



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Επαναχρησιμοποίηση Συσσωρευτών Ηλεκτρικών  
Οχημάτων σε Οικιακές Εφαρμογές ΑΠΕ – Αποθήκευσης  
Ενέργειας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

του

**Παναγιώτη Γ. Τριανταφυλλόπουλου**

**Επιβλέπων:**

Δρ Δημήτριος Ζαφειράκης  
Επίκουρος Καθηγητής Πα.Δ.Α.

Αθήνα, Ιούλιος 2023





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Επαναχρησιμοποίηση Συσσωρευτών Ηλεκτρικών  
Οχημάτων σε Οικιακές Εφαρμογές ΑΠΕ – Αποθήκευσης  
Ενέργειας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

**Παναγιώτη Γ. Τριανταφυλλόπουλου**

**Επιβλέπων:** Δρ Δημήτριος Ζαφειράκης  
Επίκουρος Καθηγητής Πα.Δ.Α.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική Επιτροπή την 23<sup>η</sup> Ιουλίου 2023

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....  
Δρ Δημήτριος Ζαφειράκης  
Επίκουρος Καθηγητής  
Πα.Δ.Α.

.....  
Δρ Κωνσταντίνος Μουστρής  
Καθηγητής  
Πα.Δ.Α.

.....  
Δρ Σπυρόπουλος Γεώργιος  
ΕΔΙΠ Α' Βαθμίδας  
Πα.Δ.Α.

Αθήνα, Ιούλιος 2023

Copyright © - Παναγιώτης Γ. Τριανταφυλλόπουλος, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

### **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Παναγιώτης Τριανταφυλλόπουλος του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 46145607 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, της Σχολής Μηχανικών, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



**Παναγιώτης Γ. Τριανταφυλλόπουλος**

## Περίληψη

Η ενεργειακή και οικονομική απόδοση εφαρμογών ηλεκτροκίνησης καθώς και σταθερών ενεργειακών εφαρμογών αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ρυθμό γήρανσης της μονάδας συσσωρευτών. Την ίδια στιγμή, αναδύεται μία νέα αγορά στη βάση αξιοποίησης συσσωρευτών δεύτερης ζωής. Οι τελευταίοι, παρότι αποσύρονται από εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίξουν σταθερές εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας, όπως οικιακού χαρακτήρα, για μικρότερο παρόλα αυτά αριθμό κύκλων λειτουργίας και για περιορισμένο βάθος εκφόρτισης. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία θα διερευνήσει την αναδυόμενη αγορά των συσσωρευτών δεύτερης ζωής καθώς και θα αξιολογήσει οικονομοτεχνικά τυπική, οικιακή εφαρμογή ΑΠΕ-αποθήκευσης ενέργειας, με επαναχρησιμοποίηση συσσωρευτών.

**Λέξεις Κλειδιά:** Συσσωρευτές δεύτερης ζωής, γήρανση συσσωρευτών, επαναχρησιμοποίηση, αυτοπαραγωγοί ενέργειας, οικιακές εφαρμογές ΑΠΕ, αποθήκευση ενέργειας

# Abstract

The energy and economic performance of e-mobility applications as well as stationary energy storage energy applications with batteries is highly dependent on the aging rate of the battery unit. At the same time, a new market is emerging based on the utilization of second-life batteries. The latter, although they are withdrawn from electromobility applications, have the ability to support stable energy storage applications, such as domestic ones, for a smaller number of operating cycles and for a limited depth of discharge. In this context, this thesis will explore the emerging market of second-life batteries as well as evaluate the economics and performance of a typical residential application of RES-energy storage, with battery reuse.

**Key Words:** Second-life batteries, battery ageing, reuse, energy prosumers, residential RES applications, energy storage

# Ευχαριστίες

Με την ευκαιρία που μου δίνεται μέσω της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ζαφειράκη Δημήτριο για τις υποδείξεις, τις συμβουλές και την έμπρακτη στήριξη που μου παρείχε καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επιπλέον ευχαριστώ την οικογένεια μου η οποία με στήριξε κατά την ακαδημαϊκή μου πορεία.

# Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή .....</b>	<b>12</b>
1.1 Ενεργειακή κρίση .....	12
1.2 Περιβαλλοντική κρίση .....	14
1.3 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας: Η περίπτωση των οικιακών Φωτοβολταϊκών .....	15
1.3.1 Οικιακές εφαρμογές (consumers/prosumers) .....	17
1.3.2 Προκλήσεις ενσωμάτωσης Φ/Β συστημάτων στο δίκτυο .....	18
1.4 Ηλεκτροκίνηση .....	21
1.5 Κοινός παρονομαστής / Διπλή λύση στο πρόβλημα Φ/Β και ηλεκτροκίνησης .....	24
1.6 Διάρθρωση κεφαλαίων .....	24
<b>Κεφάλαιο 2 Αρχή λειτουργίας συσσωρευτών και περιγραφή μηχανισμών γήρανσης ....</b>	<b>26</b>
2.1 Συσσωρευτές ιόντων λιθίου .....	26
2.2 Υποκατηγορίες μπαταριών Λιθίου: Εφαρμογές σε οχήματα .....	27
2.3 Αρχή λειτουργίας .....	28
2.4 Γήρανση .....	30
2.5 Μακροσκοπική ανάλυση της γήρανσης .....	32
2.5.1 Θερμοκρασία .....	33
2.5.2 Εύρος λειτουργίας σε ποσοστό % της συνολικής χωρητικότητας / Κατάσταση φόρτισης SOC .....	36
2.5.3 Δείκτης C-Rate .....	40
<b>Κεφάλαιο 3 Παρουσίαση του προβλήματος: Τρόποι διαχείρισης απαξιωμένων μπαταριών .....</b>	<b>44</b>
3.1 ΧΥΤΑ .....	45
3.2 Ανακύκλωση .....	46
3.3 Επαναχρησιμοποίηση .....	48
3.4 Η περίπτωση του Powerwall .....	53
3.6 Case studies .....	58
<b>Κεφάλαιο 4 Πειραματικό μέρος .....</b>	<b>63</b>
4.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο .....	63
4.2 Μελέτη περίπτωσης .....	65
4.3 Υπολογιστικό εργαλείο και προσέγγιση .....	68
<b>Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα .....</b>	<b>69</b>
5.1 Η επίδραση του μοντέλου γήρανσης .....	69
5.2 Χρόνος απόσυρσης .....	70
5.3 Συντελεστής κάλυψης .....	74



5.4 Σταθμισμένο κόστος παραγωγής ενέργειας .....	76
<b>Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα.....</b>	<b>79</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>81</b>

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Γραφική σύγκριση χαρακτηριστικών διαφόρων τύπων μπαταριών .....	26
Εικόνα 2: Γραφική αναπαράσταση αρχής λειτουργίας της μπαταρίας.....	29
Εικόνα 3: Μηχανισμοί γήρανσης μπαταριών ιόντων λιθίου.....	31
Εικόνα 4: Αναλογία του δείκτη $C_R$ με τον τρόπο οδήγησης και την ταχύτητα φόρτισης .....	42
Εικόνα 5: Χημικά στοιχεία του περιοδικού πίνακα τα οποία περιλαμβάνονται στη σύσταση της μπαταρίας. ....	46
Εικόνα 6: Σύγκριση ενεργειακών απαιτήσεων του οχήματος έναντι εφαρμογών δευτερογενούς χρήσης συσσωρευτών .....	56
Εικόνα 7: Αξιοποίηση και κατάληξη συσσωρευτών ανάλογα με τα επίπεδα φθοράς τους....	57
Εικόνα 8: Εθνικό πάρκο Yellowstone.....	58
Εικόνα 9: Εγκαταστάσεις της μονάδας .....	59
Εικόνα 10: Σχηματική επεξήγηση της λειτουργίας της μονάδας. ....	60
Εικόνα 11: Απεικόνιση του σταθμού ταχείας φόρτισης στον πανεπιστημιακό χώρο του Σαν Ντιέγκο. ....	61
Εικόνα 12: Απεικόνιση του σταδίου Amsterdam Arena .....	62
Εικόνα 13: Σκάφος με μπαταρίες δευτερογενούς χρήσης.....	62
Εικόνα 14: Σκαρίφημα εγκατάστασης προβλήματος προσομοίωσης.....	63

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Διάγραμμα αναπαράστασης του μέσου όρου των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας στα Ευρωπαϊκά νοικοκυριά τα τελευταία χρόνια.....	12
Σχήμα 1.2: Ταξινόμηση εκπομπών CO <sub>2</sub> από ανθρώπινη δραστηριότητα.....	15
Σχήμα 1.3: Δεδομένα επέκτασης παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ 2021 (IRENA)	16
Σχήμα 1.4: Παγκόσμια δεδομένα πωλήσεων για την τρέχουσα περίοδο .....	22
Σχήμα 1.5: Μερίδιο στην παγκόσμια αγορά από ηλεκτροκίνητα, υβριδικά και αυτοκίνητα με κινητήρες εσωτερικής καύσης για την περίοδο 2010-2030. ....	23
Σχήμα 2.1: Διάγραμμα απωλειών χωρητικότητας μπαταρίας στο χρόνο/μέρες .....	35
Σχήμα 2.2: Επίδραση της θερμοκρασίας στη χωρητικότητα της μπαταρίας συναρτήσει κύκλων φόρτισης σε περίοδο λειτουργίας .....	35
Σχήμα 2.3: Απώλεια χωρητικότητας σε βάθος κύκλων φόρτισης ανάλογα με το εύρος ποσοστού χρήσης (ΔSOC) σε δύο περιπτώσεις α) C/2 Rate (συνθήκες χαμηλού ρεύματος) και β) 2C Rate (συνθήκες υψηλού ρεύματος) Cycle life testing and modeling of graphite/LiCoO <sub>2</sub> cells under different state of charge ranges .....	39

Σχήμα 2.4: Απεικόνιση της επιρροής των διαφόρων τιμών του δείκτη Cr στη φθορά της μπαταρίας σε βάθος κύκλων φόρτισης .....	41
Σχήμα 3.1: Συνολική διαθέσιμη χωρητικότητα απαξιωμένων συσσωρευτών αναλογικά με τις πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων μέχρι το έτος 2030 .....	50
Σχήμα 3.2: Εκθετική αύξηση του μεριδίου των μπαταριών Λιθίου που προέρχονται από ηλεκτρικά οχήματα .....	51
Σχήμα 4.1: Δεδομένα εισόδου / εξόδου του προβλήματος .....	64
Σχήμα 4.2: Το πλαίσιο διαμόρφωσης του υπό εξέτασης του προβλήματος .....	65
Σχήμα 4.3: Προφίλ ηλεκτρικής κατανάλωσης .....	66
Σχήμα 4.4: Προφίλ ηλιακής ακτινοβολίας .....	66
Σχήμα 4.5: Συσχέτιση κανονικοποιημένης υποβάθμισης και εκτελούμενων κύκλων .....	67
Σχήμα 5.1: Npv 4kW – Ess 1kWh .....	70
Σχήμα 5.2: Npv 4kW – Ess 2kWh .....	70
Σχήμα 5.3: Npv 4kW – Ess 4kWh .....	70
Σχήμα 5.4: Npv 4kW – Ess 8kWh .....	70
Σχήμα 5.5: Npv 4kW – Ess 12kWh .....	70
Σχήμα 5.6: Npv 4kW – Ess 16kWh .....	70
Σχήμα 5.7: Χρόνος απόσυρσης συσσωρευτών συναρτήσει ισχύος ΦΒ για SOH 20% DOD 90% .....	71
Σχήμα 5.8: Χρόνος απόσυρσης συσσωρευτών συναρτήσει ισχύος ΦΒ για SOH 40% DOD 90% .....	73
Σχήμα 5.9: Χρόνος απόσυρσης συσσωρευτών συναρτήσει ισχύος ΦΒ για SOH 40% DOD 70% .....	73
Σχήμα 5.10: Συντελεστής Κάλυψης συναρτήσει Φ/Β ισχύος SOH 20% DOD 90% .....	74
Σχήμα 5.11: Συντελεστής Κάλυψης συναρτήσει Φ/Β ισχύος SOH 20% DOD 90% με και χωρίς γήρανση .....	74
Σχήμα 5.12: Σταθμισμένο κόστος 20ετίας συναρτήσει Έξοδα οικίας .....	76
Σχήμα 5.13: LCOE συναρτήσει ισχύος Φ/Β για τα διάφορα μεγέθη μπαταρίας (SOH20 DOD90 CESS100) .....	77
Σχήμα 5.14: LCOE συναρτήσει ισχύος Φ/Β για τα διάφορα μεγέθη μπαταρίας .....	78

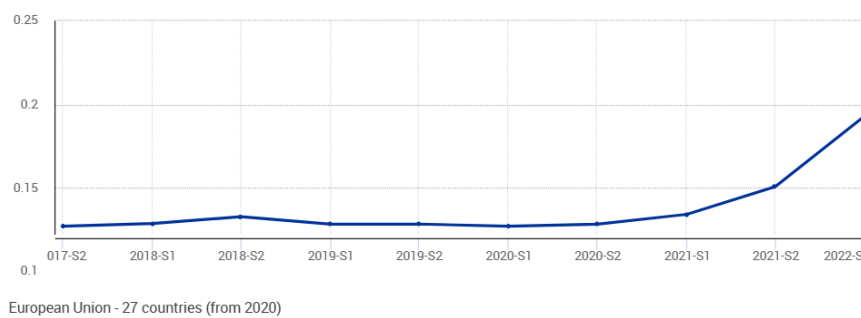
# Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

## 1.1 Ενεργειακή κρίση

Μετά τα μέσα του 2021 έως και σήμερα παρατηρείται ραγδαία αύξηση στο ενεργειακό κόστος παγκοσμίως. Ειδικότερα, οι τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος και του φυσικού αερίου παρουσίασαν νέο αρνητικό ρεκόρ, με αποτέλεσμα την αποσταθεροποίηση του τομέα της ενέργειας. Οι συνθήκες αυτές τείνουν να ορίσουν νέα δεδομένα στον κλάδο της ενέργειας και της οικονομίας καθιστώντας ασφαλές το συμπέρασμα ότι διανύουμε μια παγκόσμια ενεργειακή κρίση [1].

Η κατάσταση αυτή αφενός αποτελεί διεθνές φαινόμενο, αφετέρου η Ευρώπη πλήττεται σε μεγαλύτερο βαθμό. Ειδικότερα, σύμφωνα με επίσημα στοιχεία της Eurostat το πρώτο εξάμηνο του 2022 η μέση τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στα νοικοκυριά των Ευρωπαίων πολιτών παρουσίασε αλματώδη αύξηση σε σχέση με την αντίστοιχη του προηγούμενου έτους, μετακινούμενη από τα 0,22€/kWh στα 0,253€/kWh [2].

Η ίδια πηγή αναφέρει αντίστοιχη αύξηση και στο φυσικό αέριο, όπως αυτό είναι αναμενόμενο. Οι αναφερόμενες αυξήσεις είχαν τεράστιο αντίκτυπο στους λογαριασμούς των καταναλωτών καθώς και στα έξοδα κίνησης τους. Η Ευρώπη αντέδρασε με δραστικές μειώσεις των φόρων ηλεκτρικού ρεύματος και φυσικού αερίου [2]. Ωστόσο παρά τις προσπάθειες των διοικητικών φορέων να αντιμετωπίσουν τα δυσμενή νούμερα με τις παραπάνω φορολογικές μειώσεις η μεταβολή ήταν μη αναστρέψιμη. Στη συνέχεια παρατίθεται ένα διάγραμμα αναπαράστασης του μέσου όρου των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας στα Ευρωπαϊκά νοικοκυριά τα τελευταία χρόνια.



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα αναπαράστασης του μέσου όρου των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας στα Ευρωπαϊκά νοικοκυριά τα τελευταία χρόνια [2]

Οι λόγοι οι οποίοι κρύβονται πίσω από τις προαναφερθείσες μεταβολές στα δεδομένα της ενέργειας είναι δύο και είναι μεταξύ τους αλληλένδετοι. Ο πρώτος αφορά το διαρκώς επίκαιρο και χρόνιο ζήτημα της κλιματικής αλλαγής και της μετάβασης σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και ο δεύτερος την αποσταθεροποίηση των διακρατικών σχέσεων με παράγοντες που παίζουν βασικό ρόλο στην παραγωγή και διανομή ενέργειας.

Η σταδιακή μετάβαση στην ολοκληρωτική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ είναι κοινός στόχος παγκοσμίως. Ωστόσο, μια σειρά από προκλήσεις δεν επιτρέπουν σε μια τέτοια μεταβολή να γίνει ακαριαία. Για αυτό το λόγο έχει οριστεί ως μεταβατικό καύσιμο το φυσικό αέριο σε μια πρώτη προσπάθεια να εξαλειφθούν τα πιο βλαβερά ορυκτά καύσιμα όπως το πετρέλαιο και ο λιγνίτης [3]. Επιπλέον αποσύρονται αρκετές μονάδες πυρηνικής ενέργειας, ιδιαιτέρως παλαιού τύπου, καθώς και διενεργείται μία συνολική προσπάθεια για μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα CO<sub>2</sub>, με προοπτική, αναφορικά με τον ηλεκτρικό τομέα, της πλήρους απανθρακοποίησης έως το 2050.

Τα παραπάνω μεταβατικά μέτρα, έως την αλλαγή του μοντέλου ηλεκτροπαραγωγής, φαντάζουν ιδανικά, καθιστώντας τη μετάβαση ομαλή για το περιβάλλον και για τους καταναλωτές. Παρόλα αυτά, και στα πλαίσια της παραπάνω προσπάθειας, αυστηρές νομοθεσίες που αποσκοπούν στη μείωση των ρύπων εισέρχονται στον τομέα της βιομηχανίας επιβάλλοντας κυρώσεις και αυστηρή φορολογία σε εκείνους που δε συμμορφώνονται. Κατά αυτόν τον τρόπο, οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας αδυνατούν να συμβαδίσουν με τα όρια εκπομπών μιας και η ηλεκτροπαραγωγή είναι μια βιομηχανική διαδικασία που εκπέμπει σεβαστά ποσά ρύπων. Ως αποτέλεσμα, αυξάνεται το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας και με τη σειρά τους αυξάνονται και τα οικιακά τιμολόγια των νοικοκυριών [1].

Αντίστοιχα, το φυσικό αέριο για τους λόγους που προαναφέρθηκαν πληροί τις προϋποθέσεις ως το ιδανικό καύσιμο μετάβασης σε ΑΠΕ, σε συνδυασμό με ικανά αποθέματα ανά τον κόσμο. Παγκοσμίως, μία μεγάλης κλίμακας εξάπλωση του φυσικού αερίου βρίσκεται σε εξέλιξη. Πιο συγκεκριμένα, σχεδιάζονται ή βρίσκονται υπό κατασκευή σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύση φυσικού αερίου ισχύος 500GW ενώ παράλληλα αναπτύσσονται νέοι σταθμοί εισαγωγής υγροποιημένου φυσικού αερίου LNG [4]. Η συγκεκριμένη προοπτική συγκεντρώνει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς μια νέα γεωπολιτική τάξη έχει εγκαθιδρυθεί μετά την εισβολή της Ρωσίας στην Ουκρανία [3].

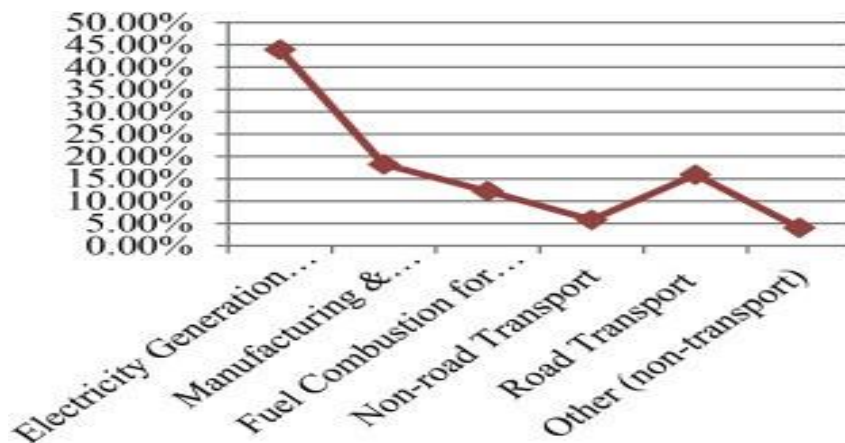
Ειδικά για την περίπτωση της Ευρώπης η οποία μέχρι και τις αρχές του 2022 εισήγαγε μέχρι και το 40% του φυσικού αερίου της από τη Ρωσία, οι ισορροπίες στον τομέα της ενέργειας

διαταράχθηκαν σε σημαντικό βαθμό [3]. Επομένως, όπως ισχύει στην περίπτωση της Ευρώπης, έτσι και μεγάλη μερίδα κρατών παγκοσμίως βασίζονται σε τρίτους για την ενεργειακή τροφοδοσία τους. Ακριβώς για αυτό το λόγο, κάποια ενδεχόμενη αποσταθεροποίηση των διακρατικών σχέσεων όπως για παράδειγμα η εμπόλεμη κατάσταση μεταξύ Ρωσίας - Ουκρανίας από τις αρχές του 2022, μπορεί να διαταράξει την ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης με τα ανάλογα αποτελέσματα.

## 1.2 Περιβαλλοντική κρίση

Όπως προαναφέρθηκε, η ενεργειακή κρίση που διανύουμε είναι μια έννοια αλληλένδετη με την αντίστοιχη περιβαλλοντική κρίση. Η κλιματική αλλαγή και η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος θεωρούνται ως η μεγαλύτερη απειλή για την ανθρώπινη επιβίωση και την κοινωνική ανάπτυξη στο πλαίσιο μιας οικονομίας χαμηλών εκπομπών άνθρακα [5]. Η ανθρώπινη δραστηριότητα προκαλεί μεταβολή του κλίματος έχοντας οδηγήσει στην πρόκληση ακραίων καιρικών φαινομένων που περιλαμβάνουν καύσωνες, πλημμύρες, ισχυρές καταιγίδες και πυρκαγιές [6]. Η ίδια πηγή αναφέρει ότι η αύξηση της συχνότητας εμφάνισης τέτοιων φαινομένων, προμηνύει χρόνιους κινδύνους όπως μακροχρόνιες ξηρασίες και εκτεταμένες πλημμύρες εξαιτίας της αύξησης της στάθμης της θάλασσας. Η κλιματική αλλαγή οφείλεται κατά κύριο λόγο στην εκτεταμένη χρήση ορυκτών καυσίμων τόσο για κάλυψη ενεργειακών αναγκών όσο και στον τομέα μεταφορών με τη χρήση κινητήρων εσωτερικής καύσης. Μεγάλο μερίδιο ευθύνης έχουν επίσης οι υψηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Σύμφωνα με τον ΟΗΕ, τα ορυκτά καύσιμα (άνθρακας, πετρέλαιο και αέριο) αντιπροσωπεύουν πάνω από το 75% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και σχεδόν το 90% όλων των εκπομπών CO<sub>2</sub> [7].

Σύμφωνα με τους Khalid et al [8] στα μέσα του 2019 οι εκπομπές CO<sub>2</sub> από τον τομέα των μεταφορών και συγκεκριμένα από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης κορυφώθηκαν σημειώνοντας αρνητικό ρεκόρ. Ειδικότερα όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα οι εν λόγω εκπομπές αγγίζουν το 16% των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα οι οποίες προέρχονται από ανθρώπινη δραστηριότητα. Κάτι τέτοιο έχει επιπτώσεις όχι μόνο για το περιβάλλον, αλλά ταυτόχρονα θέτει σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία μακροπρόθεσμα.



Σχήμα 1.2: Ταξινόμηση εκπομπών CO<sub>2</sub> από ανθρώπινη δραστηριότητα [8]

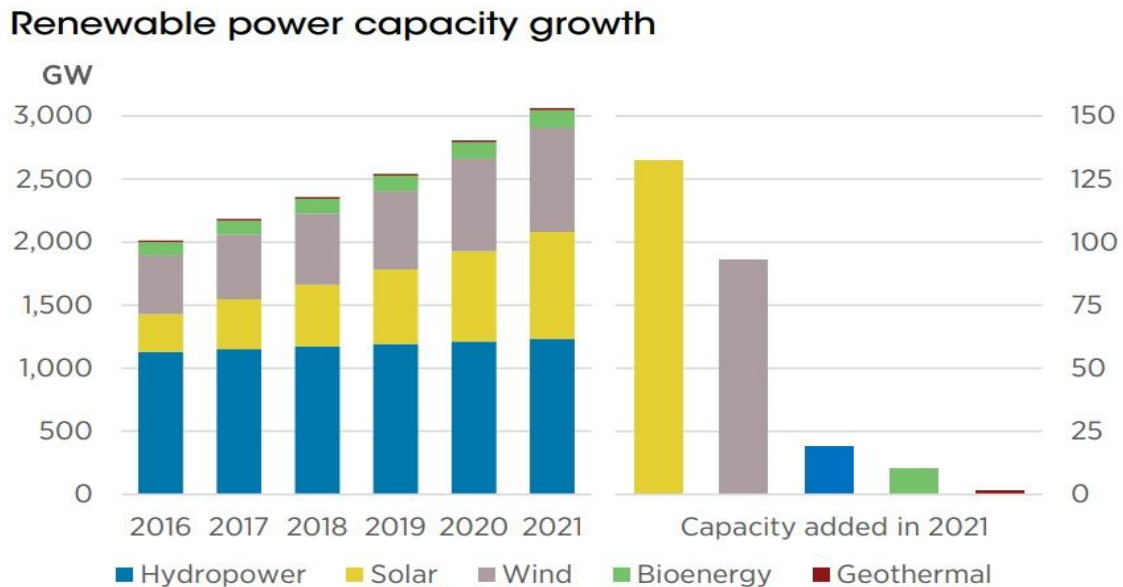
Τα παραπάνω στοιχεία σχετικά με την κλιματική αλλαγή έχουν προκαλέσει παγκόσμια ανησυχία η οποία έχει σηματοδοτήσει την αφετηρία μιας συλλογικής διεθνούς προσπάθειας αντιμετώπισης της κλιματικής κρίσης. Η συμφωνία των Παρισίων το 2015 ήταν η εκκίνηση αυτής της προσπάθειας, με 55 συνολικά κράτη να συνυπογράφουν τη συγκράτηση αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κάτω από 2 βαθμούς Κελσίου άνω των προβιομηχανικών επιπέδων [9].

Είναι κοινός ο τόπος ότι μέτρα όπως η εξοικονόμηση ενέργειας, η βελτίωση ενεργειακής απόδοσης υποδομών και οι σύγχρονες τεχνολογίες αξιοποίησης ορυκτών καυσίμων δεν αρκούν για να ανακοπεί η κλιματική αλλαγή. Η εξ ολοκλήρου μετάβαση σε ήπιες μορφές ενέργειας και η ένταξη αυτών στη βιομηχανία και στην καθημερινότητα των ανθρώπων αποτελεί τον τρόπο επίλυσης της περιβαλλοντικής κρίσης που συζητήθηκε και κατά προέκταση και της ενεργειακής κρίσης. Ωστόσο, όπως κάθε ζήτημα στον τομέα της ενέργειας, έτσι και οι ήπιες μορφές ενέργειας αντιμετωπίζουν προκλήσεις.

### 1.3 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας: Η περίπτωση των οικιακών Φωτοβολταϊκών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η μετάβαση σε Ανανεώσιμες Πηγές δημιουργεί τις προϋποθέσεις για την αντιμετώπιση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής κρίσης. Το πλήθος εφαρμογών (που βασίζονται σε) ΑΠΕ αυξάνεται ενώ παράλληλα το κόστος πέφτει σταδιακά με το πέρασμα των ετών κάνοντας αντίστοιχες επενδύσεις ελκυστικές ακόμα και σε μικρής κλίμακας οικιακές εφαρμογές. Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στατιστικά από τον Διεθνή Οργανισμό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA), στο τέλος του 2021, η συνολική

παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ ανήλθε στα 3.064 GW [10]. Όπως απεικονίζεται στο παρακάτω γράφημα της ίδιας πηγής, σε όρους επέκτασης η ηλιακή ενέργεια προηγείται, προσθέτοντας 133 GW στο διαθέσιμο δυναμικό της πράσινης ενέργειας το έτος 2021.



Σχήμα 1.2: Δεδομένα επέκτασης παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ 2021 (IRENA) [10]

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών ΑΠΕ, τα φωτοβολταϊκά είναι εκείνα τα οποία κερδίζουν έδαφος με μεγαλύτερο ρυθμό έναντι των υπολοίπων. Η ευκολία στην εγκατάσταση, η αξιοπιστία και η τεχνογνωσία είναι κάποια από τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν την τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Επιπλέον, οι μικρής κλίμακας εφαρμογές της εν λόγω τεχνολογίας ευνοούνται περισσότερο έναντι των υπολοίπων τεχνολογιών ΑΠΕ αντίστοιχης κλίμακας. Για παράδειγμα είναι πολύ πιο εύκολη η εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού πάνελ σε μία ταράτσα παρά μιας μικρής ανεμογεννήτριας. Ακόμα και σε μεγάλες εφαρμογές εκτός αστικού ιστού, τα φωτοβολταϊκά πάρκα προτιμώνται λόγω ικανοποιητικής απόδοσης και περιορισμένων επιπτώσεων στο περιβάλλον [11]. Οι Gerbaat et al [12] αιτιολογούν την κλίση των επενδύτων σε οικιακές φωτοβολταϊκές μονάδες αντί μεγάλης κλίμακας Φ/Β πάρκα τα οποία αξιοποιούνται από ιδιώτες ηλεκτροπαραγωγούς. Ο λόγος είναι ότι οι πρώτοι αποσβαίνουν το κόστος της αρχικής επένδυσης τους με βάση τις τιμές λιανικής του ρεύματος οι οποίες περιλαμβάνουν φόρους και κόστος μεταφοράς και διανομής. Από την άλλη, οι δεύτεροι ανταγωνίζονται τις τιμές χονδρικής στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής από ορυκτά καύσιμα και φυσικό αέριο, οι οποίες είναι σαφώς χαμηλότερες. Πέραν αυτού, υπάρχει κοινή γραμμή γύρω από το κομμάτι των κινήτρων που δίνονται από τα κράτη ενθαρρύνοντας επιπλέον τέτοιου είδους επενδύσεις. Δεν είναι λίγα τα



προγράμματα που προβλέπουν επιδοτήσεις μειώνοντας την αρχική επένδυση ακόμα και πάνω από το ήμισυ [13]. Έπειτα από τις τελευταίες διεθνείς εξελίξεις, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εισήγαγε ένα νέο πρόγραμμα με την ονομασία REPowerEU το οποίο προωθεί ακόμη περισσότερο τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα το εν λόγω πρόγραμμα στοχεύει στην εξάπλωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων έτσι ώστε να μειωθεί ο βαθμός εξάρτησης των Ευρωπαϊκών κρατών από τα εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα [14].

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή διαπιστώνει ότι αρκετά κράτη μέλη της, ευνοούνται από ισχυρό ηλιακό δυναμικό και παρόλα αυτά δεν το εκμεταλλεύονται επαρκώς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Ελλάδα η οποία απολαμβάνει ηλιακό δυναμικό υψηλής ποιότητας. Το σχέδιο REPowerEU έρχεται ως απάντηση στη διαταραχή της παγκόσμιας αγοράς ενέργειας το περασμένο έτος 2022 όπου οι τιμές του φυσικού αερίου και της ηλεκτρικής ενέργειας των νοικοκυριών αυξήθηκαν ακαριαία. Αρχικός στόχος είναι η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής η οποία βαίνει αύξουσα και τα αποτελέσματα της είναι ορατά μέσα από τα ακραία καιρικά φαινόμενα. Στη συνέχεια η απεξάρτηση από τα εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα τα οποία στοιχίζουν στους Ευρωπαίους φορολογούμενους ετησίως 80 δισεκατομμύρια για φυσικό αέριο, 12 δισεκατομμύρια για εισαγωγές πετρελαίου και 1,7 δις για εισαγωγές γαιάνθρακα. Οι πρωτοβουλίες αφορούν μεταξύ άλλων το διπλασιασμό της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών συστημάτων έως το 2025 και την εγκατάσταση 600 GW έως το 2030. Επίσης προτείνεται η σύσταση επιτροπής για την εξομάλυνση των διαδικασιών αδειοδότησης έργων ΑΠΕ και την αντιμετώπιση της γραφειοκρατίας. Χαρακτηριστικό είναι το επίκαιρο παράδειγμα της Ελλάδας η οποία αξιοποιεί κρατικά κονδύλια και το Ταμείο Ανάκαμψης και εισάγει το νέο πρόγραμμα “Φωτοβολταϊκά στη στέγη” με εκκίνηση το Μάρτιο του 2023.

Σύμφωνα με αυτό χρηματοδοτείται έως και το 60% της αρχικής επένδυσης για οικιακό φωτοβολταϊκό σύστημα με μέγιστη ισχύ  $10kW_p$  σε 300.000 νοικοκυριά [15].

### **1.3.1 Οικιακές εφαρμογές & αυτοπαραγωγή**

Οι πιο πρόσφατες τάσεις στον τομέα των φωτοβολταϊκών, προάγουν την ανάπτυξη οικιακών μονάδων καθιστώντας εφικτό για τους καταναλωτές να είναι ταυτόχρονα παραγωγοί ηλεκτρικού ρεύματος. Σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA), ήδη 25 εκατομμύρια νοικοκυριά αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, με στόχο αυτός ο αριθμός να φτάσει τα 100 εκατομμύρια μέχρι το 2030. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι προκειμένου να επιτευχθεί το σενάριο μηδενικών εκπομπών από τα κτήρια έως το 2050 πρέπει η ετήσια εγκατεστημένη ισχύς να αυξάνεται κατά 190GW ετησίως [16].

Η ανάπτυξη των οικιακών φωτοβολταϊκών οδήγησε στη νομοθετική πλαισίωση αναφορικά με την αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Δύο γενικές κατηγορίες προγραμμάτων συνεργασίας με το δίκτυο έχουν επικρατήσει: α) Το feed in tariff και β) το net metering. Και τα δύο προγράμματα προϋποθέτουν τη διασύνδεση με το δίκτυο μιας και λόγω της στοχαστικότητας που παρουσιάζουν οι ΑΠΕ και εξαιτίας νομικών προκλήσεων ένα αυτόνομο σύστημα αντιμετωπίζει αρκετές λειτουργικές προκλήσεις.

#### ✓ *Net metering*

Η υπηρεσία net metering αποτελεί ουσιαστικά έναν ενεργειακό συμψηφισμό μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενέργειας από την οικία με τον καταναλωτή να χρεώνεται την καθαρά καταναλισκόμενη ενέργεια. Η συναλλαγή μεταξύ του παρόχου και του καταναλωτή πραγματοποιείται μέσω της ηλεκτρικής ενέργειας και όχι χρηματικά. Ο τελευταίος καλείται να εξοφλήσει στο τέλος της περιόδου χρέωσης το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτει από τη διαφορά /παραγόμενης -καταναλισκόμενης/. Επομένως, ο στόχος του προγράμματος net metering είναι να απαλλαγεί ο καταναλωτής από τα έξοδα του ηλεκτρικού ρεύματος. Εφόσον η συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια για προκαθορισμένη χρονική διάρκεια υπερβαίνει την αντίστοιχη καταναλισκόμενη τότε η διαφορά είτε παραχωρείται στο δίκτυο ή καλύπτεται με κάποια χρηματική επιβράβευση ανάλογα με την αρχική συμφωνία που έχει γίνει με τον πάροχο [17].

#### ✓ *Feed in tariff*

Στην περίπτωση του feed in tariff η συναλλαγή πραγματοποιείται χρηματικά, σε αντίθεση με την πολιτική του net metering. Σε αυτήν την περίπτωση, ο καταναλωτής δεν συμψηφίζει παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια μεταξύ τους αλλά πουλάει απευθείας την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στον πάροχο. Η σταθερή εγγυημένη τιμή πώλησης όπως και η διάρκεια του συμβολαίου προκαθορίζεται στην αρχική συμφωνία με τον πάροχο [17], λαμβάνοντας σε κάθε περίπτωση υπόψη πως το συγκεκριμένο σχήμα, πέραν του ότι σταδιακά εκκλίπει, αναφέρεται σε εγκαταστάσεις μεγαλύτερης κλίμακας, εμπορικού χαρακτήρα.

### **1.3.2 Προκλήσεις ενσωμάτωσης Φ/Β συστημάτων στο δίκτυο**

Όπως προαναφέρθηκε, η ενσωμάτωση των διεσπαρμένων Φ/Β συστημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο δεν είναι απαλλαγμένη προκλήσεων, με τις τελευταίες να καταγράφονται στα ακόλουθα:

### ➤ *Στοχαστικότητα*

Η στοχαστικότητα των ΑΠΕ αποτελεί μείζον ζήτημα για τον ενεργειακό σχεδιασμό στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής. Ο παράγοντας της στοχαστικότητας αφορά την αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης παραγωγής ενέργειας από φυσικές πηγές οι οποίες συνδέονται άρρηκτα με καιρικά και κλιματικά φαινόμενα. Με άλλα λόγια, δε μπορεί να υπάρξει μακροπρόθεσμη έγκυρη πρόβλεψη στο δυναμικό του ήλιου, του αέρα και των κυμάτων. Ως αποτέλεσμα της μεταβλητής παραγωγής, η τελευταία δεν παρουσιάζει απόλυτη συμφωνία με τη ζήτηση γεγονός που οδηγεί σε αστάθεια του ενεργειακού ισοζυγίου. Εάν αυτό το έλλειμμα δε μπορέσει να καλυφθεί, ενδεχομένως σε ώρες αιχμής, τότε υφίσταται κίνδυνος αστοχίας του δικτύου, καταλήγοντας σε black out, ή οδηγώντας στην ενεργοποίηση εφεδρικών, συμβατικών μονάδων, όπως για παράδειγμα μια ηλεκτρογεννήτρια diesel. Καταφεύγοντας σε έκτακτες λύσεις εκτός του αρχικού ενεργειακού σχεδιασμού, αυξάνεται το λειτουργικό κόστος της μονάδας και επιβραδύνεται η περίοδος απόσβεσης της αρχικής επένδυσης, ενώ παράλληλα αυξάνεται και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Αξιοποιώντας μεθόδους αποθήκευσης ενέργειας, αποφεύγονται τα προβλήματα που προαναφέρθηκαν. Αν και το αρχικό επενδυτικό κόστος της εγκατάστασης αυξάνει σημαντικά, προσδίδεται επίσης αυτονομία και ενεργειακή ασφάλεια στο σύστημα, σε συνδυασμό με αυξημένη ευελιξία δεδομένης της δυνατότητας για διασυνδεδεμένη και μη λειτουργία ως προς το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο [18].

### ➤ *Υπερφόρτωση του δικτύου*

Αξιοποιώντας την άφθονη ηλιακή ενέργεια και με τη χρήση απλού τεχνολογικού εξοπλισμού και τεχνογνωσίας, ο κάθε καταναλωτής ηλεκτρικού ρεύματος δύναται να γίνει και παραγωγός συμβάλλοντας στη σταθεροποίηση του δικτύου και τη μείωση χρήσης συμβατικών καυσίμων. Ωστόσο όταν η παραγωγή ενέργειας πραγματοποιείται μαζικά και σε μεγάλη κλίμακα τότε δημιουργούνται διάφορα προβλήματα. Οι Nwaigwe et al [19] επεξηγούν την αδυναμία του δικτύου να υποστηρίξει μια ενδεχόμενη μαζική εξάπλωση των Φ/Β συστημάτων στον οικιακό τομέα. Αρχικά, ανεξάρτητα από το ηλιακό δυναμικό το οποίο διαφέρει ανά περιοχή, υπάρχει ένα κοινό χαρακτηριστικό στο προφίλ παραγωγής. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται την ίδια ακριβώς ώρα μέσα στην ημέρα, όπου τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα εκτίθενται στην ηλιακή ακτινοβολία. Εφόσον εκείνα είναι συνδεδεμένα απευθείας στο κεντρικό δίκτυο, μεγάλα ποσά ενέργειας θα εισχωρήσουν σε εκείνο ταυτόχρονα. Όμως ο σχεδιασμός και η εγκατάσταση της πλειοψηφίας των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και των δικτύων διανομής ηλεκτρικού ρεύματος έχουν πραγματοποιηθεί δεκάδες χρόνια πριν.

Η κατασκευή του υπάρχοντος δικτύου και των υποδικτύων τόσο στην Ελλάδα όσο και παγκοσμίως, προϋποθέτει μονοδιάστατη ροή του ρεύματος με συγκεκριμένη κατεύθυνση από τον κεντρικό σταθμό παραγωγής προς τον υποσταθμό και τέλος στον καταναλωτή. Η εισχώρηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων τα οποία είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο, συνεπάγεται αμφίδρομη ροή της ηλεκτρικής ενέργειας από και προς εκείνο. Ωστόσο, τα περισσότερα δίκτυα διανομής ηλεκτρικού ρεύματος δεν έχουν σχεδιαστεί με την προοπτική αμφίδρομης ροής της ενέργειας.

Ως αποτέλεσμα, ακόμα και μικρά ποσά ηλεκτροπαραγωγής από μονάδα φωτοβολταϊκού συστήματος μπορεί να επηρεάσει διάφορες παραμέτρους του δικτύου εφόσον η παραγωγή δε βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία με τη ζήτηση. Με άλλα λόγια, όταν η οικιακή παραγωγή υπερβεί την τοπική ενεργειακή ζήτηση, ακανόνιστα ποσά ενέργειας θα διαρρεύσουν μέσω του τροφοδότη διανομής και ενδεχομένως του υποσταθμού αυξάνοντας την πιθανότητα πρόκλησης βλάβης στο δίκτυο η οποία θα επηρεάσει και τους υπόλοιπους καταναλωτές οι οποίοι τροφοδοτούνται από το ίδιο δίκτυο.

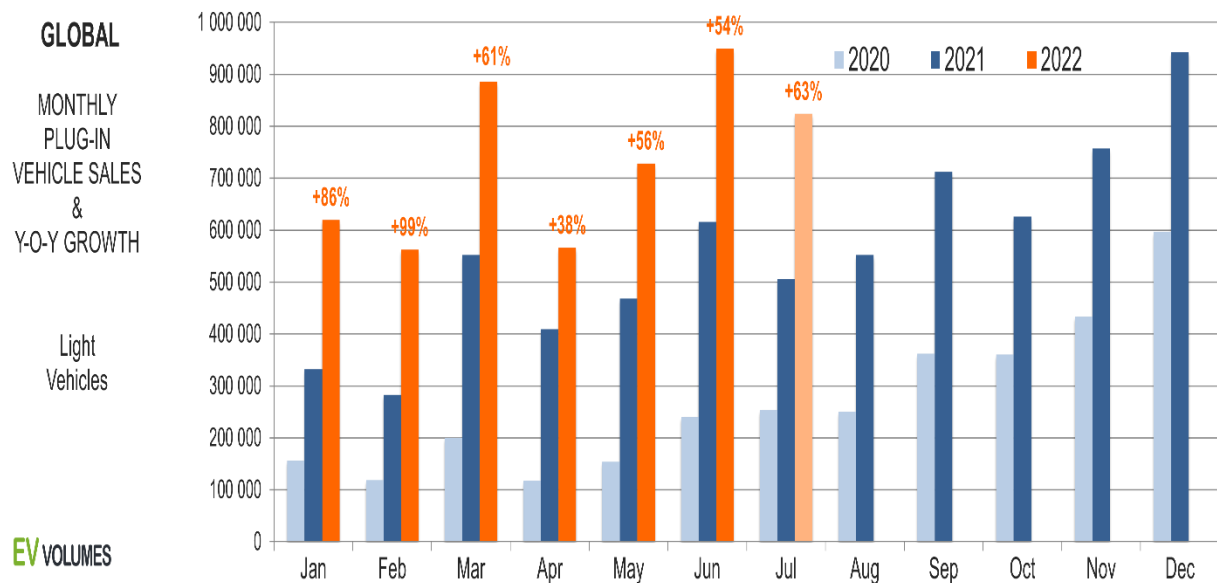
Τα προβλήματα που μπορεί να προκληθούν από ασυμφωνία παραγωγής και ζήτησης μπορεί να είναι αστάθεια τάσης, συχνότητας και γενική υπονόμηση της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας [20].

Μία πιθανή λύση στην ασυμφωνία παραγωγής και ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η αποθήκευση της σε συσσωρευτές. Με αυτόν τον τρόπο προωθούνται αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία όχι μόνο δεν επιβαρύνουν το δίκτυο με τις οικιακές καταναλώσεις, αλλά μπορούν να επιστρέψουν περίσσεια ενέργειας πίσω σε εκείνο όταν υπάρξει έλλειμμα και μάλιστα με εγγυημένους όρους [21]. Ωστόσο, στο πλαίσιο των οικιακών εφαρμογών, η οικονομική παράμετρος παίζει το βασικότερο ρόλο κατά τη διαστασιολόγηση μιας μονάδας φωτοβολταϊκών. Η ένταξη μπαταριών στο σύστημα αφενός εκτοξεύει την αρχική επένδυση σε πολύ υψηλά επίπεδα, αφετέρου υπό την προϋπόθεση σωστής επιλογής και διαστασιολόγησης τους, αυξάνεται το προσδόκιμο ζωής και μειώνεται το κόστος της παραγόμενης ενέργειας. Παράλληλα αυξάνεται σημαντικά η ενεργειακή ασφάλεια και αυτονομία του τοπικού ενεργειακού συστήματος [22,23]. Επομένως, το υψηλό κόστος της αποθήκευσης ενέργειας είναι ίσως το μόνο "αγκάθι" γύρω από την τεχνολογία των οικιακών φωτοβολταϊκών σήμερα.

## 1.4 Ηλεκτροκίνηση

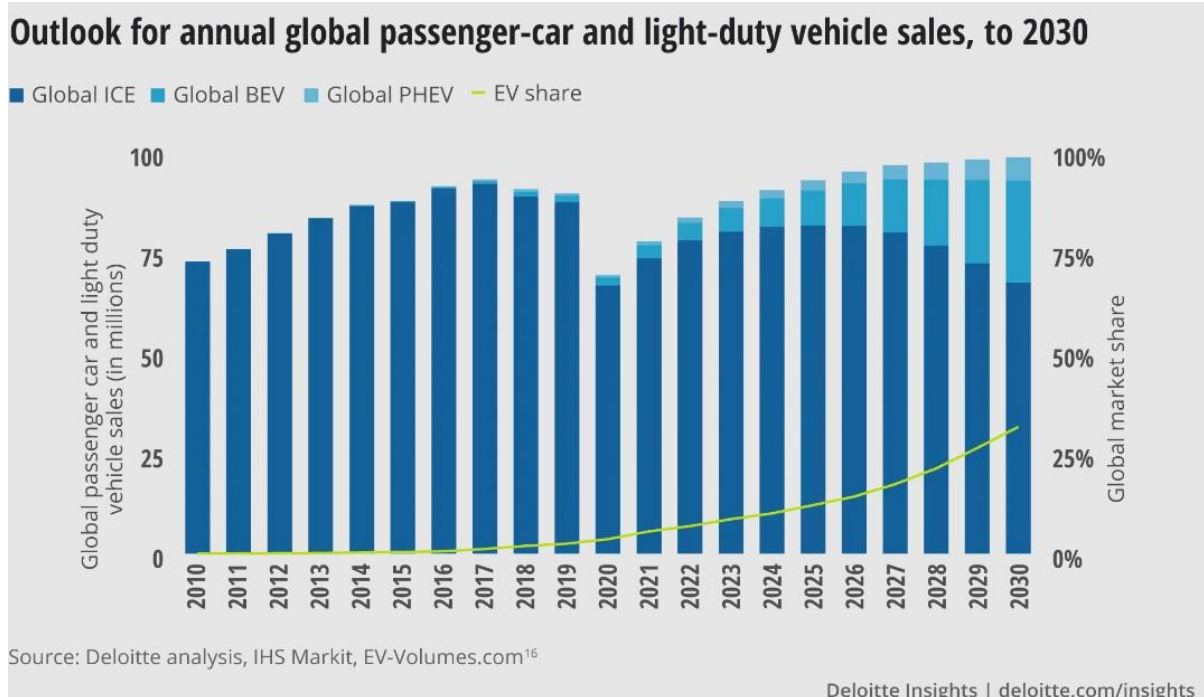
Κατά τις τελευταίες δεκαετίες πραγματοποιείται σημαντική προσπάθεια σε παγκόσμια κλίμακα για την μετάβαση σε μια οικονομία που βασίζεται στην κατανάλωση λιγότερων ορυκτών πόρων. Τα ηλεκτρικά οχήματα και ειδικά τα αυτοκίνητα συμβάλουν ενεργά σε αυτήν την προσπάθεια, σημειώνοντας ραγδαία ανάπτυξη την προηγούμενη δεκαετία. Χαρακτηριστικό δείγμα της ανάπτυξης αυτής αποτελούν οι πωλήσεις των ηλεκτροκίνητων, οι οποίες σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA), το 2012 ανήλθαν στις 120.000 ενώ το 2021 ο αριθμός αυτός αντιστοιχούσε στις πωλήσεις της κάθε βδομάδας του έτους, σημειώνοντας συνολικά 6,6 εκατομμύρια πωλήσεις [24]. Ο ίδιος οργανισμός αναφέρει ότι στο τέλος του 2021 κυκλοφορούσαν στους δρόμους 16,5 εκατομμύρια ηλεκτρικά οχήματα και μόνο το πρώτο τετράμηνο του τρέχοντος έτους πουλήθηκαν 2 εκατομμύρια οχήματα. Αυτό συνεπάγεται αύξηση κατά 75% σε σύγκριση με τις αντίστοιχες περσινές πωλήσεις την ίδια περίοδο.

Αναφορικά με τα πιο πρόσφατα δεδομένα και στατιστικά στον τομέα της ηλεκτροκίνησης, για το έτος 2022 παρόλο που δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμα η επίσημη έκθεση από το Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA), αναμένεται να καταγραφούν 10,6 εκατομμύρια πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων [25]. Το σύνολο αυτό επιμερίζεται σε 8 εκατομμύρια αμιγώς ηλεκτρικά και 2,6 εκατομμύρια υβριδικά οχήματα. Η ίδια πηγή αναφέρει ότι στο τέλος του 2022 υπολογίζεται ότι περίπου 27 εκατομμύρια ηλεκτροκίνητα οχήματα κυκλοφορούν στους δρόμους παγκοσμίως. Τα πιο πρόσφατα δεδομένα πωλήσεων στον τομέα της ηλεκτροκίνησης για τα έτη 2020,2021,2022 παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 3: Παγκόσμια δεδομένα πωλήσεων για την τρέχουσα περίοδο [25]

Η αυξητική τάση της ηλεκτροκίνησης αποτελεί ένα από τα μέτρα για τη μετάβαση σε πράσινη ενέργεια και ηλεκτροπαραγωγή αποκλειστικά από ΑΠΕ. Αποτελεί επίσης και έναν τρόπο αντιμετώπισης της ρύπανσης του περιβάλλοντος και συμβάλει στους στόχους που έχουν τεθεί για τη μείωση των εκπομπών ρύπων. Είναι γεγονός ότι ο τομέας των μεταφορών είναι από τους πλέον επιβαρυντικούς και η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει στόχο τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα CO<sub>2</sub> κατά 37,5% μέχρι το 2030 [26]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Μεγάλη Βρετανία η οποία με επίσημη απόφαση από τους αρμόδιους φορείς ανακοίνωσε πρόσφατα την οριστική διακοπή πωλήσεων βενζινοκίνητων και πετρελαιοκίνητων αυτοκινήτων και φορτηγών από το 2030 και μετά [27]. Σε συνέχεια αυτού, το κράτος προσφέρει ισχυρά οικονομικά κίνητρα ώστε να παροτρύνει τους υποψήφιους αγοραστές να στραφούν στην ηλεκτροκίνηση. Αντίστοιχη εκτίμηση για τις πωλήσεις αμιγώς ηλεκτρικών και υβριδικών αυτοκινήτων έως το 2030 έκαναν οι Woodward et al [28] με τα αποτελέσματα να φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 1.4: Μερίδιο στην παγκόσμια αγορά από ηλεκτροκίνητα, υβριδικά και αυτοκίνητα με κινητήρες εσωτερικής καύσης για την περίοδο 2010-2030 [28].

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η διαρκής ανάπτυξη της τεχνολογίας της ηλεκτροκίνησης με εξαιρετικά αυξητικές τάσεις στο άμεσο μέλλον. Αντιθέτως οι παραδοσιακοί κινητήρες εσωτερικής καύσης παρουσιάζουν καμπή στις παγκόσμιες πωλήσεις τους, με εκτίμηση πως αυτή η πτώση θα συνεχιστεί και στο μέλλον. Επιπλέον, παρατηρείται η επιρροή της πανδημίας COVID 19 στις παγκόσμιες πωλήσεις, καθώς το 2020 ήταν σημαντικά μειωμένες για το συνολικό αριθμό αυτοκινήτων σε σύγκριση με τα υπόλοιπα έτη.

Ωστόσο, τα ηλεκτροκίνητα, ακόμα και υπό αυτές τις συνθήκες, σημείωσαν αύξηση σε σχέση με το 2019, γεγονός που υποδηλώνει τις αυξητικές τάσεις που έχουν στην αγορά ακόμα και υπό αντίξοες συνθήκες. Όσον αφορά το ακόμα πιο μακρινό μέλλον, οι Karustin & Grushevenko [29] προβλέπουν ότι το έτος 2040 τα ηλεκτρικά οχήματα θα αναλογούν στο 11-28% του παγκόσμιου στόλου οχημάτων στον τομέα των μεταφορών. Επιπλέον, η στροφή προς την ηλεκτροκίνηση ενθαρρύνεται και από τους αρμόδιους φορείς με τη στήριξη νομοθετικών πλαισίων, επιδοτήσεων και οικονομικών κινήτρων σε επίπεδο βιομηχανιών και καταναλωτών [30]. Η προσπάθεια να αυξηθεί ο αντίκτυπος της ηλεκτροκίνησης ποικίλλει μεταξύ των χωρών τόσο όσον αφορά την ένταση, όσο και τους τύπους των κινήτρων που δίδονται στους χρήστες. Τέτοια κίνητρα μπορεί να είναι επιχορηγήσεις αγοράς, απαλλαγή από έξοδα και φόρους

ταξινόμησης, έκπτωση φόρων ιδιοκτησίας, φορολογικά πλεονεκτήματα για εταιρίες (όπου οι δαπάνες αφαιρούνται από το εισόδημα), απαλλαγή ΦΠΑ, φορολογικές απαλλαγές ή πιστώσεις για τις υποδομές εγκαταστάσεων φόρτισης σε κατοικίες, εταιρίες ή δημόσιους φορείς [31].

Παρά την αισιοδοξία στις μελλοντικές προβλέψεις σχετικά με την ηλεκτροκίνηση, υπάρχει ένα αγκάθι το οποίο στέκεται εμπόδιο στην καθολική ανάπτυξη της τεχνολογίας και επηρεάζει την κοινή γνώμη. Η πηγή ενέργειας τους που δεν είναι άλλη από τη μπαταρία τους έχει συγκεκριμένη διάρκεια ζωής. Εκείνη αν και επηρεάζεται από ένα πλήθος παραγόντων, συνήθως δεν ξεπερνά τα 5-10 χρόνια ή 120.000-240.000χιλιόμετρα [32]. Ο προβληματισμός γεννάται λόγω του κόστους αντικατάστασης το οποίο είναι αρκετά υψηλό, αλλά και λόγω της μετέπειτα διαχείρισης της απαξιωμένης μπαταρίας. Όπως θα αναλυθεί σε βάθος στη συνέχεια αυτής της διπλωματικής εργασίας, οι συσσωρευτές των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελούνται από πολύτιμα μέταλλα και άλλα συστατικά με αποτέλεσμα αφενός το αυξημένο κόστος τους, και αφετέρου τις προκλήσεις γύρω από τη διαθεσιμότητα και την εξόρυξη τους. Επιπλέον θα εξεταστούν οι προοπτικές ανακύκλωσης και οι τεχνοοικονομικές δυσκολίες πίσω από τη διαδικασία αυτή.

## **1.5 Κοινός παρονομαστής - Διπλή λύση στο πρόβλημα Φ/Β και Ηλεκτροκίνησης**

Στην εισαγωγή παρουσιάζονται δύο σύγχρονες τεχνολογικές λύσεις οι οποίες αποτελούν τρόπο αντιμετώπισης της ενεργειακής και περιβαλλοντικής κρίσης. Οι ΑΠΕ γενικότερα και ειδικά τα οικιακά Φ/Β όπως και η ηλεκτροκίνηση, προσφέρουν μια πράσινη λύση στο περιβάλλον και συμβάλλουν στην απαλλαγή από τα ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο, και οι δύο τεχνολογίες παρουσιάζουν από μία πρόκληση η καθεμία. Τα Φ/Β χρήζουν αποθήκευσης ενέργειας για μεγαλύτερη απόδοση, καλύτερη υποστήριξη του δικτύου και αποφυγή τεχνικών προβλημάτων λόγω ασυμφωνίας μεταξύ παραγωγής και ζήτησης. Την ίδια στιγμή, στην ηλεκτροκίνηση υπάρχει η πρόκληση σχετικά με τη διαχείριση του αναμενόμενου μεγάλου όγκου απαξιωμένων μπαταριών που θα προκύπτουν ως αναλώσιμα ανταλλακτικά. Όπως γίνεται αντιληπτό, υπάρχει ένα κοινό χαρακτηριστικό γύρω από τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι δύο τεχνολογίες και δεν είναι άλλο από την αποθήκευση ενέργειας. Ως εκ τούτου αυτή η διπλωματική εργασία παρουσιάζει την επαναχρησιμοποίηση συσσωρευτών ιόντων Λιθίου ηλεκτρικών οχημάτων ως διπλή λύση στα παραπάνω ζητήματα.



## **1.6 Διάρθρωση κεφαλαίων**

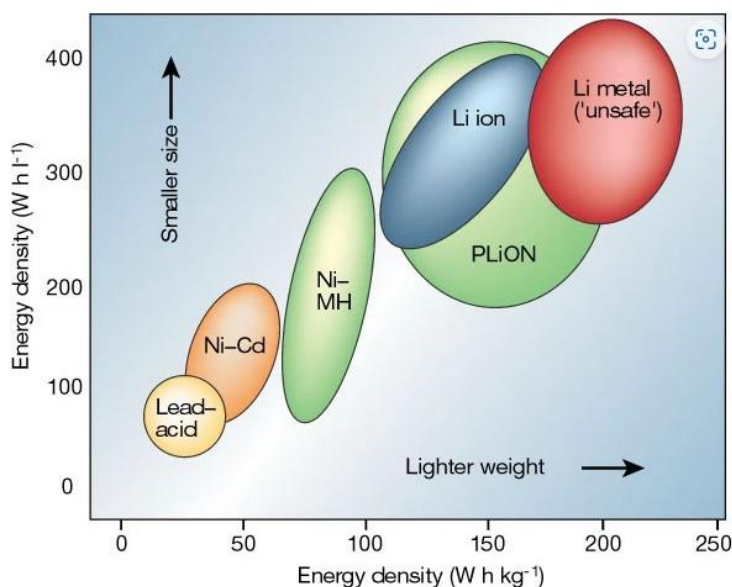
Ολοκληρώνοντας το πρώτο εισαγωγικό κεφάλαιο, ακολουθεί η διάρθρωση των επόμενων κεφαλαίων της διπλωματικής εργασίας. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναλυτική παρουσίαση των τεχνολογιών συσσωρευτών και αναλύονται οι μηχανισμοί γήρανσής τους. Στο κεφάλαιο 3 αναφέρονται οι επιλογές διαχείρισης των απαξιωμένων μπαταριών μετά την πρωτογενή τους χρήση στο όχημα. Τέλος παρουσιάζεται η τεχνολογία της επαναχρησιμοποίησης, μαζί με παραδείγματα υφιστάμενων εφαρμογών. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται μία περίπτωση μελέτης οικιακής εφαρμογής με φωτοβολταϊκό σύστημα σε συνδυασμό με αποθήκευση ενέργειας σε απαξιωμένους συσσωρευτές ηλεκτρικού οχήματος. Γίνεται χρήση ημιεμπειρικού μοντέλου με πειραματικά δεδομένα από υφιστάμενη μεταχειρισμένη μπαταρία ηλεκτρικού αυτοκινήτου και μελετάται τεχνοοικονομικά το πως θα ανταπεξέλθει στην υποστήριξη του συστήματος. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της περίπτωσης μελέτης. Τέλος το κεφάλαιο 6 συνοψίζει τα συμπεράσματα.

# Κεφάλαιο 2 Αρχή λειτουργίας συσσωρευτών και περιγραφή μηχανισμών γήρανσης

## 2.1 Συσσωρευτές ιόντων λιθίου

Τη δεδομένη περίοδο οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελούν ίσως την πιο διαδεδομένη τεχνολογία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για μικρής-μεσαίας κλίμακας εφαρμογές. Ειδικότερα, απαντώνται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών από μικρές ηλεκτρικές συσκευές που συναντάμε στην καθημερινότητα μας όπως το κινητό τηλέφωνο, φορητός Υ/Η κ.α. μέχρι και σε μεγάλης κλίμακας σταθμούς αποθήκευσης ενέργειας.

Η υπεροχή της εν λόγω τεχνολογίας μπαταριών εκφράζεται μέσα από το παρακάτω γράφημα όπου συγκρίνονται τα διάφορα είδη μπαταριών ως προς την ενεργειακή τους πυκνότητα κατά βάρος και κατά όγκο αντίστοιχα.



Εικόνα 1: Γραφική σύγκριση χαρακτηριστικών διαφόρων τύπων μπαταριών [33].

Στο σύνολο των διαφορετικών εφαρμογών που εξυπηρετούν οι συσσωρευτές λιθίου εντάσσεται και ο τομέας της ηλεκτροκίνησης, εκεί όπου η μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος παίζει το βασικότερο ρόλο αφού αποτελεί την πηγή ενέργειας για την κίνησή του. Κάτι το οποίο αποτυπώνεται και μέσω του επιμερισμού του σχετικού κόστους, μιας και ο συσσωρευτής αποτελεί το εξάρτημα εκείνο με το υψηλότερο κόστος έναντι όλων των υπολοίπων στο όχημα [34].

Το κεφάλαιο αυτό έχει σκοπό να αναδείξει την αρχή λειτουργίας των συσσωρευτών ιόντων λιθίου και τις βασικές ιδιότητές τους. Αναφέρονται τα διαφορετικά είδη αυτών των μπαταριών που χρησιμοποιούνται στον τομέα της ηλεκτροκίνησης καθώς και οι ιδιότητες τους οι οποίες καθιστούν αυτόν τον τύπο μπαταρίας τη βέλτιστη λύση σε αυτόν τον τομέα. Στη συνέχεια αναλύονται οι μηχανισμοί γήρανσης που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό της μπαταρίας σε επίπεδο μικροδομής. Τέλος υπογραμμίζονται οι κυριότερες συνθήκες γήρανσης της μπαταρίας και πως μπορούν να αποφευχθούν ώστε να επιτευχθεί μέγιστη διάρκεια ζωής του συσσωρευτή.

## **2.2 Υποκατηγορίες μπαταριών λιθίου - Εφαρμογές σε οχήματα.**

Ο συσσωρευτής ιόντων λιθίου χρησιμοποιείται σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με αποτέλεσμα οι χρήστες ηλεκτρικών συσκευών να έχουν οικειότητα με τον απλουστευμένο όρο "μπαταρία λιθίου". Για αυτό το λόγο ενδεχομένως υπάρχει η λανθασμένη εντύπωση ότι όλοι οι τύποι μπαταριών λιθίου, πέρα από το μέγεθος και τη χωρητικότητά τους, είναι κατά τα άλλα πανομοιότυπες. Κάτι τέτοιο φυσικά δεν ισχύει καθώς υπάρχουν πολλά είδη προσμίξεων με το στοιχείο του λιθίου που οδηγούν σε πολλά διαφορετικά είδη συσσωρευτών με διαφορετικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά.

Κοινώς, η διαφορά ανάμεσα σε μια μπαταρία κινητού τηλεφώνου και ενός αυτοκινήτου δεν είναι μόνο το μέγεθος, καθότι πρόκειται για δύο εντελώς διαφορετικές μπαταρίες αν και αμφότερες έχουν ως βάση το λίθιο. Κατά τον ίδιο τρόπο υπάρχει διάκριση και στους συσσωρευτές ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Παρακάτω αναφέρονται παραδείγματα τεχνολογιών μπαταριών λιθίου που κυκλοφορούν στην αγορά και υποστηρίζουν ηλεκτρικά οχήματα όπως αναλύονται στο άρθρο των Rallo et al [35].

- **Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (Li(NixMnyCo1-x-y)O2)- LNMC**

Οι περισσότεροι κατασκευαστές όπως Volkswagen, Smart, Nissan, BMW, Chevy, χρησιμοποιούν μπαταρίες λιθίου με προσμίξεις Νικελίου, Μαγγανίου και οξείδια Κοβαλτίου. Ως αποτέλεσμα έχουν εξαιρετικές θερμικές ιδιότητες.

- **Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide (Li(NixCoyAl1-x-y)O2) –LNCAO**

Η εταιρία Tesla είναι εκείνη η οποία προτιμά πρόσμιξη Νικελίου Κοβαλτίου και οξειδίων Αλουμινίου για τα εμπορικά μοντέλα της.

- **Lithium Cobalt Oxide (LiCoO2- LCO) Batteries**

Ο συγκεκριμένος τύπος μπαταρίας χρησιμοποιείται από την Tesla αποκλειστικά και μόνο για το μοντέλο Tesla Roadster και πρόκειται για μια ισχυρότερη μπαταρία με μεγάλη αντοχή στο χρόνο και μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από την προηγούμενη που χρησιμοποιεί στα υπόλοιπα μοντέλα της.

- **Lithium Manganese Oxide (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>- LMO) batteries**

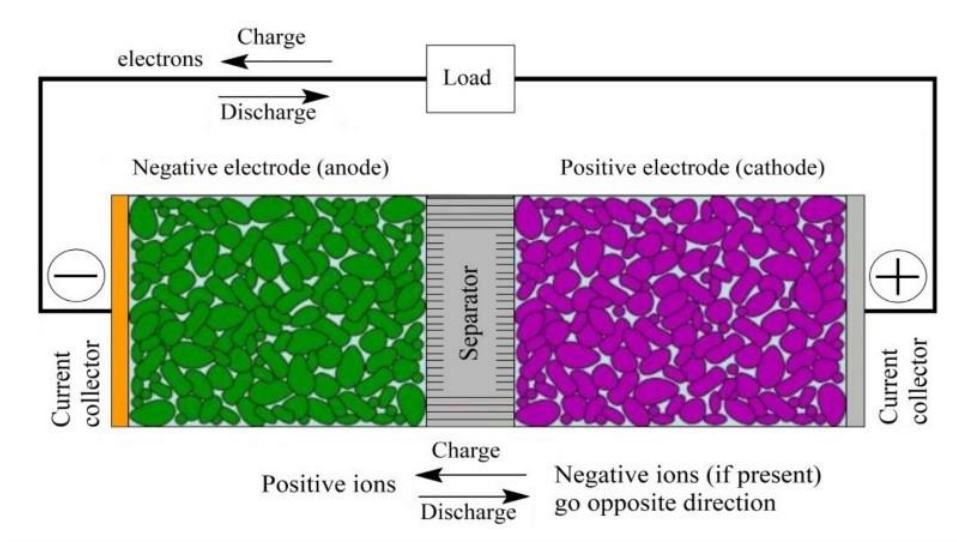
Η συγκεκριμένη πρόσμιξη με οξείδια μαγγανίου χρησιμοποιείται από διάφορους κατασκευαστές με στόχο τη βελτίωση των ενεργειακών ιδιοτήτων και της αντοχής του συσσωρευτή.

- **Lithium Iron Phosphate (LiFePO<sub>4</sub>- LFPO) batteries**

Οι μπαταρίες Φωσφορικού Λιθίου Σιδήρου προσφέρουν αυξημένα επίπεδα ενεργειακής πυκνότητας και ικανοποιητική αναλογία ισχύος προς βάρος. Πέρα από καλή απόδοση, επιτυγχάνεται μεγάλος βαθμός ασφαλείας κατά τη λειτουργία.

## 2.3 Αρχή λειτουργίας

Το μοναδιαίο στοιχείο μίας μπαταρίας είναι η κυψέλη/κελί (cell). Πολλές κυψέλες συνθέτουν μία συστοιχία (module) και αυτές με τη σειρά του συνθέτουν την μπαταρία όπως τη διακρίνουμε σαν σύνολο (battery pack). Η βασική δομή μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου αποτελείται από μια άνοδο, μια κάθοδο, έναν ηλεκτρολύτη, ένα διαχωριστή και ένα συλλέκτη ρεύματος. Η άνοδος και η κάθοδος ορίζονται ως το αρνητικό και το θετικό ηλεκτρόδιο αντίστοιχα, όπου ο μετασχηματισμός των ιόντων λιθίου λαμβάνει χώρα ανάμεσα τους, διαπερνώντας τον ηλεκτρολύτη [36].



Εικόνα 2: Γραφική αναπαράσταση αρχής λειτουργίας της μπαταρίας [37].

Όταν η μπαταρία αποφορτίζεται, το αρνητικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) οξειδώνεται από τον ηλεκτρολύτη ελευθερώνοντας ηλεκτρόνια από το υλικό της ανόδου. Τα ηλεκτρόνια από την άνοδο ρέουν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος το οποίο περνάει από τη συσκευή που τροφοδοτείται από τη μπαταρία, προς το θετικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος). Στην κάθοδο, το οξείδιο του μετάλλου μειώνεται λαμβάνοντας ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα. Κατά τη φόρτιση, ιόντα λιθίου ρέουν από την άνοδο προς την κάθοδο. Ο ηλεκτρολύτης είναι ιονικά αγωγίμος αλλά ταυτόχρονα εμποδίζει τη διέλευση ηλεκτρονίων ώστε να εμποδίζεται η αυτό-εκφόρτιση. Παράλληλα, ένας πορώδης διαχωριστής, διαχωρίζει το θετικό από το αρνητικό ηλεκτρόδιο ώστε να αποφευχθούν τυχόν βραχυκυκλώματα, ενώ επιτρέπει τη διέλευση ιόντων. Για να φορτιστεί η μπαταρία, εφαρμόζεται τάση στο κύκλωμα και αλλάζει η φορά της διαδικασίας [36].

### Ποιότητα και ρόλος υλικών

Τα υλικά κατασκευής της καθόδου και της ανόδου είναι πολύ κρίσιμα καθώς με βάση αυτή την επιλογή προκύπτουν οι τελικές ιδιότητες της μπαταρίας. Αυτά τα υλικά δηλαδή θα κρίνουν την ονομαστική τάση, τη διάρκεια ζωής, το ρυθμό αυτοεκφόρτισης, την ειδική ενέργεια, την ειδική ισχύ, την πυκνότητα ενέργειας, την πυκνότητα ισχύος, το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας και φυσικά το κόστος [38]. Ένας συνηθισμένος συνδυασμός ο οποίος έχει επικρατήσει και στην ηλεκτροκίνηση προϋποθέτει επιλογή υλικού καθόδου κάποιο οξείδιο του

λιθίου και υλικό ανόδου κάποιο παράγωγο του άνθρακα, με συνηθέστερη επιλογή το γραφίτη [39]. Η σύνθεση των στοιχείων της ανόδου και της καθόδου μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσα από πολλούς συνδυασμούς υλικών. Η επιλογή αυτών γίνεται με γνώμονα τη διαθεσιμότητα τους στη φύση και την ικανότητα εξόρυξης τους.

## 2.4 Γήρανση

Η γήρανση των μπαταριών εκδηλώνεται υπό την μορφή σταδιακού περιορισμού της ωφέλιμης χωρητικότητας και υπό την μορφή εξασθένησης της ισχύος. Η μείωση της χωρητικότητας είναι η μείωση της ποσότητας ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει ο συσσωρευτής σε σχέση με την αρχική. Η μείωση αυτή εκφράζεται ως ποσοστό, σε σύγκριση με την ονομαστική. Η βιβλιογραφία αναφέρει πως απώλεια της τάξης του 20% της ονομαστικής ή αλλιώς εναπομένουσα χωρητικότητα 80% σε ένα συσσωρευτή σημαίνει το τέλος ζωής του. Αυτό ισχύει για τις περισσότερες που χρησιμοποιούν μπαταρίες λιθίου και ειδικά για την ηλεκτροκίνηση [40].

Αυτή η σταδιακή απώλεια σε χωρητικότητα είναι αφενός αναπόφευκτη, αφετέρου η προοδευτικότητα με την οποία συμβαίνει εξαρτάται από διάφορους παράγοντες κατά τη χρήση της μπαταρίας. Αυτοί οι παράγοντες μεταξύ άλλων αφορούν τις συνθήκες φόρτισης - εκφόρτισης, το βάθος εκφόρτισης, τη θερμοκρασία λειτουργίας, και το φορτίο το οποίο αναλαμβάνει ο συσσωρευτής [41].

Από την άλλη μεριά, η εξασθένηση ισχύος οφείλεται στην αύξηση της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας. Οι δύο αυτές μορφές γήρανσης μπορεί να συμβαίνουν ακόμα και ταυτοχρόνως. Οι μηχανισμοί οι οποίοι μεταφράζουν την εξασθένηση χωρητικότητας και ισχύος είναι αρκετά περίπλοκοι και εκφράζονται μέσα από περίπλοκες χημικές αντιδράσεις και μαθηματικές σχέσεις. Η παρούσα διπλωματική εργασία δε θα ασχοληθεί με το αντικείμενο της διεξοδικής χημικής και μαθηματικής επεξήγησης του φαινομένου της γήρανσης, αλλά θα σταθεί στις βασικές αρχές και την αντιμετώπιση της.

Πως γίνεται επί της ουσίας η γήρανση

Σε προηγούμενη παράγραφο επεξηγήθηκε σφαιρικά το φαινόμενο της γήρανσης της μπαταρίας ιόντων Λιθίου και πως αντιλαμβανόμαστε ότι έχει συμβεί μέσα από τα αποτελέσματα της. Αναφέρθηκε ότι αυτή η διάβρωση επεξηγείται σε μοριακό επίπεδο μέσα

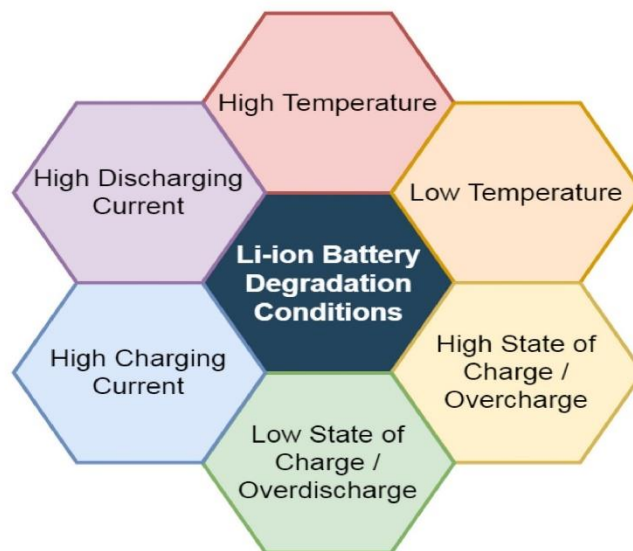
από περίπλοκα μαθηματικά μοντέλα και χημικές εξισώσεις. Ωστόσο μπορεί να γίνει μια όσο το δυνατόν πρακτική περιγραφή όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο συμβαίνει η γήρανση. Με άλλα λόγια τι είναι αυτό το οποίο οδηγεί στη μείωση χωρητικότητας και σε εξασθένηση ισχύος. Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα είναι διπλή:

### 1. Απώλεια αποθεμάτων λιθίου

Η απώλεια αποθεμάτων λιθίου αφορά τη σταδιακή κατανάλωση του εν λόγω μετάλλου σε παράπλευρες αντιδράσεις οι οποίες πραγματοποιούνται στο εσωτερικό της μπαταρίας. Αυτή η απώλεια σημαίνει τη μείωση επαρκούς παρεμβαλλόμενου υλικού ανάμεσα από τα ηλεκτρόδια το οποίο οδηγεί στη μείωση της συνολικής χωρητικότητας [42].

### 2. Απώλεια ενεργού υλικού

Η απώλεια ενεργού υλικού αποτελεί απόρροια αποικοδόμησης των ηλεκτροδίων μειώνοντας έτσι τον αριθμό των διαθέσιμων θέσεων οι οποίες φιλοξενούν λίθιο. Αυτό το φαινόμενο λαμβάνει χώρα τόσο στην άνοδο όσο και στην κάθοδο και οδηγεί σε μειωμένη χωρητικότητα και εξασθένηση ισχύος [42]



Εικόνα 3:Μηχανισμοί γήρανσης μπαταριών ιόντων λιθίου [43]

Στην παραπάνω εικόνα, συνοψίζονται οι βασικότερες αιτίες υποβάθμισης μπαταριών ιόντων λιθίου οι οποίες ενεργοποιούν τους προαναφερθέντες μηχανισμούς γήρανσης. Οι συνθήκες που αναφέρονται αποτελούν τα αίτια που οδηγούν στη γήρανση και συνδέονται αφενός με το χειρισμό και αφετέρου με εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες. Παρακάτω γίνεται

αναφορά για την κάθε κατάσταση που απεικονίζεται στην εικόνα και πως επηρεάζει την υγεία της μπαταρίας:

- **Υψηλή θερμοκρασία:** Οι υψηλές θερμοκρασίες στη μικροδομή του συσσωρευτή προκαλούν φθορά στον πορώδη διαχωριστή θετικών και αρνητικών ηλεκτροδίων, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των μη ενεργών υλικών.
- **Χαμηλή θερμοκρασία:** Οι χαμηλές θερμοκρασίες οδηγούν στην επιμετάλλωση λιθίου γύρω από το στοιχείο της ανόδου με αποτέλεσμα τη σταδιακά αυξανόμενη φθορά της ανόδου και κατά προέκταση της μπαταρίας.
- **Υψηλό ποσοστό φόρτισης (SOC):** Η υπερφόρτωση της μπαταρίας δημιουργεί πληθώρα προβλημάτων, μιας και σχετίζεται με την επιμετάλλωση λιθίου, τη φθορά του στοιχείου της καθόδου και της ανόδου επίσης. Υπάρχουν βέλτιστα όρια σχετικά με το ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας τα οποία προτείνονται από τους κατασκευαστές και θα συζητηθούν στη συνέχεια.
- **Υψηλό βάθος εκφόρτισης (DOD):** Η χαμηλή στάθμη της μπαταρίας οδηγεί στη δημιουργία σκουριάς χάλκινων στοιχείων του διαχωριστή θετικών-αρνητικών ηλεκτροδίων, αλλά και συνολική φθορά σε όλα τα επιμέρους στοιχεία του κελιού.
- **Φόρτιση με ρεύμα υψηλής έντασης:** Η ταχεία φόρτιση η οποία πραγματοποιείται υπό συνθήκες υψηλής έντασης ρεύματος βλάπτει την υγεία της μπαταρίας μιας και προκαλεί επιμετάλλωση λιθίου, και επομένως φθορά της ανόδου, αλλά και της καθόδου.
- **Αποφόρτιση με ρεύμα υψηλής έντασης:** Η έντονη αποφόρτιση υπό συνθήκες αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων με ρεύμα μεγάλης έντασης προκαλεί φθορά στα στοιχεία της ανόδου και της καθόδου.

## 2.5 Μακροσκοπική ανάλυση της γήρανσης

Όλοι οι μηχανισμοί γήρανσης που προαναφέρθηκαν έως τώρα, μελετούν τη μικροδομή της μπαταρίας και αφορούν στη φθορά σε επίπεδο κελιού. Υπάρχουν ωστόσο και μηχανισμοί φθοράς εξωτερικά του κελιού σε επίπεδο συστοιχίας αλλά και συνολικά ολόκληρης της μπαταρίας. Επιπλέον, επειδή στο σύνολο της μπαταρίας συνεργάζονται πολλές επιμέρους συστοιχίες και ακόμα περισσότερα κελιά, ισχύει ότι ο συσσωρευτής συνολικά έχει μικρότερο προσδόκιμο ζωής από ότι ένα από τα κελιά του [44].



Στα ηλεκτρικά οχήματα η γήρανση της μπαταρίας έχει μεγάλο αντίκτυπο στην απόδοση. Η εξασθένηση χωρητικότητας επιδρά αρνητικά στην εμβέλεια κίνησης του οχήματος. Παράλληλα η εξασθένηση ισχύος επηρεάζει την οδηγική συμπεριφορά, την επιτάχυνση όπως και την ιδιότητα επανάκτησης ενέργειας κατά την πέδηση [45],[46].

Αφού επεξηγήθηκε αναλυτικά η μικροδομή της μπαταρίας και όλα τα επιμέρους βασικά συστατικά της, αναλύθηκε κατά ένα βασικό βαθμό η αρχή λειτουργίας της. Στη συνέχεια αναλύθηκε ο τρόπος με τον οποίο φθείρεται η μπαταρία σε επίπεδο κελιού κατά τη διάρκεια του χρόνου. Στη συνέχεια ακολούθησε σύντομη ανάλυση της φθοράς που συμβαίνει σε επίπεδο συστοιχίας αλλά και του συνόλου της μπαταρίας. Στη συνέχεια επεξηγείται η σημασία του τρόπου χρήσης και φόρτισης από το χειριστή και η επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Οι συνιστώσες οι οποίες επηρεάζουν άμεσα τη φθορά της μπαταρίας διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: α) τη θερμοκρασία, β) το εύρος λειτουργίας εκφρασμένο σε ποσοστό % της συνολικής χωρητικότητας και γ) τη σταθερά ρεύματος C (C Rate) [47].

### **2.5.1 Θερμοκρασία**

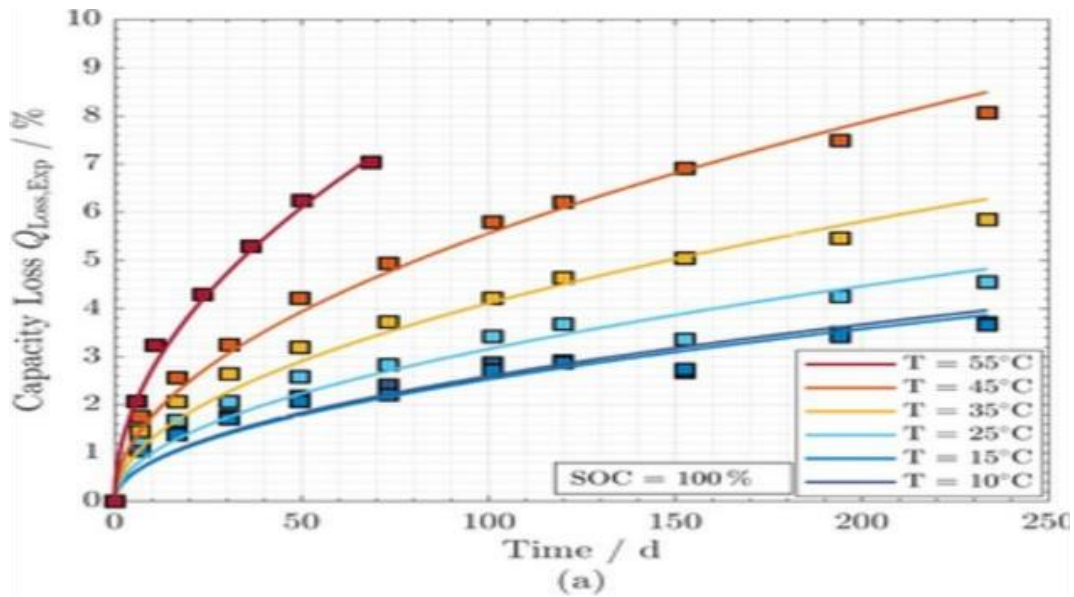
Δεν είναι λίγες οι μελέτες που έχουν διεξαχθεί με αντικείμενο τη θερμοκρασία λειτουργίας και αποθήκευσης της μπαταρίας ιόντων λιθίου και πως εκείνη επιδρά στη διάρκεια ζωής της. Τόσο κατά τη δυναμική καταπόνηση όσο και υπό συνθήκες ηρεμίας της μπαταρίας, ο παράγοντας της θερμοκρασίας παίζει πάντα ρόλο στη γήρανση της.

Οι Zhu et al [48] διεξάγουν πειραματική δοκιμή σε μια μπαταρία ιόντων λιθίου τύπου LFP για να διαπιστώσουν την επίδραση της θερμοκρασίας στη διάρκεια ζωής της. Καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος επιδρά σημαντικά στη φθορά του συσσωρευτή, η οποία εμφανίζει γραμμική συμπεριφορά υπό συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου. Αντιθέτως σε θερμότερες συνθήκες για  $T=45^{\circ}\text{C}$  η εκφόρτιση της μπαταρίας επιταχύνθηκε κατά πολύ. Παράλληλα, οι Shun sun et al [49] αναφέρουν ότι η διάρκεια ζωής της μπαταρίας ιόντων λιθίου μετά από επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης υπό συνθήκες ρεύματος C/3 στους  $25^{\circ}\text{C}$  ήταν 615 ημέρες και στους  $55^{\circ}\text{C}$  86 ημέρες αντίστοιχα. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μειώθηκε στο 1/7 λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας λειτουργίας. Ωστόσο, πέρα από τον αυξημένο ρυθμό φθοράς, οι υψηλές θερμοκρασίες συνοδεύονται από ζητήματα ασφαλείας όπως διαφυγή θερμότητας που μπορεί να οδηγήσει σε πυρκαγιά [50].

Εκτός από τις πολύ υψηλές θερμοκρασίες, οι υπερβολικά ψυχρές συνθήκες επηρεάζουν εξίσου αρνητικά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Οι χαμηλές θερμοκρασίες αν και δε δημιουργούν ζητήματα ασφαλείας, συμβάλουν στο φαινόμενο επιμετάλλωσης του λιθίου το οποίο οδηγεί στη βράχυνση της χωρητικότητας [51]. Οι Pesaran et al [52] όπως και οι Han et al [53] υποδεικνύουν το βέλτιστο κατά εκείνους θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας μιας μπαταρίας το οποίο είναι 15°C - 35°C. Ο κοινός τόπος όλων των παραπάνω μελετών είναι να αποφεύγονται οι ακραίες θερμοκρασίες λειτουργίας των μπαταριών καθώς επιδρούν αρνητικά στο προσδόκιμο ζωής τους.

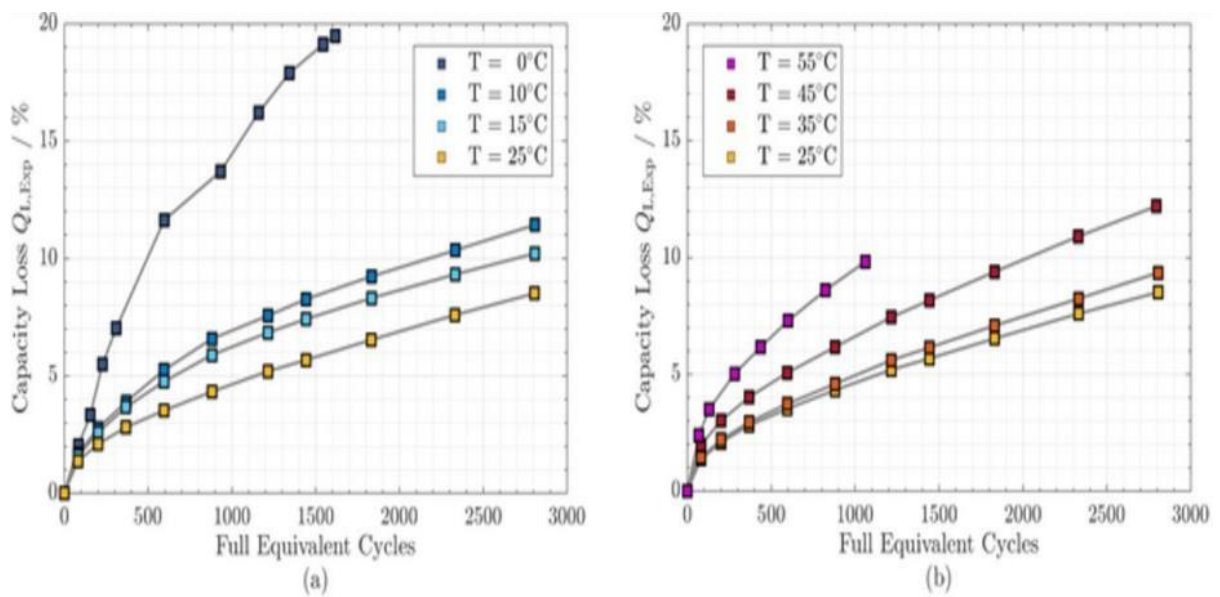
Πέρα από το λειτουργικό κομμάτι, η ημερολογιακή διάρκεια ζωής της μπαταρίας παίζει σημαντικό ρόλο ειδικά σε εφαρμογές όπως η ηλεκτροκίνηση, όπου το όχημα παραμένει σταθμευμένο το μεγαλύτερο μέρος της ζωής του [54]. Κατά την αποθήκευση, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, όπως και άλλα συστήματα αποθήκευσης, παρουσιάζουν απώλεια χωρητικότητας, η οποία αποτελείται από δύο υποκατηγορίες, την αναστρέψιμη και τη μη αναστρέψιμη. Η αναστρέψιμη απώλεια χωρητικότητας που ονομάζεται επίσης αυτοεκφόρτιση μπορεί να ανακτηθεί με πλήρη επαναφόρτιση της κυψέλης μετά την αποθήκευση. Η μη αναστρέψιμη απώλεια χωρητικότητας όμως συνεπάγεται μόνιμη απώλεια ενός ποσοστού της ονομαστικής χωρητικότητας της μπαταρίας [55]. Οι Grolleau et al [55] πραγματοποίησαν μια πειραματική μελέτη στην οποία υπέβαλαν 27 κυψέλες μπαταριών Λιθίου εμπορίου, σε στατικές δοκιμές αποθήκευσης υπό μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες και κατάσταση φόρτισης. Τα πλήρως φορτισμένα κελιά που αποθηκεύτηκαν στους 45 °C αντιμετώπισαν απώλεια χωρητικότητας της τάξεως του 20% σε διάστημα 450 ημερών. Επιπλέον όλα τα κελιά τα οποία αποθηκεύτηκαν στους 60 °C αντιμετώπισαν μόνιμη απώλεια χωρητικότητας τουλάχιστον 20% τις πρώτες 150 ημέρες. Τέλος, οι Smith et al [56], με τη χρήση ημιεμπειρικού μοντέλου με εφαρμογή σε υβριδικό αυτοκίνητο αποδεικνύουν ότι μέχρι και ο παράγοντας της στάθμευσης του οχήματος υπό σκιά έναντι της στάθμευσης υπό το φως του ήλιου μπορεί να αυξήσει το προσδόκιμο ζωής της μπαταρίας έως και 2 χρόνια περισσότερο.

Η πειραματική μελέτη των Schibe et al [57] εξετάζει πως συμπεριφέρεται μια μπαταρία σε βάθος χρόνου η οποία είναι φορτισμένη στο 100% της ονομαστικής της χωρητικότητας και αποθηκεύεται εκτεθειμένη σε ποικίλες θερμοκρασίες.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα απωλειών χωρητικότητας μπαταρίας στο χρόνο/μέρες [57]

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, η θερμοκρασία έχει άμεση επίδραση στη χωρητικότητα της μπαταρίας. Η υψηλότερη θερμοκρασία είναι ανάλογη της απώλειας χωρητικότητας, με κορύφωση τους 55°C όπου ποσοστό της τάξεως του 6% χάνεται σε βάθος 50 ημερών κάτι το οποίο στους 35°C θα χρειαστεί πάνω από 250 ημέρες για να συμβεί. Σημειώνεται επίσης ότι η κλίση όλων των καμπυλών είναι μεγαλύτερη τις πρώτες ημέρες και στη συνέχεια μειώνεται. Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός απώλειας χωρητικότητας αρχικά είναι αυξημένος και σε βάθος χρόνου βαίνει μειούμενος.



Σχήμα 2.2: Επίδραση της θερμοκρασίας στη χωρητικότητα της μπαταρίας συναρτήσει κύκλων φόρτισης σε περίοδο λειτουργίας [57].

Όπως παρατηρείται στο γράφημα της Εικόνας 10, το βέλτιστο πειραματικό σημείο όπου συναντάται η ελάχιστη απώλεια χωρητικότητας είναι για  $T=25^{\circ}\text{C}$ . Χαμηλότερες ή υψηλότερες θερμοκρασίες από αυτή επιφέρουν περισσότερες απώλειες στη ζωή της μπαταρίας.

### **2.5.2 Εύρος λειτουργίας σε ποσοστό % της συνολικής χωρητικότητας / Κατάσταση φόρτισης SOC**

Υπερφόρτιση, μεγάλο βάθος εκφόρτισης και ακανόνιστοι κύκλοι φόρτισης είναι οι βασικοί παράμετροι που οδηγούν σε ταχεία φθορά του συσσωρευτή [58],[59],[60].

#### **➤ Υπερφόρτιση και υπερεκφόρτιση**

Η υπερφόρτιση συνεπάγεται τη συνέχιση της φόρτισης ακόμα και αφού η διαδικασία έχει ολοκληρωθεί έως το 100% της συνολικής χωρητικότητας. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στο φαινόμενο της θερμικής φυγής. Κάποιος εξωτερικός παρατηρητής απλά παρατηρεί αύξηση θερμοκρασίας της μπαταρίας. Ωστόσο, στην πραγματικότητα πρόκειται για ένα πιο περίπλοκο φαινόμενο. Η διαρκής περιττή προσθήκη ενέργειας από την πηγή φόρτισης συνεπάγεται προσθήκη θερμότητας με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία στο εσωτερικό της μπαταρίας και να αλλοιώνονται τα συστατικά της.

Κατά κανόνα εγκυμονεί και μεγαλύτερους κινδύνους όπως πρόκληση πυρκαγιάς ή και κάποια εκρηκτικής φύσης αντίδραση αλλά στην περίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων κάτι τέτοιο θεωρητικά αποτρέπεται από το διαχειριστικό σύστημα της μπαταρίας (BMS). Επομένως αν και ο κίνδυνος ατυχήματος είναι θεωρητικά απειροελάχιστος, η φθορά της μπαταρίας είναι βέβαιη. Στην αντίθετη περίπτωση η υπερβολική εκφόρτιση αποτελεί επίσης κλασικό φαινόμενο κόπωσης της μπαταρίας. Υπάρχει η ψευδής αίσθηση από τους χρήστες τεχνολογιών που φέρουν μπαταρίες λιθίου ότι πρέπει να αξιοποιείται το μέγιστο της χωρητικότητας και για αυτό το λόγο εξαντλούν το ποσοστό φόρτισης μέχρι και την απενεργοποίηση της συσκευής.

Αυτή η πρακτική αφενός προσφέρει προσωρινά λίγο παραπάνω χρόνο λειτουργίας και φαινομενικά παρατείνει τον κάθε κύκλο φόρτισης αλλά στην πραγματικότητα βλάπτει ανεπανόρθωτα τη μπαταρία. Μη αναστρέψιμη απώλεια χωρητικότητας είναι το αποτέλεσμα του παραπάνω τρόπου χρήσης σε συνδυασμό διαταραχής της εσωτερικής ισορροπίας της μπαταρίας [59].

## ➤ Εύρος SOC

Συμπεραίνουμε από τις παραπάνω βιβλιογραφικές αναφορές ότι οι ακραίες τιμές κατάστασης φόρτισης είναι επιβλαβείς για τη μπαταρία. Υψηλά επίπεδα SOC όπως και υψηλό ποσοστό βάθους εκφόρτισης DOD πυροδοτούν τους μηχανισμούς γήρανσης. Όμως το ιδανικό εύρος SOC για μια μπαταρία είναι ένα ερώτημα χωρίς ξεκάθαρη απάντηση από τους ερευνητές. Ευρεία γκάμα επιστημονικών απόψεων επικαλύπτουν το ζήτημα αυτό με την πλειοψηφία να καταλήγει στον τόπο ότι όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος λειτουργίας ( $\Delta$ SOC), τόσο επιταχύνεται η γήρανση των μπαταριών [61].

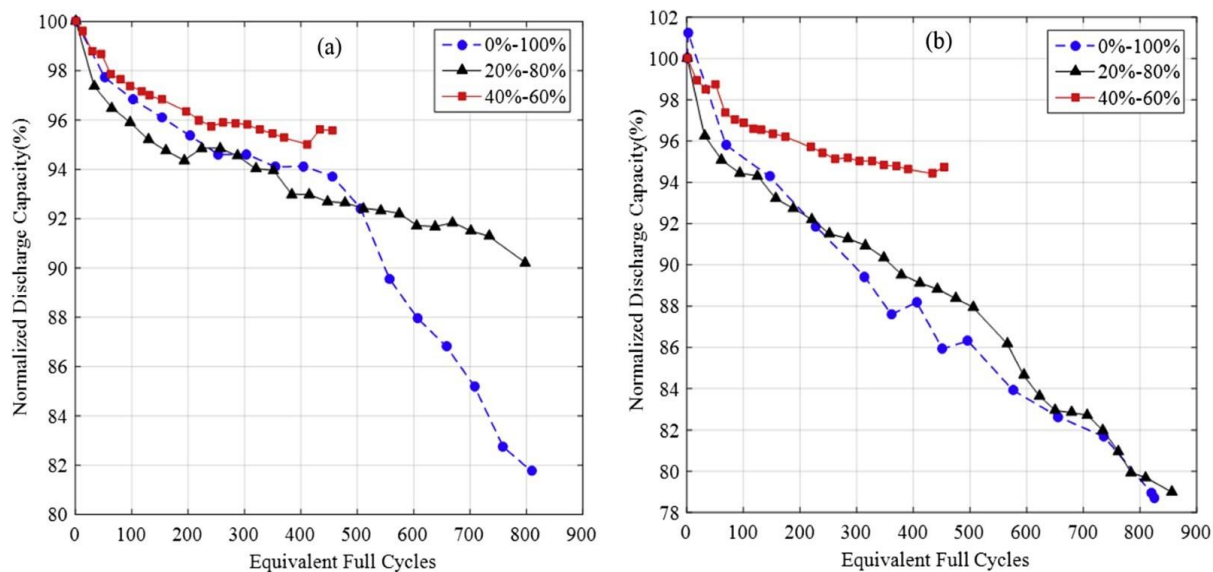
Επιπλέον οι [62] αναφέρουν ότι ο συνδυασμός υψηλού ποσοστού φόρτισης και υψηλής θερμοκρασίας δεν αποτελεί ένα καλό σύνολο για την υγεία της μπαταρίας. Οι ίδιοι ερευνητές κατόπιν πειραματικής μελέτης καταλήγουν σε χρήσιμα συμπεράσματα για τη συσχέτιση της κατάστασης φόρτισης SOC με την εσωτερική αντίσταση καινούριας και μεταχειρισμένης μπαταρίας. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι βέλτιστες τιμές εσωτερικής αντίστασης επιτυγχάνονται για εύρος SOC (30-90)% και (50-70)% για καινούρια και μεταχειρισμένη μπαταρία αντίστοιχα.

Από τα παραπάνω πορίσματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο κάθε κύκλος φόρτισης πρέπει να έχει κάποια ανώτατα και κατώτατα όρια για να επιτευχθεί μακροβιότητα της μπαταρίας. Οι Faría et al [58], επιβεβαιώνουν τη λογική αυτή αναφέροντας ότι η μερική αποφόρτιση σε αντίθεση με την ολική, οδηγεί σε μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης αλλά τελικά εξασφαλίζει μικρότερη απώλεια χωρητικότητας. Αυτό συμβαίνει διότι η απώλεια χωρητικότητας είναι ένα φαινόμενο σωρευτικό και είναι στην πραγματικότητα το άθροισμα της κόπωσης των υλικών του συσσωρευτή σε κάθε κύκλο [63]. Επομένως ο κάθε κύκλος φόρτισης πρέπει να υπερτερεί σε ποιότητα παρά σε ποσότητα (βάθος). Παρόλα αυτά, και μετά από πολλά χρόνια χρήσης μπαταριών λιθίου σε πολυάριθμες εφαρμογές, δεν υπάρχει καθολικές οδηγίες διαχείρισης αναφορικά με τον τρόπο φόρτισης των μπαταριών. Οι κατασκευαστές έχουν καταλήξει σε κάποιες γενικές οδηγίες οι οποίες όμως δε μπορούν να εφαρμόζονται σε όλες τις περιπτώσεις λόγω της ύπαρξης μεγάλης ποικιλομορφίας μπαταριών λιθίου. Για παράδειγμα οι μπαταρίες με σύσταση LFP εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στο συνολικό αριθμό κύκλων φόρτισης στον οποίο υπόκεινται ενώ για τις αντίστοιχες με σύσταση NCA παίζει μεγαλύτερο ρόλο το βάθος εκφόρτισης (DOD) ως κρίσιμη συνιστώσα φθοράς [64]. Οι Ecker et al [65] υποστηρίζουν ότι η μπαταρία η οποία διατηρεί μια μέση κατάσταση στάθμης μπαταρίας κοντά στο 50% θα υποστεί τη μικρότερη φθορά σε βάθος χρόνου. Σε συνέχεια αυτού, το άρθρο των Hoke et al [66] επιδεικνύει την επιτάχυνση του φαινομένου της

γήρανσης της μπαταρίας όταν εκείνη εκτελεί κύκλους φόρτισης σε υψηλό μέσο SOC. Σε μια προσπάθεια αποκωδικοποίησης των μηχανισμών γήρανσης σε όλο το εύρος ποσοστού φόρτισης, οι Gao et al [61] χωρίζουν το ποσοστό φόρτισης σε 5 ίσα διαστήματα χωρητικότητας 20% και μελετούν το καθένα από αυτά ξεχωριστά. Μικρά στοιχεία εμπορικών μπαταριών ιόντων λιθίου χωρητικότητας 8Ah καταπονούνται δυναμικά εκτελώντας κύκλους φόρτισης για 0-20%, 20-40%, 40-60%, 60-80%, 80-100% και 0-100%. Τα αποτελέσματα της έρευνας δείχνουν ότι στο διάστημα SOC (0-20)% διαπιστώνεται μεγάλη αύξηση εσωτερικής αντίστασης ενώ στο διάστημα (80-100)% μεγάλη απώλεια χωρητικότητας. Κοινό χαρακτηριστικό των δύο διαστημάτων είναι τα υψηλά επίπεδα απώλειας ενεργού υλικού από τη χημική σύσταση της μπαταρίας (LAM). Η έρευνα καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το εύρος ποσοστού λειτουργίας SOC (20-80)% φέρει ομοιογενή συμπεριφορά γήρανσης και είναι το βέλτιστο. Τέλος όσον αφορά τις σωστές πρακτικές φόρτισης και διακύμανσης της κατάστασης φόρτισης SOC στην ηλεκτροκίνηση, οι απόψεις δίστανται με τον τελικό λόγο να έχουν οι κατασκευαστές οι οποίοι καθοδηγούν το χρήστη μέσα από τις οδηγίες χρήσης του εκάστοτε οχήματος (manual).

Οι Saxena et al [67], έκαναν πειραματική δοκιμή σε ένα πλήθος κελιών λιθίου ώστε να δουν πως ανταποκρίνονται σε διαφορετικές ρουτίνες φόρτισης. Θεώρησαν 3 διαστήματα λειτουργίας, (0-100)% , (20-80)% , (40-60)% υπό συνθήκες χαμηλής έντασης ρεύματος κατά την εκφόρτιση C/2 και υψηλής αντίστοιχα 2C. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα από 2 τυχαία κελιά για το κάθε εύρος λειτουργίας.

Στην εικόνα 11α προκύπτει ότι τα κελιά με εύρος λειτουργίας 40-60% της χωρητικότητας τους, παρουσιάζουν μικρότερη απώλεια χωρητικότητας σε διάστημα των πρώτων 450 φορτίσεων από τις άλλες δύο περιπτώσεις. Αυτό είναι αναμενόμενο μιας και όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κομμάτι, όσο λιγότερες μεταβολές συμβαίνουν στο εσωτερικό της μπαταρίας και μακριά από υψηλά ποσοστά φόρτισης τόσο μικρότερη θα είναι και η φθορά της μπαταρίας. Θεωρητικά το ποσοστό 40-60% φαντάζει ιδανικό αλλά σε πραγματικές συνθήκες και εφαρμογές αυτό το εύρος δεν προσδίδει καμία ευελιξία καθώς εξαντλείται γρήγορα και θα απαιτούνται συνεχείς φορτίσεις.



Σχήμα 2.3: Απώλεια χωρητικότητας σε βάθος κύκλων φόρτισης ανάλογα με το εύρος ποσοστού χρήσης ( $\Delta$ SOC) σε δύο περιπτώσεις α) C/2 Rate (συνθήκες χαμηλού ρεύματος) και β) 2C Rate (συνθήκες υψηλού ρεύματος) [67]

Σε πιο ρεαλιστικές συνθήκες εμπίπτει η σύγκριση μεταξύ των διαστημάτων (20-80)% και (0-100)% τα οποία μέχρι τους πρώτους 500 κύκλους φόρτισης παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά σε όρους γήρανσης. Μακροπρόθεσμα όμως για το διάστημα 500-800 κύκλοι φόρτισης οι δύο καμπύλες διαφοροποιούνται αρκετά. Η καμπύλη του εύρους (0-100)% αποκτά μεγάλη κλίση και βαίνει πτωτικά μέχρι και τους 800 κύκλους φόρτισης εκεί όπου φθάνει το 82% της αρχικής χωρητικότητας της κυψέλης.

Αντίθετα η καμπύλη που απεικονίζει το εύρος (20-80)% διατηρεί την κλίση της με αποτέλεσμα την πιο ήπια μείωση της χωρητικότητας καταλήγοντας στο 90% της αρχικής της μετά από 800 κύκλους φόρτισης. Συμπεραίνουμε ότι σημειώνεται μια τελική διαφορά 8% στη χωρητικότητα μεταξύ των δύο καμπυλών υπό συνθήκες χαμηλής έντασης ρεύματος C/2. Επομένως το εύρος κύκλου φόρτισης-εκφόρτισης που κυμαίνεται μεταξύ 20% και 80% είναι το ιδανικό. Ωστόσο για συνθήκες εκφόρτισης με υψηλής έντασης ρεύμα 2C, όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα 3β, η συμπεριφορά που εμφανίζουν οι καμπύλες (20-80)% και (0-100)% είναι πανομοιότυπη. Αυτό συμβαίνει επειδή υπό συνθήκες υψηλού ρεύματος αυξάνεται η εσωτερική θερμοκρασία της μπαταρίας η οποία τελικά αποτελεί ισχυρότερη συνιστώσα γήρανσης από το ποσοστό φόρτισης.

### 2.5.3 Δείκτης C-Rate

Τα τελευταία χρόνια οι μπαταρίες ιόντων Λιθίου αποτελούν ίσως τη βέλτιστη λύση στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας έχοντας πρωταγωνιστικό ρόλο σε πολλές εφαρμογές και κυρίως στην ηλεκτροκίνηση. Ωστόσο, ειδικά στην τελευταία δημιουργούνται προκλήσεις γύρω από την αυτονομία και το χρόνο φόρτισης. Οι χειριστές των ηλεκτρικών οχημάτων καλούνται να ξεπεράσουν το άγχος της αυτονομίας και της χρονοβόρας διαδικασίας της φόρτισης της μπαταρίας. Η λύση σε αυτές τις προκλήσεις είναι η ταχεία φόρτιση υπό υψηλές τιμές ρεύματος ή αλλιώς υψηλό δείκτη C rate.

Το C rate είναι ένας δείκτης μέτρησης έντασης του ρεύματος στο οποίο φορτίζεται και εκφορτίζεται μια μπαταρία. Η χωρητικότητα της μπαταρίας η οποία αναγράφεται από τον κατασκευαστή αφορά συνθήκες ρεύματος 1C. Για παράδειγμα αν μια μπαταρία έχει χωρητικότητα 10Ah και είναι πλήρως φορτισμένη, αυτό σημαίνει ότι μπορεί να τροφοδοτεί με 10 Ampere για 1 ώρα. Αν η ίδια μπαταρία εκφορτιστεί με δείκτη C της τάξεως του C/2 τότε τροφοδοτεί με ρεύμα έντασης 5 Ampere για 2 ώρες και για δείκτη 2C θα παρέχει 20 Ampere για μισή ώρα αντίστοιχα. Στον τομέα της ηλεκτροκίνησης υψηλό δείκτη C rate επίσης προϋποθέτουν οι υψηλές επιδόσεις του οχήματος ή κοινώς η γρήγορη οδήγηση [68],[69].

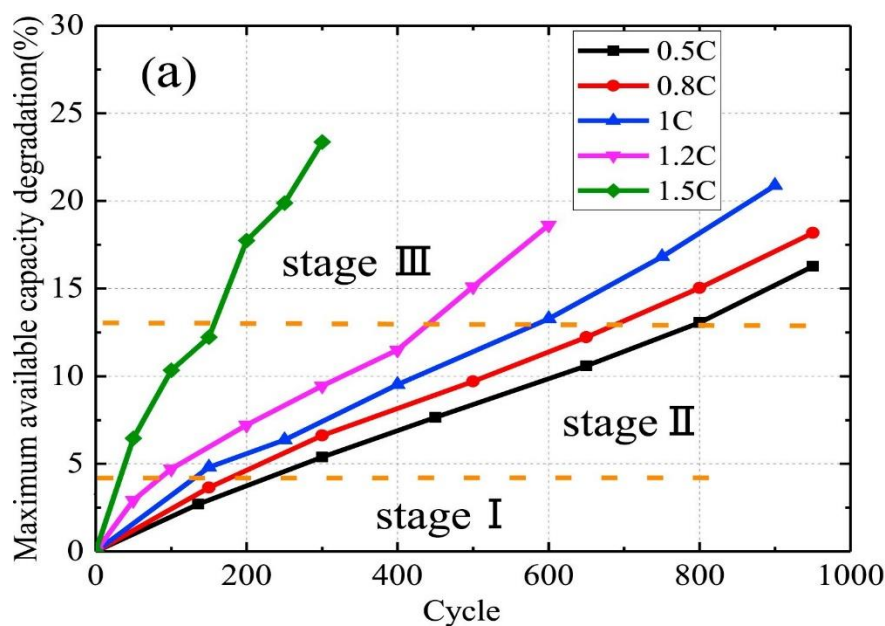
Το ερώτημα όμως είναι τι σημαίνει για τη μπαταρία η φόρτιση και εκφόρτιση με υψηλό C rate.

Οι υψηλοί δείκτες C φόρτισης και εκφόρτισης επιταχύνουν την υποβάθμιση των κυψελών λόγω της άνισης κατανομής του ρεύματος και την αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της μπαταρίας. Αυτές οι άνισα κατανεμημένες συνθήκες οδηγούν σε ανομοιόμορφη γήρανση στα στοιχεία της μπαταρίας και προκαλούν κατανάλωση λιθίου σε ορισμένα σημεία των ηλεκτρολυτών [70]. Τεχνικά, ο υψηλός δείκτης C σημαίνει πολύ γρήγορη μεταφορά λιθίου σε μικρό χρονικό διάστημα. Η εν λόγω ταχεία μεταφορά λιθίου στο εσωτερικό της μπαταρίας δεν επιτρέπει να ολοκληρώνονται οι χημικές διεργασίες μεταξύ των ιόντων κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα μερική απώλεια λιθίου. Επιπλέον, οι υψηλές θερμοκρασίες στο εσωτερικό συμβάλουν αρνητικά στη δημιουργία παράπλευρων χημικών αντιδράσεων οι οποίες αυξάνουν την απώλεια ενεργού υλικού [71]. Μια πειραματική μελέτη των Musa et al [72] καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ο δείκτης C αποτελεί βασικό συστατικό της γήρανσης. Για παράδειγμα φόρτιση σε συνθήκες 3C οδηγεί σε αυξημένη επιμετάλλωση λιθίου ενώ σε συνθήκες 4C συμβαίνει μέχρι και αποσύνθεση του γραφίτη. Οι Wang et al [73] υποστηρίζουν ότι λόγω των διαφορετικών θερμοκρασιών στους κύκλους φόρτισης δεν υπάρχει ιδανική τιμή του δείκτη C που να εφαρμόζει σε όλες τις μπαταρίες.



Αντίθετη άποψη έχουν οι Barcelona et al [74], που σε αντίθεση με την πλειοψηφία των ερευνητών δηλώνουν ότι ο δείκτης C δεν προκαλεί αξιοσημείωτη φθορά στη μπαταρία για τιμές έως και 5C. Συνεχίζουν υπογραμμίζοντας ότι ο παράγοντας που κρύβεται πίσω από τη γήρανση του συσσωρευτή υπό συνθήκες υψηλής έντασης ρεύματος είναι η αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του. Αιτιολογούν τη φθορά σαν μια αλυσιδωτή αντίδραση η οποία πυροδοτείται από τον υψηλό δείκτη C, ο οποίος με τη σειρά του προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας της μπαταρίας, η οποία είναι η ουσιαστική αιτία της μείωσης χωρητικότητας και απώλεια ισχύος μακροχρόνια.

Η Εικόνα 12 απεικονίζει τα πειραματικά αποτελέσματα της μελέτης των Gao et al [61], οι οποίοι δοκίμασαν τρεις μπαταρίες ιόντων Λιθίου υπό συνθήκες διαφορετικών τιμών του δείκτη C σε βάθος κύκλων φόρτισης. Για την αποφυγή της αλλοίωσης των αποτελεσμάτων λόγω τυχαίων σφαλμάτων και εξωτερικών παραγόντων, για τη διεξαγωγή του γραφήματος λαμβάνονται υπόψη οι μέσες τιμές και των τριών μπαταριών για κάθε διαφορετική περίπτωση του δείκτη C.



Σχήμα 2.4: Απεικόνιση της επιρροής των διαφόρων τιμών του δείκτη C<sub>r</sub> στη φθορά της μπαταρίας σε βάθος κύκλων φόρτισης [61]

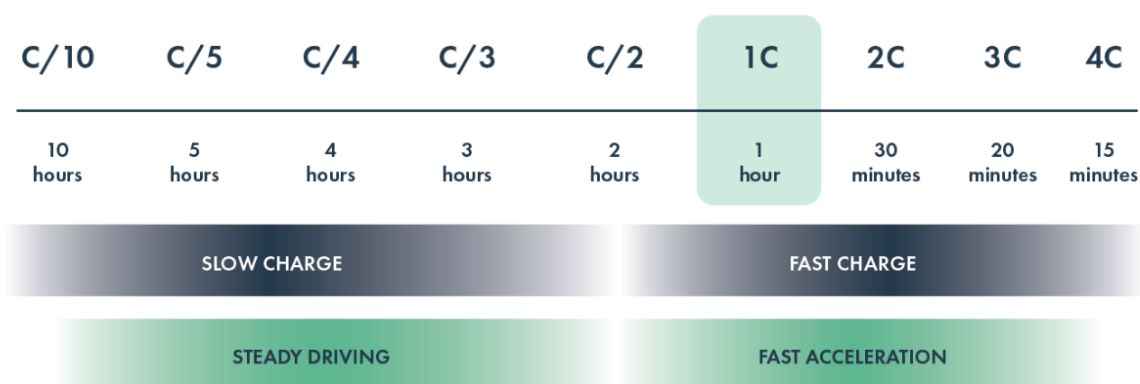
Οι ερευνητές με βάση τα πειραματικά τους αποτελέσματα ανάγουν τη φθορά σε φθορά/κύκλο φόρτισης και συμπεραίνουν τα εξής: Για φόρτιση με μικρής έντασης ρεύμα (0,5C) η μείωση της χωρητικότητας είναι 0,02%/κύκλο για τους πρώτους 150 κύκλους. Για το διάστημα 150-

800 κύκλους φόρτισης η φθορά βαίνει με σταθερό ρυθμό μεταβολής στα 0,0156%/κύκλο. Μετά τους 800 κύκλους όπου συνολικά έχει χαθεί το 13% της ονομαστικής χωρητικότητας σημειώνεται αύξηση του ρυθμού φθοράς στην τιμή του 0,0214%/κύκλο.

Για 0,8C παρατηρείται φθορά 0,0243%/κύκλο στο διάστημα 0-150 κύκλους, ενώ στην συνέχεια μειώνεται στο 0,0175%/κύκλο μέχρι τους 800 κύκλους ενώ στη συνέχεια αυξάνεται στο 0,0209%/κύκλο. Για 1C η καμπύλη έχει σχεδόν γραμμική συμπεριφορά και αυξάνεται σχεδόν ομοιόμορφα. Στους πρώτους 150 κύκλους εμφανίζει φθορά 0,032%/κύκλο ενώ για 150-600 κύκλους 0,0188%/κύκλο αντίστοιχα. Μετά τους 600 κύκλους αυξάνεται ο ρυθμός φθοράς στο 0,0271%/κύκλο φόρτισης.

Για 1,2C η υποβάθμιση της χωρητικότητας ξεκινά στα 0,0472%/κύκλο για τους πρώτους 100 κύκλους ενώ για τους επόμενους 300 μειώνεται λίγο στα 0,0226%/κύκλο. Μετά τους 400 κύκλους αυξάνεται αρκετά ο βαθμός υποβάθμισης αγγίζοντας την τιμή 0,0356%/κύκλο. Σε μόλις 600 κύκλους φόρτισης έχει ήδη χαθεί περισσότερο από το 18% της συνολικής ονομαστικής χωρητικότητας της μπαταρίας. Τέλος εξετάζεται η περίπτωση 1,5C με τα αποτελέσματα να διαφοροποιούνται αρκετά από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Η καμπύλη εμφανίζει μέσο ρυθμό αύξησης φθοράς της τάξης 0,078%/κύκλο φόρτισης. Αυτό συνεπάγεται ότι μετά το πέρας των πρώτων 250 κύκλων φόρτισης ο συσσωρευτής έχει ήδη απαξιωθεί έχοντας χάσει το 20% της αρχικής του χωρητικότητας.

Τόσο από τα αποτελέσματα της παραπάνω πειραματικής μελέτης, όσο και από την ανάλυση που προηγήθηκε για το πως επηρεάζει ο δείκτης C τη φθορά της μπαταρίας, γίνεται αντιληπτό ότι αποτελεί σημαντική συνιστώσα στο ζήτημα της γήρανσης. Για να γίνει και ευκολότερα κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο συνδέεται με την ηλεκτροκίνηση, παρατίθεται η Εικόνα 13.



Εικόνα 4: Αναλογία του δείκτη C<sub>R</sub> με τον τρόπο οδήγησης και την ταχύτητα φόρτισης [69]

Η ομαλή και σταθερή οδήγηση και η αργή φόρτιση συνεπάγεται χαμηλής έντασης ρεύμα το οποίο διαρρέει τα κυκλώματα του οχήματος και άρα χαμηλές τιμές του δείκτη C που έχουν αποτέλεσμα τη μακροζωία της μπαταρίας. Στην αντίθετη περίπτωση, ο συνδυασμός ταχείας φόρτισης και γρήγορης οδήγησης με υψηλό φορτίο και συνεχείς επιταχύνσεις έχουν αποτέλεσμα υψηλό δείκτη C και έντονη φθορά της μπαταρίας.

## **Κεφάλαιο 3 Παρουσίαση του προβλήματος: Τρόποι διαχείρισης απαξιωμένων μπαταριών**

Ο συσσωρευτής ιόντων λιθίου είναι μια επαναστατική τεχνολογία στην τεχνολογία των μπαταριών και χάρη στις ιδιότητες του μπορεί να ενταχθεί σε σύγχρονες και πολύπλοκες εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις. Το γεγονός ότι χρησιμοποιείται για να καλύψει τις ανάγκες της ηλεκτροκίνησης αποδεικνύει την υπεροχή του συγκεκριμένου τύπου συσσωρευτή έναντι άλλων τεχνολογιών μπαταριών. Αν και μία από τις ιδιότητες που διακρίνουν αυτή τη μπαταρία είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής της, εξακολουθεί να χαρακτηρίζεται ως αναλώσιμο ανταλλακτικό στο αυτοκίνητο. Με βάση τους προαναφερθέντες μηχανισμούς γήρανσης και τις διεργασίες που γίνονται στο εσωτερικό της, μειώνεται η ονομαστική της χωρητικότητα και εξασθενεί η ισχύς της. Επομένως αιωρείται το ερώτημα σχετικά με τη μετέπειτα πορεία τους, τη διαχείριση τους ως απόβλητο, και τους φορείς που είναι υπεύθυνοι για όλα αυτά. Σε αυτό το σημείο πρέπει να γίνει κατανοητό ότι οι κατασκευαστές των ηλεκτρικών οχημάτων είναι διαφορετικοί από τους κατασκευαστές των μπαταριών.

Η δικαιοδοσία των τελευταίων τελειώνει μετά την τροφοδότηση των αυτοκινητοβιομηχανιών με τα προϊόντα τους. Οι κατασκευαστές των οχημάτων από την άλλη, ενδιαφέρονται για την εύρυθμη λειτουργία της μπαταρίας όσο εκείνη εξυπηρετεί τους σκοπούς της ηλεκτροκίνησης και όχι για τη συνέχεια αυτών. Ως αποτέλεσμα αυτών, ένα μεγάλο μέρος των απαξιωμένων μπαταριών καταλήγει στο περιβάλλον σε χώρους υγειονομικής ταφής επιβαρύνοντας σημαντικά το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Πολλοί ιδιωτικοί φορείς αναπτύσσουν τεχνολογίες ανακύκλωσης αντιμετωπίζοντας αρκετές προκλήσεις με βάση τα σημερινά δεδομένα. Ως τρίτη επιλογή παρουσιάζεται η επαναχρησιμοποίηση των μπαταριών αυτών σε άλλες, εφαρμογές, όπως η σταθερού τύπου αποθήκευση, οι οποίες αναλύονται ακολούθως.

### 3.1 ΧΥΤΑ

Η τελική απόθεση είναι η χειρίστη λύση με καταστροφικές συνέπειες στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία. Αρχικά οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελούν τοξικά απόβλητα εξαιτίας των βαρέων μετάλλων και των χημικών συστατικών που περιέχουν [75],[76].

Ως εκ τούτου η απόθεση τους μπορεί να μολύνει το έδαφος και το υπέδαφος. Επιπλέον μπορούν να υπάρξουν αρνητικές επιπτώσεις για την πανίδα και τη χλωρίδα της γύρω περιοχής. Χιλιάδες ζωντανοί οργανισμοί θα μπορούσαν να τεθούν σε κίνδυνο λόγω ακατάλληλης απόρριψης μπαταριών και διαρροής χημικών [77].

Μία ακόμη επικίνδυνη επίπτωση της συσσώρευσης πολλών μπαταριών λιθίου είναι η εύφλεκτη φύση των υλικών τους με αποτέλεσμα μια πιθανή πυρκαγιά με πιθανότητα εξάπλωσης [78].

Η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών αναφέρει ότι το 2018, το 40% των πυρκαγιών σε εγκαταστάσεις διαχείρισης αποβλήτων στην Καλιφόρνια προκλήθηκαν από μπαταρίες λιθίου [79]. Ένας επιπλέον σημαντικός λόγος για τον οποίο δεν συνίσταται η υγειονομική ταφή είναι η σύσταση των μπαταριών με πολύτιμα στοιχεία και μέταλλα. Όπως φανερώνεται από την ονομασία, το λίθιο, το οποίο έχει πρωταγωνιστικό ρόλο στη σύσταση της μπαταρίας, αποτελεί ένα μέταλλο το οποίο δεν διατίθεται σε αφθονία στον πλανήτη. Το ίδιο ισχύει όμως και για άλλα πολύτιμα μέταλλα που εμπεριέχονται στους διάφορους τύπους συσσωρευτών ιόντων λιθίου, όπως είναι το κοβάλτιο, το μαγγάνιο, το νικέλιο, ακόμα και ο σίδηρος [79].

Για παράδειγμα, το 2019 το μεγαλύτερο ποσοστό λιθίου εξήχθη από την Αυστραλία (55%) και τη Χιλή (24%), ενώ περισσότερο από το 70% του κοβαλτίου προήλθε από το Κονγκό. Αντίστοιχα το 53% του Νικελίου εξήχθη από την Ινδονησία, τις Φιλιππίνες, τη Ρωσία και τη Νέα Καληδονία και η Κίνα παρήγαγε το 70% του συνολικού γραφίτη. Επομένως διεθνή ζητήματα όπως πανδημίες, εμπόλεμες καταστάσεις και κυρώσεις που επιβάλλονται στα κράτη ενδέχεται να αυξήσουν την τιμή εισαγωγής και εξόρυξης των πρώτων υλών [80]. Επιπλέον, η εξόρυξη αυτών των πολύτιμων στοιχείων είναι μια διαδικασία δαπανηρή και μπορεί να εγείρει επίσης περιβαλλοντικές και ηθικές ανησυχίες. Παρακάτω παρατίθεται εικόνα του περιοδικού πίνακα στον οποίο επισημαίνονται τα στοιχεία που περιλαμβάνονται σε μια μπαταρία ιόντων λιθίου αλλά και συνολικά στο όχημα.

(b)

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

Content in one vehicle is higher than 1000 g  
 Content in one vehicle is higher than 1 g and less than 1000 g  
 Content in one vehicle is less than 1 g  
 Critical metals in power battery

Εικόνα 5: Χημικά στοιχεία του περιοδικού πίνακα τα οποία περιλαμβάνονται στη σύσταση της μπαταρίας [79].

Όπως διαπιστώνεται από την παραπάνω εικόνα, 14 χημικά στοιχεία από τον περιοδικό πίνακα συμμετέχουν στη σύσταση της μπαταρίας, τα οποία σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να απορριφθούν στο έδαφος μετά το πέρας ζωής της. Η υγειονομική ταφή αντενδείκνυται για την περίπτωση των μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων και δε συμβαδίζει με το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας με το οποίο συντονίζεται η παγκόσμια οικονομία.

## 3.2 Ανακύκλωση

Η ανακύκλωση όπως πάντα αποτελεί την επιθυμητή κατάληξη αντικειμένων από τα οποία δύναται να απομονωθούν πολύτιμα υλικά και να επαναχρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη. Η ταχύτατη εξάπλωση των ηλεκτροκίνητων οχημάτων έχει δημιουργήσει την ανησυχία σχετικά με την επάρκεια μεταλλικών πόρων, ιδίως σε πολύτιμα μέταλλα όπως το λίθιο, κοβάλτιο και νικέλιο. Επομένως, η αποδοτική ανακύκλωση αυτών των μετάλλων μπορεί να εξασφαλίσει σταθερότητα στην εφοδιαστική αλυσίδα μπαταριών ιόντων λιθίου στο μέλλον [81].

### 3.2.1 Μέθοδοι ανακύκλωσης

Για να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας ανακύκλωσης μπαταριών λιθίου, συνήθως εφαρμόζεται φυσική προεπεξεργασία ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη επανάκτηση των επιθυμητών υλικών στη συνέχεια και να αυξηθεί ο συνολικός βαθμός απόδοσης της διεργασίας [82]. Ακολούθως, ορίζεται το κυρίως στάδιο της ανακύκλωσης η οποία πραγματοποιείται με

δύο βασικές μεθόδους, την πυρομεταλλουργία και την υδρομεταλλουργία. Η πρώτη μέθοδος πραγματοποιείται προσδίδοντας μεγάλα ποσά θερμότητας στις μπαταρίες ώστε να εξαχθούν και να διαχωριστούν μεταξύ τους τα πρωτογενή υλικά. Η καύση γίνεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες σε ειδικούς κλίβανους. Η υδρομεταλλουργία επιτυγχάνει την εξαγωγή και το διαχωρισμό των πολύτιμων μετάλλων με τη βοήθεια ισχυρών χημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται εναποθέτοντας υδατικά διαλύματα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος [83]. Η υδρομεταλλουργία είναι πιο αποτελεσματική μέθοδος από την πυρομεταλλουργία, αυξάνοντας όμως την πολυπλοκότητα και το κόστος της συνολικής διαδικασίας [84].

Στην περίπτωση των μπαταριών ιόντων λιθίου των ηλεκτρικών οχημάτων, οι υφιστάμενες τεχνολογίες ανακύκλωσης αντιμετωπίζουν αρκετές προκλήσεις τη δεδομένη χρονική στιγμή. Σε αυτό το στάδιο, υπάρχει η δυνατότητα επανάκτησης του 95% του αλουμινίου, του 75% του χαλκού και του 84% του σιδήρου. Ωστόσο, οι περισσότερες σύγχρονες μέθοδοι ανακύκλωσης αυτής της κατηγορίας μπαταριών, δεν είναι ικανές να ανακυκλώσουν ικανές ποσότητες λιθίου. Άλλες μέθοδοι όπως για παράδειγμα η πυρομεταλλουργία, δεν είναι αρκετά αποδοτικές καθώς απαιτούν μεγάλα ποσά ενέργειας και προκαλούν εκπομπή τοξικών αερίων [85]. Άλλες εργαστηριακές μελέτες έδειξαν ότι οι μέθοδοι πυρομεταλλουργίας είναι αποδοτικές και μπορούν να επανακτήσουν υψηλά ποσοστά λιθίου και άλλων πολύτιμων συστατικών μέσω όμως μιας πολύπλοκης, χρονοβόρας και οικονομικά ασύμφορης διαδικασίας [86].

Η ερευνητική εργασία των Wang et al [83] συνοψίζει τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει η ανακύκλωση συσσωρευτών ιόντων λιθίου αυτή τη στιγμή. Χαρακτηριστικά στέκονται στο γεγονός ότι το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην ανάκτηση λιθίου χωρίς να συνυπολογίζονται οι παράπλευρες απώλειες των υφιστάμενων μεθόδων ανακύκλωσης. Ωστόσο η καύση των μπαταριών, η έκλυση με ισχυρά οξέα και το σύνολο των χημικών διεργασιών, οδηγούν σε αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου και παραγωγή τοξικών δευτερογενών αποβλήτων, αναιρώντας το θεμελιώδη σκοπό της ανακύκλωσης.

Μία πρόκληση που αντιμετωπίζει η ανακύκλωση είναι η τεχνολογική ποικιλομορφία των μπαταριών που κυκλοφορούν στην αγορά. Οι μπαταρίες των ηλεκτροκίνητων, παρά το κοινό τους χαρακτηριστικό που έγκειται στην ύπαρξη λιθίου στο εσωτερικό τους, έχουν αρκετές διαφορές μεταξύ τους. Κατασκευάζονται σε διαφορετικά μεγέθη, με παραλλαγές στη χημική τους σύσταση, διαφορετική διαμόρφωση ηλεκτροδίων, ακόμα και διαφορετικό σχήμα. Υπολογίζεται ότι περισσότεροι από 15 κατασκευαστές θα παράξουν 250 διαφορετικά μοντέλα ηλεκτρικών οχημάτων το 2025 με αποκλίνοντα σχέδια μπαταριών μεταξύ τους [87].

Αυτή η ποικιλομορφία στην κατασκευή των μπαταριών αποτελεί σημαντική πρόκληση στην ανάπτυξη εμπορικών τεχνολογιών ανακύκλωσης. Η απουσία συνεννόησης κι επομένως κοινής γραμμής των κατασκευαστών δυσκολεύει τη δημιουργία μιας κεντρικής τεχνολογίας ανακύκλωσης που θα είναι ταυτόχρονα αποδοτική για όλες τις μπαταρίες λιθίου, οικονομικά βιώσιμη και που θα έχει επίσης τη δυνατότητα να αυτοματοποιηθεί κατά το μέγιστο με λύσεις ρομποτικής.

### **3.3 Επαναχρησιμοποίηση**

Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 1, κλιματικές, κοινωνικές και οικονομικές συγκυρίες οδηγούν στην απανθρακοποίηση των τομέων της οικονομίας που βασίζονται στον άνθρακα. Ανάμεσα σε αυτούς βρίσκεται ο τομέας των μεταφορών. Στα πλαίσια αυτής της προσπάθειας, πολλά κράτη προωθούν την ηλεκτροκίνηση με στόχο την ολική απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα τα επόμενα χρόνια. Οι τεχνολογίες ηλεκτροκίνησης αναπτύχθηκαν ραγδαία και ενσωματώθηκαν σε όλο τον κόσμο αρχικά μέσα από τα υβριδικά οχήματα και στη συνέχεια μέσω των αμιγώς ηλεκτρικών. Ωστόσο, ενώ οι πωλήσεις ηλεκτροκίνητων οχημάτων αυξάνονται συνεχώς, παραμένει το ερώτημα για το τι θα απογίνουν οι μπαταρίες τους μετά το πέρας της πρωτογενούς τους χρήσης [88].

Αυτό αποτελεί την κύρια πρόκληση που αντιμετωπίζει η ηλεκτροκίνηση μιας και στέκεται εμπόδιο στην ένταξη της στο σύγχρονο μοντέλο κυκλικής οικονομίας. Σε προηγούμενη αναφορά επεξηγήθηκε ότι ο συσσωρευτής αποτελεί το σημαντικότερο εξάρτημα και την πηγή ολόκληρου του οχήματος και όπως όλα τα εξαρτήματα, έτσι και εκείνο είναι αναλώσιμο. Επιπλέον οι μέθοδοι ανακύκλωσης και υγειονομικής ταφής δεν ενδείκνυνται. Οι τεχνολογίες ανακύκλωσης δε μπορούν να ενταχθούν στη βιομηχανία γιατί αφενός δεν εφαρμόζουν σε όλους τους τύπους μπαταριών λιθίου και αφετέρου δεν είναι οικονομικά βιώσιμες. Παράλληλα, οι ΧΥΤΑ αποτελούν επιβλαβή λύση τόσο για το οικοσύστημα όσο και για τον ανθρώπινο οργανισμό, καθώς η τοξική σύσταση των μπαταριών αφομοιώνεται από το έδαφος.

Μεταξύ της πρωτογενούς χρήσης των μπαταριών και της ανακύκλωσης υπάρχει ένα μεταβατικό στάδιο το οποίο αποτελεί την επαναχρησιμοποίηση των απαξιωμένων μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων. Η ενδιάμεση αυτή φάση έχει πολλές προοπτικές ανάπτυξης και σε συνδυασμό με αποδοτικούς μηχανισμούς ανακύκλωσης στη συνέχεια, καθιστά την εφοδιαστική αλυσίδα της μπαταρίας κερδοφόρα [89]. Η προσέγγιση αυτή αφορά στην αξιοποίηση των μεταχειρισμένων μπαταριών που αποσύρονται από τα οχήματα, σε άλλες



εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας. Η αρχή της επαναχρησιμοποίησης βασίζεται στην επάρκεια των ενεργειακών ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών των συσσωρευτών ώστε να χρησιμοποιηθούν σε άλλες εφαρμογές, ακόμα και όταν εκείνοι αδυνατούν να υποστηρίξουν το ηλεκτρικό όχημα. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος θεωρείται ότι χρίζει αντικατάστασης όταν φθάσει το 80% της αρχικής της χωρητικότητας [90].

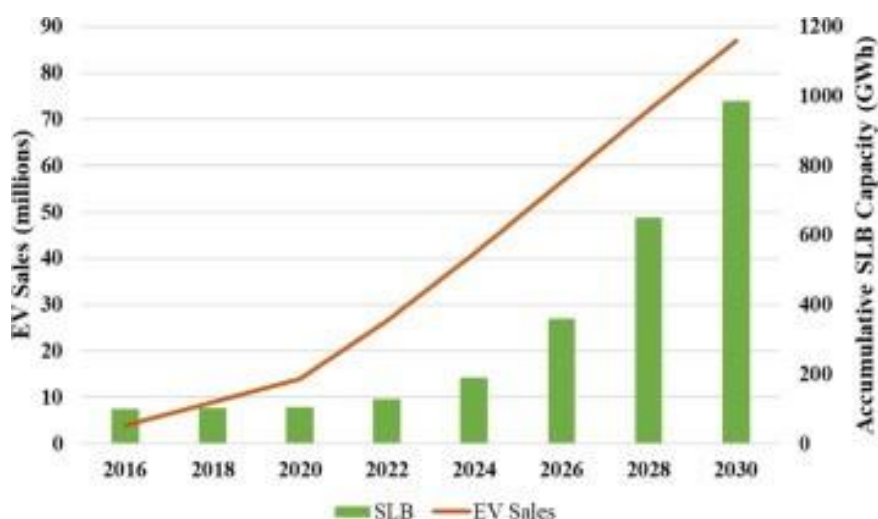
Παρότι αυτό συνεπάγεται μειωμένη αυτονομία και επιδόσεις για το όχημα, μια μπαταρία ανάλογων χαρακτηριστικών δεν παύει να αποτελεί λύση για εφαρμογές με μικρότερες απαιτήσεις. Οι εφαρμογές που δύνανται να ικανοποιηθούν μέσω της επαναχρησιμοποίησης αφορούν κυρίως στην αποθήκευση ενέργειας από ΑΠΕ, ώστε να επιλυθεί το ζήτημα της στοχαστικότητας. Κάτι τέτοιο περιλαμβάνει ευρύ φάσμα εφαρμογών, από εξοικονόμηση χρημάτων σε οικιακό τιμολόγιο ενός νοικοκυριού μέχρι και ενεργειακή αυτονόμηση απομονωμένου νησιού και ανεξαρτητοποίηση του από το ηπειρωτικό δίκτυο. Άλλες εφαρμογές αφορούν την υποβοήθηση του δικτύου ηλεκτροδότησης σε στιγμές υπερβολικής ζήτησης, εκεί δηλαδή που εμφανίζονται οι αιχμές στο προφίλ κατανάλωσης.

Οι μεταχειρισμένες μπαταρίες μπορούν επίσης να αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, υπό το καθεστώς τιμολογίων ``νυχτερινού ρεύματος``, μεταπωλώντας τη στη συνέχεια στο δίκτυο όταν η ζήτηση είναι υψηλή (arbitrage) [91],[85]. Οι εφαρμογές της δεύτερης ζωής των μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων δε σταματούν εκεί καθώς πρόκειται για μια τεχνολογία που μπορεί να ενταχθεί σε πολλούς τομείς όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια. Για να γίνει πιο κατανοητό θεωρούμε για παράδειγμα το ηλεκτρικό αυτοκίνητο Nissan Leaf (2015) με 24kWh χωρητικότητα μπαταρίας.

Όταν η μπαταρία του απαξιωθεί και προσεγγίσει το 80% της ονομαστικής του χωρητικότητας θα έχουν παραμείνει 19,2kWh. Για βάθος εκφόρτισης (DOD) 80%, παραμένουν περίπου 15kWh ωφέλιμης ηλεκτρικής ενέργειας προς αξιοποίηση [90]. Η χωρητικότητα αυτή είναι ικανοποιητική για να αποτελέσει για παράδειγμα αποθηκευτικό μέσο σε ένα αυτόνομο οικιακό φωτοβολταϊκό σύστημα με μικρές ενεργειακές απαιτήσεις.

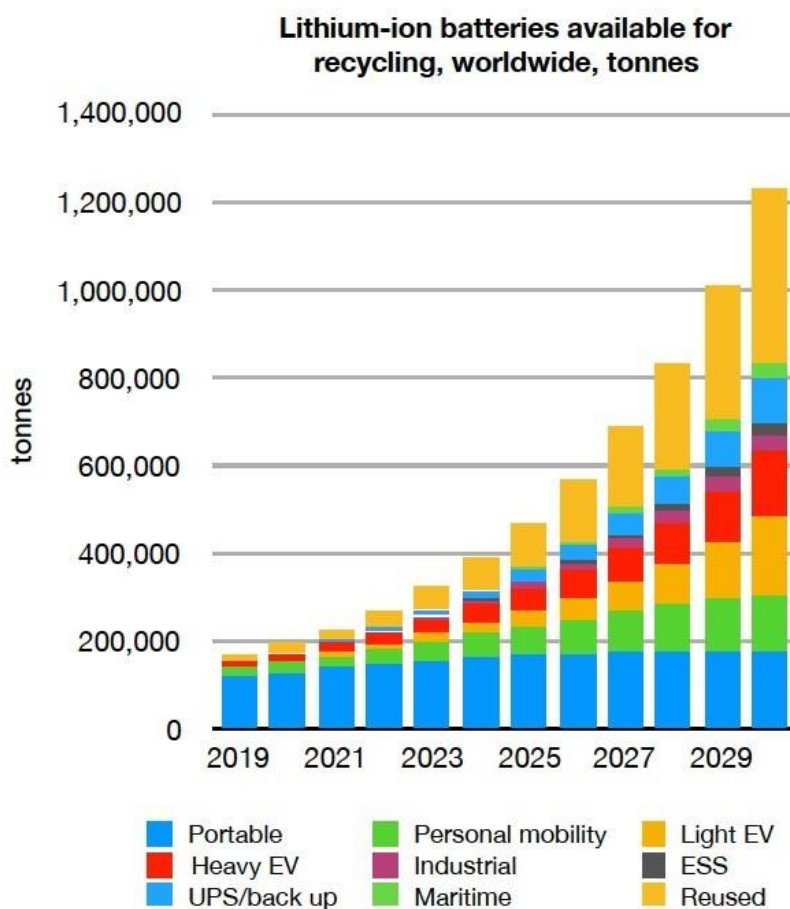
Οι δυνατότητες εφαρμογής της επαναχρησιμοποίησης είναι πολλές καθώς η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί μια διαρκώς επίκαιρη ανάγκη στον τομέα της τεχνολογίας. Ωστόσο, εκτός από την αξιοποίηση αυτών των μεταχειρισμένων μπαταριών, οι ερευνητές προειδοποιούν για το μεγάλο αναμενόμενο όγκο απαξιωμένων μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων που θα προκύψουν στο άμεσο μέλλον και για τις οποίες δεν υπάρχει σχέδιο

διαχείρισης. Σύμφωνα με το Bloomberg New Energy Finance [92] υπολογίζεται ότι η ετήσια σόρευση μεταχειρισμένων μπαταριών ηλεκτροκίνητων θα αγγίξει, με όρους χωρητικότητας, τις 185.5 GWh/yr το έτος 2025. Μεταξύ των πιο αισιόδοξων προβλέψεων βρίσκεται εκείνη των Haram et al [93] οι οποίοι αναφέρουν ότι η συνολικά σωρευμένη χωρητικότητα των απαξιωμένων μπαταριών από την ηλεκτροκίνηση θα προσεγγίσει τις 1000 GWh μέχρι το 2030, κάτι το οποίο απεικονίζεται στο παρακάτω γράφημα.



Σχήμα 10: Συνολική διαθέσιμη χωρητικότητα απαξιωμένων συσσωρευτών αναλογικά με τις πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων μέχρι το έτος 2030 [93].

Σε συνέχεια ερευνητικών προβλέψεων και συγκεκριμένα για την Ευρωπαϊκή Ένωση, οι Kastanaki & Giannis [94], προβλέπουν μέγιστο αριθμό μεταχειρισμένων μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων το 2035 ο οποίος θα ανέρχεται σε 7,9 εκατομμύρια και σε 18 εκατομμύρια το 2040. Σε συνέχεια των ερευνητικών αποτελεσμάτων που διεξήγαγαν, αυτός ο όγκος μπαταριών μεταφράζεται σε συνολική διαθέσιμη χωρητικότητα 212-317GWh. Η ενεργειακή ζήτηση από τον τομέα της ηλεκτροκίνησης ήταν 102 GWh το 2017 ενώ προβλέπεται να φθάσει τα 709 GWh το 2026 [95]. Τέλος παρατίθεται γράφημα από την πηγή [96] το οποίο αναπαριστά τη διαμόρφωση της συνολικής διαθέσιμης μάζας απαξιωμένων μπαταριών ιόντων λιθίου παγκοσμίως και τον τομέα προέλευσής τους. Σε αυτό είναι εμφανής η εκθετική αύξηση με το πέρασμα των χρόνων του μεριδίου των μπαταριών λιθίου που προέρχονται από ηλεκτρικά οχήματα, έναντι άλλων τομέων χρήσης.



Σχήμα 11: Εκθετική αύξηση του μεριδίου των μπαταριών λιθίου που προέρχονται από ηλεκτρικά οχήματα [96]

Στη συνέχεια αναφέρονται οι βασικότερες κατηγορίες εφαρμογών δευτερογενούς χρήσης μπαταριών.

- Υποστήριξη του δικτύου σε στιγμές που υπάρχει αυξημένη ζήτηση
- Υποστήριξη υποδομών ταχείας φόρτισης συνεχούς ρεύματος ηλεκτρικών οχημάτων
- Συνεργασία με ΑΠΕ και αποθήκευση ενέργειας
- Ενεργειακή αυτονομία και ανεξαρτητοποίηση από το δίκτυο σε απομονωμένες και μη περιοχές
- Συμμετοχή στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας με εφαρμογή στρατηγικών εμπορίας ενέργειας (Arbitrage)
- Ήπιες εφαρμογές ηλεκτροκίνησης μικρότερης κλίμακας

Πολλοί ερευνητές μελετούν τις εφαρμογές στις οποίες μπορούν να ανταποκριθούν οι επαναχρησιμοποιημένες μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων. Οι Casals et al [97] αναφέρουν την περίπτωση του project Sanbatt το οποίο αφορά μια πειραματική μελέτη στην Ισπανία σχετικά με την ανταπόκριση των μεταχειρισμένων μπαταριών σε διάφορες εφαρμογές. Για τις ανάγκες της ενέργειας επιστρατεύτηκαν 4 μπαταρίες με 8,8 kWh ονομαστική χωρητικότητα η κάθε μια όταν ήταν σε καινούρια κατάσταση. Εκείνες αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια η οποία παράγεται από φωτοβολταϊκό σύστημα  $8kW_p$  και στη συνέχεια το διοχετεύουν σε εφαρμογές ταχείας φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, υποστήριξη δικτύου, και ιδιοκατανάλωση για τις ενεργειακές ανάγκες κτιρίου. Τα αποτελέσματα του ημιεμπειρικού μοντέλου δείχνουν την αναμενόμενη διάρκεια ζωής μπαταριών για κάθε περίπτωση. Για την περίπτωση υποστήριξης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων οι μπαταρίες υπολογίζεται να αντέξουν 15 χρόνια. Για την υποστήριξη δικτύου υπολογίζεται προσδόκιμο ζωής περίπου 5 χρόνια ενώ για ιδιοκατανάλωση περίπου 6 χρόνια.

Οι Casals et al [98] υπολογίζουν το προσδόκιμο ζωής και μοντελοποιούν την απόδοση των επαναχρησιμοποιημένων μπαταριών για εφαρμογές όπως, εμπορίας ενέργειας (arbitrage), χρήση σε νησιωτική περιοχή και οικιακή αυτονομία. Η εμπορία ενέργειας (arbitrage), αφορά στην αγορά ενέργειας σε συγκεκριμένες περιόδους της ημέρας όπου η ζήτηση είναι μειωμένη και η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι πιο φθηνή. Σε εκείνες τις περιόδους φορτίζονται οι μπαταρίες από το δίκτυο και τις στιγμές που η ζήτηση και η τιμή της ενέργειας αυξάνουν, αξιοποιείται η αποθηκευμένη ενέργεια των μπαταριών.

Για αυτό το σενάριο θεωρήθηκε 100% βάθος εκφόρτισης (DOD) και υπολογίστηκε προσδόκιμο ζωής 8 χρόνια. Στην περίπτωση της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας από παραγωγή ΑΠΕ για οικιακή χρήση σε νησιωτική περιοχή, οι μπαταρίες συνεισφέρουν στο σύστημα όταν η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ δεν επαρκεί. Σημειώνεται ότι το σπίτι παραμένει συνδεδεμένο στο δίκτυο και οι μπαταρίες σε αυτή την περίπτωση λειτουργούν συμπληρωματικά με βάθος εκφόρτισης μόλις στο 50%. Δεδομένων των παραμέτρων αυτών, οι μπαταρίες υπολογίστηκε ότι έχουν προσδόκιμο ζωής τα 20 έτη. Τέλος στην περίπτωση ενεργειακής αυτονομίας οικιακών αναγκών από ΑΠΕ σε συνδυασμό με αποθήκευση ενέργειας οι μπαταρίες υπολογίστηκε ότι θα λειτουργούν για 8 έτη.

### 3.4 Η περίπτωση του Powerwall

Ένα φαινόμενο το οποίο εμφανίζεται ολοένα και πιο συχνά είναι οι διακοπές ρεύματος. Κάτι τέτοιο επηρεάζει άμεσα τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων μιας και αφενός τα ακινητοποιεί και αφετέρου διαταράσσεται το προφίλ φόρτισης. Η Tesla με στόχο να αντιμετωπίσει τέτοια φαινόμενα δημιούργησε οικιακά αποθηκευτικά συστήματα τα οποία λειτουργούν ως ταμειυτήρες ηλεκτρικής ενέργειας (powerbanks) [99].

Τα συστήματα αυτά αφορούν κυρίως σε οικιακή χρήση και συνεργάζονται με φωτοβολταϊκά πλαίσια ώστε να υπάρξει ενεργειακή αυτονομία σε περίπτωση διακοπής ρεύματος. Μέσω έξυπνου συστήματος διαχείρισης ορίζεται προτεραιότητα σε κάποια φορτία έναντι άλλων ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη αυτονομία. Ο συσσωρευτής powerwall έχει ενεργειακή χωρητικότητα 13,5 kWh και κοστίζει 12.850€. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν πωλείται ξεχωριστά παρά μόνο μαζί με φωτοβολταϊκό σύστημα από την Tesla το οποίο ανάλογα με τις ενεργειακές απαιτήσεις και τη διαστασιολόγηση μεταβάλλει την τιμή αγοράς του. Ωστόσο αναφέρεται ενδεικτικά ότι το κόστος ανέρχεται σε 20.000€ [100].

Γίνεται αντιληπτό ότι πρόκειται για μια αρκετά ακριβή λύση από την Tesla. Ως εναλλακτική λύση θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μεταχειρισμένες μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων μιας και μόνο θετικά στοιχεία έχουν να προσφέρουν. Η χημική σύσταση είναι παρόμοια αν όχι ίδια καθώς οι λύσεις της Tesla αφορούν μπαταρίες ιόντων λιθίου τύπου NMC. Επιπλέον η χωρητικότητα των συσσωρευτών δεύτερης ζωής είναι σαφώς μεγαλύτερη από εκείνη των powerwalls. Τέλος ο οικονομικός παράγοντας ο οποίος πάντα παίζει ρόλο ευνοεί την επαναχρησιμοποίηση με τις ήδη υπάρχουσες τιμές οι οποίες υπολογίζεται να μειωθούν στο μέλλον.

Προκλήσεις: Οικονομικές δυσκολίες (τεχνολογική αβεβαιότητα για το αν θα είναι ασφαλές, αποδοτικό, παραθέτω υπολογιστικά μοντέλα, εργαστηριακές μελέτες, προβλέψεις από διάφορους

#### Τεχνικές προκλήσεις

Μία τεχνική πρόκληση που αντιμετωπίζει η τεχνολογία της επαναχρησιμοποίησης μπαταριών είναι η ποικιλομορφία στη δομή και το σχήμα τους. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται με μικρές και μεγάλες διαφορές στη διαδικασία της μεταγενέστερης διαχείρισης των μπαταριών στο τέλος της ζωής τους. Μεταξύ διαφορετικού τύπου μπαταριών, μεταβάλλεται η διαδικασία της αποσυναρμολόγησης, του ελέγχου, όπως και η μεταφορά και αποθήκευση. Επιπλέον, οι

δομικές διαφορές των μπαταριών από διαφορετικούς κατασκευαστές ενδεχομένως να περιορίζει τη μεταξύ τους συνδυαστική χρήση σε εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας. Για παράδειγμα οι διαφορές στη θερμική διαχείριση μεταξύ των διάφορων τύπων μπαταριών καθορίζει το αν κάποιος συσσωρευτής απαιτεί την ύπαρξη συστήματος ψύξης σε αντίθεση με κάποιον άλλον [101].

Οι πιο κοινές κατηγορίες δομής κυψελών είναι η κυλινδρική, η πρισματική και η μορφή ακανόνιστου σχήματος (pouch). Οι πρώτες δύο δομές περιβάλλονται από άκαμπτο περίβλημα ενώ η τελευταία από ένα λεπτό φιλμ από πλαστικό και αλουμίνιο που της δίνει την ικανότητα να συμπιέζεται και να μεταβάλλει το σχήμα της. Χαρακτηριστικά παραδείγματα κάθε κατηγορίας αποτελούν το Tesla M3 με κυλινδρική δομή, το BMW i3 με πρισματική δομή και το Nissan Leaf με ακανόνιστη δομή (pouch) [104].

Όσο η τεχνολογία της δευτερογενούς χρήσης μπαταριών αναγνωρίζεται από την επιστημονική κοινότητα και κλιμακώνεται παγκοσμίως, τόσο μεγαλύτερη γίνεται η ανάγκη δημιουργίας νομοθετικών πλαισίων που θα προβλέπει κοινή κατασκευαστική δομή όλων των μπαταριών. Οι κατασκευαστές οφείλουν να εντάξουν την επαναχρησιμοποίηση και στη συνέχεια ανακύκλωση των μπαταριών ως απαραίτητη προϋπόθεση από το στάδιο της κατασκευής τους. Η βιομηχανία κατασκευής μπαταριών ιόντων λιθίου έχει τη δυνατότητα να ορίσει κατασκευαστικά πρότυπα που θα προβλέπουν την ομοιογένεια όλων των μπαταριών στην ηλεκτροκίνηση ώστε να διευκολυνθεί η αυτοματοποίηση της μετέπειτα διαχείρισης αυτών.

### **Οικονομικές προκλήσεις**

Μετά την απόσυρση του συσσωρευτή από το ηλεκτρικό όχημα, εκείνος δύναται να χρησιμοποιηθεί αυτούσιος για δευτερογενή χρήση. Ωστόσο, προκειμένου να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία και μακροζωία του μπορεί να περάσει από κάποια στάδια αποσυναρμολόγησης και ελέγχου πριν αξιοποιηθεί για άλλη εφαρμογή. Οι Rallo et al [35] θεωρούν ότι πρέπει να προηγηθούν συγκεκριμένες ενέργειες προετοιμασίας της μπαταρίας για να επαναχρησιμοποιηθούν. Εκείνες αφορούν την αποσυναρμολόγηση σε επίπεδο συστοιχίας ή ακόμα και κελιών και την επανατοποθέτηση με όμοια συνδεσμολογία ή μη, ανάλογα με τις μελλοντικές ενεργειακές ανάγκες και χωροταξικά ζητήματα.

Εξαιτίας της έλλειψης τυποποίησης, λόγω της ποικιλομορφίας των μπαταριών, η αποσυναρμολόγηση πραγματοποιείται χειροκίνητα και όχι αυτοματοποιημένα. Όπως είναι αναμενόμενο, απαιτούνται παραπάνω εργατικά χέρια και ο ανάλογος χρόνος για αυτές τις διαδικασίες, ενώ όπως αναμένεται, αυτό αντανακλά και στο κόστος. Οι ίδιοι ερευνητές μετά

από ολική συναρμολόγηση μπαταρίας από ηλεκτρικό Smart ForFour ονομαστικής χωρητικότητας 17,6kWh καταλήγουν στα κόστη αποσυναρμολόγησης ανά επίπεδο ως εξής:

<b>Αποσυναρμολόγηση σε επίπεδο:</b>	<b>Συνολικό κόστος (€)</b>	<b>€/kWh</b>
Μπαταρίας	558	32
Συστοιχιών	1058	60
Κελιών (κυψελών)	1333	76

Όπως είναι αναμενόμενο, όσο αυξάνεται το επίπεδο αποσυναρμολόγησης και η μπαταρία αναλύεται σε μικρότερα δομικά στοιχεία της τόσο ανεβαίνει το κόστος της διαδικασίας. Οι ερευνητές καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η διαδικασία της αποσυναρμολόγησης, του τεχνικού ελέγχου καθώς και της επανασυναρμολόγησης δε συμφέρει οικονομικά και στέκεται εμπόδιο στην ανάπτυξη της τεχνολογίας επαναχρησιμοποίησης των μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων. Υπογραμμίζουν ότι με τις παρούσες συνθήκες και την έλλειψη αυτοματοποίησης είναι προτιμότερο να αξιοποιούνται οι μεταχειρισμένες μπαταρίες χωρίς να προηγείται επεξεργασία ακόμα και αν αυτό επιδράσει αρνητικά στη συνολική διάρκεια ζωής τους [35].

Σε συνέχεια των προηγούμενων, πρέπει να συνυπολογιστεί και κάποιος χώρος ικανός να φιλοξενήσει έστω προσωρινά το μεγάλο όγκο απαξιωμένων μπαταριών για να γίνουν αυτές οι διεργασίες αλλά και για αποθήκευση. Επομένως η ενσωμάτωση των logistics όπως και η μεταφορά των μπαταριών από το σημείο Α στο σημείο Β αποτελούν συνιστώσες επιπρόσθετου κόστους και αύξηση του συνολικού κόστους αγοράς.

Εξετάζοντας τη διαθέσιμη βιβλιογραφία προκύπτει το συμπέρασμα ότι η τιμή πώλησης των επαναχρησιμοποιημένων μπαταριών είναι ο καθοριστικός παράγοντας που θα κρίνει τη βιωσιμότητα της τεχνολογίας αυτής. Οι απόψεις δίστανται στο θέμα αυτό καθώς εντοπίζονται από πολύ αισιόδοξες προβλέψεις έως και πολύ απαισιόδοξες. Οι Haram et al [93] αναφέρουν ότι η συνολική βιβλιογραφία καταλήγει σε ένα μεγάλο εύρος πιθανών τιμών πώλησης μεταχειρισμένων μπαταριών που κυμαίνεται από 43€/kWh έως 300€/kWh, ενώ δεν είναι λίγες οι εκτιμήσεις ερευνητών που θεωρούν ότι η τιμή πώλησης θα βρίσκεται κάτω από 100€/kWh.

1 <sup>st</sup> life in EVs	2 <sup>nd</sup> life in Stationary Application
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltage required: 400 V</li> <li>• Operating hours for 10A: ~16,800 h (on)</li> <li>• Ambient temperature: -40 to 60 Degree Celsius</li> <li>• C rates: <ul style="list-style-type: none"> <li>• If Continuous: 2 to 3 C</li> <li>• If Peak: &gt; 5C</li> </ul> </li> <li>• Thermal Management: Active (Air/Liquid)</li> <li>• Vibration: Yes (due EV Movement)</li> <li>• SOH: 100% (at beginning of 1<sup>st</sup> life )</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltage required: ~ 800 - 1000 V</li> <li>• Operating hours for 10A: max. 87,800 h (on)</li> <li>• Ambient temperature: 10 to 35 Degree Celsius</li> <li>• C rates: <ul style="list-style-type: none"> <li>• If Continuous: &lt; 0.5 C</li> <li>• If Peak: 0.2 to 2 C</li> </ul> </li> <li>• Thermal Management: Passive (only active in specific use cases with critical temperatures)</li> <li>• Vibration: None (Stationary)</li> <li>• SOH: 70-90% (at beginning of 2<sup>nd</sup> life )</li> </ul>

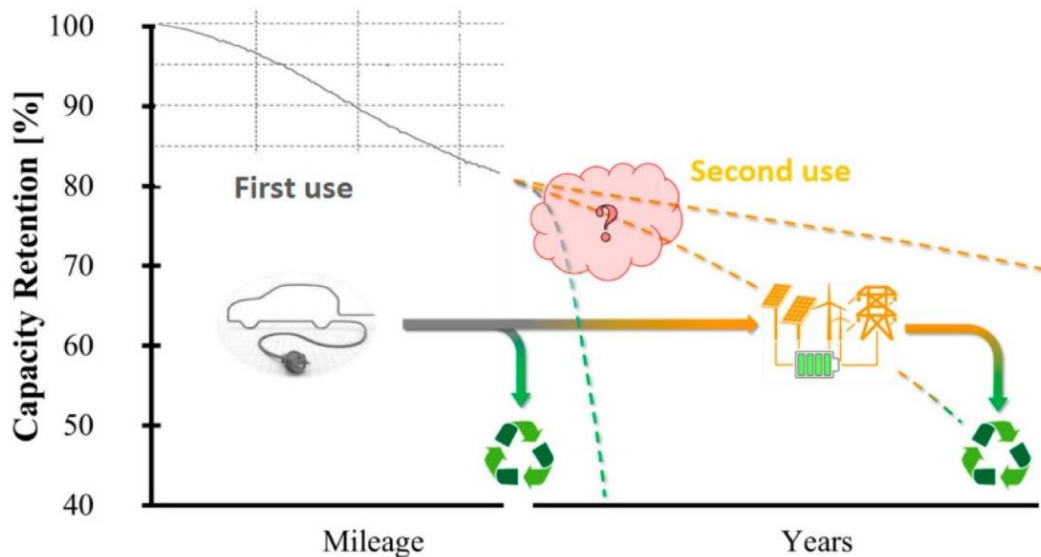
Εικόνα 6: Σύγκριση ενεργειακών απαιτήσεων του οχήματος έναντι εφαρμογών δευτερογενούς χρήσης συσσωρευτών [103]

Σύμφωνα με το άρθρο [104] οι ερευνητές υποβάλουν σε πειραματικές δοκιμές κελιά (κυψέλες) από μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων ώστε να προσομοιώσουν την λειτουργία τους σε οικιακή εφαρμογή αποθήκευσης ενέργειας σε συνδυασμό με ΑΠΕ και υποστήριξη - σταθεροποίηση ηλεκτρικού δικτύου. Συμπεραίνουν ότι εξαιτίας της ανομοιογένειας της υγείας των κελιών σε μια μπαταρία, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο το ιστορικό και η λειτουργία της κατά το πρώτο στάδιο της ζωής της, όσο εκείνη εξυπηρετούσε τους σκοπούς του οχήματος. Ως εκ τούτου, θεωρούν ότι πρέπει να υπάρχει κοινή γραμμή και συνεννόηση από τους κατασκευαστές ώστε να προάγονται οι κατάλληλες μπαταρίες για δεύτερη ζωή και η επαναχρησιμοποίηση να γίνει τεχνικά βιώσιμη.

Αξίζει να σημειωθεί ότι παρά τις συστάσεις των κατασκευαστών για αντικατάσταση της μπαταρίας του ηλεκτρικού αυτοκινήτου μετά το 70-80% της αρχικής της χωρητικότητας, ορισμένοι χρήστες ενδεχομένως να μην συμμορφωθούν με αυτές. Ειδικότερα, αν οι ανάγκες μεταφοράς τους καλύπτονται με μειωμένη χωρητικότητα και ισχύ, ενδέχεται να αναβάλλουν την αντικατάσταση της περιμένοντας να απαξιωθεί περισσότερο [46].

Αντίστοιχες πρακτικές υπονομεύουν τη λογική της επαναχρησιμοποίησης και δεν προσφέρουν κάποιο σημαντικό όφελος στο χρήστη του οχήματος. Πιο συγκεκριμένα, σε αντάλλαγμα των ελάχιστων επιπλέον χιλιομέτρων που θα κερδίσει ο χρήστης, όταν τελικά εκ των υστέρων προβεί στην αντικατάσταση της μπαταρίας εκείνη θα έχει απαξιωθεί πλήρως και δε θα μπορεί να υποστηρίξει άλλες εφαρμογές. Αυτό αποτελεί αφορμή για τους κρατικούς θεσμούς ώστε να προσφέρουν κίνητρα στους αγοραστές των ηλεκτρικών οχημάτων, προτρέποντάς τους να αντικαθιστούν τη μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος τους εντός των επιθυμητών ορίων.





Εικόνα 7: Αξιοποίηση και κατάληξη συσσωρευτών ανάλογα με τα επίπεδα φθοράς τους [37]

Η ιδέα της επαναχρησιμοποίησης μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων στην πραγματικότητα δεν αποτελεί καινοτομία. Πρόκειται για μια τεχνολογική ιδέα η οποία υπάρχει από την περίοδο που πρωτοεμφανίστηκαν τα υβριδικά οχήματα. Πάνω από μια δεκαετία αργότερα, και μετά από αρκετές πιλοτικές εφαρμογές, η τεχνολογία δεν έχει ενταχθεί στο παραγωγικό μοντέλο της αυτοκινητοβιομηχανίας ως προαπαιτούμενο. Δηλαδή, δεν προβλέπεται νομικά η ευθύνη από κάποιον κατασκευαστή ή φορέα να αναλάβει τη διαχείριση της μπαταρίας μετά την ολοκλήρωση του αρχικού σκοπού της στο όχημα [89].

Η θέση αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι ότι η αβεβαιότητα σε επίπεδο τεχνολογίας είναι ο παράγοντας κλειδί ο οποίος "φρενάρει" την εξάπλωση της. Πιο συγκεκριμένα, η αβεβαιότητα σχετικά με την απόδοση και την αντοχή στο χρόνο μετά το 80% του επιπέδου υγείας της μπαταρίας. Κάτι το οποίο εντείνει αυτή την αβεβαιότητα είναι ότι οι ίδιοι οι κατασκευαστές των μπαταριών δεν προβλέπουν την επαναχρησιμοποίηση αυτών για άλλες εφαρμογές εκτός του οχήματος. Αυτό συνεπάγεται με την απουσία κάποιας εγγύησης σωστής και μακροχρόνιας λειτουργίας για τους υποψήφιους επενδυτές.

Οι τελευταίοι επομένως καλούνται να προχωρήσουν σε μια αρχική επένδυση η οποία ενδέχεται να μην αποσβεσθεί ποτέ. Σε αυτόν τον προβληματισμό πολλοί ερευνητές αναλύουν τους μηχανισμούς γήρανσης και με τη βοήθεια πειραματικών και θεωρητικών μοντέλων ποσοτικοποιούν τις δυνατότητες των μεταχειρισμένων μπαταριών.

### 3.5 Case studies

#### *Συνεργασία με κεντρικό Φ/Β σταθμό - ΗΠΑ*

Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής στην τοποθεσία του Εθνικού πάρκου Yellowstone, με τη βοήθεια 208 μεταχειρισμένων μπαταριών από το υβριδικό μοντέλο της Toyota Camry ηλεκτροδοτούνται οι κτηριακές υποδομές του ράντσου Lamar Buffalo. Μετά από έλεγχο σωστής λειτουργίας της κάθε μπαταρίας και την κατάλληλη συνδεσμολογία, δημιουργήθηκε ένα αποθηκευτικό μέσο χωρητικότητας 85kWh το οποίο συνεργάζεται αρμονικά με φωτοβολταϊκό σύστημα και παρέχει ηλεκτρική αυτονομία στις εγκαταστάσεις. Για υπερκάλυψη των αναγκών επιστρατεύτηκε και μικρό υδροηλεκτρικό [105].



Εικόνα 8: Εθνικό πάρκο Yellowstone [105]

#### *Σταθεροποίηση – Υποβοήθηση κεντρικού δικτύου στο Αμβούργο*

Η Vattenfall, η BMW και η Bosch, στα πλαίσια μιας κοινοπραξίας το 2016 στο Αμβούργο, επιχείρησαν τη δευτερογενή χρήση μπαταριών ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Συγκεκριμένα κατασκεύασαν μια μονάδα αποθήκευσης ενέργειας με συνολική ονομαστική ισχύ 2MW και χωρητικότητα 2.800kWh με σκοπό τη λειτουργική εξομάλυνση του κεντρικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα, ο στόχος της εγκατάστασης είναι η άμεση ανταπόκριση σε αστάθειες του συστήματος ώστε να διατηρείται η συχνότητα του δικτύου στα 50Hz.

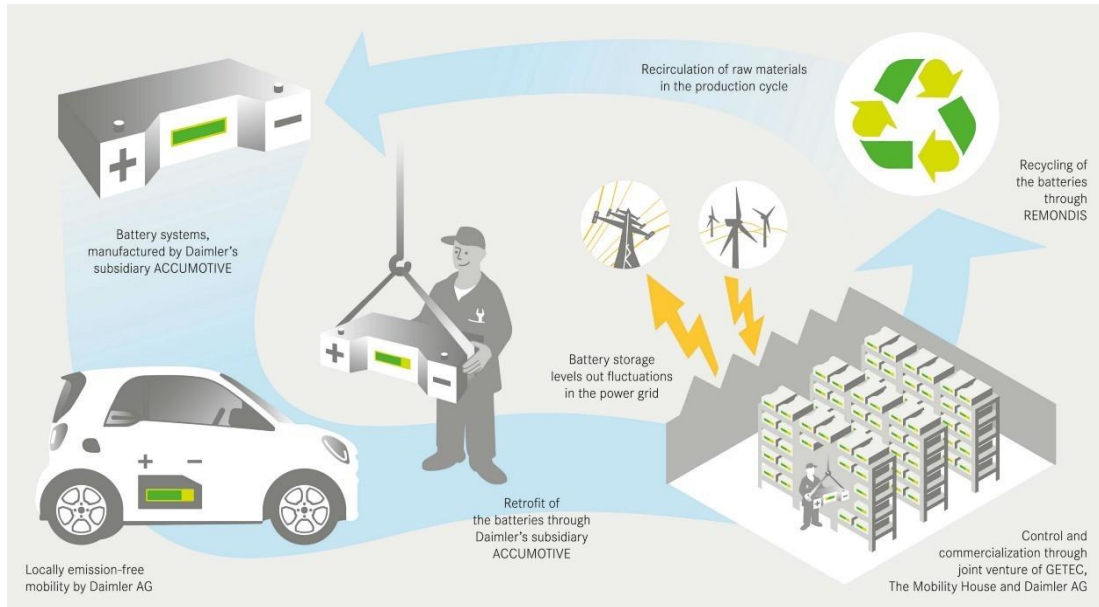
Η εγκατάσταση χρησιμοποιεί τις μπαταρίες από περισσότερα από 100 ηλεκτρικά αυτοκίνητα της εταιρίας BMW για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι με βάση τη δυναμικότητα της, η εν λόγω εγκατάσταση θα μπορούσε να παρέχει ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα μέσο νοικοκυριό δύο ατόμων για επτά μήνες συνεχόμενα [106].



Εικόνα 9: Εγκαταστάσεις της μονάδας [106]

***Μεγάλης κλίμακας μονάδα ηλεκτροπαραγωγής – αποθήκευσης – ανακύκλωσης και κατασκευής στο Λούνεν***

Σε μια κοινή προσπάθεια, οι εταιρείες Remondis, Daimler AG, Mobility House AG και GETEC κατασκεύασαν το 2016 μεγάλης κλίμακας μονάδας αποθήκευσης ενέργειας, στο Λούνεν της Γερμανίας. Η μονάδα κατασκευάστηκε σε λιγότερο από 12 μήνες και έχει δυναμικότητα αποθήκευσης 13MWh μέσα από 1.000 χρησιμοποιημένες μπαταρίες από ηλεκτρικά αυτοκίνητα τύπου Smart. Η εγκατάσταση αποσκοπεί σε μια συνεχή κυκλική ολική λειτουργία η οποία θα διακρίνεται σε επιμέρους λειτουργίες για τις οποίες θα είναι αρμόδια η κάθε εταιρία από τις προαναφερθείσες με βάση το αντικείμενο απασχόλησης. Αρχικά περιλαμβάνεται το στάδιο ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας και διάθεση της στον καταναλωτή ή στο δίκτυο. Στη συνέχεια η ανακύκλωση των συσσωρευτών οι οποίοι έχουν φτάσει στο τέλος και της δεύτερης ζωής τους. Ο κύκλος θα ολοκληρώνεται με τη διάθεση των πρώτων υλών οι οποίες θα προκύπτουν από την ανακύκλωση, για την εκ νέου κατασκευή καινούργιων μπαταριών για τον ίδιο τύπο αυτοκινήτων [107].

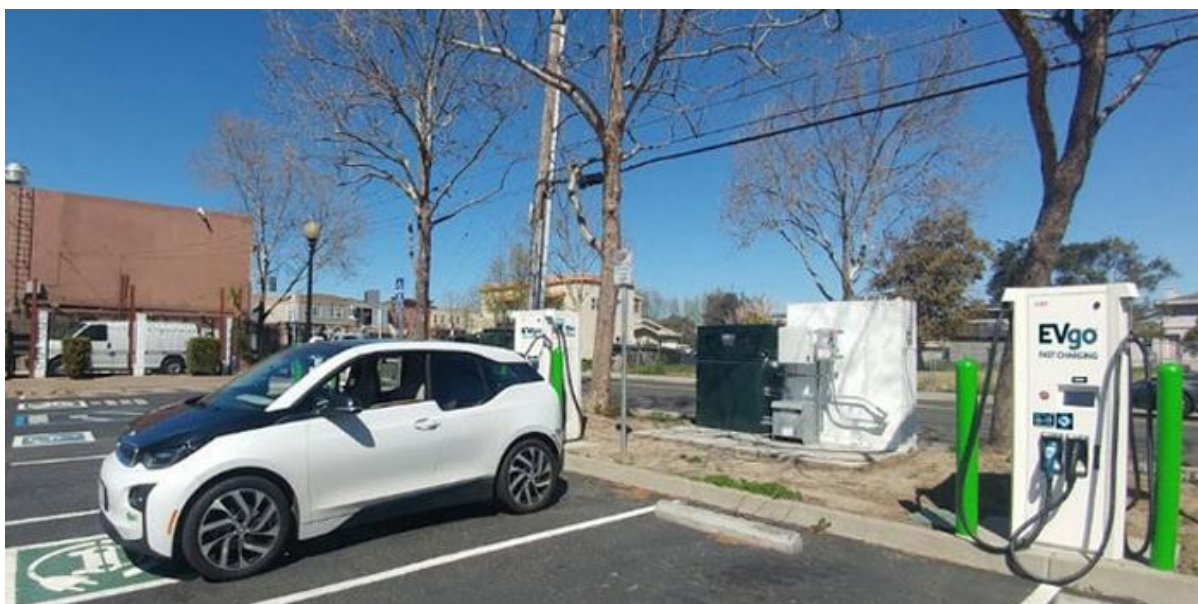


Εικόνα 10: Σχηματική επεξήγηση της λειτουργίας της μονάδας [107]

### **Σταθμός ταχείας φόρτισης - Σαν Ντιέγκο, Καλιφόρνια**

Η αμερικάνικη εταιρία EVgo, η οποία δραστηριοποιείται στα δίκτυα και τους σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, σε συνεργασία με την BMW, το 2018 αξιοποιεί τη δευτερογενή χρήση μπαταριών ΗΟ. Συγκεκριμένα τοποθετεί εφεδρική μονάδα αποθήκευσης ενέργειας μέσω μεταχειρισμένων μπαταριών από BMW i3 η οποία υποστηρίζει την ταχεία φόρτιση συνεχούς ρεύματος του σταθμού. Η μονάδα βρίσκεται στον πανεπιστημιακό χώρο του Σαν Ντιέγκο στην Καλιφόρνια. Αποτελείται από 2 συστοιχίες 4 συνολικά μπαταριών, όπου η κάθε συστοιχία έχει δυναμικότητα 30kW /44kWh. Οι μπαταρίες φορτίζονται από το δίκτυο τις ώρες χαμηλής ενεργειακής ζήτησης [108].





Εικόνα 11: Απεικόνιση του σταθμού ταχείας φόρτισης στον πανεπιστημιακό χώρο του Σαν Ντιέγκο [108]

### ***Στάδιο "Amsterdam Arena" - Άμστερνταμ***

Στα τέλη του 2016, η εταιρείες Mobility House, Nissan και Eaton υπέγραψαν 10ετή συμφωνία για την ενεργειακή αναβάθμιση του σταδίου "Amsterdam Arena" με τη δευτερογενή χρήση μπαταριών ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Από τότε, το εν λόγω στάδιο, το οποίο αποτελεί και την έδρα της ποδοσφαιρικής ομάδας του Ajax FC, αποκτά τη δική του μονάδα αποθήκευσης ενέργειας μέσα από 280 μπαταρίες "δεύτερης ζωής" τις οποίες παρείχε η Nissan από το ομώνυμο μοντέλο Leaf.

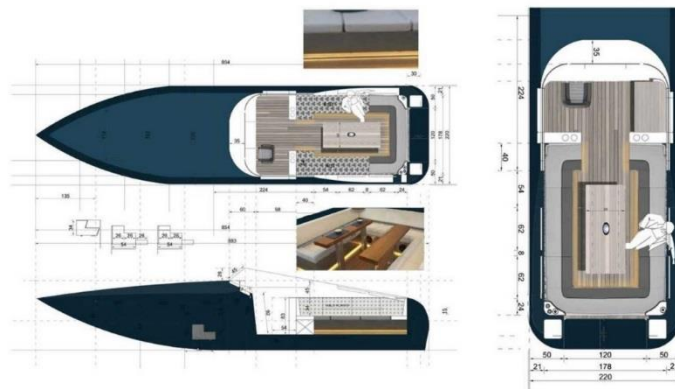
Με δυναμικότητα 4MW και 4MWh αντίστοιχα, το στάδιο χωρητικότητας 55.000 θέσεων διαχειρίζεται την ηλεκτρική του ενέργεια αποτελεσματικά, βιώσιμα και αξιόπιστα. Στόχος είναι η εξασφάλιση ενεργειακής κάλυψης σε ποδοσφαιρικούς αγώνες, αλλά και σε εκδηλώσεις οι οποίες πραγματοποιούνται εκεί. Επιπλέον η επένδυση αυτή επιτρέπει την κατάργηση των πετρελαιοκίνητων ηλεκτρογεννητριών για την εξασφάλιση εφεδρικού ηλεκτρικού ρεύματος. Τέλος θέτει τα θεμέλια για πιθανή ενδεχόμενη συνεργασία με ΑΠΕ και πλήρη ενεργειακή ανεξαρτητοποίηση του σταδίου από το κεντρικό δίκτυο [109].



Εικόνα 12: Απεικόνιση του σταδίου Amsterdam Arena [109]

### ***Μικρό ηλεκτρικό σκάφος - Παρίσι***

Στον ποταμό Σηκουάνα στη Γαλλία δραστηριοποιείται ένα μικρό ηλεκτρικό σκάφος προσφέροντας τη δυνατότητα κρουαζιέρας. Το εν λόγω επιβατηγό σκάφος μπορεί να μεταφέρει 2-8 άτομα έως και 2 ώρες κατά μήκος του ποταμού. Η πηγή ενέργειας του συστάθηκε από 4 μεταχειρισμένες μπαταρίες από Renault ZE με ονομαστική χωρητικότητα 22kWh έκαστη και τροφοδοτείται από ηλεκτροκινητήρα ισχύος 20kW. Η μηχανολογική σχεδίαση έγινε από τη ναυτιλιακή εταιρεία Seine Alliance η οποία έχει θέσει σαν στόχο της τον εξηλεκτρισμό του στόλου της μέχρι το 2024. Οι μπαταρίες με τον ηλεκτροκινητήρα ζυγίζουν μόλις 278kg, προσφέροντας λύση μικρότερου βάρους σε σχέση με την εναλλακτική χρήση βενζινοκινητήρων και καυσίμου. Το αποτέλεσμα είναι η επίτευξη μιας ήσυχης και αρμονικής μετακίνησης χωρίς θόρυβο και κραδασμούς με ικανοποιητική αυτονομία, η οποία είναι ταυτόχρονα φιλική προς το περιβάλλον και τους υδρότοπους της Γαλλίας [110].

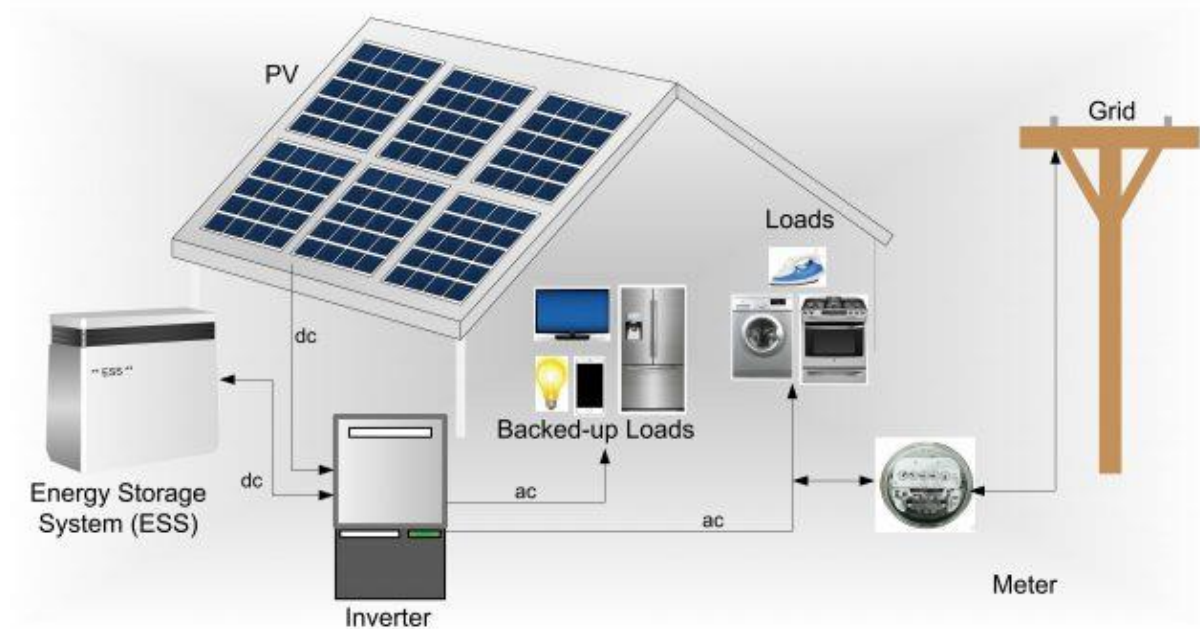


Εικόνα 13: Σκάφος με μπαταρίες HO δευτερογενούς χρήσης [110]

# Κεφάλαιο 4 Μεθοδολογικό πλαίσιο & μελέτη περίπτωσης

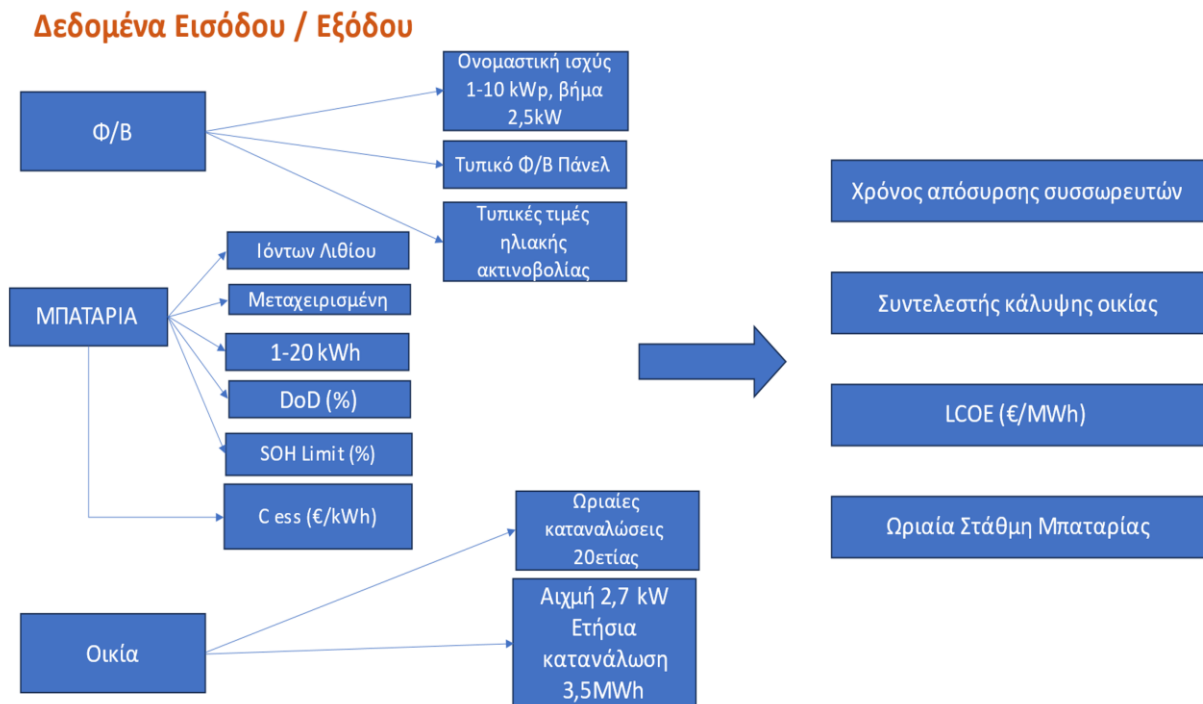
## 4.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο

Σε συνέχεια της ανωτέρω ανάλυσης, στο παρόν κεφάλαιο διαμορφώνεται πρόβλημα προσομοίωσης, με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης της γήρανσης των συσσωρευτών στο σχεδιασμό αλλά και τη μακροχρόνια λειτουργία οικιακών συστημάτων ΑΠΕ-συσσωρευτών για εφαρμογές αυτοπαραγωγής. Θεωρώντας ενσωμάτωση συσσωρευτών δεύτερης ζωής σε συνδυασμό με Φ/Β, το πεδίο μελέτης μας αναφέρεται σε συστήματα περιορισμένου αρχικού κόστους, καθώς και δεν λαμβάνει υπόψη την προσθήκη επικουρικής συνιστώσας παραγωγής, π.χ. αιολικής, εξυπηρετώντας αυτόν ακριβώς το σκοπό. Την ίδια στιγμή, και για τη διασφάλιση της επάρκειας τροφοδοσίας, το υπό εξέταση σχήμα αυτοπαραγωγής λαμβάνει υπόψη τη δυνατότητα επίσης εισαγωγών ενέργειας από το δίκτυο, για την κάλυψη αναγκών σε ιδιοκατανάλωση, χωρίς να μελετά τη δυνατότητα περαιτέρω αλληλεπίδρασης με το δίκτυο στο πλαίσιο εφαρμογής στρατηγικών εμπορίας, στις οποίες αναφερθήκαμε και προγενέστερα. Για την καλύτερη κατανόηση της μελέτης περίπτωσης παρακάτω απεικονίζεται ένα σκαρίφημα της εγκατάστασης:



Εικόνα 14: Σκαρίφημα εγκατάστασης

Το ολοκληρωμένο πλαίσιο διαμόρφωσης του υπό εξέταση προβλήματος παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα, όπου πέραν των ανωτέρω, αποτυπώνονται επίσης τα εύρη διακύμανσης των δύο βασικών σχεδιαστικών παραμέτρων που απαντούν στη θεωρούμενη Φ/Β ισχύ και τη χωρητικότητα των συσσωρευτών, η υιοθέτηση τυπικού προφίλ ηλεκτρικής ζήτησης για οικιακό καταναλωτή και η εφαρμογή εμπειρικού μοντέλου γήρανσης - υποβάθμισης της χωρητικότητας των συσσωρευτών με βάση δημοσιευμένα ερευνητικά αποτελέσματα.



Σχήμα 4.1 : Δεδομένα εισόδου / εξόδου του προβλήματος

Στη βάση αυτών, αναπτύσσεται κατάλληλο υπολογιστικό πλαίσιο για την μακροχρόνια προσομοίωση της λειτουργίας παρόμοιων συνδυασμών (20ετής ορίζοντας προσομοίωσης), επιτρέποντας με τον τρόπο αυτό την ενσωμάτωση στο πρόβλημα της σταδιακής υποβάθμισης των συσσωρευτών στο χρόνο, θεωρώντας ταυτόχρονα μέγιστη διάρκεια ημερολογιακής ζωής 20 ετών.

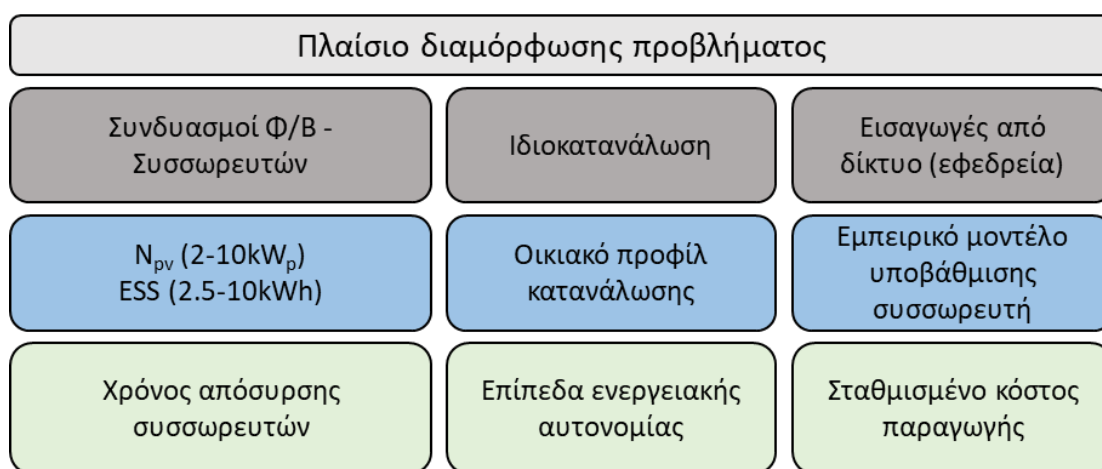
Τέλος, και αναφορικά με τους βασικούς δείκτες αξιολόγησης των υπό εξέταση συνδυασμών, πρόκειται να μελετηθούν:

- Ο **χρόνος απόσυρσης των συσσωρευτών**, ο οποίος καθορίζεται αφενός από το βαθμό χρησιμοποίησης του συσσωρευτή, αφετέρου από το θεωρούμενο μοντέλο υποβάθμισης της χωρητικότητας, το όριο απόσυρσης για την ωφέλιμη χωρητικότητα



του συσσωρευτή, που εν προκειμένω τίθεται ίσο με το 20% επί της αρχικής ωφέλιμης χωρητικότητας του συσσωρευτή δεύτερης ζωής, και το επιτρεπόμενο μέγιστο βάθος εκφόρτισης που επιλέγεται.

- Τα **επίπεδα ενεργειακής αυτονομίας** που επιτυγχάνονται (ποσοστό κάλυψης αναγκών σε ιδιοκατανάλωση) με τη χρήση του υπό εξέταση κάθε φορά συνδυασμού Φ/Β – συσσωρευτών για το σύνολο της 20ετούς περιόδου μελέτης, λαμβάνοντας υπόψη τη σταδιακή υποβάθμιση των συσσωρευτών η οποία σηματοδοτεί ολοένα και μεγαλύτερη εξάρτηση από το τοπικό δίκτυο, με ενισχυμένες εισαγωγές ενέργειας.
- Το **σταθμισμένο κόστος παραγωγής ενέργειας (LCOE)** του υπό εξέταση κάθε φορά συνδυασμού για 20ετή και πάλι ορίζοντα, συνυπολογίζοντας πέραν του κόστους επένδυσης και του κόστους συντήρησης, τα λειτουργικά έξοδα για την αγορά ενέργειας από το τοπικό δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας συνδέεται με την επικρατούσα (ωριαία) τιμή της ενέργειας στη χονδρεμπορική αγορά, λαμβάνοντας επίσης υπόψη προσαύξηση 50% για την κάλυψη του περιθωρίου κέρδους του παρόχου.



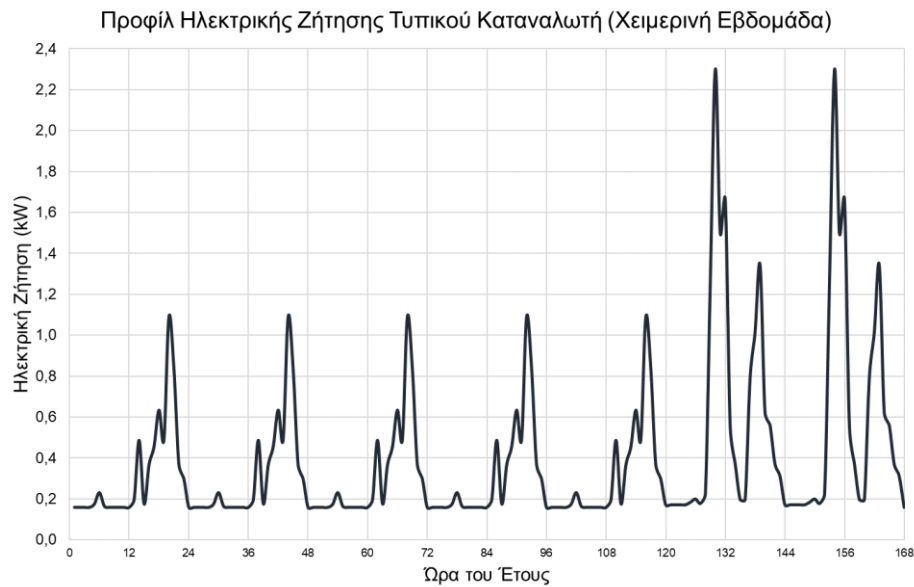
Σχήμα 4.2 – Το πλαίσιο διαμόρφωσης του υπό εξέτασης του προβλήματος

## 4.2 Μελέτη περίπτωσης

Για την εφαρμογή και την αξιολόγηση του μεθοδολογικού πλαισίου το οποίο αναπτύχθηκε συνοπτικά στην προηγούμενη ενότητα, εξετάζουμε τυπική μελέτη περίπτωσης στη βάση των ακόλουθων δεδομένων εισόδου και παραδοχών:

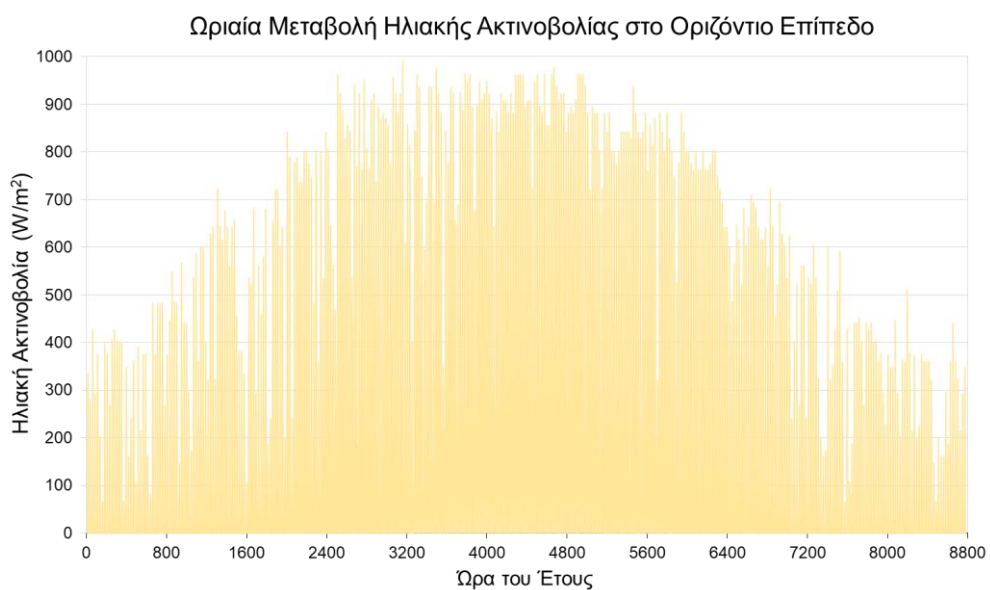
- **Προφίλ ηλεκτρικής ζήτησης τυπικού καταναλωτή:** Θεωρείται τυπικό προφίλ ζήτησης οικιακού καταναλωτή, σε ωριαία βάση και για ένα πλήρες έτος, το οποίο

επαναλαμβάνεται για όλη την 20ετία. Η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας τοποθετείται στα επίπεδα των 3.5MWh, με αιχμή ζήτησης της τάξης των 2.7kW.



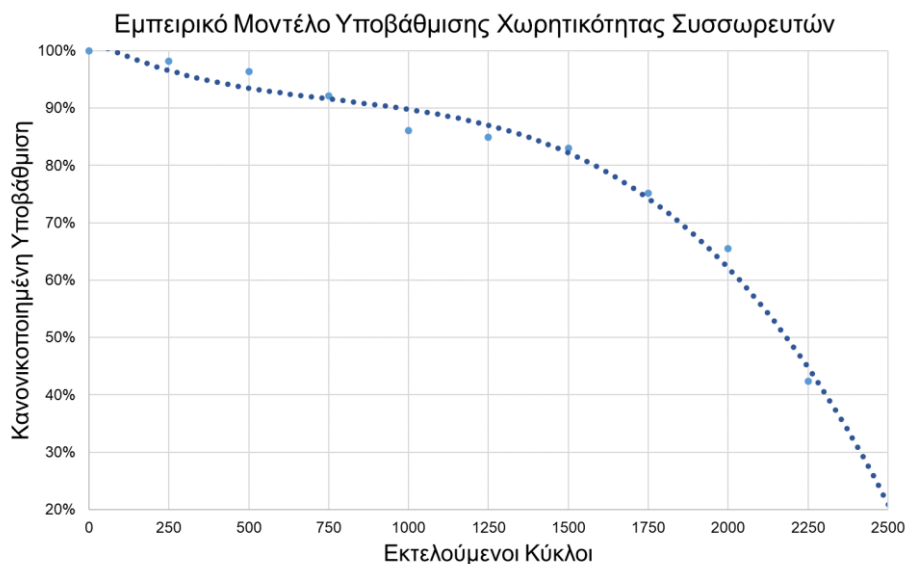
Σχήμα 4.3 – Προφίλ ηλεκτρικής κατανάλωσης

- **Μέσης ποιότητας ηλιακό δυναμικό:** Θεωρείται δυναμικό στα επίπεδα των 1580kWh/m<sup>2</sup> στο οριζόντιο επίπεδο, χωρίς να εξετάζεται η επίδραση της μεταβολής γωνίας κλίσης των πλαισίων. Όπως και στην περίπτωση της ηλεκτρικής ζήτησης, το εν λόγω προφίλ διατηρείται σταθερό καθόλη τη διάρκεια της 20ετίας.



Σχήμα 4.4 – Προφίλ ηλιακής ακτινοβολίας

- Εμπειρικό μοντέλο υποβάθμισης της χωρητικότητας των συσσωρευτών:** Το τελευταίο προέκυψε μέσω αξιοποίησης πειραματικών αποτελεσμάτων από δημοσιευμένη επιστημονική εργασία που εστιάζει στη μελέτη της γήρανσης απαξιωμένων συσσωρευτών Η/Κ οχημάτων Nissan Leaf (ωφέλιμη χωρητικότητα 80% επί της ονομαστικής) για τεχνολογία συσσωρευτών ιόντων λιθίου [111]. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα των ερευνητών, εξήχθη πολυωνυμική σχέση που συσχετίζει την υποβάθμιση της ωφέλιμης χωρητικότητας των συσσωρευτών συναρτήσει των αθροιστικά εκτελούμενων κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης, δίνοντας έτσι την δυνατότητα για ενσωμάτωση στο πρόβλημα της σταδιακής απαξίωσης των συσσωρευτών.



Σχήμα 4.5 – Συσχέτιση κανονικοποιημένης υποβάθμισης και εκτελούμενων κύκλων

- Τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β πλαισίων και συσσωρευτών:** Θεωρούνται σύγχρονα, τυπικά Φ/Β πλαίσια που για το εν λόγω ηλιακό δυναμικό οδηγούν σε ετήσιο συντελεστή φορτίου της τάξης του 17.8%. Την ίδια στιγμή, οι συσσωρευτές, πέραν της μεταβλητής του μέγιστου βάθους εκφόρτισης, χαρακτηρίζονται από σταθερούς βαθμούς απόδοσης για τον κλάδο φόρτισης και εκφόρτισης (85% και στις δύο περιπτώσεις) που οδηγεί σε συνολικό βαθμό απόδοσης του αποθηκευτικού μέσου ίσο με 72.25%. Ο τελευταίος θεωρείται ως σχετικά περιορισμένος, αντισταθμίζοντας με τον τρόπο αυτό την παραδοχή για διατήρησή του σε όλη την περίοδο της 20ετίας.

### 4.3 Υπολογιστικό εργαλείο και προσέγγιση

Για την προσομοίωση του υπό εξέταση προβλήματος αναπτύχθηκε κώδικας VBA, σε περιβάλλον Excel. Ως δεδομένα εισόδου αξιοποιήθηκαν οι ωριαίες χρονοσειρές του φορτίου ζήτησης και του ηλιακού δυναμικού, που με την ενσωμάτωση επίσης των υπόλοιπων παραμέτρων όπως τα τεχνικά χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων και των συσσωρευτών, της συνάρτησης υποβάθμισης των συσσωρευτών, του επιθυμητού μέγιστου βάθους εκφόρτισης, του ορίου απόσυρσης των συσσωρευτών σε σχέση με την εναπομείνασα ωφέλιμη χωρητικότητά του, κ.ά., επιτρέπουν την επίλυση του προβλήματος ενεργειακού ισοζυγίου, σε ωριαία βάση και σε βάθος 20ετίας. Παράλληλα, και εισάγοντας επίσης τις ακόλουθες συνιστώσες κόστους, εκτιμάται το σταθμισμένο κόστος παραγωγής ενέργειας LCOE για το σύνολο της 20ετίας και για καθέναν από τους εξεταζόμενους συνδυασμούς:

- Ανηγμένο αρχικό κόστος Φ/Β  $\rightarrow 750\text{€/kW}$
- Ανηγμένο αρχικό κόστος συσσωρευτών δεύτερης ζωής  $\rightarrow 200\text{€/kWh}$
- Κόστος επικουρικού εξοπλισμού επί του αρχικού κόστους επένδυσης  $\rightarrow 10\%$
- Επιτόκιο αναγωγής  $\rightarrow 3\%$
- Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας  $\rightarrow$  Ωριαία χρονοσειρά οριακής τιμής συστήματος για το έτος 2021, με μέση τιμή στα επίπεδα των  $116\text{€/MWh}$ .

Με βάση τα ανωτέρω, παράγονται απολογιστικά αποτελέσματα για το σύνολο των υπό εξέταση συνδυασμών, τροφοδοτώντας στη συνέχεια παραμετρική ανάλυση για την καλύτερη κατανόηση των τάσεων που χαρακτηρίζουν το υπό εξέταση πρόβλημα, εστιάζοντας σε κάθε περίπτωση στην επίδραση, τόσο στους ενεργειακούς όσο και τους οικονομικούς δείκτες, που επιφέρει η σταδιακή γήρανση των συσσωρευτών.

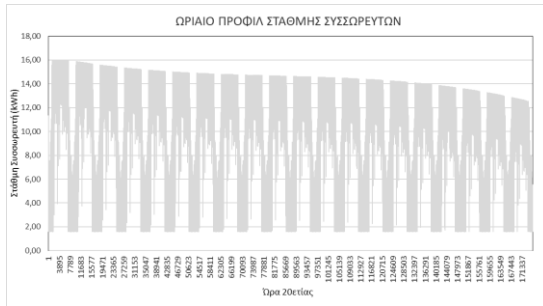
## **Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα εφαρμογής**

Σε συνέχεια της παρουσίασης του μεθοδολογικού πλαισίου και της μελέτης περίπτωσης, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα εφαρμογής της εργασίας. Τα τελευταία εστιάζουν στους τρεις δείκτες αξιολόγησης στους οποίους αναφερθήκαμε νωρίτερα, επιτρέποντας ταυτόχρονα την εσωτερική μεταβολή μεγεθών όπως η Φ/Β ισχύς, η χωρητικότητα των συσσωρευτών, το κατώτατο όριο υγείας των συσσωρευτών και το μέγιστο επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης. Με τον τρόπο αυτό, εξετάζεται ένα πλήθος συνδυασμών με βάση το οποίο έχουμε τη δυνατότητα να διακρίνουμε τάσεις που περιγράφουν το υπό μελέτη πρόβλημα. Πριν τη διενέργεια της παραμετρικής ανάλυσης, και για την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης της ενσωμάτωσης στο πρόβλημα του θεωρούμενου μοντέλου γήρανσης, στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζονται ωριαία προφίλ μεταβολής της στάθμης των συσσωρευτών υπό διαφορετικά σετ συνδυασμών Φ/Β – συσσωρευτών.

### **5.1 Η επίδραση του μοντέλου γήρανσης**

Τα προφίλ των ακόλουθων σχημάτων παρουσιάζουν την ωριαία μεταβολή της στάθμης των συσσωρευτών σε όλη τη διάρκεια της 20ετούς περιόδου μελέτης, λαμβάνοντας υπόψη βηματική αύξηση της χωρητικότητας των συσσωρευτών έναντι σταθερής Φ/Β ισχύος 4kW και μέγιστου βάθους εκφόρτισης 90%. Όπως παρατηρούμε, όταν ο λόγος της Φ/Β ισχύος προς την αποθηκευτική ικανότητα των συσσωρευτών αυξάνει, ο χρόνος απόσυρσης των τελευταίων βαίνει μειούμενος.

Αυτό εξηγείται στη βάση του μεγαλύτερου βαθμού χρήσης των συσσωρευτών που εν τέλει οδηγεί σε χρόνους απόσυρσης κάτω της 20ετίας. Εν προκειμένω, η μείωση της αποθηκευτικής ικανότητας των συσσωρευτών κάτω των 8kWh προκαλεί ταχύτερη απαξίωση, η οποία οριοθετείται από το κατώτατο όριο υγείας, στα επίπεδα του 20% επί της αρχικής αποθηκευτικής ικανότητας των συσσωρευτών δεύτερης ζωής. Σε κάθε περίπτωση, είναι εμφανής η υποβάθμιση που υφίστανται οι συσσωρευτές διαχρονικά, αποτέλεσμα που συνεπάγεται ολοένα και πιο μειωμένη συνεισφορά, η οποία αντισταθμίζεται από βαθμιαία υψηλότερες εισαγωγές ενέργειας από το τοπικό δίκτυο.



Σχήμα 5.1: Npv 4kW – Ess 16kWh



Σχήμα 5.2: Npv 4kW – Ess 12kWh



Σχήμα 5.3: Npv 4kW – Ess 8kWh



Σχήμα 5.4: Npv 4kW – Ess 4kWh



Σχήμα 5.5: Npv 4kW – Ess 2kWh

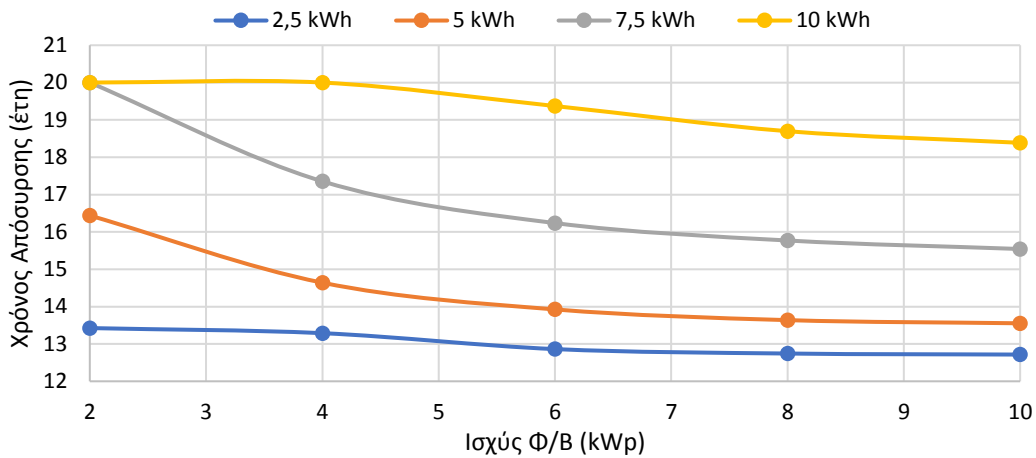


Σχήμα 5.6: Npv 4kW – Ess 1kWh

## 5.2 Χρόνος απόσυρσης

Ακολούθως, παρουσιάζεται σειρά διαγραμμάτων που εξετάζει την μεταβολή του χρόνου απόσυρσης ως προς την μεταβολή των δύο βασικών μεταβλητών, της Φ/Β ισχύος και της αποθηκευτικής ικανότητας των συσσωρευτών δηλαδή, υπό τρία διαφορετικά σενάρια κατώτατου ορίου υγείας και μέγιστου επιτρεπτού βάθους εκφόρτισης. Σε καθένα από τα γραφήματα εμφανίζονται 4 διαφορετικές καμπύλες που αντιστοιχούν σε 4 διαφορετικές περιπτώσεις αποθηκευτικής ικανότητας, με αντίστοιχη μεταβολή στον οριζόντιο άξονα της μελετώμενης Φ/Β ισχύος, στα όρια από 2kW<sub>p</sub> έως 10kW<sub>p</sub>. Στο πλαίσιο αυτό, ακολουθούν τα βασικά συμπεράσματα και ευρήματα ανά γράφημα.

### Χρόνος Απόσυρσης Συσσωρευτών συναρτήσεσι Φ/Β Ισχύος για SOH 20% & DOD 90%



Σχήμα 5.7: Χρόνος απόσυρσης συσσωρευτών συναρτήσεσι ισχύος Φ/Β για SOH 20% DOD 90%

Αναφορικά με το γράφημα του Σχήματος 23, σημειώνονται τα ακόλουθα:

- Ο χρόνος ζωής των μπαταριών είναι ανάλογος με την αρχική χωρητικότητα καθώς όσο εκείνη αυξάνεται τόσο παρατείνεται ο χρόνος απόσυρσης της.
- Μικρότερα μεγέθη Φ/Β ευνοούν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Τα μικρότερης κλίμακας Φ/Β δεν κατορθώνουν να φορτίσουν στο 100% τη μπαταρία με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται μικρότεροι κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης, κάτι το οποίο αφενός συμβάλει στη μακροζωία του συσσωρευτή, αφετέρου οδηγεί σε μικρότερο συντελεστή κάλυψης της οικίας.
- Στην περίπτωση Φ/Β 2kW με μπαταρία 10kWh (κίτρινη καμπύλη) και σε εκείνη με Φ/Β 2kW και 7,5kWh οι καμπύλες εμφανίζουν ίδιο χρόνο απόσυρσης 20 έτη. Αυτό συμβαίνει επειδή μελετάμε όλες τις περιπτώσεις σε χρονικό ορίζοντα 20ετίας έχοντας θέσει αυτό το χρόνο σαν ανώτατο όριο του προβλήματος. Υπό άλλες συνθήκες χωρίς περιορισμούς αναμένουμε μεγαλύτερο χρόνο απόσυρσης από τη μπαταρία των 10kWh.
- Η περίπτωση συσσωρευτή 2,5kWh δεν παρουσιάζει αναλογική συμπεριφορά (γραφικά) με εκείνη των μεγαλύτερων μπαταριών, ειδικά για Φ/Β ισχύ 2-4kW. Η διαφορά στην κλίση της καμπύλης η οποία είναι οριακά μηδενική (οριζόντια γραμμή), συνεπάγεται ότι σε αυτό το φάσμα Φ/Β ισχύος το μέγεθος του Φ/Β δεν έχει μεγάλη επιρροή στο χρόνο απόσυρσης του συσσωρευτή. Αυτό συμβαίνει διότι το Φ/Β με ισχύ 4kW δεν αφήνει τη μπαταρία να εκφορτίσει διατηρώντας τη σχεδόν πάντα σε υψηλά επίπεδα φόρτισης με αποτέλεσμα λιγότερους κύκλους φόρτισης και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Αυτό όμως δε συμβαίνει για

το συνδυασμό της ίδιας μπαταρίας με το μικρότερο Φ/Β 2kW το οποίο επιτρέπει στη μπαταρία να εκφορτίσει. Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα ότι ο λόγος Φ/Β ισχύος προς τη χωρητικότητα της μπαταρίας διαδραματίζει επίσης σημαντικό ρόλο, και πως όταν αυτός ο λόγος μειωθεί αρκετά, αυτό έχει άμεση επίδραση στο χρόνο απόσυρσης, συνυπολογίζοντας σε κάθε περίπτωση και τις απόλυτες τιμές Φ/Β ισχύος και αποθηκευτικής ικανότητας που διαμορφώνουν αυτό το λόγο.

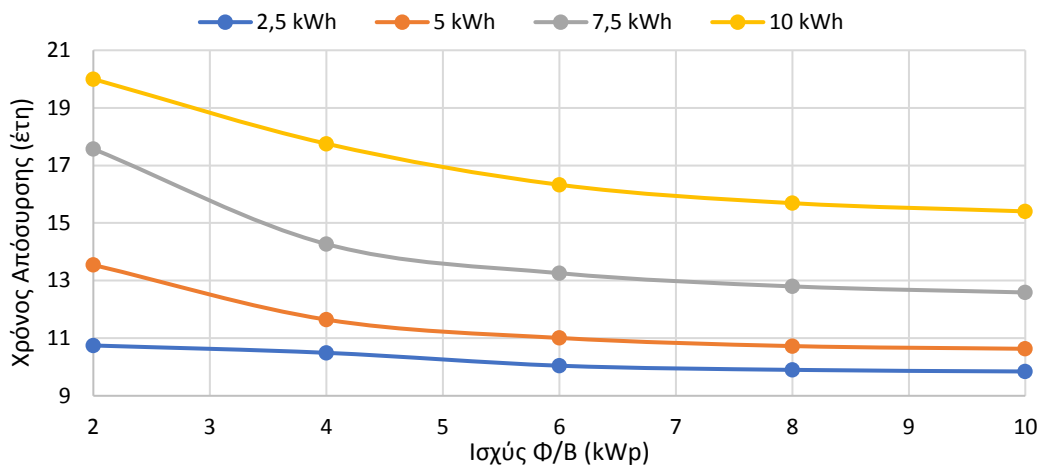
- Χαρακτηριστικές είναι οι δύο ακραίες περιπτώσεις για ισχύ Φ/Β 2kW και 10kW για τις οποίες σημειώνεται διαφορά στο συνολικό χρόνο απόσυρσης της κάθε περίπτωσης μικρότερη τους ενός έτους. Επομένως αυτό έχει άμεση επίδραση στο σχεδιασμό της αρχικής επένδυσης. Με αντίστοιχη λογική μικρές είναι οι διαφορές που σημειώνονται και στις περιπτώσεις μπαταριών 2,5kWh και 5kWh. Επομένως το οικονομικό όφελος από την αγορά μπαταρίας με μικρότερη χωρητικότητα ίσως και να αντισταθμίζει τη μικρότερη διάρκεια ζωής κατά 1-2 έτη.

Την ίδια στιγμή, αναφορικά με τα γραφήματα των Σχημάτων 24,25, σημειώνονται τα ακόλουθα:

- Τα εν λόγω γραφήματα απεικονίζουν τη σχέση μεταξύ χρόνου απόσυρσης, χωρητικότητας του συσσωρευτή του και ονομαστικής ισχύος του Φ/Β, με τα σενάρια υπό μελέτη να διαμορφώνονται από μέγιστα βάθη εκφόρτισης (DOD) 70% και 90% και από κατώτατα όρια υγείας (SOHlimit) 20% και 40% επί της αρχικής.
- Μικρότερες τιμές ονομαστικής ισχύος Φ/Β οδηγούν σε μεγαλύτερο χρόνο απόσυρσης. Αυτό συμβαίνει διότι τα μικρότερα Φ/Β δεν προλαβαίνουν να φορτίσουν τη μπαταρία σε ικανοποιητικό ποσοστό κι επομένως η τελευταία εκτελεί λιγότερους κύκλους φόρτισης σε βάθος χρόνου.
- Η αύξηση του βάθους εκφόρτισης σε συνδυασμό με την αύξηση του ελάχιστου SOH του συσσωρευτή επιφέρουν μείωση στο χρόνο απόσυρσης της μπαταρίας. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι στην περίπτωση DOD 70% και SOH 40% παρατηρούμε τους υψηλότερους χρόνους απόσυρσης ενώ στην περίπτωση με DOD 90% και SOH 40% ο συσσωρευτής χρήζει αντικατάστασης πολύ πιο άμεσα.

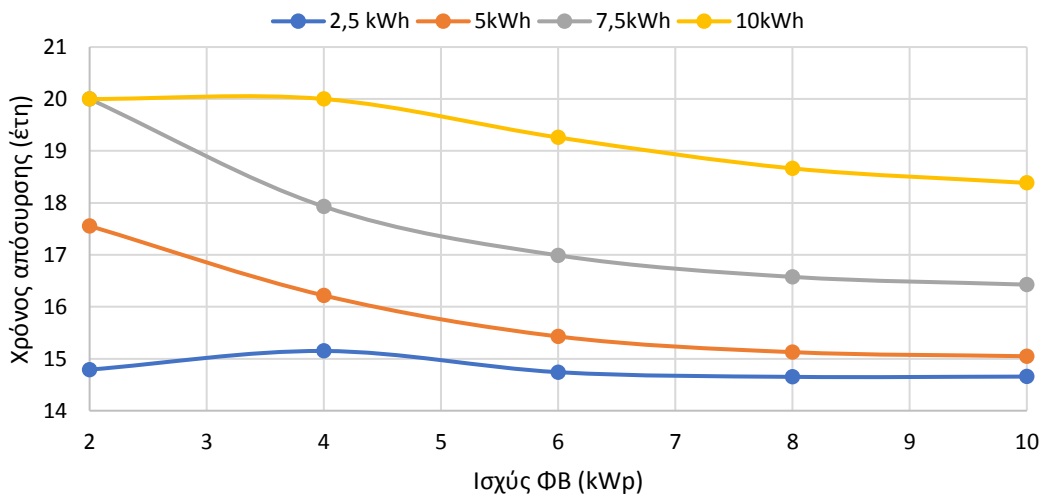


### Χρόνος Απόσυρσης Συσσωρευτών συναρτήσσει Φ/Β Ισχύος για SOH 40% & DOD 90%



Σχήμα 5.8: Χρόνος Απόσυρσης συσσωρευτών συναρτήσσει ισχύος Φ/Β για SOH 40% DOD 90%

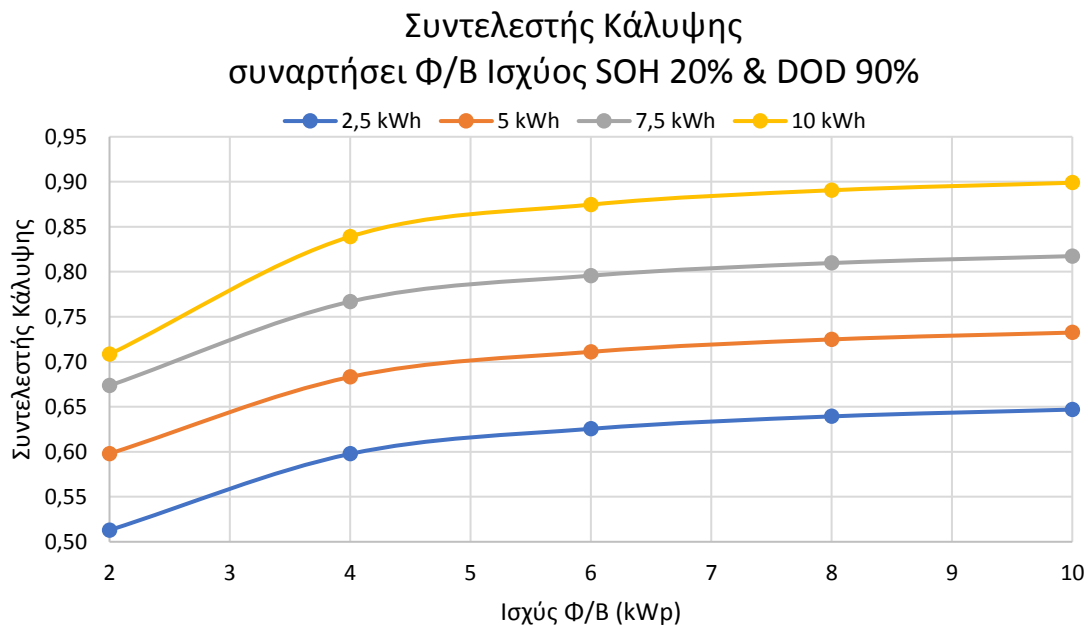
### Χρόνος Απόσυρσης Συσσωρευτών συναρτήσσει Φ/Β Ισχύος για SOH 40% & DOD 70%



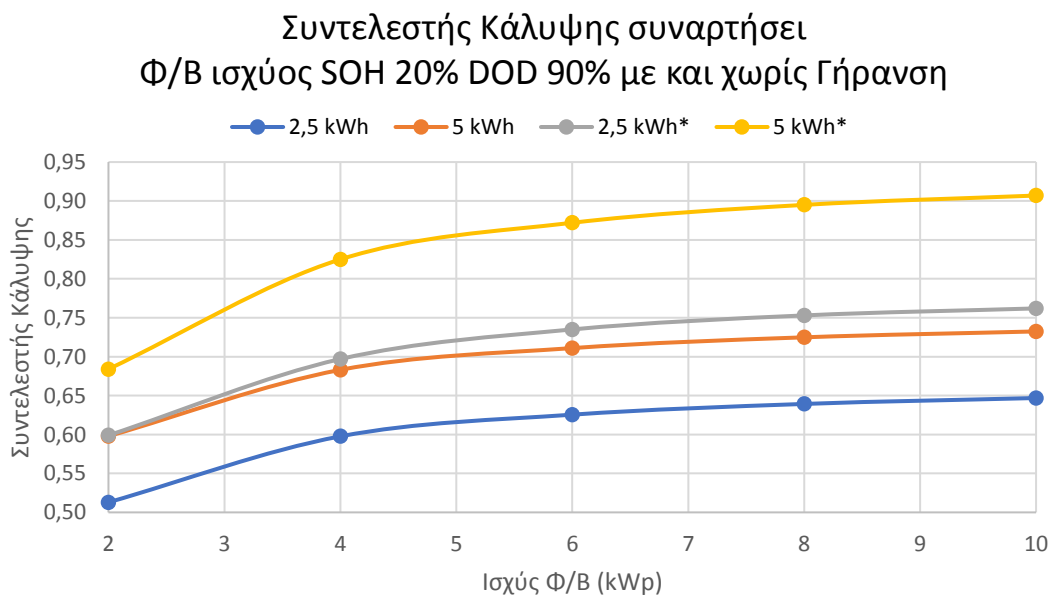
Σχήμα 5.9: Χρόνος απόσυρσης συσσωρευτών συναρτήσσει ισχύος Φ/Β για SOH 40% DOD 70%

### 5.3 Συντελεστής κάλυψης

Ακολούθως, παρουσιάζεται παρόμοια σειρά διαγραμμάτων που εξετάζει την μεταβολή του συντελεστή κάλυψης, υπό το σενάριο αναφοράς για το κατώτατο όριο υγείας και το μέγιστο επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τη συνθήκη μη ενσωμάτωσης του μοντέλου γήρανσης στους υπολογισμούς.



Σχήμα 5.10: Συντελεστής Κάλυψης συναρτήσεϊ Φ/Β ισχύος SOH 20% DOD 90%



Σχήμα 5.11: Συντελεστής Κάλυψης συναρτήσεϊ Φ/Β ισχύος SOH 20% DOD 90% με και χωρίς γήρανση

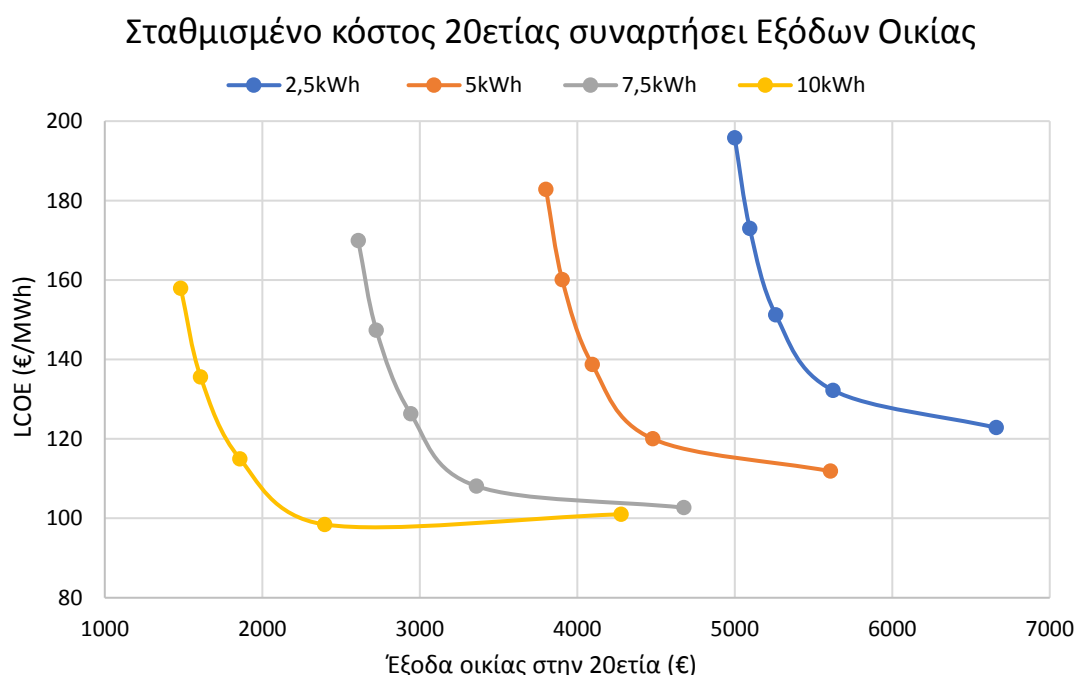
Στη βάση αυτή, αναφορικά με τα γραφήματα των Σχημάτων 26,27, σημειώνονται τα ακόλουθα:

- Τα διαγράμματα απεικονίζουν τη σχέση του συντελεστή κάλυψης της οικίας ανάλογα με το μέγεθος της μπαταρίας και την ονομαστική ισχύ του Φ/Β.
- Όπως είναι αναμενόμενο, τα υπό μελέτη μεγέθη είναι ανάλογα το οποίο σημαίνει ότι όσο αυξάνεται η χωρητικότητα της μπαταρίας και το μέγεθος του Φ/Β τόσο αυξάνεται και η ενεργειακή αυτονομία της οικίας.
- Το εύρος τιμών του συντελεστή κάλυψης κυμαίνεται μεταξύ των ακραίων τιμών 0,51 και 0,90. Η ελάχιστη τιμή συναντάται στην περίπτωση της μπαταρίας 2,5kWh σε συνδυασμό με Φ/Β 2kW, ενώ η μέγιστη τιμή προκύπτει από μπαταρία 10kWh και Φ/Β 10kW αντίστοιχα.
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει με βάση τα γραφικά αποτελέσματα, ότι μεταβάλλεται ο ρυθμός αύξησης του συντελεστή κάλυψης με την αύξηση της ισχύς του Φ/Β. Για παράδειγμα παρατηρούμε μεγάλη αύξηση του συντελεστή σε όλο το εύρος χωρητικότητας της μπαταρίας μεταξύ ισχύος Φ/Β 2kW και 4kW. Στη συνέχεια μεταξύ του εύρους 4kW και 6kW μειώνεται ο ρυθμός αύξησης και έπειτα για 8kW και 10kW μειώνεται ακόμα περισσότερο, βαίνοντας ασυμπτωτικά. Επομένως αυτή η παρατήρηση λαμβάνεται υπόψη για τον πιθανό επενδυτή ο οποίος αξίζει να επενδύσει παραπάνω για να τοποθετήσει Φ/Β 6 kW αντί 4kW γιατί θα του αποφέρει πολύ μεγαλύτερο συντελεστή κάλυψης, κάτι το οποίο δεν ισχύει συγκρίνοντας την ισχύ των 10kW και των 8kW.
- Για χωρητικότητα συσσωρευτή μεγαλύτερη των 7,5kWh, φαίνεται να αίρεται η γραμμικότητα της καμπύλης για τις περιπτώσεις 2kW και 4kW. Αυτό συμβαίνει επειδή για τόσο μικρή ονομαστική ισχύ Φ/Β και αντίθετα τόσο μεγάλη χωρητικότητα μπαταρίας, η τελευταία δεν προλαβαίνει να φορτιστεί ποτέ επαρκώς από το μικρό Φ/Β και η αποθηκευμένη ενέργεια καταναλώνεται επιτόπου. Κάτι τέτοιο έχει αντίκτυπο στο συντελεστή κάλυψης. Επομένως δεν έχει ιδιαίτερο νόημα να επιλεγεί μια τόσο μεγάλη μπαταρία με τόσο μικρό Φ/Β. Ωστόσο από ισχύ Φ/Β 6kW και άνω, η γραμμικότητα της καμπύλης παραμένει μέχρι και τη μέγιστη χωρητικότητα μπαταρίας που θεωρούμε (10kWh) αποδίδοντας πολύ υψηλούς συντελεστές κάλυψης (>0,87).
- Τέλος, αγνοώντας την επίδραση του μηχανισμού γήρανσης, προκύπτει σημαντική αύξηση του συντελεστή κάλυψης, που ανάλογα την αποθηκευτική ικανότητα του συσσωρευτή, αυξάνει από 10% έως 20%.

## 5.4 Σταθμισμένο κόστος παραγωγής ενέργειας

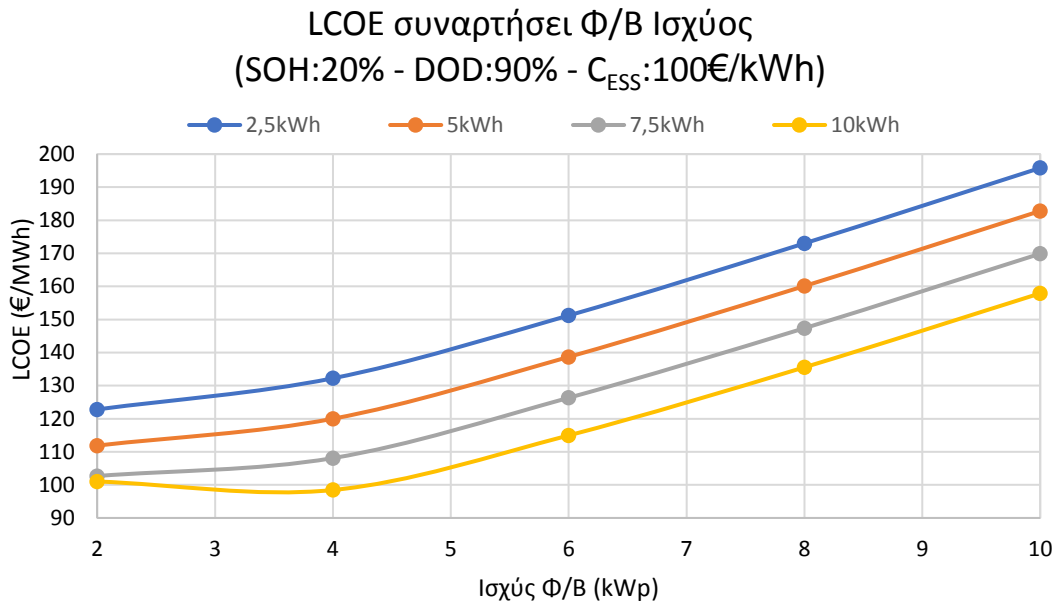
Ολοκληρώνοντας την ενότητα των αποτελεσμάτων, παρατίθενται διαγράμματα που αφορούν στην μεταβολή του σταθμισμένου κόστους παραγωγής της εγκατάστασης, στο οποίο, υπενθυμίζεται πως ενσωματώνεται και το κόστος της αγοράς ενέργειας από το δίκτυο για την κάλυψη των εμφανιζόμενων ελλειμμάτων.

Στο πλαίσιο αυτό, και με βάση το γράφημα του Σχήματος 28, προκύπτει μείωση του σταθμισμένου κόστους παραγωγής για αυξημένη χωρητικότητα συσσωρευτή, που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το κόστος των συσσωρευτών δεύτερης ζωής αποδεικνύεται ανταγωνιστικό έναντι της λύσης εισαγωγών ενέργειας από το τοπικό δίκτυο. Την ίδια στιγμή, παρατηρούμε πως όσο αυξάνεται το κόστος αγοράς ενέργειας από το δίκτυο (έξοδα οικίας), οι καμπύλες εμφανίζουν σημαντική μείωση και τείνουν ασυμπτωτικά ή/και εμφανίζουν περιοχή ελαχίστων, γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη περιοχής βέλτιστου μίγματος μεταξύ των εισαγωγών από το τοπικό δίκτυο και της κάλυψης των αναγκών σε ιδιοκατανάλωση από το συνδυασμένο σχήμα Φ/Β-συσσωρευτών.



Σχήμα 5.12: Σταθμισμένο κόστος 20ετίας συναρτήσει Έξοδα οικίας

Σε συνέχεια των ανωτέρω, στο σχήμα της Εικόνας 29, πραγματοποιείται συσχέτιση της μεταβολής του σταθμισμένου κόστους παραγωγής με τις δύο βασικές μεταβλητές, με τα κύρια συμπεράσματα να συγκεντρώνονται στα ακόλουθα:



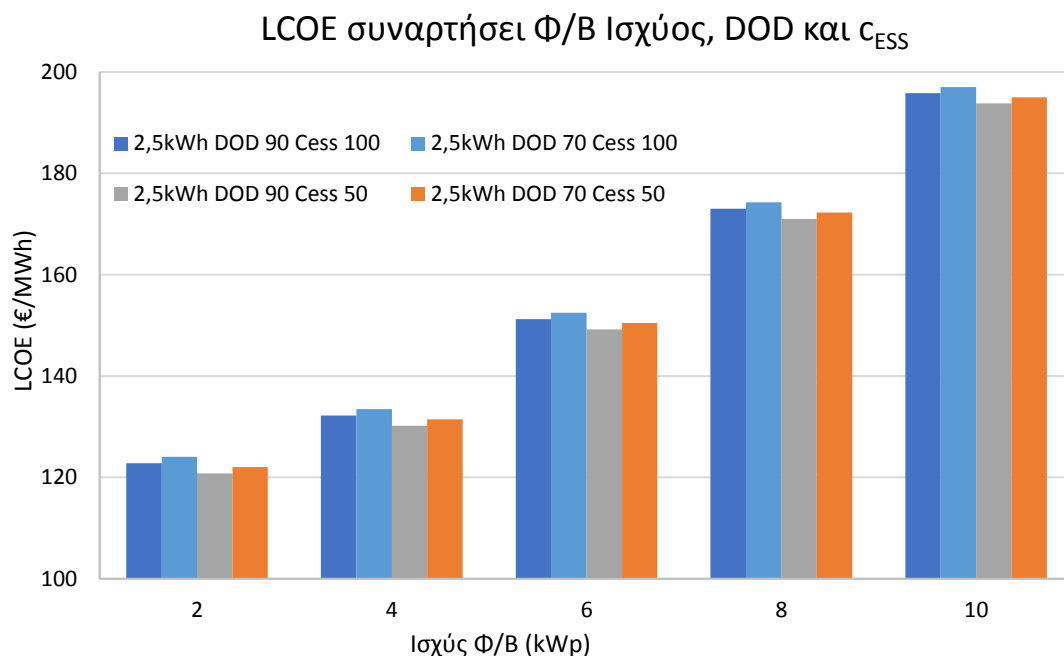
Σχήμα 5.13: LCOE συναρτήσσει ισχύος Φ/Β για τα διάφορα μεγέθη μπαταρίας (SOH20% DOD90% CESS100€/kWh)

- Το σταθμισμένο κόστος LCOE αυξάνεται ανάλογα με την ισχύ του Φ/Β και αντιστρόφως ανάλογα της χωρητικότητας της μπαταρίας. Για παράδειγμα στην περίπτωση της μικρότερης χωρητικότητας μπαταρίας (2,5kWh) και της μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος του Φ/Β (10kW), το σταθμισμένο κόστος ανέρχεται στα 196€/MWh που είναι και η υψηλότερη τιμή. Αυτό συμβαίνει διότι το μειωμένο κόστος αγοράς της μικρής μπαταρίας τελικά αντισταθμίζεται από την ανάγκη εισαγωγών ενέργειας από το δίκτυο, από την υπερδιαστασιλότητα του Φ/Β και από τον μειωμένο χρόνο απόσυρσης του συσσωρευτή λόγω πολλαπλών κύκλων φόρτισης κάθε ημέρα εξαιτίας της μικρής του χωρητικότητας.
- Αντίθετα, μικρή ισχύς Φ/Β με μικρή χωρητικότητα μπαταρίας δεν συνεπάγεται και το μικρότερο LCOE. Για παράδειγμα στην περίπτωση του μικρότερου Φ/Β (2kW) και της μικρότερης μπαταρίας (2,5kWh) προκύπτει LCOE 123€/MWh, ενώ για το σύστημα με τη μέγιστη χωρητικότητα μπαταρίας (10kWh) και Φ/Β 2kW αντιστοιχεί LCOE 101€/MWh. Δηλαδή, παρά το σαφώς υψηλότερο κόστος αγοράς μιας μεγάλης μπαταρίας παρατηρούμε χαμηλότερο LCOE. Αυτό δικαιολογείται από τη φύση του δείκτη ο οποίος δε μετρά μόνο την αρχική επένδυση των συντελεστών του συστήματος αλλά και τη μεταξύ τους συνεργασία ώστε να προσδώσουν τη μέγιστη δυνατή ενεργειακή κάλυψη ανάλογα με το φορτίο του καταναλωτή.

- Ο βέλτιστος συνδυασμός συσσωρευτή-Φ/Β για το εν λόγω σύστημα ώστε να προκύψει το ελάχιστο LCOE, όπως προκύπτει γραφικά, είναι για συσσωρευτή 10kWh και Φ/Β 4kW. Για αυτό το συνδυασμό παρατηρείται το χαμηλότερο σταθμισμένο κόστος LCOE σε βάθος 20ετίας το οποίο ανέρχεται σε 98€/MWh.

Επισημαίνεται στο σημείο αυτό πως στην προκειμένη περίπτωση θεωρούμε σταθερό βάθος εκφόρτισης και κατώτατο όριο υγείας της μπαταρίας, όπως και τιμή αγοράς επαναχρησιμοποιημένης μπαταρίας  $C_{ESS}=100€/kWh$ . Με αυτά τα μεγέθη σταθερά, μελετάται αποκλειστικά η σχέση μεταξύ του LCOE και των αρχικών παραμέτρων της εγκατάστασης που δεν είναι άλλες από τα μεγέθη της μπαταρίας και του Φ/Β.

Ολοκληρώνοντας, παρατίθεται στο ακόλουθο γράφημα η μεταβολή του LCOE για 4 διαφορετικά σενάρια υπό σταθερή χωρητικότητα συσσωρευτή, μεταβλητή Φ/Β ισχύ και διαφοροποίηση ως προς το μέγιστο επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης και το κόστος προμήθειας του συσσωρευτή. Με βάση τα αποτελέσματα είναι σαφής η επίδραση της υπερδιαστασιολόγησης της Φ/Β συνιστώσας, με τη μείωση του κόστους του συσσωρευτή να έχει περιορισμένη επίδραση, δεδομένου και του μεγέθους των 2.5kWh, ενώ αντίστοιχα περιορισμένη είναι η επίδραση του DOD για τον ίδιο ακριβώς λόγο.



Σχήμα 5.14: LCOE συναρτήσει ισχύος Φ/Β για τα διάφορα μεγέθη μπαταρίας

## 6. Συμπεράσματα

Μέσα από την επίλυση του εν λόγω προβλήματος προσομοίωσης προκύπτουν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα στο πλαίσιο επαναχρησιμοποίησης συσσωρευτών ηλεκτρικών οχημάτων για άλλες εφαρμογές:

1. Η χρήση μεταχειρισμένων μπαταριών από Nissan Leaf σε ένα σπίτι με φωτοβολταϊκά επιτρέπει την αποθήκευση ενέργειας και την εξοικονόμηση χρημάτων σε σύγκριση με την αγορά νέων μπαταριών.
2. Η γήρανση των μπαταριών αποτελεί σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει την απόδοση και τη διάρκεια ζωής του συστήματος. Με βάση την πολυωνυμική συνάρτηση γήρανσης που προέκυψε από την πειραματική μελέτη, μπορούμε να προβλέψουμε το επίπεδο γήρανσης των μπαταριών κατά τη διάρκεια της 20ετίας.
3. Η προσομοίωση του ενεργειακού ισοζυγίου του συστήματος μας επιτρέπει να αξιολογήσουμε την απόδοση της εγκατάστασης και την εξέλιξή της με την πάροδο του χρόνου. Με τη χρήση των ωριαίων χρονοσειρών και των πειραματικών αποτελεσμάτων για τη γήρανση των μπαταριών, μπορούμε να αξιολογήσουμε το επίπεδο αποδοτικότητας και την απόδοση του συστήματος σε σχέση με τις ενεργειακές ανάγκες του σπιτιού. Αυτή η αξιολόγηση μας βοηθά να κατανοήσουμε την αποτελεσματικότητα της χρήσης φωτοβολταϊκών πάνελ και μπαταριών δεύτερης ζωής για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του σπιτιού.

Επιπλέον, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η πειραματική μελέτη και η χρήση πολυωνυμικής συνάρτησης γήρανσης μας επιτρέπουν να προβλέψουμε τον αντίκτυπο της γήρανσης των μπαταριών στην απόδοση του συστήματος στο μέλλον. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να λάβουμε τα απαραίτητα μέτρα για τη συντήρηση, την αντικατάσταση ή την αναβάθμιση των μπαταριών ώστε να διατηρήσουμε την απόδοση και την αποτελεσματικότητα του συστήματος στο μέγιστο επίπεδο.

Συνολικά, η προσέγγιση που ακολουθήσαμε για το αρχικό πρόβλημα μας επιτρέπει να αναλύσουμε την επίδραση της χρήσης μεταχειρισμένων μπαταριών Nissan Leaf στο σύστημα με φωτοβολταϊκά και να προβλέψουμε την απόδοση και τη διάρκεια ζωής του συστήματος. Τα ακόλουθα συμπεράσματα μπορούν να αναχθούν από την ανάλυση:

1. Η χρήση μεταχειρισμένων μπαταριών αποδεικνύεται οικονομικά ευνοϊκή επιλογή, καθώς επιτρέπει την εξοικονόμηση κόστους σε σύγκριση με την αγορά νέων μπαταριών. Ωστόσο, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί που σχετίζονται με τη γήρανση και την απόδοση των μπαταριών, καθώς αυτό μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του συστήματος.
2. Η πειραματική μελέτη της γήρανσης των μπαταριών Nissan Leaf μας παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τη συμπεριφορά τους σε εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης. Με βάση αυτήν τη μελέτη, μπορούμε να προβλέψουμε τη γήρανση και να παρακολουθήσουμε την εξέλιξη της απόδοσης των μπαταριών μας στη διάρκεια της χρήσης τους.

3. Η προσομοίωση του ενεργειακού ισοζυγίου μας βοηθά να αξιολογήσουμε την ικανότητα του συστήματος να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του σπιτιού με φωτοβολταϊκά και αποθήκευση ενέργειας με μπαταρίες δεύτερης ζωής. Η προσομοίωση μας επιτρέπει να εκτιμήσουμε την παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, την φόρτιση και εκφόρτιση των μπαταριών, καθώς και το ελάχιστο ελλείματος ενέργειας που απαιτείται από το δίκτυο.



## Βιβλιογραφία

- [1] newsroom και Ε. για την Ο. | newmoney, ‘Πού οφείλεται η ραγδαία αύξηση στο ενεργειακό κόστος’, *Ειδήσεις για την Οικονομία* | newmoney, 15 Σεπτέμβριος 2021. <https://www.newmoney.gr/roh/palmos-oikonomias/energeia/rou-ofilete-i-ragdea-afxisi-sto-energiako-kostos/> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [2] ‘Electricity price statistics’. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity\\_price\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics) (ημερομηνία πρόσβασης 27 Ιούλιος 2023).
- [3] C. Kemfert, F. Präger, I. Braunger, F. M. Hoffart, και H. Brauers, ‘The expansion of natural gas infrastructure puts energy transitions at risk’, *Nat Energy*, vol. 7, no. 7, Art. no. 7, Ιουλίου 2022, doi: 10.1038/s41560-022-01060-3.
- [4] ‘Global Power Plant Database - Data | World Resources Institute’. <https://datasets.wri.org/dataset/globalpowerplantdatabase> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [5] F. Li, J. Zhang, και X. Li, ‘Research on supporting developing countries to achieve green development transition: Based on the perspective of renewable energy and foreign direct investment’, *Journal of Cleaner Production*, vol. 372, no. 133726, Οκτωβρίου 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133726.
- [6] P. D. Howe, ‘Extreme weather experience and climate change opinion’, *Current Opinion in Behavioral Sciences*, vol. 42, pp. 127–131, Δεκεμβρίου 2021, doi: 10.1016/j.cobeha.2021.05.005.
- [7] Newsroom, ‘Οι αιτίες και οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε ένα γράφημα’, *CNN.gr*, 15 Μάρτιος 2022. <https://www.cnn.gr/perivallon/story/304998/oi-aities-kai-oi-epiptoseis-tis-klimatikis-allagis-se-ena-grafima> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [8] M. R. Khalid, M. S. Alam, A. Sarwar, και M. S. Jamil Asghar, ‘A Comprehensive review on electric vehicles charging infrastructures and their impacts on power-quality of the utility grid’, *eTransportation*, vol. 1, no. 100006, Αυγούστου 2019, doi: 10.1016/j.etrans.2019.100006.
- [9] C. Liang, M. Umar, F. Ma, και T. L. D. Huynh, ‘Climate policy uncertainty and world renewable energy index volatility forecasting’, *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 182, no. 121810, Σεπτεμβρίου 2022, doi: 10.1016/j.techfore.2022.121810.
- [10] IRENA, 2022. Renewable capacity highlights 2022 (irena.org)
- [11] B. Zou, J. Peng, S. Li, Y. Li, J. Yan, και H. Yang, ‘Comparative study of the dynamic programming-based and rule-based operation strategies for grid-connected PV-battery systems of office buildings’, *Applied Energy*, vol. 305, no. 117875, Ιανουαρίου 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117875.
- [12] D. E. H. J. Gernaat, H.-S. de Boer, L. C. Dammeier, και D. P. van Vuuren, ‘The role of residential rooftop photovoltaic in long-term energy and climate scenarios’, *Applied Energy*, vol. 279, no. 115705, Δεκεμβρίου 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115705.
- [13] Climate Action network Europe, 2022. Report\_Rooftop-solar-PV-country-comparison.pdf (ecounion.eu)
- [14] COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS REPowerEU Plan. 2022. Ημερομηνία πρόσβασης: 23 Ιούλιος 2023. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://eur-lex.europa.eu/legal->
- [15] ‘Φωτοβολταϊκά στη στέγη: Πάνω από 60% φουσκώνει η επιδότηση για 300.000 νοικοκυριά - Οι νέοι όροι’, *Ημερησία*, 4 Φεβρουάριος 2023.

- [https://www.imerisia.gr/epiheiriseis/energeia/64702\\_fotovoltaika-sti-stegi-pano-apo-60-foyskonei-i-epidotisi-gia-300000](https://www.imerisia.gr/epiheiriseis/energeia/64702_fotovoltaika-sti-stegi-pano-apo-60-foyskonei-i-epidotisi-gia-300000) (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [16] ‘Approximately 100 million households rely on rooftop solar PV by 2030 – Analysis’, *IEA*. <https://www.iea.org/reports/approximately-100-million-households-rely-on-rooftop-solar-pv-by-2030> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [17] ‘Perfect Guide For Rooftop Solar PV Systems In 2023’, *Republic Of Solar*, 21 Ιανουάριος 2022. <https://thesolarlabs.com/ros/rooftop-solar-pv/> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [18] Άγγελος Ι. Καλδέλλης, ‘Δυναμική Κυκλική Καταπόνηση και Κατάσταση Υγείας των Σύγχρονων Τεχνολογιών Μπαταριών σε Εφαρμογές Αυτοπαραγωγής’, MSc, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Αθήνα, 2021.
- [19] K. N. Nwaigwe, P. Mutabilwa, και E. Dintwa, ‘An overview of solar power (PV systems) integration into electricity grids’, *Materials Science for Energy Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 629–633, Δεκεμβρίου 2019, doi: 10.1016/j.mset.2019.07.002.
- [20] Z. Luo κ.ά., ‘A novel forecast-based operation strategy for residential PV-battery-flexible loads systems considering the flexibility of battery and loads’, *Energy Conversion and Management*, vol. 278, no. 116705, Φεβρουαρίου 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.116705.
- [21] G. Martinopoulos, ‘Are rooftop photovoltaic systems a sustainable solution for Europe? A life cycle impact assessment and cost analysis’, *Applied Energy*, vol. 257, no. 114035, Ιανουαρίου 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114035.
- [22] J. K. Kaldellis and D. Zafirakis, ‘Prospects and challenges for clean energy in European Islands. The TILOS paradigm’, *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 2489–2502, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.08.014.
- [23] J. K. Kaldellis, D. Zafirakis, and E. Kondili, ‘Energy pay-back period analysis of stand-alone photovoltaic systems’, *Renewable Energy*, vol. 35, no. 7, pp. 1444–1454, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.renene.2009.12.016.
- [24] ‘Global EV Outlook 2022 – Analysis’, *IEA*. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022> (accessed Aug. 01, 2023).
- [25] ‘EV-Volumes - The Electric Vehicle World Sales Database’. <https://www.ev-volumes.com/news/global-ev-sales-for-2022-h1/> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [26] ‘EU agrees on 37.5% CO2 reduction for cars by 2030 – EURACTIV.com’. <https://www.euractiv.com/section/transport/news/eu-agrees-on-37-5-co2-reduction-for-cars-by-2030/> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [27] ‘Outcome and response to ending the sale of new petrol, diesel and hybrid cars and vans’, *GOV.UK*. <https://www.gov.uk/government/consultations/consulting-on-ending-the-sale-of-new-petrol-diesel-and-hybrid-cars-and-vans/outcome/ending-the-sale-of-new-petrol-diesel-and-hybrid-cars-and-vans-government-response> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [28] ‘Electric vehicles’, *Deloitte Insights*. <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/future-of-mobility/electric-vehicle-trends-2030.html> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [29] N. O. Kapustin και D. A. Grushevenko, ‘Long-term electric vehicles outlook and their potential impact on electric grid’, *Energy Policy*, vol. 137, no. 111103, Φεβρουαρίου 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2019.111103.
- [30] W. Sierzchula, S. Bakker, K. Maat, και B. van Wee, ‘The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption’, *Energy Policy*, vol. 68, pp. 183–194, Μαΐου 2014, doi:10.1016/j.enpol.2014.01.043.
- [31] ΣΦΗΟ Δήμου Νέας Ιωνίας, ‘ΣΧΕΔΙΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

- (Σ.Φ.Η.Ο.) ΔΗΜΟΥ ΝΕΑΣ ΙΩΝΙΑΣ'', Δεκέμβριος 2021
- [32] D. Pamucar, A. Ebadi Torkayesh, M. Devenci, και V. Simic, 'Recovery Center Selection for End-of-life Automotive Lithium-ion Batteries Using an Integrated Fuzzy WASPAS Approach', *Expert Systems with Applications*, vol. 206, Ιουνίου 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2022.117827.
- [33] 'Figure 1: Comparison of the different battery technologies in terms of volumetric and gravimetric energy density. | Nature', Ημερομηνία πρόσβασης: 23 Ιούλιος 2023. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.nature.com/articles/35104644/figures/1>
- [34] 'Why are Electric Cars Expensive? Explore all Facts', *AckoDrive*, 9 Αύγουστος 2021. <https://ackodrive.com/car-guide/why-electric-cars-are-expensive/> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023). content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033742483
- [35] H. Rallo, G. Benveniste, I. Gestoso, και B. Amante, 'Economic analysis of the disassembling activities to the reuse of electric vehicles Li-ion batteries', *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 159, no. 104785, Αυγούστου 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104785.
- [36] S. Mahmud κ.ά., 'Recent advances in lithium-ion battery materials for improved electrochemical performance: A review', *Results in Engineering*, vol. 15, no. 100472, Σεπτεμβρίου 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100472.
- [37] 'WEVJ | Free Full-Text | Sustainability Assessment of Second Use Applications of Automotive Batteries: Ageing of Li-Ion Battery Cells in Automotive and Grid-Scale Applications'. <https://www.mdpi.com/2032-6653/9/2/24> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [38] J. Warner, 'Chapter 7 - Lithium-Ion and Other Cell Chemistries', στο *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design*, J. Warner, Επιμ., Amsterdam: Elsevier, 2015, pp. 65–89. doi: 10.1016/B978-0-12-801456-1.00007-5.
- [39] N. Nitta, F. Wu, J. T. Lee, και G. Yushin, 'Li-ion battery materials: present and future', *Materials Today*, vol. 18, no. 5, pp. 252–264, Ιουνίου 2015, doi: 10.1016/j.mattod.2014.10.040.
- [40] R. Spotnitz, 'Simulation of capacity fade in lithium-ion batteries', *Journal of Power Sources*, vol. 113, no. 1, pp. 72–80, Ιανουαρίου 2003, doi: 10.1016/S0378-7753(02)00490-1.
- [41] J. Zhang και J. Lee, 'A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery', *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 15, pp. 6007–6014, Αυγούστου 2011, doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.03.101.
- [42] C. R. Birkel, M. R. Roberts, E. McTurk, P. G. Bruce, και D. A. Howey, 'Degradation diagnostics for lithium ion cells', *Journal of Power Sources*, vol. 341, pp. 373–386, Φεβρουαρίου 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.011.
- [43] M. Woody, M. Arbabzadeh, G. M. Lewis, G. A. Keoleian, και A. Stefanopoulou, 'Strategies to limit degradation and maximize Li-ion battery service lifetime - Critical review and guidance for stakeholders', *Journal of Energy Storage*, vol. 28, no. 101231, Απριλίου 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101231.
- [44] Y. Zheng, M. Ouyang, L. Lu, και J. Li, 'Understanding aging mechanisms in lithium-ion battery packs: From cell capacity loss to pack capacity evolution', *Journal of Power Sources*, vol. 278, pp. 287–295, Μαρτίου 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.12.105.
- [45] E. Wood, M. Alexander, και T. H. Bradley, 'Investigation of battery end-of-life conditions for plug-in hybrid electric vehicles', *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 11, pp. 5147–5154, Ιουνίου 2011, doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.02.025.
- [46] S. Saxena, C. Le Floch, J. MacDonald, και S. Moura, 'Quantifying EV battery end-of-

- life through analysis of travel needs with vehicle powertrain models’, *Journal of Power Sources*, vol. 282, pp. 265–276, Μαΐου 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.01.072.
- [47] S. Barcellona, S. Colnago, G. Dotelli, S. Latorrata, και L. Piegari, ‘Aging effect on the variation of Li-ion battery resistance as function of temperature and state of charge’, *Journal of Energy Storage*, vol. 50, no. 104658, Ιουνίου 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104658.
- [48] Y. Zhu, J. Zhu, B. Jiang, X. Wang, X. Wei, και H. Dai, ‘Insights on the degradation mechanism for large format prismatic graphite/LiFePO<sub>4</sub> battery cycled under elevated temperature’, *Journal of Energy Storage*, vol. 60, no. 106624, Απριλίου 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.106624.
- [49] S. Sun κ.ά., ‘Changes of Degradation Mechanisms of LiFePO<sub>4</sub>/Graphite Batteries Cycled at Different Ambient Temperatures’, *Electrochimica Acta*, vol. 237, pp. 248–258, Μαΐου 2017, doi: 10.1016/j.electacta.2017.03.158.
- [50] S. Liu κ.ά., ‘Unraveling the capacity fading mechanisms of LiNi<sub>0.6</sub>Co<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.2</sub>O<sub>2</sub> at elevated temperatures’, *Journal of Power Sources*, vol. 393, pp. 92–98, Ιουλίου 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.05.029.
- [51] M. Petzl, M. Kasper, και M. A. Danzer, ‘Lithium plating in a commercial lithium-ion battery – A low-temperature aging study’, *Journal of Power Sources*, vol. 275, pp. 799–807, Φεβρουαρίου 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.11.065.
- [52] Addressing the Impact of Temperature Extremes on Large Format Li-Ion Batteries for Vehicle Applications (Presentation), NREL (National Renewable Energy Laboratory) (unt.edu)
- [53] X. Han κ.ά., ‘A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle’, *eTransportation*, vol. 1, no. 100005, Αυγούστου 2019, doi: 10.1016/j.etrans.2019.100005.
- [54] D. Li κ.ά., ‘Degradation Mechanisms of C<sub>6</sub>/LiFePO<sub>4</sub> Batteries: Experimental Analyses of Calendar Aging’, *Electrochimica Acta*, vol. 190, pp. 1124–1133, Φεβρουαρίου 2016, doi: 10.1016/j.electacta.2015.12.161.
- [55] S. Grolleau κ.ά., ‘Calendar aging of commercial graphite/LiFePO<sub>4</sub> cell – Predicting capacity fade under time dependent storage conditions’, *Journal of Power Sources*, vol. 255, pp. 450–458, Ιουνίου 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.11.098.
- [56] K. Smith, M. Earleywine, E. Wood, J. Neubauer, και A. Pesaran, ‘Comparison of Plug-In Hybrid Electric Vehicle Battery Life Across Geographies and Drive Cycles’, παρουσιάστηκε στο SAE 2012 World Congress & Exhibition, Απριλίου 2012, pp. 2012-01–0666. doi: 10.4271/2012-01-0666.
- [57] M. Schimpe, M. E. von Kuepach, M. Naumann, H. C. Hesse, K. Smith, και A. Jossen, ‘Comprehensive Modeling of Temperature-Dependent Degradation Mechanisms in Lithium Iron Phosphate Batteries’, *J. Electrochem. Soc.*, vol. 165, no. 2, no. A181, Ιανουαρίου 2018, doi: 10.1149/2.1181714jes.
- [58] R. Faria κ.ά., ‘Primary and secondary use of electric mobility batteries from a life cycle perspective’, *Journal of Power Sources*, vol. 262, pp. 169–177, Σεπτεμβρίου 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.03.092.
- [59] C. Wu, C. Zhu, Y. Ge, και Y. Zhao, ‘A Review on Fault Mechanism and Diagnosis Approach for Li-Ion Batteries’, *Journal of Nanomaterials*, vol. 2015, no. e631263, Οκτωβρίου 2015, doi: 10.1155/2015/631263.
- [60] H. Ambrose και A. Kendall, ‘Effects of battery chemistry and performance on the life cycle greenhouse gas intensity of electric mobility’, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 47, pp. 182–194, Αυγούστου 2016, doi: 10.1016/j.trd.2016.05.009.
- [61] Y. Gao, J. Jiang, C. Zhang, W. Zhang, και Y. Jiang, ‘Aging mechanisms under different

- state-of-charge ranges and the multi-indicators system of state-of-health for lithium-ion battery with Li(NiMnCo)O<sub>2</sub> cathode’, *Journal of Power Sources*, vol. 400, pp. 641–651, Οκτωβρίου 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.07.018.
- [62] W. Waag, S. Käbitz, και D. U. Sauer, ‘Experimental investigation of the lithium-ion battery impedance characteristic at various conditions and aging states and its influence on the application’, *Applied Energy*, vol. 102, pp. 885–897, Φεβρουαρίου 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.09.030.
- [63] B. Xu, A. Oudalov, A. Ulbig, G. Andersson, και D. S. Kirschen, ‘Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment’, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1131–1140, Μαρτίου 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2578950.
- [64] ‘Optimal scheduling of electric vehicle charging and vehicle- to- grid services at household level including battery degradation and price uncertainty - Ortega- Vazquez - 2014 - IET Generation, Transmission & Distribution - Wiley Online Library’. <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/iet-gtd.2013.0624> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [65] M. Ecker κ.ά., ‘Calendar and cycle life study of Li(NiMnCo)O<sub>2</sub>-based 18650 lithium-ion batteries’, *Journal of Power Sources*, vol. 248, pp. 839–851, Φεβρουαρίου 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.09.143.
- [66] A. Hoke, A. Brissette, D. Maksimović, D. Kelly, A. Pratt, και D. Boundy, ‘Maximizing lithium ion vehicle battery life through optimized partial charging’, στο *2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, Οκτωβρίου 2013, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISGT.2013.6497818.
- [67] S. Saxena, C. Hendricks, και M. Pecht, ‘Cycle life testing and modeling of graphite/LiCoO<sub>2</sub> cells under different state of charge ranges’, *Journal of Power Sources*, vol. 327, pp. 394–400, Σεπτεμβρίου 2016, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.07.057.
- [68] Y. Li, J. Guo, K. Pedersen, L. Gurevich, και D.-I. Stroe, ‘Investigation of multi-step fast charging protocol and aging mechanism for commercial NMC/graphite lithium-ion batteries’, *Journal of Energy Chemistry*, vol. 80, pp. 237–246, Μαΐου 2023, doi: 10.1016/j.jechem.2023.01.016.
- [69] QuantumScape, ‘Charge Rates for Next-Generation Batteries’, *QuantumScape*, 24 Νοέμβριος 2021. <https://www.quantumscape.com/resources/blog/distinguishing-charge-rates-for-next-generation-batteries/> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [70] J. Groot, M. Swierczynski, A. I. Stan, και S. K. Kær, ‘On the complex ageing characteristics of high-power LiFePO<sub>4</sub>/graphite battery cells cycled with high charge and discharge currents’, *Journal of Power Sources*, vol. 286, pp. 475–487, Ιουλίου 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.04.001.
- [71] G. Seo κ.ά., ‘Rapid determination of lithium-ion battery degradation: High C-rate LAM and calculated limiting LLI’, *Journal of Energy Chemistry*, vol. 67, pp. 663–671, Απριλίου 2022, doi: 10.1016/j.jechem.2021.11.009.
- [72] A. S. Mussa κ.ά., ‘Fast-charging effects on ageing for energy-optimized automotive LiNi<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>Co<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub>/graphite prismatic lithium-ion cells’, *Journal of Power Sources*, vol. 422, pp. 175–184, Μαΐου 2019, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.02.095.
- [73] H. Wang, S. Frisco, E. Gottlieb, R. Yuan, και J. F. Whitacre, ‘Capacity degradation in commercial Li-ion cells: The effects of charge protocol and temperature’, *Journal of Power Sources*, vol. 426, pp. 67–73, Ιουνίου 2019, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.04.034.
- [74] S. Barcellona και L. Piegari, ‘Effect of current on cycle aging of lithium ion batteries’, *Journal of Energy Storage*, vol. 29, no. 101310, Ιουνίου 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101310.
- [75] Y. Hua, X. Liu, S. Zhou, Y. Huang, H. Ling, και S. Yang, ‘Toward Sustainable Reuse

- of Retired Lithium-ion Batteries from Electric Vehicles’, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 168, no. 105249, Μαΐου 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105249.
- [76] L. Zhu και M. Chen, ‘Research on Spent LiFePO<sub>4</sub> Electric Vehicle Battery Disposal and Its Life Cycle Inventory Collection in China’, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 23, Art. no. 23, Ιανουαρίου 2020, doi: 10.3390/ijerph17238828.
- [77] P. S. Calabrò και M. Grosso, ‘Bioplastics and waste management’, *Waste Management*, vol. 78, pp. 800–801, Αυγούστου 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.06.054.
- [78] F. Larouche κ.ά., ‘Progress and Status of Hydrometallurgical and Direct Recycling of Li-Ion Batteries and Beyond’, *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 3, no. 801, Φεβρουαρίου 2020, doi: 10.3390/ma13030801.
- [79] W. Yu, Y. Guo, S. Xu, Y. Yang, Y. Zhao, και J. Zhang, ‘Comprehensive recycling of lithium-ion batteries: Fundamentals, pretreatment, and perspectives’, *Energy Storage Materials*, vol. 54, pp. 172–220, Ιανουαρίου 2023, doi: 10.1016/j.ensm.2022.10.033.
- [80] H. Ali, H. A. Khan, και M. G. Pecht, ‘Circular economy of Li Batteries: Technologies and trends’, *Journal of Energy Storage*, vol. 40, no. 102690, Αυγούστου 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102690.
- [81] Q. Wei, Y. Wu, S. Li, R. Chen, J. Ding, και C. Zhang, ‘Spent lithium ion battery (LIB) recycle from electric vehicles: A mini-review’, *Science of The Total Environment*, vol. 866, no. 161380, Μαρτίου 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.161380.
- [82] ‘A Critical Review and Analysis on the Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries | ACS Sustainable Chemistry & Engineering’. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acssuschemeng.7b03811> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [83] M. Wang κ.ά., ‘Recycling of lithium iron phosphate batteries: Status, technologies, challenges, and prospects’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 163, no. 112515, Ιουλίου 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112515.
- [84] X. Zheng κ.ά., ‘A Mini-Review on Metal Recycling from Spent Lithium Ion Batteries’, *Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 361–370, Ιουνίου 2018, doi: 10.1016/j.eng.2018.05.018.
- [85] M. K. Al-Alawi, J. Cugley, και H. Hassanin, ‘Techno-economic feasibility of retired electric-vehicle batteries repurpose/reuse in second-life applications: A systematic review’, *Energy and Climate Change*, vol. 3, no. 100086, Δεκεμβρίου 2022, doi: 10.1016/j.egycc.2022.100086.
- [86] C. Liu, J. Lin, H. Cao, Y. Zhang, και Z. Sun, ‘Recycling of spent lithium-ion batteries in view of lithium recovery: A critical review’, *Journal of Cleaner Production*, vol. 228, pp. 801–813, Αυγούστου 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.304.
- [87] ‘Electric vehicles, second life batteries, and their effect on the power sector | McKinsey’. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/second-life-ev-batteries-the-newest-value-pool-in-energy-storage> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [88] K. M. Winslow, S. J. Laux, και T. G. Townsend, ‘A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries’, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 129, pp. 263–277, Φεβρουαρίου 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.11.001.
- [89] M. Shahjalal κ.ά., ‘A review on second-life of Li-ion batteries: prospects, challenges, and issues’, *Energy*, vol. 241, no. 122881, Φεβρουαρίου 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122881.
- [90] E. Hossain, D. Murtaugh, J. Mody, H. M. R. Faruque, Md. S. Haque Sunny, και N. Mohammad, ‘A Comprehensive Review on Second-Life Batteries: Current State, Manufacturing Considerations, Applications, Impacts, Barriers & Potential Solutions,

- Business Strategies, and Policies’, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 73215–73252, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2917859.
- [91] X. Xu κ.ά., ‘Study on the performance evaluation and echelon utilization of retired LiFePO<sub>4</sub> power battery for smart grid’, *Journal of Cleaner Production*, vol. 213, pp. 1080–1086, Μαρτίου 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.262.
- [92] D. Stringer, ‘Where 3 Million Electric Vehicle Batteries Will Go When They Retire’, *BQ Prime*. <https://www.bqprime.com/technology/where-3-million-electric-vehicle-batteries-will-go-when-they-retire> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [93] M. H. S. M. Haram, J. W. Lee, G. Ramasamy, E. E. Ngu, S. P. Thiagarajah, και Y. H. Lee, ‘Feasibility of utilising second life EV batteries: Applications, lifespan, economics, environmental impact, assessment, and challenges’, *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, no. 5, pp. 4517–4536, Οκτωβρίου 2021, doi: 10.1016/j.aej.2021.03.021.
- [94] E. Kastanaki και A. Giannis, ‘Dynamic estimation of end-of-life electric vehicle batteries in the EU-27 considering reuse, remanufacturing and recycling options’, *Journal of Cleaner Production*, vol. 393, no. 136349, Μαρτίου 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136349.
- [95] ‘Recycle, Recover and Repurpose Strategy of Spent Li- ion Batteries and Catalysts: Current Status and Future Opportunities - Garole - 2020 - ChemSusChem - Wiley Online Library’. <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cssc.201903213> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [96] ‘Recycled lithium batteries market to hit €6 billion by 2030 — report’, *MINING.COM*, 31 Οκτώβριος 2019. <https://www.mining.com/recycled-lithium-batteries-market-to-hit-6-billion-by-2030-report/> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [97] L. C. Casals, B. Amante García, και C. Canal, ‘Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis’, *Journal of Environmental Management*, vol. 232, pp. 354–363, Φεβρουαρίου 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.11.046.
- [98] L. C. Casals, B. A. García, F. Aguesse, και A. Iturrondobeitia, ‘Second life of electric vehicle batteries: relation between materials degradation and environmental impact’, *Int J Life Cycle Assess*, vol. 22, no. 1, pp. 82–93, Ιανουαρίου 2017, doi: 10.1007/s11367-015-0918-3.
- [99] ‘Vehicle Charging During Power Outage | Tesla Support’, *Tesla*. <https://www.tesla.com/support/energy/powerwall/mobile-app/vehicle-charging-during-power-outage> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [100] ‘How Much Does the Tesla Powerwall Cost? (2023 Guide)’, *This Old House*. <https://www.thisoldhouse.com/solar-alternative-energy/reviews/tesla-powerwall-cost> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [101] C. White, B. Thompson, και L. G. Swan, ‘Repurposed electric vehicle battery performance in second-life electricity grid frequency regulation service’, *Journal of Energy Storage*, vol. 28, no. 101278, Απριλίου 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101278.
- [102] A. Kampker, S. Wessel, F. Fiedler, και F. Maltoni, ‘Battery pack remanufacturing process up to cell level with sorting and repurposing of battery cells’, *Jnl Remanufactur*, vol. 11, no. 1, pp. 1–23, Απριλίου 2021, doi: 10.1007/s13243-020-00088-6.
- [103] B. Gohla-Neudecker, M. Bowler, και S. Mohr, ‘Battery 2nd life: Leveraging the sustainability potential of EVs and renewable energy grid integration’, στο *2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, Ιουνίου 2015, pp. 311–318. doi: 10.1109/ICCEP.2015.7177641.
- [104] E. Martinez-Laserna κ.ά., ‘Technical Viability of Battery Second Life: A Study From the Ageing Perspective’, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 3, pp. 2703–2713, Φεβρουαρίου 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2801262.

- [105] ‘Used Toyota Hybrid Batteries Repurposed At Yellowstone National Park’. [https://www.greencarreports.com/news/1098326\\_used-toyota-hybrid-batteries-repurposed-at-yellowstone-national-park](https://www.greencarreports.com/news/1098326_used-toyota-hybrid-batteries-repurposed-at-yellowstone-national-park) (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [106] F. Lambert, ‘BMW and Bosch open new 2.8 MWh energy storage facility built from batteries from over 100 electric cars’, *Electrek*, 22 Σεπτέμβριος 2016. <https://electrek.co/2016/09/22/bmw-bosch-energy-storage-facility-built-from-batteries-from-over-100-electric-cars/> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [107] C. O. T. Future, ‘Reusing EV Batteries, a Game Changer in Renewable Energy’, *Medium*, 11 Νοέμβριος 2016. <https://theictscoop.com/reusing-ev-batteries-a-game-changer-in-renewable-energy-b1e758d5f7fe> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [108] ‘EVgo & BMW launching 2nd-life battery project - electrive.com’, <https://www.electrive.com/>. <https://www.electrive.com/2018/07/11/evgo-bmw-launching-2nd-life-battery-project/> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [109] ‘Eaton talks business cases for energy storage systems in stadiums, hospitals and data centers’, *pv magazine International*, 16 Ιούλιος 2018. <https://www.pv-magazine.com/2018/07/16/eaton-talks-business-cases-for-energy-storage-systems-in-stadiums-hospitals-and-data-centers/> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [110] admin, ‘Renault EV Batteries Find 2nd Life In Electric Passenger Boat’, *EV Info*, 11 Νοέμβριος 2019. <https://www.evinfo.co.nz/2019/11/11/renault-ev-batteries-find-2nd-life-in-electric-passenger-boat/> (ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιούλιος 2023).
- [111] E. Braco, I. San Martín, A. Berrueta, P. Sanchis, and A. Ursúa, ‘Experimental assessment of cycling ageing of lithium-ion second-life batteries from electric vehicles’, *Journal of Energy Storage*, vol. 32, p. 101695, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101695.