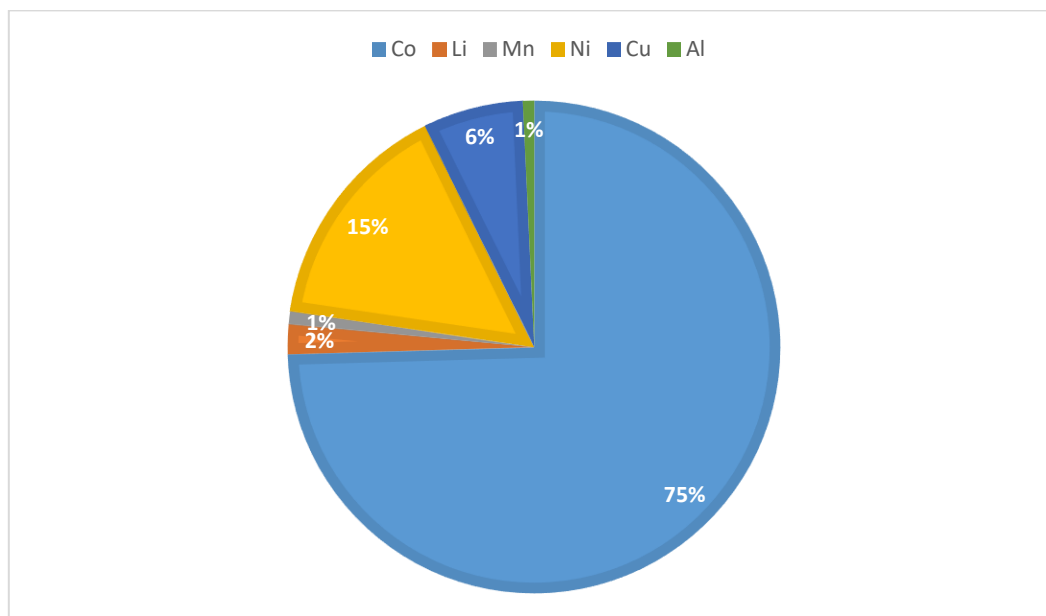
Battery type	O	Co	Li	Mn	Ni
NMC	21	39	5	17	18

Εφόσον καθορίστηκαν τα ποσοστά και βάση πρόσφατων μελετών [18], δημιουργήθηκε ο Πίνακας 4.5 όπου αναγράφει την εκτιμώμενη αξία των υλικών της ενεργής καθόδου και των υπόλοιπων μετάλλων που μπορούν να ανακτηθούν από μία LIB, οι τιμές των οποίων δίνονται σε ευρώ ανά τόνο αποβλήτου LIB.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5: Εκτιμώμενη αξία ανακτημένων μετάλλων από LIB σε €/ τόνο αποβλήτου [18]

Estimated values of recycled metals (€/ton of spent LIBs)						
Co	Li	Mn	Ni	Cu	Al	Total
13065	338	153	2698	1146	126	17,526.00 €

Από τον Πίνακα 4.5 προκύπτει το Διάγραμμα 4.11, όπου απεικονίζει το ποσοστό της συνολικής αξίας των προς ανάκτηση υλικών στις LIBs.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.11: Ποσοστά επί της συνολικής αξίας των μετάλλων μίας LIB

Είναι φανερό πως το μέταλλο με τη μεγαλύτερη αξίας εντός μίας LIB αποτελεί το κοβάλτιο (Co), καθώς το 75% της αξίας της οφείλεται σε αυτό. Πιο συγκεκριμένα από τις 17,526.00 € σε μέταλλα που μπορούν να ανακτηθούν από έναν τόνο αποβλήτου μπαταριών ιόντων λιθίου, οι 12,065.00 € αφορούν το κοβάλτιο.

Επομένως, γνωρίζοντας τη μάζα του αποβλήτου και στα δύο σενάρια παραγωγής μέχρι το 2040, υπολογίστηκαν οι ποσότητες των ανακτημένων μετάλλων της ενεργής καθόδου. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για το Low Lifetime Scenario και το High Lifetime Scenario παρουσιάζονται στο Παράρτημα 6.1 και 6.2 αντίστοιχα.

Με χρήση του Πίνακα 4.5 υπολογίστηκαν τα συνολικά έσοδα της αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας από την ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων.

Στον Πίνακα 4.6 και 4.7 παρουσιάζονται τα έσοδα (income) που προκύπτουν από την ανάκτηση όλων των υλικών για το Low Lifetime και High Lifetime Scenario αντίστοιχα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6: Συνολικά έσοδα από την ανάκτηση μετάλλων για το Low Lifetime Scenario

LL	
Year	total metals value
2025	2,794,609 €
2030	17,817,430 €
2035	64,895,518 €
2040	128,997,208 €

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7: Συνολικά έσοδα από την ανάκτηση μετάλλων για το High Lifetime Scenario

HL	
Year	total metals value
2025	1,233,619 €
2030	10,290,796 €
2035	29,534,134 €
2040	75,771,944 €

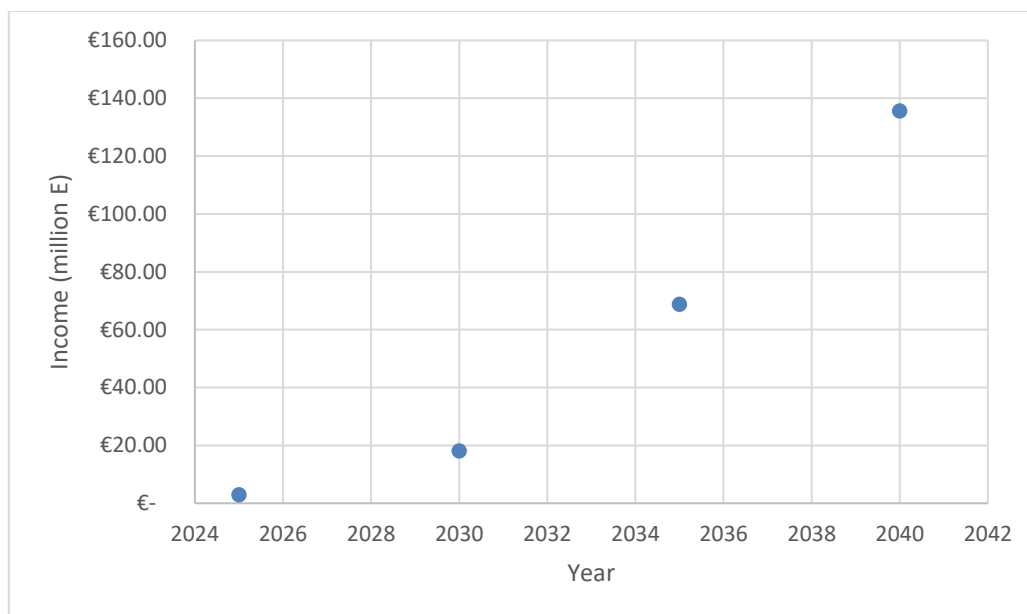
Στο Παράρτημα 7.1 και 7.2 αναλύονται τα έσοδα του συστήματος ανά κύριο μέταλλο που ανακτάται.

Επίσης, στη παρούσα κατάσταση της αγοράς, η τιμή πώλησης μια καινούριας μπαταρίας κυμαίνεται στις 12.500€, ενώ το κόστος παραγωγής της είναι περίπου 10.000€. Η αγορά επανασυναρμολογημένων μπαταριών, αποτελεί ασφαλή και οικονομικά καλύτερη επιλογή, καθώς η τιμή μίας τυπικής μπαταρίας είναι στις 7.500€.

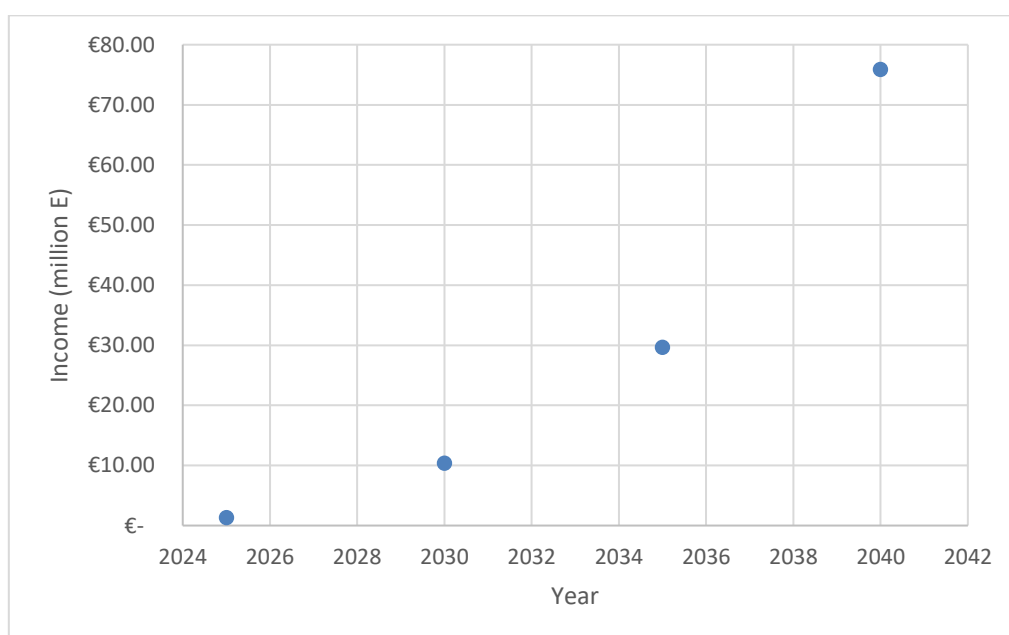
Αθροίζοντας τις παραπάνω ροές εσόδων προκύπτουν τα συνολικά έσοδα της αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας. Αναλυτικά παρουσιάζονται στο Παράρτημα 5.1 και 5.2.

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των εσόδων των ενδιάμεσων ετών, με τη χρήση δηλαδή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων. Στο Παράρτημα 8.1 και 8.2 παρουσιάζονται τα έσοδα του δικτύου από το 2025 έως το 2040 για το Low Lifetime Scenario και το High Lifetime Scenario αντίστοιχα.





ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.10: Καμπύλη εσόδων συστήματος για Low Lifetime Scenario



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.11: Καμπύλη εσόδων συστήματος για High Lifetime Scenario

#### 4.4.3 Υπολογισμών οικονομικών παραμέτρων

Εφόσον υπολογίστηκαν τα έσοδα και έξοδα της αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας, είναι εφικτός ο υπολογισμός των καθαρών ταμειακών ροών με σκοπό τον προσδιορισμό των απαιτούμενων οικονομικών παραμέτρων για την αξιολόγηση της επένδυσης. Στο Παράρτημα 9.1 και 9.2 αναγράφονται οι καθαρές ταμειακές ροές του δικτύου, για το LL scenario και το HL scenario αντίστοιχα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: Οικονομικοί παράμετροι για Low Lifetime Scenario και High Lifetime Scenario

Parameter	LL	HL
Initial investment	50,000,000.00 €	50,000,000.00 €
Discount rate	4.5%	4.5%
NPV	373,988,952.3 €	174,879,978.6 €
IRR	29.667%	20.339%
Payback period	5.771 έτη	7.311 έτη
Discounted Payback period	6.268 έτη	8.072 έτη
Cash flow return rate	29.67% per year	20.34% per year

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι οικονομικές παράμετροι που υπολογίστηκαν για την αξιολόγηση της επένδυσης. Πιο συγκεκριμένα, η αρχική επένδυση και στα δύο σενάρια θεωρήθηκε 50 εκατομμύρια € και το επιτόκιο προεξόφλησης 4.5%, σύμφωνα με τη παρούσα αγορά. Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) υπολογίστηκε 29.7% στο Low Lifetime Scenario και 20.3% στο High Lifetime Scenario. Το επιτόκιο προεξόφλησης είναι και στις δύο περιπτώσεις είναι κατά πολύ μικρότερο του IRR, γεγονός που δηλώνει συμφέρουσα επένδυση. Στο πρώτο σενάριο υπάρχει μεγάλο περιθώριο ασφαλείας μεταξύ των δύο αποδόσεων, μεγαλύτερο του 25%, που επιτρέπει την ύπαρξης ακόμα και κάποιου πιθανού λάθους. Επίσης στο Low Lifetime Scenario, το περιθώριο ασφαλείας είναι πάνω από 15%, που δηλώνει πως η επένδυση και σε αυτό το σενάριο είναι συμφέρουσα. Η περίοδος αποπληρωμής (Payback period) και στα δύο σενάρια είναι μικρότερη του ορίζοντα σχεδιασμού του έργου, που σημαίνει πως αναμένεται να αποκομιστεί οικονομικό όφελος, ίσο προς την αρχική επένδυση, εντός του εξεταζόμενου χρόνου.

## Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις

### 5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε και σχεδιάστηκε ένα σύστημα συλλογής, ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης μπαταριών ιόντων λιθίου ηλεκτρικών οχημάτων στην Αττική, προσδιορίζοντας το από πολλές οπτικές με σκοπό την ανάδειξη της αναγκαιότητας ύπαρξης ενός τέτοιου δικτύου τόσο στην Αττική, όσο και γενικότερη σε ολόκληρη την Ελληνική επικράτεια. Από την μελέτη αυτήν προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Βάσει των ιστορικών δεδομένων αλλά και των παγκόσμιων και Ευρωπαϊκών κανονισμών, προβλέφθηκε η μελλοντική παραγωγή του συγκεκριμένου αποβλήτου, έως το 2040. Στην Ελλάδα, αλλά και σε ολόκληρο τον κόσμο, τα επόμενα χρόνια αναμένεται η ηλεκτροκίνηση να διεισδύσει ακόμα περισσότερο στην αγορά αυτοκινήτων, επομένως ο τρόπος διαχείρισης και η ανακύκλωση των αποβλήτων τους είναι ένα ζήτημα το οποίο θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα.
- Μέσω των υπολογισμών, επιβεβαιώθηκε πως οι ποσότητες των ανακτημένων πολύτιμων μετάλλων αλλά και η προώθηση των επανασυναρμολογημένων μπαταριών στην αγορά, είναι ικανές να στηρίζουν τη βιωσιμότητα ενός τέτοιου δικτύου στην Αττική. Το κοβάλτιο αποτελεί το πολυτιμότερο μέταλλο στις LIBs με κάλυψη του 75% των εσόδων. Πέραν του οικονομικού οφέλους που έχει η ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση των μπαταριών, συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, καθώς τα αποθέματα αυτών των μετάλλων είναι περιορισμένα αλλά και η εξόρυξη τους συμβάλει σε μεγάλο βαθμό στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου.
- Βάση της γεωμορφολογίας της Αττικής, αλλά και της βελτιστοποίησης του συστήματος, επιλέχθηκε η εγκατάσταση των μονάδων ανακύκλωσης και επανασυναρμολόγησης στην περιοχή του Ελαιώνα, που αποτελεί βιομηχανική ζώνη εντός του κέντρου των Αθηνών. Επιπλέον χωροθετήθηκαν πέντε κέντρα συλλογής σε ολόκληρη την Αττική. Ένας σημαντικός παράγοντας που μείωσε το κόστους του επιλεγμένου σεναρίου, είναι το γεγονός πως επιλέχθηκε στον χώρο των εγκαταστάσεων ανακύκλωσης, να στεγάζεται και το κέντρο συλλογής του Κεντρικού Τομέα Αθηνών, το οποίο αναμένεται να διαχειρίζεται τον μεγαλύτερο όγκο αποβλήτων.
- Τέλος, σύμφωνα με την οικονομική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, προκύπτει πως και στα δύο σενάρια παραγωγής αποβλήτου η επένδυση είναι συμφέρουσα, γεγονός που αναδεικνύει τα πλεονεκτήματα υλοποίησης ενός τέτοιου δικτύου. Επιλέγοντας το High Lifetime Scenario, το οποίο αποτελεί το πιο συντηρητικό σενάριο παραγωγής αποβλήτου, με σαφώς λιγότερα έσοδα αλλά και έξοδα, οι οικονομικοί συντελεστές έδειξαν πως αποτελεί μια αρκετά συμφέρουσα επένδυση.

## 5.2 Μελλοντικές προτάσεις

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, τα αποτελέσματα που λήφθηκαν αλλά και η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία θα μπορούσαν να αποτελέσουν το βήμα για την εκπόνηση περαιτέρω ερευνητικών εργασιών.

- Η εύρεση της βέλτιστης τοποθεσίας των εγκαταστάσεων ανακύκλωσης και επεξεργασίας των μπαταριών ιόντων λιθίου ηλεκτρικών οχημάτων, θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε μια μεγαλύτερη κλίμακα, δηλαδή να μελετηθεί ο σχεδιασμός ενός παρόμοιου δικτύου, μεγαλύτερης εμβέλειας που θα εξυπηρετούσε ολόκληρη την Ελληνική επικράτεια.
- Η ίδια μεθοδολογία θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε μικρότερης κλίμακας περιοχές. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να γίνει έρευνα αν θα ήταν περιβαλλοντικά και οικονομικά συμφέρον να υλοποιηθεί ένα τέτοιο σχέδιο σε ένα μεγάλο νησί όπως η Κρήτη.
- Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε να εξεταστεί η περίπτωση ύπαρξης περισσότερων από ένα κέντρων επεξεργασίας και ανακύκλωσης τα οποία θα μπορούν να υποστηρίξουν και την εισαγωγή κυψελών και από γειτονικές βαλκανικές χώρες.
- Η μελέτη αυτή θα μπορούσε να γίνει πιο λεπτομερής λαμβάνοντας υπόψιν τις ποσότητες όλων των τεχνολογιών μπαταριών ιόντων λιθίου αλλά και μπαταριών υβριδικών οχημάτων που γνωρίζουν σημαντική άνθηση και σίγουρα θα είναι μια κατηγορία αποβλήτων που θα μας απασχολήσει τα επόμενα χρόνια.
- Τέλος, θα μπορούσε να μελετηθεί η δυνατότητα υποστήριξης μεγαλύτερου εύρους τεχνολογιών ανακύκλωσης ή η πιθανότητα υποστήριξης ενός τέτοιου συστήματος σε ήδη υπάρχοντα εργοστάσια ανακύκλωσης ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών.

## 6. Βιβλιογραφία

- [1] Ευρωπαϊκό κοινοβούλιο, Εκπομπές CO<sub>2</sub> για αυτοκίνητα και ημιφορτηγά: Το ΕΚ εγκρίνει αυστηρότερα όρια, 2023
- [2] Protocol for Designing, Optimizing, and Analyzing Reverse Supply Chains Using RELOG, 2023
- [3] Economic Efficiency of High-performance Electric Vehicle Operation Based on Neural Network Algorithm, 2023
- [4] IEA Electric vehicles, 2023
- [5] Εθνικό σχέδιο ηλεκτροκίνησης, ΥΠΕΝ, 2023
- [6] <https://depts.washington.edu/matseed/batteries/MSE/battery.html>
- [7] A Review of Battery Electric Vehicle Technology and Readiness Levels, 2017
- [8] <https://www.rebattery.gr/ilektrokinisi-mpataries-ni-mh-kai-li/>
- [9] Lithium-ion Battery Recycling— overview of Techniques and Trends, 2023
- [10] Reverse logistics and information systems: modeling of processes and implementing in the sector of mobile phones in Greece, Πανουσοπούλου, 2014
- [11] Dynamic Estimation of End-of-life Electric Vehicle Batteries in the EU-27 Considering Reuse, Remanufacturing and Recycling Options, Kastanaki, 2023
- [12] Δείκτης τιμών καταναλωτή: Σεπτέμβριος 2023, ετήσιος πληθωρισμός 1,6%, Ελληνική Στατιστική Αρχή, Οκτώβριος 2023
- [13] Optimal Design of Electric Vehicle Battery Recycling Network – from the Perspective of Electric Vehicle Manufacturers, 2020
- [14] <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>
- [15] Census 2021, Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2022
- [16] A Dynamic Network Design Model with Capacity Expansions for Eol Traction Battery Recycling – A Case Study of an OEM in Germany, 2023
- [17] Optimal Configuration of Electric Vehicle Battery Recycling System Under Across-network Cooperation, 2023
- [18] Recent reseach related to Li-ion battery recycling process- A review, Dorneanu, 2022
- [19] <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/07/10/council-adopts-new-regulation-on-batteries-and-waste-batteries/>
- [20] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/batteries/lead-acid-batteries>

- [21] European Association for storage of energy, Nickel-Metal Hydride Battery
- [22] European Association for storage of energy, Sodium-Nickel-Chloride Battery
- [23] The operational environment for repurposing electric vehicle lithium-ion batteries for energy storage applications in the EU, McDougall, 2023
- [24] EUROBAT E- Mobility Battery R&D Roadmap 2030 – Battery Technology for Vehicle Applications
- [25] MyEV.com

## 7. Παραρτήματα

### Παράρτημα 1

Scenario 1					
L1		L2		L3	
Route	Distance (km)	Route	Distance (km)	Route	Distance (km)
Glyfada to Plants	45.5	Glyfada to Plants	45.5	Glyfada to XYTA	41.9
Center to Plants	25.2	Center to Plants	25.2	Center to XYTA	21.6
Anatoliki to Plants	51.6	Anatoliki to Plants	51.6	Anatoliki to XYTA	48
Peireas to Plants	19.6	Peireas to Plants	19.6	Peireas to XYTA	23.3
Dytiki to Plants	14.8	Dytiki to Plants	14.8	Dytiki to XYTA	12.9
Voreia to Plants	20.3	Voreia to Plants	20.3	Voreia to XYTA	16.6

Scenario 2					
L1		L2		L3	
Route	Distance (km)	Route	Distance (km)	Route	Distance (km)
Center to Plants	25.2	Center to Plants	25.2	Center to XYTA	21.6
Peireas to Plants	19.6	Peireas to Plants	19.6	Peireas to XYTA	23.3
Dytiki to Plants	14.8	Dytiki to Plants	14.8	Dytiki to XYTA	12.9
Voreia to Plants	20.3	Voreia to Plants	20.3	Voreia to XYTA	16.6

Scenario 3					
L1		L2		L3	
Route	Distance (km)	Route	Distance (km)	Route	Distance (km)
Sarwnida to Plants	62	Sarwnida to Plants	62	Sarwnida to XYTA	58.4
Lavrio to Plants	70.2	Lavrio to Plants	70.2	Lavrio to XYTA	66.6
Glyfada to Plants	45.5	Glyfada to Plants	45.5	Glyfada to XYTA	41.9
Center to Plants	25.2	Center to Plants	25.2	Center to XYTA	21.6
Anatoliki to Plants	51.6	Anatoliki to Plants	51.6	Anatoliki to XYTA	48
Peireas to Plants	19.6	Peireas to Plants	19.6	Peireas to XYTA	23.3
Dytiki to Plants	14.8	Dytiki to Plants	14.8	Dytiki to XYTA	12.9
Voreia to Plants	20.3	Voreia to Plants	20.3	Voreia to XYTA	16.6

Scenario 4					
L1		L2		L3	
Route	Distance (km)	Route	Distance (km)	Route	Distance (km)
Glyfada to Plants	17.5	Glyfada to Plants	17.5	Glyfada to XYTA	17.5
Peireas to Plants	10.2	Peireas to Plants	10.2	Peireas to XYTA	10.2
Anatoliki to Plants	47.5	Anatoliki to Plants	47.5	Anatoliki to XYTA	47.5
Voreia to Plants	16.1	Voreia to Plants	16.1	Voreia to XYTA	16.1
In plants	0	In plants	0	In Plants to XYTA	21.6



Παράρτημα 2

Scenario 4														
Low Lifetime								High Lifetime						
	Acquisition cost	Processing cost	Transportation	CO2 transportation	CO2 processing	Total			Acquisition cost	Processing cost	Transportation	CO2 transportation	CO2 processing	Total
2025	136,562.18 €	485,896.33 €	37,843.74 €	730.65 €	33,647.56 €	696,705.46 €		2025	59,325.89 €	213,145.53 €	16,673.30 €	322.05 €	14,720.98 €	304,187.75 €
2030	564,941.59 €	2,589,655.15 €	191,871.79 €	3,919.93 €	159,970.75 €	3,510,359.21 €		2030	301,848.15 €	1,470,748.74 €	109,764.72 €	2,248.27 €	89,884.29 €	1,974,494.16 €
2035	2,425,499.59 €	11,055,529.01 €	766,780.93 €	15,565.41 €	717,166.53 €	14,980,541.47 €		2035	911,461.59 €	4,176,178.44 €	389,144.19 €	7,560.30 €	249,404.60 €	5,733,749.12 €
2040	5,045,685.04 €	21,503,594.33 €	1,521,633.13 €	30,824.28 €	1,388,415.83 €	29,490,152.61 €		2040	2,504,921.40 €	10,686,640.99 €	940,319.67 €	18,528.76 €	643,964.29 €	14,794,375.12 €
Total	8,172,688.41 €	35,634,674.82 €	2,518,129.59 €	51,040.27 €	2,299,200.67 €	48,677,758.75 €		Total	3,777,557.03 €	16,546,713.69 €	1,455,901.89 €	28,659.38 €	997,974.16 €	22,806,806.15 €

Παράρτημα 3

2025				2030				2035				2040		
	CO2 [tonnes]	Value			CO2 [tonnes]	Value			CO2 [tonnes]	Value			CO2 [tonnes]	Value
Collection center	75.9756512	7,445.61 €		Collection center	484.3935611	47,470.57 €		Collection center	1889.81849	185,202.21 €		Collection center	3720.59097	364,617.92 €
Recycling plant	189.267284	18,548.19 €		Recycling plant	1019.26774	99,888.24 €		Recycling plant	3762.557693	368,730.65 €		Recycling plant	7595.980224	744,406.06 €
Remanufacturing	75.58257686	7,407.09 €		Remanufacturing	112.6465279	11,039.36 €		Remanufacturing	1603.044575	157,098.37 €		Remanufacturing	2727.683123	267,312.95 €
Waste disposal cente	2.516888857	246.66 €		Waste disposal cente	16.04678258	1,572.58 €		Waste disposal cente	62.60509813	6,135.30 €		Waste disposal cente	123.2541453	12,078.91 €
TOTAL	343.3424009	33,647.56 €		TOTAL	1632.354611	159,970.75 €		TOTAL	7318.025857	717,166.53 €		TOTAL	14167.50846	1,388,415.83 €

## Παράρτημα 4.1

2025		696,705.46 €
2026	-	551,128.40 €
2027		1,405,882.08 €
2028		3,362,892.55 €
2029		5,319,903.03 €
2030		3,510,359.21 €
2031		9,233,923.98 €
2032		11,190,934.45 €
2033		13,147,944.93 €
2034		15,104,955.40 €
2035		14,980,541.47 €
2036		19,018,976.35 €
2037		20,975,986.82 €
2038		22,932,997.30 €
2039		24,890,007.77 €
2040		29,490,152.61 €

## Παράρτημα 4.2

2025		304,187.75 €
2026	-	438,174.68 €
2027		506,421.66 €
2028		1,451,018.00 €
2029		2,395,614.34 €
2030		1,974,494.16 €
2031		4,284,807.03 €
2032		5,229,403.37 €
2033		6,173,999.71 €
2034		7,118,596.05 €
2035		5,733,749.12 €
2036		9,007,788.73 €
2037		9,952,385.07 €
2038		10,896,981.41 €
2039		11,841,577.76 €
2040		14,794,375.12 €

## Παράρτημα 5.1

LL			
Year	total metals value	remanufactured	Total
2025	2,794,609.56 €	182,684.28 €	2,977,293.85 €
2030	17,817,430.42 €	272,268.44 €	18,089,698.85 €
2035	64,895,518.25 €	3,874,584.05 €	68,770,102.30 €
2040	128,997,208.40 €	6,592,853.18 €	135,590,061.58 €

## Παράρτημα 5.2

HL			
Year	total metals value	remanufactured	Total
2025	1,233,619.62 €	76,772.75 €	1,310,392.37 €
2030	10,290,796.02 €	92,399.63 €	10,383,195.65 €
2035	29,534,134.43 €	108,026.55 €	29,642,160.98 €
2040	75,771,944.82 €	123,653.40 €	75,895,598.22 €

## Παράρτημα 6.1

		Active cathode material analysis (ton)				
Year		O	Co	Li	Mn	Ni
	2025	8.706247	16.16874	2.072916	7.047914	7.462497
	2030	55.50791	103.0861	13.21617	44.93498	47.57821
	2035	202.1736	375.4653	48.13658	163.6644	173.2917
	2040	401.8742	746.3378	95.68434	325.3267	344.4636

## Παράρτημα 6.2

		Active cathode material analysis (ton)				
Year		O	Co	Li	Mn	Ni
	2025	3.843183	7.137341	0.915044	3.111148	3.294157
	2030	32.05965	59.53935	7.633251	25.95305	27.4797
	2035	92.0098	170.8753	21.9071	74.48412	78.86554
	2040	236.0578	438.393	56.20423	191.0944	202.3352

## Παράρτημα 7.1

LL					
Value / main metal					
Co	Li	Mn	Ni	Cu	Al
2,083,280.49 €	53,895.81 €	24,396.63 €	430,209.78 €	182,735.51 €	20,091.34 €
13,282,250.85 €	343,620.42 €	155,544.15 €	2,742,863.59 €	1,165,056.22 €	128,095.19 €
48,377,264.97 €	1,251,551.13 €	566,530.54 €	9,990,192.18 €	4,243,424.85 €	466,554.56 €
96,162,759.77 €	2,487,792.79 €	1,126,131.06 €	19,858,180.32 €	8,434,942.42 €	927,402.05 €

## Παράρτημα 7.2

HL					
Value / main metal					
Co	Li	Mn	Ni	Cu	Al
919,618.87 €	23,791.14 €	10,769.36 €	189,906.75 €	80,664.62 €	8,868.88 €
7,671,416.76 €	198,464.51 €	89,837.49 €	1,584,193.07 €	672,900.39 €	73,983.81 €
22,016,630.51 €	569,584.47 €	257,829.66 €	4,546,564.80 €	1,931,194.69 €	212,330.31 €
56,485,248.15 €	1,461,309.90 €	661,480.52 €	11,664,538.81 €	4,954,618.78 €	544,748.66 €

## Παράρτημα 8.1

LL	
2025	2,977,293.85 €
2026 -	1,950,642.72 €
2027	7,019,731.41 €
2028	15,990,105.55 €
2029	24,960,479.68 €
2030	18,089,698.85 €
2031	42,901,227.95 €
2032	51,871,602.08 €
2033	60,841,976.21 €
2034	69,812,350.34 €
2035	68,770,102.30 €
2036	87,753,098.61 €
2037	96,723,472.74 €
2038	105,693,846.88 €
2039	114,664,221.01 €
2040	135,590,061.58 €

## Παράρτημα 8.2

HL	
2025	1,310,392.37 €
2026 -	2,284,058.97 €
2027	2,576,232.69 €
2028	7,436,524.35 €
2029	12,296,816.01 €
2030	10,383,195.65 €
2031	22,017,399.32 €
2032	26,877,690.98 €
2033	31,737,982.64 €
2034	36,598,274.29 €
2035	29,642,160.98 €
2036	46,318,857.61 €
2037	51,179,149.26 €
2038	56,039,440.92 €
2039	60,899,732.58 €
2040	75,895,598.22 €

## Παράρτημα 9.1

LL	
2025	2,280,588.38 €
2026 -	1,399,514.32 €
2027	5,613,849.33 €
2028	12,627,212.99 €
2029	19,640,576.65 €
2030	14,579,339.65 €
2031	33,667,303.97 €
2032	40,680,667.63 €
2033	47,694,031.29 €
2034	54,707,394.94 €
2035	53,789,560.83 €
2036	68,734,122.26 €
2037	75,747,485.92 €
2038	82,760,849.58 €
2039	89,774,213.24 €
2040	106,099,908.97 €

## Παράρτημα 9.2

HL	
2025	1,006,204.62 €
2026 -	1,845,884.29 €
2027	2,069,811.03 €
2028	5,985,506.34 €
2029	9,901,201.66 €
2030	8,408,701.49 €
2031	17,732,592.29 €
2032	21,648,287.61 €
2033	25,563,982.93 €
2034	29,479,678.24 €
2035	23,908,411.86 €
2036	37,311,068.88 €
2037	41,226,764.19 €
2038	45,142,459.51 €
2039	49,058,154.82 €
2040	61,101,223.10 €