



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ Li-Ion/LFP ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
IoT**

ΒΛΑΣΙΟΣ ΜΠΕΛΛΟΣ

ΑΜ:16180/1703

Επιβλέπων: Γρηγόριος Δουμένης

Επίκουρος Καθηγητής

Άρτα, Σεπτέμβριος 2024

PERFORMANCE OF Li-Ion/LFP ACCUMULATORS IN IOT APPLICATIONS

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Άρτα, 26 Σεπτεμβρίου 2024

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής

Γρηγόριος Δουμένης,

2. Μέλος επιτροπής

Στεργίου Ελευθέριος,

3. Μέλος επιτροπής

Βαρτζιώτης Φώτιος,

© Μπέλλος, Βλάσιος, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εξ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Μπέλλος, Βλάσιος

Υπογραφή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Γρηγόριο Δουμένη για την πολύτιμη βοήθειά του τόσο κατά την διάρκεια των σπουδών μου όσο και κατά την διάρκεια της συγγραφής της πτυχιακής μου εργασίας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Ιωάννη Μασκλαβάνο και Βασιλική Νάσκαρη που ήταν δίπλα μου αρωγοί σε όλα τα προβλήματα που προέκυψαν.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζει τα χαρακτηριστικά και τις αποδόσεις συσσωρευτών τεχνολογίας λιθίου-ιόντων (Li-Ion) και λιθίου-φωσφορικού σιδήρου (LFP), με στόχο τη χρήση τους σε εφαρμογές Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Μέσω ενός πλήρως αυτοματοποιημένου συστήματος φόρτισης και εκφόρτισης που αναπτύχθηκε σε LabVIEW, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της ενεργειακής πυκνότητας, της διάρκειας ζωής, της θερμοκρασιακής σταθερότητας και της ικανότητας γρήγορης φόρτισης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι μπαταρίες LFP προσφέρουν αυξημένη ασφάλεια και αντοχή σε ακραίες συνθήκες, ενώ οι μπαταρίες Li-Ion προσφέρουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, καθιστώντας τις κατάλληλες για εφαρμογές όπου απαιτείται μεγαλύτερη διάρκεια αυτονομίας και απόδοσης. Η εργασία αυτή αναλύει επίσης τα κριτήρια επιλογής της κατάλληλης μπαταρίας για IoT συστήματα, προτείνοντας βελτιώσεις στην απόδοσή τους.

Λέξεις-κλειδιά: Συσσωρευτές Li-Ion, Συσσωρευτές LFP, χαρακτηρισμός συσσωρευτών

ABSTRACT

This thesis examines the characteristics and performance of lithium-ion (Li-Ion) and lithium-iron phosphate (LFP) batteries, focusing on their use in Internet of Things (IoT) applications. Through a fully automated charging and discharging system developed in LabVIEW, measurements were taken on energy density, lifespan, thermal stability, and fast-charging capability. The results indicate that LFP batteries offer enhanced safety and resistance to extreme conditions, while Li-Ion batteries provide higher energy density, making them suitable for applications requiring extended autonomy and performance. This study also discusses the criteria for selecting the appropriate battery for IoT systems and suggests ways to improve their efficiency.

Keywords: Li-Ion batteries, LFP batteries, battery characterization

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	vi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vii
ABSTRACT.....	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ/ΕΙΚΟΝΩΝ	x
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Ιστορικό και κίνητρα για τη μελέτη	1
2. IoT και τεχνολογίες συσσωρευτών.....	3
2.1 Ιστορική εξέλιξη συστημάτων IoT.....	5
2.2 Τεχνολογίες συσσωρευτών	7
2.3 Συσσωρευτές τεχνολογίας Λιθίου σε κόμβους IoT	21
3. Μετρήσεις χαρακτηριστικών συσσωρευτών Li-Ion και LFP	23
3.1 Σύστημα αυτόματης φόρτισης/εκφόρτισης συσσωρευτών	23
3.2 Καμπύλες φόρτισης	30
3.3 Καμπύλες στατικής εκφόρτισης.....	37
3.4 Καμπύλες εκφόρτισης με τυπικό φορτίο IoT	41
4. Συμπεράσματα	42
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	44

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ/ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Goodenough's battery[1]	2
Εικόνα 2. Μορφές διάχυτης ενέργειας	4
Εικόνα 3. Διάγραμμα ΙοΤ[5]	5
Εικόνα 4. Διάγραμμα κόμβου ΙοΤ[7]	6
Εικόνα 5. Τυπική ενεργειακή κατανάλωση κόμβου ΙοΤ[8].....	7
Εικόνα 6. Ενεργειακή πυκνότητα vs Πυκνότητα ισχύος σε ταμειυτήρες ενέργειας[10]	8
Εικόνα 7. Μπαταρία Λιθίου-Ιόντων[13].....	11
Εικόνα 8. Μπαταρία Λιθίου-Φωσφορικού Σιδήρου	13
Εικόνα 9. Μπαταρία Λιθίου Πολυμερούς	15
Εικόνα 10. Μπαταρία Νικελίου-Μεταλλικού Υδριδίου[14]	17
Εικόνα 11. Μπαταρία Νικελίου-Καδμίου[15]	19
Εικόνα 12. Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών συσσωρευτών[10].....	21
Εικόνα 13. Τροφοδοτικό Rigol DP832A	24
Εικόνα 14. Γραφική διεπαφή χρήστη (σύστημα φόρτισης)	25
Εικόνα 15. Block διάγραμμα λειτουργίας (σύστημα φόρτισης).....	25
Εικόνα 16. BK Precision 8601 Electronic DC Load.....	26
Εικόνα 17. Γραφική διεπαφή χρήστη (σύστημα αποφόρτισης)	27
Εικόνα 18. Block διάγραμμα λειτουργίας (σύστημα αποφόρτισης)	27
Εικόνα 19. Aim TTi SMU 4001	28
Εικόνα 20. Προγραμματισμός παλμού.....	29
Εικόνα 21. Keysight 34465A	29
Εικόνα 22. Γραφική απεικόνιση καταγραφέα	30
Εικόνα 23. Καμπύλη φόρτισης μπαταρίας Li-Ion	32
Εικόνα 24. Καμπύλη φόρτισης μπαταρίας LiFePO4	32
Εικόνα 25. Μπαταρία Li-Ion EFEST IMR26650	33
Εικόνα 26. Μπαταρία LiFePO4 Soshine.....	33
Εικόνα 27. Καμπύλη φόρτισης μπαταρίας με ρεύμα ίσο με 0.3C	34
Εικόνα 28. Καμπύλη φόρτισης μπαταρίας Li-Ion με ρεύμα 0.07C	34
Εικόνα 29. Καμπύλη φόρτισης μπαταρίας LiFePO4 με ρεύμα 0.1C	35
Εικόνα 30. Καμπύλη φόρτισης μπαταρίας LiFePO4 με ρεύμα 0.01C	35
Εικόνα 31. Απεικόνιση παλμού στον παλμογράφο.....	36
Εικόνα 32. Φόρτιση μπαταρία LiFePO4 με παλμούς	37
Εικόνα 33. Καμπύλη εκφόρτισης μπαταρίας Li-Ion.....	39

Εικόνα 34. Καμπύλη εκφόρτισης μπαταρίας LiFePO_4	39
Εικόνα 35. Καμπύλη αποφόρτισης μπαταρίας LiFePO_4 με ρεύμα 1A	40
Εικόνα 36. Αποφόρτιση μπαταρίας LiFePO_4 με ρεύμα ίσο με 0.001C.....	41
Εικόνα 37. Αποφόρτιση μπαταρίας Li-Ion με ρεύμα ίσο με 0.001C.....	41
Εικόνα 38. Αποφόρτιση μπαταρίας LiFePO_4 με παλμικό φορτίο	42

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας και των εφαρμογών του Διαδικτύου των Αντικειμένων (IoT) έχει δημιουργήσει μια αυξανόμενη ζήτηση για αξιόπιστες, αποδοτικές και περιβαλλοντικά φιλικές λύσεις αποθήκευσης ενέργειας. Οι μπαταρίες λιθίου-ιόντων (Li-Ion) αποτελούν μία από τις πιο εξελιγμένες και διαδεδομένες τεχνολογίες στον τομέα των φορητών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, με εφαρμογές που εκτείνονται από τα ηλεκτρικά οχήματα μέχρι τις έξυπνες συσκευές και τα συστήματα IoT.

Η επιλογή των σωστών μπαταριών για τις εφαρμογές IoT είναι κρίσιμης σημασίας, καθώς οι συσκευές IoT συχνά λειτουργούν σε απομακρυσμένες τοποθεσίες και απαιτούν αυτονομία για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η χρήση επαναφορτιζόμενων μπαταριών με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και μεγάλη διάρκεια ζωής εξασφαλίζει ότι αυτές οι συσκευές μπορούν να λειτουργούν χωρίς τη συνεχή ανάγκη για αντικατάσταση ή φόρτιση, μειώνοντας έτσι το κόστος συντήρησης και βελτιώνοντας τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος.

Επιπλέον, οι μπαταρίες Λιθίου-Φωσφορικού Σιδήρου (LFP), ένας τύπος των μπαταριών Li-Ion, προσφέρουν μια ασφαλέστερη εναλλακτική λύση για τις παραδοσιακές μπαταρίες, με χαμηλότερο κίνδυνο υπερθέρμανσης και αυξημένη διάρκεια ζωής. Η επιλογή της κατάλληλης μπαταρίας για IoT εφαρμογές αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχία των συστημάτων αυτών, καθώς επηρεάζει την απόδοση, την αξιοπιστία και το κόστος λειτουργίας.

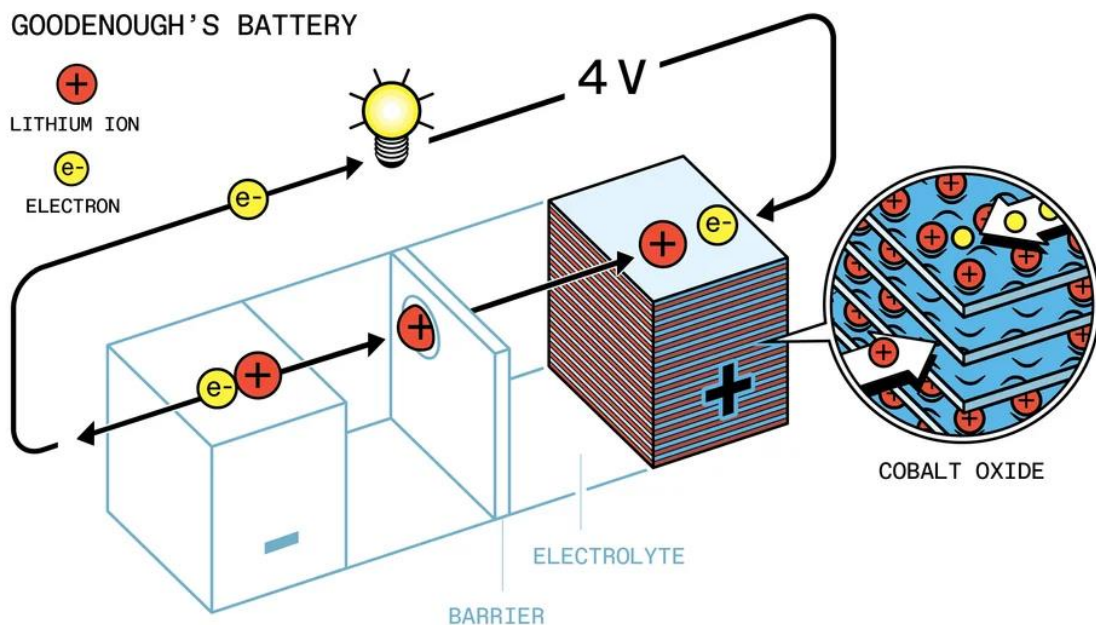
Η παρούσα πτυχιακή εργασία στοχεύει να αναλύσει τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των μπαταριών Li-Ion και LFP, εστιάζοντας στη χρήση τους σε εφαρμογές IoT. Θα εξετάσει επίσης τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν αυτές οι τεχνολογίες και τις προοπτικές βελτίωσής τους για να καλύψουν τις απαιτήσεις των σύγχρονων συστημάτων.

1.1 Ιστορικό και κίνητρα για τη μελέτη

Η ιστορία των μπαταριών λιθίου-ιόντων (Li-Ion) ξεκινάει από τις πρώτες προσπάθειες ανάπτυξης επαναφορτιζόμενων μπαταριών στη δεκαετία του 1970. Οι πρώτες αυτές προσπάθειες επικεντρώθηκαν στη χρήση μεταλλικού λιθίου ως ανόδιο, το οποίο

προσέφερε υψηλή ενεργειακή πυκνότητα αλλά παρουσίαζε σημαντικά προβλήματα ασφάλειας λόγω της αστάθειας του μεταλλικού λιθίου.

Ένας από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες στην ανάπτυξη των μπαταριών Li-Ion ήταν η δουλειά του John B. Goodenough το 1980, ο οποίος εισήγαγε το υλικό οξείδιο του κοβαλτίου για την κατασκευή της καθόδου. Αυτή η καινοτομία βελτίωσε δραματικά την απόδοση και τη σταθερότητα των μπαταριών, καθιστώντας την τεχνολογία πιο αξιόπιστη και αποδοτική. Μέχρι το 1991, η SONY ήταν η πρώτη εταιρεία που κυκλοφόρησε εμπορικά τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λιθίου-ιόντων, και από τότε η τεχνολογία αυτή έχει γνωρίσει μεγάλη εξέλιξη και αποδοχή.



Εικόνα 1. Goodenough's battery[1]

Οι σύγχρονες μπαταρίες Li-Ion χρησιμοποιούν διάφορα υλικά για την άνοδο και την κάθοδο, όπως το φωσφορικό λίθιο (LFP) και το οξείδιο του μαγγανίου. Αυτά τα υλικά βελτιώνουν τη συνολική απόδοση της μπαταρίας, μειώνοντας τον κίνδυνο υπερθέρμανσης και αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής και την ασφάλεια. Οι μπαταρίες αυτές χρησιμοποιούνται πλέον σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών, από τα smartphones και τους φορητούς υπολογιστές έως τα ηλεκτρικά οχήματα και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

Τα κίνητρα για τη μελέτη των μπαταριών Li-Ion και LFP περιλαμβάνουν τη συνεχή ανάγκη για βελτιωμένες ενεργειακές λύσεις που να είναι τόσο αποδοτικές όσο και ασφαλείς. Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα των μπαταριών αυτών τις καθιστά ιδανικές για

φορητές συσκευές και αυτόνομους κόμβους IoT, ενώ η αυξημένη διάρκεια ζωής τους μειώνει το κόστος συντήρησης και αντικατάστασης.

Επιπλέον, η παγκόσμια ανάγκη για πράσινες τεχνολογίες και βιώσιμες μορφές ενέργειας αποτελεί έναν ισχυρό παράγοντα για την έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα αυτό. Οι μπαταρίες Li-Ion διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη μετάβαση προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως τα ηλιακά και αιολικά συστήματα, όπου είναι απαραίτητα τα συστήματα αποθήκευσης υψηλής απόδοσης.

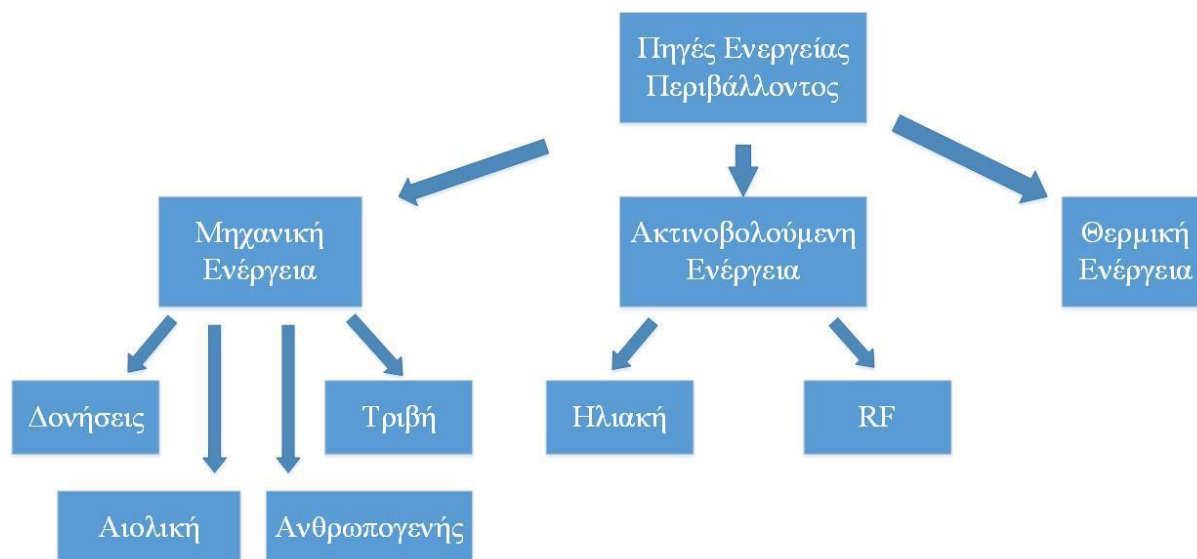
Ωστόσο, παρά την αποτελεσματικότητά τους, οι μπαταρίες Li-Ion αντιμετωπίζουν ακόμα προκλήσεις που αφορούν την ασφάλεια, όπως η υπερθέρμανση και η πιθανότητα διαρροών ή εκρήξεων. Για αυτόν τον λόγο, η έρευνα συνεχίζει να επικεντρώνεται στη βελτίωση της ασφάλειας και στην ανάπτυξη νέων υλικών που μπορούν να μειώσουν τον κίνδυνο τέτοιων ατυχημάτων, διατηρώντας παράλληλα υψηλή απόδοση και ενεργειακή απόδοση.

2. IoT και τεχνολογίες συσσωρευτών

Η ανάπτυξη των συστημάτων IoT (Internet of Things) έχει επηρεάσει σημαντικά τον τρόπο με τον οποίο οι συσκευές επικοινωνούν και αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους. Το IoT περιλαμβάνει ένα δίκτυο φυσικών συσκευών, αισθητήρων και άλλων τεχνολογιών που είναι συνδεδεμένες στο Διαδίκτυο και μπορούν να συλλέγουν και να ανταλλάσσουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Οι συσκευές αυτές περιλαμβάνουν από καθημερινά αντικείμενα, όπως έξυπνες οικιακές συσκευές και φορητές συσκευές, έως βιομηχανικά μηχανήματα και αυτοματοποιημένα συστήματα[2]. Αυτή η διασύνδεση επιτρέπει την ανάπτυξη σύγχρονων, αυτοματοποιημένων και έξυπνων συστημάτων, τα οποία μπορούν να παρακολουθούν και να ελέγχουν τις συνθήκες λειτουργίας τους χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που καθορίζουν την επιτυχία των συστημάτων IoT είναι η ενεργειακή αυτονομία και η αποδοτικότητα. Δεδομένου ότι πολλές από αυτές τις συσκευές βρίσκονται σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες τοποθεσίες, είναι κρίσιμο να διαθέτουν επαρκή αποθήκευση ενέργειας και χαμηλή κατανάλωση για να εξασφαλίσουν συνεχή και απρόσκοπτη λειτουργία. Συχνά η αντικατάσταση των συσσωρευτών αυτών είναι δύσκολη και οικονομικά δυσχερείς. Για την επέκταση της

διάρκειας ζωής των συστημάτων αυτών, είναι απαραίτητη η επαναφόρτιση των συσσωρευτών. Για την επαναφόρτιση χρησιμοποιούνται τεχνικές energy harvesting. Με τη χρήση των τεχνικών αυτών, αξιοποιείται διάχυτη ενέργεια από το περιβάλλον η οποία μετατρέπεται σε ωφέλιμο ηλεκτρικό ρεύμα. Στην παρακάτω εικόνα, απεικονίζονται οι διαφορετικές μορφές διάχυτης ενέργειας.



Εικόνα 2. Μορφές διάχυτης ενέργειας

Η εξέλιξη των τεχνολογιών συσσωρευτών έχει οδηγήσει σε βελτιώσεις στις ενεργειακές ιδιότητες, στην ασφάλεια και στη μακροχρόνια απόδοση, καθιστώντας τις μπαταρίες αυτές την κύρια επιλογή για σύγχρονες εφαρμογές IoT. Οι μπαταρίες Li-Ion, με την υψηλή ενεργειακή πυκνότητά τους και την ταχεία δυνατότητα φόρτισης, προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή απόδοση σε συνδυασμό με μικρό μέγεθος και βάρος[3]. Επιπλέον, οι μπαταρίες LFP προσφέρουν αυξημένη σταθερότητα και ασφάλεια, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για εφαρμογές που απαιτούν αντοχή σε σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες και υψηλές θερμοκρασίες.

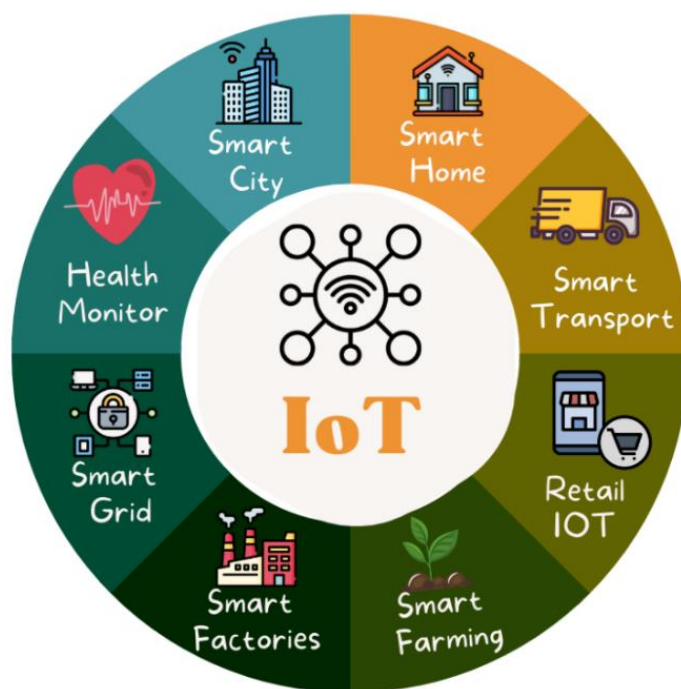
Η συμβολή των τεχνολογιών συσσωρευτών στο IoT δεν περιορίζεται μόνο στην αποθήκευση ενέργειας αλλά επεκτείνεται και στη διαχείριση της ενεργειακής κατανάλωσης. Καθώς οι κόμβοι IoT λειτουργούν με τη χρήση έξυπνων αισθητήρων και συστημάτων επικοινωνίας, είναι απαραίτητο να αξιοποιούνται συσσωρευτές που μπορούν να υποστηρίξουν αποτελεσματικά αυτές τις λειτουργίες, μειώνοντας παράλληλα το ενεργειακό τους αποτύπωμα. Οι προκλήσεις που προκύπτουν από τη χρήση των συσσωρευτών περιλαμβάνουν την ανάγκη για βελτίωση της διάρκειας ζωής τους, τη

μείωση των κινδύνων υπερθέρμανσης και τη βελτίωση της απόδοσής τους σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας.

2.1 Ιστορική εξέλιξη συστημάτων IoT

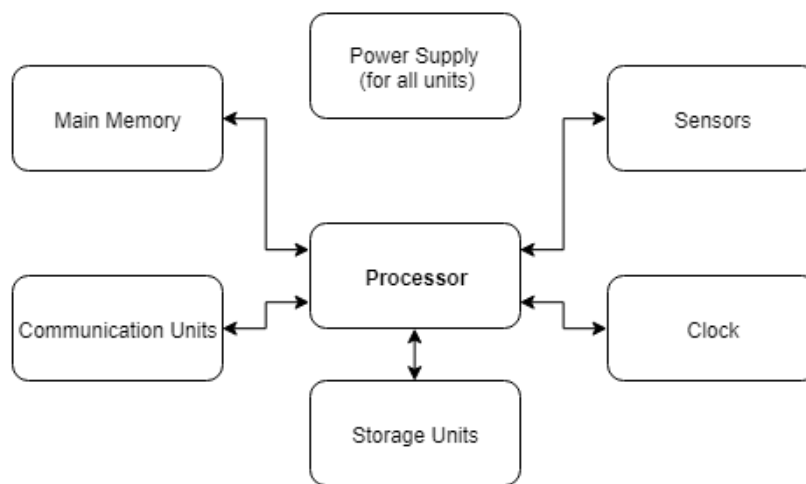
Ο όρος Internet of Things (IoT) περιγράφει ένα δίκτυο φυσικών αντικειμένων ή "πραγμάτων" που είναι εξοπλισμένα με τεχνολογία για να συλλέγουν, να ανταλλάσσουν και να επεξεργάζονται δεδομένα μέσω του Διαδικτύου. Αυτά τα αντικείμενα μπορούν να είναι απλές συσκευές, όπως αισθητήρες και έξυπνα ρολόγια, έως πιο περίπλοκα συστήματα, όπως βιομηχανικά μηχανήματα και αυτοματοποιημένα οχήματα. Η εξέλιξη του IoT είναι αποτέλεσμα της σύγκλισης πολλών τεχνολογιών, όπως η ασύρματη επικοινωνία, η μικροηλεκτρονική, και οι υπολογιστικές πλατφόρμες, που κατέστησαν δυνατή τη διασύνδεση εκατομμυρίων συσκευών σε ένα κοινό δίκτυο[4].

Η ιδέα της διασύνδεσης αντικειμένων ξεκίνησε τη δεκαετία του 1980, αλλά η πραγματική ανάπτυξη των συστημάτων IoT άρχισε να αποκτά μορφή με την άνοδο της ευρυζωνικής σύνδεσης, τη μείωση του κόστους των αισθητήρων και τη βελτίωση των υπολογιστικών δυνατοτήτων. Στις αρχές του 21ου αιώνα, οι τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας, όπως το Wi-Fi, το Bluetooth και το 4G, έδωσαν νέα ώθηση στην ανάπτυξη του IoT, επιτρέποντας τη δημιουργία δικτύων συνδεδεμένων συσκευών που μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους με μεγαλύτερη ταχύτητα και αξιοπιστία.



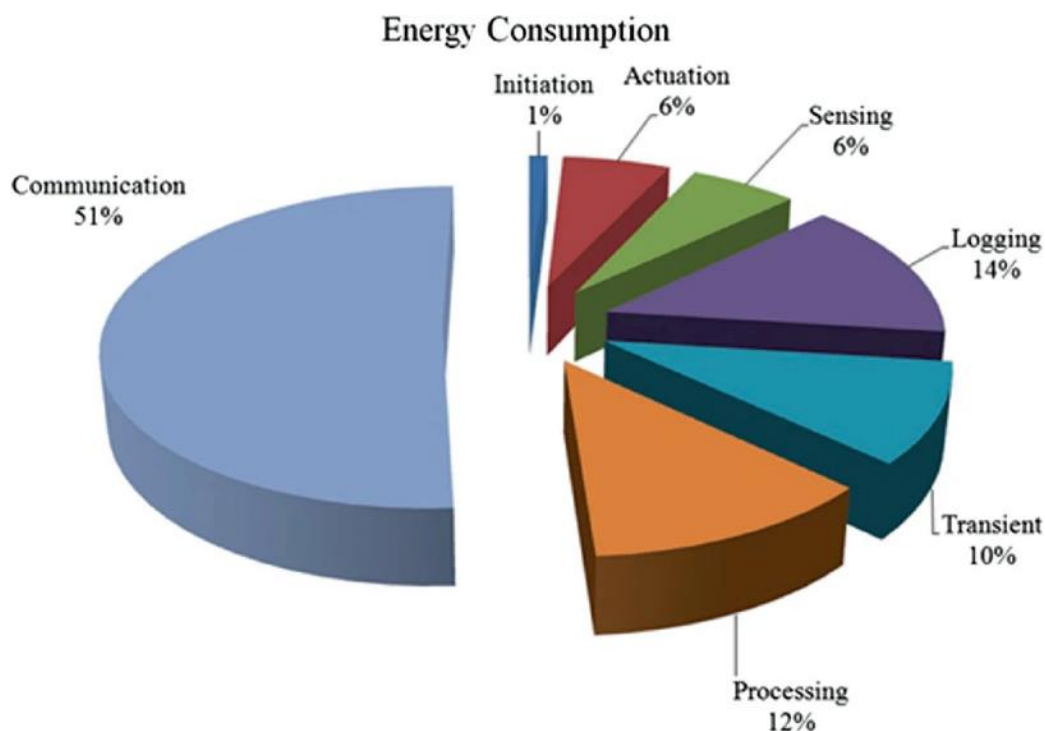
Εικόνα 3. Διάγραμμα IoT[5]

Οι κόμβοι IoT είναι οι θεμελιώδεις μονάδες που απαρτίζουν το δίκτυο των συνδεδεμένων συσκευών. Αυτοί οι κόμβοι μπορούν να λειτουργούν ως ανεξάρτητες οντότητες ή να συνεργάζονται με άλλους κόμβους για τη συλλογή και την ανάλυση δεδομένων. Ένας τυπικός κόμβος IoT περιλαμβάνει έναν αισθητήρα για τη συλλογή δεδομένων, έναν επεξεργαστή για την επεξεργασία των δεδομένων, μια μονάδα επικοινωνίας για την αποστολή των δεδομένων σε έναν κεντρικό διακομιστή ή στο cloud και το υποσύστημα τροφοδοσίας. Το υποσύστημα τροφοδοσίας ενσωματώνει τα απαραίτητα μικροηλεκτρονικά στοιχεία για τη συγκομιδή και αποθήκευση ενέργειας από το περιβάλλον[6]. Οι κόμβοι αυτοί είναι εξοπλισμένοι με συσσωρευτές που επιτρέπουν τη μακροχρόνια λειτουργία τους σε απομακρυσμένες ή μη προσβάσιμες περιοχές.



Εικόνα 4. Διάγραμμα κόμβου IoT[7]

Η ενεργειακή απόδοση των κόμβων IoT αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα για την αποτελεσματική λειτουργία των συστημάτων αυτών. Οι κόμβοι IoT συνήθως απαιτούν χαμηλή κατανάλωση ισχύος, ιδιαίτερα όταν βρίσκονται σε κατάσταση αναμονής. Η κατανάλωση ισχύος ποικίλλει ανάλογα με την εφαρμογή και τη λειτουργία του κόμβου, με το προφίλ ισχύος να εξαρτάται από παράγοντες όπως η συχνότητα των μετρήσεων, η ισχύς μετάδοσης, και η συχνότητα των δεδομένων που αποστέλλονται. Για παράδειγμα, οι κόμβοι που βρίσκονται σε περιβάλλοντα με χαμηλή ενεργειακή απαίτηση μπορούν να λειτουργούν για μήνες ή ακόμα και χρόνια με μία μόνο φόρτιση της μπαταρίας τους, ενώ κόμβοι που απαιτούν περισσότερη ισχύ για συχνή μετάδοση δεδομένων ή επεξεργασία μπορεί να χρειάζονται τακτική φόρτιση ή αντικατάσταση των συσσωρευτών.



Εικόνα 5. Τυπική ενεργειακή κατανάλωση κόμβου IoT[8]

Η εξέλιξη του IoT έχει φέρει επαναστατικές αλλαγές σε πολλούς τομείς, όπως η βιομηχανία, η υγειονομική περίθαλψη, η γεωργία, και οι έξυπνες πόλεις. Η δυνατότητα παρακολούθησης και ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει στους χρήστες να λαμβάνουν πιο ενημερωμένες αποφάσεις, να βελτιστοποιούν τις διαδικασίες και να μειώνουν το κόστος λειτουργίας. Στη γεωργία, για παράδειγμα, το IoT επιτρέπει την ακριβή παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών, ενώ στη βιομηχανία, συστήματα IoT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προληπτική συντήρηση μηχανημάτων, αυξάνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας το χρόνο διακοπής λειτουργίας.

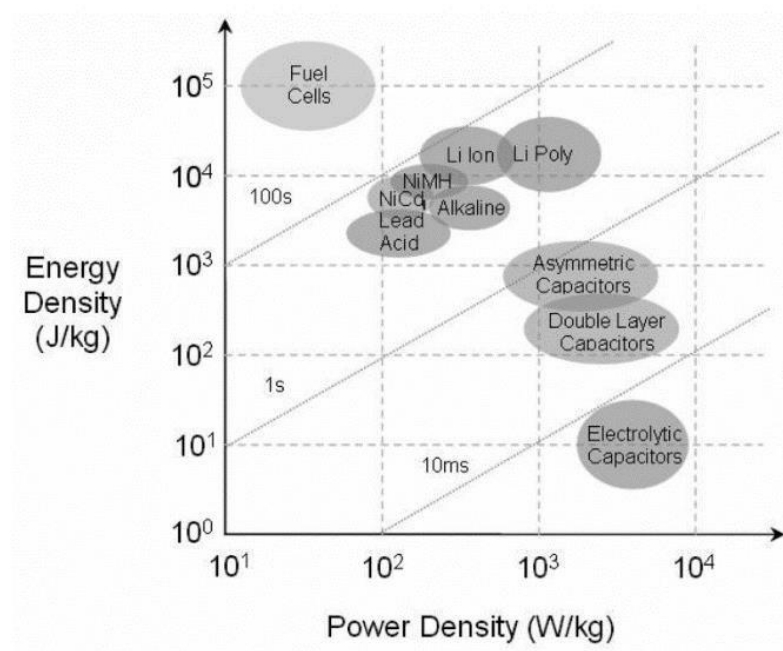
Καθώς το IoT συνεχίζει να εξελίσσεται, οι κόμβοι και οι τεχνολογίες που το υποστηρίζουν γίνονται όλο και πιο εξελιγμένοι. Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, όπως το 5G και η τεχνητή νοημοσύνη (AI), υπόσχεται να αυξήσει περαιτέρω τις δυνατότητες του IoT, επιτρέποντας τη δημιουργία πιο έξυπνων, αυτόνομων συστημάτων που θα μπορούν να αλληλοεπιδρούν με το περιβάλλον τους σε πραγματικό χρόνο και να προσαρμόζονται αυτόματα στις συνθήκες λειτουργίας τους.

2.2 Τεχνολογίες συσσωρευτών

Οι συσσωρευτές παίζουν έναν καθοριστικό ρόλο στην ενεργειακή υποστήριξη των συστημάτων IoT, καθιστώντας δυνατή τη συνεχή λειτουργία των συσκευών σε

περιβάλλοντα όπου η πρόσβαση σε σταθερό ηλεκτρικό δίκτυο είναι περιορισμένη ή ανύπαρκτη. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές IoT που χρησιμοποιούνται σε απομακρυσμένες περιοχές, έξυπνες πόλεις, βιομηχανικές εγκαταστάσεις και αγροκτήματα, όπου η αξιόπιστη και σταθερή τροφοδοσία είναι ζωτικής σημασίας για τη συνεχή συλλογή δεδομένων και την αδιάλειπτη λειτουργία των συστημάτων[9]. Η τεχνολογία των συσσωρευτών διαδραματίζει επίσης κεντρικό ρόλο στην υποστήριξη των εφαρμογών που απαιτούν αυτόνομη λειτουργία για μακρά χρονικά διαστήματα, όπως σε περιπτώσεις αισθητήρων που καταγράφουν περιβαλλοντικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο ή σε κόμβους που επικοινωνούν ασύρματα μεταξύ τους.

Η ραγδαία εξέλιξη των τεχνολογιών συσσωρευτών τις τελευταίες δεκαετίες έχει οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση, την ασφάλεια και τη διάρκεια ζωής των μπαταριών. Αυτές οι βελτιώσεις έχουν διευκολύνει τη δημιουργία αποδοτικότερων και πιο αξιόπιστων συστημάτων IoT. Για παράδειγμα, οι νέες τεχνολογίες συσσωρευτών παρέχουν μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα, επιτρέποντας την αποθήκευση περισσότερης ενέργειας σε μικρότερο όγκο και μειώνοντας το βάρος της συσκευής.



Εικόνα 6. Ενεργειακή πυκνότητα vs Πυκνότητα ισχύος σε ταμειυτήρες ενέργειας[10]

Επιπλέον, η αυξημένη ασφάλεια και η σταθερότητα των σύγχρονων συσσωρευτών τους καθιστά ιδανικούς για εφαρμογές που απαιτούν αντοχή σε ακραίες θερμοκρασίες ή συνθήκες υγρασίας, κάτι που είναι κοινό σε πολλές περιπτώσεις χρήσης των IoT συστημάτων.

Οι κύριες μετρικές που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των συσσωρευτών περιλαμβάνουν τα εξής[11]:

- **Ενεργειακή πυκνότητα:** Η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει ένας συσσωρευτής σε σχέση με το μέγεθος ή το βάρος του. Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα είναι απαραίτητη για τις μικρές, ελαφριές συσκευές IoT που πρέπει να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς ανάγκη για συχνή φόρτιση ή αντικατάσταση της μπαταρίας. Η χρήση μπαταριών με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα συμβάλλει επίσης στη μείωση του συνολικού βάρους της συσκευής, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για φορητές ή τοποθετημένες σε δυσπρόσιτα σημεία εφαρμογές.
- **Πυκνότητα ισχύος:** Ο ρυθμός με τον οποίο ένας συσσωρευτής μπορεί να αποδώσει ενέργεια. Η ισχύς πυκνότητας είναι κρίσιμη για εφαρμογές IoT που απαιτούν γρήγορη παροχή ισχύος σε σύντομο χρονικό διάστημα, όπως για παράδειγμα συσκευές που λειτουργούν με παλμική φόρτιση ή που ενεργοποιούνται περιοδικά για να αποστείλουν δεδομένα σε έναν κεντρικό κόμβο. Οι μπαταρίες που μπορούν να αποδώσουν υψηλή ισχύ πυκνότητας είναι ιδανικές για αυτές τις περιπτώσεις, καθώς παρέχουν άμεση και γρήγορη ισχύ όταν είναι απαραίτητο.
- **Διάρκεια ζωής:** Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης που μπορεί να υποστηρίξει ένας συσσωρευτής πριν μειωθεί σημαντικά η απόδοσή του. Μακροχρόνια διάρκεια ζωής σημαίνει μειωμένη ανάγκη για συντήρηση και αντικατάσταση, γεγονός που είναι ζωτικής σημασίας για απομακρυσμένες εφαρμογές IoT.
- **Χρόνος φόρτισης:** Ο χρόνος που απαιτείται για την πλήρη φόρτιση του συσσωρευτή. Γρήγοροι χρόνοι φόρτισης είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για συσκευές IoT που πρέπει να επιστρέφουν σε λειτουργία το συντομότερο δυνατό.
- **Θερμοκρασιακή σταθερότητα:** Η ικανότητα του συσσωρευτή να λειτουργεί αποτελεσματικά σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες χωρίς να παρουσιάζει προβλήματα υπερθέρμανσης ή αστάθειας.

Η πρόοδος στις τεχνολογίες συσσωρευτών, όπως οι μπαταρίες λιθίου-ιόντων (Li-Ion) και λιθίου-φωσφορικού σιδήρου (LFP), έχει οδηγήσει σε βελτιώσεις που καλύπτουν αυτές τις μετρικές. Οι μπαταρίες Li-Ion είναι ιδιαίτερα γνωστές για την υψηλή ενεργειακή πυκνότητά τους, που τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές IoT με αυξημένες απαιτήσεις

ισχύος και περιορισμένο χώρο. Από την άλλη πλευρά, οι μπαταρίες LFP προσφέρουν αυξημένη θερμοκρασιακή σταθερότητα και ανθεκτικότητα σε ακραίες συνθήκες, καθιστώντας τις ιδανικές για πιο απαιτητικά περιβάλλοντα.

Ο ιδανικός συσσωρευτής για συστήματα IoT θα πρέπει να πληροί διάφορες απαιτήσεις προκειμένου να εξασφαλίζεται η αποδοτική και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος:

- **Υψηλή ενεργειακή και ισχύ πυκνότητα:** Για την αποθήκευση μεγάλης ποσότητας ενέργειας σε μικρό χώρο και για την παροχή γρήγορης απόδοσης ισχύος όταν είναι απαραίτητο. Αυτές οι μετρικές είναι κρίσιμες για συσκευές IoT που πρέπει να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς συχνή φόρτιση, αλλά και για συσκευές που απαιτούν στιγμιαία αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, όπως οι αισθητήρες που λειτουργούν με παλμικά σήματα.
- **Μεγάλη θερμοκρασιακή σταθερότητα:** Η ικανότητα των συσσωρευτών να λειτουργούν σε ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας είναι εξαιρετικά σημαντική για πολλές εφαρμογές IoT που μπορεί να τοποθετηθούν σε εξωτερικούς χώρους, βιομηχανικές περιοχές ή άλλες απαιτητικές συνθήκες.
- **Μακροχρόνια διάρκεια ζωής:** Η ικανότητα ενός συσσωρευτή να διατηρεί την απόδοσή του για πολλούς κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης μειώνει την ανάγκη για συχνή αντικατάσταση και συντήρηση. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για απομακρυσμένες ή δύσκολα προσβάσιμες τοποθεσίες όπου η αντικατάσταση ή η συντήρηση του συσσωρευτή μπορεί να είναι δαπανηρή και δύσκολη.
- **Αποτελεσματική φόρτιση:** Η δυνατότητα γρήγορης επαναφόρτισης επιτρέπει στις συσκευές IoT να επιστρέφουν γρήγορα σε πλήρη λειτουργία, ελαχιστοποιώντας το χρόνο διακοπής. Αυτό είναι κρίσιμο για εφαρμογές IoT που απαιτούν συνεχή λειτουργία χωρίς μεγάλες καθυστερήσεις.
- **Οικονομική αποδοτικότητα και βιωσιμότητα:** Οι συσσωρευτές που είναι οικονομικά αποδοτικοί και περιβαλλοντικά φιλικοί είναι απαραίτητοι για εφαρμογές IoT που απαιτούν μακροχρόνια βιώσιμες λύσεις.

Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα των συσσωρευτών επικεντρώνεται στη βελτίωση αυτών των χαρακτηριστικών, με στόχο τη δημιουργία πιο αποδοτικών και βιώσιμων λύσεων που να ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες ανάγκες των εφαρμογών IoT. Η αναζήτηση του ιδανικού συσσωρευτή παραμένει ένας από τους πιο δυναμικούς τομείς της τεχνολογικής καινοτομίας, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών και

αξιόπιστων συστημάτων που μπορούν να λειτουργούν αποτελεσματικά ακόμα και στις πιο απαιτητικές συνθήκες.

Οι κυριότερες τεχνολογίες συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται στα συστήματα IoT περιλαμβάνουν[12]:

1. Μπαταρίες Λιθίου-Ιόντων (Li-Ion):

Οι μπαταρίες Λιθίου-Ιόντων είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία στις φορητές συσκευές και τα συστήματα IoT, κυρίως λόγω της *υψηλής ενεργειακής πυκνότητάς* τους. Αυτή η ιδιότητα τους επιτρέπει να αποθηκεύουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας σε ένα σχετικά μικρό μέγεθος, καθιστώντας τις ιδανικές για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή απόδοση σε περιορισμένο χώρο. Ειδικότερα στις συσκευές IoT, όπου η συσκευασία συχνά πρέπει να είναι μικρή και ελαφριά, οι μπαταρίες Li-Ion ανταποκρίνονται ιδανικά στις ανάγκες αυτές. Για παράδειγμα, σε αισθητήρες IoT που τοποθετούνται σε δυσπρόσιτες περιοχές ή σε συσκευές που πρέπει να παραμένουν αόρατες, οι μπαταρίες αυτές προσφέρουν τη δυνατότητα λειτουργίας χωρίς να προσθέτουν σημαντικό βάρος ή όγκο στη συσκευή.



Εικόνα 7. Μπαταρία Λιθίου-Ιόντων[13]

Επιπλέον, οι μπαταρίες Li-Ion έχουν *ταχείς χρόνους φόρτισης*, κάτι που είναι εξαιρετικά σημαντικό για συσκευές IoT που πρέπει να επανέρχονται γρήγορα σε λειτουργία μετά από φόρτιση. Η ικανότητα γρήγορης επαναφόρτισης επιτρέπει τη μείωση του χρόνου διακοπής λειτουργίας των συσκευών και αυξάνει τη συνολική αποδοτικότητα των συστημάτων IoT, καθώς οι συσκευές μπορούν να συνεχίσουν τη συλλογή και την αποστολή δεδομένων χωρίς μεγάλες καθυστερήσεις. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε εφαρμογές που απαιτούν συνεχή λειτουργία, όπως τα βιομηχανικά περιβάλλοντα ή οι έξυπνες πόλεις,

όπου οι συσκευές IoT παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες για την παρακολούθηση και διαχείριση των υποδομών.

Μια άλλη σημαντική ιδιότητα των μπαταριών Li-Ion είναι η *μακροχρόνια απόδοσή τους*. Οι μπαταρίες αυτές έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και μπορούν να αντέξουν πολυάριθμους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης χωρίς σημαντική μείωση της απόδοσής τους. Αυτό σημαίνει ότι οι συσκευές IoT που χρησιμοποιούν μπαταρίες Li-Ion μπορούν να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς να απαιτείται συχνή αντικατάσταση της μπαταρίας, γεγονός που μειώνει τα λειτουργικά κόστη και τον χρόνο συντήρησης. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές όπου οι συσκευές τοποθετούνται σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις με περιορισμένη πρόσβαση, η μακροχρόνια ανθεκτικότητα των μπαταριών Li-Ion είναι εξαιρετικά σημαντική.

Τέλος, οι μπαταρίες Li-Ion είναι *ασφαλείς* και σταθερές σε ποικίλες συνθήκες λειτουργίας. Παρόλο που απαιτούν ειδική διαχείριση για την αποφυγή υπερφόρτισης ή υπερθέρμανσης, οι σύγχρονες τεχνολογίες έχουν ενσωματώσει πολυάριθμα μέτρα ασφαλείας για την προστασία από αυτές τις καταστάσεις. Οι προστατευτικοί μηχανισμοί που έχουν προστεθεί στις μπαταρίες αυτές διασφαλίζουν ότι μπορούν να λειτουργούν με ασφάλεια ακόμα και σε περιβάλλοντα όπου οι θερμοκρασίες και τα φορτία ποικίλλουν σημαντικά, κάτι που είναι σύνηθες στις εφαρμογές IoT.

2. Μπαταρίες Λιθίου-Φωσφορικού Σιδήρου (LFP):

Οι μπαταρίες Λιθίου-Φωσφορικού Σιδήρου (LFP) αποτελούν μια εξαιρετικά αποδοτική τεχνολογία στον τομέα των συσσωρευτών, με σημαντικά πλεονεκτήματα σε ό,τι αφορά την ασφάλεια, τη θερμοκρασιακή σταθερότητα και τη διάρκεια ζωής τους. Αυτές οι ιδιότητες τις καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλες για εφαρμογές IoT που λειτουργούν σε απαιτητικά περιβάλλοντα, όπως βιομηχανικές εγκαταστάσεις, εξωτερικές τοποθεσίες, και περιοχές με ακραίες καιρικές συνθήκες.



Εικόνα 8. Μπαταρία Λιθίου-Φωσφορικού Σιδήρου

Οι μπαταρίες LFP διακρίνονται για την *αυξημένη ασφάλεια* που προσφέρουν. Σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες λιθίου, οι μπαταρίες LFP έχουν μικρότερο κίνδυνο υπερθέρμανσης και έκρηξης, ακόμα και σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας. Αυτή η ιδιότητα είναι κρίσιμη σε εφαρμογές όπου οι συσκευές IoT εκτίθενται σε έντονες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις ή λειτουργούν συνεχώς σε περιβάλλοντα με υψηλές θερμοκρασίες. Για παράδειγμα, σε εξωτερικά δίκτυα αισθητήρων ή σε βιομηχανικές εφαρμογές, η θερμοκρασιακή σταθερότητα των μπαταριών LFP επιτρέπει τη συνεχή και αξιόπιστη λειτουργία χωρίς τον κίνδυνο δυσλειτουργιών που μπορεί να προκαλέσουν διακοπές στη λειτουργία του συστήματος.

Η *θερμοκρασιακή σταθερότητα* των μπαταριών LFP είναι μια από τις βασικές τους αρετές. Μπορούν να λειτουργούν αξιόπιστα σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από πολύ χαμηλά έως πολύ υψηλά επίπεδα, χωρίς να επηρεάζεται η απόδοσή τους. Αυτό τις καθιστά ιδανικές για εφαρμογές που εκτίθενται σε ακραίες συνθήκες, όπως η γεωργία, όπου οι συσκευές IoT χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των καλλιεργειών, ή σε συστήματα παρακολούθησης του καιρού και περιβαλλοντικών συνθηκών, όπου απαιτείται συνεχής λειτουργία υπό διαφορετικές θερμοκρασίες.

Οι μπαταρίες LFP έχουν επίσης το πλεονέκτημα της *μεγαλύτερης διάρκειας ζωής* σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες μπαταριών λιθίου. Οι συσσωρευτές αυτοί μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης χωρίς σημαντική μείωση της απόδοσής τους, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές IoT που απαιτούν μακροχρόνια λειτουργία χωρίς ανάγκη συχνής συντήρησης ή αντικατάστασης της μπαταρίας. Αυτό είναι κρίσιμο σε περιπτώσεις όπου οι συσκευές βρίσκονται σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, όπου η πρόσβαση για συντήρηση είναι δύσκολη και δαπανηρή.

Συγκεκριμένα, οι μπαταρίες LFP μπορούν να λειτουργούν για *χιλιάδες κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης* χωρίς απώλεια της απόδοσής τους. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να υποστηρίξουν τη συνεχή λειτουργία των συστημάτων IoT για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, μειώνοντας το κόστος συντήρησης και αυξάνοντας τη συνολική αξιοπιστία των συστημάτων. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές όπως οι έξυπνες πόλεις, όπου εγκαθίστανται μεγάλες ποσότητες συσκευών IoT για παρακολούθηση της κίνησης, της ποιότητας του αέρα ή της κατανάλωσης ενέργειας, η μακροχρόνια ανθεκτικότητα των μπαταριών LFP είναι εξαιρετικά σημαντική.

Η *ικανότητα λειτουργίας σε απομακρυσμένες τοποθεσίες* καθιστά τις μπαταρίες LFP ιδανικές για εφαρμογές IoT που απαιτούν αξιόπιστη τροφοδοσία σε περιοχές με περιορισμένη πρόσβαση σε συντήρηση. Σε περιβάλλοντα όπως απομακρυσμένα αγροκτήματα, πετρελαϊκές εγκαταστάσεις, ή δάση όπου η πρόσβαση για συντήρηση των συσκευών είναι δύσκολη, οι μπαταρίες LFP μπορούν να εξασφαλίσουν τη συνεχή λειτουργία των συσκευών για μεγάλα χρονικά διαστήματα, χωρίς ανάγκη για συχνή αντικατάσταση ή συντήρηση.

Η μακροχρόνια διάρκεια ζωής και η αυξημένη αντοχή σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας καθιστούν τις μπαταρίες LFP ιδιαίτερα χρήσιμες για περιπτώσεις όπου η αξιοπιστία και η αντοχή είναι πρωταρχικής σημασίας. Η δυνατότητα να λειτουργούν σταθερά ακόμα και σε απομακρυσμένες ή δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες καθιστά αυτή την τεχνολογία ιδανική για εφαρμογές IoT που απαιτούν σταθερή τροφοδοσία χωρίς συχνές διακοπές.

3. Μπαταρίες Λιθίου-Πολυμερούς (Li-Po):

Οι μπαταρίες Λιθίου-Πολυμερούς (Li-Po) αποτελούν μια εξέλιξη της τεχνολογίας λιθίου και προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε εφαρμογές όπου απαιτείται ευελιξία, λεπτό προφίλ και ελαφριά κατασκευή. Οι συσσωρευτές αυτοί χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα IoT, ειδικά σε περιπτώσεις όπου η φυσική προσαρμοστικότητα της μπαταρίας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επιλογή της.



Εικόνα 9. Μπαταρία Λιθίου Πολυμερούς

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των μπαταριών Li-Po είναι το *ευέλικτο σχήμα* τους. Σε αντίθεση με άλλους τύπους μπαταριών λιθίου, οι μπαταρίες Li-Po μπορούν να κατασκευαστούν σε λεπτά και ελαφριά μεγέθη, γεγονός που τις καθιστά εξαιρετικά προσαρμόσιμες για εφαρμογές IoT όπου ο διαθέσιμος χώρος είναι περιορισμένος. Αυτή η δυνατότητα ευέλικτης διαμόρφωσης του μεγέθους και του σχήματος της μπαταρίας τις καθιστά ιδανικές για χρήση σε μικρές και λεπτές συσκευές, όπως φορητά IoT, αισθητήρες ή συσκευές ενσωματωμένες σε άλλες δομές.

Οι μπαταρίες αυτές είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για *φορητές συσκευές IoT*, όπως έξυπνα ρολόγια, φορητές συσκευές υγείας και άλλες τεχνολογίες, όπου το μικρό βάρος και το λεπτό προφίλ είναι κρίσιμα για τη διατήρηση της άνεσης και της αισθητικής της συσκευής. Επιπλέον, οι μπαταρίες Li-Po χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπως τα drones και τα μικρά αυτόνομα ρομπότ, όπου το ελαφρύ βάρος επιτρέπει μεγαλύτερη αυτονομία και καλύτερη απόδοση κατά τη διάρκεια της πτήσης ή της κίνησης.

Η *ενεργειακή πυκνότητα* των μπαταριών Li-Po είναι συγκρίσιμη με αυτή των μπαταριών Li-Ion, κάτι που σημαίνει ότι μπορούν να αποθηκεύσουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας σε μικρό όγκο. Αυτό καθιστά τις μπαταρίες Li-Po ιδανικές για συσκευές IoT που απαιτούν ισχυρή απόδοση αλλά δεν μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλες ή βαριές μπαταρίες. Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα επιτρέπει στις συσκευές αυτές να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα με ελάχιστες ανάγκες φόρτισης, βελτιώνοντας την αυτονομία και την αποδοτικότητα της συσκευής.

Ωστόσο, σε αντίθεση με τις μπαταρίες Li-Ion, οι μπαταρίες Li-Po είναι πιο ευαίσθητες στις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως οι ακραίες θερμοκρασίες και η υγρασία. Αυτή η

ευαισθησία σημαίνει ότι οι μπαταρίες αυτές πρέπει να χρησιμοποιούνται σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα για να διασφαλίζεται η ασφάλεια και η αποδοτικότητά τους. Σε περιπτώσεις όπου οι μπαταρίες Li-Po εκτίθενται σε ακραίες θερμοκρασίες, υπάρχει κίνδυνος μειωμένης απόδοσης ή ακόμα και καταστροφής της μπαταρίας, γεγονός που περιορίζει την εφαρμογή τους σε εξωτερικά ή βιομηχανικά περιβάλλοντα.

Για παράδειγμα, ενώ οι μπαταρίες Li-Po είναι ιδανικές για συσκευές που χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους ή σε φορητές εφαρμογές, όπου οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι σταθερές και ελεγχόμενες, ενδέχεται να μην είναι κατάλληλες για εφαρμογές σε ακραίες θερμοκρασίες ή σε εξωτερικές τοποθεσίες. Αυτό τις καθιστά πιο κατάλληλες για προσωπικές συσκευές IoT ή εφαρμογές σε εσωτερικούς χώρους που απαιτούν λεπτό σχεδιασμό και ευέλικτη χρήση, αλλά όχι για συστήματα που λειτουργούν σε απαιτητικά ή ακραία περιβάλλοντα.

Οι μπαταρίες Li-Po προσφέρουν ένα συνδυασμό ευελιξίας, υψηλής ενεργειακής πυκνότητας και ελαφριού βάρους, καθιστώντας τις ιδανικές για εφαρμογές IoT που απαιτούν μικρό μέγεθος, ελαφριά κατασκευή και υψηλή ενεργειακή απόδοση. Παρά την ευαισθησία τους στις περιβαλλοντικές συνθήκες, οι μπαταρίες αυτές είναι από τις καλύτερες επιλογές για συσκευές που λειτουργούν σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα ή για φορητές εφαρμογές.

4. Μπαταρίες Νικελίου-Μεταλλικού Υδριδίου (NiMH):

Οι μπαταρίες Νικελίου-Μεταλλικού Υδριδίου (NiMH) αποτελούν μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία συσσωρευτών, που προσφέρει ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα, ιδίως σε εφαρμογές όπου η οικονομική αποδοτικότητα και η φιλικότητα προς το περιβάλλον είναι καθοριστικοί παράγοντες. Σε σχέση με άλλες παλαιότερες τεχνολογίες, όπως οι μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου (NiCd), οι μπαταρίες NiMH αποτελούν μια πιο αποδοτική και περιβαλλοντικά ασφαλή επιλογή, αν και δεν φτάνουν την απόδοση και την ενεργειακή πυκνότητα των μπαταριών λιθίου.



Εικόνα 10. Μπαταρία Νικελίου-Μεταλλικού Υδριδίου[14]

Οι μπαταρίες NiMH προσφέρουν *υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα* σε σχέση με τις παραδοσιακές μπαταρίες NiCd, γεγονός που τις καθιστά πιο αποδοτικές σε εφαρμογές που απαιτούν μακροχρόνια αποθήκευση ενέργειας σε συσκευές IoT. Παρόλο που η ενεργειακή τους πυκνότητα δεν μπορεί να συγκριθεί με αυτή των σύγχρονων μπαταριών λιθίου, είναι αρκετά καλή για εφαρμογές που δεν απαιτούν εξαιρετικά υψηλή απόδοση. Η αυξημένη ενεργειακή πυκνότητα σημαίνει ότι οι μπαταρίες NiMH μπορούν να αποθηκεύσουν περισσότερη ενέργεια σε σύγκριση με τις μπαταρίες NiCd, χωρίς να καταλαμβάνουν σημαντικά περισσότερο χώρο ή βάρος.

Αυτό τις καθιστά κατάλληλες για οικιακές συσκευές IoT, όπως έξυπνα ρολόγια, τηλεχειριστήρια, συστήματα συναγερμού ή μικρές φορητές συσκευές που δεν απαιτούν υψηλή ισχύ αλλά πρέπει να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς συχνή φόρτιση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η χρήση μπαταριών NiMH είναι οικονομικά αποδοτική και επαρκής για την κάλυψη των αναγκών.

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των μπαταριών NiMH είναι ότι είναι πιο φιλικές προς το περιβάλλον σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες μπαταριών, όπως οι μπαταρίες NiCd. Οι μπαταρίες NiMH δεν περιέχουν τοξικά μέταλλα, όπως το κάδμιο, το οποίο θεωρείται επιβλαβές για το περιβάλλον και την υγεία. Αυτό τις καθιστά πιο βιώσιμες επιλογές για εφαρμογές IoT που επιζητούν τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Σε πολλές περιπτώσεις, οι μπαταρίες αυτές ανακυκλώνονται πιο εύκολα και με λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον σε σχέση με τις παλαιότερες τεχνολογίες.

Η περιβαλλοντική φιλικότητα των μπαταριών NiMH καθιστά αυτή την τεχνολογία πιο ελκυστική για εφαρμογές που στοχεύουν στη βιωσιμότητα και την περιβαλλοντική υπευθυνότητα, όπως τα έξυπνα συστήματα διαχείρισης ενέργειας ή τα συστήματα παρακολούθησης περιβαλλοντικών δεδομένων. Επιπλέον, είναι μια εναλλακτική λύση για συσκευές που χρησιμοποιούν επαναφορτιζόμενες μπαταρίες αλλά δεν απαιτούν την υψηλή απόδοση των μπαταριών λιθίου.

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, οι μπαταρίες NiMH έχουν ορισμένα μειονεκτήματα σε σχέση με τις μπαταρίες λιθίου. Ένα από τα βασικά τους προβλήματα είναι ο μεγαλύτερος χρόνος φόρτισης που απαιτούν. Σε αντίθεση με τις μπαταρίες λιθίου που μπορούν να φορτίζονται ταχύτατα, οι μπαταρίες NiMH χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να φτάσουν στο 100% της φόρτισής τους. Αυτό μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα σε εφαρμογές IoT που απαιτούν συνεχή και άμεση λειτουργία, καθώς οι διακοπές για φόρτιση μπορεί να είναι χρονοβόρες.

Επιπλέον, οι μπαταρίες NiMH έχουν χαμηλότερη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με τις μπαταρίες λιθίου. Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης που μπορούν να υποστηρίξουν πριν μειωθεί η απόδοσή τους είναι μικρότερος, γεγονός που σημαίνει ότι οι συσκευές IoT που χρησιμοποιούν αυτές τις μπαταρίες θα χρειαστούν συχνότερη αντικατάσταση της μπαταρίας. Αυτό αυξάνει το συνολικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης των συσκευών σε μακροπρόθεσμο επίπεδο, καθιστώντας τις λιγότερο ελκυστικές για εφαρμογές όπου η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι κρίσιμη.

Λόγω της χαμηλότερης τιμής τους σε σχέση με τις μπαταρίες λιθίου, οι μπαταρίες NiMH χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου το κόστος είναι σημαντικός παράγοντας και η απόδοση της μπαταρίας δεν είναι τόσο κρίσιμη. Για παράδειγμα, σε συσκευές IoT που δεν απαιτούν άμεση απόδοση υψηλής ισχύος και όπου η οικονομική αποδοτικότητα είναι το κύριο ζητούμενο, οι μπαταρίες NiMH παρέχουν μια πιο προσιτή λύση. Αυτό τις καθιστά ιδανικές για μαζικές καταναλωτικές συσκευές ή για εφαρμογές που δεν λειτουργούν συνεχώς, όπως έξυπνα τηλεχειριστήρια, θερμοστάτες ή συστήματα συναγερμού.

Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι χαμηλότερες απαιτήσεις απόδοσης δικαιολογούν τη χρήση των NiMH, καθώς η εξοικονόμηση κόστους καθιστά τις συσκευές πιο προσιτές, χωρίς να θυσιάζεται η βασική λειτουργικότητα.

5. Μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου (NiCd):

Οι μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου (NiCd) αποτελούν μια παλαιότερη τεχνολογία που, αν και έχει αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από πιο σύγχρονες και αποδοτικές τεχνολογίες, συνεχίζει να χρησιμοποιείται σε ορισμένες ειδικές εφαρμογές.



Εικόνα 11. Μπαταρία Νικελίου-Καδμίου[15]

Οι μπαταρίες NiCd προσφέρουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα που τις καθιστούν κατάλληλες για περιβάλλοντα με έντονες συνθήκες, αλλά περιέχουν επίσης περιορισμούς, ιδιαίτερα όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις τοξικές ουσίες που περιλαμβάνουν.

Μία από τις κύριες ιδιότητες των μπαταριών NiCd είναι η ικανότητά τους να λειτουργούν αξιόπιστα σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Αυτές οι μπαταρίες είναι ιδιαίτερα ανθεκτικές σε ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες, τόσο σε χαμηλές όσο και σε υψηλές θερμοκρασίες, χωρίς να παρατηρείται σημαντική πτώση στην απόδοσή τους. Αυτό τις καθιστά ιδανικές για εφαρμογές σε εξωτερικά περιβάλλοντα, όπου οι συσκευές IoT πρέπει να λειτουργούν αδιάλειπτα, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες. Για παράδειγμα, οι μπαταρίες NiCd χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικά περιβάλλοντα ή σε γεωγραφικές περιοχές με έντονες διακυμάνσεις θερμοκρασίας, όπου η αξιοπιστία είναι κρίσιμη.

Η αντοχή τους σε ακραίες συνθήκες καθιστά τις μπαταρίες NiCd κατάλληλες για εφαρμογές όπως τα συστήματα IoT που τοποθετούνται σε απομακρυσμένες ή δύσκολες

τοποθεσίες, όπως ανιχνευτές περιβαλλοντικών δεδομένων, βιομηχανικοί αισθητήρες και συστήματα παρακολούθησης σε εξωτερικούς χώρους. Σε αυτά τα περιβάλλοντα, οι μπαταρίες NiCd παρέχουν αξιόπιστη τροφοδοσία, εξασφαλίζοντας ότι οι συσκευές IoT μπορούν να συνεχίσουν τη λειτουργία τους, παρά τις αντίξοες συνθήκες.

Οι μπαταρίες NiCd είναι γνωστές για την ικανότητά τους να αντέχουν σε έντονες συνθήκες φόρτισης και αποφόρτισης. Μπορούν να υποστούν γρήγορη φόρτιση και αποφόρτιση χωρίς να προκαλείται σημαντική ζημιά στη δομή τους, γεγονός που τους επιτρέπει να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις ή συχνή αλλαγή της τροφοδοσίας. Σε συστήματα IoT όπου οι συσκευές μπορεί να απαιτούν συνεχή παροχή ενέργειας ή γρήγορη επαναφόρτιση για να παραμείνουν λειτουργικές, οι μπαταρίες NiCd μπορούν να ανταποκριθούν σε αυτές τις απαιτήσεις.

Ωστόσο, η δυνατότητά τους να αντέχουν σε υψηλούς ρυθμούς φόρτισης τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη επαναφορά της λειτουργίας τους μετά από σύντομες διακοπές. Για παράδειγμα, σε συστήματα IoT που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές διεργασίες ή αυτόματους μετρητές κατανάλωσης ενέργειας, όπου η γρήγορη επαναφόρτιση είναι απαραίτητη για τη συνεχή παρακολούθηση και καταγραφή δεδομένων, οι μπαταρίες NiCd είναι μια αξιόπιστη λύση.

Παρά τα λειτουργικά τους πλεονεκτήματα, οι μπαταρίες NiCd έχουν σημαντικά περιβαλλοντικά μειονεκτήματα. Περιέχουν τοξικά υλικά, όπως το κάδμιο, που είναι εξαιρετικά επιβλαβή για το περιβάλλον και την υγεία των ανθρώπων. Αυτό έχει οδηγήσει σε αυστηρούς κανονισμούς σχετικά με τη χρήση και την ανακύκλωση των μπαταριών NiCd, καθώς και στη σταδιακή αντικατάστασή τους από πιο περιβαλλοντικά φιλικές τεχνολογίες, όπως οι μπαταρίες NiMH ή οι μπαταρίες λιθίου.

Η τοξικότητα του καδμίου που περιέχεται στις μπαταρίες NiCd καθιστά την ανακύκλωσή τους ιδιαίτερα σημαντική. Η ακατάλληλη απόρριψη των μπαταριών αυτών μπορεί να προκαλέσει σοβαρή ρύπανση του περιβάλλοντος, ιδίως του εδάφους και των υδάτων. Επιπλέον, λόγω των περιβαλλοντικών και υγειονομικών επιπτώσεων, η χρήση των μπαταριών NiCd έχει μειωθεί σημαντικά και προτιμώνται πλέον σε πολύ συγκεκριμένες εφαρμογές όπου οι ανάγκες για ανθεκτικότητα και απόδοση σε ακραίες συνθήκες υπερτερούν των περιβαλλοντικών ανησυχιών.

Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται συνολικά τα χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων συσσωρευτών.

Specifications	Lead Acid	NiCd	NiMH	Li-ion ¹		
				Cobalt	Manganese	Phosphate
Specific energy (Wh/kg)	30–50	45–80	60–120	150–250	100–150	90–120
Internal resistance	Very Low	Very low	Low	Moderate	Low	Very low
Cycle life ² (80% DoD)	200–300	1,000 ³	300–500 ³	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000
Charge time ⁴	8–16h	1–2h	2–4h	2–4h	1–2h	1–2h
Overcharge tolerance	High	Moderate	Low	Low. No trickle charge		
Self-discharge/month (room temp)	5%	20% ⁵	30% ⁵	<5% Protection circuit consumes 3%/month		
Cell voltage (nominal)	2V	1.2V ⁶	1.2V ⁶	3.6V ⁷	3.7V ⁷	3.2–3.3V
Charge cutoff voltage (V/cell)	2.40 Float 2.25	Full charge detection by voltage signature		4.20 typical Some go to higher V		3.60
Discharge cutoff voltage (V/cell, 1C)	1.75V	1.00V		2.50–3.00V		2.50V
Peak load current Best result	5C ⁸ 0.2C	20C 1C	5C 0.5C	2C <1C	>30C <10C	>30C <10C
Charge temperature	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	0 to 45°C (32 to 113°F)		0 to 45°C ⁹ (32 to 113°F)		
Discharge temperature	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	–20 to 65°C (–4 to 149°F)		–20 to 60°C (–4 to 140°F)		
Maintenance requirement	3–6 months ¹⁰ (topping chg.)	Full discharge every 90 days when in full use		Maintenance-free		
Safety requirements	Thermally stable	Thermally stable, fuse protection		Protection circuit mandatory ¹¹		
In use since	Late 1800s	1950	1990	1991	1996	1999
Toxicity	Very high	Very high	Low	Low		
Coulombic efficiency ¹²	~90%	~70% slow charge ~90% fast charge		99%		
Cost	Low	Moderate		High ¹³		

Εικόνα 12. Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών συσσωρευτών[10]

2.3 Συσσωρευτές τεχνολογίας Λιθίου σε κόμβους IoT

Η χρήση συσσωρευτών τεχνολογίας λιθίου αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες λύσεις για την τροφοδοσία των κόμβων IoT, λόγω της υψηλής απόδοσης και της αξιοπιστίας τους. Οι κόμβοι IoT συχνά απαιτούν αυτονομία και ανθεκτικότητα σε απαιτητικές περιβαλλοντικές συνθήκες, κάτι που καθιστά τους συσσωρευτές λιθίου ιδανικούς για τέτοιου είδους εφαρμογές. Ωστόσο, η επιλογή του κατάλληλου τύπου συσσωρευτή και η κατανόηση των επιθυμητών και ανεπιθύμητων χαρακτηριστικών τους είναι κρίσιμη για την αποδοτική λειτουργία των συσκευών IoT[16].

Επιθυμητά χαρακτηριστικά συσσωρευτών Λιθίου για Κόμβους IoT:

- **Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα:** Οι συσσωρευτές λιθίου προσφέρουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, επιτρέποντας την αποθήκευση μεγάλης ποσότητας ενέργειας σε μικρό όγκο. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για μικρού μεγέθους συσκευές IoT που απαιτούν μεγάλη διάρκεια λειτουργίας με περιορισμένο βάρος και μέγεθος.
- **Μεγάλη διάρκεια ζωής:** Η δυνατότητα των συσσωρευτών λιθίου να διατηρούν την αποδοτικότητά τους για μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης μειώνει την ανάγκη για συχνή αντικατάσταση, καθιστώντας τους ιδανικούς για συσκευές που λειτουργούν σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές.
- **Γρήγορη και αποδοτική φόρτιση:** Οι συσσωρευτές λιθίου έχουν τη δυνατότητα γρήγορης φόρτισης, κάτι που επιτρέπει στους κόμβους IoT να επανέλθουν σε πλήρη λειτουργία γρήγορα μετά από περίοδο αδράνειας, εξασφαλίζοντας συνεχή παροχή υπηρεσιών.
- **Θερμοκρασιακή σταθερότητα:** Η ικανότητα των συσσωρευτών λιθίου να λειτουργούν αξιόπιστα σε διάφορες θερμοκρασίες είναι κρίσιμη για τις εφαρμογές IoT, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με ακραίες κλιματικές συνθήκες.

Παρά τα πολυάριθμα πλεονεκτήματα των συσσωρευτών λιθίου, υπάρχουν επίσης ορισμένα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά που πρέπει να ληφθούν υπόψη:

- **Κίνδυνος υπερθέρμανσης:** Οι συσσωρευτές λιθίου είναι ευάλωτοι σε υπερθέρμανση, ιδιαίτερα όταν εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες ή όταν υπόκεινται σε υπερφόρτιση. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ζητήματα ασφάλειας, όπως διαρροές ή ακόμα και εκρήξεις.
- **Απαιτήσεις συντήρησης:** Παρά τη μεγάλη διάρκεια ζωής τους, οι συσσωρευτές λιθίου μπορεί να απαιτούν τακτική συντήρηση για να διατηρήσουν την αποδοτικότητά τους, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται σε απαιτητικές εφαρμογές IoT.
- **Περιορισμένη απόδοση σε ακραίες συνθήκες:** Παρόλο που οι συσσωρευτές λιθίου μπορούν να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, η απόδοσή

τους μπορεί να μειωθεί σημαντικά σε εξαιρετικά χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες, κάτι που επηρεάζει τη συνολική λειτουργία των κόμβων IoT.

- **Υψηλό κόστος παραγωγής:** Οι συσσωρευτές λιθίου συχνά έχουν υψηλότερο κόστος παραγωγής σε σχέση με άλλες τεχνολογίες μπαταριών, γεγονός που μπορεί να αυξήσει το συνολικό κόστος των συστημάτων IoT, ιδιαίτερα σε μεγάλες κλίμακες εφαρμογών.

Παρά τα μειονεκτήματα αυτά, η συνεχής βελτίωση των συσσωρευτών λιθίου και η ανάπτυξη νέων υλικών και μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας στοχεύουν στη μείωση των περιορισμών τους και στην αύξηση της απόδοσης και της ασφάλειάς τους. Οι συσσωρευτές λιθίου παραμένουν η πιο αξιόπιστη επιλογή για την τροφοδοσία των κόμβων IoT, ενισχύοντας την αυτονομία και την αποδοτικότητα των συσκευών σε ποικίλες και απαιτητικές εφαρμογές.

3. Μετρήσεις χαρακτηριστικών συσσωρευτών Li-Ion και LFP

Η αξιολόγηση των χαρακτηριστικών των συσσωρευτών Li-Ion και LFP αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα για την κατανόηση της απόδοσής τους σε εφαρμογές IoT. Οι μετρήσεις της πραγματικής χωρητικότητας σε χαμηλά ρεύματα εκφόρτισης και φόρτισης, καθώς και οι μετρήσεις με παλμικές καταναλώσεις τύπου IoT, είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό της λειτουργικής ικανότητας και της αξιοπιστίας των συσσωρευτών. Μέσω των αυτόνομων συστημάτων καταγραφής και ανάλυσης που έχουν αναπτυχθεί με τη χρήση της πλατφόρμας LabVIEW, είναι δυνατή η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των παραμέτρων φόρτισης και αποφόρτισης[17]. Αυτές οι διαδικασίες επιτρέπουν μια λεπτομερή και ακριβή ανάλυση των επιδόσεων των μπαταριών, προσφέροντας πολύτιμα δεδομένα για τη βελτιστοποίηση των συστημάτων IoT και την ενίσχυση της ενεργειακής αποδοτικότητας.

3.1 Σύστημα αυτόματης φόρτισης/εκφόρτισης συσσωρευτών

Για τις ανάγκες της μελέτης, αναπτύχθηκαν δύο αυτόνομα συστήματα μέτρησης μέσω της πλατφόρμας LabVIEW της National Instruments. Αυτά τα συστήματα σχεδιάστηκαν ειδικά για την καταγραφή και ανάλυση των διαδικασιών φόρτισης και αποφόρτισης των μπαταριών, προσφέροντας ένα πλήρως αυτοματοποιημένο περιβάλλον με εξαιρετική ακρίβεια και συνέπεια. Χρησιμοποιώντας το LabVIEW, τα συστήματα αυτά επιτρέπουν

την παρακολούθηση κρίσιμων παραμέτρων, όπως η τάση και το ρεύμα, σε πραγματικό χρόνο και παρέχουν δυνατότητες αποθήκευσης των δεδομένων για περαιτέρω ανάλυση.

Σύστημα Φόρτισης Μπαταριών

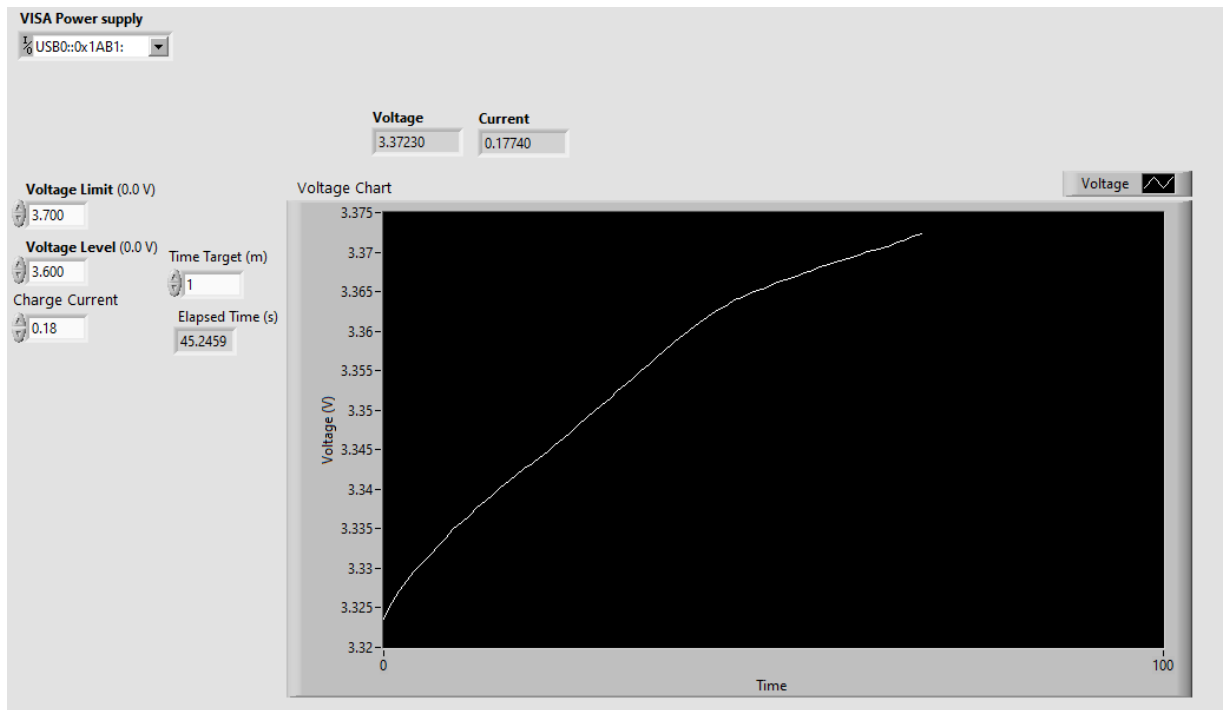
Το πρώτο σύστημα εστιάζει στη διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών, χρησιμοποιώντας μια διαδραστική διεπαφή για την καταγραφή και ανάλυση των δεδομένων. Για τις ανάγκες της διάταξης χρησιμοποιήθηκε το τροφοδοτικό Rigol DP832A. Το τροφοδοτικό είναι ικανό να παρέχει πολύ χαμηλά ρεύματα έως 1mA. Το τροφοδοτικό προγραμματίζεται από το χρήστη στην εκκίνηση της φόρτισης.



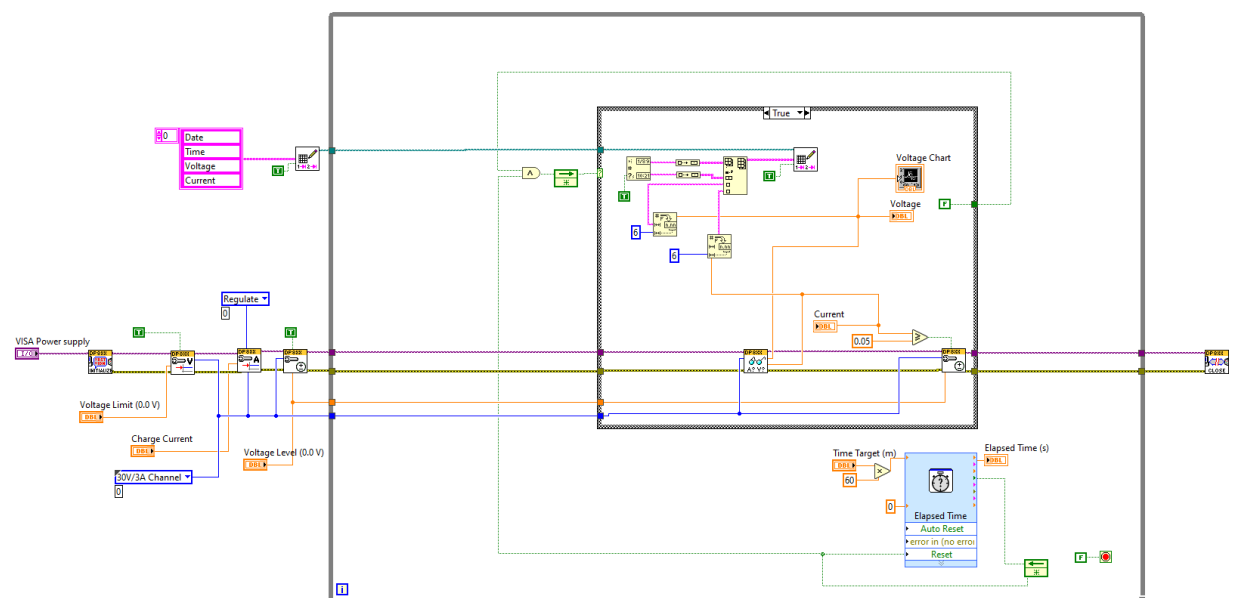
Εικόνα 13. Τροφοδοτικό Rigol DP832A

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, το σύστημα παρακολουθεί συνεχώς την τάση και το ρεύμα που παρέχονται από το τροφοδοτικό, όπως φαίνεται στη σχετική εικόνα του γραφήματος τάσης (Voltage Chart). Αυτή η συνεχής καταγραφή των δεδομένων είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της δυναμικής της φόρτισης και της κατάστασης της μπαταρίας, επιτρέποντας την παρακολούθηση κρίσιμων σημείων, όπως η σταδιακή αύξηση της τάσης καθώς η μπαταρία πλησιάζει στην πλήρη φόρτιση. Με τη χρήση του “Time target”, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει το χρόνο μεταξύ των μετρήσεων της τάσης. Για την αποφυγή υπερφόρτωσης της μπαταρίας, ο χρήστης ορίζει το όριο τάσης φόρτισης αλλά και το ρεύμα φόρτισης. Η φόρτιση σταματάει αυτόματα όταν το ρεύμα φόρτισης πέσει κάτω από το 20% του αρχικού ρεύματος.

Η δυνατότητα αποθήκευσης των δεδομένων σε αρχείο Excel μέσω της πλατφόρμας LabVIEW διευκολύνει την περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση των μετρήσεων. Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει την οπτικοποίηση των δεδομένων και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την απόδοση της μπαταρίας κατά τη φόρτιση, παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες για την αποδοτικότητα του συστήματος φόρτισης και την υγεία του συσσωρευτή σε βάθος χρόνου.



Εικόνα 14. Γραφική διεπαφή χρήστη (σύστημα φόρτισης)



Εικόνα 15. Block διάγραμμα λειτουργίας (σύστημα φόρτισης)

Σύστημα Αποφόρτισης Μπαταριών

Το δεύτερο σύστημα επικεντρώνεται στην αποφόρτιση των συσσωρευτών, παρέχοντας τη δυνατότητα παρακολούθησης της τάσης και του ρεύματος σε συνθήκες εκφόρτισης. Όπως φαίνεται στις εικόνες που παρατίθενται, η καταγραφή των δεδομένων αποφόρτισης προσφέρει λεπτομερείς πληροφορίες για τη σταθερότητα της τάσης κατά την αποφόρτιση και τον ρυθμό μείωσης της ενέργειας της μπαταρίας. Αυτή η διαδικασία είναι εξίσου σημαντική με τη φόρτιση, καθώς βοηθά στην αξιολόγηση της αντοχής και της απόδοσης της μπαταρίας υπό διάφορα φορτία.

Για την αποφόρτιση των μπαταριών χρησιμοποιήθηκε το BK Precision 8601.



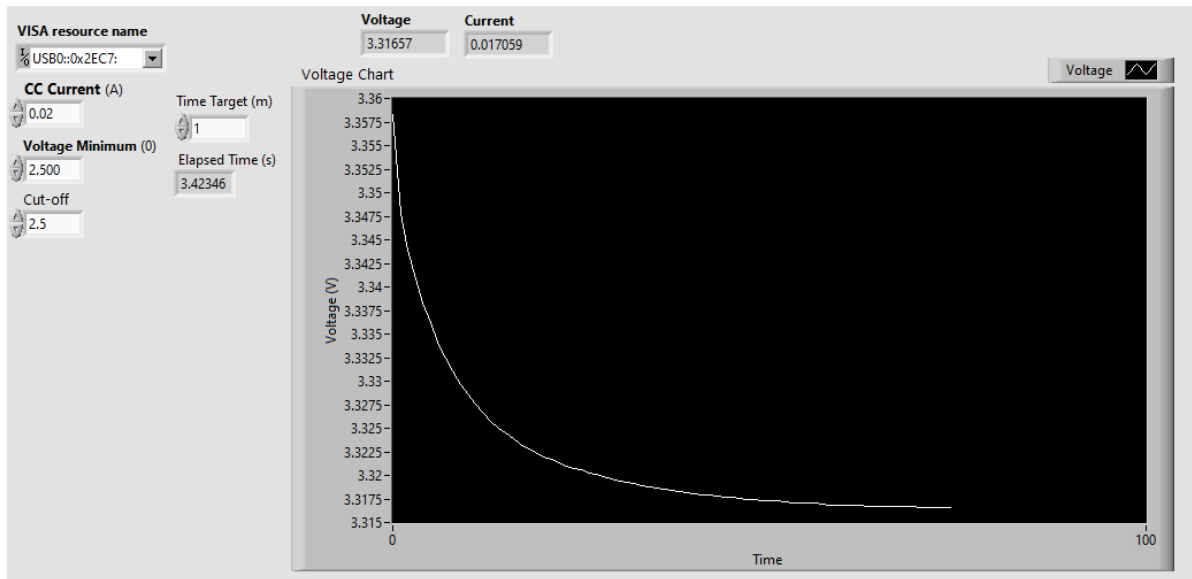
Εικόνα 16. BK Precision 8601 Electronic DC Load

Το όργανο αυτό λειτουργεί ως φορτίο DC με δυνατότητα ρύθμισης της αντίστασης φορτίου μέχρι και 7500Ω. Η ικανότητα του αυτή το καθιστά κατάλληλο για μετρήσεις αποφόρτισης συσσωρευτών με πολύ χαμηλά ρεύματα. Το ελάχιστο ρεύμα είναι ίσο με:

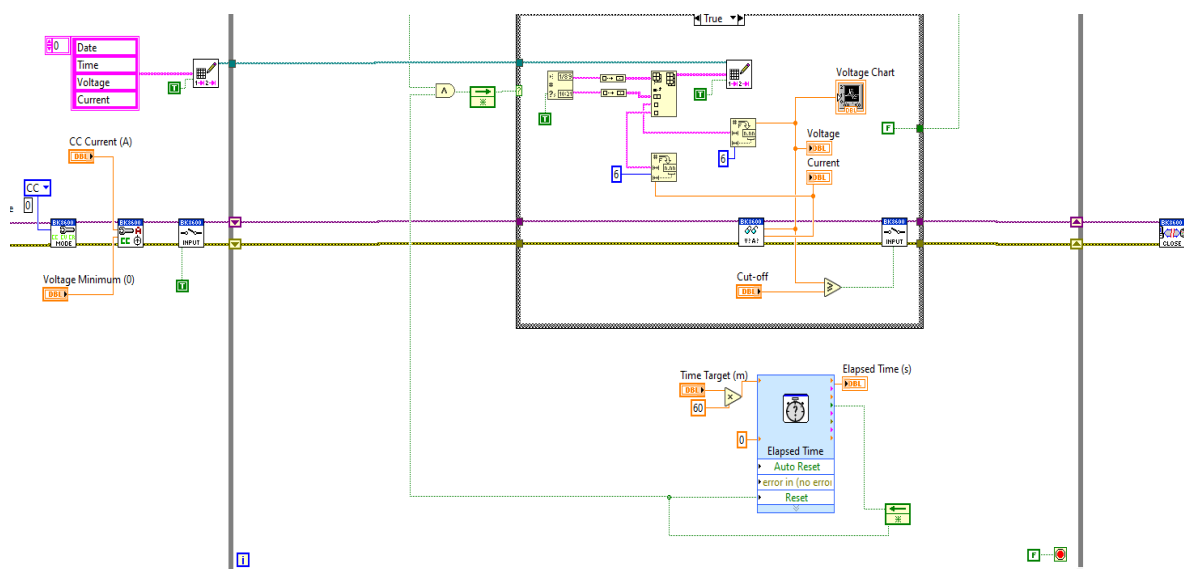
$$I = \frac{V}{R} = \frac{2.5V}{7500\Omega} = 3.3mA$$

Με τη χρήση του LabVIEW, το όργανο προγραμματίζεται στο επιθυμητό επίπεδο ρεύματος αποφόρτισης. Κατά τη εκκίνηση ο χρήστης ορίζει την ελάχιστη τάση (τάση προστασίας), στην οποία απενεργοποιείται το φορτίο. Η καταγραφή των δεδομένων

αποφόρτισης εξασφαλίζει ότι όλες οι κρίσιμες πληροφορίες αποθηκεύονται με ακρίβεια, παρέχοντας ένα αξιόπιστο μέσο για τη μακροχρόνια παρακολούθηση και σύγκριση των επιδόσεων των συσσωρευτών.



Εικόνα 17. Γραφική διεπαφή χρήστη (σύστημα αποφόρτισης)



Εικόνα 18. Block διάγραμμα λειτουργίας (σύστημα αποφόρτισης)

Η χρήση της πλατφόρμας LabVIEW για την ανάπτυξη συστημάτων φόρτισης και αποφόρτισης μπαταριών προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα που ενισχύουν την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα της ανάλυσης. Με την αυτοματοποίηση των διαδικασιών καταγραφής δεδομένων, μειώνεται η πιθανότητα ανθρώπινου λάθους, ενώ τα αποτελέσματα παραμένουν συνεπή και αξιόπιστα. Οι μετρήσεις τάσης και ρεύματος

καταγράφονται σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας άμεση πρόσβαση στην ανάλυση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς των συσσωρευτών.

Η ευελιξία του LabVIEW επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή των παραμέτρων λειτουργίας ανάλογα με τις ανάγκες της μελέτης, βελτιώνοντας την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και διευκολύνοντας την προσαρμογή των διαδικασιών φόρτισης και αποφόρτισης. Η αποθήκευση των δεδομένων σε μορφή Excel διευκολύνει την περαιτέρω επεξεργασία και οπτικοποίηση, επιτρέποντας τη μακροχρόνια παρακολούθηση των όπεριδόσεων των συσσωρευτών και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων.

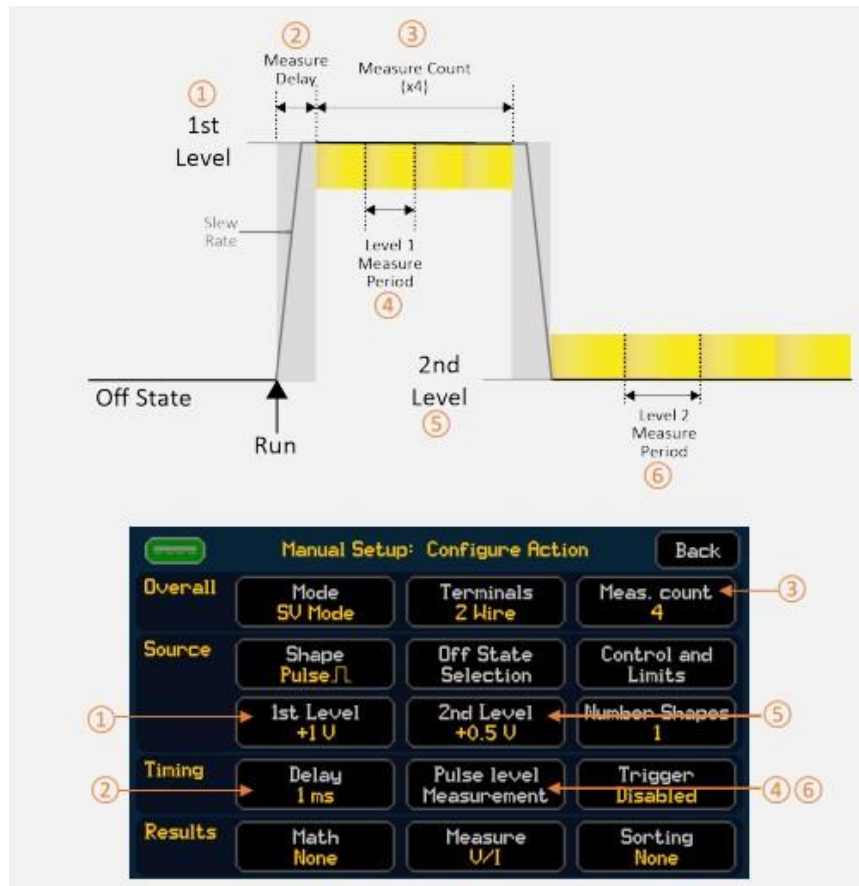
Σύστημα Παλμικής Φόρτισης/Αποφόρτισης Μπαταριών

Για την αξιολόγηση των συσσωρευτών με παλμικά φορτία χρησιμοποιήθηκε όργανο Source Meter Unit, πιο συγκεκριμένα το SMU4001 της AimTTi.



Εικόνα 19. Aim TTi SMU 4001

Το όργανο προγραμματίζεται ώστε να παράγει παλμούς διαφορετικού πλάτους και συχνότητας με το επιθυμητό όριο ρεύματος.



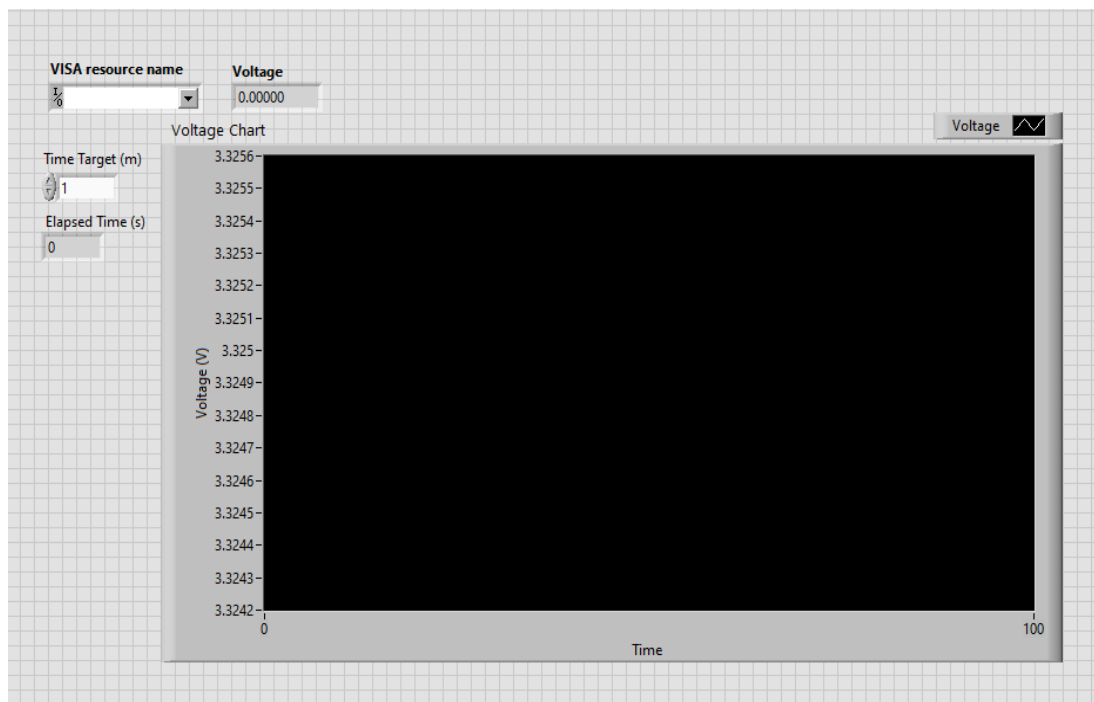
Εικόνα 20. Προγραμματισμός παλμού

Λόγω δυσλειτουργίας των LabView driver δεν ήταν εφικτός ο προγραμματισμός του οργάνου μέσω του προγράμματος. Αντ' αυτού χρησιμοποιήθηκε εξωτερικό πολύμετρο το οποίο συνδέθηκε παράλληλα στην μπαταρία. Το πολύμετρο που χρησιμοποιήθηκε είναι το Keysight 34465A.



Εικόνα 21. Keysight 34465A

Το πολύμετρο προγραμματίστηκε μέσω LabView ώστε να καταγράφει την τάση στα άκρα της μπαταρίας ανά τακτά (προγραμματιζόμενα) διαστήματα.



Εικόνα 22. Γραφική απεικόνιση καταγραφεία

3.2 Καμπύλες φόρτισης

Η διαδικασία φόρτισης των μπαταριών είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της απόδοσής τους και της αντοχής τους σε μακροχρόνια χρήση. Ιδιαίτερα στα συστήματα IoT, η σταθερή και αξιόπιστη παροχή ενέργειας είναι απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία των συσκευών. Οι καμπύλες φόρτισης χρησιμοποιούνται για να αποτυπώσουν τη συμπεριφορά της τάσης μιας μπαταρίας κατά τη διάρκεια της φόρτισης, επιτρέποντας έτσι τη μελέτη της ενεργειακής αποδοτικότητας, της σταθερότητας και της συνολικής απόδοσης της μπαταρίας.

Η φόρτιση των μπαταριών Li-Ion και LiFePO₄ ακολουθεί συγκεκριμένα στάδια που έχουν σχεδιαστεί για να εξασφαλίζουν αποτελεσματική και ασφαλή φόρτιση, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής τους και προστατεύοντας την εσωτερική χημεία τους. Και στις δύο τεχνολογίες μπαταριών, η φόρτιση χωρίζεται σε δύο βασικά στάδια: το στάδιο **σταθερού ρεύματος (Constant Current - CC)** και το στάδιο **σταθερής τάσης (Constant Voltage - CV)**. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιες διαφορές μεταξύ των δύο ως προς τη συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά της φόρτισης.

Στάδιο Σταθερού Ρεύματος (CC):

Κατά το αρχικό στάδιο της φόρτισης, τόσο στις μπαταρίες Li-Ion όσο και στις LiFePO₄, το ρεύμα φόρτισης παραμένει σταθερό. Η τάση της μπαταρίας αυξάνεται σταδιακά καθώς η ενέργεια αποθηκεύεται στα κύτταρα. Σε αυτό το στάδιο, η μπαταρία φορτίζεται σχετικά γρήγορα και καλύπτει περίπου το 70-80% της συνολικής χωρητικότητάς της.

- Για τις μπαταρίες Li-Ion, το ρεύμα φόρτισης εφαρμόζεται μέχρι η τάση της μπαταρίας να φτάσει περίπου τα 4.2V ανά στοιχείο.
- Στις μπαταρίες LiFePO₄, η τάση αυτή είναι χαμηλότερη, συνήθως γύρω στα 3.6-3.65V ανά στοιχείο.

Στάδιο Σταθερής Τάσης (CV):

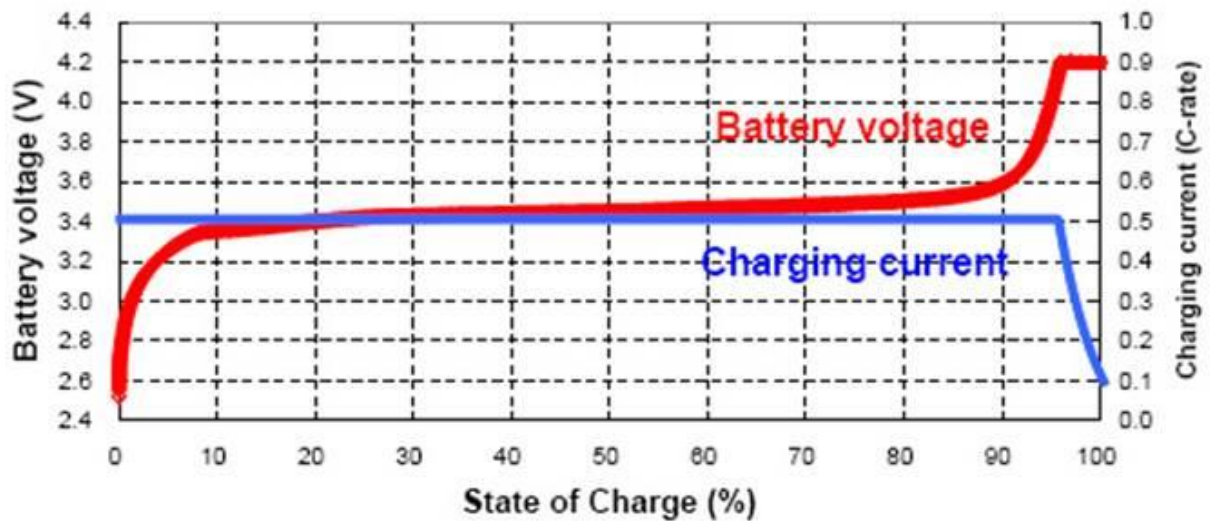
Όταν η τάση της μπαταρίας φτάσει την προκαθορισμένη τιμή (4.2V για τις Li-Ion και 3.6-3.65V για τις LiFePO₄), η φόρτιση περνά στο στάδιο σταθερής τάσης. Στο στάδιο αυτό, η τάση παραμένει σταθερή, αλλά το ρεύμα φόρτισης μειώνεται σταδιακά καθώς η μπαταρία πλησιάζει το 100% της χωρητικότητάς της. Η μείωση του ρεύματος είναι απαραίτητη για την προστασία της μπαταρίας και την αποφυγή υπερφόρτισης.

Αυτό το στάδιο μπορεί να είναι πιο χρονοβόρο, καθώς η φόρτιση επιβραδύνεται, ειδικά στα τελευταία ποσοστά (90-100%). Στις μπαταρίες LiFePO₄, το στάδιο αυτό ολοκληρώνεται όταν το ρεύμα πέσει κάτω από ένα ορισμένο επίπεδο (π.χ. 0.05C).

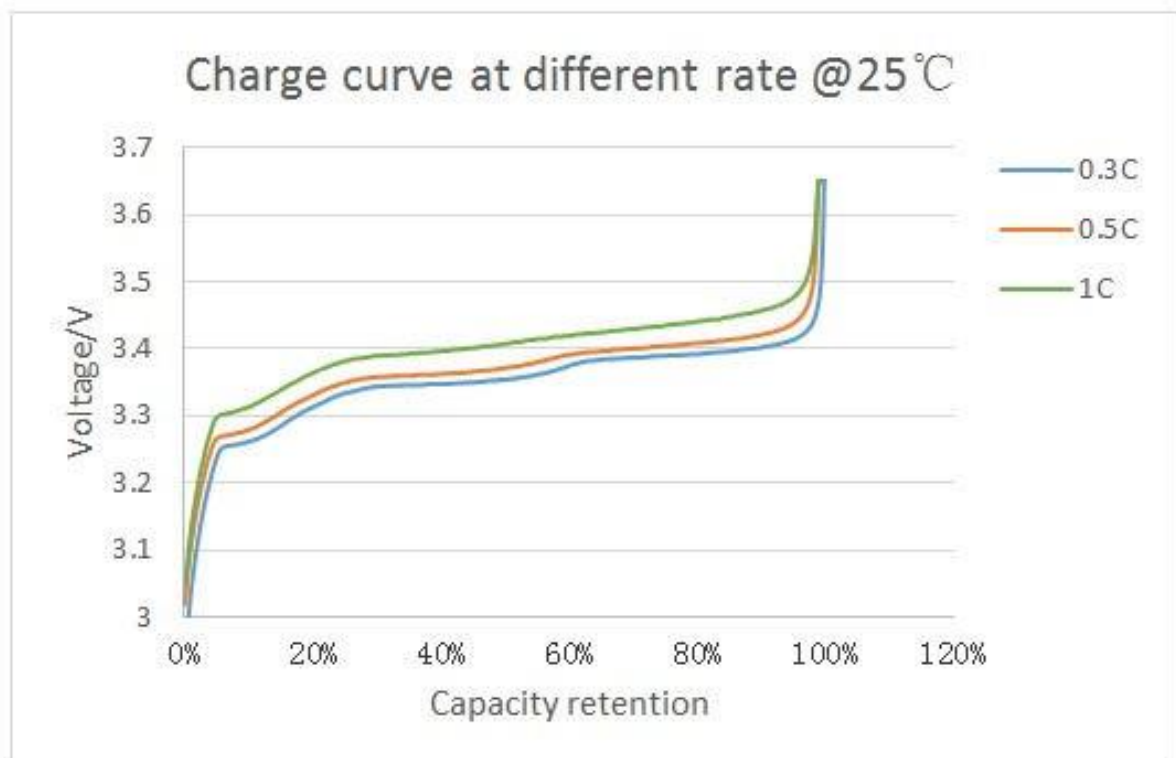
Τερματισμός Φόρτισης:

Η φόρτιση τερματίζεται συνήθως όταν το ρεύμα φόρτισης πέσει κάτω από ένα όριο που έχει προκαθοριστεί από το σύστημα φόρτισης, ή μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Στις μπαταρίες Li-Ion, το όριο ρεύματος είναι συνήθως πολύ χαμηλό (κοντά στο 0.01C), ενώ στις LiFePO₄ το σύστημα φόρτισης σταματά τη διαδικασία όταν το ρεύμα μειωθεί σε αντίστοιχα χαμηλά επίπεδα.

Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται οι καμπύλες φόρτισης μπαταριών Li-Ion και LiFePO₄.



Εικόνα 23. Καμπύλη φόρτισης μπαταρίας Li-Ion



Εικόνα 24. Καμπύλη φόρτισης μπαταρίας LiFePO4

Στο πλαίσιο της μελέτης αυτής, πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές μετρήσεις της καμπύλης φόρτισης, με στόχο την ανάλυση της συμπεριφοράς τους σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Οι συσσωρευτές που επιλέχθηκαν είναι οι:

- EFEST IMR26650 5000mAh



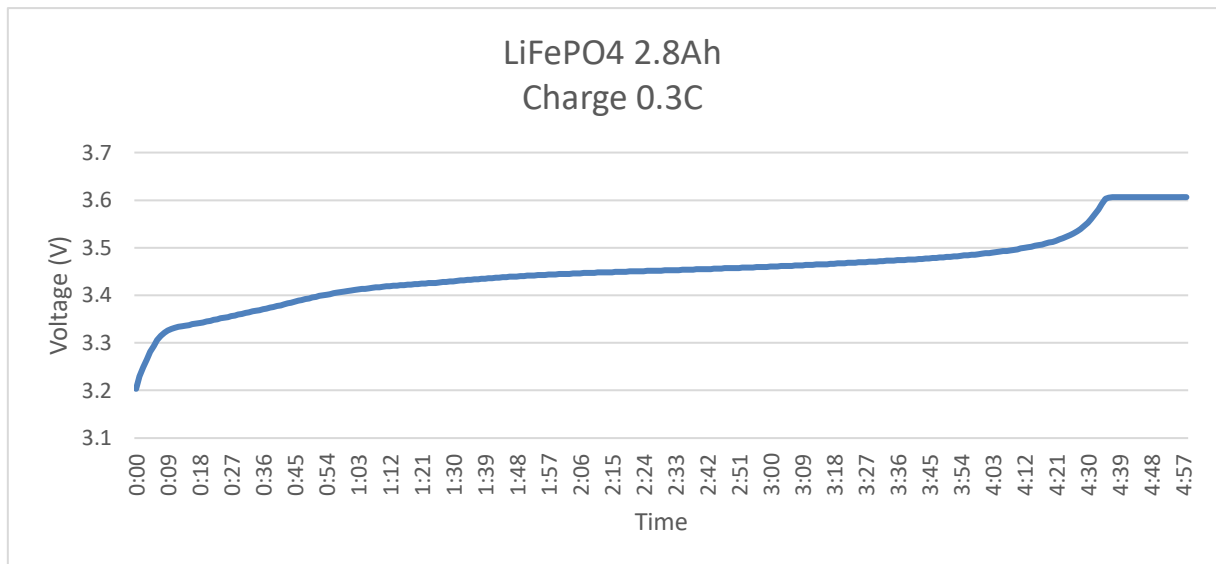
Εικόνα 25. Μπαταρία Li-Ion EFEST IMR26650

- Soshine LiFePO4 2800mAh



Εικόνα 26. Μπαταρία LiFePO4 Soshine

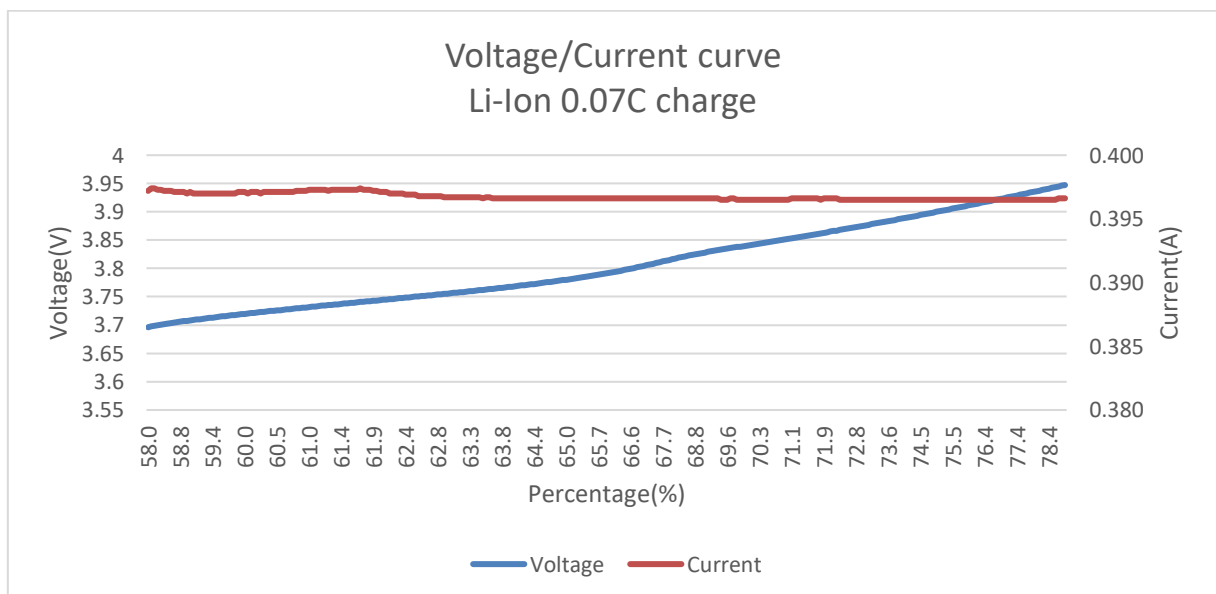
Για την επιβεβαίωση της βιβλιογραφίας, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις φόρτισης των δύο τύπων συσσωρευτών με σχετικά υψηλά ρεύματα. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις φόρτισης με πολύ χαμηλά ή παλμικά ρεύματα. Ακολουθεί το γράφημα που παρουσιάζει την καμπύλη φόρτισης μιας μπαταρίας LiFePO4 2.8Ah με ρυθμό φόρτισης 0.3C:



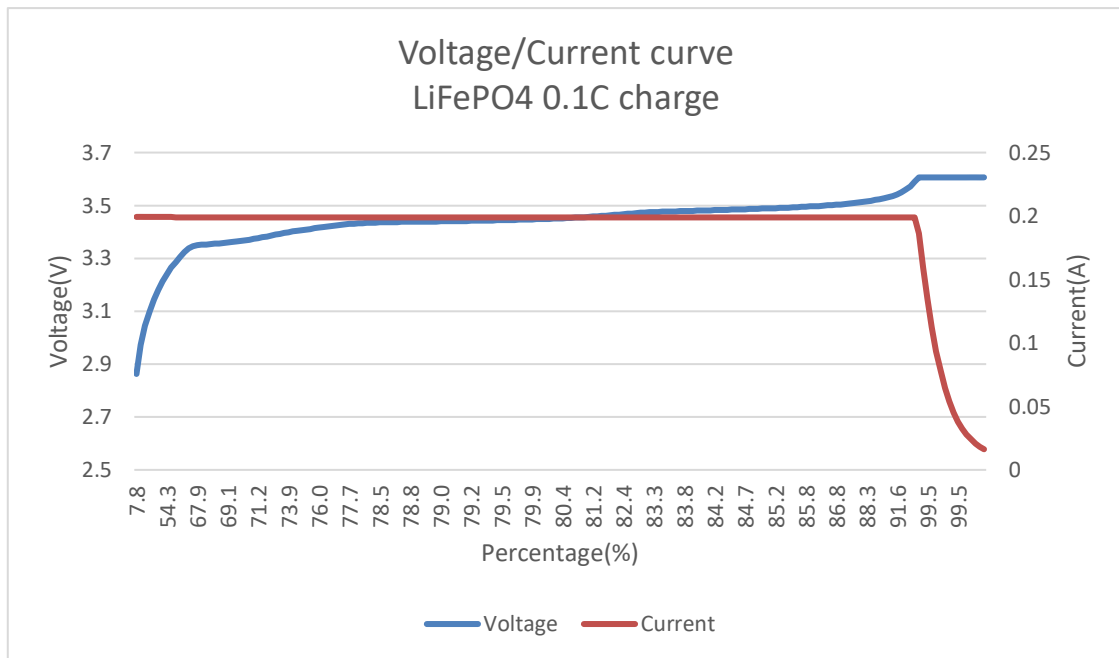
Εικόνα 27. Καμπύλη φόρτισης μπαταρίας με ρεύμα ίσο με 0.3C

Η καμπύλη φόρτισης που παρουσιάζεται στο παραπάνω γράφημα ακολουθεί την τυπική πορεία φόρτισης για μπαταρίες τεχνολογίας Λιθίου-Φωσφορικού Σιδήρου (LiFePO₄). Στο αρχικό στάδιο, παρατηρείται μια ταχεία αύξηση της τάσης, η οποία σταθεροποιείται περίπου στα 3.4V. Στη συνέχεια, η τάση παραμένει σχετικά σταθερή για το μεγαλύτερο διάστημα της φόρτισης, και αυξάνεται απότομα κοντά στο τέλος, όταν η μπαταρία πλησιάζει την πλήρη φόρτιση.

- Καμπύλες φόρτισης με ρεύμα ίσο με 0.1C



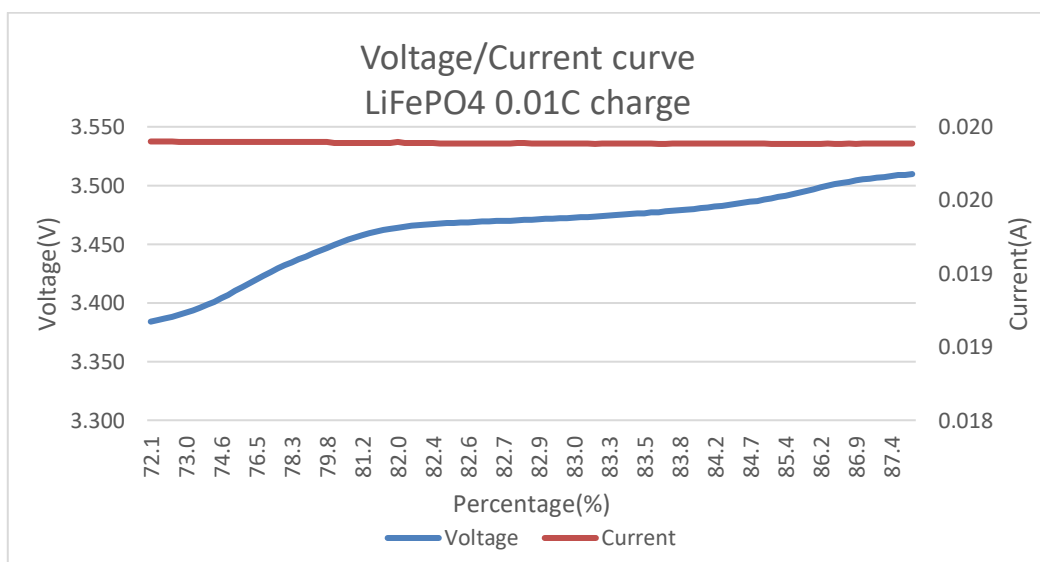
Εικόνα 28. Καμπύλη φόρτισης μπαταρίας Li-Ion με ρεύμα 0.07C



Εικόνα 29. Καμπύλη φόρτισης μπαταρίας LiFePO4 με ρεύμα 0.1C

Ο ρυθμός φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε (0.1C) αντιστοιχεί σε περίπου 10% της συνολικής χωρητικότητας της μπαταρίας ανά ώρα, επιτρέποντας αργή και ασφαλή φόρτιση. Αυτός ο ρυθμός είναι ιδανικός για να ελαχιστοποιηθούν οι κίνδυνοι υπερθέρμανσης και να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση της μπαταρίας Li-Ion, το προτεινόμενο ρεύμα φόρτισης είναι 0.4A (για standard charge).

- Καμπύλες φόρτισης με ρεύμα ίσο με 0.01C

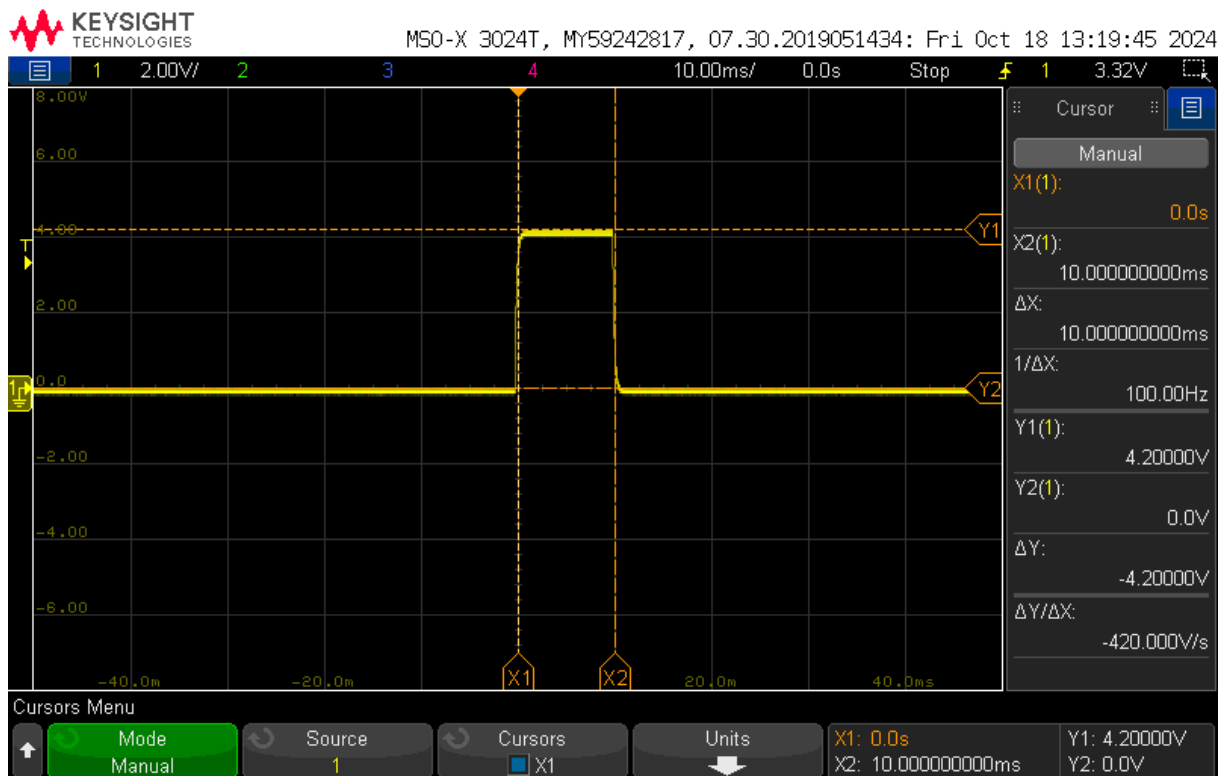


Εικόνα 30. Καμπύλη φόρτισης μπαταρίας LiFePO4 με ρεύμα 0.01C

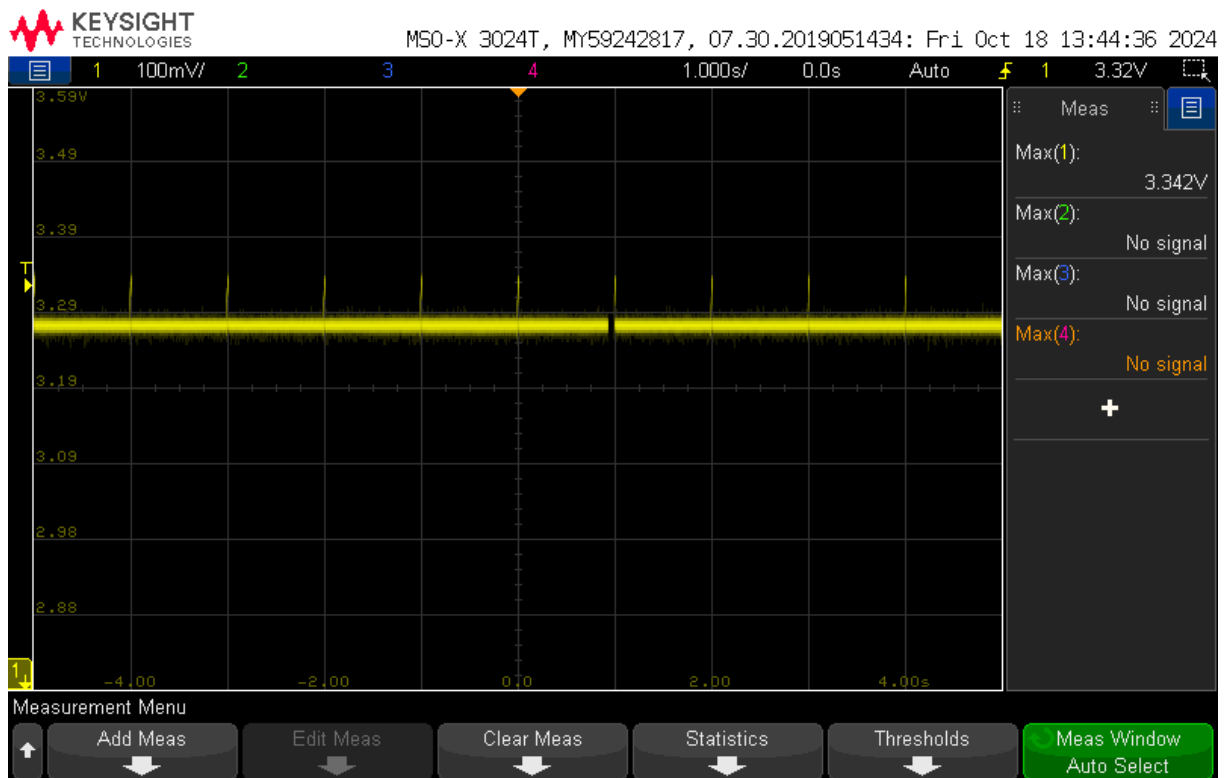
Οι καμπύλη η οποία απεικονίζεται στην εικόνα 30, απεικονίζει στιγμιότυπο της φόρτισης της μπαταρίας με χαμηλό ρεύμα φόρτισης, ίσο με 18mA.

- Καμπύλες φόρτισης με παλμικό ρεύμα φόρτισης, παλμούς 0.1C για 10mS και 1% duty cycle

Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζεται η φόρτιση της μπαταρίας με παλμούς μικρής περιόδου. Στην εικόνα 31, απεικονίζεται στιγμιότυπο του παλμού. Στην εικόνα 32 απεικονίζεται η τάση της μπαταρίας με τη εφαρμογή της παλμικής φόρτισης. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της μεγάλης χωρητικότητας της μπαταρίας, η εφαρμογή του παλμού δεν είναι αρκετή ώστε η μεταβολή της τάσης να είναι εμφανής στο στιγμιότυπο.



Εικόνα 31. Απεικόνιση παλμού στον παλμογράφο



Εικόνα 32. Φόρτιση μπαταρία LiFePO4 με παλμούς

3.3 Καμπύλες στατικής εκφόρτισης

Η διαδικασία εκφόρτισης των μπαταριών Li-Ion και LiFePO4 ακολουθεί επίσης στάδια που επηρεάζονται από τη χημεία της μπαταρίας και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της. Όπως και στη φόρτιση, η εκφόρτιση πρέπει να γίνεται με συγκεκριμένους κανόνες, ώστε να διασφαλίζεται η διάρκεια ζωής και η απόδοση της μπαταρίας, αποφεύγοντας φαινόμενα όπως η υπερβολική αποφόρτιση που μπορεί να προκαλέσει βλάβες.

Στάδιο Σταθερού Ρεύματος (Constant Current - CC):

Κατά την εκφόρτιση, η μπαταρία αρχικά παρέχει ρεύμα στο εξωτερικό φορτίο σε σχεδόν σταθερή τάση, ανάλογα με το φορτίο και το ρυθμό εκφόρτισης (**C-rate**). Το ρεύμα παραμένει σταθερό, ενώ η τάση της μπαταρίας αρχίζει να μειώνεται αργά καθώς αποδίδεται η ενέργεια.

- Στις μπαταρίες Li-Ion, η εκφόρτιση ξεκινά από τάση περίπου **4.2V** (αν είναι πλήρως φορτισμένη) και συνεχίζεται έως ότου η τάση φτάσει το όριο αποκοπής, το οποίο συνήθως βρίσκεται γύρω στα **3.0V** ανά στοιχείο. Η εκφόρτιση κάτω από αυτό το όριο μπορεί να προκαλέσει μη αναστρέψιμες βλάβες στη μπαταρία.

- Οι LiFePO_4 ξεκινούν την εκφόρτιση από τάση περίπου **3.6-3.65V** και μπορούν να εκφορτιστούν με ασφάλεια έως περίπου **2.5V** ανά στοιχείο. Σε αυτό το εύρος, οι LiFePO_4 εμφανίζουν πιο σταθερή τάση κατά την εκφόρτιση σε σύγκριση με τις Li-Ion .

Στάδιο Σταθερής Τάσης (Constant Voltage - CV):

Καθώς η μπαταρία συνεχίζει να εκφορτίζεται, η τάση της μειώνεται προοδευτικά. Η συμπεριφορά αυτή εξαρτάται από την τεχνολογία της μπαταρίας. Στις **Li-Ion**, η τάση πέφτει σταθερά καθώς αποφορτίζεται, και η πτώση επιταχύνεται όταν η μπαταρία πλησιάζει την πλήρη αποφόρτιση. Αντίθετα, οι **LiFePO₄** διατηρούν πιο σταθερή τάση κατά την εκφόρτιση, εμφανίζοντας έντονη πτώση τάσης μόνο όταν η μπαταρία πλησιάζει τα όρια εκφόρτισης.

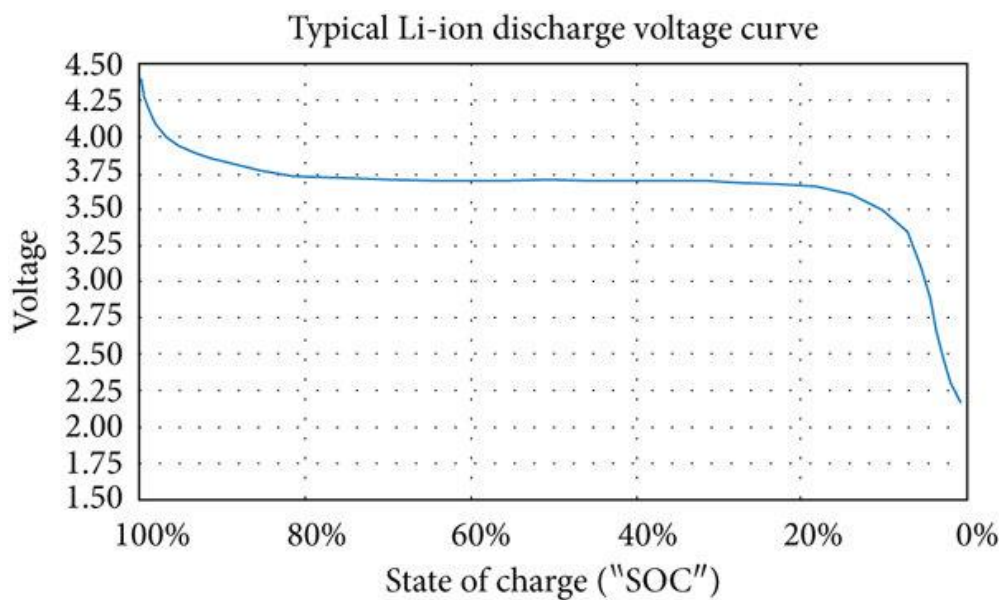
Η σταθερότητα στην τάση κατά την εκφόρτιση καθιστά τις **LiFePO₄** ιδιαίτερα κατάλληλες για εφαρμογές όπου η σταθερή παροχή ισχύος είναι σημαντική, όπως σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και ηλεκτροκίνητα οχήματα.

Τερματισμός Εκφόρτισης:

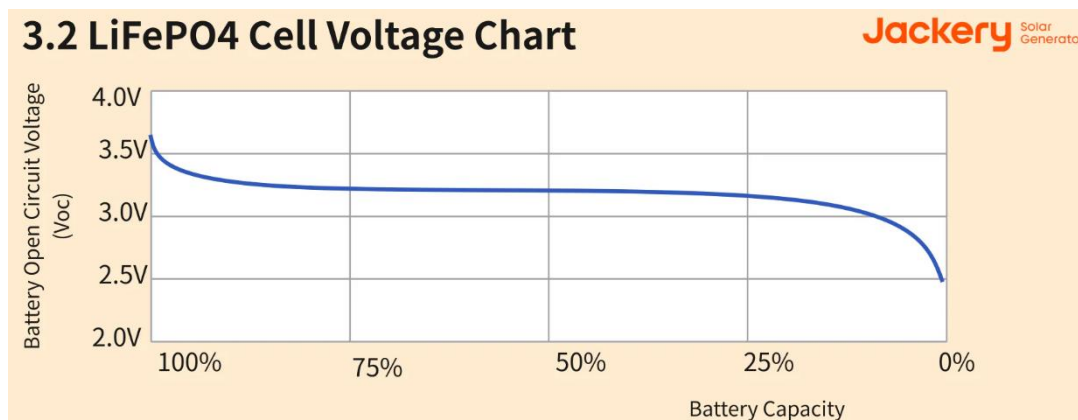
Η εκφόρτιση πρέπει να τερματίζεται όταν η τάση της μπαταρίας φτάσει το καθορισμένο όριο για την προστασία της από την υπερβολική αποφόρτιση.

- Στις μπαταρίες Li-Ion , η εκφόρτιση σταματά όταν η τάση πλησιάσει τα **3.0V** ανά στοιχείο. Η εκφόρτιση κάτω από αυτό το όριο μπορεί να προκαλέσει ανεπανόρθωτες ζημιές στα εσωτερικά στοιχεία της μπαταρίας, μειώνοντας τη χωρητικότητα και τη διάρκεια ζωής της.
- Για τις μπαταρίες LiFePO_4 , η εκφόρτιση συνήθως τερματίζεται μόλις η τάση φτάσει τα **2.5V** ανά στοιχείο. Παρόλο που οι LiFePO_4 είναι πιο ανθεκτικές στην εκφόρτιση σε χαμηλές τάσεις από τις Li-Ion , είναι σημαντικό να αποφεύγεται η υπερβολική εκφόρτιση, καθώς και αυτή μπορεί να μειώσει την απόδοσή τους.

Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται οι καμπύλες αποφόρτισης μπαταριών Li-Ion και LiFePO_4 .

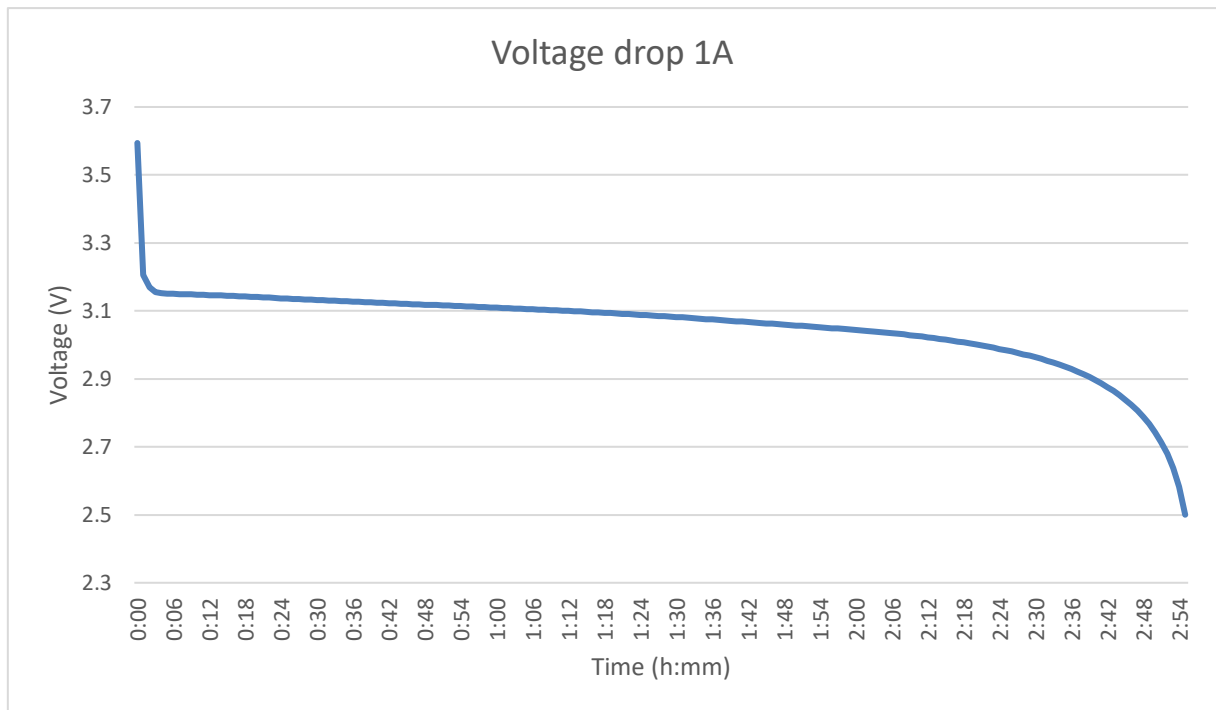


Εικόνα 33. Καμπύλη εκφόρτισης μπαταρίας Li-Ion



Εικόνα 34. Καμπύλη εκφόρτισης μπαταρίας LiFePO4

Όπως και στην περίπτωση της φόρτισης, πραγματοποιήθηκε μέτρηση της τάσης αποφόρτισης ώστε να επιβεβαιωθεί η βιβλιογραφία. Ακολουθεί το γράφημα που παρουσιάζει την καμπύλη εκφόρτισης με ρεύμα 1A:



Εικόνα 35. Καμπύλη αποφόρτισης μπαταρίας LiFePO4 με ρεύμα 1A

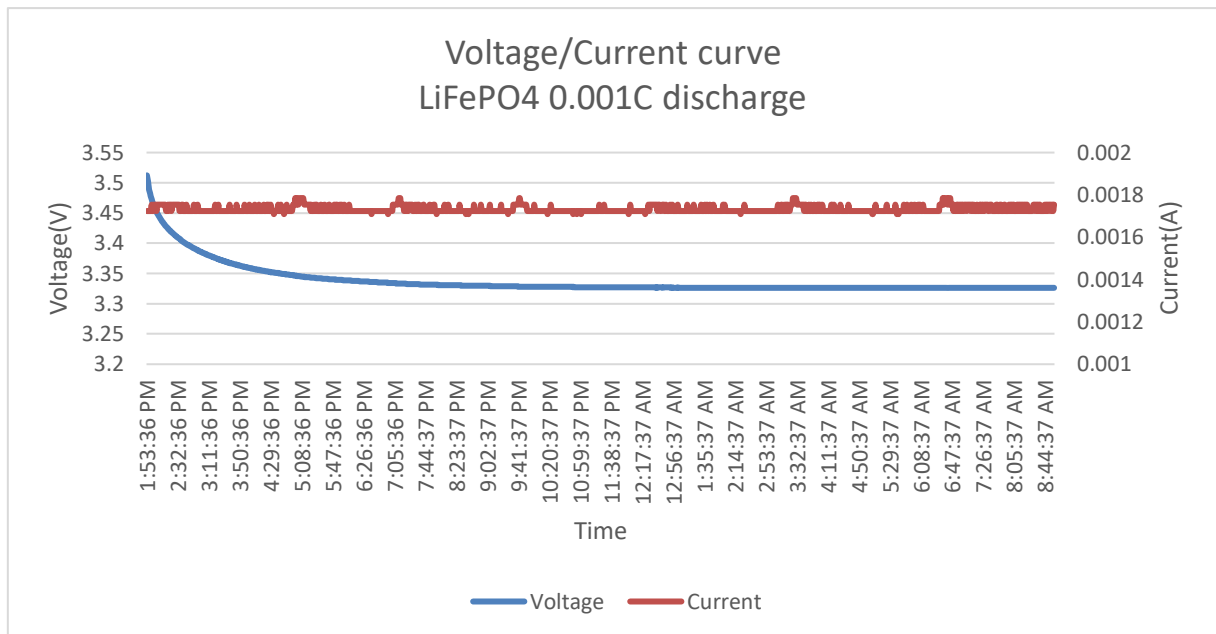
Η καμπύλη εκφόρτισης δείχνει την αναμενόμενη συμπεριφορά της μπαταρίας LiFePO4 κατά τη διάρκεια μιας σταθερής εκφόρτισης. Στην αρχή της διαδικασίας, παρατηρείται μια ταχεία πτώση της τάσης, η οποία στη συνέχεια σταθεροποιείται σε επίπεδα γύρω στα 3.1V. Αυτό το στάδιο είναι κρίσιμο, καθώς δείχνει την ικανότητα της μπαταρίας να διατηρεί σταθερή τάση καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας της, προσφέροντας σταθερή ισχύ στις συσκευές IoT.

Η σταθερή πτώση της τάσης διατηρείται για περίπου 2.5 ώρες, γεγονός που υποδηλώνει τη μακροχρόνια σταθερότητα της συγκεκριμένης μπαταρίας κατά την εκφόρτιση με χαμηλό ρεύμα. Προς το τέλος της διαδικασίας εκφόρτισης, παρατηρείται μια απότομη μείωση της τάσης, η οποία υποδεικνύει ότι η μπαταρία πλησιάζει στην πλήρη εκφόρτιση και δεν μπορεί πλέον να παρέχει σταθερή ισχύ.

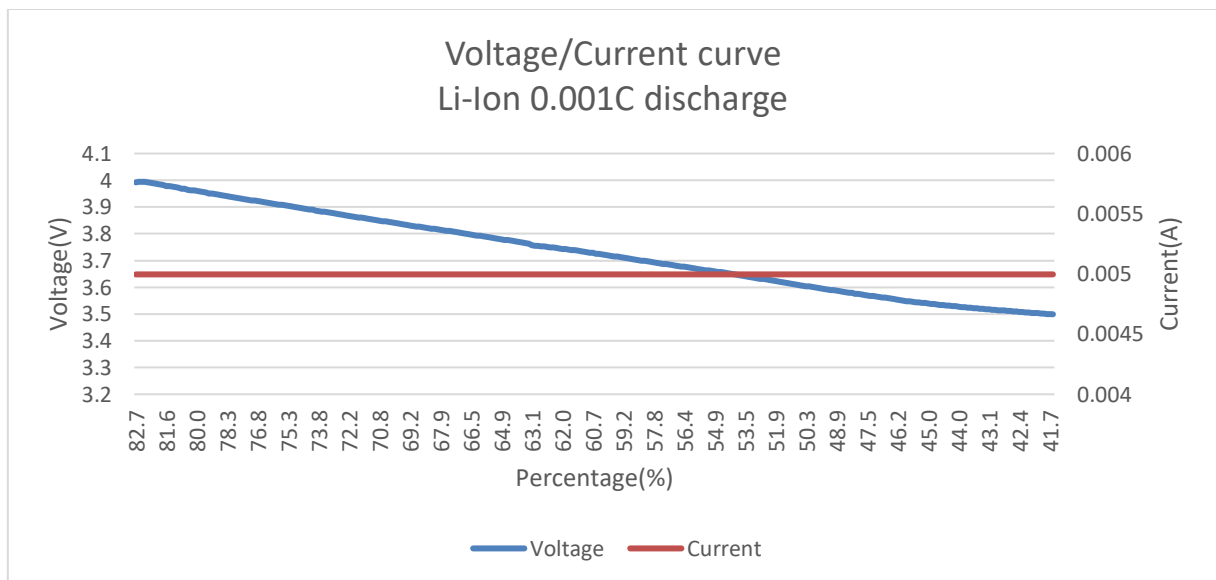
Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις εκφόρτισης μπαταριών τεχνολογιών Li-Ion και LiFePO4 με πολύ χαμηλό ρεύμα εκφόρτισης (0.001C).

- Καμπύλες αποφόρτισης με ρεύμα ίσο με 0.001C

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αποφόρτισης των μπαταριών με πολύ χαμηλό ρεύμα ίσο με 0.001C. Το ρεύμα αυτό αντιστοιχεί στο ρεύμα που καταναλώνει ένας τυπικός κόμβος IoT σε κατάσταση χαμηλής ισχύος (sleep mode).



Εικόνα 36. Αποφόρτιση μπαταρίας LiFePO4 με ρεύμα ίσο με 0.001C



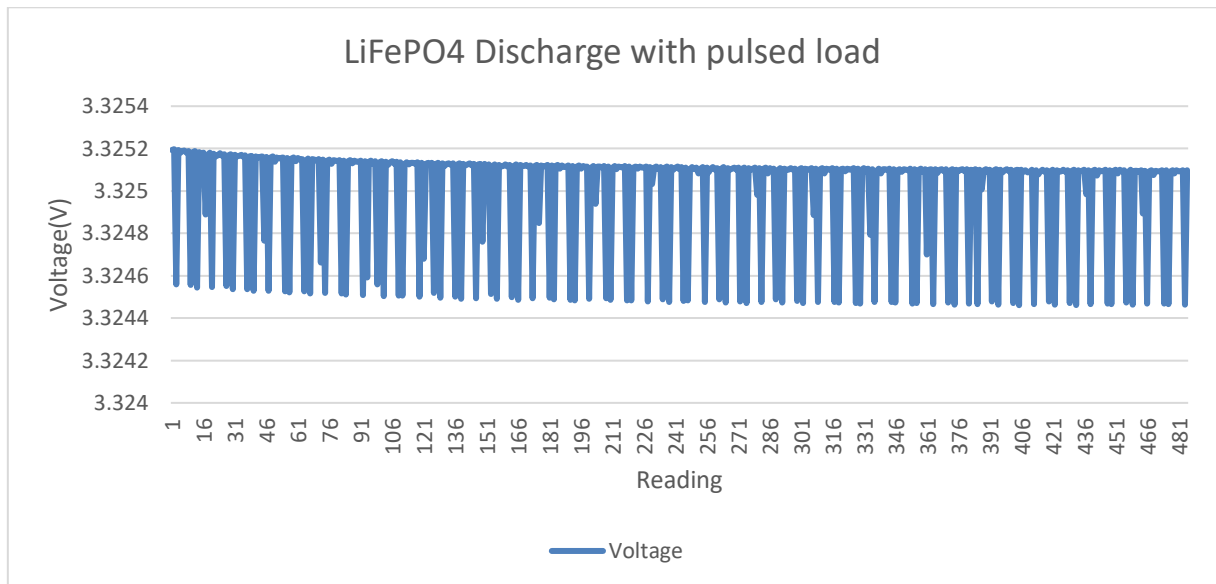
Εικόνα 37. Αποφόρτιση μπαταρίας Li-Ion με ρεύμα ίσο με 0.001C

Στα παραπάνω γραφήματα απεικονίζονται στιγμιότυπα από την αποφόρτιση των δύο μπαταριών. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση υγείων μπαταριών, η πλήρης αποφόρτιση θα έχει διάρκεια 1000 ώρες.

3.4 Καμπύλες εκφόρτισης με τυπικό φορτίο IoT

- Καμπύλες αποφόρτισης με ρεύμα εκφόρτισης (0.001C), παλμούς 0.2C για 2mS και 1% duty cycle

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με παλμικό φορτίο. Η SMU προγραμματίστηκε ώστε να παράγει παλμούς δύο καταστάσεων. Στην υψηλή κατάσταση ο παλμός έχει διάρκεια 2ms και μέγιστο ρεύμα 0.2C. Στη χαμηλή κατάσταση, ο παλμός έχει διάρκεια 1sec-2ms=998ms. Το ρεύμα στη χαμηλή κατάσταση είναι ίσο με 0.001C. Με τον τρόπο αυτό προσομοιώνεται η λειτουργία ενός τυπικού IoT συστήματος με δύο καταστάσεις λειτουργίας (active και sleep).



Εικόνα 38. Αποφόρτιση μπαταρίας LiFePO4 με παλμικό φορτίο

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η τάση της μπαταρίας όταν σε αυτή εφαρμόζεται το παλμικό σήμα. Ο συνδυασμός της πολύ μεγάλης χωρητικότητας της μπαταρίας και του πολύ χαμηλού ρεύματος κατανάλωσης δεν παρουσιάζει εμφανή αλλαγή στην τάση της μπαταρίας.

4. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα της πτυχιακής εργασίας επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία των μπαταριών λιθίου-ιόντων (Li-Ion) και λιθίου-φωσφορικού σιδήρου (LFP) για εφαρμογές Internet of Things (IoT). Η έρευνα έδειξε ότι και οι δύο τύποι μπαταριών παρουσιάζουν ξεχωριστά πλεονεκτήματα, γεγονός που καθιστά την επιλογή του κατάλληλου τύπου σημαντική ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε συστήματος.

Οι μπαταρίες Li-Ion διακρίνονται για την υψηλή ενεργειακή τους πυκνότητα, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη διάρκεια λειτουργίας και αυξημένη αυτονομία. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι οι μπαταρίες αυτές είναι πιο ευαίσθητες

σε ακραίες συνθήκες, γεγονός που απαιτεί μεγαλύτερη προσοχή στη διαχείριση τους κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση, ειδικά σε περιβάλλοντα με υψηλές θερμοκρασίες.

Αντίθετα, οι μπαταρίες LFP παρουσιάζουν καλύτερη θερμοκρασιακή σταθερότητα και αυξημένη ασφάλεια, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για εφαρμογές σε ακραία περιβάλλοντα ή σε συστήματα που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία και αντοχή. Παρά την χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σχέση με τις Li-Ion, οι μπαταρίες LFP εξασφαλίζουν πιο σταθερή παροχή ισχύος σε μακροχρόνια χρήση και παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή σε κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης.

Ένα άλλο εύρημα είναι ότι, σε συνθήκες πολύ χαμηλών ρευμάτων φόρτισης και εκφόρτισης, παρατηρήθηκε διαφοροποίηση της συμπεριφοράς των καμπυλών τάσης σε σχέση με αυτές που παρέχονται από τους κατασκευαστές. Αυτό καταδεικνύει την ανάγκη για επιπλέον μελέτη και πειραματισμό κατά την επιλογή συσσωρευτών για εφαρμογές IoT που θα λειτουργούν σε συνθήκες χαμηλής κατανάλωσης.

Συμπερασματικά, η μελέτη επιβεβαιώνει ότι τόσο οι μπαταρίες Li-Ion όσο και οι LFP αποτελούν αξιόπιστες επιλογές για συστήματα IoT, με την τελική επιλογή να εξαρτάται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής. Η χρήση μπαταριών με σωστή διαχείριση ενέργειας μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη σε συστήματα που απαιτούν αυτονομία, αξιοπιστία και αντοχή σε ακραίες συνθήκες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “Intro to the functioning principle as well as chain reaction equation of lithium iron phosphate battery - TERLI New Energy Technology Co., Ltd.” Accessed: Oct. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.terli.net/Intro-to-the-functioning-principle-as-well-as-chain-reaction-equation-of-lithium-iron-phosphate-battery-id44266567.html>
- [2] S. Madakam, R. Ramaswamy, and S. Tripathi, “Internet of Things (IoT): A Literature Review,” *Journal of Computer and Communications*, vol. 3, no. 5, Art. no. 5, May 2015, doi: 10.4236/jcc.2015.35021.
- [3] G. Callebaut, G. Leenders, J. Van Mulders, G. Ottoy, L. De Strycker, and L. Van der Perre, “The Art of Designing Remote IoT Devices—Technologies and Strategies for a Long Battery Life,” *Sensors*, vol. 21, no. 3, Art. no. 3, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21030913.
- [4] N. Sharma, M. Shamkuwar, and I. Singh, “The History, Present and Future with IoT,” in *Internet of Things and Big Data Analytics for Smart Generation*, V. E. Balas, V. K. Solanki, R. Kumar, and M. Khari, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 27–51. doi: 10.1007/978-3-030-04203-5_3.
- [5] “TECHIES INFOTECH.” Accessed: Oct. 24, 2024. [Online]. Available: <https://techprogress.co/internet.php>
- [6] I. Tsenempis, G. Filios, I. Katsidimas, and S. Nikolettas, “Energy Harvesting and Smart Management Platform for Low Power IoT Systems,” in *2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, Feb. 2019, pp. 339–346. doi: 10.1109/DCOSS.2019.00075.
- [7] S. Arslan, O. Dagdeviren, and G. Kardas, *An IoT LDR Bulb Application with Android Things Operating System for Smart Cities*. 2019. doi: 10.1109/ASYU48272.2019.8946400.
- [8] N. Otaif and M. Abbas, “A Comparative Analysis of Energy Consumption in Wireless Sensor Networks,” in *Pervasive Computing and Social Networking*, G. Ranganathan, R. Bestak, R. Palanisamy, and Á. Rocha, Eds., Singapore: Springer Nature, 2022, pp. 113–126. doi: 10.1007/978-981-16-5640-8_10.
- [9] A. H. Mohd Aman, N. Shaari, and R. Ibrahim, “Internet of things energy system: Smart applications, technology advancement, and open issues,” *International Journal of Energy Research*, vol. 45, no. 6, pp. 8389–8419, 2021, doi: 10.1002/er.6451.
- [10] I. Μασκλαβάνος, “Αξιολόγηση πηγών και μεθόδων για την τροφοδοσία αυτόνομων ενσωματωμένων συστημάτων,” 2019, Accessed: Oct. 24, 2024. [Online]. Available: <https://olympias.lib.uoi.gr/jspui/handle/teiep/10603>
- [11] A. Noori, M. F. El-Kady, M. S. Rahmanifar, R. B. Kaner, and M. F. Mousavi, “Towards establishing standard performance metrics for batteries, supercapacitors and beyond,” *Chemical Society Reviews*, vol. 48, no. 5, pp. 1272–1341, 2019, doi: 10.1039/C8CS00581H.
- [12] J. Haase *et al.*, “Analysis of batteries in the built environment an overview on types and applications,” in *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Jul. 2017, pp. 8113–8118. doi: 10.1109/IECON.2017.8217424.
- [13] “LP14430A 650mAh Lithium-ion Rechargeable Battery | Lithium_Polymer_Batteries_com.” Accessed: Oct. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.lithium-polymer-batteries.com/lp14430a-650mah-lithium-ion-rechargeable-battery/>
- [14] “Ni-Mh μπαταρίες: τύποι, πώς να ξανακτίσετε και να φορτίσετε.” Accessed: Oct. 24, 2024. [Online]. Available: <https://ipower.bigbadmole.com/el/akkumulatory/batarei/ni-mh.html>

- [15] “Fujicell Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία 4/5 SC Ni-Cd 1200mAh 1.2V 1τμχ,” Skroutz. Accessed: Oct. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.skroutz.gr/s/48870829/Fujicell-Epanafortizomeni-Mpataria-4-5-SC-Ni-Cd-1200mAh-1-2V-1tmch.html>
- [16] I. González, A. J. Calderón, and F. J. Folgado, “IoT real time system for monitoring lithium-ion battery long-term operation in microgrids,” *Journal of Energy Storage*, vol. 51, p. 104596, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104596.
- [17] D.-I. Stroe, M. Swierczynski, A.-I. Stroe, and S. Knudsen Kær, “Generalized Characterization Methodology for Performance Modelling of Lithium-Ion Batteries,” *Batteries*, vol. 2, no. 4, Art. no. 4, Dec. 2016, doi: 10.3390/batteries2040037.

