



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΜΥΤΙΛΗΝΗ

**Επιβλέπων:**

Δρ Δημήτριος Ζαφειράκης  
Επίκουρος Καθηγητής Πα.Δ.Α.

Αθήνα, Οκτώβριος 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Συσσωρευτές Μετάλλου-Αέρα: Τεχνολογίες και  
Εφαρμογές**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΜΥΤΙΛΗΝΗ

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική Επιτροπή την 14<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2022

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

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

.....  
Δρ Κοσμάς Καββαδίας  
Αναπληρωτής Καθηγητής Πα.Δ.Α.

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

Copyright © -

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, με αριθμό μητρώου 51204051 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  
(Υπογραφή)

.....

# Περίληψη

Η ταχέως εξελισσόμενη αγορά της αποθήκευσης ενέργειας οδηγείται το τελευταίο χρονικό διάστημα από σύγχρονες τεχνολογίες συσσωρευτών και εφαρμογές ηλεκτροκίνησης κατά κύριο λόγο. Στα πλαίσια αυτά, και παρότι οι τεχνολογίες με βάση το λίθιο είναι οι πλέον διαδεδομένες, νέες, πολλά υποσχόμενες τεχνολογικές λύσεις χαμηλότερου κόστους και υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας αναδύονται, μεταξύ των οποίων και οι συσσωρευτές μετάλλου (π.χ. αλουμινίου, ψευδαργύρου, κλπ) – αέρα. Με βάση τα ανωτέρω, στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η εκπόνηση εκτενούς βιβλιογραφικής ανασκόπησης αλλά και αξιολόγησης σύγχρονων τεχνολογιών μετάλλου-αέρα και σχετικών εφαρμογών τους, σε συνδυασμό με τεχνική ανάλυση της αρχής λειτουργίας παρόμοιων συστημάτων.

## Λέξεις Κλειδιά

Συσσωρευτές, Συσσωρευτές Μετάλλου Αέρα, Μπαταρίες, Ηλεκτροκίνηση, Πολυκριτηριακή Ανάλυση.

# Abstract

The rapid market development of energy storage is leading during the last years, to new accumulator technologies and electric mobility applications. In this context, and even if lithium based technologies are the most widespread, new, very promising technologies with lower cost and higher energy density are emerging, among those are metal (f.e. aluminum, zinc, and others) – air batteries. Based on the aforementioned, goal of this thesis is the preparation of an extensive literature review and the evaluation of modern metal-air technologies and their applications, combined with technical analysis of the operating principle of similar systems.

## Key Words

Accumulators, Metal Air Batteries, Batteries, Electric Mobility, Multi Criteria Analysis.

# Περιεχόμενα

<b>Ενότητα 1: Εισαγωγή .....</b>	<b>11</b>
1.1 Γενικά Εισαγωγικά.....	11
1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	11
1.3 Ρύθμιση Ηλεκτρικών Συστημάτων.....	13
1.4 Ευελιξία σε Ηλεκτρικά Συστήματα.....	13
1.5 Κεντρική και Διεσπαρμένη Αποθήκευση Ενέργειας.....	14
1.6 Πορεία του Λιθίου τα τελευταία χρόνια.....	14
<b>Ενότητα 2. Συσσωρευτές .....</b>	<b>15</b>
2.1 Αρχή λειτουργίας των Συσσωρευτών.....	15
2.2 Εφαρμογές των Συσσωρευτών.....	16
2.2.1 Φορητές μπαταρίες.....	16
2.2.2 Μπαταρίες SLI (Ανάφλεξης και Εκκίνησης).....	16
2.2.3 Μπαταρίες Έλξης (Vehicle Traction Batteries).....	17
2.2.4 Σταθερές Μπαταρίες.....	18
2.3 Τεχνολογίες Συσσωρευτών.....	19
2.3.1 Μπαταρίες Μόλυβδου – Οξέος (PbAB).....	19
2.3.2 Μπαταρίες Νικελίου – Καδμίου (NiCad).....	20
2.3.3 Μπαταρίες Νικελίου – Υβριδίου Μετάλλου (NiMH).....	21
2.3.4 Μπαταρίες Λιθίου – ιόντος (Li-ion).....	21
2.3.5 Μπαταρίες Μετάλλου – αέρα (Mt – air).....	22
2.4 Συμπεράσματα.....	23
<b>Ενότητα 3: Συλλογή Δεδομένων και Κριτήρια Σύγκρισης των Μπαταριών Mt – air.....</b>	<b>24</b>
3.1 Κριτήρια.....	24
3.1.1 Ενεργειακά.....	24
3.1.2 Οικονομικά.....	28
3.1.3 Περιβαλλοντικά και Ασφάλειας.....	30
3.2 Σύγκριση με τις μπαταρίες Λιθίου ιόντος (Li ion).....	32

<b>Ενότητα 4: Αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.....</b>	<b>33</b>
4.1 Παρουσίαση και ανάλυση των Ενεργειακών κριτηρίων των Mt air και Li ion.....	33
4.2 Παρουσίαση και ανάλυση των Οικονομικών κριτηρίων των Mt air και Li ion.....	36
4.3 Πολυκριτηριακή Ανάλυση των διαφόρων Mt air και Li ion συσσωρευτών.....	39
4.3.1 Αξιολόγηση των Κριτηρίων.....	39
4.3.2 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση.....	40
4.3.3 Βαθμολογία των Συσσωρευτών Mt air και Li ion.....	42
<b>Ενότητα 5: Εφαρμογές των Συσσωρευτών Mt air .....</b>	<b>46</b>
5.1 Πρακτικές Εφαρμογές των Mt air.....	47
5.2 Συμπεράσματα.....	47
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>48</b>
<b>Παράρτημα 1: Πίνακες παραμέτρων των Συσσωρευτών Μετάλλου αέρα.</b>	<b>59</b>
<b>Παράρτημα 2: Δεδομένα των συσσωρευτών Mt air και Li ion.....</b>	<b>79</b>

## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 3.1:</b> Ενεργειακές Παράμετροι Συσσωρευτών Αλουμινίου Αέρα.....	59
<b>Πίνακας 3.2:</b> Ενεργειακές Παράμετροι Συσσωρευτών Ψευδαργύρου Αέρα .....	59
<b>Πίνακας 3.3:</b> Ενεργειακές Παράμετροι Συσσωρευτών Λιθίου Αέρα.....	60
<b>Πίνακας 3.4:</b> Ενεργειακές Παράμετροι Συσσωρευτών Μαγνησίου Αέρα.....	60
<b>Πίνακας 3.5:</b> Ενεργειακές Παράμετροι Συσσωρευτών Νατρίου Αέρα.....	61
<b>Πίνακας 3.6:</b> Ενεργειακές Παράμετροι Συσσωρευτών Σιδήρου Αέρα .....	61
<b>Πίνακας 3.7:</b> Ενεργειακές Παράμετροι Συσσωρευτών Σιλικόνης Αέρα.....	62
<b>Πίνακας 3.8:</b> Οικονομικές Παράμετροι Συσσωρευτών Αλουμινίου Αέρα .....	62
<b>Πίνακας 3.9:</b> Οικονομικές Παράμετροι Συσσωρευτών Ψευδαργύρου Αέρα.....	63
<b>Πίνακας 3.10:</b> Οικονομικές Παράμετροι Συσσωρευτών Λιθίου Αέρα .....	63
<b>Πίνακας 3.11:</b> Οικονομικές Παράμετροι Συσσωρευτών Μαγνησίου Αέρα .....	64
<b>Πίνακας 3.12:</b> Οικονομικές Παράμετροι Συσσωρευτών Νατρίου Αέρα .....	64
<b>Πίνακας 3.13:</b> Οικονομικές Παράμετροι Συσσωρευτών Σιδήρου Αέρα .....	65
<b>Πίνακας 3.14:</b> Οικονομικές Παράμετροι Συσσωρευτών Σιλικόνης Αέρα.....	65
<b>Πίνακας 3.15:</b> Παράμετροι περιβάλλοντος και ασφάλειας των συσσωρευτών Al air.....	66
<b>Πίνακας 3.16:</b> Παράμετροι περιβάλλοντος και ασφάλειας των συσσωρευτών Ψευδαργύρου αέρα. ....	67
<b>Πίνακας 3.17:</b> Παράμετροι περιβάλλοντος και ασφάλειας των συσσωρευτών Λιθίου αέρα.	68
<b>Πίνακας 3.18:</b> Παράμετροι περιβάλλοντος και ασφάλειας των συσσωρευτών Μαγνησίου αέρα. ....	68
<b>Πίνακας 3.19:</b> Παράμετροι περιβάλλοντος και ασφάλειας των συσσωρευτών Νατρίου αέρα. .....	69
<b>Πίνακας 3.20:</b> Παράμετροι περιβάλλοντος και ασφάλειας των συσσωρευτών Σιδήρου αέρα. .....	69
<b>Πίνακας 3.21:</b> Παράμετροι περιβάλλοντος και ασφάλειας των συσσωρευτών Σιλικόνης αέρα. .....	70
<b>Πίνακας 3.22:</b> Ενεργειακά, Οικονομικά και Περιβαλλοντικά/Ασφάλειας Κριτήρια των συσσωρευτών Li ion από την βιβλιογραφία.....	71
<b>Πίνακας 4.23:</b> Παρουσίαση της Βαρύτητας και της σημασίας της, για την αξιολόγηση στην Πολυκριτηριακή Ανάλυση. ....	72



<b>Πίνακας 4.24:</b> Παρουσίαση των προτιμήσεων μεταξύ των κριτηρίων και η τελική βαρύτητα σε ποσοστό. ....	72
<b>Πίνακας 4.25:</b> Μέγιστα αποτελέσματα των ενεργειακών παραμέτρων από τα δεδομένα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης των συσσωρευτών Mt air και Li ion. ....	73
<b>Πίνακας 4.26:</b> Βαθμολογία των Ενεργειακών Παραμέτρων των συσσωρευτών Mt air και Li ion. ....	74
<b>Πίνακας 4.27:</b> Αποτελέσματα των Οικονομικών παραμέτρων, από την βιβλιογραφική ανασκόπηση των συσσωρευτών Mt air και Li ion. ....	75
<b>Πίνακας 4.28:</b> Βαθμολογία των Οικονομικών Παραμέτρων των συσσωρευτών Mt air και Li ion. ....	75
<b>Πίνακας 4.29:</b> Αποτελέσματα των παραμέτρων Περιβάλλοντος και Ασφάλειας, από την βιβλιογραφική ανασκόπηση των συσσωρευτών Mt air και Li ion. ....	76
<b>Πίνακας 4.30:</b> Βαθμολογία των παραμέτρων Περιβάλλοντος και Ασφάλειας των συσσωρευτών Mt air και Li ion. ....	76
<b>Πίνακας 4.31:</b> Βαθμολογία των Συσσωρευτών Mt air και Li ion. ....	77
<b>Πίνακας 4.32:</b> Νέο Άθροισμα των βαθμολογιών, σύμφωνα με τις βαρύτητες του <b>Πίνακα 4.23</b> . ....	77
<b>Πίνακας 4.33:</b> Νέο Άθροισμα των βαθμολογιών, με βαρύτητα 100% στα Ενεργειακά Κριτήρια. ....	77
<b>Πίνακας 4.34:</b> Νέο Άθροισμα των βαθμολογιών, με βαρύτητα 100% στα Οικονομικά Κριτήρια. ....	78
<b>Πίνακας 4.35:</b> Νέο Άθροισμα των βαθμολογιών, με βαρύτητα 100% στα Κριτήρια Περιβάλλοντος και Ασφάλειας. ....	78
<b>Πίνακας 4.36:</b> Νέο Άθροισμα των βαθμολογιών, με ίση βαρύτητα σε όλα τα κριτήρια. ....	78
<b>Πίνακας 4.37:</b> Δεδομένα Συσσωρευτών Αλουμινίου αέρα, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία. ....	79
<b>Πίνακας 4.38:</b> Δεδομένα Συσσωρευτών Αλουμινίου αέρα, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία. ....	80
<b>Πίνακας 4.39:</b> Δεδομένα Συσσωρευτών Ψευδαργύρου αέρα, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία. ....	81
<b>Πίνακας 4.40:</b> Δεδομένα Συσσωρευτών Ψευδαργύρου αέρα, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία. ....	82
<b>Πίνακας 4.41:</b> Δεδομένα Συσσωρευτών Λιθίου αέρα, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία. ....	83
<b>Πίνακας 4.42:</b> Δεδομένα Συσσωρευτών Λιθίου αέρα, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία. ....	84

<b>Πίνακας 4.43:</b> Δεδομένα Συσσωρευτών Μαγνησίου αέρα, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία.....	85
<b>Πίνακας 4.44:</b> Δεδομένα Συσσωρευτών Νατρίου αέρα, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία. .....	86
<b>Πίνακας 4.45:</b> Δεδομένα Συσσωρευτών Σιδήρου αέρα, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία.	87
<b>Πίνακας 4.46:</b> Δεδομένα Συσσωρευτών Σιλικόνης αέρα, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία. .....	88
<b>Πίνακας 4.47:</b> Δεδομένα Συσσωρευτών Λιθίου ιόντος, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία.	89
<b>Πίνακας 4.48:</b> Δεδομένα Συσσωρευτών Λιθίου ιόντος, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία.	90

## Κατάλογος Γραφημάτων

<b>Γράφημα 4.1:</b> Ειδική Χωρητικότητα των μπαταριών Μετάλλου αέρα και Λιθίου ιόντος. ....	34
<b>Γράφημα 4.2:</b> Ειδική Ενέργεια των συσσωρευτών Μετάλλου αέρα και Λιθίου ιόντος. ....	35
<b>Γράφημα 4.3:</b> Βαθμός απόδοσης (Round-trip) των συσσωρευτών Μετάλλου αέρα και Λιθίου ιόντος. ....	35
<b>Γράφημα 4.4:</b> Κύκλοι ζωής των συσσωρευτών Μετάλλου αέρα και Λιθίου ιόντος. ....	36
<b>Γράφημα 4.5:</b> Κόστος υλικού των συσσωρευτών Μετάλλου αέρα και Λιθίου ιόντος. ....	37
<b>Γράφημα 4.6:</b> Συνολικό κόστος συσσωρευτών Μετάλλου αέρα και Λιθίου ιόντος. ....	38
<b>Γράφημα 4.7:</b> Νέο Άθροισμα της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης σύμφωνα με τις βαρύτητες του <b>Πίνακα 4.24</b> . ....	42
<b>Γράφημα 4.8:</b> Νέο Άθροισμα της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης με Βαρύτητα 100% στα Ενεργειακά Κριτήρια. ....	43
<b>Γράφημα 4.9:</b> Νέο Άθροισμα της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης με Βαρύτητα 100% στα Οικονομικά Κριτήρια. ....	44
<b>Γράφημα 4.10:</b> Νέο Άθροισμα της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης με Βαρύτητα 100% στα Κριτήρια Περιβάλλοντος και Ασφάλειας. ....	45
<b>Γράφημα 4.11:</b> Νέο Άθροισμα της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης με ίση Βαρύτητα σε όλα τα κριτήρια. ....	45

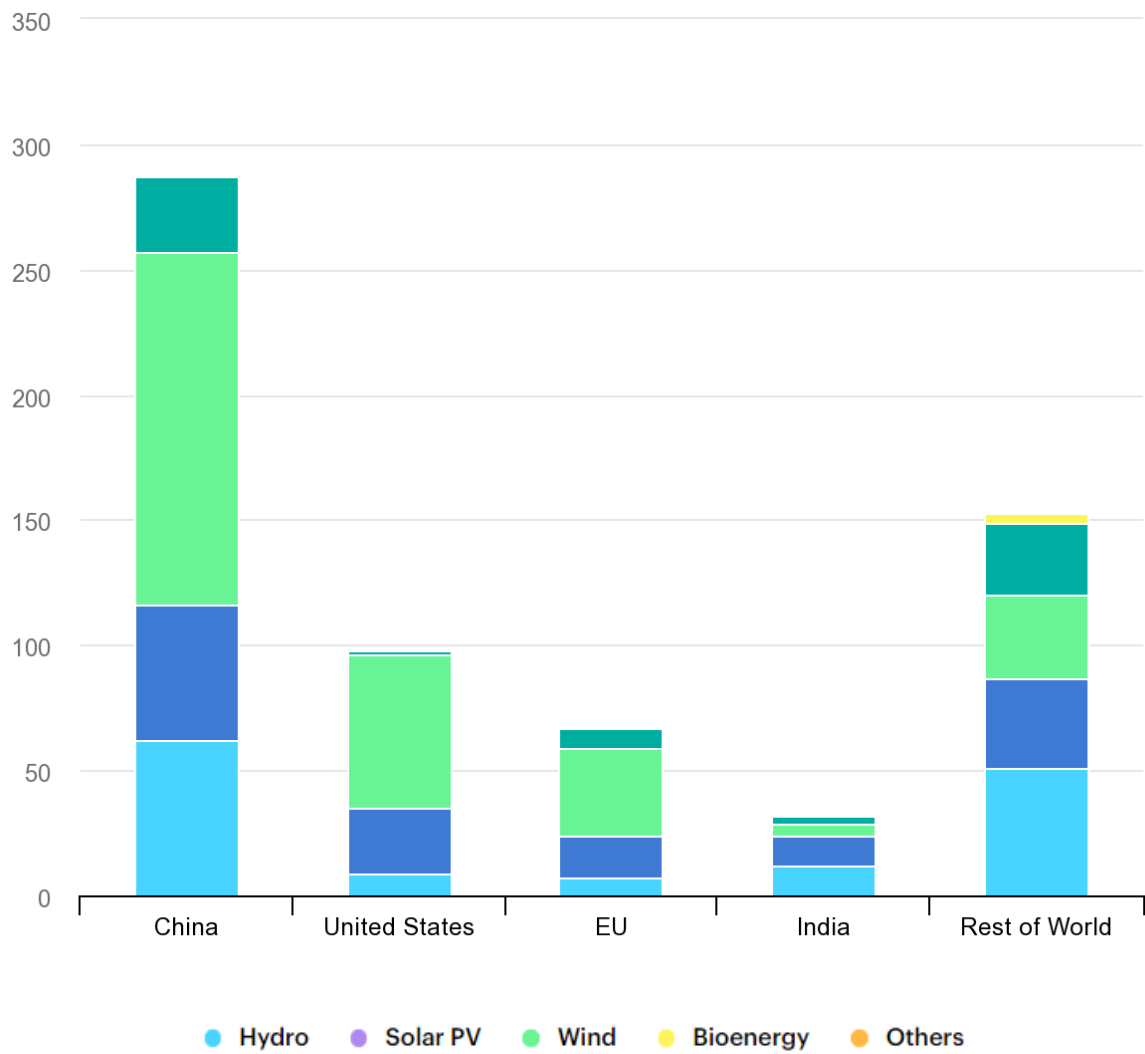
# Ενότητα 1: Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά Εισαγωγικά.

Με την συνεχόμενη αύξηση της ενεργειακής ζήτησης και την κλιματική αλλαγή, το ενεργειακό πρότυπο έχει αλλάξει έτσι ώστε να μειωθούν οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου (Lip Huat Saw, et al., 2017 [1]). Η αποθήκευση και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), έχουν κυρίαρχη σημασία για να θεμελιωθεί μία βιώσιμη κοινωνία (Tibor Nagy, et al., 2020 [2]). Η ηλιακή ενέργεια, μία από τις πιο υποσχόμενες ΑΠΕ θα μπορούσε να καλύψει την ενεργειακή ζήτηση του πλανήτη (16 TW/year) (Qi Li, et al., 2017 [3]). Ωστόσο, για να μπορέσει να αξιοποιηθεί η ενέργεια που παράγεται από τις ΑΠΕ, πρέπει να αποθηκεύεται.

## 1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η ενέργεια είναι ένας από τους σημαντικότερους πόρους για την ανθρώπινη επιβίωση. Στις νέες τεχνολογίες υπάρχει μεγάλη ανάγκη για παραγωγή ενέργειας από τις ΑΠΕ (Gunnar Luderer, et al., 2017 [4]). Ανάμεσα στις νέες πηγές ενέργειας, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια είναι οι βασικοί στόχοι ανάπτυξης παγκοσμίως, λόγω των άφθονων αποθεμάτων τους και της προστασίας του περιβάλλοντος. Το 2020 η εγκατεστημένη ισχύς από την αιολική ενέργεια παγκοσμίως ξεπέρασε τα προηγούμενα έτη με 93 GW, 53,9 % περισσότερο από το 2019 (Chao Ai, et al., 2022 [5]). Η Ηλιακή ενέργεια είναι μία ΑΠΕ η οποία μπορεί να βρεθεί σε διάφορες εφαρμογές. Σε συμβατικές εφαρμογές, συστήματα που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια, χρησιμοποιούνται σε οροφές σπιτιών, σε υπαίθριο χώρο και σε προσόψεις. Οι οροφές κατά την διάρκεια μίας ζεστής ημέρας του καλοκαιριού μπορούν να απορροφήσουν μέχρι και 40 MJ/m<sup>2</sup>/μέρα (Tao Ma, et al., 2022 [6]).



**Διάγραμμα 1.1:** Παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω ΑΠΕ σε TWh, ανά τεχνολογία, κράτος και ήπειρο. (International Energy Agency, 2020, [134])

### 1.3 Ρύθμιση Ηλεκτρικών Συστημάτων.

Τα ηλεκτρικά συστήματα που βασίζονται στις ΑΠΕ για παραγωγή ηλεκτρισμού, όπως τα φωτοβολταϊκά, μπορούν να μειώσουν τις απώλειες και την αιχμή ζήτησης κατά την διάρκεια της ημέρας, αξιοποιώντας το υφιστάμενο τοπικό δυναμικό. Ωστόσο, αν αυτά τα συστήματα δεν έχουν ρυθμιστεί επαρκώς, είναι πιθανό να υπάρχουν αυξομειώσεις στην τάση, λόγω της αντίστροφης ροής ισχύος (Insu Kim, et al., 2020 [7]), ενώ αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες στις οποίες ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα που συνδέονται στο δίκτυο για την επαναφόρτισή τους, μπορούν να εξομαλύνουν τις εναλλαγές στην τάση κατά την διάρκεια της φόρτισης. (Nader A. El-Taweel, et al., 2019 [8]).

### 1.4 Ευελιξία σε Ηλεκτρικά Συστήματα.

Η αποθήκευση ενέργειας είναι η σύλληψη της ενέργειας που έχει παραχθεί, για την χρήση της σε μελλοντικό χρόνο. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους αποθηκεύεται η ενέργεια και μερικοί από αυτούς είναι:

- Με συμπιεσμένο αέρα. Με την χρήση ηλεκτρικού ρεύματος, γίνεται η συμπίεση του αέρα (συνήθως σε υπόγειες κοιλότητες). Όταν χρειαστεί αυτή η ενέργεια, τότε ο αέρας αυτός αφήνεται ελεύθερος και αφού αναμιχθεί με καύσιμο για την παραγωγή καυσαερίων, οδηγείται σε έναν στρόβιλο, ο οποίος παράγει ηλεκτρική ενέργεια.
- Με αντλησιοταμίευση. Το νερό οδηγείται σε μια δεξαμενή μέσω μιας αντλίας που λειτουργεί με ηλεκτρικό ρεύμα. Στην συνέχεια, αφήνεται ελεύθερο και με την φυσική ροή του κινεί έναν στρόβιλο.
- Με μπαταρίες. Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, αποθηκεύουν ηλεκτρικό ρεύμα για την χρήση του σε επόμενο χρόνο.
- Με θερμότητα. Σε αυτή την περίπτωση το ηλεκτρικό ρεύμα χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμικής ενέργειας, η οποία μπορεί να αποθηκευτεί μέχρι να χρειαστεί. Για παράδειγμα, το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ψύξη νερού όταν δεν υπάρχει ζήτηση ενέργειας και στην συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για ψύξη όταν υπάρχει μεγάλη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9])

Αυτοί είναι μερικοί τρόποι αποθήκευσης ενέργειας σε ηλεκτρικά συστήματα. Μαζί με αυτούς τους τρόπους, νέες τεχνολογίες αναπτύσσονται όπως οι υπερπυκνωτές, οι μπαταρίες ροής (Flow Batteries) και η αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας (epa.gov [10]).

## 1.5 Κεντρική και Διεσπαρμένη Αποθήκευση Ενέργειας.

Η Κεντρική Αποθήκευση Ενέργειας (ΚΑΕ), απευθύνεται στην αποθήκευση μεγάλης κλίμακας ενέργειας σε κεντρικά δίκτυα. Η Διεσπαρμένη Αποθήκευση Ενέργειας (ΔΑΕ), είναι η αποθήκευση ενέργειας σε μικρότερα δίκτυα (microgrids) τα οποία έχουν την δυνατότητα να συνδεθούν και με το κεντρικό δίκτυο, για την βελτιστοποίηση της διαχείρισης ενέργειας (Seyed Ehsan Ahmadi, et al., 2022 [11]). Η ΚΑΕ μειώνει την ενέργεια που χρειάζεται το κεντρικό σύστημα για να τροφοδοτήσει το δίκτυο (Joseph Maria Jebamalai, et al., 2020 [12]), ενώ η ΔΑΕ εξομαλύνει την ζήτηση και τον εφοδιασμό του κεντρικού δικτύου (Laura Florini, Marco Aiello, 2019 [13]).

## 1.6 Πορεία του Λιθίου τα τελευταία χρόνια.

Το Λίθιο (Li), είναι ένα από τα ελαφρύτερα και πιο αντιδραστικά είδη μετάλλου (Mt), έχοντας το καλύτερο ηλεκτροχημικό δυναμικό ( $E^0 = -3,045 \text{ V}$ ), ενώ προσφέρει πολύ υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος στις μπαταρίες (Peter Kurzweil, 2014 [14]). Το λίθιο σήμερα, χρησιμοποιείται σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες κινητών, φορητών υπολογιστών, καμερών και ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και σε μπαταρίες μίας χρήσης, και οι μπαταρίες Λιθίου ιόντος (Li ion) είναι το είδος συσσωρευτή που έχει κατακτήσει την αγορά. Μερικές από τις τεχνολογίες με βάση το λίθιο είναι οι Li ion, Λιθίου Θείου (Li-S), Λιθίου αέρα (Li air), Λιθίου διοξειδίου του άνθρακα (Li CO<sub>2</sub>) και άλλες (Taehoon Kim, et al., 2019 [15]).

Η εγκατεστημένη ισχύς που προσφέρουν οι μπαταρίες Li-ion έχει εκτιμηθεί από την FCAB (Federal Consortium for Advanced Batteries [16]) ότι θα αυξηθεί από τα 1.5 GW την χρονιά του 2020, στα 7.8 GW το 2025.

Ωστόσο, υπάρχουν μερικά προβλήματα που αφορούν το κόστος του λιθίου και θέματα ασφάλειας κατά την λειτουργία των Li-ion συσσωρευτών, που απασχολούν την επιστημονική κοινότητα για την βελτίωση της Li-ion τεχνολογίας. Στην ηλεκτροκίνηση, το καινούριο Tesla model S, έχει αυτονομία για περίπου 637 km ανά φόρτιση (400 mi) (Tesla.com, 2022 [17]). Οι βελτιώσεις αυτές στην αυτονομία οδήγησης επιτυγχάνονται, με την προσθήκη περισσότερων συσσωρευτών στο όχημα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος (Tao Liu, et al., 2020 [18]). Επίσης, υπάρχει ένας προβληματισμός για την ασφάλεια των μπαταριών Li-ion καθώς αναπτύσσουν υψηλές θερμοκρασίες κατά την λειτουργία και την φόρτισή τους (Peizhao Lyu, et al., 2020 [19]). Η τιμή του Λιθίου σύμφωνα με την London Metal Exchange [20] ανέρχεται στα 75000 \$/tn.

## Ενότητα 2. Συσσωρευτές

Οι συσσωρευτές είναι συστήματα τα οποία περιέχουν συγκεκριμένα ποσά ενέργειας. Ένα συμπίεμένο ελατήριο, ο συμπίεσμένος αέρας ή νερό που βρίσκεται σε ύψος, μπορεί να θεωρηθεί συσσωρευτής. Τα τελευταία χρόνια, το είδος συσσωρευτή που χρησιμοποιείται όλο ένα και περισσότερο είναι οι μπαταρίες, οι οποίες είναι συσκευές που μετατρέπουν την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020, [9]).

Υπάρχουν διαφορετικά είδη μπαταριών, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους και το χημικό στοιχείο που περιέχουν. Οι πιο συνηθισμένες μπαταρίες είναι οι Li-ion, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο.

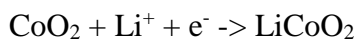
### 2.1 Αρχή λειτουργίας των Συσσωρευτών.

Η μπαταρία είναι μία συσκευή η οποία μετατρέπει την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Δηλαδή, η χημική ενέργεια που έχει αποθηκευτεί σε χημικούς δεσμούς, μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτές οι αντιδράσεις, λαμβάνουν μέρος σε δύο διαφορετικά σημεία, τα οποία είναι γνωστά και ως ηλεκτρόδια. Στο πρώτο ηλεκτρόδιο, το ενεργό υλικό οξειδώνεται και παράγονται ηλεκτρόνια. Στο δεύτερο ηλεκτρόδιο, τα ηλεκτρόνια καταναλώνονται με αποτέλεσμα την μείωση του ενεργού υλικού.

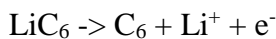
Μερικά παραδείγματα χημικών αντιδράσεων:

Μπαταρίες Li-ion:

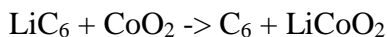
Η χημική αντίδραση του θετικού ηλεκτροδίου (κάθοδος) σε υπόστρωμα οξειδίου του κοβαλτίου με πρόσμιξη λιθίου:



Η χημική αντίδραση του αρνητικού ηλεκτροδίου (άνοδος):



Η ολοκληρωμένη χημική αντίδραση (από αριστερά προς τα δεξιά: εκφόρτιση, δεξιά προς τα αριστερά: φόρτιση), είναι η εξής:



(Bergveld, H. J, et al., 2002 [21]), (Dhameja Sandeep, 2001 [22]).

## 2.2 Εφαρμογές των Συσσωρευτών

Στο τρέχον στάδιο, η τεχνολογία βασίζεται στις βελτιώσεις των ηλεκτροχημικών μπαταριών. Σε πολλές περιπτώσεις, η κύρια πρόκληση αυτής της τεχνολογίας είναι η πυκνότητα ισχύος και ενέργειας. Αυτός είναι και ο λόγος που γίνονται πολλές επενδύσεις, για την βελτίωση σε διαφορετικούς τύπους μπαταριών και τεχνολογιών (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020, [9]).

### 2.2.1 Φορητές μπαταρίες

Ένα είδος συσσωρευτή είναι οι φορητές μπαταρίες. Συσκευές όπως ηλεκτρονικά παιχνίδια, ασύρματες συσκευές, λάπτοπ, συνήθως λειτουργούν με μπαταρίες νικελίου καδμίου (NiCd), Νικελίου - Υβριδίου μετάλλου (NiMH) ή και Λιθίου ιόντος (Li-ion). Για την κατανάλωση μεγάλων ποσών ενέργειας, χρειάζονται επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στις φορητές εφαρμογές είναι σε μέγεθος A, AA, AAA, ενώ τα μεγέθη B, C, και D είναι επίσης διαθέσιμα στην αγορά. Αυτές οι κυψέλες έχουν κυλινδρικό σχήμα το οποίο είναι καθορισμένο από την Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC, [23]), (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]).



Εικόνα 2.2.1.1: Μπαταρίες D, C, AA, AAA, AAAA και 9V.

### 2.2.2 Μπαταρίες SLI (Ανάφλεξης και Εκκίνησης).

Οι μπαταρίες SLI είναι πολύ συνηθισμένες στις βιομηχανίες αυτοκινήτων. Όλα τα οχήματα που κινούνται με ορυκτά καύσιμα, χρειάζονται μία μπαταρία SLI για την εκκίνησή τους (Tae Won Noh, et al., 2019 [24]). Η ονομαστική τάση για τις μοτοσυκλέτες και τα αυτοκίνητα είναι 6 ή 12 V και στα βαριά οχήματα είναι μέχρι και 24 V.

Στις εφαρμογές SLI, η πιο συνηθισμένη τεχνολογία είναι οι μπαταρίες μόλυβδου – οξέος. Τα πλεονεκτήματα αυτών των μπαταριών είναι ότι έχουν χαμηλό κόστος, προσφέρουν υψηλή ισχύ και μπορούν να ανακυκλωθούν (Mingyang Li, et al., 2019 [25]). Στην αγορά, η χωρητικότητα των μπαταριών μόλυβδου οξέος είναι από 100 μέχρι 1200 Wh. Ωστόσο, αυτή η τεχνολογία μπορεί να προσφέρει και μεγαλύτερη χωρητικότητα.



Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι, στα ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα (EV) χρειάζονται οι μπαταρίες SLI, διότι οι ηλεκτρικές συσκευές και ο εξοπλισμός ενός αυτοκινήτου κατασκευάζονται σύμφωνα με πηγή ισχύος των 12 V, αλλά τα EV έχουν ηλεκτρική τάση περίπου 230 V. Άρα για τις συσκευές όπως ο φωτισμός, το ράδιο και άλλα ηλεκτρονικά μέρη, χρειάζεται ρυθμιστής τάσης, ο οποίος έχει υψηλό κόστος, ή μια SLI μπαταρία (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]).

### 2.2.3 Μπαταρίες Έλξης (Vehicle Traction Batteries).

Στα υβριδικά και στα ηλεκτροκίνητα οχήματα, η μπαταρία χρησιμοποιείται για να αποθηκεύει και στην συνέχεια για να προσφέρει την ενέργεια που χρειάζεται. Ακόμα και στα οχήματα με κυψέλες καυσίμου, οι μπαταρίες χρειάζονται για την επιτάχυνση του οχήματος (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]).

Ένα από τα κύρια εξαρτήματα ενός ηλεκτροκίνητου αυτοκινήτου (EV), είναι οι μπαταρίες έλξης οι οποίες προσφέρουν υψηλή απόδοση ισχύος και ανάκτηση της ενέργειας κατά την πέδηση, αλλά προσφέρουν μεγαλύτερη ασφάλεια κατά την οδήγηση και επεκτείνουν σημαντικά το εύρος της απόστασης που μπορεί να καλύψει ένα EV. (Cheng Wang, et al., 2022 [26]). Η ενεργειακή χωρητικότητα που μπορεί να προσφέρει μία μπαταρία έλξης κυμαίνεται στο εύρος των 20 με 630 kWh, ωστόσο ανάλογα με τις ενεργειακές απαιτήσεις, είναι εφικτό να αυξηθεί η ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί, συνδέοντας περισσότερες μονάδες σε σειρά ή παράλληλα.

Σε αυτές τις εφαρμογές, λόγω των ενεργειακών απαιτήσεων χρειάζονται μπαταρίες οι οποίες έχουν υψηλή ισχύ και ενεργειακή πυκνότητα. Το είδος μπαταρίας που χρησιμοποιείται στις εφαρμογές έλξης, είναι οι μπαταρίες λιθίου, μόλυβδου οξέος και νικελίου καδμίου. (A. Kuperman, et al., 2013 [27]).



*Εικόνα 2.2.3.1 Μπαταρία έλξης η οποία περιέχει πολλές κυψέλες μέσα στην μονάδα.  
(evfiresafe.com)*



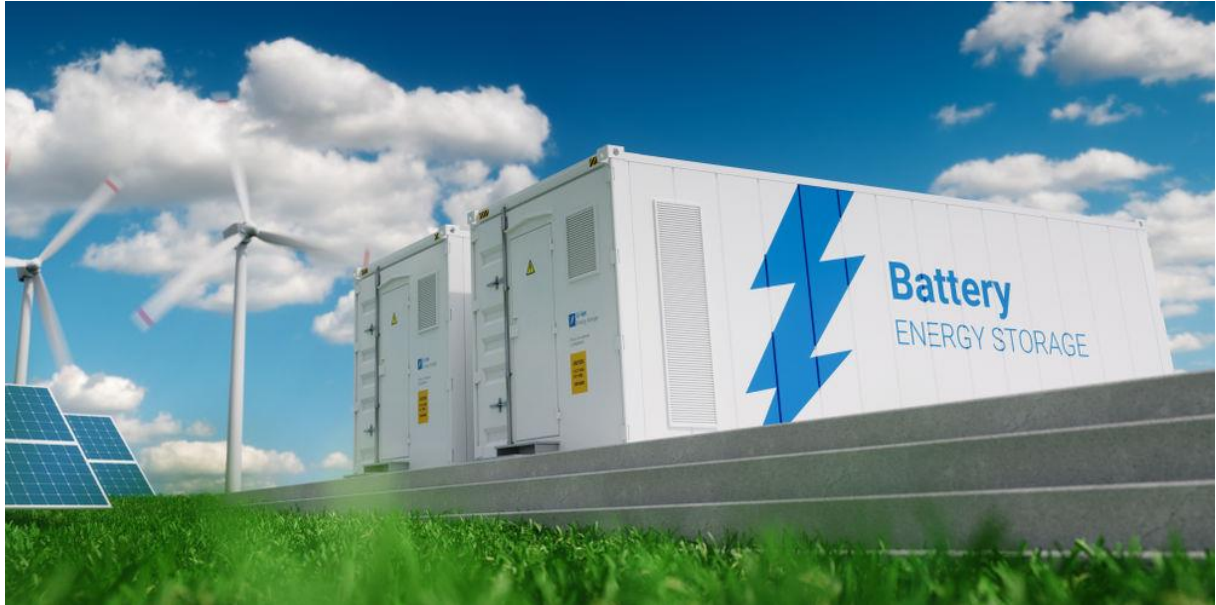
Εικόνα 2.2.3.2 Μονάδες μπαταριών οι οποίες είναι συνδεδεμένες σε σειρά. (evfiresafe.com)

Σε μικρότερα οχήματα που χρησιμοποιούνται κυρίως για κυκλοφορία στην πόλη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μπαταρίες μολυβδου οξέος, καθώς έχουν χαμηλό κόστος και μπορούν να ανακυκλωθούν. (Supriya Wadekar, 2020 [28]). Το μοναδικό μειονέκτημα των μπαταριών μολυβδου οξέος στην ηλεκτροκίνηση είναι το υψηλό βάρος τους, με αποτέλεσμα να πρέπει να αυξηθεί η ισχύς του κινητήρα (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]).

## 2.2.4 Σταθερές Μπαταρίες

Οι σταθερές μπαταρίες χρησιμοποιούνται κυρίως για την ρύθμιση της τάσης και την διαχείριση ενέργειας (προσθήκη ή απορρόφηση ισχύος από το δίκτυο) (Abraham Alem Kebede, et al., 2021 [29]). Η καλύτερη επιλογή είναι οι μπαταρίες μολυβδου οξέος, λόγω του χαμηλού κόστους, αλλά τα τελευταία χρόνια μία εναλλακτική επιλογή είναι οι μπαταρίες λιθίου ιόντος (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]). Επίσης, έχει ερευνηθεί και η απόδοση των μπαταριών νατρίου – ιόντος. Λόγω της αφθονίας των αποθεμάτων νατρίου, δείχνουν να έχουν την δυνατότητα να καλύψουν τις απαιτήσεις που αφορούν την διαθεσιμότητα του υλικού και το κόστος για αποθήκευση ενέργειας σε συστήματα μεγάλης κλίμακας, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και έξυπνων δικτύων (smart grids) (Tiefeng Liu, et al., 2019 [30]).

Η εφαρμογή των σταθερών μπαταριών, απαιτεί υψηλή χωρητικότητα έτσι ώστε να μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις των ΑΠΕ και έξυπνων δικτύων (Tiefeng Liu, et al., 2019 [30]). Ο κύκλος ζωής των σταθερών μπαταριών μολυβδου οξέος κυμαίνεται στα 12 χρόνια, ενώ η ενεργειακή χωρητικότητα που μπορούν να προσφέρουν φτάνει στις 5 MWh.



Εικόνα 2.2.4.1: Σταθερή μπαταρία.

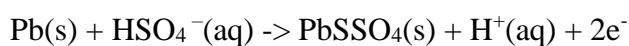
## 2.3 Τεχνολογίες Συσσωρευτών

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, υπάρχουν διαφορετικές εφαρμογές στις οποίες ένα βασικό κομμάτι τους, είναι οι μπαταρίες. Κάθε περίπτωση, απαιτεί την κατάλληλη τεχνολογία με κύριο κριτήριο αυτό που μπορεί να προσφέρει σε χωρητικότητα, ισχύ, κύκλο ζωής, κλπ. Όλες οι μπαταρίες, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις πρωτογενείς (μη – επαναφορτιζόμενες) και τις δευτερογενείς (επαναφορτιζόμενες). Κάποιες τεχνολογίες, έχουν ήδη εισέλθει στην αγορά ενώ είναι πολλές αυτές που βρίσκονται υπό διερεύνηση.

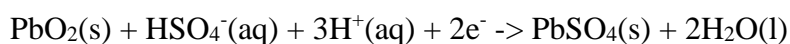
### 2.3.1 Μπαταρίες Μόλυβδου – Οξέος (PbAB)

Οι μπαταρίες Μόλυβδου – οξέος (Lead – Acid Battery PbAB), θεωρούνται ως μία από τις παλαιότερες επιτυχημένες εφευρέσεις στην ιστορία των μπαταριών. Εφευρέθηκε το 1859 από τον Gaston Planté και αποτελείται από διοξείδιο του μόλυβδου στο θετικό ηλεκτρόδιο και καθαρό μόλυβδο στο αρνητικό ηλεκτρόδιο. Ο ηλεκτρολύτης, είναι θεικό οξύ (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]).

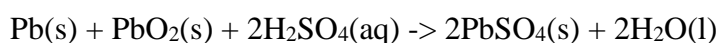
Χημική αντίδραση της αρνητικής πλάκας:



Χημική αντίδραση της θετικής πλάκας:



Η τελική χημική αντίδραση είναι η εξής:



Οι PbAB χρησιμοποιούνται κυρίως στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με παροχή συνεχούς ρεύματος (DC), και σε συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικού ρεύματος. Ωστόσο, χρειάζεται αρκετός χώρος, γεγονός που υποδηλώνει την ανάγκη για αύξηση της χωρητικότητάς τους. (Choong – Koo Chang, 2019 [31]).

Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι PbAB για διαφορετικές χρήσεις. Μερικές από αυτές είναι για χρήση σε εφαρμογές:

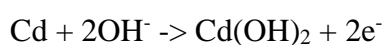
- SLI PbAB: Χρησιμοποιούνται κυρίως στην βιομηχανία αυτοκινήτων, διότι παράγουν υψηλή ένταση ρεύματος η οποία βοηθάει στην εκκίνηση του αυτοκινήτου (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]).
- Κλειστού τύπου PbAB: Χρησιμοποιούνται κυρίως για βαθιά εκφόρτιση σε συστήματα που αποθηκεύουν την ηλιακή ενέργεια (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]) και ως εφεδρική μπαταρία (Yemeserach Mekonnen, et al., 2018 [32]).
- Σωληνοειδής PbAB: Χρησιμοποιούνται σε μικρά οχήματα με μεγάλο βάθος εκφόρτισης, γιατί βοηθούν στην κίνησή του (Md Abul Kashem, et al., 2019 [33]) και ως σταθερές μπαταρίες (Arun S, et al., 2020 [34]).

### 2.3.2 Μπαταρίες Νικελίου – Καδμίου (NiCad)

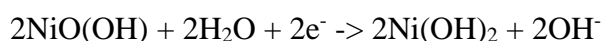
Οι μπαταρίες NiCad, εφευρέθηκαν στην αλλαγή του 19<sup>ου</sup> στον 20<sup>ο</sup> αιώνα και από τότε είναι από τις μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, όταν απαιτείται υψηλή ένταση ρεύματος ή μεγαλύτεροι κύκλοι ζωής (Slobodan Petrovic, 2020 [35]). Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές που χρειάζονται υψηλή ισχύ, όπως φορητές ηλεκτρικές σκούπες, κάμερες, ξυριστικές μηχανές, στερεοφωνικά, ασύρματα τηλέφωνα και άλλες παρόμοιες συσκευές (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]). Η ονομαστική τους τάση είναι 1.2 V.

Το θετικό ηλεκτρόδιο των NiCad αποτελείται από Ni(OH)<sub>2</sub> / NiOOH, το αρνητικό ηλεκτρόδιο από Cd(OH)<sub>2</sub> και ο ηλεκτρολύτης είναι υδροξείδιο του καλίου (KOH).

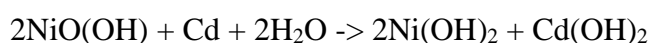
Η χημική αντίδραση του ηλεκτροδίου του καδμίου κατά την εκφόρτιση είναι:



Η αντίδραση στο ηλεκτρόδιο από οξείδιο του νικελίου:



Η συνολική αντίδραση κατά την εκφόρτιση:



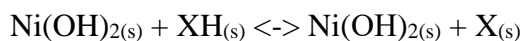
Τα πλεονεκτήματά τους είναι ότι, έχουν αυξημένους κύκλους ζωής, είναι αποτελεσματικές σε χαμηλές θερμοκρασίες, δεν χρειάζονται συντήρηση, η φόρτισή τους απαιτεί λιγότερο χρόνο και παρουσιάζουν καλή διάρκεια ζωής. Ωστόσο, οι μπαταρίες NiCad που έχουν χρησιμοποιηθεί, κατηγοριοποιούνται ως επικίνδυνα απόβλητα και για αυτόν τον λόγο, έχουν απαγορευτεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (EE) (Dipali Rahangdale, et al., 2018 [36]).

Μερικά παραπάνω βασικά μειονεκτήματα των μπαταριών NiCad, είναι ότι έχουν μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα και ειδική ενέργεια από άλλους συσσωρευτές, όπως οι NiMH και Li-ion και παρουσιάζουν φαινόμενα μνήμης, με αποτέλεσμα να πρέπει να εκφορτίζονται πλήρως (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]).

### 2.3.3 Μπαταρίες Νικελίου – Υβριδίου Μετάλλου (NiMH)

Η Ιαπωνική εταιρεία Sanyo, παρουσίασε τις μπαταρίες NiMH το 1990 και ήταν ο κύριος ανταγωνιστής των μπαταριών NiCad (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]). Οι NiMH μαζί με τις μπαταρίες λιθίου ιόντος είναι από τις πιο διαδεδομένες δευτερογενείς μπαταρίες παγκοσμίως, επειδή παρουσιάζουν εξαιρετική ηλεκτροχημική απόδοση και επειδή είναι αποδεκτές σε περιβαλλοντικά κριτήρια, συγκριτικά με τις μπαταρίες PbAB και τις NiCad (Fupeng Liu, et al., 2019 [37]). Οι NiMH χρησιμοποιούνται κυρίως στα ηλεκτρικά και υβριδικά αυτοκίνητα, με ποσοστό 70% στην αγορά επαναφορτιζόμενων μπαταριών, ωστόσο αυτό το ποσοστό φθίνει λόγω της αντικατάστασης των NiMH από τις μπαταρίες Λιθίου – ιόντος (Silvia J.R. Vargas, et al., 2021 [38]). Η ονομαστική τους τάση είναι 1.2 V.

Η αντίστροφη χημική αντίδραση της μπαταρίας είναι η εξής:



όπου X είναι το κράμα που απορροφά το υδρογόνο. Οι μπαταρίες NiMH κατηγοριοποιούνται σε δύο διαφορετικούς τύπους, που βασίζονται στην σύνθεση του υλικού που απορροφά το υδρογόνο στην άνοδο (Silvia J.R. Vargas, et al., 2021 [38]).

### 2.3.4 Μπαταρίες Λιθίου – ιόντος (Li-ion)

Οι πρώτες μπαταρίες Li-ion εισήχθησαν στην τεχνολογία των συσσωρευτών το 1991 από την Ιαπωνική εταιρεία SONY (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]). Έχουν κατακτήσει την αγορά, λόγω της υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας συγκριτικά με άλλες δευτερογενείς τεχνολογίες (Arumugam Mathiram, 2020 [39]). Η τάση τους κυμαίνεται στα 3.6 V, αλλά αυτό εξαρτάται κυρίως από την χημεία των στοιχείων της ανόδου και της καθόδου (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]).

Οι Li-ion από τότε που εισήχθησαν στην αγορά, αντικατέστησαν τις μπαταρίες στο πεδίο της μαζικής μεταφοράς, της αεροδιαστημικής και του στρατιωτικού εξοπλισμού, λόγω της ηλεκτροχημικής τους απόδοσης, της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, του χαμηλού τους βάρους, της απουσίας φαινομένων μνήμης και της χαμηλής αυτο-εκφόρτισης (Dawei Yu, et al., 2021 [40]).

Ωστόσο όπως κάθε τεχνολογία έχει τα μειονεκτήματά της, τα προβλήματα των μπαταριών Li-ion είναι τα εξής:

- Αναπτύσσουν υψηλές θερμοκρασίες: Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις επηρεάζουν την παραγωγή θερμότητας και οι υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν τον ρυθμό των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Οι μπαταρίες πρέπει να λειτουργούν σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και σε περιοχές όπου το κλίμα είναι θερμό, ο χρόνος ζωής της μπαταρίας

μπορεί να μειωθεί κατά τα 2/3, όταν δεν υπάρχει σύστημα ψύξης (Shuting Yang, et al., 2019 [41]).

- Οι μπαταρίες Li-ion πρέπει να λειτουργούν σε ασφαλείς χώρους: Στον οποίο θα πρέπει να ρυθμίζεται ο ρυθμός φόρτισης της μπαταρίας, η θερμοκρασία και το εύρος τάσης δυναμικού. Αν αυτό το εύρος δεν διατηρηθεί, η απόδοση της μπαταρίας εξασθενεί και αυτό μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα ασφαλείας (Weidong Chen, et al., 2018 [42]).
- Περιορισμένο πλήθος εφαρμογών: Στις εφαρμογές που απαιτείται μεγάλη ισχύς, όπως στην ηλεκτροκίνηση, οι επιμέρους κυψέλες της μπαταρίας τοποθετούνται παράλληλα ή σε σειρά, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος και να δημιουργούνται προβλήματα στην σταθερότητα λειτουργίας και στην ασφάλεια τους (Weidong Chen, et al., 2018 [42]).

### 2.3.5 Μπαταρίες Μετάλλου – αέρα (Mt – air)

Οι Mt – air είναι μία ώριμη οικογένεια πρωτογενών και δευτερογενών συσσωρευτών (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]). Το αρνητικό ηλεκτρόδιο, αποτελείται από άνθρακα ώστε να εμποδίζει την επαφή του μετάλλου με το οξυγόνο, ενώ το θετικό ηλεκτρόδιο αποτελείται από μία μεταλλική πλάκα (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]). Το μέταλλο ή το κράμα μετάλλου μετατρέπεται σε μεταλλικά ιόντα στην άνοδο και το οξυγόνο μετατρέπεται σε ιόντα υδροξειδίου στην κάθοδο. Ο ηλεκτρολύτης της μπαταρίας μπορεί να είναι υδατικός ή μη υδατικός. Στους υδατικούς ηλεκτρολύτες, το οξυγόνο διαχέεται στην μπαταρία μέσω ενός στρώματος και μετατρέπεται σε ηλεκτρόνια τα οποία δημιουργούν ανιόντα οξυγόνου. Στους μη υδατικούς ηλεκτρολύτες, το οξυγόνο λαμβάνει τα ηλεκτρόνια και μετατρέπεται σε ανιόν οξυγόνου. Η μεταλλική πλάκα, απελευθερώνει ηλεκτρόνια, τα οποία μετατρέπονται σε μεταλλικά ιόντα και στην συνέχεια διαλύονται μέσα στον ηλεκτρολύτη. Αυτή η διαδικασία, μπορεί να γίνει αντίστροφα κατά την φόρτιση των δευτερογενών Mt – air (Chunlian Wang, et al., 2019 [43]).

Η χημική αντίδραση των μπαταριών Mt – air κατά την εκφόρτιση είναι η εξής:

$M + 4OH^- \rightarrow M(OH)_4^- + 3e^-$  όπου M το μεταλλικό υλικό του θετικού ηλεκτροδίου (Hao-Fan Wang, 2019 [44]), (Lixia Yang, et al., 2021 [45]).

Ενώ κατά την φόρτιση:



Μέχρι σήμερα, υπάρχουν διαφορετικοί τύποι μπαταριών Mt – air, όπως οι Λιθίου – αέρα (Li – air), Νατρίου – αέρα (Na – air), Καλίου αέρα (K – air), Ψευδαργύρου – αέρα (Zn – air), Μαγνησίου – αέρος και οι Αλουμινίου – αέρος (Al – air) (Yisi Liu, et al., 2017 [46]). Οι μπαταρίες Λιθίου αέρος, παρουσιάζουν μοναδικά χαρακτηριστικά, καθώς το ενεργειακό τους περιεχόμενο είναι σχεδόν ίσο με το καύσιμο Diesel και 100 φορές περισσότερο από τις σημερινές μπαταρίες Li – ion (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]).

Οι μπαταρίες μετάλλου αέρος, λειτουργούν χρησιμοποιώντας τον αέρα της ατμόσφαιρας ως ένα από τα βασικά αντιδρώντα, με αποτέλεσμα να έχουν μικρό βάρος και υψηλή ενεργειακή πυκνότητα (Md. Arafat Rahman, et al., 2013 [47]). Λόγω αυτού, συνήθως κατηγοριοποιούνται στις κυψέλες καυσίμου (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]). Το μειονέκτημά τους όμως,

είναι ότι έχουν μικρούς κύκλους ζωής με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]). Ωστόσο, η εταιρεία Phinergy, παρουσιάζει ένα σχέδιο για την ηλεκτροκίνηση, στο οποίο χρησιμοποιούνται πρωτογενείς μπαταρίες Al – air και για τον ανεφοδιασμό του αυτοκινήτου, προτείνει την αλλαγή του αλουμινίου με νέο, το οποίο είναι παρόμοιο με αυτό των οχημάτων που κινούνται με ορυκτά καύσιμα (Phinergy, 2022, [48]).

Οι μπαταρίες μετάλλου αέρος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές εφαρμογές. Αυτό εξαρτάται από το υλικό που είναι φτιαγμένο το θετικό ηλεκτρόδιο, καθώς υπάρχουν διαφορές στο ενεργειακό τους περιεχόμενο.

## 2.4 Συμπεράσματα

Οι συσσωρευτές είναι συσκευές που έχουν χρήση σε διαφορετικές εφαρμογές και κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τις ηλεκτροχημικές τους ιδιότητες. Οι συσσωρευτές Li – ion έχουν κατακτήσει την αγορά, επειδή προσφέρουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, ωστόσο παρουσιάζουν προβλήματα που αφορούν στην ασφάλεια και το κόστος. Οι συσσωρευτές Pb-AB χρησιμοποιούνται κυρίως σε σταθερές εφαρμογές και στην βιομηχανία αυτοκινήτων, λόγω της υψηλής έντασης ρεύματος. Οι μπαταρίες NiCad, χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ισχύ και το κύριο πλεονέκτημά τους είναι ότι χρειάζονται μικρότερο χρόνο για την φόρτισή τους. Ωστόσο, η τοξικότητα του καδμίου, τα φαινόμενα μνήμης, τις καθιστούν απαγορευμένες και βλαβερές για το περιβάλλον. Οι μπαταρίες NiMH, έχουν καλύτερες ιδιότητες οι οποίες αφορούν την ενέργεια και την απόδοση, από τις NiCad, ωστόσο χρησιμοποιούνται όλο και λιγότερο, λόγω της χρήσης των Li – ion σε περισσότερες εφαρμογές.

Οι μπαταρίες μετάλλου αέρα, είναι μία από τις ανερχόμενες κατηγορίες συσσωρευτών στον τομέα της αποθήκευσης ενέργειας, καθώς η ενεργειακή πυκνότητα των Mt - air, μπορεί να ανταγωνιστεί αυτή των ορυκτών καυσίμων (G. Girishkumar, et al., 2010 [49]). Αυτό σημαίνει ότι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές εφαρμογές, όπως σε φορητή αποθήκευση, σταθερή αποθήκευση και στην ηλεκτροκίνηση (P. Goel, et al., 2020 [50]). Οι μπαταρίες Mt – air χωρίζονται σε κατηγορίες, ανάλογα με το μεταλλικό υλικό που περιέχουν στο θετικό τους ηλεκτρόδιο.

Στην επόμενη ενότητα, γίνεται συλλογή δεδομένων από την βιβλιογραφία που αφορούν τις ενεργειακές ιδιότητες των μπαταριών μετάλλου αέρος και η παρουσίαση των κριτηρίων για την σύγκρισή τους.

# Ενότητα 3: Συλλογή Δεδομένων και Κριτήρια Σύγκρισης των Μπαταριών Mt – air

Με την συνεχόμενη ανάπτυξη της παγκόσμιας οικονομίας, η ζήτηση για ενέργεια έχει αυξηθεί σημαντικά (Chunlian Wang, et al., 2019 [43]). Για να καλυφθεί αυτή η ζήτηση, είναι απαραίτητο να προωθηθούν περισσότερες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας, οι οποίες είναι καθαρές, ανανεώσιμες και βιώσιμες (Xiaoqing Chen, et al., 2020 [51]). Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), εμφανίζουν μεταβλητότητα στην παραγωγή και για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας, είναι απαραίτητες η μετατροπή ενέργειας με χαμηλό κόστος και οι τεχνολογίες αποθήκευσης όπως οι μπαταρίες μετάλλου αέρος (MAB) ή και (Mt-air) (Jingyuan Qiao, et al., 2021 [52]).

Τα τελευταία χρόνια, οι MAB έχουν κινήσει σημαντικό ενδιαφέρον, καθώς μπορούν να λειτουργήσουν σε υπαίθριο περιβάλλον (Chunlian Wang, et al., 2019 [43]). Αυτό το είδος μπαταριών έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα ( $1.3\sim 13.0 \text{ kWh kg}^{-1}$ ) και μερικές από αυτές είναι οι Zn-air, Li-air, Al-air, Mg-air και Na-air. Μερικά ακόμα μεταλλικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες Mt air είναι ο Σίδηρος (Fe) και η Σιλίκονη (Si).

## 3.1 Κριτήρια

Οι μπαταρίες MAB, ανάλογα με το μεταλλικό υλικό, έχουν διαφορετικό ενεργειακό περιεχόμενο, κόστος και επίδραση στο περιβάλλον. Αυτό τους επιτρέπει, να έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές εφαρμογές. Στην παρούσα διπλωματική, θα ακολουθήσει βιβλιογραφική ανασκόπηση ανάμεσα στα διάφορα είδη μπαταριών Mt – air και των μπαταριών που χρησιμοποιούνται στην αγορά σήμερα.

Τα κριτήρια σύγκρισης είναι τα παρακάτω:

1. Ενεργειακά
2. Οικονομικά
3. Περιβαλλοντικά και Ασφάλειας

### 3.1.1 Ενεργειακά

Η τεχνολογία των μπαταριών, αντιμετωπίζει προκλήσεις που αφορούν τον χρόνο ζωής της μπαταρίας (Tibor Nagy, et al., 2020, [2]), τη θεωρητική χωρητικότητα (Byeong Jin Jeong, et al., 2021 [53]), την ενεργειακή πυκνότητα (P. Goel, et al., 2020 [50]) και άλλες παραμέτρους.

Συγκεκριμένα οι παράμετροι αυτές είναι οι εξής:

- **Ειδική Χωρητικότητα:** Μία συσκευή αποθήκευσης, αποθηκεύει συγκεκριμένα ποσά ενέργειας. Όσο περισσότερη ενέργεια μπορεί να αποθηκεύσει μία μπαταρία, τόσο καλύτερη θεωρείται και η τεχνολογία (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]).
- **Ειδική Ενέργεια:** Η ενέργεια που προσφέρει ένα σύστημα ανά μονάδα μάζας.



- **Ενεργειακή Πυκνότητα:** Η ενέργεια που προσφέρει ένα σύστημα ανά μονάδα όγκου.
- **Κύκλοι ζωής:** Οι δευτερογενείς (επαναφορτιζόμενες) μπαταρίες χρησιμοποιούνται για πολλαπλές χρήσεις και κάθε τεχνολογία μπορεί να φορτιστεί και να εκφορτιστεί στη βάση περιορισμένων κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης.
- **Βαθμός απόδοσης (Round-trip):** Ο συνολικός βαθμός απόδοσης μετατροπής για φόρτιση και εκφόρτιση. Όσο πιο υψηλός είναι ο βαθμός απόδοσης (Round-trip), μικρότερες και οι απώλειες (eia.gov, 2022 [54]).
- **Βάθος Εκφόρτισης:** Το ποσοστό της ενέργειας που χρησιμοποιείται από την μπαταρία (ωφέλιμο απόθεμα ενέργειας).
- **Θεωρητικές τιμές:** Η μέγιστη τιμή που μπορεί να παραχθεί από μία μπαταρία.

Στον **Πίνακα 3.1**, συλλέχθηκαν οι τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων των μπαταριών Al-air. Αυτοί οι συσσωρευτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δευτερογενείς ή πρωτογενείς και έχει αναφερθεί και η χρήση τους ως μηχανικά επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, αλλάζοντας την άνοδο αλουμινίου όταν εκφορτίζεται πλήρως. Η **θεωρητική ειδική ενέργειά** τους είναι 8100-8461 Wh/kg (Abdul Ghani Olabi, et al., 2021 [55]), (Yawen Li, et al., 2022 [56]), ενώ η **πραγματική ειδική ενέργεια** κυμαίνεται στο εύρος των 300-4068 Wh/kg (P. Goel, et al., 2020 [50]), (Xiaohui Li, et al., 2021 [57]). Οι τιμές της **ειδικής χωρητικότητας** που συλλέχθηκαν από την βιβλιογραφία είναι 121-2817 Ah/kg (P. Goel, et al., 2020 [50]), (Soraya Hosseini, et al., 2022 [58]) και ο **βαθμός απόδοσης (Round-trip)**, 55%-92% (Abdul Ghani Olabi, et al., 2021 [55]). Ωστόσο, παρουσιάζουν περιορισμένο αριθμό **κύκλων ζωής** 4-11 (J. Yang, et al., 2022 [59]), (Soraya Hosseini, et al., 2021 [60]), λόγω της διάβρωσης του αλουμινίου σε αλκαλικούς ηλεκτρολύτες (Lixia Yang, et al., 2021 [45]).

Οι αναστολές διάβρωσης (CI) από βάριο μέσα σε ηλεκτρολύτη KOH, μειώνουν σημαντικά τον ρυθμό αυτό διάβρωσης και την ανάπτυξη υδρογόνου στην άνοδο αλουμινίου (Soraya Hosseini, et al., 2021 [60]) με τις μπαταρίες να παρουσιάζουν ειδική χωρητικότητα 2817 Ah/kg. Άλλα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ως CI, είναι το ασβέστιο (2573 Ah/kg), ενώ χωρίς την προσθήκη CI η ειδική χωρητικότητα ήταν 2392 Ah/kg. Ο θεϊκός ψευδάργυρος (ZnSO<sub>4</sub>) μαζί με αλγινικό νάτριο (AN), μείωσαν επίσης σημαντικά τον ρυθμό αυτοδιάβρωσης, με την κατάλληλη συγκέντρωση ZnSO<sub>4</sub> και AN. Η μείωση αντίδρασης οξυγόνου (ORR) και η μείωση ανάπτυξης υδρογόνου (OER), μπορούν να επιταχυνθούν με την χρήση ανθρακούχων υλικών, όπως καταλύτες από άνθρακα με βάση C νανοσωλήνων και νανο-ίνων, από γραφένιο ή νανοφύλλα γραφίτη και από άλλες μορφές άνθρακα, μετάλλων και οξειδίων μετάλλου όπως (περοβσκίτης, σπινέλιο, κ.α) και νιτρίδια μετάλλου (P. Goel, et al., 2020 [50]).

Ο **Πίνακας 3.2** περιέχει τις αντίστοιχες ενεργειακές παραμέτρους των συσσωρευτών Zn-air. Οι Zn-air μπαταρίες είναι δευτερογενείς με πλήθος **κύκλων ζωής** 75-1000 (Zengxia Pei, et al., 2020 [61]), (Yanguang Li, Jun Lu, 2017 [62]). Η **θεωρητική ειδική ενέργεια** τους είναι 1218-1353 Wh/kg (Chunlian Wang, et al., 2019 [43]), (Upasana Bhardwaj, et al., 2022 [63]), (M. Bockelmann, et al., 2016 [64]). Η **πραγματική ειδική ενέργειά** τους ανάλογα με την τεχνολογία κυμαίνεται στο εύρος των 300-700 Wh/kg, ενώ η **ειδική χωρητικότητα** στο εύρος 400-829,7 Ah/kg. Το βάθος εκφόρτισης των Zn-air μπορεί να είναι από 77%-98,6% (Chi-Young Jung et al. 2016 [65]), (Boyeong Hwang, et al., 2016 [66]) και ο **βαθμός απόδοσης (Round-trip)** 54%-75% (Marina Bockelmann, et al., 2016 [64]), (Keliang Wang, et al., 2022 [67]).

Οι **μπαταρίες ψευδαργύρου αέρα**, αντιμετωπίζουν προβλήματα συσσώρευσης οξειδίων του ψευδαργύρου, βραχυκυκλωμάτων και ανάπτυξης δενδριτών πάνω στο ηλεκτρόδιο που περιορίζουν την ζωή της μπαταρίας (Boyeong Hwang, et al., 2016 [66]), (Keliang Wang, et al., 2022 [67]). Οι (Jingyuan Qiao, et al., 2021 [52]), βελτίωσαν αρκετά τον κύκλο ζωής των Zn-air σε 1000 με την προσθήκη MXene καταλυτών. Ωστόσο, σύμφωνα με την NCBI (National Center of Biotechnology Information, 2022 [68]) το υλικό αυτό είναι τοξικό και επιβλαβές για την ανθρώπινη υγεία. Το υλικό από περοβσκίτη  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  (CCTO) ως καταλύτης για την ORR και OER, εμφάνισε υψηλή ειδική χωρητικότητα 801 Ah/kg με βαθμό απόδοσης (Round-trip) 75% και κύκλους ζωής περισσότερους από 100 (Urasana Bhardwaj, et al., 2022 [63]).

Οι μπαταρίες **Λιθίου αέρα**, έχουν την υψηλότερη **θεωρητική ειδική ενέργεια** στην οικογένεια των Mt-air συσσωρευτών 11238-13000 kWh/kg (Abdul Ghani Olabi, et al., 2021 [55]), (Bingbing Tian, et al., 2017 [69]). Στον **Πίνακα 3.3** έγινε η συλλογή των ενεργειακών παραμέτρων των Li-air. Η **πραγματική ειδική ενέργειά** τους είναι 330-2792 kWh/kg (Tao Liu et al., 2020 [18]), (U.R. Farooqui, et al., 2017 [70]), η **ειδική χωρητικότητά** τους 600-6000 Ah/kg (Qi Li, et al., 2017 [3]), (Wen-Bin Luo, 2017 [71]), ο **βαθμός απόδοσης (Round-trip)** 68%-95% και οι **κύκλοι ζωής** 15-500 (Xingbao Zhu, et al., 2017 [72]).

Οι Li-air, παρουσιάζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά την χωρητικότητα και την ειδική ενέργεια. Στην ηλεκτροκίνηση, η μπαταρία μπορεί να προσφέρει ενέργεια για 800 km ανά φόρτιση (Wen Bin Luo, et al., 2017 [71]). Όμως, δεν έχει ερευνηθεί το κατάλληλο ηλεκτρόδιο για την κατασκευή της μπαταρίας. Τα προβλήματα που έχουν παρατηρηθεί, αφορούν την κάθοδο, όπου τα προϊόντα της χημικής αντίδρασης φράζουν τις οδούς διάχυσης αερίων και ηλεκτρολυτών, με αποτέλεσμα το ηλεκτρόδιο – αέρα (κάθοδος) να μην μπορεί να έχει επαφή με τα αέρια οξυγόνου και τον ηλεκτρολύτη. Αυτό επηρεάζει σημαντικά, την χωρητικότητα (Wen Bin Luo, et al., 2017 [71]). Το ηλεκτρόδιο – αέρα μπορεί να υποστεί υπέρταση (Xingbao Zhu, et al., 2017 [72]), με αποτέλεσμα την αποσύνθεση του ηλεκτροδίου και του ηλεκτρολύτη και τον περιορισμένο αριθμό κύκλων ζωής των Li-air (Tao Liu, et al., 2020 [18]). Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί ότι ο άνθρακας που προέρχεται από μαγιά είναι από τα πιο υποσχόμενα υλικά της καθόδου των Li air (Xingbao Zhu, et al., 2018 [72]).

Οι συσσωρευτές Μαγνησίου αέρα, είναι ένα είδος Mt-air που έχει τραβήξει το ενδιαφέρον, λόγω της υψηλής **θεωρητικής ειδικής ενέργειας** 6098-6815 Wh/kg (Abdul Ghani Olabi, et al., 2021, [55]), (Fanglei Tong, et al., 2021 [73]). Οι Mg-air μπορεί να είναι πρωτογενείς και δευτερογενείς. Στον **Πίνακα 3.4**, παρουσιάζονται τα δεδομένα των ενεργειακών παραμέτρων των συσσωρευτών Mg-air, από την βιβλιογραφία. Η **πραγματική ειδική ενέργεια** τους, κυμαίνεται στο εύρος 565-2750 Wh/kg (Chun-Sheng Li, et al., 2017 [74]), (Abdul Ghani Olabi, et al., 2021 [55]), οι **κύκλοι ζωής** μέχρι και 5000 (Luhe Li, et al., 2021 [75]), ο **βαθμός απόδοσης (Round-trip)** 90% (Chun-Sheng Li, et al., 2017 [74]) και η **ειδική χωρητικότητα** στο εύρος 237-2910 Ah/kg (Abdul Ghani Olabi, et al., 2021 [55]), (Luhe Li, et al., 2021 [75]).

Το κυριότερο πρόβλημα των Mg-air, είναι η διάβρωση της Mg ανόδου που έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , τον οποίο εμποδίζει την άνοδο από περαιτέρω χημικές αντιδράσεις (Chun-Sheng Li, et al., 2017). Η προσθήκη άλλων μετάλλων όπως ο μόλυβδος (Pb), ο υδράργυρος

(Hg) και το γάλλιο (Ga), βελτιώνουν την απόδοση των Mg-air, ωστόσο αυτά τα υλικά είναι επιβλαβή για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία (Luhe Li, et al., 2021 [75]).

Η λύση του προβλήματος της διάβρωσης, θα βελτιώσει την απόδοση των Mg-air. Η προσθήκη διπλής στρώσης από gel ανάμεσα στον ηλεκτρολύτη και την άνοδο, μειώνει σημαντικά την διάβρωση του μαγνησίου και βελτιώνει την απόδοση των Mg-air, ενώ οι συσσωρευτές έχουν ειδική χωρητικότητα 2190 Ah/kg και 5000 κύκλους ζωής (Luhe Li, et al., 2021 [75]). Η προσθήκη δημητρίου στην σύσταση της Mg ανόδου, αυξάνει επίσης σημαντικά την απόδοση της μπαταρίας, με ειδική ενέργεια 1552,37 Wh/kg και ειδική χωρητικότητα 1282,051 Ah/kg (Quan Li, et al., 2021 [76]).

Οι μπαταρίες νατρίου αέρα (Na-air), είναι συσσωρευτές Mt-air που έχουν υψηλή **θεωρητική ειδική ενέργεια** 2090-2716 Wh/kg (Ziyauddin Khan, et al., 2020 [77]), (Henning Weinrich, et al., 2019 [78]). Οι Na-air είναι δευτερογενείς μπαταρίες με **κύκλους ζωής** που μπορούν να φτάσουν τους 1000 (Y. Kang, et al., 2020 [79]), **βαθμό απόδοσης** (Round-trip) 83%-95% (Abdul Ghani Olabi, et al., 2021 [55]), (Feng Liang, et al., 2018 [80]) και **ειδική χωρητικότητα** στο εύρος 592,8-2856 Ah/kg (Feng Liang, et al., 2018 [80]), (Shilei Chang, et al., 2021 [81]). Στον **Πίνακα 3.5**, έγινε η συλλογή των ενεργειακών παραμέτρων για τους Na-air συσσωρευτές από την βιβλιογραφία.

Οι μπαταρίες **νατρίου αέρα** χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις υδατικές ή υβριδικές και τις μη υδατικές. Οι μη υδατικές κατά την χημική αντίδραση, παράγουν προϊόντα κατά την εκφόρτιση, τα οποία είναι αδιάλυτα και μη αγωγίμα οξειδία μετάλλου ( $\text{NaO}_2$  και  $\text{Na}_2\text{O}_2$ ), με αποτέλεσμα να καλύπτουν τα σημεία αντίδρασης και να προκαλούν φθορές στην μπαταρία (Xiaolong Xu, et al., 2019 [82]). Στις υβριδικές, παρουσιάζεται το πρόβλημα της αργής μείωσης αντίδρασης οξυγόνου (ORR) και της μείωσης εξέλιξης οξυγόνου (OER) στην κάθοδο, το οποίο δημιουργεί υπερδυναμικό και αστάθεια κατά τον κύκλο φόρτισης και εκφόρτισης (Yufei Wu, et al., 2019 [83]).

Στις υδατικές Na-air μπαταρίες, η προσθήκη καταλύτη βασισμένο στο κοβάλτιο (Co), αυξάνει σημαντικά την αντίδραση ανάπτυξης οξυγόνου των Na air, αυξάνοντας τους κύκλους ζωής στους 1000 με ενεργειακή απόδοση (Round-Trip) 94,83% (Y. Kang, et al., 2020 [79]). Στις μη υδατικές, έχει μελετηθεί η προσθήκη gel από νανοσωλήνες άνθρακα (SWNT) και ιοντικών ρευστών, η οποία αυξάνει σημαντικά την ειδική χωρητικότητα στα 2234 Ah/kg, τους κύκλους ζωής στους 125 (Shilei Chang, et al., 2021 [81]).

Οι **Fe-air συσσωρευτές**, είναι δευτερογενείς και είναι μία από τις πιθανές επιλογές για αποθήκευση ενέργειας μεγάλης κλίμακας (Abdul Ghani Olabi, et al., 2021 [55]), λόγω της ηλεκτροχημικής σταθερότητάς και της υψηλής ειδικής ενέργειας τους (Bingbing Tian, et al., 2017 [69]). Η **θεωρητική ειδική τους ενέργεια** είναι 1229 Wh/kg, η **πραγματική ειδική ενέργεια** από 25 – 1237 Wh/kg, ο **βαθμός απόδοσης (Round-trip)** 35%-96%, οι **κύκλοι ζωής** 10-3500 και η ειδική χωρητικότητα 20,8-1500 Ah/kg. Στον **Πίνακα 3.6** έγινε η συλλογή των ενεργειακών παραμέτρων για τις Fe air μπαταρίες.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα των Fe-air, είναι η ανάπτυξη του υδρογόνου στο ηλεκτρόδιο σιδήρου κατά την φόρτιση της μπαταρίας (Henning Weinrich, et al., 2019 [78]). Η ανάπτυξη του υδρογόνου έχει ως αποτέλεσμα τον μικρό αριθμό κύκλων ζωής και αυτό-εκφόρτισης.

Ο συνδυασμός του σιδήρου και του σιδηροκυανιδίου ( $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ ), μειώνει σημαντικά τον ρυθμό μείωσης της χωρητικότητας κατά τους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης στα 0,15% ανά κύκλο με ενεργειακό βαθμό απόδοσης (Round-trip) 76% (L. Wei, et al., 2018 [84]). Επίσης έχει μελετηθεί η επίδραση του πάχους του ηλεκτροδίου από Fe. Τα ηλεκτρόδια με μικρότερο πάχος παρουσιάζουν μεγαλύτερη ειδική χωρητικότητα (50 Ah/kg με πάχος ηλεκτροδίου 0,5mm και 10 Ah/kg με πάχος 3,25 mm) και τα σωματίδια καρβονυλικού σιδήρου ενδέχεται να συμβάλλουν στην αύξηση της ενεργής επιφάνειας του σιδήρου, με αποτέλεσμα την αύξηση της χωρητικότητας (Henning Weinrich, et al., 2019 [78]).

Οι **συσσωρευτές σιλικόνης αέρα**, είναι πρωτογενείς και κατέχουν την υψηλότερη ογκομετρική χωρητικότητα συγκριτικά με τις υπόλοιπες Mt air μπαταρίες (Danshuo Chen, et al., 2022 [85]). Η **θεωρητική ειδική τους ενέργεια** είναι 8001-8470 Wh/kg, ενώ η **πραγματική ειδική ενέργεια** 140-1601 Wh/kg, η **ενεργειακή απόδοση (Round-trip)** 45% και η **ειδική χωρητικότητα** 120-1206 Ah/kg. Η σιλικόνη δεν θεωρείται μεταλλικό υλικό, ωστόσο συγκαταλέγεται στην κατηγορία των Mt – air συσσωρευτών, λόγω της κατηγοριοποίησης τους στα μεταλλοειδή υλικά. Στον **Πίνακα 3.7** συλλέχθηκαν οι ενεργειακές παράμετροι των Si air συσσωρευτών από την βιβλιογραφία.

Μέχρι σήμερα, δεν υπάρχουν επαναφορτιζόμενες μπαταρίες Si air, ωστόσο αυτό δεν εμποδίζει την περαιτέρω έρευνα τους, καθώς μπορούν να αντικαταστήσουν τις πρωτογενείς Zn air μπαταρίες, λόγω της υψηλής χωρητικότητάς τους (Henning Weinrich, et al., 2019 [78]). Ο ηλεκτρολύτης των Si-air, συνήθως αποτελείται από ιονικά ρευστά (RTIL) και αλκαλικά διαλύματα, ωστόσο τα RTIL αυξάνουν τον ρυθμό αυτοεκφόρτισης και την ειδική χωρητικότητα (Danshuo Chen, et al., 2022 [85]). Επίσης, η διάβρωση των αλκαλικών Si air συσσωρευτών είναι ένα από τα μεγαλύτερα εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν, έτσι ώστε να αναπτυχθεί η πρακτική εφαρμογή των Si air .

Η αυτοδιάβρωση, μπορεί να αντιμετωπιστεί με την κατάλληλη συγκέντρωση KOH και με την προσθήκη νανοσυρμάτων (NW) σιλικόνης (Danshuo Chen, et al., 2022 [85]). Οι μπαταρίες με Si air με NW και συγκέντρωση 6 M KOH παρουσίασαν χρόνο εκφόρτισης 500 h με πυκνότητα ρεύματος 0,05 mA/cm<sup>2</sup>, ειδική χωρητικότητα 192,3 mAh/g και περιορισμένο ρυθμό αυτό - διάβρωσης (Danshuo Chen, et al., 2022 [85]). Ο ηλεκτρολύτης με μικρή συγκέντρωση KOH, ευνοεί τον χρόνο ζωής των Si-air, ενώ οι μεγάλες συγκεντρώσεις KOH έχουν μεγαλύτερο πλεονέκτημα σε συνεχή εκφόρτιση και υψηλές πυκνότητες ρεύματος (Yasin Emre Durmus, et al., 2017 [86]).

### 3.1.2 Οικονομικά

Το κόστος ενός συσσωρευτή είναι αρκετά σημαντικό για την προώθησή του στην αγορά και η επίτευξη των ιδανικών τιμών ενεργειακών παραμέτρων, έχει σημασία μόνο εάν υπάρχουν

βιώσιμες οικονομικές λύσεις (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]). Οι οικονομικές παράμετροι των συσσωρευτών είναι οι εξής:

- **Κόστος Υλικού:** Οι συσσωρευτές αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια (άνοδος/κάθοδος) κι έναν ηλεκτρολύτη. Το κόστος υλικού εκφράζει την τιμή σε (\$) του μεταλλικού υλικού που χρησιμοποιείται στο ηλεκτρόδιο (άνοδος ή κάθοδος) ανά μονάδα μάζας (kg).
- **Διαθεσιμότητα Υλικού:** Η αφθονία του υλικού πάνω στον φλοιό της Γης σε (ppm).
- **Συνολικό Κόστος:** Το κόστος της μπαταρίας ανά μονάδα ενέργειας (\$/kWh). Το συνολικό κόστος, προκύπτει από τις εκτιμήσεις της βιβλιογραφίας.

Οι μπαταρίες Mt – air, παρουσιάζουν ικανοποιητικές τιμές στην ειδική χωρητικότητα και ενέργεια τους σύμφωνα με τις παρούσες ενεργειακές παραμέτρους. Ωστόσο, ένας ακόμα λόγος που ερευνάται αυτή η τεχνολογία, είναι η αφθονία των μετάλλων όπως το αλουμίνιο, η σιλικόνη, ο σίδηρος, το μαγνήσιο και το νάτριο, στον φλοιό της Γης αλλά και το χαμηλότερο κόστος υλικού.

Το αλουμίνιο, είναι ένα από τα πιο άφθονα υλικά στον φλοιό της Γης, (Yifei Wang, et al., 2018), καθώς η διαθεσιμότητα του υλικού κυμαίνεται στα 82300-83000 ppm (worldatlas.com, 2022, [87]), (Ziyauddin Khan, et al., 2020 [77]) και από τα φθηνότερα υλικά με κόστος υλικού στο εύρος 1,75 - 1,9 \$/kg (Abdul Ghani Olabi, et al., 2021 [55]), (Quan Li, et al., 2021 [76]). Το συνολικό κόστος των Al air, κυμαίνεται στο εύρος 29-30 \$/kWh (Shaohua Yang, Harold Knickle, 2002 [88]). Ενδέχεται ωστόσο, να υπάρχει διαφορετική εκτίμηση για το κόστος των Al air συσσωρευτών, καθώς η τεχνολογία αυτή έχει εξελιχθεί, από τις πειραματικές έρευνες που γίνονται τα τελευταία χρόνια. Στον **Πίνακα 3.8**, συλλέχθηκαν οικονομικά στοιχεία από την βιβλιογραφία για τις Al air.

Ο ψευδάργυρος, είναι επίσης άφθονος, ωστόσο λιγότερο από το αλουμίνιο και η διαθεσιμότητα υλικού στον φλοιό της Γης κυμαίνεται στα 70 ppm (worldatlas.com, 2022, [87]), κόστος υλικού 1,85 – 2,5 \$/kg (X. Chen, et al., 2020 [51]), (Quan Li, et al., 2021 [76]) και σύμφωνα με την (dailymetalprice.com, 2022, [89]), το κόστος του ψευδαργύρου το 2022 είναι περίπου 3 \$/kg. Το συνολικό κόστος των Zn air έχει εκτιμηθεί ότι κυμαίνεται στην τιμή των 10 \$/kWh (Shuyun Wang, et al., 2021 [90]). Στον **Πίνακα 3.9**, συλλέχθηκαν οι οικονομικές παράμετροι των Zn air από την βιβλιογραφία.

Το λίθιο, είναι το λιγότερο άφθονο μεταλλικό υλικό στην οικογένεια των Mt air συσσωρευτών, με διαθεσιμότητα υλικού στον φλοιό της Γης 18-20 ppm (Ziyauddin Khan, et al., 2020 [77]), (worldatlas.com, 2022, [87]). Το κόστος υλικού είναι σχετικά υψηλό και κυμαίνεται στο εύρος 25 – 180 \$/kg (Fanglei Tong, et al., 2021 [91]), (N. Chawla, 2019 [92]), ενώ για το 2022 σύμφωνα με την (dailymetalprice.com, 2022, [89]), το κόστος υλικού κυμαίνεται στα 70,5 \$/kg. Το συνολικό κόστος των Li air έχει εκτιμηθεί στο εύρος 105 – 500 \$/kWh (Tao Liu et al., 2020 [18]), (N. Chawla, 2019 [92]). Στον **Πίνακα 3.10**, συλλέχθηκαν οι οικονομικές παράμετροι των Li air συσσωρευτών.

Το μαγνήσιο, είναι επίσης ένα από τα πιο άφθονα μεταλλικά υλικά, με διαθεσιμότητα υλικού 23300 - 27640 ppm στον φλοιό της Γης (worldatlas.com, 2022, [87]), (Ziyauddin Khan, et al., 2020 [77]). Το κόστος του μαγνησίου κυμαίνεται στο εύρος 2,01 – 2,75 \$/kg (Fanglei Tong, et al., 2021 [73]), (Abdul Ghani Olabi, et al., 2021 [55]). Το συνολικό κόστος των Mg air συσσωρευτών,

έχει εκτιμηθεί ότι είναι 40 \$/kWh (Jingling Ma, et al., 2019 [93]). Στον **Πίνακα 3.11**, συλλέχθηκαν οι παράμετροι των οικονομικών στοιχείων των Mg air από την βιβλιογραφία.

Το νάτριο, είναι το 6<sup>ο</sup> πιο άφθονο υλικό στον φλοιό της Γης με διαθεσιμότητα υλικού 22700 – 23600 ppm (Ziyauddin Khan, et al., 2020 [77]), (worldatlas.com, 2022, [87]) και το 4<sup>ο</sup> πιο άφθονο μεταλλικό υλικό (Xiaolong Xu, et al., 2019 [82]). Το κόστος του νατρίου είναι χαμηλό 1,7 \$/kg (Abdul Ghani Olabi, et al., 2021 [55]) και το συνολικό κόστος των Na-air συσσωρευτών έχει εκτιμηθεί στα 100 – 150 \$/kWh (N. Chawla, 2019 [92]). Οι Na-air αντιμετωπίζουν προβλήματα κόστους, λόγω της χρήσης οργανικών καταλυτών (Ziyauddin Khan, et al., 2020 [77]). Στον **Πίνακα 3.12**, συλλέχθηκαν τα οικονομικά στοιχεία των Na-air από την βιβλιογραφία.

Ο σίδηρος, με αφθονία στον φλοιό της Γης 56300 ppm (worldatlas.com, 2022, [87]), είναι ένα από τα πιο άφθονα μεταλλικά υλικά και το 3<sup>ο</sup> πιο άφθονο μεταλλικό στην οικογένεια των Mt air. Ο σίδηρος είναι ένα φθινό υλικό 0,12 – 0,4 \$/kg (Fanglei Tong, et al., 2021 [73]), (Abdul Ghani Olabi, et al., 2021 [55]), ενώ για το 2022 το κόστος του Fe είναι περίπου 0,1 \$/kg (dailymetalprice.com, 2022, [89]). Το συνολικό κόστος των Fe-air, προβλέπεται ότι θα είναι 22 – 100 \$/kWh (L. Wei, et al., 2018, [84]), (Aswin K. Manohar, et al., 2012 [94]). Στον **Πίνακας 3.13**, έγινε η συλλογή των οικονομικών παραμέτρων των Fe-air.

Η σιλικόνη είναι το 2<sup>ο</sup> πιο άφθονο υλικό στον φλοιό της Γης με 282000 ppm (Henning Weinrich, et al., 2019 [78]), (Yingjian Yu, et al., 2021 [95]). Το κόστος της σιλικόνης κυμαίνεται στα 3 \$/kg για το 2022 (dailymetalprice.com, 2022, [89]) και το συνολικό κόστος των Si-air συσσωρευτών, εκτιμήθηκε ότι είναι μικρότερο των 100 \$/kWh και χαμηλότερο από τις Li-air μπαταρίες (Yingjian Yu, et al., 2021, [95]). Στον **Πίνακα 3.14**, παρουσιάζονται οι οικονομικές παράμετροι των Si air.

### 3.1.3 Περιβαλλοντικά και Ασφάλειας

Τα αυξανόμενα περιβαλλοντικά προβλήματα, παροτρύνουν την έρευνα τεχνολογιών οι οποίες είναι φιλικές προς το περιβάλλον (Jingyuan Qiao, et al., 2021 [52]). Οι επαναφορτιζόμενοι συσσωρευτές που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας, δεν έχουν αγγίξει ακόμα την ιδανική τους απόδοση (Henning Weinrich, et al., 2019 [96]). Μέσα στο πλαίσιο βελτίωσής τους, είναι σημαντικό να αναπτυχθούν τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας οι οποίες να μην επηρεάζουν αρνητικά το περιβάλλον και να είναι ασφαλείς.

Η ασφάλεια είναι ένα αρκετά σημαντικό κριτήριο για τις μπαταρίες, καθώς μπορεί να είναι εκτεθειμένες σε υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες (Emanuel Peled, et al., 2013 [97]).

Τα κριτήρια περιβάλλοντος και ασφάλειας είναι τα εξής:

- **Φιλικό προς το περιβάλλον συσσωρευτές:** Κατά πόσο η τεχνολογία θεωρείται φιλική προς το περιβάλλον, σύμφωνα με την βιβλιογραφία.
- **Ασφάλεια:** Οι μπαταρίες λειτουργούν μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων, ανάλογα την τεχνολογία μπορεί να υπάρχουν κίνδυνοι κατά την λειτουργία όπως εκρήξεις, ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών και ανάφλεξη.

Οι συσσωρευτές Mt – air, χαρακτηρίζονται ως φιλικό προς το περιβάλλον, καθώς ανακυκλώνονται εύκολα και πολλοί από αυτούς δεν είναι τοξικοί. Ωστόσο, οι μπαταρίες αυτές βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο, διότι η εφαρμογή τους στην καθημερινότητα δεν είναι ακόμα δυνατή λόγω ζητημάτων ασφάλειας κατά την λειτουργία τους που πρέπει να επιλυθούν.

Οι Al-air συσσωρευτές είναι αρκετά φιλικό προς το περιβάλλον, γιατί δεν είναι τοξικοί (Soraya Hosseini, et al., 2021 [60]) και ανακυκλώνονται εύκολα (Xiaohui Li, et al., 2021 [57]). Ωστόσο, αντιμετωπίζουν θέματα ασφάλειας κατά την λειτουργία τους, λόγω της διάβρωσης του αλουμινίου (Yawen Li, et al., 2022 [56]). Η συλλογή των παραμέτρων περιβάλλοντος και ασφάλειας παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.15**. Η σύνθεση νέων υλικών και η προσθήκη κατάλληλων ηλεκτρολυτών ενδέχεται να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της διάβρωσης.

Οι Zn-air μπαταρίες είναι επίσης φιλικές προς το περιβάλλον (Xiaorui Liu, et al., 2019 [98]) και έχουν μικρή τοξικότητα (Pucheng Pei, et al., 2014 [99]), (Upasana Bhardwaj, et al., 2022 [63]). Επίσης, οι Zn-air συσσωρευτές που δεν χρησιμοποιούν οργανικούς ηλεκτρολύτες είναι λιγότερο τοξικοί (Boyeong Hwang, et al., 2016 [66]). Οι μπαταρίες αυτές παρέχουν εξαιρετική ασφάλεια, επειδή λειτουργούν με υδατικό ηλεκτρολύτη (Xiaorui Liu, et al., 2019 [98]) και το διάλυμα του, δεν είναι εύφλεκτο (Boyeong Hwang, et al., 2016 [66]). Στον **Πίνακα 3.16**, παρουσιάζονται οι αναφορές για τα κριτήρια περιβάλλοντος και ασφάλειας, από την βιβλιογραφία.

Οι Li-air συσσωρευτές, αντιμετωπίζουν προβλήματα ασφάλειας, καθώς το προϊόν της χημικής αντίδρασης ( $\text{Li}_2\text{O}_2$ ) μπορεί να προκαλέσει έκρηξη (Chun-Sheng Li, et al., 2017 [74]).

Οι μπαταρίες Mg air, είναι φιλικές προς το περιβάλλον (Jingling Ma, et al., 2019 [93]) και δεν προκαλούν ρύπανση (Quan Li, et al., 2021 [76]). Επίσης, παρέχουν ασφάλεια κατά την λειτουργία τους (Fanglei Tong, et al., 2021 [73]) και μάλιστα τα ιόντα μαγνησίου είναι ακίνδυνα για το ανθρώπινο σώμα (Luhe Li, et al., 2021 [75]), καθιστώντας τις συγκεκριμένες μπαταρίες κατάλληλες για συσκευές εμφύτευσης στο ανθρώπινο σώμα. Ο **Πίνακας 3.18**, αποτελείται από τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, για τα κριτήρια περιβάλλοντος και ασφάλειας των μπαταριών Mg air.

Οι συσσωρευτές Na-air, είναι φιλικό προς το περιβάλλον (Xiaolong Xu, et al., 2019 [82]). Ωστόσο, η ασφάλεια, είναι ένα από τα κυριότερα ζητήματα για τις υδατικές Na-air (Shilei Chang, et al., 2021 [81]), λόγω του σχηματισμού δενδριτών (Ziyauddin Khan, et al., 2020 [77]). Αντιθέτως, οι μη υδατικές Na-air είναι ασφαλείς (Ziyauddin Khan, et al., 2020 [77]). Ο **Πίνακας 3.19**, συγκεντρώνει τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, για τα κριτήρια περιβάλλοντος και ασφάλειας.

Οι Fe-air, είναι φιλικές προς το περιβάλλον, ανακυκλώσιμες και δεν είναι τοξικές (P.S. Arunkumar, et al., 2021 [100]), (Bingbing Tian, et al., 2017 [69]). Αυτοί οι συσσωρευτές είναι ασφαλείς κατά την λειτουργία τους (Bingbing Tian, et al., 2017 [69]), (Bui Thi Hang, et al., 2013 [101]), (Stefano Trocino, et al., 2018 [102]). Στον **Πίνακα 3.20**, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

Οι μπαταρίες Si air, είναι μη τοξικές, δεν προκαλούν ρύπανση και το προϊόν της χημικής τους αντίδρασης ( $\text{SiO}_2$ ), μπορεί να διαχειριστεί και να απελευθερωθεί στο περιβάλλον (Gil Cohn, Yair

Ein-Eli, 2010 [103]), (Danshuo Chen, et al., 2022 [85]). Η λειτουργία των Si air, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, κρίνεται ασφαλής (Danshuo Chen, et al., 2022 [85]), (Yasin Emre Durmus, et al., 2017 [86]), (Yingjian Yu, et al., 2021 [104]). Ωστόσο, οι μη υδατικές Si air, αναπτύσσουν υψηλές θερμοκρασίες (Henning Weinrich, et al., 2019 [78]). Στον **Πίνακα 3.21**, έγινε η συγκέντρωση των αποτελεσμάτων των Si air, για τα κριτήρια περιβάλλοντος και ασφάλειας.

### **3.2 Σύγκριση με τις μπαταρίες Λιθίου ιόντος (Li ion).**

Οι Mt-air συσσωρευτές, βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Με βάση την βιβλιογραφική ανασκόπηση, παρουσιάζουν εξαιρετικές ενεργειακές επιδόσεις, ωστόσο χαμηλούς κύκλους ζωής και προβλήματα κατά την λειτουργία τους. Η διάβρωση του μεταλλικού ηλεκτροδίου κάνει την εφαρμογή τους ασταθή και με βάση την θεωρητική τους ενέργεια, παρουσιάζουν μεγάλα περιθώρια βελτίωσης.

Οι συσσωρευτές που χρησιμοποιούνται σήμερα, για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι Λιθίου ιόντος (Li ion), Νικελίου καδμίου, Μόλυβδου οξέος, Νικελίου υβριδίου μετάλλου. Οι Li ion ως οι πιο συνηθισμένοι συσσωρευτές, παρουσιάζουν θεωρητική ειδική ενέργεια 400 Wh/kg, βαθμό απόδοσης (Round-trip) 85%-93% (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]), (Abdul Ghani Olabi, et al., 2021 [55]), ενεργειακή πυκνότητα 705-900 Wh/L, ειδική ενέργεια 100-400 Wh/kg (Ziyauddin Khan, et al., 2020 [77]) και ειδική χωρητικότητα 110-370 Ah/kg (Yu Miao, et al., 2019 [105]), (A. El Kharbachi, et al., 2019 [106]). Οι κύκλοι ζωής των Li air εξαρτώνται από το βάθος εκφόρτισης, δηλαδή για 10%-100% βάθος εκφόρτισης, οι κύκλοι ζωής μπορεί να είναι από 15000 μέχρι 300 (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]). Οι Li ion συσσωρευτές εφαρμόζονται στην ηλεκτροκίνηση, σε φορητές συσκευές, στην αεροδιαστημική, για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και σε φορητούς υπολογιστές (Dawei Yu, et al., 2021 [40]), (A. El Kharbachi, et al., 2019 [106]), (Lingxi Kong, et al., 2018 [107]).

Ωστόσο το Λίθιο, είναι ένα ακριβό μεταλλικό υλικό με κόστος 70 \$/kg (Quan Li, et al., 2022 [76]), και οι Li air συσσωρευτές έχουν υψηλό συνολικό κόστος, 168 \$/kWh (Henning Weinrich, et al., 2019 [78]), 268 \$/kWh (Abdul Ghani Olabi, et al., 2021 [55]).

Περιβαλλοντικά, οι Li-ion αποτελούνται από υλικά τα οποία είναι τοξικά και δεν πρέπει να απελευθερώνονται στο περιβάλλον. Για αυτόν τον λόγο, οι συσσωρευτές αυτοί πρέπει να ανακυκλώνονται (Dawei Yu, et al., 2021 [40]). Επίσης, είναι αρκετές οι αναφορές από πυρκαγιές και ατυχήματα σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα που έχουν προκληθεί κατά την λειτουργία των Li ion (Pius Victor Chombo, Yossapong Laoonual, 2020 [108]).

Οι συσσωρευτές Μετάλλου αέρα, είναι μια νέα τεχνολογία που αναδύεται και παρουσιάζει εξαιρετικές ενεργειακές επιδόσεις με ειδική χωρητικότητα μέχρι και 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή των Li ion, μεγαλύτερη αφθονία των μεταλλικών υλικών, όπως το Αλουμίνιο, ο Σίδηρος, το Μαγνήσιο, το Νάτριο, χαμηλότερο κόστος και είναι φιλικές προς το περιβάλλον. Ωστόσο, οι Mt air για να καταφέρουν να ανταγωνιστούν τις μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σήμερα, πρέπει να επιλύσουν τα προβλήματα που μειώνουν τους κύκλους ζωής τους και τα προβλήματα ασφάλειας που δημιουργούνται λόγω της διάβρωσης του μετάλλου και της εμφάνισης δενδριτών. Στον



**Πίνακα 3.22**, συλλέχθηκαν τα ενεργειακά και τα οικονομικά κριτήρια των μπαταριών Li ion, καθώς και τα περιβαλλοντικά και ασφάλειας.

## Ενότητα 4: Αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

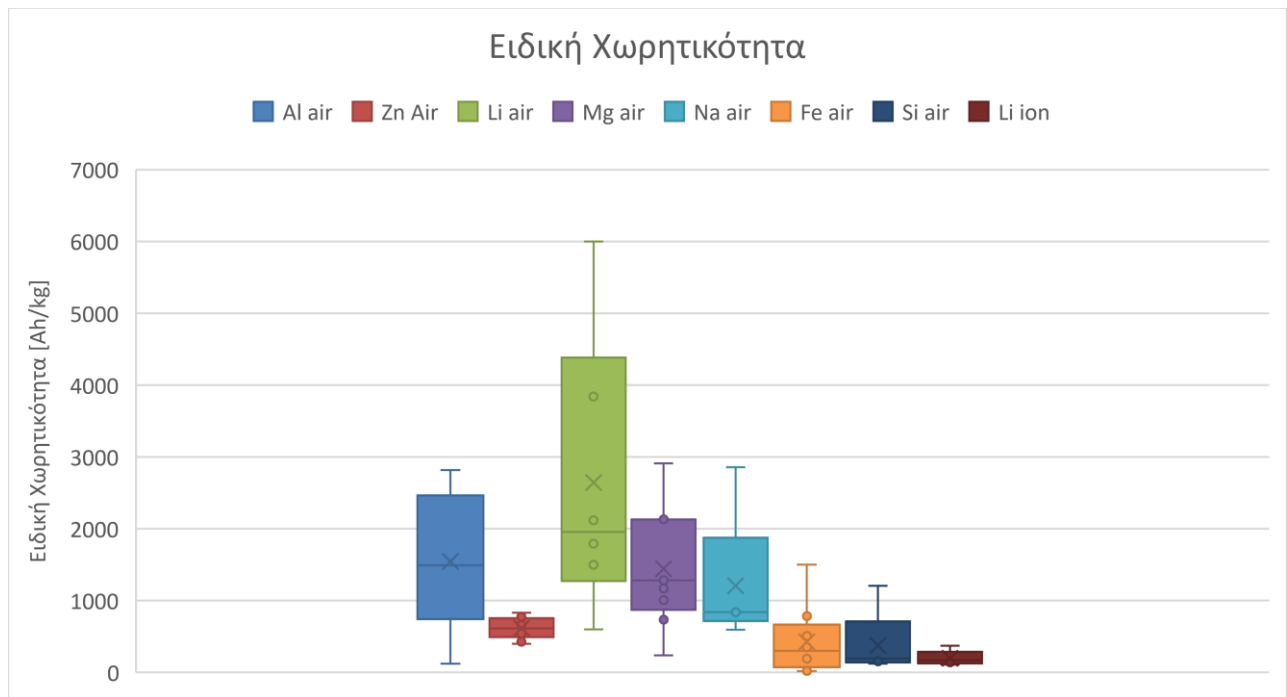
Οι μπαταρίες Mt air, παρουσιάζουν διαφορετικές ιδιότητες στα ενεργειακά τους στοιχεία με βάση το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το ηλεκτρόδιο του μετάλλου. Οι μπαταρίες που ερευνήθηκαν κατά την βιβλιογραφική ανασκόπηση είναι οι:

1. Αλουμινίου αέρα
2. Ψευδαργύρου αέρα
3. Λιθίου αέρα
4. Μαγνησίου αέρα
5. Νατρίου αέρα
6. Σιδήρου αέρα
7. Σιλκόνης αέρα
8. Λιθίου ιόντος

Η συλλογή των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται σε πίνακες, καθώς και οι πηγές αυτών των αποτελεσμάτων από την βιβλιογραφία, στο **Παράρτημα 2: Δεδομένα των συσσωρευτών Mt air και Li ion**.

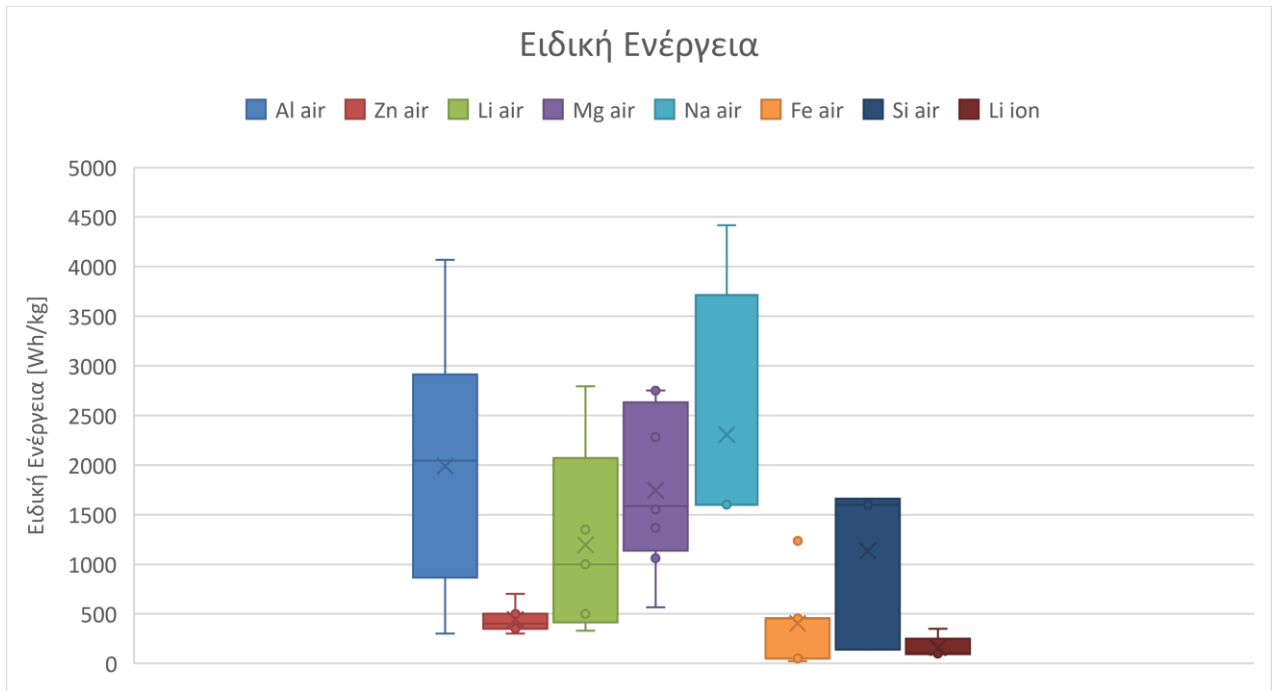
### 4.1 Παρουσίαση και ανάλυση των Ενεργειακών κριτηρίων των Mt air και Li ion.

Οι συσσωρευτές Λιθίου αέρα, παρουσίασαν την μεγαλύτερη ειδική ενέργεια και ειδική χωρητικότητα. Με βάση τους πίνακες που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 3: Συλλογή Δεδομένων και Κριτήρια Σύγκρισης των Μπαταριών Mt – air, στο **Γράφημα 4.1**, γίνεται η σύγκριση της ειδικής χωρητικότητας των συσσωρευτών Mt air και των Li ion. Οι συσσωρευτές Zn air, παρουσιάζουν την χαμηλότερη ειδική χωρητικότητα συγκριτικά με τους υπόλοιπους Mt air, ενώ η Li air την υψηλότερη. Οι Al air, Mg air και Na air, κυμαίνονται σε παρόμοια εύρη τιμών, με υψηλή ειδική χωρητικότητα, ενώ οι Fe air και Si air, έχουν χαμηλότερες τιμές, παρόμοιες με τις Zn air. Αντιστοίχως οι συσσωρευτές Λιθίου ιόντος, παρουσιάζουν μικρότερη ειδική χωρητικότητα από όλους τους Mt air.



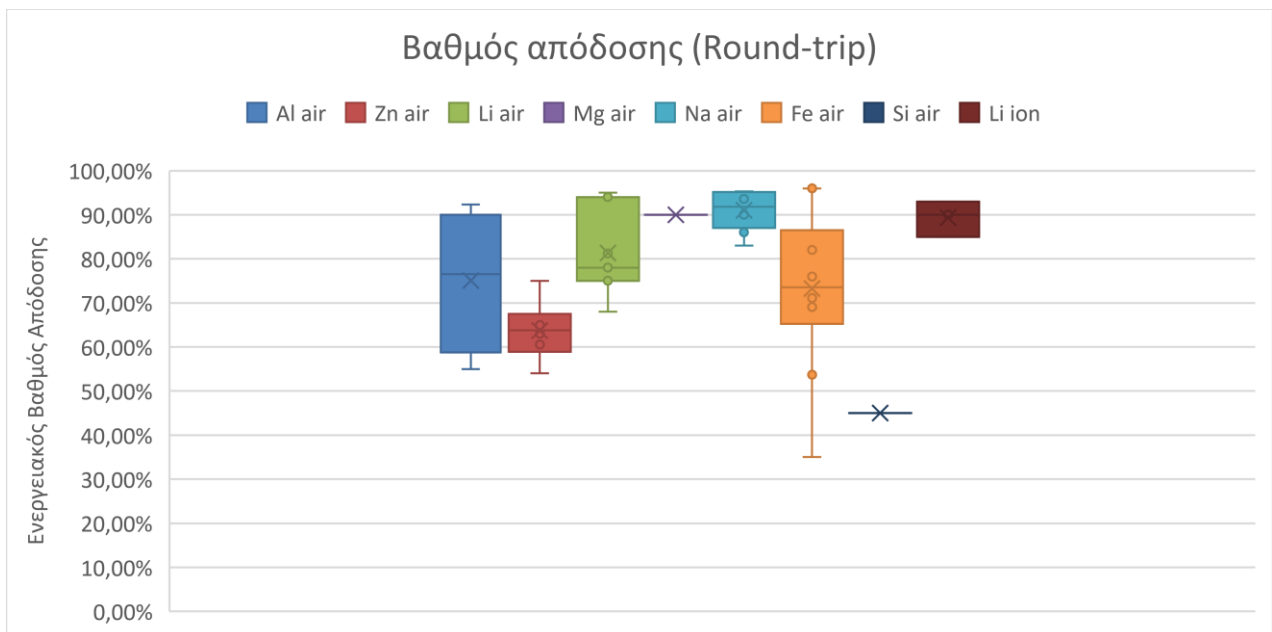
**Γράφημα 4.1:** Ειδική Χωρητικότητα των μπαταριών Μετάλλου αέρα και Λιθίου ιόντος.

Το **Γράφημα 4.2**, παρουσιάζει τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης των συσσωρευτών  $Mt$  air και  $Li$  ion, για την ειδική ενέργεια. Οι συσσωρευτές  $Na$  air, παρουσίασαν τις μεγαλύτερες τιμές ειδικής ενέργειας, μαζί με τις  $Al$  air, ενώ οι  $Li$  air,  $Mg$  air και  $Si$  air, παρουσίασαν εξίσου υψηλές τιμές. Οι συσσωρευτές  $Fe$  air και  $Zn$  air, έχουν τις χαμηλότερες τιμές. Οι συσσωρευτές Λιθίου ιόντος, έχουν μικρότερη ειδική ενέργεια από τις  $Al$  air,  $Li$  air,  $Mg$  air,  $Si$  air και παρόμοια με αυτή των  $Zn$  air και  $Fe$  air.



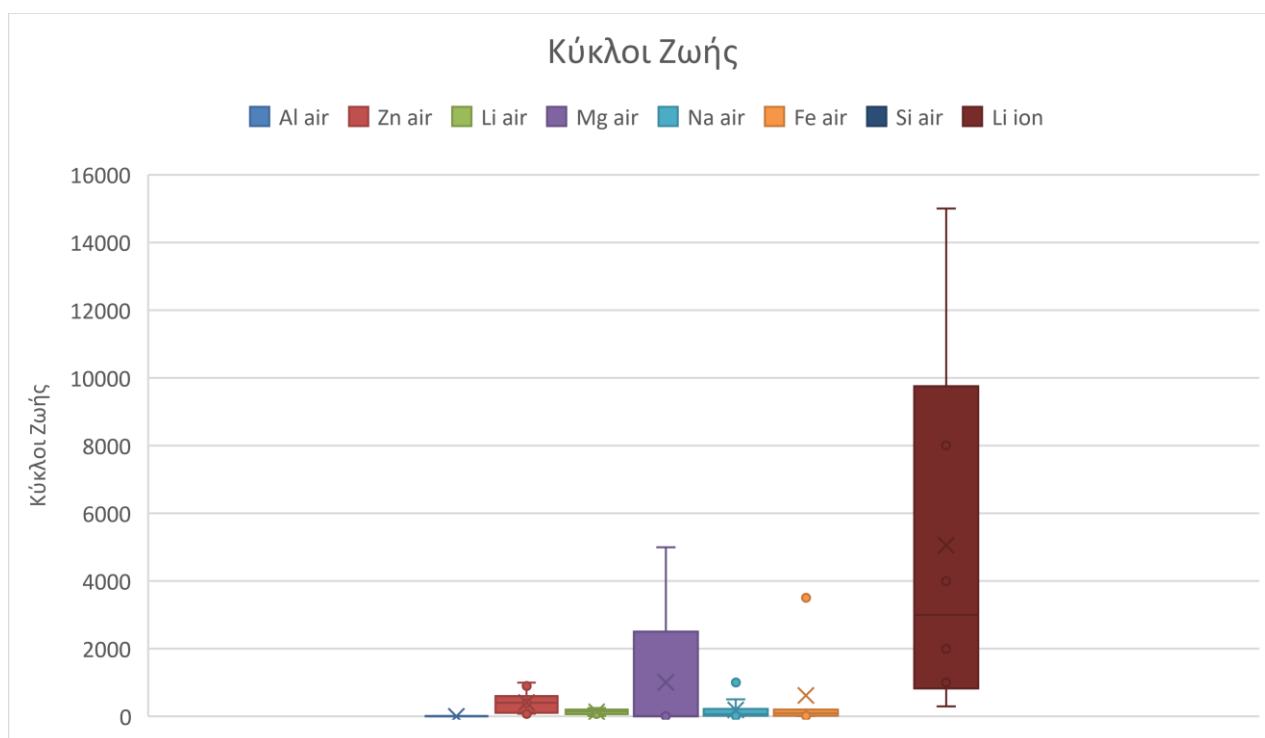
**Γράφημα 4.2:** Ειδική Ενέργεια των συσσωρευτών Μετάλλου αέρα και Λιθίου ιόντος.

Στο **Γράφημα 4.3**, γίνεται σύγκριση του βαθμού απόδοσης (Round-trip) των συσσωρευτών  $Mt$  air και  $Li$  ion. Οι  $Al$  air,  $Li$  air,  $Mg$  air,  $Na$  air και  $Fe$  air, παρουσιάζουν υψηλούς βαθμούς απόδοσης, οι οποίοι μπορούν να συγκριθούν με τους συσσωρευτές  $Li$  ion. Αντιθέτως, οι  $Zn$  air και  $Si$  air παρουσιάζουν χαμηλούς βαθμούς απόδοσης (Round-trip).



**Γράφημα 4.3:** Βαθμός απόδοσης (Round-trip) των συσσωρευτών Μετάλλου αέρα και Λιθίου ιόντος.

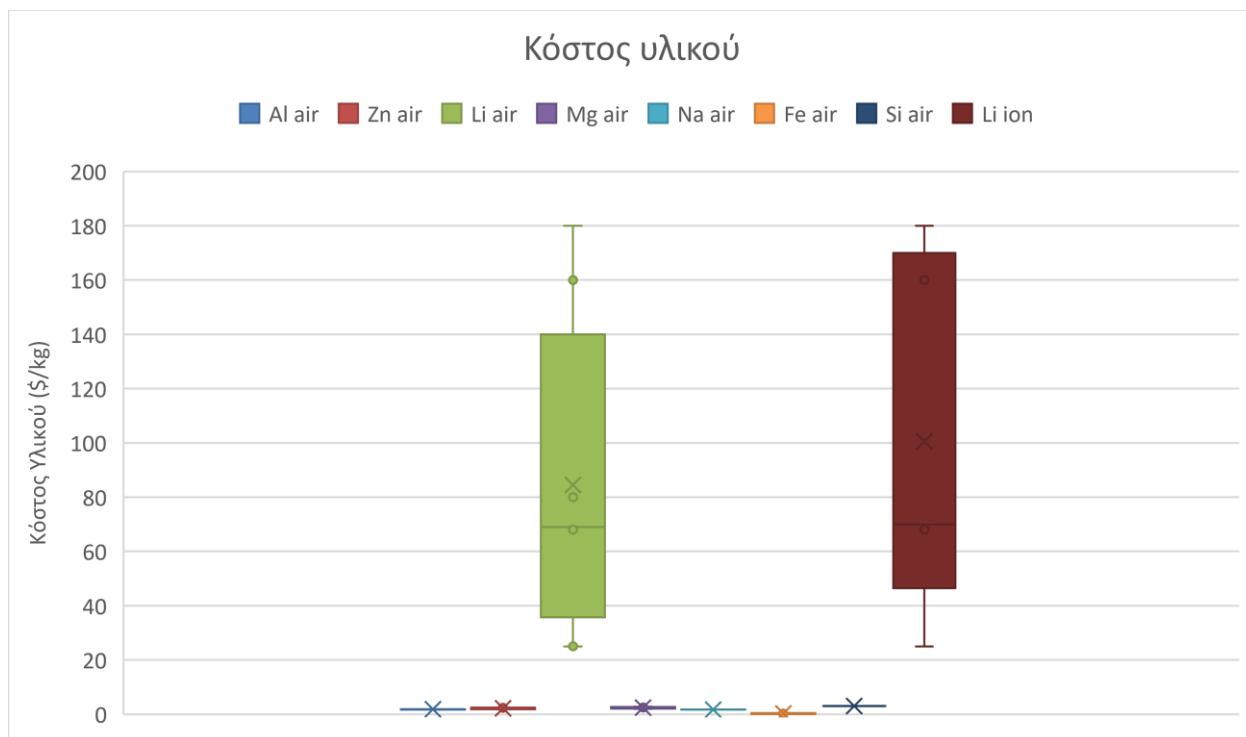
Στο **Γράφημα 4.4**, εμφανίζονται οι τιμές που προέκυψαν από την βιβλιογραφική ανασκόπηση, για τους κύκλους ζωής των Mt air και Li ion. Οι Mg air και Zn air, παρουσιάζουν τους μεγαλύτερους κύκλους φόρτισης εκφόρτισης, ανάμεσα στις Mt air, ενώ οι Li air, Na air και Fe air έχουν μικρότερες τιμές. Οι συσσωρευτές Al air, αντιμετωπίζουν προβλήματα κατά την φόρτιση και εκφόρτιση, που σχετίζονται με την διάβρωση του αλουμινίου. Οι Li ion συσσωρευτές, παρουσιάζουν μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης εκφόρτισης, αρκετά μεγαλύτερο από τις Mt air. Οι κύκλοι ζωής είναι το μεγαλύτερο πρόβλημα των Mt air συσσωρευτών, καθώς οι Li ion, ανάλογα με το βάθος εκφόρτισης τους, μπορούν να έχουν μέχρι και 10 φορές μεγαλύτερο κύκλο ζωής από τις Mt air.



**Γράφημα 4.4:** Κύκλοι ζωής των συσσωρευτών Μετάλλου αέρα και Λιθίου ιόντος.

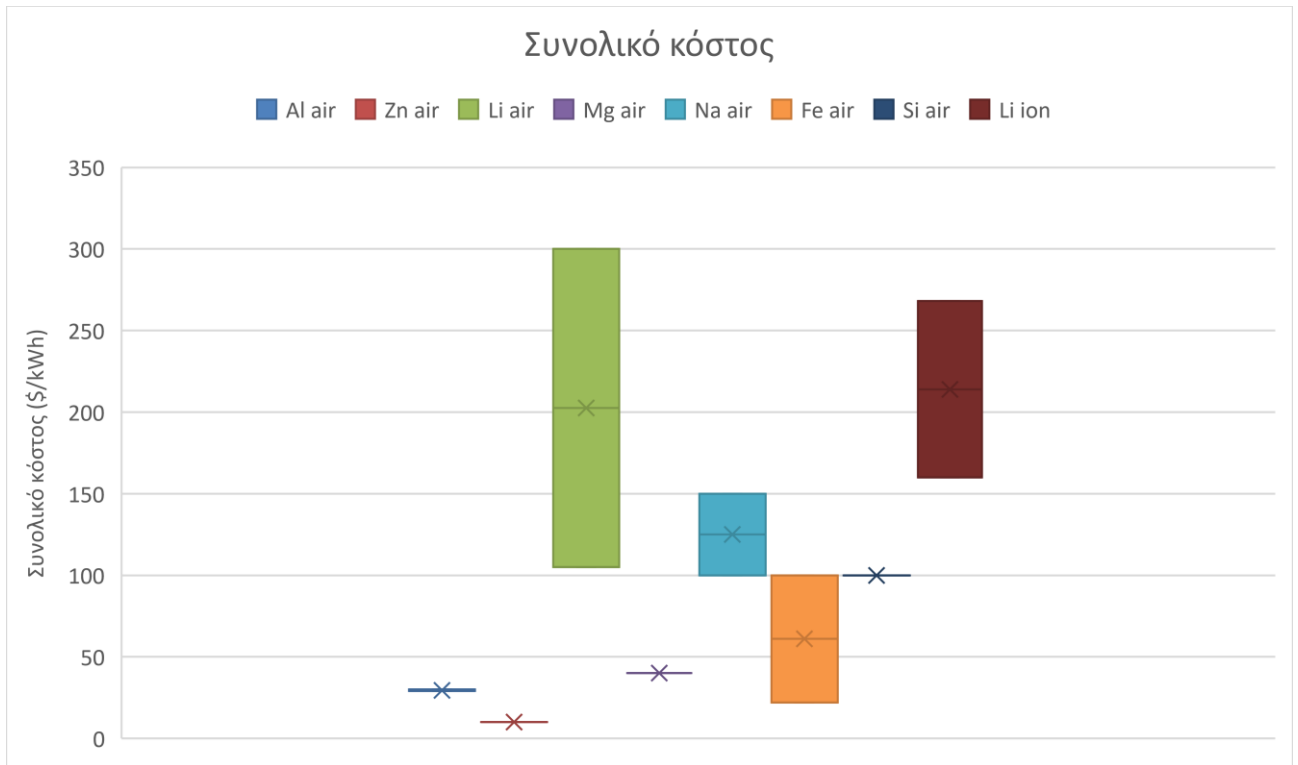
## 4.2 Παρουσίαση και ανάλυση των Οικονομικών κριτηρίων των Mt air και Li ion.

Οι συσσωρευτές μετάλλου αέρα, σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση, εμφανίζουν μικρό κόστος υλικού. Οι συσσωρευτές Fe air, παρουσιάζουν το μικρότερο κόστος υλικού, ενώ οι Al air, Zn air, Mg air, Na air και Si air, παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές. Ωστόσο το Λίθιο είναι ένα ακριβό μεταλλικό υλικό και οι συσσωρευτές Li air, έχουν το ακριβότερο κόστος υλικού. Οι Li ion συσσωρευτές, έχουν το ίδιο κόστος με τις Li air, καθώς χρησιμοποιούν το ίδιο υλικό. Στο **Γράφημα 4.5**, παρουσιάζεται το κόστος υλικού για τους Mt air και Li ion συσσωρευτές.



**Γράφημα 4.5:** Κόστος υλικού των συσσωρευτών Μετάλλου αέρα και Λιθίου ιόντος.

Το συνολικό κόστος των συσσωρευτών Mt air, έχει εκτιμηθεί στην βιβλιογραφία, ωστόσο οι τιμές αυτές δεν προσδιορίζουν αυτήν την παράμετρο, καθώς οι Mt air βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Με βάση τους ηλεκτρολύτες, το υλικό ή και το συνδυασμό των υλικών σε περίπτωση που το ηλεκτρόδιο είναι κράμα μετάλλου, η βιβλιογραφία έχει εκτιμήσει το συνολικό κόστος των Mt air. Οι Li air, παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές κόστους ανά kWh, ενώ η Zn air την χαμηλότερη. Οι Al air και Mg air, παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές, η Na air και Si air, είναι πιο ακριβές και οι Fe air, ανάλογα με την σύνθεσή τους, μπορεί να είναι όσο φθηνές οι Al air, αλλά και όσο ακριβές οι Na air και Si air. Οι Li ion, ανάλογα με την τεχνολογία, κυμαίνονται σε υψηλά και χαμηλά κόστη και η εκτιμηθείσα τιμή του συνολικού κόστους για τις Al air, Zn air, Mg air και Fe air, είναι αρκετά χαμηλότερη. Στο **Γράφημα 4.6**, παρουσιάζεται το συνολικό κόστος των Mt air και των Li ion συσσωρευτών.



**Γράφημα 4.6:** Συνολικό κόστος συσσωρευτών Μετάλλου αέρα και Λιθίου ιόντος.

## 4.3 Πολυκριτηριακή Ανάλυση των διαφόρων Mt air και Li ion συσσωρευτών.

Οι συσσωρευτές Mt air παρουσιάζουν διαφορετικές ιδιότητες, τόσο ενεργειακά, όσο οικονομικά και περιβαλλοντικά. Για να γίνει η κατάλληλη εκτίμηση μεταξύ αυτών των τεχνολογιών, με βάση τα κριτήρια που έχουν αναφερθεί, θα γίνει σύγκριση μεταξύ των Mt air τεχνολογιών και των Li ion συσσωρευτών.

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, τα κριτήρια σύγκρισης των επιμέρους μπαταριών μετάλλου αέρα είναι τα:

1. Ενεργειακά
2. Οικονομικά
3. Περιβαλλοντικά και Ασφάλειας

Στην συνέχεια, θα γίνει αξιολόγηση της βαρύτητας των επιμέρους κριτηρίων με βάση τον πίνακα.

### 4.3.1 Αξιολόγηση των Κριτηρίων

Η αξιολόγηση των κριτηρίων, έγινε με βάση τα τρία κριτήρια που αναφέρθηκαν. Η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή, δείχνει την τεχνολογική στάθμιση ενός συσσωρευτή. Όσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα τόσο καλύτερη θεωρείται η τεχνολογία (Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]). Τα ενεργειακά κριτήρια, κρίθηκαν με την μεγαλύτερη βαρύτητα από όλα τα κριτήρια, με συντελεστή **58,18%**, σύμφωνα με τις βαρύτητες του **Πίνακα 4.24**.

Στην σημερινή εποχή, είναι σημαντικό να βρεθούν νέες τεχνολογίες οι οποίες να είναι ικανοποιητικές για τις ενεργειακές απαιτήσεις, αλλά επίσης και φιλικές προς το περιβάλλον. Η κλιματική αλλαγή, έχει ωθήσει την επιστημονική κοινότητα στην εύρεση τεχνολογιών που να μην ρυπαίνουν και να μην είναι τοξικές. Οι συσσωρευτές μετάλλου αέρα, δείχνουν να είναι φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς χρησιμοποιούν ένα μεταλλικό υλικό ως το ηλεκτρόδιο και αέρα από την ατμόσφαιρα. Ωστόσο, οι συγκεκριμένες μπαταρίες δεν θεωρούνται ασφαλείς κατά την λειτουργία τους, λόγω της παρουσίας διαφόρων προβλημάτων που έχουν να κάνουν με την αντίδραση του μετάλλου με το οξυγόνο. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σήμερα, δεν έχουν φτάσει στην ιδανική τους απόδοση σε σχέση με την ασφάλεια και το περιβάλλον, καθώς έχουν αναφερθεί ατυχήματα κατά την λειτουργία τους, όπως ατυχήματα που σχετίζονται με την Tesla (Pius Victor Chombo, Yossapong Laoonual, 2020 [108]). Τα κριτήρια Περιβάλλοντος και Ασφάλειας, κρίθηκαν με βαρύτητα **35,56%**, σύμφωνα με τις βαρύτητες του **Πίνακα 4.24**.

Οι τεχνολογίες με βάση το λίθιο, παρουσιάζουν ικανοποιητικές αποδόσεις, όσον αφορά την χωρητικότητα, τον βαθμό απόδοσης, κύκλους ζωής κλπ., ωστόσο, είναι σημαντικό να βρεθούν τεχνολογίες που όχι μόνο να είναι οικονομικά προσιτές, αλλά και να έχουν υψηλή διαθεσιμότητα υλικού. Οι συσσωρευτές Mt air, όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, διακρίνονται σε είδη, που χρησιμοποιούν μεταλλικά υλικά με υψηλή διαθεσιμότητα υλικού, όπως η σιλκόνη και το αλουμίνιο. Ωστόσο, το κόστος υλικού και το συνολικό κόστος των Mt air, είναι παρόμοιο,

αλλά αρκετά μικρότερο συγκριτικά με τις Li ion. Τα Οικονομικά κριτήρια, κρίθηκαν με βαρύτητα **6,26%**, σύμφωνα με τις βαρύτητες του **Πίνακα 4.24**.

Στον **Πίνακα 4.24** παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία αξιολόγησης των βαρυτήτων μεταξύ των κριτηρίων, και στον **Πίνακα 4.23**, η σημασία των βαθμολογιών.

### 4.3.2 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των συσσωρευτών Mt air και Li ion, είναι αυτά που βρέθηκαν από την βιβλιογραφική ανασκόπηση που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Στην συνέχεια βαθμολογήθηκαν με βάση τις βέλτιστες τιμές των επιμέρους συσσωρευτών.

Τα ενεργειακά κριτήρια, κατηγοριοποιούνται στις εξής παραμέτρους:

1. Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Μέταλλο)
2. Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Μέταλλο και Οξυγόνο)
3. Ενεργειακή Πυκνότητα
4. Ειδική Ενέργεια
5. Κύκλοι Ζωής
6. Βαθμός απόδοσης (Round-trip)
7. Βάθος εκφόρτισης
8. Ειδική Χωρητικότητα

Σε αυτές τις παραμέτρους, βρέθηκε η μέγιστη τιμή από τους συσσωρευτές Mt air και Li ion και στην συνέχεια αξιολογήθηκε η βαθμολογία τους. Στον **Πίνακα 4.25**, παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των ενεργειακών παραμέτρων από την βιβλιογραφία, ενώ στον **Πίνακα 4.26**, η βαθμολογία τους.

Στα ενεργειακά κριτήρια, οι συσσωρευτές Li air, παρουσιάζουν την μεγαλύτερη βαθμολογία, καθώς παρουσιάζουν την μεγαλύτερη ειδική χωρητικότητα και θεωρητική ειδική ενέργεια. Οι συσσωρευτές Al air, έχουν την μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα και οι Na air και Al air, την υψηλότερη πραγματική ειδική ενέργεια. Οι Li ion, αποδίδουν αρκετά μεγαλύτερο αριθμό κύκλων ζωής, συγκριτικά με τις Mt air και πιο σταθερή λειτουργία.

Τα δεδομένα των οικονομικών κριτηρίων, είναι:

1. Αξία Υλικού
2. Διαθεσιμότητα Υλικού
3. Συνολικό Κόστος

Το συνολικό κόστος και η αξία υλικού, έδωσαν την μεγαλύτερη βαθμολογία για τις ελάχιστες τιμές που προέκυψαν από την βιβλιογραφική ανασκόπηση, ενώ η διαθεσιμότητα υλικού για την μέγιστη τιμή.

Στον **Πίνακα 4.27**, παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές από την βιβλιογραφική ανασκόπηση, ενώ στον **Πίνακα 4.28** η βαθμολογία τους.



Η βέλτιστη βαθμολογία όσον αφορά την αξία υλικού, παρουσιάζεται στις μπαταρίες Fe air και για το συνολικό κόστος, στις Zn air. Οι συσσωρευτές Si air, παρουσίασαν αρκετά υψηλότερη βαθμολογία συγκριτικά με τις υπόλοιπες Mt air και Li ion, καθώς η σιλικόνη είναι πιο άφθονη.

Τα δεδομένα για τα κριτήρια περιβάλλοντος και ασφάλειας είναι:

1. Φιλικό προς το περιβάλλον Συσσωρευτές
2. Ασφάλεια

Τα κριτήρια αυτά αξιολογήθηκαν με βάση τις αναφορές από την βιβλιογραφική ανασκόπηση. Η αξιολόγηση για την Ασφάλεια έγινε με ποσοστά και είναι η εξής:

- Ανησυχία για την ασφάλεια/ Αναφορές για ατυχήματα/ Κίνδυνος: 30%
- Ασφαλής: 60%
- Αρκετά Ασφαλής: 90%

Ενώ για το Περιβάλλον:

- Τοξικά Υλικά/ Ρύπανση: 1
- Σχετικά Φιλικό: 3
- Φιλικό προς το περιβάλλον: 5

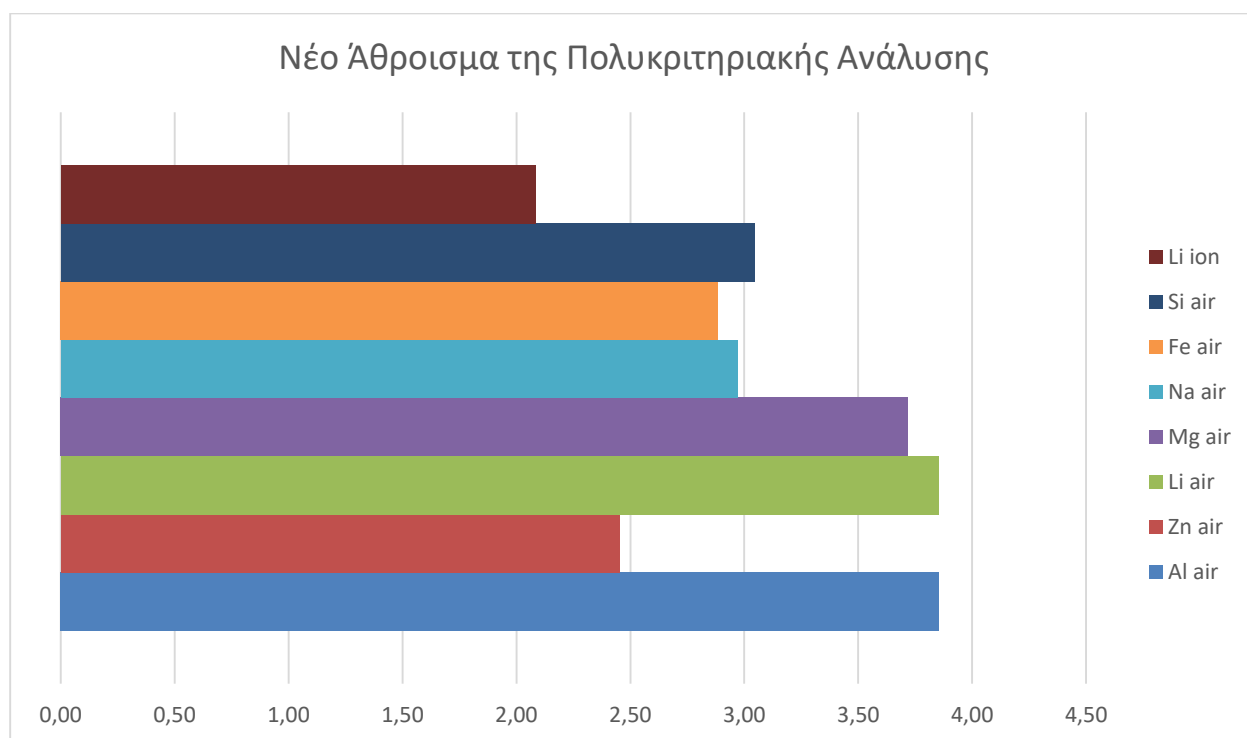
Στον **Πίνακα 4.29**, παρουσιάζονται οι αξιολογήσεις των παραμέτρων περιβάλλοντος και ασφάλειας και στον **Πίνακα 4.30**, η βαθμολογία. Τα κριτήρια αυτά βαθμολογήθηκαν με βάση την μέγιστη τιμή.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, οι συσσωρευτές Mt air, είναι φιλικό προς το περιβάλλον, ωστόσο οι Li air, παρουσιάζουν κάποια ζητήματα, λόγω των ηλεκτρολυτών που χρησιμοποιούνται. Οι Li ion συσσωρευτές, παρουσίασαν την μικρότερη βαθμολογία. Η ασφάλεια των συσσωρευτών Mt air, παρουσιάζει αρκετά προβλήματα και για αυτόν τον λόγο βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σήμερα ωστόσο, δεν έχουν φτάσει στην μέγιστη απόδοσή τους και υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις ατυχημάτων στην ηλεκτροκίνηση αλλά και σε φορητές συσκευές από τις Li ion μπαταρίες.

### 4.3.3 Βαθμολογία των Συσσωρευτών Mt air και Li ion

Με βάση την αξιολόγηση των δεδομένων και την βαθμολογία τους, παρουσιάζεται η τελική βαθμολογία των συσσωρευτών Mt air και Li ion, σύμφωνα με τις βαρύτητες που παρουσιάστηκαν στην αρχή της πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Στον **Πίνακα 4.31**, παρουσιάζεται η συνολική βαθμολογία των συσσωρευτών, μαζί με όλα τα κριτήρια. Σύμφωνα με τις βαρύτητες του **Πίνακα 4.24**, παρουσιάζεται η τελική βαθμολογία στον **Πίνακα 4.32**. Στην πολυκριτηριακή ανάλυση και τις βαρύτητες αυτές, την υψηλότερη βαθμολογία τις παρουσιάζουν οι συσσωρευτές Al air και Li air. Αυτό συμβαίνει, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό του βάρους, το έχουν τα Ενεργειακά Κριτήρια με ποσοστό 58,18%. Στο **Γράφημα 4.7**, παρουσιάζεται γραφικά η τελική βαθμολογία των Συσσωρευτών Mt air και Li ion.

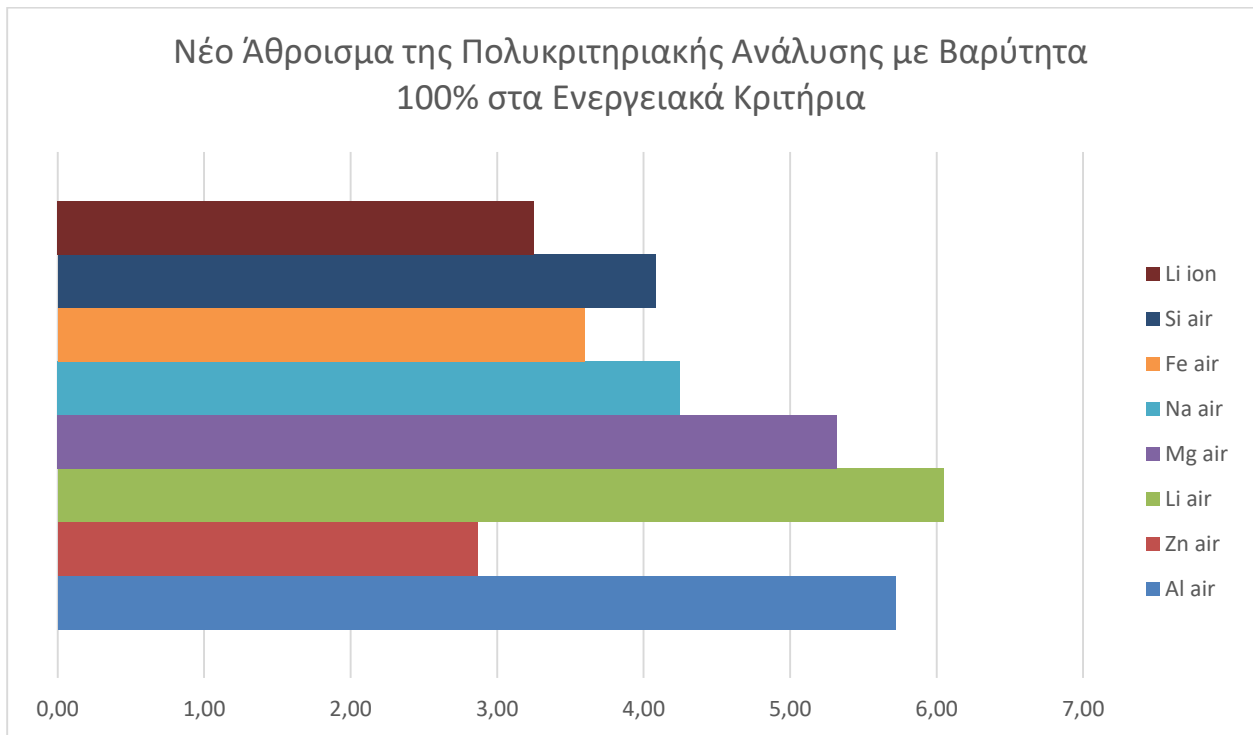


**Γράφημα 4.7:** Νέο Άθροισμα της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης σύμφωνα με τις βαρύτητες του **Πίνακα 4.24**.

Στην συνέχεια, εξετάστηκαν και άλλα σενάρια με βαρύτητα 100% στα Ενεργειακά Κριτήρια, 100% στα Οικονομικά κριτήρια, 100% στα κριτήρια Περιβάλλοντος και Ασφάλειας, καθώς και η περίπτωση με ίσες βαρύτητες σε όλα τα κριτήρια.

Στο πρώτο σενάριο, με βαρύτητα 100% στα Ενεργειακά Κριτήρια, οι συσσωρευτές Al air και Li air, υπερσχύουν με τις υψηλότερες βαθμολογίες και οι Li ion και Zn air, παρουσιάζουν τις μικρότερες τιμές. Αυτό συμβαίνει, καθώς οι Al air και Li air, παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές στην θεωρητική ειδική ενέργεια οι οποίες είναι 13000 Wh/kg των Li air, έναντι 500 Wh/kg των Li ion. Οι Li ion, παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές από τις Zn air, λόγω της χαμηλής θεωρητικής ειδικής ενέργειας, πρακτικής ειδικής ενέργειας και του μικρότερου βαθμού απόδοσης (Round Trip) συγκριτικά με τις υπόλοιπες Mt air και Li ion. Οι βαθμολογίες αυτού του σεναρίου,

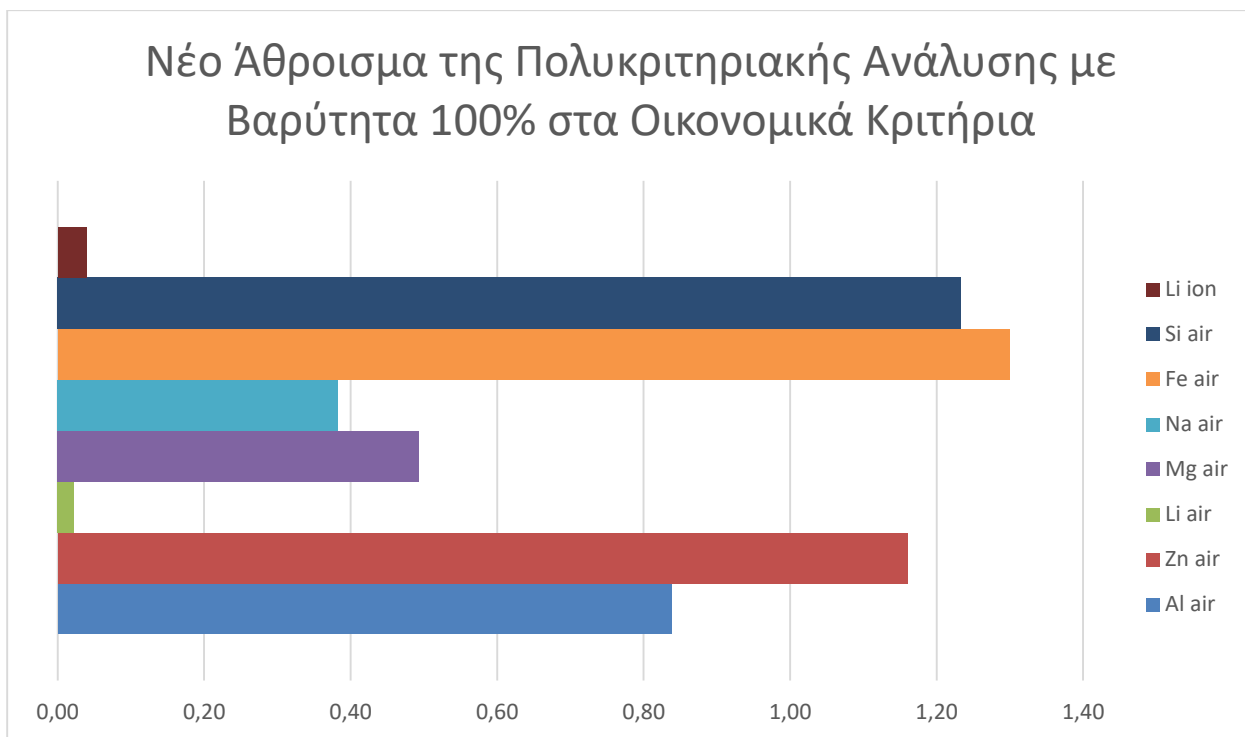
παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.33** καθώς και γραφικά στο **Γράφημα 4.8**: Νέο Άθροισμα της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης με Βαρύτητα 100% στα Ενεργειακά Κριτήρια..



**Γράφημα 4.8:** Νέο Άθροισμα της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης με Βαρύτητα 100% στα Ενεργειακά Κριτήρια.

Οι υψηλές θεωρητικές τιμές που παρουσιάζουν οι συσσωρευτές Mt air, δείχνουν ότι υπάρχει μεγάλο περιθώριο βελτίωσής τους, καθώς οι πρακτικές τιμές της ειδικής ενέργειας είναι αρκετά μικρότερες από τις θεωρητικές. Αντιθέτως, οι συσσωρευτές Li ion είναι μια τεχνολογία η οποία έχει φτάσει αρκετά κοντά στις θεωρητικές της τιμές.

Στο δεύτερο σενάριο, με βαρύτητα 100% στα Οικονομικά κριτήρια, οι συσσωρευτές Fe air και Si air, παρουσιάζουν την υψηλότερη βαθμολογία, διότι οι Si air παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερη διαθεσιμότητα υλικού 282000 ppm, συγκριτικά με τις υπόλοιπες Mt air και Li ion και οι Fe air, το χαμηλότερο κόστος υλικού, υψηλή διαθεσιμότητα και σχετικά χαμηλό συνολικό κόστος. Οι συσσωρευτές Zn air, παρουσιάζουν το μικρότερο συνολικό κόστος, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις από την βιβλιογραφία. Οι Li ion και Li air, απέδωσαν τις χαμηλότερες τιμές, καθώς το κόστος του λιθίου είναι το υψηλότερο συγκριτικά με τα υπόλοιπα μεταλλικά υλικά με 180 \$/kg, η διαθεσιμότητα επίσης η μικρότερη με 18 ppm στον φλοιό της Γης και το συνολικό κόστος των Li air έχει εκτιμηθεί από την βιβλιογραφία ως υψηλότερο από τις Li ion με τιμή μέχρι και 500 \$/kWh (N. Chawla, 2019 [92]). Στον **Πίνακα 4.34**, παρουσιάζονται αναλυτικά οι βαθμολογίες όλων των συσσωρευτών και στο **Γράφημα 4.9** σε σχεδιάγραμμα.



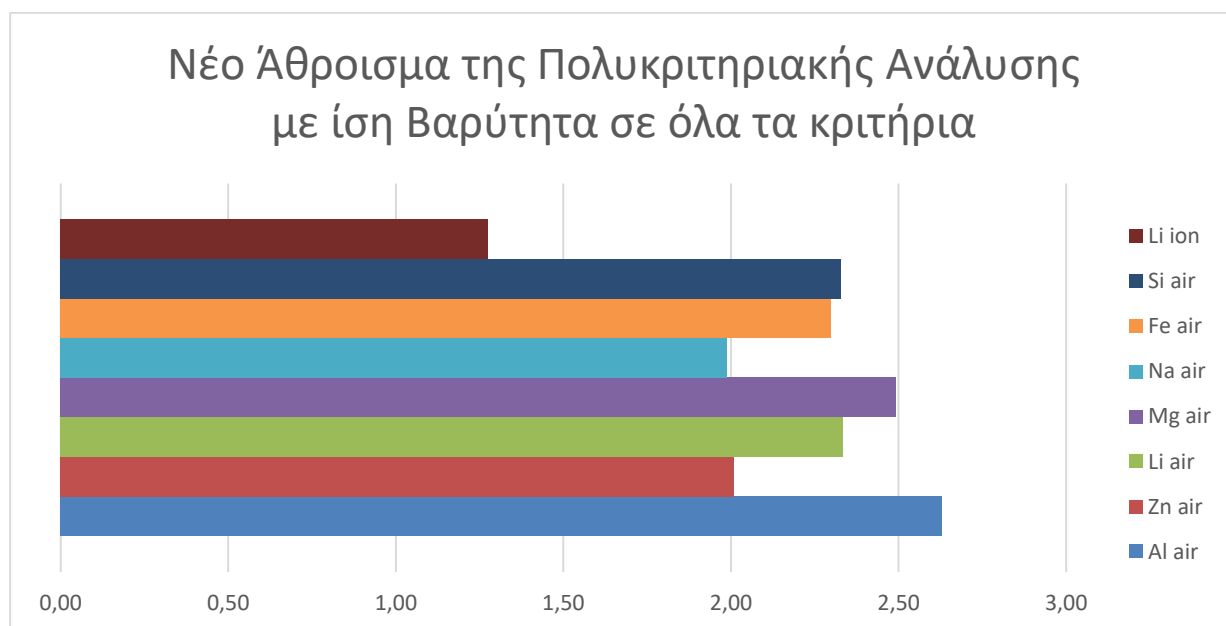
**Γράφημα 4.9:** Νέο Άθροισμα της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης με Βαρύτητα 100% στα Οικονομικά Κριτήρια.

Στο τρίτο σενάριο με βαρύτητα 100% στα κριτήρια Περιβάλλοντος και Ασφάλειας, οι συσσωρευτές Zn air και Fe air, παρουσίασαν την μεγαλύτερη βαθμολογία, καθώς σύμφωνα με την βιβλιογραφία η λειτουργία τους κρίνεται ως ασφαλής και φιλική προς το περιβάλλον. Οι συσσωρευτές Mt air, είναι φιλικό προς το περιβάλλον, λόγω της λειτουργίας τους με τον αέρα της ατμόσφαιρας, ωστόσο η σύνθεσή τους γίνεται με διαφορετικό συνδυασμό ηλεκτρολυτών και μεταλλικού κράματος. Για αυτόν τον λόγο, παρουσιάζονται διακυμάνσεις στην βαθμολογία τους στο κριτήριο “Φιλικό προς το Περιβάλλον” και “Ασφάλεια”. Οι συσσωρευτές Li air, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, κρίνονται ως μη ασφαλείς, καθώς το προϊόν της χημικής αντίδρασης  $\text{Li}_2\text{O}_2$ , μπορεί να προκαλέσει έκρηξη. Οι Li ion, επίσης κρίνονται ως μη ασφαλείς, λόγω των αναφορών για ατυχήματα που έχουν προκληθεί κατά την λειτουργία τους. Στον **Πίνακα 4.35**, παρουσιάζονται αναλυτικά οι τελικές βαθμολογίες των Mt air και Li ion, σύμφωνα με την βαρύτητα αυτού του σεναρίου και στο **Γράφημα 4.10**, παρουσιάζονται αυτές οι βαθμολογίες, γραφικά.



**Γράφημα 4.10:** Νέο Άθροισμα της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης με Βαρύτητα 100% στα Κριτήρια Περιβάλλοντος και Ασφάλειας.

Το τέταρτο σενάριο, παρουσιάζει τις βαθμολογίες των συσσωρευτών με ίση βαρύτητα σε όλα τα κριτήρια. Οι συσσωρευτές που υπερिशύουν σε αυτή την περίπτωση, είναι οι Al air, λόγω της υψηλής τους ειδικής ενέργειας και χωρητικότητας, αλλά και επειδή η τεχνολογία αυτή είναι φιλική προς το περιβάλλον και δείχνει να είναι οικονομική, τόσο σε κόστος υλικού και συνολικού κόστους, αλλά και σε διαθεσιμότητα υλικού. Στον **Πίνακα 4.36**, παρουσιάζεται η βαθμολογία των Mt air και Li ion και γραφικά στο **Γράφημα 4.11**.



**Γράφημα 4.11:** Νέο Άθροισμα της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης με ίση Βαρύτητα σε όλα τα κριτήρια.

# Ενότητα 5: Εφαρμογές των Συσσωρευτών Mt air

Υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών που μπορούν να υποστηριχθούν από τους συσσωρευτές Mt air. Τα διαφορετικά είδη Mt air, είναι κατάλληλα σε διαφορετικές εφαρμογές ή και σε ίδιες.

Οι Al air, μπορούν να εφαρμοστούν στην ηλεκτροκίνηση (Shaohua Yang, Harold Knickle, 2002 [88]), (Xiaohui Li, et al., 2021 [57]), σε στρατιωτικές εφαρμογές (P. Goel, et al., 2020 [50]), (Xing Zhong, et al., 2012 [109]), στην τροφοδοσία φορητών συσκευών και σε εφαρμογές που απαιτούν μικρή ισχύ (Yifei Wang, et al., 2018 [110]) και στην αποθήκευση ενέργειας (Xiaohui Li, et al., 2021 [57]).

Οι Zn air, είναι ένα είδος συσσωρευτή που χρησιμοποιείται ήδη σε ακουστικά βαρηκοΐας (Yingjian Yu, et al., 2021 [104]). Οι εφαρμογές που μπορούν να υποστηριχθούν από αυτές τις μπαταρίες είναι η ηλεκτροκίνηση (Siyuan Zhao, et al., 2022 [111]), (Pucheng Pei, et al., 2014 [99]), σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας (Marina Bockelmann, et al., 2016 [64]), (Zengxia Pei, et al., 2019 [61]), (Siyuan Zhao, et al., 2022 [111]) και ως σταθερές μπαταρίες (Keliang Wang, et al., 2022 [67]).

Οι Li air, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση ηλιακής ενέργειας (Qi Li, et al., 2017 [3]) και στην ηλεκτροκίνηση (Tao Liu et al., 2020 [18]), (U.R. Farooqui, et al., 2017 [70]), (Wen-Bin Luo, 2017 [71]).

Οι Mg air, σε συσκευές αποθήκευσης ενέργειας (Fanglei Tong, et al., 2021 [73]), στην ηλεκτροκίνηση (Xingrui Chen, et al., 2019 [112]) και σε συσκευές που μπορούν να φορεθούν ή να εμφυτευθούν στο ανθρώπινο σώμα για ιατρικούς λόγους, καθώς τα ιόντα μαγνησίου είναι ακίνδυνα για το ανθρώπινο σώμα (Luhe Li, et al., 2021 [75]).

Οι Na air, μπορούν να εφαρμοστούν στην ηλεκτροκίνηση και γενικότερα στην αποθήκευση ενέργειας (Feng Liang, et al., 2018 [80]), (Y. Kang, et al., 2020 [79]).

Οι Fe air, ως φορητές και σταθερές μπαταρίες (Henning Weinrich, et al., 2019 [78]), στην ηλεκτροκίνηση (Yingjian Yu, et al., 2021 [104]) και σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας (Aswin K. Manohar, et al., 2012 [94]).

Οι Si air, είναι κυρίως πρωτογενείς συσσωρευτές και η υλοποίησή τους μπορεί να εφαρμοστεί σε μικρο/νάνο συστήματα και φορητές συσκευές (Yingjian Yu, et al., 2021 [104]).

## 5.1 Πρακτικές Εφαρμογές των Mt air.

Στις μέρες μας, έχει γίνει προσπάθεια εφαρμογής των Mt air συσσωρευτών πρακτικά. Η Phinergy (phinergy.com, 2022, [48]), η οποία είναι μια καινοτόμος εταιρεία φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογίας που ξεκίνησε από το Πανεπιστήμιο Bar Ilan του Ισραήλ, έχει προωθήσει τεχνολογίες που είναι βασισμένες στις μπαταρίες Al air και Zn air. Στην ηλεκτροκίνηση, η χρήση των Mt air μπορεί να αυξήσει την αυτονομία οδήγησης ενός ηλεκτροκίνητου οχήματος από 2 έως και 3 φορές η οποία είναι ίση με τα αυτοκίνητα με Μηχανές Εσωτερικής Καύσης. Το αλουμίνιο, είναι άφθονο, φθηνό και δεν εκπέμπει ρύπους κατά την οδήγηση. Μπορεί να εφαρμοστεί σε λεωφορεία, τα οποία θα υποστηρίζονται από Al air συσσωρευτές σε όλη την λειτουργία τους με την ίδια ρουτίνα ανεφοδιασμού τους. Στα αυτοκίνητα, η χρήση των Al air, ξεπερνάει το εύρος διαδρομής που μπορεί να καλύψει ένα ηλεκτροκίνητο όχημα και ο ανεφοδιασμός τους γίνεται αντικαθιστώντας το Αλουμίνιο σε πρατήρια βενζίνης, με διάρκεια 5 λεπτών.

Οι συσσωρευτές Zn air, σύμφωνα με την Phinergy, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ρύθμιση ηλεκτρικών δικτύων, με την εξισορρόπηση κατά την αιχμή παραγωγής ενέργειας και ζήτησης κατανάλωσης, για την αποθήκευση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

## 5.2 Συμπεράσματα

Οι συσσωρευτές Mt air, είναι μία νέα τεχνολογία που αναδύεται για την αποθήκευση ενέργειας. Στις μέρες μας, με την κλιματική αλλαγή γίνονται προσπάθειες για την αναζήτηση νέων πηγών ενέργειας που δεν μολύνουν το περιβάλλον και δεν επιβαρύνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Οι μπαταρίες Mt air είναι μία μεγάλη οικογένεια που αποτελείται από συσσωρευτές που χρησιμοποιούν ως ηλεκτρόδιο ένα μεταλλικό υλικό και τον αέρα. Παρουσιάζουν υψηλότερη ειδική ενέργεια και ειδική χωρητικότητα από τις μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σήμερα, όπως οι μπαταρίες με βάση το Λίθιο. Ωστόσο, οι συσσωρευτές αυτοί, παρουσιάζουν προβλήματα κατά την λειτουργία τους, τα οποία είναι παρόμοια για όλα τα μέταλλα και είναι κυρίως η διάβρωσή τους από τον αέρα. Όμως, έχουν γίνει προσπάθειες για την βελτίωση της απόδοσής τους με νέα υλικά, όπως το γραφένιο, που επιταχύνουν την Μείωση Αντίδρασης Οξυγόνου. Με την διόρθωση αυτών των προβλημάτων και την επίτευξη της σταθερής τους λειτουργίας, οι μπαταρίες Μετάλλου αέρα, ενδέχεται να είναι οι συσσωρευτές του μέλλοντος.

# Βιβλιογραφία

- [1] Lip Huat Saw, Yonghuang Ye, Ming Chian Yew, Wen Tong Chong, Ming Kun Yew, Tan Ching Ng, «Computational fluid dynamics simulation on open cell aluminium foams for Li-ion battery cooling system,» σε *Applied Energy, Volume 204*, Kajang, 2017, pp. Pages 1489-1499.
- [2] Tibor Nagy, Lajos Nagy, Zoltán Erdélyi, Eszter Baradács, György Deák, Miklós Zsuga, Sándor Kéki, «Environmentally friendly Zn-air rechargeable battery with heavy metal free charcoal based air cathode,» σε *Electrochimica Acta, Volume 368*, Debrecen, Hungary, 2021.
- [3] Qi Li, Yang Liu, Shaohua Guo, Haoshen Zhou, «Solar energy storage in the rechargeable batteries,» σε *Nano Today, Volume 16*, Nanjing 210093, China, Tennoudai, Tsukuba, Japan, 2017, pp. Pages 46-60.
- [4] Gunnar Luderer, Robert C. Pietzcker, Samuel Carrara, Harmen Sytze de Boer, Shinichiro Fujimori, Nils Johnson, Silvana Mima, Douglas Arent, «Assessment of wind and solar power in global low-carbon energy scenarios: An introduction,» σε *Energy Economics, Volume 64*, 2017, pp. Pages 542-551.
- [5] Chao Ai, Lin Zhang, Wei Gao, Guisheng Yang, Die Wu, Lijuan Chen, Wenting Chen, Andrew Plummer, «A review of energy storage technologies in hydraulic wind turbines,» σε *Energy Conversion and Management, Volume 264*, 2022.
- [6] Tao Ma, Senji Li, Wenbo Gu, Shengjie Weng, Jinqing Peng, Gang Xiao, «Solar energy harvesting pavements on the road: comparative study and performance assessment,» σε *Sustainable Cities and Society, Volume 81*, 2022.
- [7] Insu Kim, Ronald G. Harley, «Examination of the effect of the reactive power control of photovoltaic systems on electric power grids and the development of a voltage-regulation method that considers feeder impedance sensitivity,» σε *Electric Power Systems Research, Volume 180*, 2020.
- [8] Nader A. El-Taweel, Hadi Khani, Hany E.Z. Farag, «Voltage regulation in active power distribution systems integrated with natural gas grids using distributed electric and gas energy resources,» σε *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 106*, 2019, pp. Pages 561-571.
- [9] Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, «Chapter 1 - Battery technologies,» σε *Simulation of Battery Systems, Academic Press*, 2020, pp. Pages 1-54.
- [10] «epa.gov,» U.S. Environmental Protection Agency, 22 Νοέμβριος 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.epa.gov/energy/electricity-storage>.



- [11] Seyed Ehsan Ahmadi, Delnia Sadeghi, Mousa Marzband, Abdullah Abusorrah, Khaled Sedraoui, «Decentralized bi-level stochastic optimization approach for multi-agent multi-energy networked micro-grids with multi-energy storage technologies,» σε *Energy, Volume 245*, 2022.
- [12] Joseph Maria Jebamalai, Kurt Marlein, Jelle Laverge, «Influence of centralized and distributed thermal energy storage on district heating network design,» σε *Energy, Volume 202*, 2020.
- [13] Laura Fiorini, Marco Aiello, «Energy management for user’s thermal and power needs: A survey,» σε *Energy Reports, Volume 5*, 2019, pp. Pages 1048-1076.
- [14] P. Kurzweil, «Chapter 16 - Lithium Battery Energy Storage: State of the Art Including Lithium–Air and Lithium–Sulfur Systems,» σε *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*, Electrochemistry Laboratory, University of Applied Sciences, Amberg, Germany, Elsevier, 2015, pp. Pages 269-307.
- [15] Taehoon Kim, Wentao Song, Dae-Yong Son, Luis K. Ono, Yabing Qi, «Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies,» σε *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, pp. 2942-2964.
- [16] Federal Consortium for Advanced Batteries, «National Blueprint for Lithium Batteries,» Ιούnius 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/national-blueprint-lithium-batteries>.
- [17] «Tesla,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: Tesla.com.
- [18] Tao Liu, J. Padmanabhan Vivek, Evan Wenbo Zhao, Jiang Lei, Nuria Garcia-Araez, Clare P. Grey, «Current Challenges and Routes Forward for Nonaqueous Lithium–Air Batteries,» σε *Chemical Reviews*, American Chemical Society, 2020, pp. 6558-6625.
- [19] Peizhao Lyu, Xinjian Liu, Jie Qu, Jiateng Zhao, Yutao Huo, Zhiguo Qu, Zhonghao Rao, «Recent advances of thermal safety of lithium ion battery for energy storage,» σε *Energy Storage Materials, Volume 31*, 2020, pp. 195-220.
- [20] «The London Metal Exchange,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.lme.com/>.
- [21] Bergveld, H. J.; Kruijt, W. S.; Notten, P. H. L., «Design by Modelling,» σε *Battery Management Systems*, Dordrecht, Springer Netherlands, 2002, p. 107–108.
- [22] S. Dhameja, «Electric Vehicle Battery Systems,» Elsevier, 2001, p. 12.
- [23] «International Electrotechnical Commission,» 26 Ιούλιος 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.iec.ch/taxonomy/term/353>.

- [24] Noh, Tae-Won and Ahn, Jung-Hoon and Lee, Byoung Kuk, «Cranking Capability Estimation Algorithm Based on Modeling and Online Update of Model Parameters for Li-Ion SLI Batteries,» σε *Energies, Volume 12*, 2019.
- [25] Mingyang Li, Jiakuan Yang, Sha Liang, Huijie Hou, Jingping Hu, Bingchuan Liu, R.Vasant Kumar, «Review on clean recovery of discarded/spent lead-acid battery and trends of recycled products,» σε *Journal of Power Sources, Volume 436*, 2019.
- [26] Cheng Wang, Chengyang Yu, Weiwei Guo, Zhenpo Wang, Jiyuan Tan, «Identification of Typical Sub-Health State of Traction Battery Based on a Data-Driven Approach,» σε *Batteries, Volume 8*, 2022.
- [27] A. Kuperman, U. Levy, J. Goren, A. Zafransky and A. Savernin, «Battery Charger for Electric Vehicle Traction Battery Switch Station,» σε *Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 12*, IEEE, 2013, pp. 5391-5399.
- [28] Supriya Wadekar, «Motors and Batteries for Electric Vehicle: A Review,» σε *International Journal of Research Publication and Reviews Vol (2 ) Issue (8)*, Ichalkarnji, Maharashtra, India, 2020, pp. 235-239.
- [29] Abraham Alem Kebede, Thierry Coosemans, Maarten Messagie, Towfik Jemal, Henok Ayele Behabtu, Joeri Van Mierlo, Maitane Berecibar, «Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application,» σε *Journal of Energy Storage, Volume 40*, 2021.
- [30] Tiefeng Liu, Yaping Zhang, Zhanguo Jiang, Xianqing Zeng, Jiapeng Ji, Zeheng Li, Xuehui Gao, Minghao Sun, Zhan Lin, Min Ling, Junchao Zheng, Chengdu Liang, «Exploring competitive features of stationary sodium ion batteries for electrochemical energy storage,» σε *Energy & Environmental Science, Volume 12*, The Royal Society of Chemistry, 2019, pp. 1512-1533.
- [31] Chang, Choong-koo, «Factors Affecting Capacity Design of Lithium-Ion Stationary Batteries,» σε *Batteries, Volume 3, Issue 3*, 2019.
- [32] Yemeserach Mekonnen, Haneen Aburba, Arif Sarwat, «Life cycle prediction of Sealed Lead Acid batteries based on a Weibull model,» σε *Journal of Energy Storage, Volume 18*, 2018, pp. 467-475.
- [33] M. A. Kashem, A. Fattah, S. M. S. Farhan and N. Nafis, «Fast Formation of Tubular Plate Deep Cycle Lead Acid Battery by Acid Recirculation System (ACS),» σε *International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*, IEEE, 2019, pp. 1-6.
- [34] Arun S, Mithin Kumar S, K Uday Venkat Kiran, Sundar Mayavan, «Effects of carbon surface area and morphology on performance of stationary lead acid battery,» σε *Journal of Energy Storage, Volume 32*, 2020.

- [35] Petrovic Slobodan, «Nickel–Cadmium Batteries. In: Battery Technology Crash Course,» σε *Nickel–Cadmium Batteries*, Springer International Publishing, 2021, pp. 73-88.
- [36] Dipali Rahangdale, Anupama Kumar, «Acrylamide grafted chitosan based ion imprinted polymer for the recovery of cadmium from nickel-cadmium battery waste,» σε *Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 6, Issue 2*, 2018, pp. 1828-1839.
- [37] Fupeng Liu, Chao Peng, Antti Porvali, Zulin Wang, Benjamin P. Wilson, Mari Lundström, «Synergistic Recovery of Valuable Metals from Spent Nickel–Metal Hydride Batteries and Lithium-Ion Batteries,» σε *ACS Sustainable Chemistry & Engineering, Volume 7, Issue 19*, American Chemical Society, 2019, pp. 16103-16111.
- [38] Silvia J.R. Vargas, Nicolas Schaeffer, Jamille C. Souza, Luis H.M. da Silva, Maria C. Hespanhol, «Green separation of lanthanum, cerium and nickel from waste nickel metal hydride battery,» σε *Waste Management, Volume 125*, 2021, pp. 154-162.
- [39] Arumugam Manthiram, «A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry,» σε *Nature Communications, Volume 11, Issue 1*, 2020, p. 1150.
- [40] Dawei Yu, Zhu Huang, Brian Makuza, Xueyi Guo, Qinghua Tian, «Pretreatment options for the recycling of spent lithium-ion batteries: A comprehensive review,» σε *Minerals Engineering, Volume 173*, 2021.
- [41] Shuting Yang, Chen Ling, Yuqian Fan, «A Review of Lithium-Ion Battery Thermal Management System,» σε *International Journal of Electrochemical Science*, 2019, pp. 6077-6107.
- [42] Weidong Chen, Jun Liang, Zhaohua Yang, Gen Li, «A Review of Lithium-Ion Battery for Electric Vehicle Applications and Beyond,» σε *Energy Procedia, Volume 158*, 2019, pp. 4363-4368.
- [43] Chunlian Wang, Yongchao Yu, Jiajia Niu, Yaxuan Liu, Denzel Bridges, Xianqiang Liu, Joshi Pooran, Yuefei Zhang, Anming Hu, «Recent Progress of Metal–Air Batteries—A Mini Review,» σε *Applied Sciences, Volume 9, Issue 14*, 2019.
- [44] Hao-Fan Wang, Qiang Xu, «Materials Design for Rechargeable Metal-Air Batteries,» σε *Matter, Volume 1, Issue 3*, 2019, pp. 565-595.
- [45] Lixia Yang, Yuntao Wu, Shuo Chen, Yuanqiang Xiao, Sen Chen, Penghua Zheng, Junxia Wang, Jun-E. Qu, «A promising hybrid additive for enhancing the performance of alkaline aluminum-air batteries,» σε *Materials Chemistry and Physics, Volume 257*, 2021.
- [46] Yisi Liu, Qian Sun, Wenzhang Li, Keegan R. Adair, Jie Li, Xueliang Sun, «A comprehensive review on recent progress in aluminum–air batteries,» σε *Green Energy & Environment, Volume 2, Issue 3*, 2017, pp. 246-277.
- [47] Md. Arafat Rahman, Xiaojian Wang, Cuie Wen, «High Energy Density Metal-Air Batteries: A Review,» σε *Journal of The Electrochemical Society, Volume 160, Number 10*, 2013.

- [48] «Phinergy,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://phinergy.com/technology/>.
- [49] G. Girishkumar, B. McCloskey, A. C. Luntz, S. Swanson, W. Wilcke, «Lithium–Air Battery: Promise and Challenges,» σε *The Journal of Physical Chemistry Letters*, Volume 1, Issue 14, American Chemical Society, 2010, pp. 2193-2203.
- [50] P. Goel, D. Dobhal, R.C. Sharma, «Aluminum–air batteries: A viability review,» σε *Journal of Energy Storage*, Volume 28, 2020.
- [51] Xiaoqing Chen, Imdad Ali, Lijian Song, Peng Song, Youchen Zhang, Semeniuk Maria, Saadat Nazmus, Weimin Yang, Hom Nath Dhakal, Haoyi Li, Mohini Sain, Seeram Ramakrishna, «A review on recent advancement of nano-structured-fiber-based metal-air batteries and future perspective,» σε *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 134, 2020.
- [52] Jingyuan Qiao, Lingqiao Kong, Shaokang Xu, Kaixian Lin, Wei He, Meng Ni, Qiushi Ruan, Peigen Zhang, Ying Liu, Wei Zhang, Long Pan, ZhengMing Sun, «Research progress of MXene-based catalysts for electrochemical water-splitting and metal-air batteries,» σε *Energy Storage Materials*, Volume 43, 2021, pp. 509-530.
- [53] Byeong Jin Jeong, Yong Nam Jo, «A Study on the Self-Discharge Behavior of Zinc-Air Batteries with CuO Additives,» σε *Applied Sciences*, Volume 11, Issue 24, 2021.
- [54] «U.S. Energy Information Administrator,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=46756>.
- [55] Olabi AG, Sayed ET, Wilberforce T, Jamal A, Alami AH, Elsaid K, Rahman SMA, Shah SK, Abdelkareem MA, «Metal-Air Batteries—A Review,» σε *Energies*, Volume 14, Issue 21, 2021.
- [56] Yawen Li, Yichun Wang, Songmao Zhang, Long Miao, Manhui Wei, Keliang Wang, «Corrosion inhibition of aromatic acids on Al-7075 anode for Al-air batteries with alkaline electrolyte,» σε *Journal of Power Sources*, Volume 523, 2022.
- [57] Xiaohui Li, Jin Li, Daquan Zhang, Lixin Gao, Jiahao Qu, Tong Lin, «Synergistic effect of 8-aminoquinoline and ZnO as hybrid additives in alkaline electrolyte for Al-air battery,» σε *Journal of Molecular Liquids*, Volume 322, 2021.
- [58] Soraya Hosseini, Ting-Hao Xu, Salman Masoudi Soltani, Ta-En Ko, Yu-Jui Lin, Yuan-Yao Li, «The efficient acetoxy-group-based additives in protecting of anode in the rechargeable aluminium-air batteries,» σε *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 47, Issue 1, 2022, pp. 501-516.
- [59] Junyu Yang, Daquan Zhang, Tong Lin, Wenyue Zhang, Chunping Li, Lixin Gao, «Effect of quinoline-8-sulfonic acid and CaO as hybrid electrolyte additives on microstructure and property of AA5052 alloy anode for aluminum-air battery,» σε *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Volume 131, 2022.

- [60] Soraya Hosseini, Zhe-Yu Liu, Chen-Tzu Chuan, Salman M. Soltani, V. Venkata Krishna Lanjapalli, Yuan-Yao Li, «The role of SO-group-based additives in improving the rechargeable aluminium-air batteries,» σε *Electrochimica Acta*, Volume 375, 2021.
- [61] Z. Pei, Z. Yuan, C. Wang, S. Zhao, J. Fei, L. Wei, J. Chen, C. Wang, R. Qi, Z. Liu, Y. Chen, «A Flexible Rechargeable Zinc–Air Battery with Excellent Low-Temperature Adaptability,» σε *Angewandte Chemie International Edition*, Volume 59, Issue 12, 2020, pp. 4793-4799.
- [62] Yanguang Li, Jun Lu, «Metal–Air Batteries: Will They Be the Future Electrochemical Energy Storage Device of Choice?,» σε *ACS Energy Letters*, 2017, pp. 1370-1377.
- [63] Upasana Bhardwaj, Aditi Sharma, Vinay Gupta, Khalid Mujasam Batoo, Sajjad Hussain, H. S. Kushwaha, «High energy storage capabilities of CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> for paper-based zinc–air battery,» σε *Scientific Reports*, Volume 12, Issue 1, 2022.
- [64] Marina Bockelmann, Ulrich Kunz, Thomas Turek, «Electrically rechargeable zinc-oxygen flow battery with high power density,» σε *Electrochemistry Communications*, Volume 69, 2016, pp. 24-27.
- [65] Chi-Young Jung, Tae-Hyun Kim, Wha-Jung Kim, Sung-Chul Yi, «Computational analysis of the zinc utilization in the primary zinc-air batteries,» σε *Energy*, Volume 102, 2016, pp. 694-704.
- [66] Boyeong Hwang, Eun-Suok Oh, Ketack Kim, «Observation of electrochemical reactions at Zn electrodes in Zn-air secondary batteries,» σε *Electrochimica Acta*, Volume 216, 2016, pp. 484-489.
- [67] Keliang Wang, Pucheng Pei, Yayu Zuo, Manhui Wei, Hengwei Wang, Pengfei Zhang, Zhuo Chen, Nuo Shang, «Magnetic zinc-air batteries for storing wind and solar energy,» σε *iScience*, Volume 25, Issue 2, 2022.
- [68] «National Center of Biotechnology Information,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28601597/>.
- [69] Bingbing Tian, Jolanta Światowska, Vincent Maurice, Sandrine Zanna, Antoine Seyeux, Philippe Marcus, «The effect of Na<sub>2</sub>S additive in alkaline electrolyte on improved performances of Fe-based air batteries,» σε *Electrochimica Acta*, Volume 259, 2018, pp. 196-203.
- [70] U.R. Farooqui, A.L. Ahmad, N.A. Hamid, «Challenges and potential advantages of membranes in lithium air batteries: A review,» σε *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 77, 2017, pp. 1114-1129.
- [71] Wen-Bin Luo, Xuan-Wen Gao, Shu-Lei Chou, Yong-Mook Kang, Jia-Zhao Wang, Hua-Kun Liu, Shi-Xue Dou, «Investigation of Promising Air Electrode for Realizing Ultimate Lithium Oxygen Battery,» σε *Advanced Energy Materials*, Volume 7, Issue 24, 2017.

- [72] Xingbao Zhu, Yingzhang Yan, Weihua Wan, Yu Wang, Yuanguo Wu, Xianglei He, Zhe Lü, «Yeast-derived active carbon as sustainable high-performance electrodes for lithium–oxygen batteries,» σε *Materials Letters, Volume 215*, 2018, pp. 71-74.
- [73] Fanglei Tong, Shanghai Wei, Xize Chen, Wei Gao, «Magnesium alloys as anodes for neutral aqueous magnesium-air batteries,» σε *Journal of Magnesium and Alloys, Volume 9, Issue 6*, 2021, pp. 1861-1883.
- [74] Chun-Sheng Li, Yan Sun, Florian Gebert, Shu-Lei Chou, «Current Progress on Rechargeable Magnesium–Air Battery,» σε *Advanced Energy Materials, Volume 7, Issue 24*, 2017.
- [75] Luhe Li, Hao Chen, Er He, Dr. Lie Wang, Tingting Ye, Jiang Lu, Yiding Jiao, Jiacheng Wang, Rui Gao, Prof. Huisheng Peng, Prof. Ye Zhang, «High-Energy-Density Magnesium-Air Battery Based on Dual-Layer Gel Electrolyte,» σε *Angewandte Chemie International Edition, Volume 60, Issue 28*, 2021, pp. 15317-15322.
- [76] Quan Li, Wei Xiong, Menghua Yu, Jing Li, Lin Liu, Guang Zhu, Liyuan Wang, Jun Wang, Sirong Yu, Enyang Liu, «Effect of Ce content on performance of AZ31 magnesium alloy anode in air battery,» σε *Journal of Alloys and Compounds, Volume 891*, 2022.
- [77] Ziyaaddin Khan, Mikhail Vagin, Xavier Crispin, «Can Hybrid Na–Air Batteries Outperform Nonaqueous Na–O<sub>2</sub> Batteries?,» σε *Advanced Science, Volume 7, Issue 5*, 2020.
- [78] Henning Weinrich, Markus Gehring, Hermann Tempel, Hans Kungl, Rüdiger-A. Eichel, «Electrode thickness-dependent formation of porous iron electrodes for secondary alkaline iron-air batteries,» σε *Electrochimica Acta, Volume 314*, 2019, pp. 61-71.
- [79] Y. Kang, S. Wang, K.S. Hui, H.-F. Li, F. Liang, X.-L. Wu, Q. Zhang, W. Zhou, L. Chen, F. Chen, K.N. Hui, «[Fe(CN)<sub>6</sub>] vacancy-boosting oxygen evolution activity of Co-based Prussian blue analogues for hybrid sodium-air battery,» σε *Materials Today Energy, Volume 20*, 2021.
- [80] Feng Liang, Xuechao Qiu, Qingkai Zhang, Yao Kang, Alicia Koo, Katsuro Hayashi, Kunfeng Chen, Dongfeng Xue, Kwun Nam Hui, Hossein Yadegari, Xueliang Sun, «A liquid anode for rechargeable sodium-air batteries with low voltage gap and high safety,» σε *Nano Energy, Volume 49*, 2018, pp. 574-579.
- [81] Chang, S., Hou, M., Xu, B., Liang, F., Qiu, X., Yao, Y., Qu, T., Ma, W., Yang, B., Dai, Y., Chen, K., Xue, D., Zhao, H., Lin, X., Poon, F., Lei, Y., Sun, X., «High-Performance Quasi-Solid-State Na-Air Battery via Gel Cathode by Confining Moisture,» σε *Advanced Functional Materials, Volume 31, Issue 22*, 2021.
- [82] Xiaolong Xu, Kwan San Hui, Duc Anh Dinh, Kwun Nam Hui, Hao Wang, «Recent advances in hybrid sodium–air batteries,» σε *Materials Horizons, Volume 6, Issue 7*, The Royal Society of Chemistry, 2019, pp. 1306-1335.

- [83] Yuqi Wu, Xuechao Qiu, Feng Liang, Qingkai Zhang, Alicia Koo, Yongnian Dai, Yong Lei, Xueliang Sun, «A metal-organic framework-derived bifunctional catalyst for hybrid sodium-air batteries,» σε *Applied Catalysis B: Environmental, Volume 241*, 2019, pp. 407-414.
- [84] L. Wei, M.C. Wu, T.S. Zhao, Y.K. Zeng, Y.X. Ren, «An aqueous alkaline battery consisting of inexpensive all-iron redox chemistries for large-scale energy storage,» σε *Applied Energy, Volume 215*, 2018, pp. 98-105.
- [85] Danshuo Chen, Yajing Li, Xiaochen Zhang, Sujuan Hu, Yingjian Yu, «Investigation of the discharging behaviors of different doped silicon nanowires in alkaline Si-air batteries,» σε *Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Volume 112*, 2022, pp. 271-278.
- [86] Yasin Emre Durmus, Saúl Said Montiel Guerrero, Özgür Aslanbas, Hermann Tempel, Florian Hausen, L.G.J. de Haart, Yair Ein-Eli, Rüdiger-A. Eichel, Hans Kungl, «Investigation of the corrosion behavior of highly As-doped crystalline Si in alkaline Si-air batteries,» σε *Electrochimica Acta, Volume 265*, 2018, pp. 292-302.
- [87] «World Atlas,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: worldatlas.com.
- [88] Shaohua Yang, Harold Knickle, «Design and analysis of aluminum/air battery system for electric vehicles,» σε *Journal of Power Sources, Volume 112, Issue 1*, 2002, pp. 162-173.
- [89] «Daily Metal Price,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: dailymetalprice.com.
- [90] Shuyun Wang, Shengmei Chen, Longtao Ma, Juan Antonio Zapien, «Recent progress in cobalt-based carbon materials as oxygen electrocatalysts for zinc-air battery applications,» σε *Materials Today Energy, Volume 20*, 2021.
- [91] Fanglei Tong, Xize Chen, Shanghai Wei, Jenny Malmström, Joseph Vella, Wei Gao, «Microstructure and battery performance of Mg-Zn-Sn alloys as anodes for magnesium-air battery,» σε *Journal of Magnesium and Alloys, Volume 9, Issue 6*, 2021, pp. 1967-1976.
- [92] N. Chawla, «Recent advances in air-battery chemistries,» σε *Materials Today Chemistry, Volume 12*, 2019, pp. 324-331.
- [93] Jingling Ma, Conghui Qin, Yaqiong Li, Fengzhang Ren, Yong Liu, Guangxin Wang, «Properties of reduced graphene oxide for Mg-air battery,» σε *Journal of Power Sources, Volume 430*, 2019, pp. 244-251.
- [94] Aswin K. Manohar, Souradip Malkhandi, Bo Yang, Chenguang Yang, G. K. Surya Prakash, S. R. Narayanan, «A High-Performance Rechargeable Iron Electrode for Large-Scale Battery-Based Energy Storage,» σε *Journal of The Electrochemical Society, Volume 159, Issue 8*, The Electrochemical Society, 2012.
- [95] Yingjian Yu, Shaoshuai Gao, Sujuan Hu, «Si modified by Zn and Fe as anodes in Si-air batteries with ameliorative properties,» σε *Journal of Alloys and Compounds, Volume 883*, 2021.

- [96] Weinrich H, Durmus YE, Tempel H, Kungl H, Eichel R-A, «Silicon and Iron as Resource-Efficient Anode Materials for Ambient-Temperature Metal-Air Batteries: A Review.,» σε *Materials*, Volume 12, Issue 13, 2019.
- [97] Emanuel Peled, Diana Golodnitsky, Roni Hadar, Hadar Mazor, Meital Goor, Larisa Burstein, «Challenges and obstacles in the development of sodium–air batteries,» σε *Journal of Power Sources*, Volume 244, 2013, pp. 771-776.
- [98] Xiaorui Liu, Yifei Yuan, Jie Liu, Bin Liu, Xu Chen, Jia Ding, Xiaopeng Han, Yida Deng, Cheng Zhong & Wenbin Hu, «Utilizing solar energy to improve the oxygen evolution reaction kinetics in zinc–air battery,» σε *Nature Communications*, Volume 10, Issue 1, 2019.
- [99] Pucheng Pei, Ze Ma, Keliang Wang, Xizhong Wang, Mancun Song, Huachi Xu, «High performance zinc air fuel cell stack,» σε *Journal of Power Sources*, Volume 249, 2014, pp. 13-20.
- [100] P.S. Arunkumar, T. Maiyalagan, Soorathep Kheawhom, Shun Mao, Zhongqing Jiang, «Effect of carbon material additives on hydrogen evolution at rechargeable alkaline iron battery electrodes,» σε *Materials Science for Energy Technologies*, Volume 4, 2021, pp. 236-241.
- [101] Bui Thi Hang, Doan Ha Thang, Eiji Kobayashi, «Fe/carbon nanofiber composite materials for Fe–air battery anodes,» σε *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Volume 704, 2013, pp. 145-152.
- [102] Stefano Trocino, Massimiliano Lo Faro, Sabrina Campagna Zignani, Vincenzo Antonucci, Antonino Salvatore Aricò, «High performance solid-state iron-air rechargeable ceramic battery operating at intermediate temperatures (500–650 °C),» σε *Applied Energy*, Volumes 233–234, 2019, pp. 386-394.
- [103] Gil Cohn, Yair Ein-Eli, «Study and development of non-aqueous silicon-air battery,» σε *Journal of Power Sources*, Volume 195, Issue 15, 2010, pp. 4963-4970.
- [104] Yingjian Yu, Sujuan Hu, Jian Huang, «Germanium-modified silicon as anodes in Si–Ge air batteries with enhanced properties,» σε *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Volume 157, 2021.
- [105] Miao Y, Hynan P, von Jouanne A, Yokochi A., «Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements,» σε *Energies*, Volume 12, Issue 6, 2019.
- [106] A. El Kharbachi, O. Zavorotynska, M. Latroche, F. Cuevas, V. Yartys, M. Fichtner, «Exploits, advances and challenges benefiting beyond Li-ion battery technologies,» σε *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 817, 2020.
- [107] Kong L, Li C, Jiang J, Pecht MG., «Li-Ion Battery Fire Hazards and Safety Strategies,» σε *Energies*, Volume 11, Issue 9, 2018.



- [108] Pius Victor Chombo, Yossapong Laoonual, «A review of safety strategies of a Li-ion battery,» σε *Journal of Power Sources*, Volume 478, 2020.
- [109] Xing Zhong, Hua Zhang, Yuan Liu, Dr. Jingwei Bai, Dr. Lei Liao, Prof. Yu Huang, Prof. Xiangfeng Duan, «High-Capacity Silicon–Air Battery in Alkaline Solution,» σε *ChemSusChem*, Volume 5, Issue 1, 2012, pp. 177-180.
- [110] Yifei Wang, Wending Pan, Holly Kwok, Xu Lu, Dennis Y.C. Leung, «Low-cost Al-air batteries with paper-based solid electrolyte,» σε *Energy Procedia*, Volume 158, 2019, pp. 522-527.
- [111] Siyuan Zhao, Tong Liu, Jian Wang, Idris Temitope Bello, Yayu Zuo, Manhui Wei, Keliang Wang, Kenneth K.S. Lau, Meng Ni, «Anti-CO<sub>2</sub> strategies for extending Zinc-Air Batteries' Lifetime: A review,» σε *Chemical Engineering Journal*, Volume 450, Part 2, 2022.
- [112] Xingrui Chen, Qi Zou, Qichi Le, Jian Hou, Ruizhen Guo, Henan Wang, Chenglu Hu, Lei Bao, Tong Wang, Dazhi Zhao, Fuxiao Yu, Andrej Atrens, «The quasicrystal of Mg–Zn–Y on discharge and electrochemical behaviors as the anode for Mg-air battery,» σε *Journal of Power Sources*, Volume 451, 2020.
- [113] Yongxin Zhu, Xiaohui Li, Daquan Zhang, Lixin Gao, «Improvement of electrochemical performance with amphoteric surfactants for Al anode of Al-air battery in alkaline system,» σε *Journal of Power Sources*, Volume 515, 2021.
- [114] Natasha Ronith Levy, Polina Tereshchuk, Amir Natan, Ronja Haas, Daniel Schröder, Jürgen Janek, Peter Jakes, Rüdiger A. Eichel, Yair Ein-Eli, «Hybridization of carbon nanotube tissue and MnO<sub>2</sub> as a generic advanced air cathode in metal–air batteries,» σε *Journal of Power Sources*, Volume 514, 2021.
- [115] Jang-Soo Lee, Sun Tai Kim, Ruiguo Cao, Nam-Soon Choi, Meilin Liu, Kyu Tae Lee, Jaephil Cho, «Metal–Air Batteries with High Energy Density: Li–Air versus Zn–Air,» σε *Advanced Energy Materials*, Volume 1, Issue 1, 2011, pp. 34-50.
- [116] Hao Gong, Hairong Xue, Bin Gao, Yang Li, Xiaoli Fan, Songtao Zhang, Tao Wang, Jianping He, «Introduction of photo electrochemical water-oxidation mechanism into hybrid lithium–oxygen batteries,» σε *Energy Storage Materials*, Volume 31, 2020, pp. 11-19.
- [117] Alexander Kraysberg, Yair Ein-Eli, «The impact of nano-scaled materials on advanced metal–air battery systems,» σε *Nano Energy*, Volume 2, Issue 4, 2013, pp. 468-480.
- [118] Jingyi Zhu, Tao Qu, Fengmei Su, Yuqi Wu, Yao Kang, Kunfeng Chen, Yaochun Yao, Wenhui Ma, Bing Yang, Yongnian Dai, Feng Liang, Dongfeng Xue, «Highly dispersed Co nanoparticles decorated on a N-doped defective carbon nano-framework for a hybrid Na–air battery,» σε *Dalton Transactions*, Volume 49, Issue 6, The Royal Society of Chemistry, 2020, pp. 1811-1821.

- [119] Myeongjin Kim, Hyun Ju, Jooheon Kim, «Single crystalline Bi<sub>2</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>7</sub> pyrochlore oxide nanoparticles as efficient bifunctional oxygen electrocatalyst for hybrid Na-air batteries,» σε *Chemical Engineering Journal*, Volume 358, 2019, pp. 11-19.
- [120] H. A. Figueredo-Rodríguez, R. D. McKerracher, M. Insausti, A. Garcia Luis, C. Ponce de León, C. Alegre, V. Baglio, A. S. Aricò, F. C. Walsh, «A Rechargeable, Aqueous Iron Air Battery with Nanostructured Electrodes Capable of High Energy Density Operation,» σε *Journal of The Electrochemical Society*, Volume 164, Issue 6, The Electrochemical Society, 2017.
- [121] Xuan Zhao, Yunhui Gong, Xue Li, Nansheng Xu, Kevin Huang, «Performance of Solid Oxide Iron-Air Battery Operated at 550°C,» σε *Journal of The Electrochemical Society*, Volume 160, Issue 8, The Electrochemical Society, 2013.
- [122] Durmus Yasin Emre, «Investigation and Development of a Resource Efficient Metal-air Battery-Silicon-air,» 2018.
- [123] «Shanghai Metals Market,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://price.metal.com/>.
- [124] Tadashi Takeya, Akiyoshi Nakata, Hajime Arai, Zempachi Ogumi, «Enhanced zinc electrode rechargeability in alkaline electrolytes containing hydrophilic organic materials with positive electrode compatibility,» σε *Journal of Power Sources*, Volume 407, 2018, pp. 180-184.
- [125] Jeong BJ, Jo Yong N., «A Study on the Self-Discharge Behavior of Zinc-Air Batteries with CuO Additives,» σε *Applied Sciences*, Volume 11, Issue 24.
- [126] Shanmugam Ramakrishnan, Dhinesh Babu Velusamy, Sivaprakash Sengodan, Goli Nagaraju, Do Hwan Kim, Ae Rhan Kim, Dong Jin Yoo, «Rational design of multifunctional electrocatalyst: An approach towards efficient overall water splitting and rechargeable flexible solid-state zinc-air battery,» σε *Applied Catalysis B: Environmental*, Volume 300, 2022.
- [127] Tatiana Santos Andrade, Marcio Cesar Pereira, Panagiotis Lianos, «High voltage gain in photo-assisted charging of a metal-air battery,» σε *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Volume 878, 2020.
- [128] Ali Abbasi, Soraya Hosseini, Anongnat Somwangthanaroj, Rongrong Cheacharoen, Sorin Olaru & Soorathep Kheawhom, «Discharge profile of a zinc-air flow battery at various electrolyte flow rates and discharge currents,» σε *Scientific Data*, Volume 7, Issue 1, 2020.
- [129] Shuai Ma, Modi Jiang, Peng Tao, Chengyi Song, Jianbo Wu, Jun Wang, Tao Deng, Wen Shang, «Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review,» σε *Progress in Natural Science: Materials International*, Volume 28, Issue 6, 2018, pp. 653-666.
- [130] Yue Yang, Lei Chen, Lijun Yang, Xiaoze Du, «Numerical study of combined air and phase change cooling for lithium-ion battery during dynamic cycles,» σε *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 165, 2021.

- [131] Thomas Le Varlet, Oliver Schmidt, Ajay Gambhir, Sheridan Few, Iain Staffell, «Comparative life cycle assessment of lithium-ion battery chemistries for residential storage,» σε *Journal of Energy Storage*, Volume 28, 2020.
- [132] Diao W, Kulkarni C, Pecht M., «Development of an Informative Lithium-Ion Battery Datasheet,» σε *Energies*, Volume 14, Issue 17, 2021.
- [133] Gil Cohn, David Starosvetsky, Rika Hagiwara, Digby D. Macdonald, Yair Ein-Eli, «Silicon–air batteries,» σε *Electrochemistry Communications*, Volume 11, Issue 10, 2009, pp. 1916-1918.
- [134] «International Energy Agency,» 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-electricity-generation-increase-by-technology-country-and-region-2020-2021>.

## Παράρτημα 1: Πίνακες παραμέτρων των Συσσωρευτών Μετάλλου αέρα.

Συσσωρευτές	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal) (Wh/kg)	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal + Oxygen) (Wh/kg)	Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)	Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	Κύκλοι ζωής	Βαθμός απόδοσης (Round-trip) (%)	Βάθος εκφόρτισης (%)	Ειδική Χωρητικότητα (Ah/kg)
<b>Al air</b> <b>(Πρωτογενείς/Δευτερογενείς)</b>	8100,00	5779	21837	300	<10	70%	80%	1030
	8140,00	2796	21994	500	<4	92%	100%	239
	8100,00	3311	10347	2300	<4	83%		767,5
	8130,00	3947		1430	4	55%		900,8
	8100,00			1230	11			300
	8100,00			2043	<4			500
	8100,00			3222	Limited			121
	8461			4068				2541,4
	8100,00			3014				1399
	6258			1906,6				2174
				2210,6				2703
				2365,1				2817
				2043				1582,3
				2810				1831,5
				3602				1984,1
				300				1399
				500				1905
								2439
							2604	
							1357,47	
							260-2777	
							658	

Πίνακας 3.1: Ενεργειακές Παράμετροι Συσσωρευτών Αλουμινίου Αέρα

Συσσωρευτές	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal) (Wh/kg)	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal + Oxygen) (Wh/kg)	Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)	Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	Κύκλοι ζωής	Βαθμός απόδοσης (Round-trip) (%)	Βάθος εκφόρτισης (%)	Ειδική Χωρητικότητα (Ah/kg)
<b>Zn air</b> <b>(Δευτερογενείς)</b>	1300,00	915	9653	500	600	54,00%	80,00%	400
	1350	1084	6136	400	150	64,60%	97,00%	745
	1300	1085		350	600	75,00%	98,60%	829,7
	1353	1086		500	400	63,00%	77,00%	775
	1350	1084		700	100	60,52%	81,00%	542
	1352	1086		300	75	65%		471,0
	1218			350	75			522
	1350			500,00	1000			451
					120			658,0
					500			428,8
					900			800
					408			745
					1000			515
								768,6
								630
								751
							598	
							500	

Πίνακας 3.2: Ενεργειακές Παράμετροι Συσσωρευτών Ψευδαργύρου Αέρα

Συσσωρευτές	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal) (Wh/kg)	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal + Oxygen) (Wh/kg)	Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)	Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	Κύκλοι ζωής	Βαθμός απόδοσης (Round-trip) (%)	Βάθος εκφόρτισης (%)	Ειδική Χωρητικότητα (Ah/kg)
<b>Li air (Δευτερογενείς)</b>	12000	5200	7988	330	70	81%	100%	2120
	13000	3550	7989	1350	180	78%		600
	11430	5220		2792	140	95%		1793,9
	11430	3600		500	15	78%		1500
	11246	3600		1000	200	75%		6000
	11430	5928		1700,00	100	68-94%		3842
	13000	3458			250			
	13000	3458			500			
	11238	3458						
		5220						
		2784						
	8091							

Πίνακας 3.3: Ενεργειακές Παράμετροι Συσσωρευτών Λιθίου Αέρα

Συσσωρευτές	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal) (Wh/kg)	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal + Oxygen) (Wh/kg)	Θεωρητική Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)	Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	Κύκλοι ζωής	Βαθμός απόδοσης (Round-trip) (%)	Βάθος εκφόρτισης (%)	Ειδική Χωρητικότητα (Ah/kg)
<b>Mg air (Πρωτογενείς/ Δευτερογενείς)</b>	6493	3910	14108	1620	10	90,0%	100%	737
	6800	3919	14000	2750	4		100%	2131
	6800	3900	9619	565	5000			2910
	6815	2840		2282	4			1009
	6493	3919		1367	10			1167
	6098	2848		1060,86				1282,051
				1552,37				1376
				2750				237
								2131

Πίνακας 3.4: Ενεργειακές Παράμετροι Συσσωρευτών Μαγνησίου Αέρα

Συσσωρευτές	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal) (Wh/kg)	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal + Oxygen) (Wh/kg)	Θεωρητική Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)	Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	Κύκλοι ζωής	Βαθμός απόδοσης (Round-trip) (%)	Βάθος εκφόρτισης (%)	Ειδική Χωρητικότητα (Ah/kg)
<b>Na air (Δευτερογενείς)</b>	2716	1601	4409	4418	20	90%	100%	2856
	2260	1683	2466	1600,6	500	90%	100%	896
	2090	1980		1600	125	95%		592,8
	2271			1600	25	86%		838
					100	94%		838
					50	95%		
					1000	95%		
					80	83%		
					40			
				20				

Πίνακας 3.5: Ενεργειακές Παράμετροι Συσσωρευτών Νατρίου Αέρα

Συσσωρευτές	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal) (Wh/kg)	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal + Oxygen) (Wh/kg)	Θεωρητική Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)	Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	Κύκλοι ζωής	Βαθμός απόδοσης (Round-trip) (%)	Βάθος εκφόρτισης (%)	Ειδική Χωρητικότητα (Ah/kg)
<b>Fe air</b> <b>(Δευτερογενείς)</b>	1200	763	9677	453	22	69%	100%	350
	1229	764	3244	453	3500	71%	100%	192
	1120	764		458	40	83%	100%	550
	1229			453	200	35%		23
	1229			1237	200	54%		23,7
				25	200	70%		120,3
				50	25	96%		300
				50	100	82%		508
				453	20	76%		854
				75,00	30	96%		300
				75,00	10			1500
					150			20,8
				3500			786	

Πίνακας 3.6: Ενεργειακές Παράμετροι Συσσωρευτών Σιδήρου Αέρα

Συσσωρευτές	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal) (Wh/kg)	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal + Oxygen) (Wh/kg)	Θεωρητική Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)	Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	Κύκλοι ζωής	Βαθμός απόδοσης (Round-trip) (%)	Βάθος εκφόρτισης (%)	Ειδική Χωρητικότητα (Ah/kg)
<b>Si air</b> <b>(Πρωτογενείς)</b>	8470	3947	19748	140		45%	100%	192,3
	8470	3947	19748	1660,55				120
	8461	2334	19748	1600				1206
	8461							214,7
	8470							154,8
	8470							
	8470							
	8461							
	8461							
8001								

Πίνακας 3.7: Ενεργειακές Παράμετροι Συσσωρευτών Σιλίκονης Αέρα

Συσσωρευτές	Αξία Υλικού (\$/kg)	Διαθεσιμότητα Υλικού (ppm)	Συνολικό κόστος (\$/kWh)
<b>Al air</b>	Χαμηλή	Καλή αφθονία	Χαμηλό
	Χαμηλή	Υψηλή	30
	Μικρό κόστος	Υψηλή	29
	Προσιτή	83000 ppm	Χαμηλό
	Αποτελεσματική	83000,00	Χαμηλό
	1,75		Φθηνό
	1,9		Προσιτό
	1,81		Αποτελεσματικό
	1,75		

Πίνακας 3.8: Οικονομικές Παράμετροι Συσσωρευτών Αλουμινίου Αέρα

Συσσωρευτές	Αξία Υλικού (\$/kg)	Διαθεσιμότητα Υλικού (ppm)	Συνολικό κόστος (\$/kWh)
<b>Zn air</b>	1,85	Καλή	Χαμηλό
	2,5	Άφθονη	Χαμηλό
	2,44	Καλή	Χαμηλό
		Άφθονη	10
		Άφθονη	Χαμηλό
		70ppm (στον φλοιό της Γης), <0,2%	
		Άφθονη	
		Αφθονία του Zn στον φλοιό της Γης	
		70,00	

Πίνακας 3.9: Οικονομικές Παράμετροι Συσσωρευτών Ψευδαργύρου Αέρα

Συσσωρευτές	Αξία Υλικού (\$/kg)	Διαθεσιμότητα Υλικού (ppm)	Συνολικό κόστος (\$/kWh)
<b>Li air</b>	160	Περιορισμένη	Χαμηλό
	80	Περιορισμένη	105
	25	Χαμηλή	300
	68	0,0065% του φλοιού της Γης	Υψηλό
	180	Χαμηλή φυσική αφθονία (18 ppm)	500
	68	18,00	
	70		
	25		

Πίνακας 3.10: Οικονομικές Παράμετροι Συσσωρευτών Λιθίου Αέρα

Συσσωρευτές	Αξία Υλικού (\$/kg)	Διαθεσιμότητα Υλικού (ppm)	Συνολικό κόστος (\$/kWh)
<b>Mg air</b>	2,5	Άφθονο (2,08% στον φλοιό της Γης)	Χαμηλό κόστος
	2,476	27640 ppm	40
	2,01	Άφθονο	
	2,75	27640,00	
		23300,00	

Πίνακας 3.11: Οικονομικές Παράμετροι Συσσωρευτών Μαγνησίου Αέρα



Συσσωρευτές	Αξία Υλικού (\$/kg)	Διαθεσιμότητα Υλικού (ppm)	Συνολικό κόστος (\$/kWh)
<b>Na air</b>	1,7	Ο φλοιός της Γης περιέχει 2.6% Na	Χαμηλό
	Εξαιρετικά φθηνή	6ο πιο άφθονο υλικό (22700 ppm)	Χαμηλό
		Υψηλή Αφθονία	100
		22700,00	Ζητήματα κόστους, λόγω των οργανικών ηλεκτρολυτών
			Χαμηλό
			Χαμηλό
			Χαμηλό
			150

Πίνακας 3.12: Οικονομικές Παράμετροι Συσσωρευτών Νατρίου Αέρα

Συσσωρευτές	Αξία Υλικού (\$/kg)	Διαθεσιμότητα Υλικού (ppm)	Συνολικό κόστος (\$/kWh)
<b>Fe air</b>	0,3	Μεγάλη αφθονία	Χαμηλό κόστος
	0,12	Άφθονο	Αποτελεσματικό κόστος
	0,4	Πολύ άφθονο	Χαμηλό κόστος
		56300,00	Χαμηλό κόστος
			Χαμηλό κόστος
			100
			22

Πίνακας 3.13: Οικονομικές Παράμετροι Συσσωρευτών Σιδήρου Αέρα

Συσσωρευτές	Αξία Υλικού (\$/kg)	Διαθεσιμότητα Υλικού (ppm)	Συνολικό κόστος (\$/kWh)
<b>Si air</b>	3	26% του φλοιού της Γης	Χαμηλό κόστος
		Άφθονο	Χαμηλότερο από τις Li air
		2ο πιο άφθονο στοιχείο στον φλοιό της Γης	Προσιτό κόστος
		Δεύτερο πιο άφθονο στοιχείο στον φλοιό της Γης	<b>100</b>
		Δεύτερο πιο άφθονο στοιχείο	
		Δεύτερο πιο άφθονο	
		Δεύτερο πιο άφθονο	
		Μεγάλη αφθονία	
		Στα 5 πιο άφθονα υλικά	
		282000,00	

Πίνακας 3.14: Οικονομικές Παράμετροι Συσσωρευτών Σιλικόνης Αέρα

Συσσωρευτές	Φιλικό προς το περιβάλλον	Ασφάλεια
<b>Al air</b>	Μικρή ρύπανση	Ασφαλής
	Μπορούν να ανακυκλωθούν, Ακίνδυνοι προς το περιβάλλον	Ασφαλής
	Μπορούν να ανακυκλωθούν	Κίνδυνοι ασφαλείας λόγω διάβρωσης
	Μικρή τοξικότητα	<b>30%</b>
	Φιλικό προς το περιβάλλον	
	Φιλικό προς το περιβάλλον, Ανακύκλωση	
	<b>5</b>	

**Πίνακας 3.15:** Παράμετροι περιβάλλοντος και ασφαλείας των συσσωρευτών Al air.

Συσσωρευτές	Φιλικοί προς το περιβάλλον	Ασφάλεια
<b>Zn air</b>	Φιλικοί προς το περιβάλλον	Υψηλή ασφάλεια
	Μικρή τοξικότητα	Αρκετά ασφαλή, λόγω του υδατικού ηλεκτρολύτη
	Φιλικοί προς το περιβάλλον	Ασφαλή
	Οικολογικά φιλικόί, μικρή τοξικότητα	Σχετικά Ασφαλή
	Φιλικοί, μη τοξικοί	Ασφαλή διαχείριση
	Φιλικοί προς το περιβάλλον	Μειωμένος κίνδυνος εκρήξεων
	Χαμηλότερη τοξικότητα συγκριτικά με τους οργανικούς ηλεκτρολύτες	Ασφαλή
	<b>5</b>	Αρκετά ασφαλή
		Ασφαλή λειτουργία
		Εξαιρετική ασφάλεια λόγω του υδατικού ηλεκτρολύτη
		Μεγαλύτερη ασφάλεια, όταν δεν χρησιμοποιούνται εύφλεκτα διαλύματα
		<b>90%</b>

**Πίνακας 3.16:** Παράμετροι περιβάλλοντος και ασφάλειας των συσσωρευτών Ψευδαργύρου αέρα.

Συσσωρευτές	Φιλικό προς το περιβάλλον	Ασφάλεια
<b>Li air</b>	<b>3</b>	Προβλήματα ασφάλειας
		Το $\text{Li}_2\text{O}_2$ είναι αρκετά εκρηκτικό
		<b>30%</b>

Πίνακας 3.17: Παράμετροι περιβάλλοντος και ασφάλειας των συσσωρευτών Λιθίου αέρα.

Συσσωρευτές	Φιλικό προς το περιβάλλον	Ασφάλεια
<b>Mg air</b>	Φιλική	Τα ιόντα Mg είναι ακίνδυνα για το ανθρώπινο σώμα
	Δεν ρυπαίνει το περιβάλλον	Ασφαλή
	Φιλική	Ασφαλή
	<b>5</b>	<b>60%</b>

Πίνακας 3.18: Παράμετροι περιβάλλοντος και ασφάλειας των συσσωρευτών Μαγνησίου αέρα.

Συσσωρευτές	Φιλικό προς το περιβάλλον	Ασφάλεια
<b>Na air</b>	Μικρές επιπτώσεις στο περιβάλλον	Η ασφάλεια είναι ένα από τις κύριες προκλήσεις των υδατικών Na air
	Φιλική	Υψηλή
	<b>5</b>	Μη ασφαλής λόγω της δημιουργίας δενδριτών
		Υψηλή
		<b>30%</b>

Πίνακας 3.19: Παράμετροι περιβάλλοντος και ασφάλειας των συσσωρευτών Νατρίου αέρα.

Συσσωρευτές	Φιλικό προς το περιβάλλον	Ασφάλεια
<b>Fe air</b>	Φιλική προς το περιβάλλον	Ασφαλής
	Φιλική προς το περιβάλλον, ανακυκλώσιμη, μη τοξική	Ασφαλής
	<b>5</b>	Ασφαλής
		<b>90%</b>

Πίνακας 3.20: Παράμετροι περιβάλλοντος και ασφάλειας των συσσωρευτών Σιδήρου αέρα.

Συσσωρευτές	Φιλικό προς το περιβάλλον	Ασφάλεια
<b>Si air</b>	Φιλικό προς το περιβάλλον	Ασφαλής
	Μη τοξικοί, το SiO <sub>2</sub> μπορεί να διαχειριστεί και να απελευθερωθεί στο περιβάλλον	Ασφαλής
	Μη τοξικοί	Ασφαλής
	<b>5</b>	Ασφαλής
		Ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών
		<b>60%</b>

**Πίνακας 3.21:** Παράμετροι περιβάλλοντος και ασφάλειας των συσσωρευτών Σιλίκονης αέρα.

Συσσωρευτές	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	Θεωρητική Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)	Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	Κύκλοι ζωής	Βαθμός απόδοσης (Round-trip) (%)	Βάθος εκφόρτισης (%)	Ειδική Χωρητικότητα (Ah/kg)	Αξία Υλικού (\$/kg)	Διαθεσιμότητα Υλικού	Συνολικό κόστος (\$/kWh)	Φίλικο προς το περιβάλλον	Ασφάλεια	
Li ion	400	705	90	300	93%	100%	370	Μεταλλικό υλικό υψηλής αξίας - Πρέπει να ανακυκλωθεί για να επιλυθεί η βιωσιμότητα κόστους.	Σπάνιο, Η προμήθεια του λιθίου θα εξαντληθεί μακροπρόθεσμα.	Χαμηλό - Υψηλό (Εξαρτάται από την τεχνολογία)	Τοξικά υλικά (δεν πρέπει να απελευθερώνονται στο περιβάλλον), Πρέπει να γίνεται ανακύκλωση, Ρύπανση	Ανησυχία για την ασφάλεια.	
	400	900	150	2000	85%	80%	140	68	18rpm Φυσική αυθονία	160	Τοξική, Πρέπει να ανακυκλώνεται	Αναφορές για φωτιά και εκρήξεις, που προκαλούν ζημιές και σωματικούς τραυματισμούς.	
	500		350	1000	90%	10%	170	70	Περιορισμένη	268	<b>1</b>	Αναφορές για ατυχήματα πυρκαγιάς, Ατυχήματα πυρκαγιάς που σχετίζονται με την Tesla.	
			100	4000			200	25	Περιορισμένη			Η θερμότητα που απελευθερώνεται μπορεί να προκαλέσει αυτανάφλεξη και έκρηξη.	
			100	8000			110	18,00				Εάν μια μπαταρία φτάσει σε σημείο που να απελευθερώνει θερμότητα, μόνο το 12% από αυτή την ενέργεια, είναι αρκετό για να αυξήσει την θερμοκρασία των υπόλοιπων μπαταριών.	
			240	15000									<b>30%</b>
			400										
		450											
	Ενεργειακά Κριτήρια							Οικονομικά Κριτήρια			Περιβαλλοντικά και Ασφάλειας		

Πίνακας 3.22: Ενεργειακά, Οικονομικά και Περιβαλλοντικά/Ασφάλειας Κριτήρια των συσσωρευτών Li ion από την βιβλιογραφία.



Βαρύτητα	Προτίμηση
9	Απόλυτα προτιμητέο
8	Ισχυρά απόλυτα προτιμητέο
7	Ισχυρά προτιμητέο
6	Μέτρια - ισχυρά προτιμητέο
5	Μέτρια προτιμητέο
3	Ελαφρά προτιμητέο
2	Εξίσου ελαφρά προτιμητέο
1	Ίση προτίμηση

**Πίνακας 4.23:** Παρουσίαση της Βαρύτητας και της σημασίας της, για την αξιολόγηση στην Πολυκριτηριακή Ανάλυση.

	Ενεργειακά	Οικονομικά	Περιβαλλοντικά και Ασφάλειας	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	ΒΑΡΟΣ
Ενεργειακά	1	8	3	12,00	58,18%
Οικονομικά	1/8	1	1/6	1,29	6,26%
Περιβαλλοντικά και Ασφάλειας	1/3	6	1	7,33	35,56%
			<b>Σύνολο</b>	20,63	100,00%

**Πίνακας 4.24:** Παρουσίαση των προτιμήσεων μεταξύ των κριτηρίων και η τελική βαρύτητα σε ποσοστό.



Ενεργειακά	+	+	+	+	+	+	+	+
Συσσωρευτές	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal) (Wh/kg)	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal + Oxygen) (Wh/kg)	Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)	Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	Κύκλοι ζωής	Βαθμός απόδοσης (Round-trip) (%)	Βάθος εκφόρτισης (%) (max)	Ειδική Χωρητικότητα (Ah/kg)
Al air	8461,00	5779,00	21994,00	4068,00	11,00	92%	100%	2817,00
Zn air	1353,00	1086,00	9653,00	700,00	1000,00	75%	99%	829,70
Li air	13000,00	8091,00	7989,00	2792,00	500,00	95%	100%	6000,00
Mg air	6815,00	3919,00	14108,00	2750,00	5000,00	90%	100%	2910,00
Na air	2716,00	1980,00	4409,00	4418,00	1000,00	95%	100%	2856,00
Fe air	1229,00	764,00	9677,00	1237,00	3500,00	96%	100%	1500,00
Si air	8470,00	3947,00	19748,00	1660,55	0,00	45%	100%	1206,00
Li ion	500,00	500,00	900,00	350,00	8000,00	93%	100%	370,00
<b>MAX/MIN (+/-)</b>	<b>13000</b>	<b>8091</b>	<b>21994</b>	<b>4418</b>	<b>8000</b>	<b>96%</b>	<b>100%</b>	<b>6000</b>

Πίνακας 4.25: Μέγιστα αποτελέσματα των ενεργειακών παραμέτρων από τα δεδομένα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης των συσσωρευτών Mt air και Li ion.

Ενεργειακά									
Συσσωρευτές	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Μέταλλο)	Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Μέταλλο + Οξυγόνο)	Ενεργειακή Πυκνότητα	Ειδική Ενέργεια	Κύκλοι ζωής	Βαθμός απόδοσης	Βάθος εκφόρτισης	Ειδική Χωρητικότητα	Βαθμολογία
Al air	0,65	0,71	1,00	0,92	0,00	0,96	1,00	0,47	5,72
Zn air	0,10	0,13	0,44	0,16	0,13	0,78	0,99	0,14	2,87
Li air	1,00	1,00	0,36	0,63	0,06	0,99	1,00	1,00	6,05
Mg air	0,52	0,48	0,64	0,62	0,63	0,94	1,00	0,49	5,32
Na air	0,21	0,24	0,20	1,00	0,13	0,99	1,00	0,48	4,25
Fe air	0,09	0,09	0,44	0,28	0,44	1,00	1,00	0,25	3,60
Si air	0,65	0,49	0,90	0,38	0,00	0,47	1,00	0,20	4,08
Li ion	0,04	0,06	0,04	0,08	1,00	0,97	1,00	0,06	3,25

Πίνακας 4.26: Βαθμολογία των Ενεργειακών Παραμέτρων των συσσωρευτών Mt air και Li ion.

Οικονομικά	-	+	-
Συσσωρευτές	Αξία Υλικού (\$/kg)	Διαθεσιμότητα Υλικού (ppm)	Συνολικό κόστος (\$/kWh)
Al air	1,9	83000	30
Zn air	2,5	70	10
Li air	180	18	500
Mg air	2,75	27640	40
Na air	1,7	22700	150
Fe air	0,4	56300	100
Si air	3	282000	100
Li ion	180	18	268
<b>MAX/MIN (+/-)</b>	<b>0,4</b>	<b>282000</b>	<b>10</b>

**Πίνακας 4.27:** Αποτελέσματα των Οικονομικών παραμέτρων, από την βιβλιογραφική ανασκόπηση των συσσωρευτών Mt air και Li ion.

Οικονομικά				
Συσσωρευτές	Αξία Υλικού (\$/kg)	Διαθεσιμότητα Υλικού (ppm)	Συνολικό κόστος (\$/kWh)	Βαθμολογία
Al air	0,2105	0,2943	0,3333	0,8382
Zn air	0,1600	0,0002	1,0000	1,1602
Li air	0,0022	0,0001	0,0200	0,0223
Mg air	0,1455	0,0980	0,2500	0,4935
Na air	0,2353	0,0805	0,0667	0,3825
Fe air	1,0000	0,1996	0,1000	1,2996
Si air	0,1333	1,0000	0,1000	1,2333
Li ion	0,0022	0,0001	0,0373	0,0396

**Πίνακας 4.28:** Βαθμολογία των Οικονομικών Παραμέτρων των συσσωρευτών Mt air και Li ion.

Περιβαλλοντικά και Ασφάλειας	+	+
Συσσωρευτές	Φιλικό προς το περιβάλλον	Ασφάλεια
Al air	5	0,3
Zn air	5	0,9
Li air	3	0,3
Mg air	5	0,6
Na air	5	0,3
Fe air	5	0,9
Si air	5	0,6
Li ion	1	0,3
<b>MAX/MIN (+/-)</b>	<b>5</b>	<b>0,9</b>

**Πίνακας 4.29:** Αποτελέσματα των παραμέτρων Περιβάλλοντος και Ασφάλειας, από την βιβλιογραφική ανασκόπηση των συσσωρευτών Mt air και Li ion.

Περιβαλλοντικά και Ασφάλειας			
Συσσωρευτές	Φιλικό προς το περιβάλλον	Ασφάλεια	Βαθμολογία
Al air	1	0,33	1,33
Zn air	1	1,00	2,00
Li air	0,6	0,33	0,93
Mg air	1	0,67	1,67
Na air	1	0,33	1,33
Fe air	1	1,00	2,00
Si air	1	0,67	1,67
Li ion	0,2	0,33	0,53

**Πίνακας 4.30:** Βαθμολογία των παραμέτρων Περιβάλλοντος και Ασφάλειας των συσσωρευτών Mt air και Li ion.

Συσσωρευτές	Ενεργειακά	Οικονομικά	Περιβαλλοντικά και Ασφάλειας	Άθροισμα
Al air	5,72	0,84	1,33	7,89
Zn air	2,87	1,16	2,00	6,03
Li air	6,05	0,02	0,93	7,00
Mg air	5,32	0,49	1,67	7,48
Na air	4,25	0,38	1,33	5,96
Fe air	3,60	1,30	2,00	6,90
Si air	4,08	1,23	1,67	6,98
Li ion	3,25	0,04	0,53	3,82

Πίνακας 4.31: Βαθμολογία των Συσσωρευτών Mt air και Li ion.

Νέο Άθροισμα	Συσσωρευτές
3,85	Al air
3,85	Li air
3,72	Mg air
3,05	Si air
2,97	Na air
2,88	Fe air
2,45	Zn air
2,08	Li ion

Πίνακας 4.32: Νέο Άθροισμα των βαθμολογιών, σύμφωνα με τις βαρύτητες του Πίνακα 4.23.

Νέο Άθροισμα	Συσσωρευτές
6,05	Li air
5,72	Al air
5,32	Mg air
4,25	Na air
4,08	Si air
3,60	Fe air
3,25	Li ion
2,87	Zn air

Πίνακας 4.33: Νέο Άθροισμα των βαθμολογιών, με βαρύτητα 100% στα Ενεργειακά Κριτήρια.

Νέο Άθροισμα	Συσσωρευτές
1,30	Fe air
1,23	Si air
1,16	Zn air
0,84	Al air
0,49	Mg air
0,38	Na air
0,04	Li ion
0,02	Li air

**Πίνακας 4.34:** Νέο Άθροισμα των βαθμολογιών, με βαρύτητα 100% στα Οικονομικά Κριτήρια.

Νέο Άθροισμα	Συσσωρευτές
2,00	Zn air
2,00	Fe air
1,67	Mg air
1,67	Si air
1,33	Al air
1,33	Na air
0,93	Li air
0,53	Li ion

**Πίνακας 4.35:** Νέο Άθροισμα των βαθμολογιών, με βαρύτητα 100% στα Κριτήρια Περιβάλλοντος και Ασφάλειας.

Νέο Άθροισμα	Συσσωρευτές
2,63	Al air
2,49	Mg air
2,33	Li air
2,33	Si air
2,30	Fe air
2,01	Zn air
1,99	Na air
1,27	Li ion

**Πίνακας 4.36:** Νέο Άθροισμα των βαθμολογιών, με ίση βαρύτητα σε όλα τα κριτήρια



## Παράρτημα 2: Δεδομένα των συσσωρευτών Mt air και Li ion.

Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal) (Wh/kg)				8140			8100	8130							8100	8100				
Θεωρητική Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)																				
Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal & Oxygen) (Wh/kg)	5779						2796													
Πρακτική Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)							300	500	2300	1430	1230			2043	3222	4068	3014	1906,6	2210,6	2365,1
Ειδική Χωρητικότητα Μπαταρίας (Ah/kg)	239	767,5	900,8	300	500							121	2541,4	1399	2174	2703	2817	1582,3	1831,5	1984,1
Βάθος Εκφόρτισης DoD (%)				80%																
Ενεργειακή Απόδοση (%)																				
Κύκλοι ζωής																		<10	<4	<4
Διαθεσιμότητα Υλικού		Καλή αφθονία																		
Ασφάλεια							Ασφαλής													
Αξία υλικού (\$/kg)		Χαμηλή					1,75													Χαμηλή
Κόστος (\$/kWh)		Χαμηλό		30	29															Χαμηλό
Περιβάλλον		Μικρή ρύπανση		Μπορούν να ανακυκλωθούν, Ακίνδυνοι προς το περιβάλλον			Φιλικοί προς το περιβάλλον, Ανακύκλωση						Μπορούν να ανακυκλ							
Primary/Secondary		Πρωτογενής	Μηχανικά Επαναφορτιζόμενη			Πρωτογενής											Δευτερογενής	Δευτερογενής		
Πηγή	Chunlian Wang, et al., 2019 [43]	Yifei Wang, et al., 2018 [110]		Shaohua Yang, Harold Knickle, 2002 [88]		P. Goel, et al., 2020 [50]						Xiaohui Li, et al., 2021 [57]		Soraya Hosseini, et al., 2022 [58]	Yongxin Zhu, et al., 2021 [113]					

**Πίνακας 4.37:** Δεδομένα Συσσωρευτών Αλουμινίου αέρα, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία.

Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal) (Wh/kg)	8100					8100	8100	8091		8146	8100			8076		6258		8461					
Θεωρητική Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)								21837	6737	21994													10347
Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal & Oxygen) (Wh/kg)									2784				2796		3311				3947				
Πρακτική Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	2043	2810	3602					2300						300-500	300-500								
Ειδική Χωρητικότητα Μπαταρίας (Ah/kg)	1399	1905	2439	2604		1357,47																	
Βάθος Εκφόρτισης DoD (%)								100%															
Ενεργειακή Απόδοση (%)															70%	92%	82%	55%					
Κύκλοι ζωής	4	4	4	11		4																	
Διαθεσιμότητα Υλικού	Υψηλή												83000 ppm										82300 ppm
Ασφάλεια				Ασφαλής																			
Αξία υλικού (\$/kg)	Χαμηλή													1,9	1,81	1,75							
Κόστος (\$/kWh)	Χαμηλό			Φθινό	Προσιτό	Αποτελεσματικό																	
Περιβάλλον				Μικρή τοξικότητα		Φιλικό προς το περιβάλλον																	Φίλικο προς το περιβάλλον, Ανακύκλωση
Primary/Secondary	Δευτερογενής			Δευτερογενής																			
Πηγή	J. Yang, et al., 2022 [59]			Soraya Hosseini, et al., 2021 [60]	N. Ronith Levy, et al., 2021 [114]	Yawen Li, et al., 2022 [56]	Bingbing Tian, et al., 2017 [69]	Henning Weinrich, et al., 2019 [96]	Gil Cohn, et al., 2009 [133]	Xing Zhong, et al., 2012 [109]	Ziyauddin Khan, et al., 2020 [77]	Quan Li, et al., 2021 [76]	Fanglei Tong, et al., 2021 [73]	Abdul Ghani Olabi, et al., 2021, [55]			worldatlas.com, 2022 [87]	Lixia Yang, et al., 2021 [45]	Shuyun Wang, et al., 2021 [90]				

**Πίνακας 4.38:** Δεδομένα Συσσωρευτών Αλουμινίου αέρα, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία.

Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal) (Wh/kg)	1350											1353						1352	
Θεωρητική Εννεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)																			
Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal & Oxygen) (Wh/kg)			915	1084								1085				1086	1084	1086	
Πρακτική Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)					500	400											350	500	700
Ειδική Χωρητικότητα Μπαταρίας (Ah/kg)		400	745	800								428,8			745			300	875
Βάθος Εκφόρτισης DoD (%)							97%	80,00%	77,00%	81,00%									
Βαθμός Απόδοσης (Round-Trip) (%)	54%		65%		75%							63%			61%		65%		
Κύκλοι ζωής	>600	150	>600	>400								>100	>500						>75
Διαθεσιμότητα Υλικού	Καλή			Άφθονη												Άφθονη			
Ασφάλεια		Υψηλή ασφάλεια		Αρκετά ασφαλή, λόγω του υδατικού ηλεκτρολύτη	Ασφαλή	Σχετικά Ασφαλή					Ασφαλή διαχείριση	Μειωμένος κίνδυνος εκρήξεων							
Αξία υλικού (\$/kg)																			1,85
Συνολικό Κόστος (\$/kWh)	Χαμηλό	Χαμηλό	Χαμηλό		Χαμηλό	Χαμηλό						Χαμηλό			Χαμηλό	Χαμηλό			
Περιβάλλον						Φιλικό προς το περιβάλλον					Μικρή τοξικότητα	Φιλικό προς το περιβάλλον	Οικολογικά φιλικό, μικρή τοξικότητα						
Πηγή	Marina Bockelmann, et al., 2016 [64]	Tadashi Kakeya, et al., 2018 [124]	Zengxia Pei, et al., 2019 [61]	Siyuan Zhao, et al., 2022 [111]	Keliang Wang, et al., 2022 [67]	Chi-Young Jung, et al., 2016 [65]					Pucheng Pei, et al., 2014 [99]	Byeong Jin Jeong, et al., 2021 [125]	Upasana Bhardwaj, et al., 2022 [63]	Shanmugam Ramakrishnan, et al., 2022 [126]	Tatiana Santos Andrade, et al., 2020 [127]	Jang-Soo Lee, et al., 2011 [115]	Yanguang Li, Jun Lu, 2017 [62]	Abdul Ghani Olabi, et al., 2021, [55]	

**Πίνακας 4.39:** Δεδομένα Συσσωρευτών Ψευδαργύρου αέρα, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία.



Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal) (Wh/kg)						12000						13000	11430		
Θεωρητική Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)														7988	
Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal & Oxygen) (Wh/kg)	5200		3550	5220	3600				3600	5928				3458	3458
Πρακτική Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)				330		1350	2792						11000		
Ειδική Χωρητικότητα Μπαταρίας (Ah/kg)	2120		600	1793,9	1500		2800		6000						
Βάθος Εκφόρτισης DoD (%)													100%		
Βαθμός Απόδοσης (Round-Trip) (%)		81%	140%		78%		95%		78%	75%					
Κύκλοι ζωής			>70	<180	>140	<15	50		200	>100			>250		
Διαθεσιμότητα Υλικού															Περιορισμένη
Ασφάλεια															
Αξία υλικού (\$/kg)															160-180
Συνολικό Κόστος (\$/kWh)			Χαμηλό	<105											300-500
Περιβάλλον															
Πρωτογενής/Δευτερογενής		Δευτερογενής	Δευτερογενής												
Πηγή	Jang-Soo Lee, et al., 2011 [115]	Hao Gong, et al., 2020 [116]	Qi Li, et al., 2017 [3]	Tao Liu et al., 2020, [18]	U.R. Farooqui, et al., 2017 [70]	Wen-Bin Luo, 2017 [71]	Yanguang Li, et al., [62]	Alexander Kraytsberg, et al., 2012 [117]	Bingbing Tian, et al., 2017 [69]	Henning Weinrich, et al., 2019 [96]	N. Chawla, 2019 [92]				

**Πίνακας 4.41:** Δεδομένα Συσσωρευτών Λιθίου αέρα, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία.



Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal) (Wh/kg)		6493						6800	6800		6815		6493	6098				9619
Θεωρητική Εννεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)			14108	14000														
Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal & Oxygen) (Wh/kg)	3910		3919	3900						2840			3919	2848				
Πρακτική Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	1620	2750				565		2282	1367	1060,86	1552,37		2750					
Ειδική Χωρητικότητα Μπαταρίας (Ah/kg)				737	2131			2910	1009	1167	1282,051	1376	237	2131				
Βάθος Εκφόρτισης DoD (%)		100%											100%					
Βαθμός Απόδοσης (Round-Trip) (%)				90,0%														
Κύκλοι ζωής		<10		>4				5000	4				<10					
Διαθεσιμότητα Υλικού				Άφθονο (2,08% στον φλοιό της Γης)				27640 ppm					Άφθονο					2,33%, 23300 ppm
Ασφάλεια									Τα ιόντα Mg είναι ακίνδυνα για το ανθρώπινο σώμα			Ασφαλή	Ασφαλή					
Αξία υλικού (\$/kg)				2,5							2,476	2,01	2,75					
Συνολικό Κόστος (\$/kWh)	Χαμηλό κόστος																	
Περιβάλλον	Φιλική										Δεν ρυπαίνει το περιβάλλον	Φιλική						
Πρωτογενής/Δευτερογενής				Δευτερογενής	Δευτερογενής	Πρωτογενής		Δευτερογενής	Πρωτογενής (Μηχανικά Επαναφορτιζόμενος)	Πρωτογενής								
Πηγή	Jingling Ma, et al., 2019 [93]	Henning Weinrich, et al., 2019 [96]	Chun-Sheng Li, et al., 2017 [74]			Ziyauddin Khan, et al., 2020 [77]	Luhe Li, et al., 2021 [75]	Fanglei Tong, et al., 2021 [91]	Xingrui Chen, et al., 2019 [112]	Quan Li, et al., 2021 [76]	Fanglei Tong, et al., 2021 [73]	Abdul Ghani Olabi, et al., 2021, [55]	worldatlas.com, 2022 [87]	Shuyun Wang, et al., 2021 [90]				

**Πίνακας 4.43:** Δεδομένα Συσσωρευτών Μαγνησίου αέρα, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία.

Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal) (Wh/kg)	2716					2260	2090					2271			2716		
Θεωρητική Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)	2634	4409															2466
Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal & Oxygen) (Wh/kg)		1601						1683				1980		1683	1601		
Πρακτική Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)							4418			1600,6				>1600	1600		
Ειδική Χωρητικότητα Μπαταρίας (Ah/kg)					2856		896			592,8	838			838			
Βάθος Εκφόρτισης DoD (%)	100%																100%
Βαθμός Απόδοσης (Round-Trip) (%)			90%			90%	95%	94%	95%	95%						83%	
Κύκλοι ζωής	>20		>500		>125	>25		50	1000	>80		>300			40	>20	
Διαθεσιμότητα Υλικού						Ο φλοιός της Γης περιέχει 2.6% Na	6ο πιο άφθονο υλικό (22700 ppm)	Υψηλή Αφθονία						4ο πιο Άφθονο μεταλλικό υλικό			2,4%, 23600 ppm
Ασφάλεια				Η ασφάλεια είναι μία από τις κύριες προκλήσεις των υδατικών Na air	Υψηλή		Μη ασφαλής λόγω της δημιουργίας δενδριτών				Υψηλή						
Αξία υλικού (\$/kg)														Εξαιρετικά φθηνή	1,7		
Συνολικό Κόστος (\$/kWh)			Χαμηλό	Χαμηλό		100-150	Ζητήματα κόστους, λόγω των οργανικών ηλεκτρολυτών	Χαμηλό		Χαμηλό		Χαμηλό		Χαμηλό			
Περιβάλλον								Μικρές επιπτώσεις στο περιβάλλον						Φιλική			
Πρωτογενής/Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής							
Πηγή	Henning Weinrich, et al., 2019 [96]	Jingyi Zhu, et al., 2020 [118]	Shilei Chang, et al., 2021 [81]		N. Chawla, 2019 [92]	Ziyauddin Khan, et al., 2020 [77]	Myeongjin Kim, et al., 2018 [119]	Y. Kang, et al., 2020 [79]	Feng Liang, et al., 2018 [80]	Emanuel Peled, et al., 2013 [97]	Xiaolong Xu, et al., 2019 [82]	Abdul Ghani Olabi, et al., 2021, [55]	worldatlas.com, 2022 [87]	Shuyun Wang, et al., 2021 [90]			

**Πίνακας 4.44:** Δεδομένα Συσσωρευτών Νατρίου αέρα, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία.



Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal) (Wh/kg)	1200			1229		1120								1229				1229			
Θεωρητική Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)				9677	2598															3244	
Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal & Oxygen) (Wh/kg)				764											763	764	764				
Πρακτική Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)				453					453	458	453		1237	25		50-75	50-75	453			
Ειδική Χωρητικότητα Μπαταρίας (Ah/kg)		350		192		550	23	23,7	120	<300	508	854	300	1500	20,8			300-786			
Βάθος Εκφόρτισης DoD (%)				100%						100%								100%			
Βαθμός Απόδοσης (Round-Trip) (%)						69%	71%	83%	35%	54%	70%	96%	82%	76%							
Κύκλοι ζωής			22	>3500		40	>200	>200	>200	>25	>100	20	>30	>10	>150			3500			
Διαθεσιμότητα Υλικού				Μεγάλη αφθονία							Άφθονο							Πολύ άφθονο		5,6% του φλοιού της Γης, 56300 ppm	
Ασφάλεια	Ασφαλής					Ασφαλής					Ασφαλής										
Αξία υλικού (\$/kg)																		0,3	0,12	0,4	~0,1
Συνολικό Κόστος (\$/kWh)	Χαμηλό κόστος	Αποτελεσματικό κόστος				Χαμηλό κόστος				Χαμηλό κόστος	100	Χαμηλό κόστος	<100		<22						
Περιβάλλον	Φιλική προς το περιβάλλον	Φιλική προς το περιβάλλον, ανακυκλώσιμη, μη τοξική																			
Πρωτογενής/Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής
Πηγή	Bingbing Tian, et al., 2017 [69]	P.S. Arunkumar, et al., 2021 [100]	Henning Weinrich, et al., 2019 [96]	Bui Thi Hang, et al., 2013 [101]	Henning Weinrich, et al., 2018 [78]	N. Chawla, 2019 [92]	Stefano Trocino, et al., 2018 [102]	H. A. Figueroa Rodriguez, et al., 2017 [120]	Aswin K. Manohar, et al., 2012 [94]	Xuan Zhao, et al., 2013 [121]	L. Wei, et al., 2018 [84]	Yingjian Yu, et al., 2021 [95]	Quan Li, et al., 2021 [76]	Fanglei Tong, et al., 2021 [73]	Abdul Ghani Olabi, et al., 2021,	worldatlas.com, 2022 [87]	daily metal price.com, 2022 [89]	Shuyun Wang, et al., 2021 [90]			

**Πίνακας 4.45:** Δεδομένα Συσσωρευτών Σιδήρου αέρα, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία.

Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal) (Wh/kg)	8470	8470	8461		8461	8470	8470	8470			8461		8461	8001		
Θεωρητική Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)			19748		19748						19748					
Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal & Oxygen) (Wh/kg)											3947	3947	2334			
Πρακτική Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)		3820														
Ειδική Χωρητικότητα Μπαταρίας (Ah/kg)	192,3	120						1206	215	155						
Βάθος Εκφόρτισης DoD (%)											100%	100%				
Βαθμός Απόδοσης (Round-Trip) (%)																45%
Κύκλοι ζωής																
Διαθεσιμότητα Υλικού	26% του φλοιού της Γης	Αφθονο	2ο πιο άφθονο στοιχείο στον φλοιό της Γης	Δεύτερο πιο άφθονο στοιχείο στον φλοιό της Γης	Δεύτερο πιο άφθονο στοιχείο	Δεύτερο πιο άφθονο	Δεύτερο πιο άφθονο	Μεγάλη αφθονία			Στα 5 πιο άφθονα υλικά					282000ppm
Ασφάλεια	Ασφαλής	Ασφαλής		Ασφαλής	Ασφαλής											Ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών
Αξία υλικού (\$/kg)																3
Συνολικό Κόστος (\$/kWh)		Χαμηλό κόστος	Χαμηλότερο από τις Li air (100 \$/kWh)					Προσιτό κόστος								
Περιβάλλον	Φιλικοί προς το περιβάλλον			Μη τοξικοί, το SiO2 μπορεί να διαχειριστεί και να απελευθερωθεί στο περιβάλλον		Μη τοξικοί										
Πρωτογενής/Δευτερογενής	Πρωτογενής	Πρωτογενής	Πρωτογενής	Πρωτογενής	Πρωτογενής	Πρωτογενής	Πρωτογενής				Πρωτογενής					Δευτερογενής
Πηγή	Danshuo Chen, et al., 2022 [85]	Yasin Emre Durmus, et al., 2017 [86]	Yingjian Yu, et al., 2021 [104]	Gil Cohn, Yair Ein-Eli, 2010, [103]	Yingjian Yu, et al., 2021 [95]	Gil Cohn, et al., 2009 [133]	Durmus Yasin Emre, et al., 2018 [122]	Xing Zhong, et al., 2012 [109]			Henning Weinrich, et al., 2019 [96]	Abdul Ghani Olabi, et al., 2021, [55]	Shanghai Metals Market, 2022			Henning Weinrich, et al., 2019 [96]

**Πίνακας 4.46:** Δεδομένα Συσσωρευτών Σιλικόνης αέρα, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία.

Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal) (Wh/kg)																				
Θεωρητική Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)																				
Πρακτική Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)		90-120	150-240																	
Ειδική Χωρητικότητα Μπαταρίας (Ah/kg)		370				140	170	200	110											
Βάθος Εκφόρτισης DoD (%)						10%-100%														
Βαθμός Απόδοσης (Round-Trip) (%)																				
Κύκλοι ζωής		2000	500-1000			300-15000 (ανάλογο με το DoD)														
Διαθεσιμότητα Υλικού		Σπάνιο, Η προμήθεια του λιθίου θα εξαντληθεί μακροπρόθεσμα.																		
Ασφάλεια		Ανησυχία για την ασφάλεια.		Αναφορές για φωτιά και εκρήξεις, που προκαλούν ζημιές και σωματικούς τραυματισμούς.						Αναφορές για ατυχήματα πυρκαγιάς, Ατυχήματα πυρκαγιάς που σχετίζονται με την Tesla.	Η θερμότητα που απελευθερώνεται μπορεί να προκαλέσει αυτανάφλεξη και έκρηξη.	Εάν μια μπαταρία φτάσει σε σημείο που να απελευθερώνει θερμότητα, μόνο το 12% από αυτή την ενέργεια, είναι αρκετό για να αυξήσει την θερμοκρασία των υπόλοιπων μπαταριών.								
Αξία υλικού (\$/kg)	Μεταλλικό υλικό υψηλής αξίας - Πρέπει να ανακυκλωθεί για να επιλυθεί η βιωσιμότητα κόστους.																			
Συνολικό Κόστος (\$/kWh)						Χαμηλό - Υψηλό (Εξαρτάται από την τεχνολογία)														
Περιβάλλον	Τοξικά υλικά (δεν πρέπει να απελευθερώνονται στο περιβάλλον), Πρέπει να																			
Πρωτογενής/Δευτερογενής		Δευτερογενής		Δευτερογενής								Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	Δευτερογενής	
Πηγή	Dawei Yu, et al., 2021 [40]	A. El Kharbachi, et al., 2019 [106]	Lingxi Kong, et al., 2018 [107]	Yu Miao, et al., 2019 [105]	Pius Victor Chombo, et al., 2020 [108]	Shuai Ma, et al., 2018 [129]	Shuting Yang, et al., 2019 [41]	Lip Huat Saw, et al., 2017 [1]												

**Πίνακας 4.47:** Δεδομένα Συσσωρευτών Λιθίου ιόντος, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία.

Θεωρητική Ειδική Ενέργεια (Metal) (Wh/kg)					400	400								400-500
Θεωρητική Ενερειακή Πυκνότητα (Wh/L)														
Πρακτική Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)		350-450	100-400							100-200				
Ειδική Χωρητικότητα Μπαταρίας (Ah/kg)								<200		<150				95-250
Βάθος Εκφόρτισης DoD (%)										80%				
Βαθμός Απόδοσης (Round-Trip) (%)														
Κύκλοι ζωής						4000				4500-8000			>500	
Διαθεσιμότητα Υλικού			18ppm Φυσική αυθονία	Περιορισμένη		Περιορισμένη								
Ασφάλεια					Ανησυχία για την ασφάλεια.									
Αξία υλικού (\$/kg)				Υψηλή		68		Μεγάλη αύξηση του κόστους του Λιθίου, λόγω της υψηλής ζήτησης			70	25		
Συνολικό Κόστος (\$/kWh)		160								268 (2015)				
Περιβάλλον								Τοξική, Πρέπει να ανακυκλώνεται						
Πρωτογενής/Δευτερογενής		Δευτερογενής												
Πηγή	Yue Yang, et al., 2021 [130]	Henning Weinrich, et al., 2019 [96]	Ziyaaddin Khan, et al., 2020 [77]	Xiaohui Li, et al., 2020 [57]	P.Goel, et al., [50]	Xiaoqing Chen, et al., 2020 [51]	Chunlian Wang, et al., 2019 [43]	Farschad Torabi, Pouria Ahmadi, 2020 [9]	Chi-Young Jung, et al., 2016 [65]	Abdul Ghani Olabi, et al., 2021, [55]	Quan Li, et al., 2021 [76]	Fanglei Tong, et al., 2021 [73]	Weiping Diao, et al., 2021 [132]	Emanuel Peled, et al., 2013 [97]

**Πίνακας 4.48:** Δεδομένα Συσσωρευτών Λιθίου ιόντος, με τις Πηγές από την βιβλιογραφία.