



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΠΜΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ  
ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ

## Μετρητής χωρητικότητας συσσωρευτών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωσήφ Γ. Κιμωνής

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2022





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΠΜΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ  
ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ

**Μετρητής χωρητικότητας συσσωρευτών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωσήφ Κιμιωνής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 4 Νοεμβρίου 2022.

.....  
Ε. Χριστοφόρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Α. Σολδάτος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Σ. Αγγελόπουλος  
Μεταδιδακτορικός Ε.Μ.Π.



.....  
Ιωσήφ Γ. Κιμιωνής

Copyright © Ιωσήφ Κιμιωνής, 2022.

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 προς τον 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 Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



# Περίληψη

---

Μια διάταξη κατά την οποία δύο ή περισσότερα ηλεκτροχημικά στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους ονομάζεται συσσωρευτής ή μπαταρία. Ο συσσωρευτής ουσιαστικά είναι μια χημική πηγή ρεύματος, ικανή να αποθηκεύσει ηλεκτρική ενέργεια, αφού τη μετατρέψει σε χημική, και όταν χρειαστεί να την αποδώσει σε εξωτερικό κύκλωμα. Χωρητικότητα ενός συσσωρευτή είναι το ηλεκτρικό φορτίο που παρέχει ο συσσωρευτής κατά την εκφόρτιση του και ποσοτικοποιεί την διαθέσιμη ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε αυτόν. Ένας συσσωρευτής με μειωμένη χωρητικότητα αδυνατεί να τροφοδοτεί την απαιτούμενη ενέργεια και ισχύ με αποτέλεσμα να μην λειτουργεί σε ικανοποιητικό επίπεδο. Οπότε είναι αναγκαία η ακριβής εκτίμηση της διαθέσιμης χωρητικότητας του συσσωρευτή και για αυτόν τον σκοπό σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένας μετρητής χωρητικότητας συσσωρευτών βασισμένος στο Arduino NANO, με χρήση του οποίου κάποιος είναι σε θέση να εντοπίζει σε ποιο στάδιο ζωής βρίσκεται ο συσσωρευτής. Κατά την λειτουργία του ο συσσωρευτής εκφορτίζεται μέσω μιας σταθερής αντίστασης ενώ η ένταση του ρεύματος και ο χρόνος μετριοούνται από το Arduino και η χωρητικότητα υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τις μετρήσεις της έντασης ρεύματος και του χρόνου.

**Λέξεις-κλειδιά:** ενέργεια, συσσωρευτής, χωρητικότητα, μετρητής, Arduino





# Abstract

---

A device in which two or more electrochemical elements are linked together is called a battery. The battery is essentially a chemical current source, capable of storing electrical energy, after converting it into a chemical, and when needed to impute it to an external circuit. Capacity of a battery is the electric charge provided by the battery during its discharge and quantifies the available energy stored in it. A battery with reduced capacity is unable to supply the required energy and power and therefore does not function at a satisfactory level. It is therefore necessary to accurately estimate the available capacity of the battery and for this purpose a battery capacity tester based on Arduino NANO was designed and implemented, by using the tester one is able to identify the life stage of the battery. While operating the battery is discharged through a constant resistance while the current and time are measured by Arduino and the capacity is calculated by multiplying the current and time measurements.

**Keywords:** *energy, battery, capacity, tester, Arduino*



# Πρόλογος

---

Η παρούσα εργασία έχει σκοπό τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός μετρητή χωρητικότητας συσσωρευτών. Είναι αναγκαίο να έχει κάποιος την δυνατότητα της ακριβούς εκτίμησης της χωρητικότητας ενός συσσωρευτή, καθώς η χωρητικότητα του συσσωρευτή είναι το μέγεθος που ποσοτικοποιεί την διαθέσιμη ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη σε αυτόν.

Η εργασία αποτελείται από τρία κεφάλαια με την ακόλουθη δομή:

Κεφάλαιο 1: Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί το Θεωρητικό μέρος της εργασίας στο οποίο γίνεται εισαγωγή στο θέμα, ιστορική αναδρομή για τους συσσωρευτές, παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά των συσσωρευτών, καθώς και οι τεχνικές επιτήρησης της υγείας τους.

Κεφάλαιο 2: Το δεύτερο κεφάλαιο αποτελεί το Πειραματικό μέρος της εργασίας κατά το οποίο παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και τα απαιτούμενα εξαρτήματα της πειραματικής διάταξης για τον μετρητή χωρητικότητας συσσωρευτών, ο τρόπος λειτουργίας του, η διαδικασία κατασκευής του και τέλος τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων και ο σχολιασμός τους.

Κεφάλαιο 3: Στο τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, ένας γενικός σχολιασμός των αποτελεσμάτων και τέλος παράθεση προβλημάτων – μειονεκτημάτων.



# Πίνακας περιεχομένων

---

Περίληψη .....	v
Abstract .....	vii
Πρόλογος.....	ix
Πίνακας περιεχομένων .....	xi
Ευρετήριο Σχημάτων.....	xiii
1 Συσσωρευτές .....	1
1.1 Εισαγωγή .....	1
1.2 Ιστορική αναδρομή .....	2
1.3 Αρχές λειτουργίας συσσωρευτή .....	16
1.4 Χαρακτηριστικά συσσωρευτών.....	22
1.4.1 Κατηγοριοποίηση συσσωρευτών.....	22
1.4.2 Τεχνικές προδιαγραφές συσσωρευτών .....	23
1.4.3 Κατάσταση συσσωρευτών .....	26
1.5 Τεχνικές επιτήρησης υγείας.....	27
1.5.1 Εκτίμηση κατάστασης φόρτισης (State Of Charge – SOC) .....	28
1.5.2 Εκτίμηση τάσης .....	33
1.5.3 Εκτίμηση χωρητικότητας.....	34
1.5.4 Υπολειπόμενη ωφέλιμη ζωή (Remaining Useful Life - RUL).....	37
2 Μετρητής χωρητικότητας συσσωρευτών .....	39
2.1 Σχεδιασμός μετρητή χωρητικότητας συσσωρευτών .....	39
2.2 Απαιτούμενα εξαρτήματα .....	41
2.3 Αρχή λειτουργίας.....	43
2.4 Κατασκευή του κυκλώματος .....	44
2.5 Αποτελέσματα των μετρήσεων .....	48
3 Συμπεράσματα.....	51
Βιβλιογραφία .....	53
Παράρτημα.....	57



# Ευρετήριο Σχημάτων

---

Σχήμα 1: Η μπαταρία της Βαγδάτης [2].....	2
Σχήμα 2: Το βάζο Leyden, συσκευή αποθήκευσης στατικού ηλεκτρισμού [3] .....	3
Σχήμα 3: Η μπαταρία του Benjamin Franklin [4] .....	4
Σχήμα 4: Η βολταϊκή στήλη, η πρώτη χημική μπαταρία [6] .....	5
Σχήμα 5: Η πρωτότυπη μπαταρία Volta [1].....	5
Σχήμα 6: Ο συσσωρευτής του W. Cruickshank [7] .....	6
Σχήμα 7: Ο συσσωρευτής του Planté [8] .....	8
Σχήμα 8: Ο συσσωρευτής του Camille Alphonse Fauré [9] .....	8
Σχήμα 9: Ο συσσωρευτής του Leclanché [10] .....	9
Σχήμα 10: Η μπαταρία ξηρού τύπου άνθρακα-ψευδαργύρου [2].....	10
Σχήμα 11: Η μπαταρία καδμίου-νικελίου [2] .....	11
Σχήμα 12: Ο συσσωρευτής νικελίου-σιδήρου του Edison [11].....	12
Σχήμα 13: Η συμβατική αλκαλική μπαταρία [2] .....	13
Σχήμα 14: Ο συσσωρευτής ιόντων λιθίου [2] .....	15
Σχήμα 15: Εκφόρτιση και φόρτιση ηλεκτροχημικών κελιών [2] .....	18
Σχήμα 16: Σχηματικό διάγραμμα για ελεγκτή χωρητικότητας μπαταριών [28] ..	40
Σχήμα 17: Κατασκευή κυκλώματος σε breadboard. ....	45
Σχήμα 18: Κατασκευή κυκλώματος σε διάτρητη πλακέτα.....	46
Σχήμα 19: Μετρήσεις χωρητικότητας συσσωρευτών .....	47





# 1 Συσσωρευτές

## 1.1 Εισαγωγή

Όπως είναι γνωστό για τις περισσότερες καθημερινές δραστηριότητες του ανθρώπου απαιτείται χρήση κάποιας μορφής ενέργειας (χημική ενέργεια, θερμική ενέργεια, ηλεκτρισμός κ.α.), με συνέπεια να είναι απαραίτητη μια συσκευή η οποία θα αποθηκεύει ενέργεια και θα την απελευθερώνει σε κάποια μορφή προς χρήση.

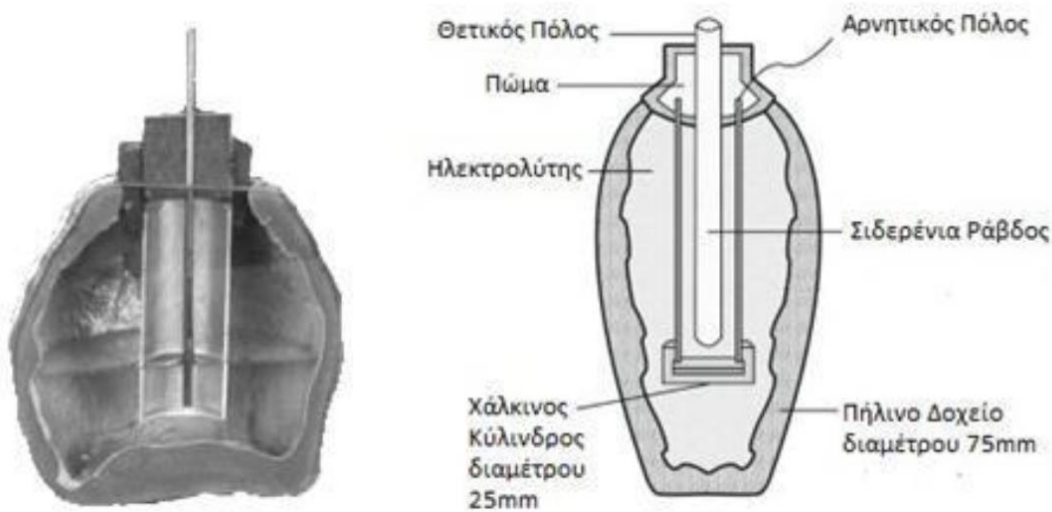
Η πιο διαδεδομένη αποθήκη ενέργειας στην καθημερινότητα είναι ο συσσωρευτής. Ο συσσωρευτής αποθηκεύει χημική ενέργεια, την οποία αποδίδει σε κάποιο εξωτερικό κύκλωμα με την μορφή ρεύματος, λειτουργώντας ουσιαστικά ως χημική πηγή ρεύματος. Ο συσσωρευτής στις μέρες μας αποτελείται από τρία κύρια μέρη, την άνοδο, την κάθοδο και τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος είναι μια χημική ουσία. Στο εσωτερικό του συσσωρευτή πραγματοποιούνται χημικές αντιδράσεις οι οποίες, με την βοήθεια του ηλεκτρολύτη, προκαλούν μετακίνηση ηλεκτρονίων στην άνοδο και αντίστοιχο έλλειμα ηλεκτρονίων στην κάθοδο. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανόδου και της καθόδου και όταν τελικά ο συσσωρευτής συνδεθεί με κάποιο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα υπάρχει ροή ηλεκτρικού ρεύματος.

Όπως είναι εύκολα αντιληπτό η χρήση των συσσωρευτών έχει ωφελήσει την ανθρωπότητα σε πολλούς τομείς. Ως επί το πλείστον ο συσσωρευτής παρέχει την δυνατότητα χρήσης ηλεκτρισμού χωρίς να υπάρχει ηλεκτρικό δίκτυο και λειτουργεί ως εφεδρική πηγή ενέργειας σε περιπτώσεις που διακόπτεται η σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο. Επίσης παρέχει την δυνατότητα για τροφοδοσία οχημάτων, ακόμα και δορυφόρων και έχει μεγάλη συνεισφορά στην ανθρώπινη πρόοδο.

Λόγω της ευρείας πλέον χρήσης των συσσωρευτών στην καθημερινότητα είναι αναγκαίο να γνωρίζει κάποιος την διαθέσιμη ενέργεια που απομένει στον συσσωρευτή καθώς και την κατάστασή του. Επομένως είναι σημαντική η μέτρηση της χωρητικότητας ενός συσσωρευτή, του μεγέθους δηλαδή που καθορίζει την διαθέσιμη ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε αυτόν.

## 1.2 Ιστορική αναδρομή

Ο αρχαιότερος συσσωρευτής ανακαλύφθηκε το 1936, κατά τη διάρκεια ανασκαφών κοντά στην Βαγδάτη, γνωστός ως μπαταρία της Βαγδάτης ή μπαταρία της Πάρθιας, από την Πάρθια περίοδο, στην οποία τοποθετείται χρονολογικά. Ο συσσωρευτής στην ουσία ήταν ένα πήλινο δοχείο μέσα στο οποίο υπήρχε ένας χάλκινος κύλινδρος με μια σιδερένια ράβδο στο εσωτερικό. Κατά την λειτουργία του το δοχείο γέμιζε με διάλυμα ηλεκτρολύτη (χυμό λεμονιού, κρασί ή ξύδι) και παρήγαγε τάση 1 με 2 Volt [1].



Σχήμα 1: Η μπαταρία της Βαγδάτης [2]

Η πρώτη ηλεκτροστατική μηχανή κατασκευάστηκε το 1663 από τον Otto von Guericke, με τη χρήση μίας σφαίρας η οποία όταν τρίβονταν έλκυε μικρά κομμάτια χαρτιού. Αποδείχθηκε από τον Guericke ότι κατά την εκφόρτισή της παράγονταν ηλεκτρικοί σπινθήρες [1].

Μία συσκευή που αποθήκευε στατικό ηλεκτρισμό μεταξύ δύο μεταλλικών ηλεκτροδίων, γνωστή ως το "βάζο του Leyden" εφευρέθηκε το 1745. Ονομάστηκε από την πόλη του Leyden όπου ζούσε και εργαζόταν ο Pieter van Musschenbroek (1745-1746), ο οποίος την εφηύρε ταυτόχρονα με τον Ewald von Kleist Georg (1744). Θεωρείται η πρώτη μορφή ηλεκτρικού πυκνωτή. Πιο συγκεκριμένα μεταλλικά φύλλα τοποθετούνταν στην εξωτερική και εσωτερική επιφάνεια μιας γυάλινης φιάλης. Μέσω ενός φελλού μια μεταλλική αλυσίδα πέρναγε στο εσωτερικό και ερχόταν σε

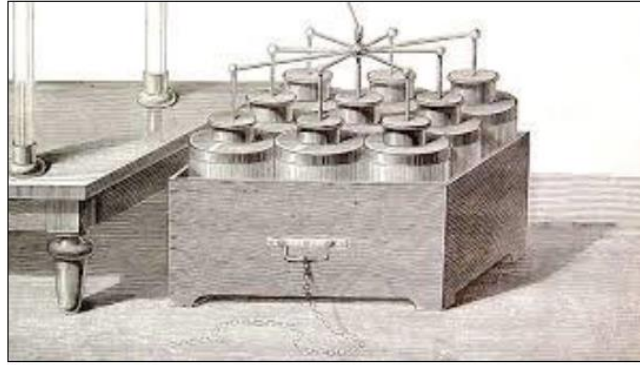
επαφή με το μεταλλικό φύλλο διοχετεύοντας ηλεκτρικό φορτίο, παραγόμενο από εξωτερική ηλεκτρική μηχανή. Το γεγονός ότι ένας μονωτής, το γυαλί, ήταν ανάμεσα σε δύο αγώγιμα μεταλλικά φύλλα, έδινε στη συσκευή τη δυνατότητα να αποθηκεύει ηλεκτρικό φορτίο [1].

Η ανακάλυψη του βάζου Leyden συνέβαλε στη θεμελίωση του στατικού ηλεκτρισμού. Ακόμα και στις μέρες μας, χρησιμοποιούνται βάζα Leyden για εκπαιδευτικούς σκοπούς, για απόδειξη των αρχών της ηλεκτροστατικής [2].



Σχήμα 2: Το βάζο Leyden, συσκευή αποθήκευσης στατικού ηλεκτρισμού [3]

Ο όρος “μπαταρία” χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά το 1749 από τον Benjamin Franklin, για την περιγραφή ενός συνόλου συνδεδεμένων πυκνωτών που χρησιμοποιήθηκαν για πειράματα με ηλεκτρική ενέργεια. Οι πυκνωτές ήταν συνδεδεμένοι με μία στατική γεννήτρια και αποφορτίζονταν με την επαφή μετάλλου με τα ηλεκτρόδια. Στις αρχές, η χρήση του όρου περιορίστηκε στην περιγραφή βολταϊκών στηλών και παρόμοιων συσκευών, στις οποίες πολλά ηλεκτροχημικά κελιά συνδέονται μεταξύ τους με τον τρόπο που ο Franklin συνέδεε τους πυκνωτές. Σήμερα όλοι οι ηλεκτροχημικοί συνδυασμοί ονομάζονται μπαταρίες [2].



Σχήμα 3: Η μπαταρία του Benjamin Franklin [4]

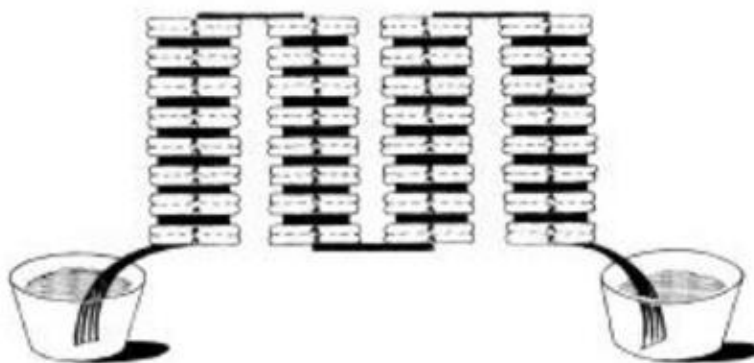
Ο Luigi Galvani, το 1780, έκανε πειράματα κρεμώντας έναν βάτραχο από έναν ορειχάλκινο γάντζο, και ανακάλυψε τυχαία ότι όταν ακουμπούσε με το νυστέρι του τα νεύρα του ποδιού του βατράχου οι μύες έκαναν συσπάσεις. Μην μπορώντας να δώσει άλλη εξήγηση ο Galvani υπέθεσε ότι το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε κάποιο είδος ηλεκτρισμού προερχόμενο από το μυϊκό σύστημα του βατράχου και το ονόμασε “ζωικό ηλεκτρισμό” [1]. Αντίθετα ο συνάδελφος και φίλος επιστήμονας Alessandro Volta, θεώρησε ότι οι μυϊκές συσπάσεις οφείλονταν στα δύο διαφορετικά μέταλλα, σίδηρο και χαλκό, που συνδέθηκαν αγώγιμα μεταξύ τους μέσω ενός υγρού μέσου. Η θεωρία του Volta επαληθεύτηκε πειραματικά και δημοσιεύτηκε το 1791, ενώ το 1800 κατασκεύασε την “βολταϊκή στήλη”, την πρώτη πραγματική μπαταρία [5].

Η βολταϊκή στήλη στην ουσία αποτελούνταν από εναλλασσόμενους δίσκους χαλκού και ψευδαργύρου, τοποθετημένοι ο ένας πάνω στον άλλο σχηματίζοντας μία στήλη, χωρισμένοι μεταξύ τους από ένα ύφασμα ή χαρτόνι εμποτισμένο με αλατόνερο (ηλεκτρολύτη). Η βολταϊκή στήλη ήταν ικανή να παράγει συνεχές και σταθερό ρεύμα, ενώ οι απώλειες φορτίου με την πάροδο του χρόνου όταν δεν ήταν σε χρήση ήταν ελάχιστες, σε αντίθεση με το “βάζο του Leyden” [5].



Σχήμα 4: Η βολταϊκή στήλη, η πρώτη χημική μπαταρία [6]

Ο Volta μετά από πειράματα με διάφορους συνδυασμούς κατέληξε ότι ο ψευδάργυρος και ο άργυρος είχαν τα επιθυμητά αποτελέσματα, καθώς το συγκεκριμένο ζεύγος ήταν ικανό να παράγει αρκετά ισχυρή τάση ώστε να προκαλέσει ηλεκτρικούς σπινθήρες. Επίσης ανακάλυψε ότι όταν τα ζεύγη ψευδαργύρου και αργύρου στοιβάζονταν το ένα πάνω στο άλλο και συνδέονταν σε σειρά περισσότερες της μιας βολταϊκές στήλες, η τάση αυξανόταν. Το αποτέλεσμα ήταν η κατασκευή μιας πρωτότυπης μπαταρίας, η οποία αποτελούνταν από ηλεκτρόδια ψευδαργύρου και αργύρου συνδεδεμένα σε σειρά, διαχωρισμένα από χαρτί εμποτισμένο με ηλεκτρολύτη [7].



Σχήμα 5: Η πρωτότυπη μπαταρία Volta [1]

Ο Volta παρατήρησε στα πειράματα του διάβρωση των πλακών του ψευδαργύρου, και πίστευε ότι με αλλαγή υλικών θα μπορούσε να αποφευχθεί. Κάτι

τέτοιο ήταν αδύνατο καθώς παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερο ήταν το παραγόμενο ρεύμα, τόσο ταχύτερη ήταν η διάβρωση του ψευδαργύρου. Από αυτό το γεγονός διαπιστώθηκε ότι η διάβρωση ήταν άμεσα συνδεδεμένη με την ικανότητα της μπαταρίας να παράγει ρεύμα. Αποτέλεσμα ήταν η απόρριψη της θεωρίας του Volta για τη δημιουργία τάσης μέσω της επαφής δύο διαφορετικών υλικών [7].

Η πρώτη ηλεκτρική μπαταρία για μαζική παραγωγή σχεδιάστηκε το 1802, από τον William Cruickshank ο οποίος τροποποίησε τη βολταϊκή στήλη του Volta. Τα κύρια τεχνικά προβλήματα της βολταϊκής στήλης ήταν η διαρροή ηλεκτρολύτη και βραχυκυκλώματα, εξ αιτίας του βάρους των μεταλλικών πλακών και της συμπίεσης του υφάσματος το οποίο ήταν εμποτισμένο με αλατόνερο. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων ο Cruickshank στηρίχθηκε στην οριζόντια διάταξη των μεταλλικών πλακών. Τετράγωνα φύλλα χαλκού τοποθετήθηκαν μέσα σε ένα μακρύ ορθογώνιο ξύλινο κουτί σφραγισμένο με τσιμέντο. Τα φύλλα αυτά ήταν κολλημένα στα άκρα με ισομεγέθη φύλλα ψευδαργύρου και το κουτί γέμιζε με ηλεκτρολύτη αλατόνερου ή αραιωμένου οξέος. Παράλληλα με την αντιμετώπιση των τεχνικών προβλημάτων της βολταϊκής στήλης, ο συσσωρευτής αυτός είχε μεγαλύτερη αποδοτικότητα και διάρκεια καθώς δεν είχε διαρροή ηλεκτρολύτη και τα υλικά του δεν στέγνωναν [1].



Σχήμα 6: Ο συσσωρευτής του W. Cruickshank [7]

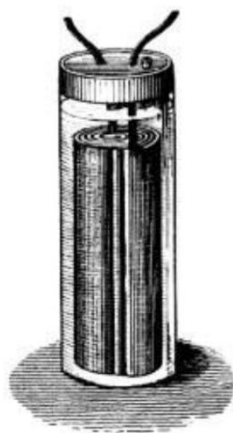
Το 1836 ο Άγγλος χημικός John F. Daniell εφηύρε έναν συσσωρευτή ο οποίος εκτός του πιο σταθερού ρεύματος που παρήγαγε, μπορούσε να επαναφορτιστεί. Το στοιχείο Daniell, όπως ονομάστηκε, ήταν ουσιαστικά ένα χάλκινο δοχείο γεμάτο με διάλυμα θεικού χαλκού, μέσα στο οποίο βυθιζόταν ένα μικρότερο κεραμικό δοχείο γεμάτο με θειικό οξύ και ένα ηλεκτρόδιο ψευδαργύρου [5]. Το γεγονός ότι το κεραμικό δοχείο ήταν πορώδες, επέτρεπε στα ιόντα να περνούν μέσα από αυτό ενώ ταυτόχρονα εμπόδιζε την ανάμιξη των δύο διαλυμάτων. Κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή το ηλεκτρόδιο του ψευδαργύρου, το οποίο ήταν ο αρνητικός πόλος, διαλυόταν, ενώ χαλκός αποτίθετο στο θετικό ηλεκτρόδιο που ήταν το χάλκινο δοχείο. Η τάση που έδινε το στοιχείο του Daniell ήταν 1,1V και η κύρια χρήση του ήταν σε τηλεγραφικά συστήματα [2].

### **Μπαταρία μολύβδου-οξέος**

Το 1850 ο Γάλλος φυσικός Gaston Planté εφηύρε την μπαταρία μολύβδου-οξέος, η οποία είχε την ιδιότητα να επαναφορτιστεί όταν τροφοδοτείτο με ένα αντίστροφο ρεύμα. Η συγκεκριμένη μπαταρία ουσιαστικά αποτελείται από ηλεκτρόδια μολύβδου στην άνοδο και διοξειδίου του μολύβδου στην κάθοδο, τα οποία είναι βυθισμένα σε διάλυμα θεικού οξέος. Κατά την αντίδραση των δυο ηλεκτροδίων με το οξύ παράγεται θειικός μόλυβδος. Η διαφορά είναι ότι κατά την αντίδραση στην άνοδο απελευθερώνονται ηλεκτρόνια ενώ κατά την αντίδραση του διοξειδίου του μολύβδου στην κάθοδο τα ηλεκτρόνια αυτά καταναλώνονται, με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Η εφαρμογή αντίθετης φοράς ρεύματος αντιστρέφει αυτές τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις και έτσι η μπαταρία επαναφορτίζεται [2].

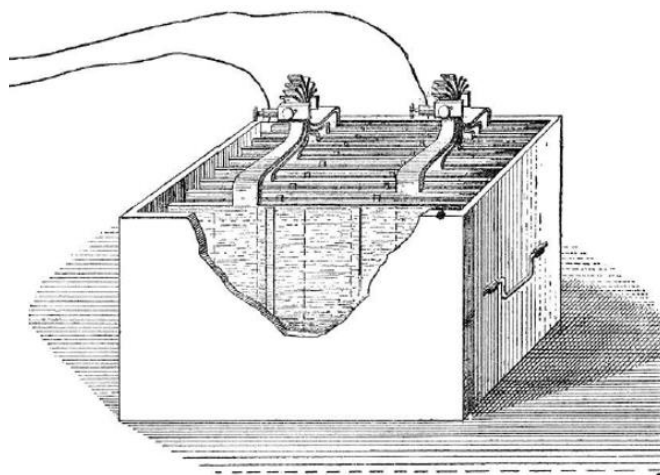
Το αρχικό μοντέλο του Planté αποτελείτο από δύο φύλλα μολύβδου που χωρίζονταν από ταινίες καουτσούκ και τυλίγονταν σε σπειροειδές σχήμα. Αραιό διάλυμα θεικού οξέος χρησιμοποιούνταν ως ηλεκτρολύτης και το δυναμικό εξόδου της μπαταρίας ήταν 2V. Δυστυχώς εξ αιτίας της μικρής επιφάνειας των ηλεκτροδίων, το αρχικά αποδιδόμενο ρεύμα ήταν πολύ μικρό. Μετά από διαδοχικές φορτίσεις και εκφορτίσεις, λόγω του σταδιακού σχηματισμού αποθέσεων μεγαλύτερης επιφάνειας, οι χημικές αντιδράσεις στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων είχαν σαν αποτέλεσμα την αύξηση του εμβαδού τους και έτσι το ρεύμα σταδιακά παρουσίαζε

βελτίωση. Η “διαδικασία σχηματισμού” όπως ονομάστηκε, χρησιμοποιείται και στις μέρες μας για την αρχική φόρτιση των μπαταριών μολύβδου-οξέος. Η πρώτη χρήση των μπαταριών του Planté έγινε για να τροφοδοτήσουν φώτα σε βαγόνια τρένων όταν εκείνα σταματούσαν στις αποβάθρες [2].



Σχήμα 7: Ο συσσωρευτής του Planté [8]

Το 1881, ο Camille Alphonse Faure κατόρθωσε να βελτιώσει σημαντικά την μπαταρία μολύβδου. Με την χρήση ηλεκτροδίων κατασκευασμένων από πλέγμα μολύβδου και επικαλυμμένα με πάστα διοξειδίου του μολύβδου και θειικού οξέος, αυξήθηκε αισθητά η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου ή “χωρητικότητα” της μπαταρίας. Με τον συγκεκριμένο σχεδιασμό η απόδοση της μπαταρίας αυξήθηκε αρκετά, ενώ για ακόμη μεγαλύτερη απόδοση πολλές τέτοιες πλάκες συνδέονταν μεταξύ τους [2].



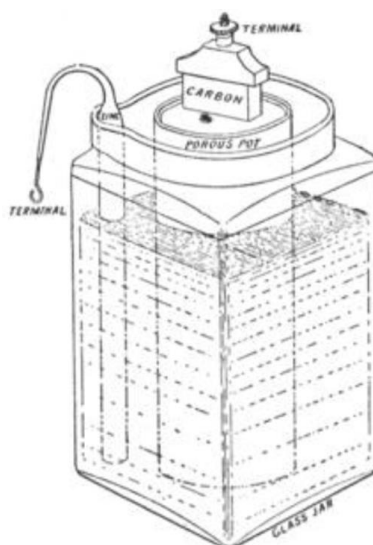
Σχήμα 8: Ο συσσωρευτής του Camille Alphonse Faure [9]



Το βασικό μειονέκτημα του συσσωρευτή του Planté ήταν το βάρος και ο όγκος του, τα οποία ήταν μεγάλα για την ενέργεια που απέδιδε. Από την άλλη, είχε την δυνατότητα να παράγει εντυπωσιακά μεγάλα ρεύματα σε υπερτάσεις. Επίσης είχε πολύ χαμηλή εσωτερική αντίσταση, και αυτό σήμαινε ότι μία μόνο μπαταρία ήταν αρκετή για να τροφοδοτήσει πολλαπλά κυκλώματα. Με κάποιες μικρές τροποποιήσεις η μπαταρία μολύβδου-οξέος χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα σε αυτοκίνητα και άλλες εφαρμογές, όπου το μεγάλο βάρος της δεν είναι περιοριστικός παράγοντας [2].

### **Μπαταρία του Leclanché**

Το 1866 ο Γάλλος χημικός Georges Leclanché εφηύρε μία μπαταρία αποτελούμενη από ένα γυάλινο δοχείο που περιείχε σαν ηλεκτρολύτη διάλυμα χλωριούχου αμμωνίου. Αρνητικό ηλεκτρόδιο ήταν μία ράβδος ψευδαργύρου και θετικό ηλεκτρόδιο μία ράβδος γραφίτη, η οποία ήταν τοποθετημένη μέσα σε ένα εσωτερικό πορώδες κεραμικό δοχείο και περιβαλλόταν από ένα αγωγίμο μίγμα σκόνης διοξειδίου του μαγγανίου και άνθρακα. Η μπαταρία του Leclanché δεν ήταν επαναφορτιζόμενη και παρείχε τάση 1,5V. Αρκετά γρήγορα βρήκε εφαρμογή με επιτυχία στην τηλεγραφία, τη σηματοδότηση και άλλες ηλεκτρολογικές εφευρέσεις (όπως το κουδούνι). Κατά τα χρόνια έχει υποστεί σημαντικές βελτιώσεις, κυριότερη εξ αυτών η χρησιμοποίηση δοχείου από ψευδάργυρο ως το δοχείο που περιέχει την μπαταρία αλλά και σαν ηλεκτρόδιο, κατά τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα [5].

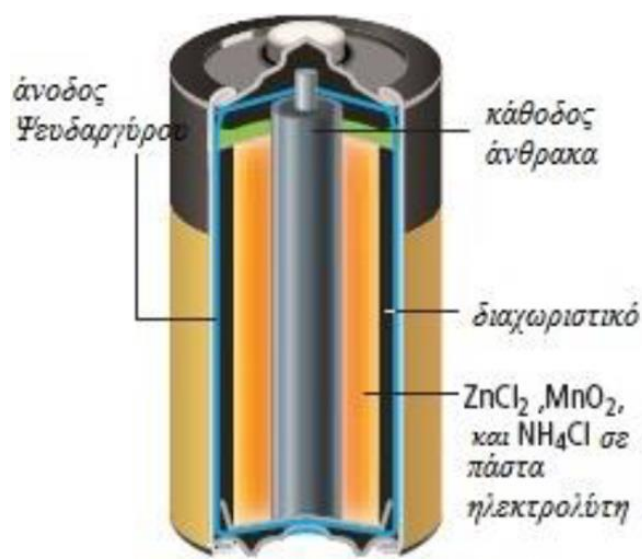


Σχήμα 9: Ο συσσωρευτής του Leclanché [10]

## Μπαταρία άνθρακα-ψευδαργύρου

Για τον περιορισμό των διαρροών των ηλεκτρολυτών και της ευκολότερης χρήσης των ηλεκτροχημικών μπαταριών, πολλοί προσπάθησαν να κάνουν χρήση ηλεκτρολυτών που δεν ήταν σε υγρή κατάσταση, παρουσιάζοντας τις μπαταρίες ξηρού τύπου [2].

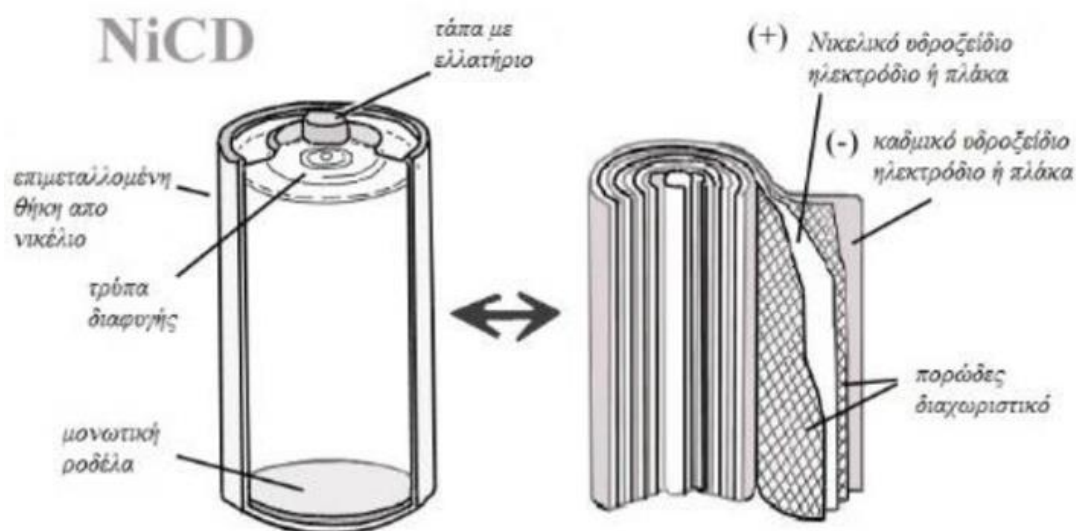
Το 1886, ο Carl Gassner κατοχύρωσε μια παραλλαγή της μπαταρίας του Leclanché, η οποία δεν περιείχε ελεύθερο υγρό ηλεκτρολύτη, και γι' αυτό τον λόγο ονομάστηκε το "ξηρό στοιχείο" του Carl Gassner. Στη συγκεκριμένη παραλλαγή το χλωριούχο αμμώνιο αναμείχθηκε με γύψο, με σκοπό την δημιουργία μιας πάστας, ενώ προστέθηκε και μικρή ποσότητα χλωριούχου ψευδαργύρου με σκοπό την παράταση της διάρκειας ζωής του όταν ο συσσωρευτής βρισκόταν εκτός λειτουργίας. Σε αυτήν την πάστα εμβαπτίστηκε η κάθοδος του διοξειδίου του μαγγανίου και σφραγίστηκαν με ένα κέλυφος ψευδαργύρου και τα δυο μαζί, το οποίο λειτουργούσε ως άνοδος. Αντίθετα με τα προηγούμενα υγρά στοιχεία, η νέα ξηρού τύπου μπαταρία του Gassner ήταν πιο σταθερή, δεν απαιτούσε ιδιαίτερη συντήρηση και δεν παρουσίαζε προβλήματα διαρροής του ηλεκτρολύτη, ανεξάρτητα από τον τρόπο χρήσης της και τον προσανατολισμό της. Έγινε ευρέως γνωστή ως μπαταρία άνθρακα-ψευδαργύρου και κατασκευάζεται ακόμη και στις μέρες μας [2].



Σχήμα 10: Η μπαταρία ξηρού τύπου άνθρακα-ψευδαργύρου [2]

## Μπαταρία καδμίου-νικελίου

Το 1899 ο Σουηδός επιστήμονας Waldemar Jungner, εφηύρε την μπαταρία καδμίου-νικελίου, μία επαναφορτιζόμενη μπαταρία αποτελούμενη από ηλεκτρόδια νικελίου και καδμίου και ηλεκτρολύτη διάλυμα υδροξειδίου του καλίου [1]. Έγινε πρώτη φορά χρήση αλκαλικού ηλεκτρολύτη σε μπαταρία και παρείχε δυναμικό 1,2V. Στις αρχές οι αλκαλικές αυτές μπαταρίες ήταν ανθεκτικές και παρουσίαζαν αρκετά καλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος. Από την άλλη, ήταν πολύ πιο ακριβές λόγω του υψηλού κόστους των πρώτων υλών τους, με αποτέλεσμα την περιορισμένη χρήση τους [2].



Σχήμα 11: Η μπαταρία καδμίου-νικελίου [2]

## Μπαταρίες νικελίου-σιδήρου

Το 1899 παράλληλα με τη μπαταρία του καδμίου-νικελίου, ο Waldemar Jungner είχε εφεύρει και μία μπαταρία νικελίου-σιδήρου. Θεώρησε ότι η μπαταρία νικελίου-καδμίου ήταν ανώτερη και γι' αυτό τον λόγο δεν κατοχύρωσε ποτέ την συγκεκριμένη του εφεύρεση. Αν και αρκετά πιο οικονομική, η μπαταρία νικελίου-σιδήρου κατά την φόρτισή της παρήγαγε αρκετά περισσότερο αέριο υδρογόνο, γεγονός που έκανε δυσκολότερη την σφράγιση της και έτσι η φόρτιση της θα ήταν λιγότερο αποδοτική. Ωστόσο, το 1903 ο Thomas Edison, σχεδίασε εκ νέου την μπαταρία νικελίου-σιδήρου του Jungner, την κατοχύρωσε και άρχισε να την πουλάει στην αγορά. Επιθυμία του Edison ήταν να εμπορευματοποιήσει ένα πιο ανθεκτικό και ελαφρύ υποκατάστατο

της μπαταρίας μολύβδου-οξέος, με σκοπό την τροφοδοσία των αυτοκινήτων, ελπίζοντας ότι η εταιρία του θα ήταν ο κύριος προμηθευτής της μπαταρίας των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Δυστυχώς τα πρώτα μοντέλα είχαν μικρή διάρκεια ζωής που δεν ξεπερνούσε την αντίστοιχη της μπαταρίας μολύβδου οξέος και παρουσίαζαν διαρροές [5]. Το 1910 η αυτοκινητοβιομηχανία της Ford έβγαλε στην αγορά το μοντέλο T Ford. Η αξιοπιστία και η οικονομική του τιμή το καθιέρωσαν και έτσι οι βενζινοκινητήρες καθιερώθηκαν στα αυτοκίνητα. Αυτό δεν εμπόδισε την μπαταρία του Edison να σημειώσει μεγάλη επιτυχία σε άλλες εφαρμογές, όπως στα ηλεκτρικά και στα ηλεκτρικά-ντίζελ τρένα, στους σιδηροδρομικούς σταθμούς για παροχή εφεδρικής ενέργειας και στα ορυχεία για παροχή ενέργειας στους λαμπτήρες [2].

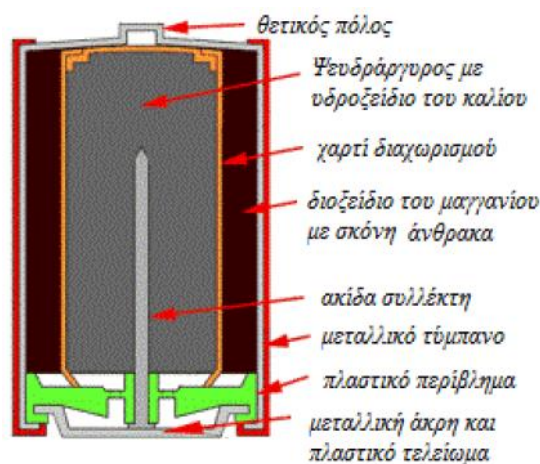


Σχήμα 12: Ο συσσωρευτής νικελίου-σιδήρου του Edison [11]

### Συμβατικές αλκαλικές μπαταρίες

Παρόλο που η μπαταρία ψευδαργύρου-άνθρακα ήταν η δημοφιλέστερη μπαταρία μιας χρήσεως έως τα τέλη της δεκαετίας του 1950, το γεγονός ότι είχε αρκετά μικρή διάρκεια ζωής δεν της επέτρεψε να συνεχίσει να είναι εμπορική και στην συνέχεια των χρόνων. Το 1955 ανατέθηκε στον Lewis Urry, έναν μηχανικό στο Ερευνητικό Εργαστήριο της Πάρμα, να βρει έναν τρόπο για να παρατείνει τη διάρκεια ζωής των μπαταριών ψευδαργύρου-άνθρακα. Ο ίδιος όμως, σε αντίθεση με τους ανωτέρους του, πίστευε στην ανωτερότητα των αλκαλικών μπαταριών, παρότι η τιμή των αλκαλικών μπαταριών μεγάλης διάρκειας ήταν αρκετά αυξημένη σε σχέση με τις υπόλοιπες. Έτσι το 1959, ο Urry δημιούργησε μία μπαταρία η οποία αποτελείτο από διοξείδιο του μαγγανίου στην κάθοδο, κωνιορτοποιημένο ψευδάργυρο στην άνοδο

και έναν αλκαλικό ηλεκτρολύτη. Για μεγαλύτερη επιφάνεια στην άνοδο έκανε χρήση ψευδάργυρου σε σκόνη, και οι μπαταρίες του κατέκλεισαν την αγορά [5].



Σχήμα 13: Η συμβατική αλκαλική μπαταρία [2]

### Μπαταρίες νικελίου-υδρογόνου και νικελίου-υδριδίου μετάλλου

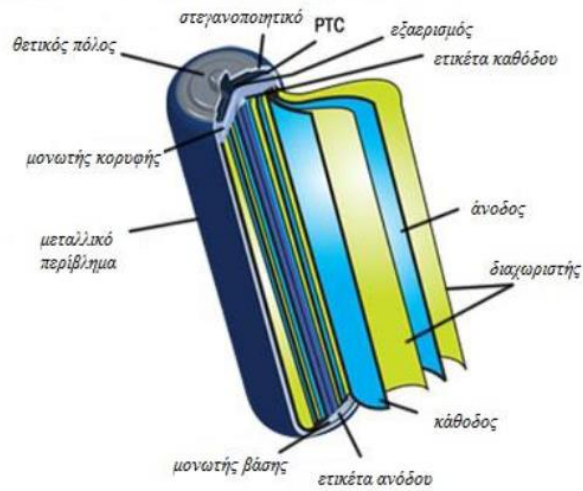
Τη δεκαετία του 1970 εισήλθαν στην αγορά οι μπαταρίες νικελίου-υδρογόνου, ως ένα υποσύστημα αποθήκευσης ενέργειας για εμπορικούς δορυφόρους επικοινωνιών. Για χρήση σε μικρότερες εφαρμογές, δημιουργήθηκε το 1989 μια παραλλαγή τους, οι μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου (Ni-MH). Αυτές οι νέες μπαταρίες Ni-MH έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τις μπαταρίες νικελίου-υδρογόνου και με νέα πειράματα κατασκευαστών, ο χρόνος ζωής τους συνεχώς αυξάνεται [5].

Στην αγορά για πολλά χρόνια οι μόνες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες για φορητές συσκευές ήταν οι μπαταρίες καδμίου-νικελίου. Το κάδμιο ως γνωστόν είναι τοξικό και οι συγκεκριμένες μπαταρίες συνέβαλαν στη ρύπανση του περιβάλλοντος. Κατά τη δεκαετία του 1990 στην Ευρώπη ξεκίνησε μια προσπάθεια περιορισμού της χρήσης τους και αντικατάστασής τους από τις πιο φιλικές προς το περιβάλλον μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου (Ni-MH). Παρόλο που η μπαταρία Ni-MH είναι παρόμοια με αυτήν του νικελίου-καδμίου, οι χημικές ουσίες με βάση το νικέλιο γρήγορα αντικαταστάθηκαν από το λίθιο και έτσι προέκυψαν οι μπαταρίες ιόντων λιθίου [5].

## Μπαταρίες λιθίου και ιόντων λιθίου

Το γεγονός ότι το λίθιο είναι το μέταλλο με τη χαμηλότερη πυκνότητα, το μεγαλύτερο ηλεκτροχημικό δυναμικό και τη μεγαλύτερη αναλογία ενέργειας προς βάρος, το κατέστησαν θεωρητικά ως το ιδανικό υλικό για την κατασκευή μπαταριών. Το 1912 ο G.N. Lewis άρχισε να πειραματίζεται με μπαταρίες λιθίου και οι πρώτες μπαταρίες λιθίου κυκλοφόρησαν στην αγορά τη δεκαετία του 1970 [2].

Η δεκαετία του 1980 ήταν η σημαντικότερη για την τεχνολογία της κατασκευής μπαταριών λιθίου. Το 1980 ο Αμερικανός χημικός John B. Goodenough, χρησιμοποίησε το οξείδιο  $\text{LiCoO}_2$  σαν κάθοδο (θετικό ηλεκτρόδιο) των μπαταριών λιθίου ενώ ο Γάλλος ερευνητής Rachid Yazami, χρησιμοποίησε γραφίτη σαν άνοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο). Το 1985 με βάση τα παραπάνω, η ερευνητική ομάδα του Akira Yoshino στην Ιαπωνία, κατασκεύασε την πρώτη μπαταρία ιόντων λιθίου (Li-ion), η οποία στην ουσία ήταν μία επαναφορτιζόμενη και πιο σταθερή έκδοση της μπαταρίας λιθίου. Το 1997 κυκλοφόρησε στην αγορά η μπαταρία ιόντων λιθίου με πολυμερείς ηλεκτρολύτες, η οποία χρησιμοποιεί ως ηλεκτρολύτη ένα σύνθετο πολυμερές, μέσα στο οποίο έχει εισαχθεί ο ηλεκτρολύτης, και ηλεκτρόδια υπό την μορφή ελασμάτων με διαχωριστές μεταξύ τους. Το πλεονέκτημα αυτών των μπαταριών είναι ότι παρέχεται η δυνατότητα στην μπαταρία να εγκλείεται σε ένα εύκαμπτο περιτύλιγμα, αντί σε ένα άκαμπτο μεταλλικό περίβλημα, γεγονός που τις καθιστά ικανές να διαμορφωθούν ειδικά ώστε να χωρέσουν σε μία συγκεκριμένη συσκευή. Επίσης η μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα των μπαταριών αυτών σε σχέση με τις απλές μπαταρίες ιόντων λιθίου, τις κατέστησαν την ιδανικότερη επιλογή μπαταρίας για φορητές συσκευές ηλεκτρονικών ειδών (κινητά τηλέφωνα, ψηφιακές συσκευές κ.α.) [5].



Σχήμα 14: Ο συσσωρευτής ιόντων λιθίου [2]

Σήμερα οι έρευνες στην πλειοψηφία τους περιστρέφονται γύρω από τη βελτίωση των μπαταριών με βάση το λίθιο. Οι κύριοι τομείς στους οποίους χρησιμοποιούνται μπαταρίες ιόντων λιθίου αφορούν την τροφοδοσία κινητών τηλεφώνων, φορητών υπολογιστών, ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών, ηλεκτρικών εργαλείων και ιατρικών συσκευών, καθώς και χρήση τους σε ηλεκτρικά οχήματα και δορυφόρους. Τα κύρια πλεονεκτήματα της μπαταρίας ιόντων λιθίου είναι η υψηλή ειδική ενέργεια, η απλή φόρτιση, το χαμηλό κόστος συντήρησης και η φιλικότητα προς το περιβάλλον [5].

### 1.3 Αρχές λειτουργίας συσσωρευτή

Ηλεκτροχημικό στοιχείο ονομάζεται η ηλεκτροχημική διάταξη η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια και αποτελείται από ένα θετικό και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο. Κατά τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, οι οποίες λαμβάνουν χώρα στα ηλεκτρόδια, γίνεται μεταφορά ηλεκτρονίων μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος/φορτίου. Τα ηλεκτρόδια βυθίζονται σε έναν ηλεκτρολύτη, ο οποίος λειτουργεί ως ιοντικός αγωγός και άγει ιόντα μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, αποτελώντας παράλληλα και έναν ηλεκτρονικό μονωτή, εμποδίζοντας δηλαδή τη διέλευση και αγωγή ηλεκτρονίων μέσα από τη μάζα του. Αυτό συμβαίνει γιατί στην περίπτωση που ο ηλεκτρολύτης επέτρεπε την αγωγή ηλεκτρονίων μέσα από τη μάζα του, το αποτέλεσμα θα ήταν αυτοεκφόρτιση και εσωτερικό βραχυκύκλωμα εντός του κελιού. Στους περισσότερους συσσωρευτές ως ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούνται υδατικά διαλύματα οξέων, βάσεων ή αλάτων. Επίσης ως ηλεκτρολύτες έχουν χρησιμοποιηθεί και οργανικά διαλύματα αλάτων, πολυμερή, κεραμικά και τηγμένα άλατα [13].

Το ηλεκτροχημικό στοιχείο είναι η βασική ηλεκτροχημική μονάδα κατά την οποία έχουμε άμεση μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Συσσωρευτής ή μπαταρία ονομάζεται η διάταξη κατά την οποία δύο ή περισσότερα ηλεκτροχημικά στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους, είτε σε σειρά, συνδέοντας το θετικό ηλεκτρόδιο του ενός με το αρνητικό ηλεκτρόδιο άλλου, είτε σε μια διάταξη σειρά- παράλληλα. Στην καθομιλουμένη ο όρος μπαταρία συμπεριλαμβάνει τόσο μια μεμονωμένη ενιαία διάταξη όσο και διατάξεις κατάλληλα συνδεδεμένων πολλαπλών ηλεκτροχημικών στοιχείων, τοποθετημένων σε ένα ενιαίο δοχείο [14].

Χωρητικότητα ενός συσσωρευτή είναι το ηλεκτρικό φορτίο που παρέχει ο συσσωρευτής κατά την εκφόρτιση του. Ένας τρόπος για να αυξηθεί η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή, είναι σε κάθε ηλεκτροχημικό στοιχείο να συνδεθούν παράλληλα μεταξύ τους περισσότερες πλάκες ηλεκτροδίων της ίδιας πολικότητας (θετική πλάκα με θετική πλάκα, αρνητική πλάκα με αρνητική πλάκα). Η διάταξη των πλακών διαφορετικής πολικότητας είναι εναλλάξ, δηλαδή μια θετική δίπλα σε μια αρνητική και στη συνέχεια βυθίζονται στον ίδιο ηλεκτρολύτη. Κατ' αυτόν τον τρόπο αυξάνεται



η χωρητικότητα του ηλεκτροχημικού στοιχείου, η οποία μετριέται σε Coulomb ή για πρακτικούς λόγους πιο συχνά σε Ah (αμπερώρια). Παράλληλα όμως έχει διατηρηθεί το μέγεθός του στο ελάχιστο, ενώ η τάση του ηλεκτροχημικού κελιού παραμένει η ίδια, καθώς οι πλάκες συνδέονται παράλληλα [14].

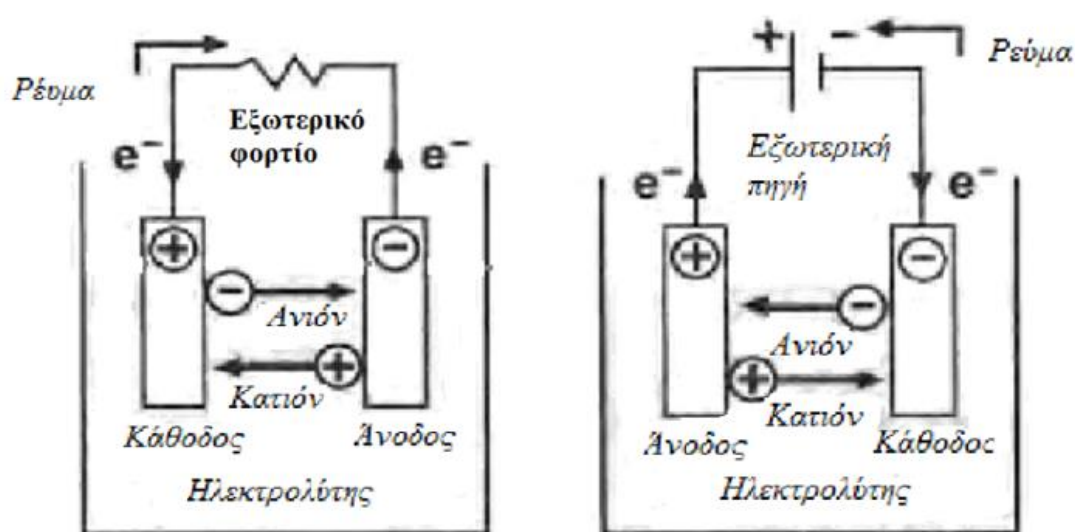
### **Ηλεκτροχημικό στοιχείο: εκφόρτιση – φόρτιση**

Στη συνέχεια εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο μια χημική συσκευή αποθηκεύει και παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Με βάση την αρχή λειτουργίας της γαλβανικής διάταξης, της οποίας βασικά συστατικά είναι ένα θετικό και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο, ένας ηλεκτρολύτης και ένα δοχείο, λειτουργεί κι ένας συσσωρευτής.

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, δηλαδή αντιδράσεις οξειδωσης και αναγωγής στα δύο ηλεκτρόδια. Το ένα ηλεκτρόδιο είναι κατασκευασμένο από τις λεγόμενες ενεργές ουσίες, δηλαδή υλικά που αντιδρούν, τα οποία βρίσκονται σε επαφή με ένα μεταλλικό εξάρτημα, που ονομάζεται συλλέκτης ρεύματος. Οι αντιδράσεις των ενεργών ουσιών (ενεργών μαζών) σε κάθε ηλεκτρόδιο ονομάζονται ημιαντιδράσεις. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ημιαντιδράσεων που συμβαίνουν στα δύο ηλεκτρόδια είναι υπεύθυνη για την δημιουργία εξωτερικού ρεύματος από μια μπαταρία. Κατά την εκφόρτιση ενός ηλεκτροχημικού στοιχείου, ο συλλέκτης ρεύματος του αρνητικού ηλεκτροδίου συγκεντρώνει τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται από μια ημιαντίδραση οξειδωσης. Αυτά τα ηλεκτρόνια διαπερνούν ένα εξωτερικό φορτίο, με αποτέλεσμα την παραγωγή έργου, και στην συνέχεια μέσω του συλλέκτη ρεύματος του θετικού ηλεκτροδίου, συγκεντρώνονται σε αυτό, όπου γίνεται μια ημιαντίδραση αναγωγής. Είναι γνωστό εξ ορισμού ότι το ηλεκτρόδιο στο οποίο γίνεται οξειδωση είναι η άνοδος, ενώ το ηλεκτρόδιο στο οποίο γίνεται αναγωγή είναι η κάθοδος, οπότε το αρνητικό ηλεκτρόδιο του στοιχείου είναι η άνοδος και το θετικό ηλεκτρόδιο η κάθοδος. Η ροή των ηλεκτρονίων είναι από την άνοδο στην κάθοδο του ηλεκτροχημικού στοιχείου και λόγω αυτής τα βυθισμένα στον ηλεκτρολύτη μέρη των ηλεκτροδίων παρουσιάζουν στιγμιαία μειωμένα και αυξημένα συγκέντρωση ηλεκτρονίων αντίστοιχα. Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα αρνητικά φορτισμένα ιόντα (ανιόντα) να οδεύουν μέσω του ηλεκτρολύτη προς την άνοδο του στοιχείου, η οποία στο βυθισμένο στον ηλεκτρολύτη τμήμα της παρουσιάζει έλλειμμα ηλεκτρονίων και άρα φορτίζεται θετικά, ενώ θετικά φορτισμένα

ιόντα (κατιόντα) οδεύουν προς την κάθοδο του στοιχείου, η οποία στο βυθισμένο στον ηλεκτρολύτη τμήμα της παρουσιάζει αυξημένη συγκέντρωση ηλεκτρονίων και φορτίζεται αρνητικά. Στη συνέχεια τα ιόντα αυτά παίρνουν μέρος σε ημιαντιδράσεις οξείδωσης και αναγωγής αντίστοιχα, αποβάλλοντας και προσλαμβάνοντας ηλεκτρόνια, και με αυτό τον τρόπο συνεχίζεται ο κύκλος λειτουργίας του ηλεκτροχημικού στοιχείου μέχρι να εξαντληθεί πλήρως κάποια από τις ενεργές ουσίες [13].

Όταν το ηλεκτροχημικό στοιχείο είναι επαναφορτιζόμενο, κατά τη φόρτιση του αντιστρέφεται η ροή του ρεύματος. Σε αυτή την περίπτωση, η αντίδραση οξείδωσης πραγματοποιείται στο θετικό ηλεκτρόδιο και η αντίδραση αναγωγής στο αρνητικό, με αποτέλεσμα το θετικό ηλεκτρόδιο να είναι η άνοδος και το αρνητικό η κάθοδος. Από την πηγή φόρτισης οδηγούνται ηλεκτρόνια στην κάθοδο, προς την οποία οδεύουν θετικά ιόντα από τον ηλεκτρολύτη και έτσι γίνεται αντίδραση αναγωγής. Αντίθετα ηλεκτρόνια απομακρύνονται από την άνοδο, προς την οποία οδεύουν αρνητικά ιόντα από τον ηλεκτρολύτη και γίνεται αντίδραση οξείδωσης [13].



Σχήμα 15: Εκφόρτιση και φόρτιση ηλεκτροχημικών κελιών [2]

Για την ελαχιστοποίηση της εσωτερικής αντίστασης ενός ηλεκτροχημικού κελιού, τα δύο ηλεκτρόδια στο ηλεκτροχημικό στοιχείο πρέπει να βρίσκονται όσο το δυνατόν κοντά το ένα στο άλλο. Για να αποφευχθεί η πολύ μεγάλη πτώση τάσης κατά μήκος των ακροδεκτών της μπαταρίας, ιδιαίτερα κατά τη δημιουργία μεγάλων ρευμάτων, αυτή η εσωτερική αντίσταση πρέπει να είναι της τάξης των mΩ. Ακόμη και στην

περίπτωση που χρησιμοποιηθούν οι καλύτεροι ιοντικά αγώγιμοι ηλεκτρολύτες, η χαμηλή αυτή ηλεκτρική αντίσταση επιτυγχάνεται μόνο όταν η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων περιορίζεται περίπου στο 1 mm. Για αυτόν τον λόγο είναι απαραίτητη η χρήση διαχωριστή, καθώς και για την αποτροπή πιθανής ηλεκτρικής επαφής των δύο ηλεκτροδίων, γεγονός που θα προκαλούσε εσωτερικό βραχυκύκλωμα. Ο διαχωριστής τις περισσότερες φορές κατασκευάζεται από ένα λεπτό, πορώδες και μονωτικό υλικό και τοποθετείται μεταξύ των ηλεκτροδίων. Επίσης ο διαχωριστής επιτρέπει τη μεταφορά ιοντικών ρευμάτων, μέσω του ηλεκτρολύτη που γεμίζει τους πόρους του [14].

### **Θεωρητικό δυναμικό ηλεκτροχημικών στοιχείων και τάση λειτουργίας τους**

Όταν σε ένα ηλεκτροχημικό στοιχείο πραγματοποιείται μια ηλεκτροχημική αντίδραση της μορφής:



παρατηρείται μείωση της ελεύθερης ενέργειας του συστήματος. Σε κανονικές συνθήκες, δηλαδή σε θερμοκρασία 25°C, πίεση 1atm και ενεργότητες ουσιών 1mol/L, η ελεύθερη ενέργεια δίνεται από την σχέση:

$$\Delta G^0 = -nFE^0 \quad (2)$$

όπου  $n$ : αριθμός ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στην ηλεκτροχημική αντίδραση

$F$ : σταθερά Faraday με  $F=96485 \text{ C/mol}$

$E^0$ : κανονικό δυναμικό της ηλεκτροχημικής αντίδρασης σε  $V$

Το γεγονός που καθιστά ένα ηλεκτροχημικό στοιχείο ικανό να δώσει ηλεκτρική ενέργεια σε ένα εξωτερικό κύκλωμα είναι η μεταβολή αυτή της ελεύθερης ενέργειας του συστήματος [2].

Το κανονικό δυναμικό  $E^0$  ενός στοιχείου εξαρτάται από τα ενεργά υλικά στα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου και προσδιορίζεται γνωρίζοντας την ελεύθερη ενέργεια των υλικών που συμμετέχουν στην αντίδραση, ή πειραματικά. Ένας άλλος τρόπος να υπολογιστεί είναι από τα κανονικά ηλεκτροδιακά δυναμικά των ημιαντιδράσεων οξείδωσης ή αναγωγής, τα οποία για κανονικές συνθήκες είναι γνωστά. Στον Πίνακα 1 δίνονται οι τιμές των κανονικών δυναμικών για ορισμένες

ημιαντιδράσεις. Με βάση αυτές τις τιμές υπολογίζεται το κανονικό δυναμικό  $E^0$  της συνολικής ηλεκτροχημικής αντίδρασης από τη σχέση:

$$E^0 = E_+^0 - E_-^0 \quad (3)$$

όπου  $E_+^0$ : κανονικό δυναμικό των ημιαντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στο ηλεκτρόδιο της καθόδου

$E_-^0$ : κανονικό δυναμικό των ημιαντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στο ηλεκτρόδιο της ανόδου

Όταν οι συνθήκες είναι διάφορες από τις κανονικές, το δυναμικό υπολογίζεται από τη σχέση του Nernst:

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_C^c a_D^d}{a_A^a a_B^b} \quad (4)$$

όπου  $a_i$ : οι ενεργότητες των αντίστοιχων ουσιών

$R$ : η παγκόσμια σταθερά των αερίων  $R=8,314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$

$T$ : η απόλυτη θερμοκρασία σε  $K$

και η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας στην περίπτωση αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta G = -nFE \quad (5)$$

Πρακτικά όταν μια μπαταρία είναι συνδεδεμένη με ένα εξωτερικό φορτίο και εκφορτίζεται έχει δυναμικό χαμηλότερο από το θεωρητικό. Η τιμή του δυναμικού εξαρτάται όχι μόνο από τη φύση του συστήματος, τη θερμοκρασία και την πίεση αλλά και από την ένταση του ρεύματος. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε απώλειες λόγω της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας, αλλά και λόγω διαφόρων υπερτάσεων κατά την εκφόρτιση [2]. Δηλαδή μπορούμε να πούμε ότι υπάρχουν:

**Ωμικές απώλειες αντίστασης** οι οποίες έχουν άμεση σχέση με την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας και υπολογίζονται από το γινόμενο ρεύματος επί αντίσταση ( $I \cdot R$ )

**Απώλειες υπερτάσεων ή πόλωσης** οι οποίες έχουν σχέση με την κινητική των ηλεκτροχημικών δράσεων στα ηλεκτρόδια και πιο συγκεκριμένα με το στάδιο που ελέγχει τη συνολική κινητική.

Πίνακας 1.1: Κανονικά ηλεκτροδιακά δυναμικά [2]

Αντίδραση	E°,V (SHE)	Αντίδραση	E°,V (SHE)
$\text{Li}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Li}$	-3.045	$\text{HgO} + \text{H}_2\text{O} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Hg} + 2\text{OH}^-$	0.098
$\text{K}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{K}$	-2.935	$\text{Sn}^{4+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Sn}^{2+}$	0.154
$\text{Ca}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Ca}$	-2.866	$\text{Cu}^{2+} + e^- \rightleftharpoons \text{Cu}^+$	0.153
$\text{Na}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Na}$	-2.714	$\text{AgCl} + e^- \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{Cl}^-$	0.2224
$\text{Mg}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Mg}$	-2.363	$\text{Hg}_2\text{Cl}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{Hg} + 2\text{Cl}^-$	0.2676
$\text{Al}^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons \text{Al}$	-1.662	$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Cu}$	0.337
$\text{Ti}^{2+} + e^- \rightleftharpoons 2e^- \rightleftharpoons \text{Ti}$	-1.628	$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + e^- \rightleftharpoons \text{e}(\text{CN})_6^{4-}$	0.36
$\text{Zn}(\text{OH})_2 + 2e^- \rightleftharpoons \text{Zn} + 2\text{OH}^-$	-1.245	$\text{Cu}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Cu}$	0.521
$\text{Mn}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Mn}$	-1.180	$\text{I}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{I}^-$	0.536
$2\text{H}_2\text{O} + 2e^- \rightleftharpoons \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	-0.822	$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}_2$	0.682
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Zn}$	-0.764	$\text{Fe}^{3+} + e^- \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}$	0.771
$\text{S} + 2e^- \rightleftharpoons \text{S}^{2-}$	-0.48	$\text{Br}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{Br}^-$	1.065
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Fe}$	-0.441	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	1.299
$\text{Cd}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Cd}$	-0.403	$\text{Cl}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	1.358
$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Ni}$	-0.250	$\text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	1.455
$\text{Sn}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Sn}$	-0.136	$\text{Ce}^{4+} + e^- \rightleftharpoons \text{Ce}^{3+}$	1.61
$2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{H}_2$	0.0000	$\text{F}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{F}^-$	1.87

Υπέρταση ονομάζεται η απόκλιση του δυναμικού των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων από τη θεωρητική τιμή, που οφείλεται στον μηχανισμό και την κινητική τους και συμβολίζεται με  $n$ . Ανάλογα με τα ηλεκτροχημικά συστήματα προκύπτουν διάφορες αιτίες δημιουργίας υπερτάσεων, όμως γενικά τα είδη υπερτάσεων ομαδοποιούνται σε δύο κατηγορίες:

α) **υπέρταση ενεργοποίησης** η οποία οφείλεται σε περιορισμούς στη κινητική μεταφοράς φορτίου, δηλαδή στη δυσκολία μεταφοράς φορτίου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση απαιτείται η παροχή ορισμένου ποσού ενέργειας ενεργοποίησης ώστε να ξεπεραστεί ένα ενεργειακό φράγμα και να πραγματοποιηθεί η ηλεκτροχημική αντίδραση.

β) **υπέρταση συγκέντρωσης** η οποία προκύπτει από περιορισμούς στην κινητική της μεταφοράς των αντιδρώντων ή των προϊόντων προς ή από τη διεπιφάνεια ηλεκτροδίων/ηλεκτρολύτη. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε τοπική κατανάλωση ή τοπική παραγωγή ηλεκτροδραστικών ειδών κοντά στα ηλεκτρόδια, εξ

αιτίας της αργής διάχυσής τους και έχει ως αποτέλεσμα μεταβολές των συγκεντρώσεων κοντά στις ηλεκτροδιακές επιφάνειες σε σχέση με τις συγκεντρώσεις μέσα στον κύριο όγκο του ηλεκτρολύτη. Αυτό επιδρά και στις τιμές των δυναμικών, οι οποίες εξαρτώνται από τη συγκέντρωση στις περιοχές κοντά στα ηλεκτρόδια [2].

Εξ αιτίας των παρατηρούμενων διαφορών στις τιμές του δυναμικού των στοιχείων τις περισσότερες φορές αναφέρονται για αυτά διάφορες τιμές όπως:

- **Θεωρητικό ή θερμοδυναμικό δυναμικό** το οποίο εξαρτάται από τα υλικά των ανόδων και καθόδων, τη σύσταση του ηλεκτρολύτη και τη θερμοκρασία
- **Δυναμικό ανοικτού κυκλώματος** το οποίο είναι το δυναμικό χωρίς σύνδεση με εξωτερικό φορτίο και τις περισσότερες φορές έχει τιμές παρόμοιες του θεωρητικού δυναμικού
- **Δυναμικό κλειστού κυκλώματος** το οποίο είναι το δυναμικό υπό συνθήκες σύνδεσης με εξωτερικό φορτίο και μειώνεται με την εξέλιξη της εκφόρτισης

## 1.4 Χαρακτηριστικά συσσωρευτών

Υπάρχουν ορισμένα χαρακτηριστικά σύμφωνα με τα οποία προσδιορίζονται οι συσσωρευτές και συγκεκριμένη ορολογία που χρησιμοποιείται για την περιγραφή, ταξινόμηση και σύγκριση μπαταριών, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω.

### 1.4.1 Κατηγοριοποίηση συσσωρευτών

Οι συσσωρευτές κατηγοριοποιούνται με διάφορους τρόπους, σημαντικότερος από αυτούς είναι ανάλογα με τη δυνατότητα επαναφόρτισης τους ή μη.

**Πρωτεύοντες και Δευτερεύοντες Συσσωρευτές:** πρωτεύοντες συσσωρευτές είναι αυτοί που δεν έχουν τη δυνατότητα να επαναφορτιστούν ενώ δευτερεύοντες είναι αυτοί που έχουν τη δυνατότητα να επαναφορτιστούν.

**Υψηλής Ενέργειας ή Υψηλής Ισχύος Συσσωρευτές,** όσον αφορά την αποδιδόμενη ενέργεια ή ισχύ.

**Μεγάλης Διάρκειας ή Μεγάλης Αντοχής Συσσωρευτές**, όσον αφορά τη διάρκεια ζωής τους. Αυτή η κατηγοριοποίηση σχετίζεται με κατάλληλη τροποποίηση της χημείας τους ώστε να προκύψει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής εις βάρος της ενεργειακής τους απόδοσης.

**C-rate και E-rate**, όσον αφορά την εκφόρτιση τους. Για την περιγραφή της εκφόρτισης ενός συσσωρευτή, το ρεύμα εκφόρτισης εκφράζεται συνήθως μέσω του όρου C-rate, με σκοπό την κανονικοποίηση του ως προς τη χωρητικότητα του συσσωρευτή, που διαφέρει μεταξύ των διαφόρων συσσωρευτών/μπαταριών. Ο C-rate αποτελεί μέτρο του ρυθμού με τον οποίο εκφορτίζεται ένας συσσωρευτής σε σχέση με τη μέγιστη χωρητικότητά του. Ο συγκεκριμένος τρόπος ταξινόμησης βοηθά στη σύγκριση της λειτουργίας και απόδοσης διαφορετικών συστημάτων μεταξύ τους. Αντίστοιχα ο E-rate περιγράφει την ισχύ εκφόρτισης [15].

#### 1.4.2 Τεχνικές προδιαγραφές συσσωρευτών

Στα τεχνικά δελτία των συσσωρευτών συναντώνται ορισμένες από τις παρακάτω προδιαγραφές.

**Ονομαστική Τάση (V)** : Η τάση αναφοράς του συσσωρευτή, είναι η τάση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων/πόλων και εξαρτάται από τη χημική σύσταση των ηλεκτροδίων, τη συγκέντρωση των ενεργών υλικών και τη θερμοκρασία. Μονάδα μέτρησης της τάσης είναι V.

**Τάσης Αποκοπής (cut-off voltage)**: Η ελάχιστη επιτρεπόμενη τάση, η τάση όπου γενικά χαρακτηρίζει έναν «άδειο» συσσωρευτή, δηλαδή έναν εκφορτισμένο συσσωρευτή.

**Χωρητικότητα ή Ονομαστική Χωρητικότητα (Ah)**: Είναι το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο που αποδίδει ένας συσσωρευτής όταν εκφορτίζεται με κάποιο ρεύμα εκφόρτισης, από κατάσταση πλήρους φόρτισης μέχρι την τάση αποκοπής. Μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας είναι το Coulomb, όμως χρησιμοποιούνται τα αμπερώρια ( $1Ah=3600C$ ) επειδή το  $1C$  είναι πολύ μικρή μονάδα. Ο τρόπος υπολογισμού της χωρητικότητας είναι με πολλαπλασιασμό του ρεύματος εκφόρτισης

(σε  $A$ ) με τον χρόνο εκφόρτισης (σε  $h$ ). Η χωρητικότητα εξαρτάται από την ποσότητα των ενεργών υλικών και επηρεάζεται από τις συνθήκες εκφόρτισης.

**Ενέργεια ή Ονομαστική Ενέργεια ( $Wh$ ):** Το ενεργειακό περιεχόμενο ενός συσσωρευτή, δηλαδή οι ολικές βατώρες (Watt-hours) που αποδίδονται όταν ο συσσωρευτής εκφορτίζεται με ένα συγκεκριμένο ρεύμα εκφόρτισης από κατάσταση πλήρους φόρτισης μέχρι την τάση αποκοπής. Ο τρόπος υπολογισμού της ενέργειας είναι με πολλαπλασιασμό της ισχύς εκφόρτισης (σε  $W$ ) με τον χρόνο εκφόρτισης (σε  $h$ ).

**Κύκλος Ζωής:** Ο αριθμός των κύκλων εκφόρτισης-φόρτισης ενός συσσωρευτή έως ότου σταματήσουν να πληρούνται κάποια συγκεκριμένα κριτήρια απόδοσης. Ο κύκλος ζωής προσδιορίζεται υπό ειδικές συνθήκες φόρτισης και εκφόρτισης και πάντα μέχρι ένα συγκεκριμένο βάθος/έκταση εκφόρτισης στους κύκλους εκφόρτισης-φόρτισης. Ουσιαστικά η διάρκεια ζωής επηρεάζεται από τον ρυθμό και το βάθος της εκφόρτισης σε κάθε κύκλο καθώς και από την θερμοκρασία και την υγρασία. Όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος εκφόρτισης τόσο μικρότερος είναι ο κύκλος ζωής.

**Ειδική Ενέργεια ( $Wh/L$ ):** Η ονομαστική ενέργεια ενός συσσωρευτή ανά μονάδα μάζας. Ορισμένες φορές αναφέρεται και ως βαρομετρική ενεργειακή πυκνότητα. Περιγράφει την αποδιδόμενη από έναν συσσωρευτή ενέργεια ανά μονάδα μάζας των ενεργών υλικών και είναι χαρακτηριστική της χημείας του συσσωρευτή καθώς και του αριθμού των στοιχείων που τον αποτελούν και του τρόπου σύνδεσής τους. Μονάδα μέτρησης της ειδικής ενέργειας είναι  $Wh/L$ .

**Ειδική Ισχύς ( $W/kg$ ):** Η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς ανά μονάδα μάζας. Καθορίζει την απαιτούμενη μάζα ενεργών ουσιών για την επίτευξη ενός δεδομένου στόχου απόδοσης και εξαρτάται από τη χημεία του συσσωρευτή καθώς και από τον αριθμό των στοιχείων που τον αποτελούν και τον τρόπο σύνδεσής τους, όπως και η ειδική ενέργεια, αλλά και από την εσωτερική αντίστασή του. Μονάδα μέτρησης της ειδικής ισχύος είναι  $W/kg$ .

**Ενεργειακή Πυκνότητα ( $Wh/L$ ):** Η ονομαστική ενέργεια ενός συσσωρευτή ανά μονάδα όγκου. Ορισμένες φορές αναφέρεται και ως ογκομετρική ενεργειακή



πυκνότητα. Καθορίζει το απαιτούμενο μέγεθος ενός συσσωρευτή για την επίτευξη ενός δεδομένου ηλεκτρικού ρεύματος και είναι χαρακτηριστική της χημείας του συσσωρευτή καθώς και του αριθμού των στοιχείων που τον αποτελούν και του τρόπου σύνδεσής τους. Μονάδα μέτρησης της ενεργειακής πυκνότητας είναι  $Wh/L$ .

**Πυκνότητα Ισχύος ( $W/L$ ):** Η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς ανά μονάδα όγκου. Η πυκνότητα ισχύος καθορίζει το απαιτούμενο μέγεθος ενός συσσωρευτή για την επίτευξη συγκεκριμένης απόδοσης και είναι χαρακτηριστική της χημικής σύστασης του συσσωρευτή καθώς και του αριθμού των στοιχείων που τον αποτελούν και του τρόπου σύνδεσής τους. Μονάδα μέτρησης της πυκνότητας ισχύος είναι  $W/L$ .

**Μέγιστο Συνεχές Ρεύμα Εκφόρτισης:** Το μέγιστο ρεύμα με το οποίο ο συσσωρευτής μπορεί να εκφορτίζεται συνεχόμενα. Τις περισσότερες φορές το όριο αυτό ορίζεται από τον κατασκευαστή, με σκοπό την αποφυγή μεγάλων ρυθμών εκφόρτισης που είναι πιθανό να βλάψουν τη μπαταρία ή να μειώσουν τη χωρητικότητά της.

**Μέγιστο Παλμικό Ρεύμα Εκφόρτισης 30 δευτερολέπτων:** Το μέγιστο παλμικό ρεύμα 30 δευτερολέπτων με το οποίο μπορεί να αποφορτιστεί ένας συσσωρευτής. Τις περισσότερες φορές το όριο αυτό ορίζεται από τον κατασκευαστή, με σκοπό την αποφυγή υπερβολικών ρυθμών εκφόρτισης που είναι πιθανό να βλάψουν τη μπαταρία ή να μειώσουν τη χωρητικότητά της.

**Τάση Φόρτισης:** Η τάση στην οποία φορτίζεται ένας συσσωρευτής ώστε να αποκτήσει πλήρη χωρητικότητα. Τα σχήματα φόρτισης αποτελούνται τις περισσότερες φορές από ένα σταθερό ρεύμα φόρτισης, μέχρις ότου η τάση φθάσει την τιμή της τάσης φόρτισης, και στη συνέχεια επιβολή σταθερής τάσης φόρτισης, επιτρέποντας στο ρεύμα φόρτισης να μειωθεί μέχρι να πάρει πολύ μικρές τιμές.

**Δυναμικό Συντήρησης (FloatVoltage):** Η τάση στην οποία διατηρείται ένας συσσωρευτής μετά από πλήρη φόρτιση, για να διατηρεί τη χωρητικότητά του αντισταθμίζοντας την αυτοεκφόρτισή του.

**(Προτεινόμενο) Ρεύμα Φόρτισης:** Το ιδανικό ρεύμα με το οποίο φορτίζεται αρχικά ένας συσσωρευτής (μέχρι το 70% περίπου της χωρητικότητάς του), σε ένα σχήμα φόρτισης με σταθερό ρεύμα πριν τη μετάβαση σε φόρτιση με σταθερή τάση.

**Εσωτερική Αντίσταση:** Η ηλεκτρική αντίσταση στο εσωτερικό ενός συσσωρευτή. Τις περισσότερες φορές διαφέρει μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης, εξαρτάται από τη χημική σύσταση του συσσωρευτή και επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, το μέγεθός του, το ρεύμα εκφόρτισης και τους κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης που έχει υποστεί, δηλαδή από τη γενικότερη κατάστασή του. Η εσωτερική αντίσταση κάθε συσσωρευτή είναι απαραίτητο να είναι ιδιαίτερα μικρή, γιατί καθώς αυτή αυξάνεται η απόδοσή του μειώνεται, με αποτέλεσμα η θερμική του σταθερότητα να ελαττώνεται, καθώς μεγάλο μέρος της ενέργειας φόρτισής του μετατρέπεται σε θερμότητα.

**Απόδοση Συσσωρευτή:** Η απόδοση ενός συσσωρευτή εκφράζεται με δύο τρόπους. Είτε σαν απόδοση ρεύματος είτε σαν ενεργειακή απόδοση. Ως απόδοση ρεύματος δίδεται από τον λόγο του ηλεκτρικού φορτίου που παράγεται κατά την εκφόρτιση προς το φορτίο που αποθηκεύεται κατά τη φόρτιση, ενώ ως ενεργειακή απόδοση από τον λόγο της ενέργειας που παρέχεται κατά την εκφόρτιση προς την ενέργεια που αποθηκεύεται κατά τη φόρτιση [15].

#### 1.4.3 Κατάσταση συσσωρευτών

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες από τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την κατάσταση φόρτισης/λειτουργίας ενός συσσωρευτή.

**Κατάσταση Φόρτισης (State Of Charge - SOC) (%):** Εκφράζει τη χωρητικότητα που παρουσιάζει μια δεδομένη στιγμή ένας συσσωρευτής σαν ποσοστό της μέγιστης χωρητικότητάς του. Ο τρόπος υπολογισμού της κατάστασης φόρτισης είναι με ολοκλήρωση της μεταβολής του ρεύματος συναρτήσει του χρόνου οπότε και προσδιορίζεται η μεταβολή της χωρητικότητας με τον χρόνο.

**Βάθος Εκφόρτισης (Depth Of Discharge - DOD) (%):** Εκφράζει το ποσοστό της χωρητικότητας ενός συσσωρευτή που έχει εκφορτιστεί σαν ποσοστό της μέγιστης χωρητικότητας. Ως μεγάλη εκφόρτιση θεωρείται μια της τάξης του 80% DOD.

**Τάση Πόλων (V):** Η τάση μεταξύ των ακροδεκτών ενός συσσωρευτή όταν αυτός συνδέεται με εξωτερικό φορτίο. Η τάση στους πόλους του συσσωρευτή μεταβάλλεται με την κατάσταση φόρτισης και το ρεύμα εκφόρτισης.

**Τάση Ανοικτού Κυκλώματος (V):** Η τάση μεταξύ των ακροδεκτών ενός συσσωρευτή όταν σε αυτόν δεν εφαρμόζεται φορτίο. Η τάση ανοικτού κυκλώματος εξαρτάται από την κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή [15].

## 1.5 Τεχνικές επιτήρησης υγείας

Οι τεχνολογικές καινοτομίες στη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και η ανοχή στην κακοποίηση οδηγούν στην ανάπτυξη μπαταριών μεγάλης διάρκειας. Ωστόσο, ανεξάρτητα με το πόσο καλή είναι η μπαταρία, θα υποβαθμιστεί με την πάροδο του χρόνου λόγω γήρανσης και περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ως εκ τούτου, είναι πάντα επιθυμητή η ανίχνευση της εκάστοτε υποβάθμισης, λαμβάνοντας μέτρα για την παρεμπόδιση των σφάλματων και την αποτροπή λαθών. Έτσι λειτουργεί η παρακολούθηση της υγείας ενός συσσωρευτή. Η πρόγνωση από την άλλη πλευρά έχει να κάνει με την υποβάθμιση/διάδοση σφαλμάτων και προβλέπει πόσο σύντομα θα αποτύχει ένα σύστημα/εξάρτημα ή θα φτάσει σε ένα επίπεδο που δεν μπορεί να εγγυηθεί μια ικανοποιητική απόδοση. Κατά προτίμηση, η πρόγνωση διεξάγεται πρώτα, με ή χωρίς πληροφορίες που αντλήθηκαν από την παρακολούθηση της υγείας. Για περιπτώσεις στις οποίες η πρόγνωση δεν μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια την υπολειπόμενη ωφέλιμη ζωή, η παρακολούθηση της υγείας γνωστοποιεί την κατάσταση της υγείας μια μπαταρίας [16].

Η παρακολούθηση της υγείας και η πρόγνωση για μηχανήματα έχουν συγκεντρώσει μεγάλη προσοχή στην ερευνητική κοινότητα τα τελευταία χρόνια. Εκατοντάδες εργασίες σε αυτόν τον τομέα, συμπεριλαμβανομένων θεωριών και πρακτικών εφαρμογών, εμφανίζονται κάθε χρόνο σε συνέδρια, ακαδημαϊκά περιοδικά και τεχνικές εκθέσεις. Ωστόσο, μια μπαταρία, η οποία διαθέτει ηλεκτροχημικές συμπεριφορές, είναι διαφορετική από ένα μηχανικό σύστημα σε διάφορες πτυχές. Πρώτα απ' όλα, οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις μέσα σε μια μπαταρία είναι σχεδόν απρόσιτες με τη χρήση κοινών τεχνολογιών αισθητήρων, με αποτέλεσμα τη σπανιότητα των δεδομένων για ανάλυση. Δεύτερον, σε σύγκριση με τα δεδομένα από μηχανήματα τύπου κυματομορφής, τα πιο διαθέσιμα δεδομένα για παρακολούθηση που συλλέγονται από τις μπαταρίες έχουν τύπο τιμής, όπως η τάση,

το ρεύμα και η θερμοκρασία. Τέλος, τα προφίλ λειτουργίας των μπαταριών είναι πολύ πιο δυναμικά από αυτά των μηχανικών συστημάτων. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση και την υποβάθμιση των μπαταριών είναι η απώλεια χωρητικότητας λόγω γήρανσης της μπαταρίας, η ανισορροπία χωρητικότητας μεταξύ των στοιχείων της μπαταρίας, η αυτοεκφόρτιση κα. Ως εκ τούτου, για τον σχεδιασμό κατάλληλων μεθοδολογιών και αλγόριθμων για την παρακολούθηση υγείας της μπαταρίας και την πρόγνωση πρέπει να ληφθεί υπόψη η μοναδικότητα του συστήματος της μπαταρίας [16].

### 1.5.1 Εκτίμηση κατάστασης φόρτισης (State Of Charge – SOC)

Η εκτίμηση της κατάστασης φόρτισης ήταν πάντα ένα μεγάλο πρόβλημα για όλες τις συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία. Μια ακριβής εκτίμηση της SOC όχι μόνο αξιολογεί την αξιοπιστία των προϊόντων, αλλά και παρέχει κρίσιμες πληροφορίες όπως την υπολειπόμενη χρήσιμη ενέργεια ή/και τον υπολειπόμενο εύχρηστο χρόνο. Επιπλέον, μια αποτελεσματική και ακριβής εκτίμηση της SOC θα καθοδηγήσει τον σχεδιασμό των στρατηγικών φόρτισης/εκφόρτισης που έχει μεγάλη σημασία στην εφαρμογή υψηλών ρευμάτων όπου τα επιμέρους στοιχεία είναι πιθανό να έχουν διαφορετικές χωρητικότητες λόγω παραλλαγής κατασκευής, φυσικής γήρανσης, υποβάθμισης κα. Σε αυτήν την περίπτωση, μια βέλτιστη στρατηγική φόρτισης/εκφόρτισης θα αποτρέψει αποτελεσματικά την εμφάνιση ανωμαλιών όπως υπερφόρτιση, υπερθέρμανση και η υπερβολική εκφόρτιση από το να συμβούν. Κατά συνέπεια, η αξιοπιστία της συσκευής αποθήκευσης ενέργειας θα ενισχυθεί και η διάρκεια ζωής του προϊόντος θα επεκταθεί [16].

Έχει εισαχθεί πλήθος μεθόδων εκτίμησης της SOC από τη δεκαετία του 1980, η υιοθέτηση των οποίων ήταν σταδιακή σε διάφορες ακαδημαϊκές έρευνες και βιομηχανικές εφαρμογές. Ωστόσο, ο ορισμός της SOC δεν έχει ακόμη συμφωνηθεί, η ασάφεια αυτή οδήγησε σε μεγάλη σύγχυση στην κατανόηση της έννοιας και της χρησιμότητας της SOC, καθώς και της συμμετοχής της σε περαιτέρω αναλυτικά καθήκοντα, όπως την εκτίμηση της χωρητικότητας και την πρόβλεψη της υπολειπόμενης χρήσιμης ζωής [16].

Η πιο κλασική μέθοδος υπολογισμού της SOC δίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$SOC = 1 - \frac{\int i \cdot dt}{C_n} \quad (6)$$

όπου  $i$ : το ρεύμα

$C_n$ : η ονομαστική χωρητικότητα

$t$ : ο χρόνος

Αυτή η προσέγγιση απαιτεί δυναμική μέτρηση του ρεύματος των στοιχείων/μπαταρίας, το χρονικό ολοκλήρωμα του οποίου θεωρείται ότι παρέχει άμεση ένδειξη της διαθέσιμης χωρητικότητας. Ωστόσο, η ονομαστική χωρητικότητα είναι μετρούμενη σε σταθερό ρυθμό εκφόρτισης υπό ελεγχόμενη θερμοκρασία. Αυτές οι συνθήκες σπάνια συμβαίνουν σε πραγματικές εφαρμογές. Ως εκ τούτου, η χρήση της ονομαστικής χωρητικότητας ως συνολική χωρητικότητα παραμένει αμφιλεγόμενη [17]. Εξάλλου, λόγω της εξάρτησής της από την ολοκλήρωση, τα σφάλματα σε τελικές μετρήσεις συσσωρεύονται και μπορεί να προκύψουν μεγάλα σφάλματα της SOC, γεγονός που απαιτεί εκ νέου βαθμονόμηση σε τακτά χρονικά διαστήματα. Μια άλλη εκδοχή του υπολογισμού της SOC εξετάζει την επίδραση της δυνητικής απόδοσης και έχει ως εξής:

$$SOC = 1 - \frac{\int i \cdot \eta \cdot dt}{C_n} \quad (7)$$

όπου  $\eta$ : η δυνητική απόδοση ορισμένη ως ο λόγος μεταξύ ενέργειας φόρτισης και εκφόρτισης που απαιτείται για την αποκατάσταση της πραγματικής χωρητικότητας ( $\eta \leq 1$ ).

Ακόμα μια άλλη έκδοση της SOC ήταν απλά σε μια γραμμική σχέση με ένα προκαθορισμένο επίπεδο τάσης [18].

Η δημιουργία εκτεταμένων πινάκων σύγκρισης της κατάστασης φόρτισης (SOC) και τάσης ανοικτού κυκλώματος (OCV-Open Circuit Voltage) κάτω από διαφορετικές θερμοκρασίες έχει γίνει εδώ και καιρό κοινή πρακτική των κατασκευαστών μπαταριών για την προετοιμασία προτεινόμενων φύλλων δεδομένων. Αποκαλύφθηκε και μια άλλη παρόμοια μέθοδος εκτίμησης της SOC η οποία αναζητούσε σχέσεις καταγραφής του μεγέθους του ρεύματος αιχμής και της

SOC [18]. Αυτή η μέθοδος, ωστόσο, απαιτεί εκτεταμένες δοκιμές και την κατασκευή πινάκων, και λαμβάνεται περισσότερο ως συμπληρωματικό μέσο για να εξασφαλίσει την ακρίβεια και αποτελεσματικότητα των παραδοσιακών πινάκων SOC-OCV. Ένα μεγάλο μειονέκτημα αυτών των προσπαθειών για την κατάρτιση των πινάκων είναι ότι οι πραγματικές συνθήκες σπανίως αντιστοιχούν ακριβώς σε αυτές που έχουν καταγραφεί, με αποτέλεσμα αποκλίσεις μεταξύ της εκτιμώμενης SOC και της πραγματικής SOC [19].

Αντί να βασίζονται αποκλειστικά σε πίνακες SOC-OCV, περισσότερες προηγμένες μέθοδοι εκτίμησης της SOC που βασίζονται σε ασαφή λογική (fuzzy logic), κινητό μέσο όρο αυτόματης παλινδρόμησης, τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης, εκτεταμένο φίλτρο Kalman και μηχανή διανύσματος υποστήριξης έχουν προταθεί σε ακαδημαϊκά περιοδικά, συνέδρια και πατέντες [16].

### **Fuzzy logic**

Αντί να επιδιώκουμε μόνο απολύτως καθαρές και ακριβείς πληροφορίες, οι μέθοδοι ασαφούς λογικής επιτρέπουν ένα ορισμένο επίπεδο αβεβαιότητας και ασάφειας στην επεξεργασία ελλιπών και θορυβωδών δεδομένων. Η εφαρμογή της μεθόδου ασαφούς λογικής αποτελείται από 4 μέρη: σχέση εισόδου-εξόδου βάσει κανόνων, συνάρτηση μέλους για τις εισόδους και αποτελέσματα, αιτιολόγηση και αποσαφήνιση των αποτελεσμάτων [16].

### **Κινητός μέσος όρος αυτόματης παλινδρόμησης (Autoregressive moving average – ARMA)**

Το μοντέλο ARMA είναι δημοφιλές στατιστικό μοντέλο που εφαρμόζεται σε χρονοσειρές και σε index-based δεδομένα για να μελετούν τα πρότυπα ενός συστήματος και/ή να προβλέπουν τις τιμές του εγγύς μέλλοντος σε μια σειρά. Τα μοντέλα ARMA αποτελούνται από δύο μέρη: ένα τμήμα αυτόματης παλινδρόμησης (AR) και ένα τμήμα κινητού μέσου όρου (MA).

Για το συμπέρασμα της SOC από τη μέτρηση σύνθετης αντίστασης, αναπτύχθηκε ένα ηλεκτροχημικό μοντέλο δύο ηλεκτροδίων και χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μετρούμενης αντίστασης για επικύρωση. Οι είσοδοι σε αυτό το μοντέλο, όπως η αντίσταση ηλεκτρολύτη, η αντίσταση μεταφοράς φορτίου και η χωρητικότητα διπλού επιπέδου, έχουν εξαχθεί και τροφοδοτηθεί σε δεύτερης τάξης μοντέλο ARMA για να υπολογιστεί η SOC [20].

### **Τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (Artificial neural network – ANN)**

Ένα ANN, το οποίο αποτελείται από διάφορους κόμβους και επίπεδα, είναι μια απλή απομίμηση του ανθρώπινου εγκεφάλου. Απαιτεί ελάχιστες ειδικές γνώσεις στη μοντελοποίηση σύνθετων συστημάτων και υιοθετεί μια προσέγγιση «μαύρο κουτί» σε διάφορες πηγές δεδομένων. Λόγω της απλότητάς του στο χειρισμό των δεδομένων από σύνθετα ή ακόμα και άγνωστα συστήματα, το ANN έχει γίνει μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους για μοντελοποίηση πολύπλοκου συστήματος. Ένα τυπικό απλό νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από 3 επίπεδα: ένα επίπεδο εισόδου, ένα κρυφό επίπεδο και ένα επίπεδο εξόδου. Ανάλογα με την ειδικές ανάγκες, όπως ο αριθμός εισόδων και εξόδων, ο αριθμός των κόμβων μέσα σε διαφορετικά επίπεδα μπορεί να οριστεί, για ευκολία ή από ανάγκη. Οι γραμμές που συνδέουν κάθε ζεύγος κόμβων σημειώνονται ως βάρη, που κυριολεκτικά χαρτογραφούν συναρτήσεις από έναν χώρο σε έναν άλλο χώρο [16].

### **Ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης (Electrochemical impedance spectroscopy – EIS)**

Η EIS έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που συνέβησαν μέσα σε χημικές μπαταρίες που είναι συνήθως απρόσιτες στην κοινή αισθητηριακή τεχνολογία. Πριν από την εφαρμογή EIS, θα πρέπει να προταθεί πρώτα ένα κατάλληλο ηλεκτροχημικό μοντέλο (π.χ. κύκλωμα φανταστικής μπαταρίας). Η EIS μπορεί να ενεργοποιήσει τα σήματα AC σε ορισμένες συχνότητες και να υπολογίσει τις αριθμητικές τιμές των μοντελοποιημένων στοιχείων όπως αντιστάσεις, πυκνωτές και πηνία, τα οποία θα

αποτελέσουν τη βάση για περαιτέρω ανάλυση. Ωστόσο, η EIS δεν είναι εύκολη στη χρήση, και τα αποτελέσματα από την EIS είναι δύσκολο να αναπαραχθούν κυρίως λόγω του γεγονότος ότι τα συστήματα που μετρούνται πρέπει να είναι σε σταθερή κατάσταση καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Υπογραμμίζεται η σημασία της υιοθέτησης κατάλληλων μεθόδων για τη χρήση των EIS. Για εκτίμηση της SOC, προσδιορίστηκε ότι υπάρχει στενή σχέση μεταξύ της SOC της μπαταρίας και ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων στο οποίο η χωρική αντίσταση ισούται με την επαγωγική αντίσταση. Επιπλέον, το εύρος συχνοτήτων ( $f_{\pm}$ ) ποικίλλει μονότονα και αναπαρίσταται ως λειτουργία της SOC της μπαταρίας. Επομένως, η SOC θα μπορούσε να βρεθεί από τον καθορισμό του επιθυμητού εύρους συχνοτήτων  $f_{\pm}$  [21].

### **Εκτεταμένο φίλτρο Kalman (Extended Kalman filter – EKF)**

Το εκτεταμένο φίλτρο Kalman (EKF) είναι επέκταση του φίλτρου Kalman (KF) για μη γραμμική εφαρμογή. Με τη χρήση μερικών παραγώγων και επέκταση σειράς Taylor, το EKF γραμμικοποιεί τις συναρτήσεις «Predict» και «Update» για τρέχουσες εκτιμήσεις. Μετά τη γραμμικοποίηση, η υπόλοιπη διαδικασία μοιάζει με όταν χρησιμοποιείτε ένα παραδοσιακό φίλτρο Kalman. Ωστόσο, το EKF δεν μπορεί να ασχοληθεί με συστήματα με μη γραμμικά χαρακτηριστικά δεδομένου ότι η προσέγγιση σειρών Taylor πρώτης τάξης δεν μπορεί να δώσει αρκετή ακρίβεια σε μη γραμμική περίπτωση [16].

Επανεξετάστηκαν διάφορες μέθοδοι εκτίμησης της SOC, συμπεριλαμβανομένων της μέτρησης Coulomb, μέτρηση OCV, ηλεκτροχημικό μοντέλο μοριακής κλίμακας και φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης. Τα μειονεκτήματα αυτών των μεθόδων επισημάνθηκαν όπως η ανακρίβεια στη δυναμική εκτίμηση της SOC και η εκτεταμένη εξειδίκευση που απαιτείται σε μοντελοποίηση μικρής κλίμακας. Για την ενεργοποίηση της δυναμική εκτίμησης της SOC με ενισχυμένη ακρίβεια, προτάθηκε ένα μοντέλο κυκλωμάτων με έμφαση στην θεραπεία της υστέρησης, θερμοκρασίας και χαλάρωσης. Το EKF εφαρμόστηκε με βάση το προτεινόμενο μοντέλο. Το κύριο μειονέκτημα της προσέγγισης αυτής είναι η χρήση πινάκων OCV-SOC, οι οποίοι είναι και είναι ανακριβείς σε κάποιο βαθμό όταν χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές πραγματικού κόσμου [22].



## Μηχανή διανύσματος υποστήριξης (Support vector machine – SVM)

Η μηχανή διανύσματος υποστήριξης (SVM) είναι ένας αλγόριθμος παλινδρόμησης που χρησιμοποιείται ευρέως σε εργασίες επεξεργασίας σήματος όπως η αναγνώριση κειμένου και η βιοπληροφορική. Η SVM προβάλλει τον αρχικό χώρο δεδομένων χαμηλής διάστασης σε χώρο χαρακτηριστικών υψηλής διάστασης. Αυτή η προβολή είναι ισοδύναμη με μετασχηματισμό μη γραμμικών προβλημάτων χαμηλότερης διάστασης σε γραμμικό πρόβλημα στην ανώτερη διάσταση. Ρυθμίζεται από σαφώς καθορισμένες συνθήκες περιορισμού (συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker), μόνο ένα μικρό υποσύνολο των δεδομένων κατάρτισης που αναφέρονται ως διανύσματα υποστήριξης και χρησιμοποιούνται στη διαμόρφωση εξισώσεων ταξινόμησης και παλινδρόμησης [16].

Οι Hansen και Wang χρησιμοποίησαν τη SVM για να κατασκευάσουν ένα εμπειρικό μοντέλο εκτίμησης SOC. Δεν χρειαζόταν κύκλωμα μπαταρίας. Το δiάνυσμα εισόδου συμπεριλάμβανε ρεύμα, τάση, SOC που υπολογίζεται από το προηγούμενο βήμα και την αλλαγή τάσης κατά τα τελευταία 1 s. Η έξοδος ήταν SOC στο τρέχον βήμα. Το μοντέλο εκτίμησης SOC εκπαιδεύτηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα σταθερής κατάστασης μόνο (παλμός σταθερού ρεύματος). Πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και στη δοκιμή SOC σταθερής κατάστασης και στη δοκιμή SOC δυναμικής κατάστασης. Τα αναφερθέντα σφάλματα στο σύστημα διαχείρισης κινδύνου ήταν περίπου 5% και 5,76% αντίστοιχα. Ένα καλό μοντέλο παλινδρόμησης SVM απαιτεί ακριβή ρύθμιση κάποιων εμπειρικών παραμέτρων, όπως η σταθερά C και το σφάλμα  $\epsilon$  [23].

### 1.5.2 Εκτίμηση τάσης

Η προσπάθεια της εκτίμησης της τάσης είναι για να δημιουργήσει ένα μοντέλο μπαταρίας ήχου, το οποίο έχει τις χημικές, ηλεκτρικές και φυσικές ιδιότητες μιας μπαταρίας σε κάποιο βαθμό και είναι αρκετά επαρκές για προσομοίωση επιδόσεων μπαταρίας υπό διαφορετικές συνθήκες. Η μέθοδος εκτίμησης ενέργειας μπαταρίας ήχου εγγυάται τη συνεχή παροχή ηλεκτρικού ρεύματος σε οποιοδήποτε ηλεκτρικές συσκευές. Υπάρχουν δυο τομείς εστίασης στην εκτίμηση τάσης. Ένας

τομέας είναι να προτείνει εκτίμηση αποδοτικής OCV. Ο άλλος είναι η βελτίωση της αποτελεσματικότητας παρακολούθησης τάσης στο κύκλωμα προστασίας έτσι ώστε να μπορούν να προληφθούν αστοχίες όπως υπερφόρτιση και υπερθέρμανση. Οι μέθοδοι εκτίμησης που έχουν υιοθετηθεί εδώ και καιρό από τις βιομηχανίες δέχονται ολοένα και περισσότερες επικρίσεις και υποψίες κυρίως επειδή αυτές οι μέθοδοι απαιτούσαν πολλές δαπανηρές δοκιμές για σκοπούς εκτεταμένης πινακοποίησης και συχνά παρουσίαζαν μη ικανοποιητική ακρίβεια υπό ειδικές συνθήκες. Περισσότερο προηγμένες μέθοδοι και τεχνολογίες απαιτούνται για την αντιμετώπιση των προκλήσεων [16].

Κατασκευάστηκε ένα εμπειρικό μοντέλο μπαταρίας ιόντων λιθίου ικανό να υπολογίσει την τάση ανοικτού κυκλώματος (OCV) κάτω από μια σειρά ρυθμών εκφόρτισης και θερμοκρασιών περιβάλλοντος. Αρχικά ορίστηκαν ένα μοντέλο αναφοράς εκφόρτισης με αυθαίρετη επιλογή ρυθμού εκφόρτισης και οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Αυτό το μοντέλο αναφοράς στη συνέχεια προσαρμόστηκε με την εισαγωγή ενός συντελεστή ρυθμού, συντελεστή θερμοκρασίας και τους δυνητικούς διορθωτικούς όρους για να χωρέσουν στα σενάρια απαλλαγής υπό ποικίλους ρυθμούς εκφόρτισης και θερμοκρασίες. Η ακρίβεια αυτού του μοντέλου βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη λεπτομερή ρύθμιση των διαφόρων εμπειρικών παραμέτρων, όπως ο συντελεστής ταχύτητας, ο συντελεστής θερμοκρασίας, και οι αντιστάσεις του μοντέλου. Άλλες ανησυχίες περιλαμβάνουν την επίδραση της επιδείνωσης της μπαταρίας σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα και τα δεδομένα προσομοίωσης, καθώς και τη δυνατότητα εφαρμογής του παρόντος μοντέλου σε σενάρια εκφόρτισης στα οποία οι ρυθμοί εκφόρτισης και οι θερμοκρασίες είναι διαφορετικοί από αυτούς της μοντελοποίησης [24].

### 1.5.3 Εκτίμηση χωρητικότητας

Η χωρητικότητα βαθμολογείται σε αμπέρ-ώρες (Ah), που ποσοτικοποιεί την διαθέσιμη ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε μια μπαταρία. Η απώλεια χωρητικότητας, ως αποτέλεσμα της αυξημένης αντίστασης, κυρίως στην κάθοδο μιας

μπαταρίας, θα προκαλέσει μειωμένη απόδοση με συνέπεια οι ηλεκτρικές συσκευές να μην μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο και λειτουργική αποτυχία με αποτέλεσμα ο συσσωρευτής να αδυνατεί να τροφοδοτεί την απαιτούμενη ενέργεια και ισχύ. Το ποσοστό απώλειας χωρητικότητας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες φόρτισης/εκφόρτισης όπως μέγιστη τάση φόρτισης, βάθος εκφόρτισης, μέγεθος ρεύματος, φορτίο και θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα οι παραδοσιακές μπαταρίες ιόντων λιθίου υφίσταται μόνιμη απώλεια χωρητικότητας με την πάροδο του χρόνου. Ως εκ τούτου, είναι αναγκαία η ακριβής εκτίμηση της διαθέσιμης χωρητικότητας για αξιοπιστία και καλύτερη διαχείριση της χρήσης ενέργειας. Επιπλέον, η ακριβής εκτίμηση της χωρητικότητας της μπαταρίας θα ωφελήσει τον σχεδιασμό καινοτόμων υλικών για κατασκευή μπαταριών και κυκλωμάτων προστασίας που εξισορροπούν τη μακροβιότητα της μπαταρίας και τις ενεργειακές ανάγκες [16].

Η εκτίμηση της χωρητικότητας της μπαταρίας είναι στενά συνδεδεμένη με εκείνη της κατάστασης φόρτισης (SOC), καθώς η SOC ορίζεται συνήθως ως ο λόγος μεταξύ διαθέσιμης χωρητικότητας και ονομαστικής χωρητικότητας. Ωστόσο, οι κατασκευαστές καθορίζουν την ονομαστική χωρητικότητα, για μια μπαταρία με τη διεξαγωγή μετρήσεων με σταθερό ρυθμό εκφόρτισης και σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Συνεπώς, η χρήση της ονομαστικής χωρητικότητας ως σημείο αναφοράς συχνά είναι ακατάλληλη για εφαρμογές στον πραγματικό κόσμο. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η SOC μπορεί να έχει διαφορετικές έννοιες και ορισμούς για συγκεκριμένες εφαρμογές και στόχους. Αντιθέτως, η χωρητικότητα της μπαταρίας είναι πιο καλά καθορισμένη, η εκτίμηση της οποίας έχει γίνει ένα αυτόνομο πεδίο έρευνας [16].

Μερικά μοντέλα εκτίμησης της χωρητικότητας της μπαταρίας όπως το γραμμικό μοντέλο και το μοντέλο χαλάρωσης βασίζονται σε διαφορετικές παραδοχές και έχουν μοναδική ισορροπία απλότητας, ακρίβειας, υπολογιστικού κόστους κλπ. Επανεξετάστηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των προαναφερθέντων μοντέλων, και αμφισβητήθηκε η αποτελεσματικότητα και η ακρίβειά τους. Στην αξιολόγηση καθορίστηκε ότι ο μετατροπέας DC/DC παίζει σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση της χωρητικότητας αφού ένας μετατροπέας DC/DC μπορεί να αλλάξει ένα

φορτίο, με βάση τα δικά του χαρακτηριστικά. Ως εκ τούτου, αποφασίστηκε ότι ο πειραματισμός και η μέτρηση είναι ο πιο αξιόπιστος τρόπος για να υπολογιστεί η πραγματική χωρητικότητα. Επιπλέον, υποστηρίζεται ότι το βελτιωμένο μοντέλο χωρητικότητας μπαταρίας θα πρέπει να λάβει υπόψη την επίδραση του μετατροπέα DC/DC [25].

Το εκτεταμένο φίλτρο Kalman έχει επίσης χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση της χωρητικότητας, συνήθως μαζί με την εκτίμηση SOC. Το πλαίσιο φίλτρων Kalman προτάθηκε για εκτίμηση κατάστασης (ταχέως μεταβαλλόμενες μεταβλητές όπως η SOC) και εκτίμηση παραμέτρων (αργά μεταβαλλόμενες μεταβλητές όπως η χωρητικότητα). Οι κυριότερες αιτιολογήσεις για την χρήση δύο ξεχωριστών EKF αντί ενός ήταν για την παράκαμψη της ανάγκης της αντιμετώπισης μεγάλων δομών και της παροχής ευελιξίας για συγκεκριμένες ανάγκες και συμφέροντα (π.χ. κάποιος μπορεί να ενδιαφέρεται μόνο για την μέτρηση εξασθένισης χωρητικότητας και SOC· στην περίπτωση αυτή, άλλες εκτιμήσεις μεταβλητών, αν και δεν είναι επιθυμητό, θα χρησιμοποιήσει αναπόφευκτα πολύτιμη υπολογιστική ισχύ και θα καταλήξει αναπόφευκτα σε μειωμένη συνολική ταχύτητα υπολογισμού). Με βάση τα ειδικά μοντέλα κατάστασης/παραμέτρου που εμπλέκονται, ενδέχεται να υπάρχουν ορισμένες αλληλεπιδράσεις μεταξύ δύο EKF [22].

Προτάθηκε ένα πολυμεταβλητό γραμμικό μοντέλο για τη σχέση μεταξύ χωρητικότητας και πλήθους εισόδων, συμπεριλαμβανομένων της εσωτερικής αντίστασης DC, τάσης ανοικτού κυκλώματος (OCV), θερμοκρασίας,  $V_{up}$  και  $I_{up}$  (τάση και ρεύμα κατά τη μετάβαση από κανονική φόρτιση σε υπερφόρτιση),  $V_{dn}$  και  $I_{dn}$  (τάση και ρεύμα κατά τη μετάβαση από την υπερφόρτιση στην κανονική φόρτιση). Τα μεγέθη των  $V_{up}$ ,  $I_{up}$ ,  $V_{dn}$  και  $I_{dn}$  προήλθαν από μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης κατά την οποία εφαρμόστηκαν στην μπαταρία παλμοί ελεγχόμενου ρεύματος. Υπάρχουν αρκετές ανησυχίες σχετικά με αυτή η προσέγγιση. Πρώτον, η OCV μπορεί να μετρηθεί άμεσα, αλλά η διαδικασία είναι πολύ χρονοβόρα. Δεύτερον, η χωρική αντίσταση αγνοήθηκε κατά τη μέτρηση της αντίστασης (αν και αυτή η πρακτική μπορεί να είναι για μπαταρίες μολύβδου-οξέος). Τρίτον, για τέτοιου είδους δεδομένα η μοντελοποίηση, η υπερ-τοποθέτηση ή η ελλιπής τοποθέτηση είναι πάντα μια μεγάλη πρόκληση. Επιπλέον πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για τον υπολογισμό της

αντίστασης αφού η σχέση μεταξύ του ρεύματος και της τάσης είναι μη γραμμική [26] [27].

Εξωτερικές μετρήσεις όπως η τάση, το ρεύμα και η επιφανειακή θερμοκρασία, αν και εύκολα στην πρόσβαση, επηρεάζονται από πλήθος παραγόντων, όπως ο ρυθμός φόρτισης, ο ρυθμός εκφόρτισης και η θερμοκρασία περιβάλλοντος, και ως εκ τούτου δεν αντιπροσωπεύουν εγγενείς ιδιότητες των μπαταριών. Στη διερεύνηση των αιτιών των μηχανισμών υποβάθμισης και της επίδρασής τους στην απώλεια χωρητικότητας, πρέπει να μελετηθούν οι μεταβολές στις ηλεκτρικές, χημικές και φυσικές ιδιότητες ανόδου, καθόδου και ηλεκτρολύτη κατά τη διάρκεια ελεγχόμενης δοκιμής ενός κύκλου [16].

#### 1.5.4 Υπολειπόμενη ωφέλιμη ζωή (Remaining Useful Life - RUL)

Ο όρος υπολειπόμενη ωφέλιμη ζωή (RUL), που ονομάζεται επίσης υπολειπόμενη διάρκεια ζωής, αναφέρεται στον διαθέσιμο χρόνο επίδοσης που απομένει πριν το σύστημα υποβαθμιστεί σε μη αποδεκτό επίπεδο. Η επιτυχής πρόβλεψη RUL για τις μπαταρίες είναι ιδιαίτερα επιθυμητή, καθώς επιτρέπει την πρόληψη βλαβών με πιο ελεγχόμενο τρόπο, ώστε η αποτελεσματική συντήρηση να μπορεί να πραγματοποιείται σε κατάλληλο χρόνο για τη διόρθωση επικείμενων σφαλμάτων, χωρίς μόνιμη βλάβη μπαταρίας. Επιπλέον, η ακριβής πρόβλεψη RUL για τις μπαταρίες μπορεί να διευκολύνει την ανάπτυξη νέων καινοτόμων μοντέλων υπηρεσιών που θα αποσκοπούν στην εξερεύνηση νέων ευκαιριών και αγορών. Η επιτυχής πρόβλεψη RUL πρέπει να λαμβάνει υπόψη την τρέχουσα κατάσταση της υγείας της μπαταρίας, δεδομένα/πληροφορίες ιστορικού, μηχανισμούς αποτυχίας, διάδοση αποτυχίας, κλπ. [16].



## 2 Μετρητής χωρητικότητας συσσωρευτών

Σκοπός είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός μετρητή χωρητικότητας συσσωρευτών. Με χρήση του μετρητή κάποιος είναι σε θέση να μετράει την ακριβή χωρητικότητα του συσσωρευτή και σε σύγκριση με την αρχική χωρητικότητα να εντοπίζει σε ποιο στάδιο ζωής βρίσκεται ο συσσωρευτής. Για την υλοποίηση του συγκεκριμένου μετρητή χωρητικότητας γίνεται χρήση του Arduino NANO.

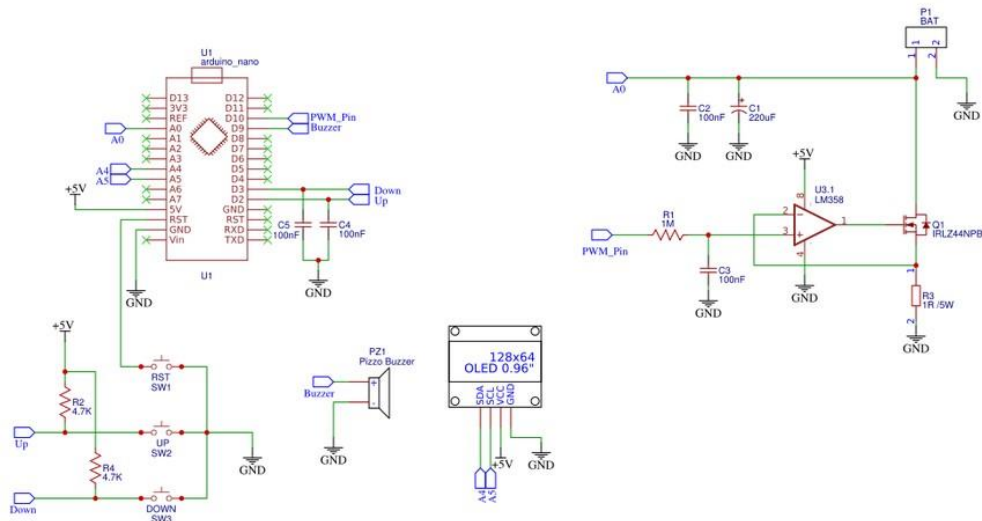
Ο τρόπος λειτουργίας του μετρητή χωρητικότητας συσσωρευτών αρχικά βασιζόταν στο νόμο του Ohm. Ο συσσωρευτής για τον οποίο πρόκειται να μετρηθεί η χωρητικότητα, εκφορτίζεται μέσω μιας σταθερής αντίστασης ενώ η ένταση του ρεύματος και ο χρόνος μετριοούνται από το Arduino. Τέλος η χωρητικότητα υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τις μετρήσεις της έντασης ρεύματος και του χρόνου.

Βασικό μειονέκτημα αυτής της σκέψης είναι ότι κατά τη διάρκεια της δοκιμής, καθώς η τάση του συσσωρευτή μειώνεται, το ρεύμα μειώνεται επίσης. Αυτό το γεγονός καθιστά τους υπολογισμούς πολύπλοκους και ανακριβείς. Με την εφαρμογή σταθερού ρεύματος καθ' όλη τη διαδικασία εκφόρτισης το παραπάνω πρόβλημα διορθώνεται [28].

Στον συγκεκριμένο μετρητή χωρητικότητας συσσωρευτών ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ορίζει το ρεύμα εκφόρτισης με τη χρήση πλήκτρων στην αρχή της μέτρησης. Επίσης παρέχεται η δυνατότητα για τη μέτρηση της χωρητικότητας για σχεδόν οποιοδήποτε είδος συσσωρευτή κάτω από 5V.

### 2.1 Σχεδιασμός μετρητή χωρητικότητας συσσωρευτών

Ο συγκεκριμένος μετρητής χωρητικότητας συσσωρευτών βασίστηκε στο παρακάτω σχηματικό διάγραμμα. Το κύκλωμα τροφοδοτείται μέσω ενός USB που συνδέει το Arduino Nano με έναν φορητό υπολογιστή ή με ένα τροφοδοτικό.



Σχήμα 16: Σχηματικό διάγραμμα για ελεγκτή χωρητικότητας μπαταριών [28]

Για καλύτερη κατανόηση του σχηματικού διαγράμματος, αυτό μπορεί να χωριστεί στις ακόλουθες τέσσερις περιοχές: κύκλωμα συνεχούς ρεύματος, κύκλωμα μέτρησης τάσης συσσωρευτή, κύκλωμα διασύνδεσης χρήση και κύκλωμα ηχείου.

### Κύκλωμα συνεχούς ρεύματος

Το κεντρικό τμήμα του κυκλώματος είναι ο τελεστικός ενισχυτής Op-amp LM358 ο οποίος περιέχει δύο τελεστικούς ενισχυτές. Το σήμα PWM από την έξοδο D10 του Arduino φιλτράρεται από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο ( $R_1$  και  $C_3$ ) και τροφοδοτείται στον δεύτερο τελεστικό ενισχυτή. Η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στο LM358 φιλτράρεται από έναν πυκνωτή αποσύζευξης  $C_5$ .

Ο πρώτος τελεστικός ενισχυτής, η  $R_1$  και το  $Q_1$  συνθέτουν ένα κύκλωμα παροχής συνεχούς ρεύματος. Έτσι, υπάρχει η δυνατότητα να ρυθμίζεται η ένταση του ρεύματος μέσω της αντίστασης  $R_1$  αλλάζοντας το πλάτος παλμού του σήματος PWM.

### Κύκλωμα μέτρησης τάσης συσσωρευτή

Η τάση της μπαταρίας υπολογίζεται από την αναλογική είσοδο A0 του Arduino. Δύο πυκνωτές  $C_1$  και  $C_2$  χρησιμοποιούνται για να φιλτράρουν τον θόρυβο που προέρχεται από το κύκλωμα συνεχούς ρεύματος.



## Κύκλωμα διασύνδεσης χρήστη

Το κύκλωμα διασύνδεσης χρήστη αποτελείται από δύο πλήκτρα και μια 0,96" OLED οθόνη. Τα πλήκτρα Up και Down χρησιμοποιούνται για να αυξηθεί ή να μειωθεί η ένταση του ρεύματος μέσω της αύξησης ή μείωσης του πλάτους του παλμού PWM. Οι R<sub>2</sub> και R<sub>4</sub> είναι pull-up αντιστάσεις για τα Up και Down πλήκτρα, ενώ οι πυκνωτές C<sub>4</sub> και C<sub>5</sub> χρησιμοποιούνται για την επαναφορά των πλήκτρων. Υπάρχει και ένα τρίτο πλήκτρο RST, το οποίο χρησιμοποιείται για την επαναφορά του Arduino.

## Κύκλωμα ηχείου

Ένα απλό κύκλωμα ηχείου τύπου buzzer χρησιμοποιείται για να ειδοποιήσει για την έναρξη και το τέλος της δοκιμής. Ένα buzzer 5V είναι συνδεδεμένο στην ψηφιακή υποδοχή D9 του Arduino [28].

## 2.2 Απαιτούμενα εξαρτήματα

Για την υλοποίηση του κυκλώματος του μετρητή χωρητικότητας συσσωρευτών με χρήση Arduino χρησιμοποιήθηκαν τα ηλεκτρικά εξαρτήματα του ακόλουθου πίνακα.

Εξάρτημα	Ποσότητα
Arduino NANO	1
Οθόνη OLED 0.96"	1
Τελεστικός ενισχυτής LM358	1
Mosfet IRLB8743P N-Channel 150A	1
Ψύκτρα TO-220 25.4mm 12.6K/W	1
Πυκνωτής Κεραμικός Μονολιθικός 100nF	4
Πυκνωτής 220μF	1
Κεραμική Αντίσταση 5W 1ohm	1

Αντίσταση 1ΜΩ	1
Αντίσταση 4,7kΩ	2
Buzzer 5V	1
Πλήκτρα 6x6mm 5mm 4pins	3
Πρωτότυπη πλακέτα κυκλώματος (PCB)	1
Διακόπτης	1
Υποδοχή συσσωρευτή 18650	1
Σειρά με 15 θηλυκές υποδοχές	2
Σειρά με 8 θηλυκές υποδοχές	1
Σειρά με 3 θηλυκές υποδοχές	1

### **Arduino NANO**

Το Arduino NANO είναι μια πλακέτα ανάπτυξης η οποία βασίζεται στον μικροελεγκτή ATmega328P που αναπτύχθηκε από την Arduino.cc. Για την εργασία με αυτό απαιτούνται το Arduino IDE και ένα καλώδιο USB type B. Υπάρχει η δυνατότητα να τροφοδοτείται μέσω USB ή μέσω μιας εξωτερικής μπαταρίας 9 V, ή μέσω τροφοδοτικού με τάση που κυμαίνεται μεταξύ 7 V και 20 V.

### **Οθόνη OLED 0,96''**

Η οθόνη OLED λειτουργεί χωρίς οπίσθιο φωτισμό. Παράλληλα είναι πιο λεπτή και ελαφρύτερη από μια LCD. Σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού (όπως ένα σκοτεινό δωμάτιο), μια οθόνη OLED μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερο ποσοστό αντίθεσης από μια οθόνη LCD.

## 2.3 Αρχή λειτουργίας

Ο τρόπος λειτουργίας του μετρητή χωρητικότητας συσσωρευτών βασίζεται στη σύγκριση της τάσης των εισόδων του τελεστικού ενισχυτή. Ρυθμίζοντας το πλάτος του παλμού PWM, ρυθμίζεται η ένταση του ρεύματος και η τάση που εφαρμόζεται στην είσοδο, με αποτέλεσμα η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή να ενεργοποιεί την πύλη του MOSFET. Καθώς το MOSFET ενεργοποιείται, το ρεύμα διαρρέει την αντίσταση  $R_1$  και δημιουργεί μια πτώση τάσης. Ο στόχος είναι οι τάσεις στις εισόδους του τελεστικού ενισχυτή να είναι ίσες. Έτσι, το ρεύμα είναι ανάλογο με την τάση στην είσοδο του τελεστικού ενισχυτή. Επίσης το σήμα PWM από το Arduino φιλτράρεται με τη χρήση ενός κυκλώματος χαμηλοπερατών φίλτρων ( $R_1$  και  $C_3$ ).

### Μέτρηση χωρητικότητας

Η χωρητικότητα υπολογίζεται με τον εξής τρόπο:

$$\text{Χωρητικότητα μπαταρίας (mAh)} = \text{Ρεύμα (I) σε mA} \times \text{Χρόνος (T) σε ώρες}$$

Από την παραπάνω εξίσωση για τον υπολογισμό της χωρητικότητας της μπαταρίας (mAh), πρέπει να είναι γνωστό το ρεύμα σε mA και ο χρόνος σε ώρες. Το σχεδιασμένο κύκλωμα είναι ένα κύκλωμα συνεχούς φορτίου ρεύματος, έτσι ώστε το ρεύμα εκφόρτισης να παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου δοκιμής. Το ρεύμα εκφόρτισης μπορεί να ρυθμιστεί πιέζοντας το πλήκτρο Πάνω και Κάτω. Η χρονική διάρκεια υπολογίζεται με τη χρήση χρονομέτρου στον κώδικα Arduino.

### Περιοχές εφαρμογής

Ο συγκεκριμένος μετρητής χωρητικότητας συσσωρευτών είναι ικανός να μετρήσει την χωρητικότητα μπαταριών τύπου AA/AAA NiMH/NiCd, 18650 Li-ion, Li-Polymer, και Li FePO<sub>4</sub>. Είναι κατάλληλος για σχεδόν κάθε είδους μπαταρία με τάση κάτω από 5V [28].

## 2.4 Κατασκευή του κυκλώματος

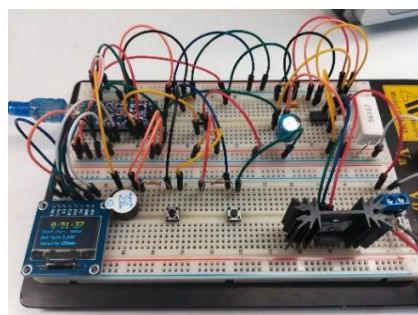
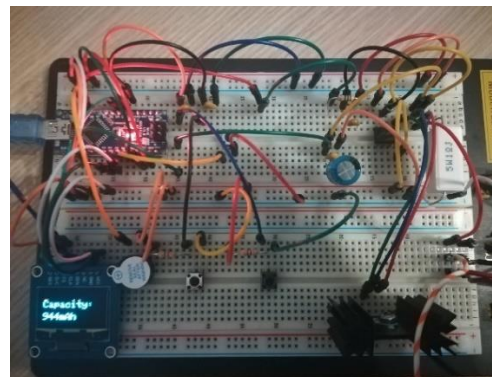
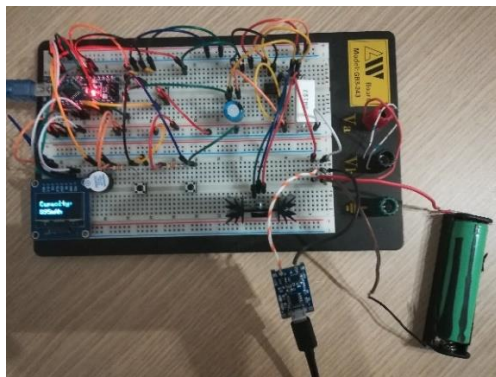
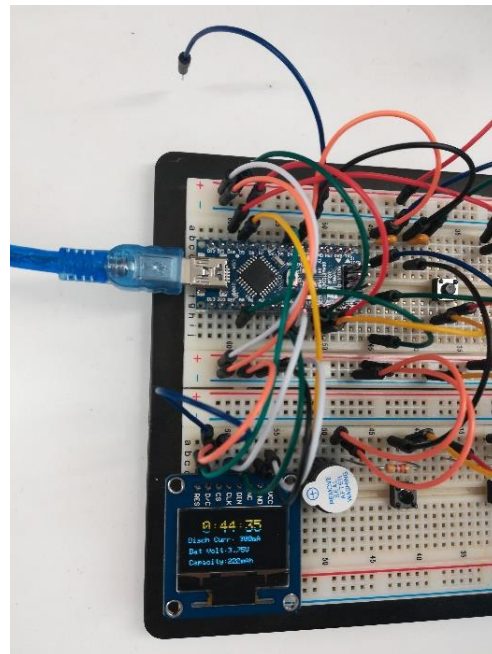
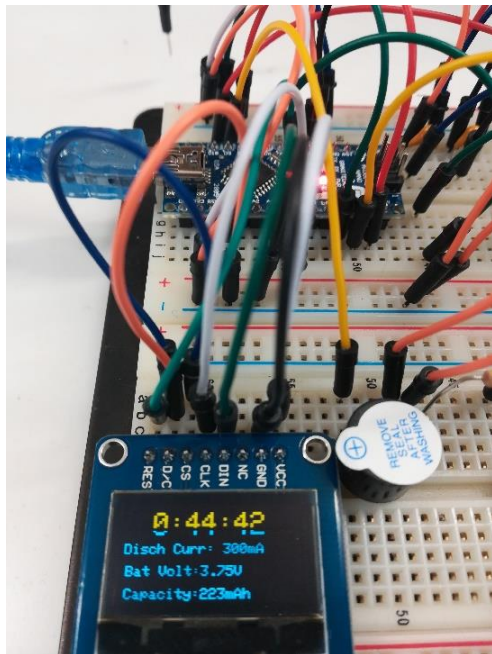
Πριν από την κατασκευή του μετρητή σε διάτρητη πλακέτα κυκλώματος, το κύκλωμα δοκιμάστηκε σε ένα breadboard. Όλα τα εξαρτήματα τοποθετήθηκαν στο breadboard και συνδέθηκαν μεταξύ τους σύμφωνα με το σχηματικό διάγραμμα (Σχήμα 16). Το Arduino συνδέθηκε μέσω καλωδίου USB με ηλεκτρονικό υπολογιστή και εισήχθη ο κατάλληλος κώδικας. Για την εμφάνιση αποτελεσμάτων για την τάση, το ρεύμα εκφόρτισης και την χωρητικότητα των συσσωρευτών, χρησιμοποιήθηκε η οθόνη 0.96" OLED με ανάλυση 128x64. Για την σωστή επικοινωνία μεταξύ τους, οι συνδέσεις μεταξύ Arduino και οθόνης είναι ως εξής:

Arduino	OLED
5V	VCC
A4	DIN
A5	CLK
D4	RES
GND	D/C
GND	CS
GND	GND

Για την αναπαραγωγή ειδοποιήσεων κατά την έναρξη και την διάρκεια της δοκιμής, χρησιμοποιείται ένα buzzer. Οι συνδέσεις μεταξύ Arduino και buzzer είναι ως εξής:

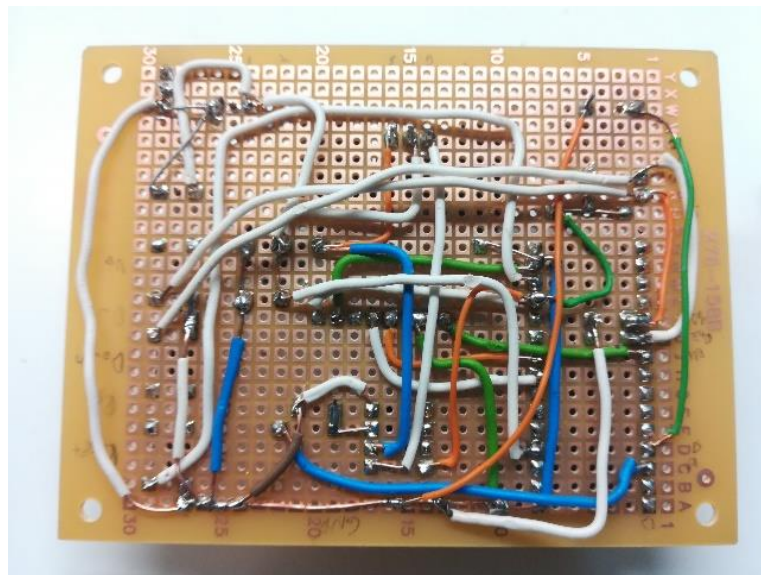
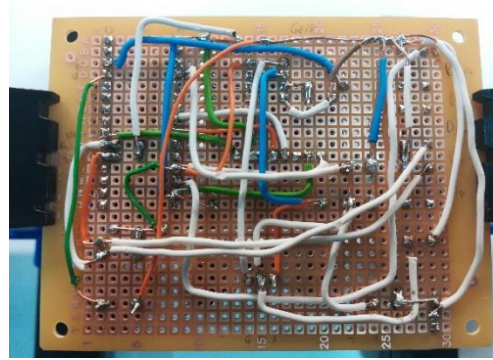
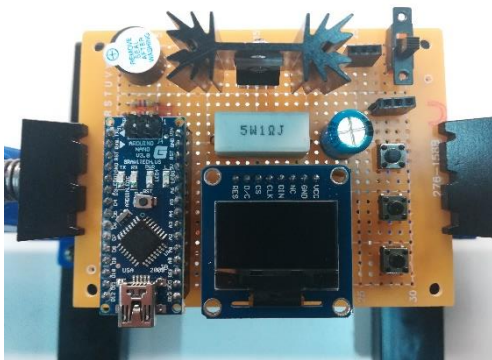
Arduino	Buzzer
D9	Θετικός ακροδέκτης
GND	Αρνητικός ακροδέκτης

Μετά από ορισμένες δοκιμές και αφού διαπιστώθηκε ότι το κύκλωμα λειτουργούσε σωστά στο breadboard, τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα κολλήθηκαν σε διάτρητη πλακέτα.



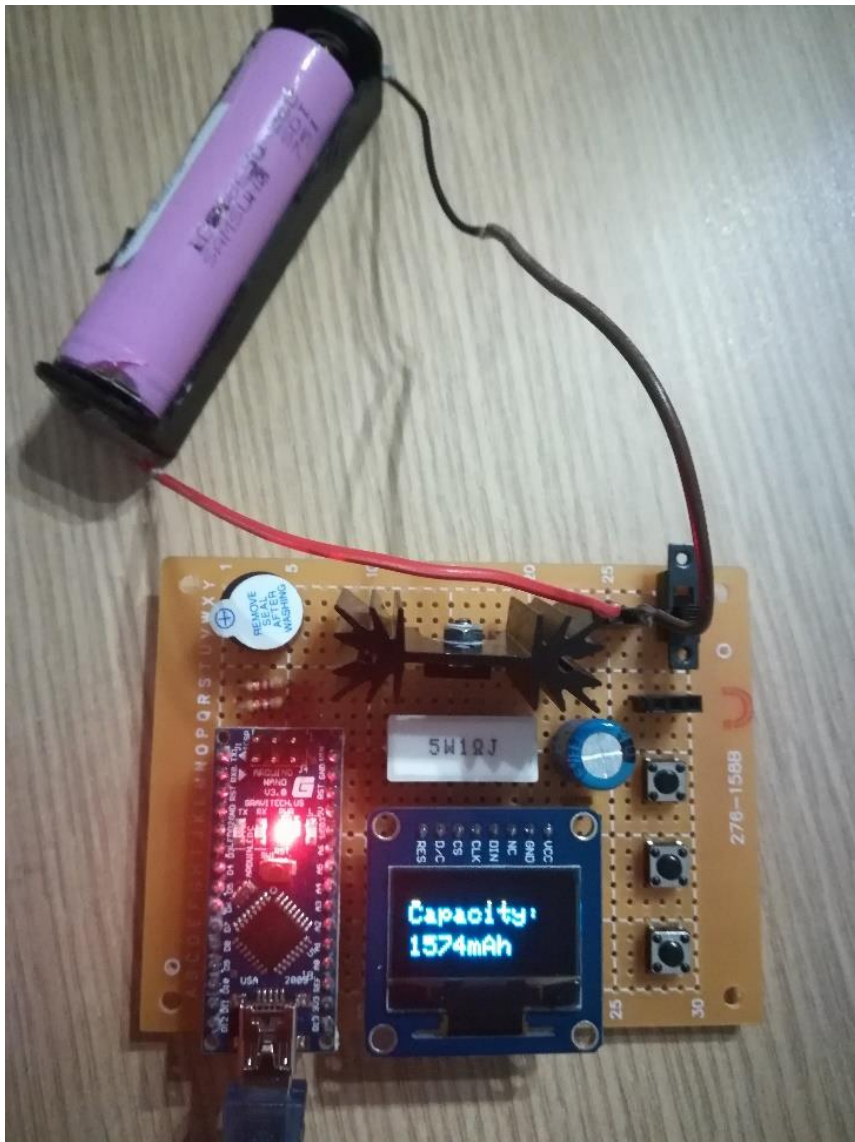
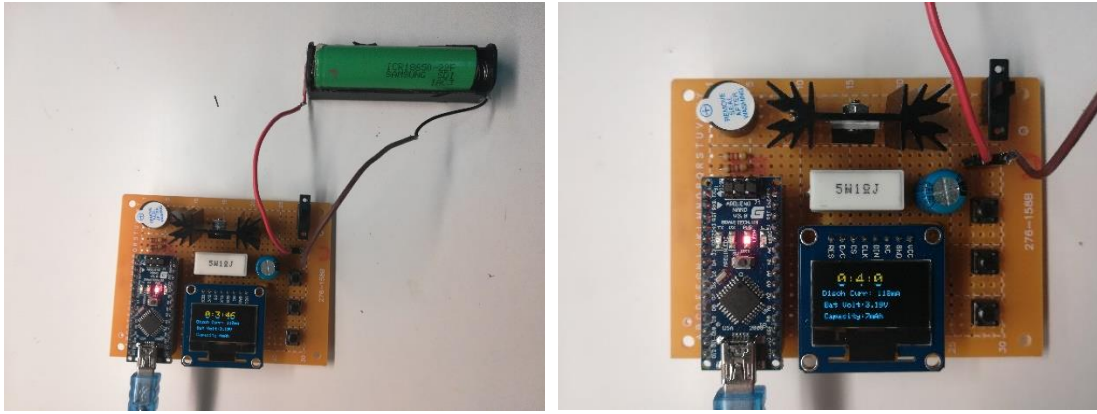
Σχήμα 17: Κατασκευή κυκλώματος σε breadboard.

Για την τοποθέτηση και κόλληση του Arduino και της οθόνης στην πλακέτα χρησιμοποιήθηκαν σειρές με θηλυκές υποδοχές. Έπειτα ακολούθησε η κόλληση των υπόλοιπων εξαρτημάτων σε σημεία τα οποία διευκόλυναν την καλωδίωση. Για την καλωδίωση χρησιμοποιήθηκαν χρωματιστά καλώδια για τον ευκολότερο εντοπισμό τους.



Σχήμα 18: Κατασκευή κυκλώματος σε διάτρητη πλακέτα.





Σχήμα 19: Μετρήσεις χωρητικότητας συσσωρευτών

## 2.5 Αποτελέσματα των μετρήσεων

Για την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του μετρητή χωρητικότητας συσσωρευτών ακολούθησε μια σειρά μετρήσεων χωρητικότητας για διάφορους επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές λιθίου (Samsung ICR18650). Πιο συγκεκριμένα για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι συσσωρευτές ICR18650-26C, ICR18650-22F και ICR18650-22B για τους οποίους ακολουθούν οι ονομαστικές χωρητικότητες που αναγράφει ο κατασκευαστής.

*Πίνακας 2.1: Ονομαστικές χωρητικότητες συσσωρευτών.*

Συσσωρευτής	Ονομαστική Χωρητικότητα
ICR18650-26C	2600 mAh
ICR18650-22F	2200 mAh
ICR18650-22B	2200 mAh

Στην αρχή της μέτρησης ο χρήστης τοποθετεί έναν φορτισμένο συσσωρευτή στην κατάλληλη υποδοχή και με την βοήθεια των πλήκτρων Πάνω και Κάτω επιλέγει το ρεύμα εκφόρτισης για την συγκεκριμένη μέτρηση. Έπειτα με παρατεταμένη πίεση του πλήκτρου Πάνω ακούγεται ο χαρακτηριστικός ήχος από το buzzer και ξεκινάει η μέτρηση. Στην οθόνη εμφανίζονται από πάνω προς τα κάτω με την ακόλουθη σειρά ο χρόνος που τρέχει, το ρεύμα εκφόρτισης, η τάση του συσσωρευτή και τέλος η χωρητικότητα που έχει μετρηθεί έως την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Όταν η τάση του συσσωρευτή φτάσει το κατώτατο όριο, τότε η μέτρηση σταματάει και στην οθόνη εμφανίζεται πλέον μόνο η χωρητικότητα του συσσωρευτή.

Ο παρακάτω πίνακας περιέχει τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία:

*Πίνακας 2.2: Αποτελέσματα μετρήσεων συσσωρευτών.*

ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗΣ	ΡΕΥΜΑ (mA)	ΤΑΣΗ (V)	ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ (mAh)
ICR18650-26C	110	4.11	1554
	210	4.04	1516
	300	4.02	1533
	490	3.96	1574
	580	3.92	1515
	680	3.88	1525



	770	3.84	1516
	870	3.84	1537
ICR18650-22F	110	3.91	944
	210	4.01	884
ICR18650-22B	110	4.02	886
	210	4.01	753

Όπως φαίνεται παραπάνω τα αποτελέσματα για την χωρητικότητα των συσσωρευτών που χρησιμοποιήθηκαν δεν πλησιάζουν τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Αντιθέτως παρατηρείται ότι η χωρητικότητα των συσσωρευτών είναι σχεδόν η μισή από αυτή που αναμένεται. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται σε πλήθος παραγόντων. Ένας βασικός παράγοντας είναι η παλαιότητα των συσσωρευτών, για τους οποίους είχαν πραγματοποιηθεί αρκετοί κύκλοι φόρτισης-αποφόρτισης μέχρι την διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων. Τέλος είναι υπαρκτό και το ενδεχόμενο να απαιτούνται βελτιώσεις στον σχεδιασμό του κυκλώματος αλλά και στον κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για την συγκεκριμένη σειρά μετρήσεων από το Arduino.



### 3 Συμπεράσματα

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε βασίστηκε στο σχηματικό διάγραμμα του Σχήματος 16 όπου το κύκλωμα τροφοδοτείται μέσω ενός USB που συνδέει το Arduino Nano με έναν φορητό υπολογιστή ή με ένα τροφοδοτικό. Ακολουθώντας την διάταξη του κυκλώματος του σχήματος κατασκευάστηκε ένας μετρητής χωρητικότητας συσσωρευτών ο οποίος ήταν λειτουργικός και έδινε την δυνατότητα στον χρήστη να μετρήσει την χωρητικότητα του εκάστοτε συσσωρευτή την δεδομένη χρονική στιγμή. Συγκρίνοντας τις ονομαστικές χωρητικότητες του κατασκευαστή για τους συσσωρευτές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία και τα αποτελέσματα των μετρήσεων διαπιστώθηκε μια όχι και τόσο αμελητέα απόκλιση. Η μετρούμενη χωρητικότητα των συσσωρευτών δεν πλησίασε αρκετά την ονομαστική τιμή που αναμενόταν, για την ακρίβεια στις περισσότερες περιπτώσεις ήταν σχεδόν η μισή από την αναμενόμενη.

Όπως είναι γνωστό οι συσσωρευτές με το πέρασ του χρόνου και με την χρήση χάνουν απόδοση και η χωρητικότητά τους μειώνεται. Το γεγονός ότι στις πειραματικές μετρήσεις οι συσσωρευτές που χρησιμοποιήθηκαν δεν ήταν καινούργιοι, αλλά είχαν ήδη πραγματοποιήσει αρκετούς κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης είναι ο κύριος λόγος για την απόκλιση ανάμεσα στην ονομαστική τιμή τους και στην μετρούμενη τιμή.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την ακρίβεια των πειραματικών μετρήσεων είναι ο σχεδιασμός του κυκλώματος και η σωστή σύνδεση των επιμέρους μερών. Επίσης σημαντικό ρόλο έχει και ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την σειρά μετρήσεων της παρούσας εργασίας. Μικρές αλλαγές στον κώδικα Arduino μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια των μετρήσεων και τα αποτελέσματά τους.

Για μελλοντική έρευνα, θα παρουσίαζε ενδιαφέρον ο επανασχεδιασμός του κυκλώματος και του κώδικα Arduino, με στόχο μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις και αποτελέσματα πιο κοντά στην ονομαστική τιμή της χωρητικότητας του εκάστοτε συσσωρευτή.



# Βιβλιογραφία

---

- [1] I. Buchmann, «When Was the Battery Invented?,» Battery University, Φεβρουάριος 2007. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-101-when-was-the-battery-invented>. [Πρόσβαση Ιανουάριος 2022].
- [2] Π. Πικάσης, «Ηλεκτρικοί συσσωρευτές."Αρχές λειτουργίας και βασικά χαρακτηριστικά τους",» Αθήνα, 2016.
- [3] «Βάζο Leyden,» Wblog.wiki, [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://wblog.wiki/el/Leyden\\_jar](https://wblog.wiki/el/Leyden_jar). [Πρόσβαση Ιανουάριος 2022].
- [4] Steevithak, «Common as Air,» Δεκέμβριος 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.steevithak.com/2013/12/28/common-as-air/>. [Πρόσβαση Ιανουάριος 2022].
- [5] Ν. Ιγγλέζου, «Ανάλυση Λειτουργίας και Μοντελοποίηση Συσσωρευτών,» Αθήνα, 2013.
- [6] «Voltaic Pile,» Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Voltaic\\_pile](https://en.wikipedia.org/wiki/Voltaic_pile). [Πρόσβαση Ιανουάριος 2022].
- [7] A. Chodos, «APS News,» Μάρτιος 2006. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.aps.org/publications/apsnews/200603/history.cfm>. [Πρόσβαση Ιανουάριος 2022].
- [8] «Trough battery 1801-1838,» Science Museum Group, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co6522/trough-battery-1801-1838-voltaic-pile>. [Πρόσβαση Ιανουάριος 2022].

- [9] Richard, «The Different Types of Lead Acid Batteries We Encounter,» UPS Battery Center, Μάιος 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.upsbatterycenter.com/blog/types-of-lead-acid-batteries/>. [Πρόσβαση Ιανουάριος 2022].
- [10] «Early Storage Battery,» Science Photo Library, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sciencephoto.com/media/412356/view/early-storage-battery-19th-century>. [Πρόσβαση Ιανουάριος 2022].
- [11] «Leclanché cell,» Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Leclanch%C3%A9\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Leclanch%C3%A9_cell). [Πρόσβαση Ιανουάριος 2022].
- [12] «Nickel–iron battery,» Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93iron\\_battery](https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93iron_battery). [Πρόσβαση Ιανουάριος 2022].
- [13] C. Honsberg και S. Bowden, «Basic Battery Operation,» 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/battery-basics/basic-battery-operation>. [Πρόσβαση Φεβρουάριος 2022].
- [14] A. Bhatt, M. Forsyth, R. Withers και G. Wabg, «How a battery works,» Φεβρουάριος 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.science.org.au/curious/technology-future/batteries>. [Πρόσβαση Φεβρουάριος 2022].
- [15] MIT Electric Vehicle Team, «A Guide to Understand Battery Specifications,» 2008.
- [16] J. Zhang και J. Lee, «A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery,» *Journal of Power Sources*, p. 8, 31 Μάρτιος 2011.
- [17] E. Meissner και G. Richter, «Journal of Power Sources 116,» pp. 79-98, 2003.
- [18] J. Guiheen, H. Singh και T. Palanisamy, Method and Apparatus for Determining the State of Charge of a Lithium-Ion Battery, 2003.

- [19] S. Lee, J. Kim, J. Lee και B. Cho, The State and Parameter Estimation of an Li-Ion Battery Using a New OCV-SOC Concept, 2007.
- [20] J. Kozlowski, Electrochemical cell prognostics using online impedance measurements and model-based data fusion techniques, 2003.
- [21] H. Blanke, O. Bohlen και S. Buller, «Impedance measurements on lead–acid batteries for state-of-charge, state-of-health and cranking capability prognosis in electric and hybrid electric vehicles,» *Journal of Power Sources* 144, pp. 418-425, 2005.
- [22] G. Plett, «Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs,» *Journal of Power Sources* 134, pp. 262-276, 2004.
- [23] T. Hansen και C. Wang , «Journal of power sources 141,» pp. 351-358, 2005.
- [24] L. Gao, S. Liu και R. Dougal, «Dynamic lithium-ion Battery model for system simulation,» *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 25, pp. 495-505, Οκτώβριος 2002.
- [25] S. Park, A. Savvides και M. Srivastava, «Battery Capacity Measurement And Analysis,» *Proceedings of the 2001 International Symposium on Low Power Electronics and Design*, pp. 382-387, 2001.
- [26] S. Hoenig, H. Singh, T. G. Palanisamy και M. Eagan, «Method and apparatus for predicting the available energy of a battery,» 2001.
- [27] G. Instruments, «Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy,» *Gamry Instruments*, 2010.
- [28] A. Reddy, «Arduino based battery capacity tester,» *Department of Electronics and Communication Engineering, Warangal India*, 2019.





# Παράρτημα

---

Στο παράρτημα παρατίθεται ο κώδικας Arduino που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία[28].

```
// ARDUINO BATTERY CAPACITY TESTER

#include<JC_Button.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>

#define DEBUG 0 // Binary Treatment 0=Nothing, 1=Early, 2=Running Voltages, 4=Finish
#define SCREEN_WIDTH 128 // OLED display width, in pixels
#define SCREEN_HEIGHT 64 // OLED display height, in pixels

// Declaration for an SSD1306 display connected to I2C (SDA, SCL pins)
#define OLED_RESET 4 // Reset pin # (or -1 if sharing Arduino reset pin)
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, OLED_RESET);

void timerInterrupt();
void Display_UP_DOWN();//Debugging support
void Print_DEBUG_4();//Debugging support

const float Low_BAT_level = 2.75;// Threshold for stopping test
//Desired Current steps with a 3R load (R7)
int Current [] = {0,50,100,200,300,400,500,600,700,800,900,1000};
int PWM [] = {0, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50};
int Array_Size;// calculated during setup
const byte PWM_Pin = 10;
const byte Buzzer = 9;
const int BAT_Pin = A0;
const int Vref_Pin = A1;//Pin to which Band Gap Reference is attached
int Current_Value = 0; // Selected Current value for test
int PWM_Value = 0;// Value of PWM during test
int PWM_Index = 0;// Index into PWM array during test
unsigned long Capacity;
```

```

float Capacity_f;
int ADC_Value = 0;
float Vref_Voltage = 1.215; // LM385BLP-1.2 Band Gap Reference voltage
float Vcc = 4.94; // Voltage of Arduino 5V pin (Measured during setup using Band Gap Reference)
float BAT_Voltage = 0;
float Resistance = 1.0; // Value of R3 Power Resistor
float sample = 0;
byte Hour = 0, Minute = 0, Second = 0;
bool calc = false, Done = false, Report_Info = true;
Button UP_Button(2, 25, false, true);
Button Down_Button(3, 25, false, true);

// string values for reporting intermediate information
const int VAL_MAX = 10;
char val_0[VAL_MAX]={" "};
char val_2[VAL_MAX]={" "};

void setup () { //Setup

Serial.begin(38400);
pinMode(PWM_Pin, OUTPUT);
pinMode(Buzzer, OUTPUT);
analogWrite(PWM_Pin, PWM_Value);
UP_Button.begin();
Down_Button.begin();
display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
display.clearDisplay();
display.setTextColor(WHITE);
display.setTextSize(1);
display.setCursor(20,25);
display.print("Battery Test");
display.display();
delay(3000);
display.clearDisplay();
display.setTextSize(2);
display.setCursor(2,15);
display.print("Adj Curr:");
display.setCursor(2,40);

```

```

display.print("UP/Down:");
display.print("0");
display.setCursor(2,55);
display.setTextSize(1);

#if (DEBUG == 1 || DEBUG == 5)
Serial.println("\nStart of calculations");
#endif

Array_Size = sizeof(Current)/2;
//Read voltages of Band Gap Reference and use it to calculate actual Vcc
float fTemp=0.0;
for(int i=0;i< 100;i++)
{
fTemp=fTemp+analogRead(Vref_Pin); //read the Band Gap Reference voltage
delay (2);
}
fTemp=fTemp/100.0;
Vcc = Vref_Voltage * 1024.0 / fTemp;

// Convert desired current levels to PWM using actual Vcc
// Convert PWM values back to actual current levels
// While measuring actual current I discovered that the actual draw is
// (PWM + 1)/256 rather than PWM/255 as indicated in Arduino documentation
int iTemp;
for (int i=0;i<Array_Size;i++)
{
iTemp = int( Resistance * Current[i] * 256.0 / Vcc / 1000.0 - 1.0 + 0.5 ); // desired current to
nearest PWM
iTemp = min(iTemp,255);
iTemp = max(iTemp,0);
Current[i] = int( (iTemp+1) * Vcc / 256.0 / Resistance * 1000.0); // actual current for PWM
PWM[i] = iTemp;//Save PWM in array
}

//Include Threshold and Vcc in startup display
dtostrf(Low_BAT_level, 5, 3, val_0);
dtostrf(Vcc, 5, 3, val_2);

```

```

display.print("Thr=");
display.print(val_0);
display.print("v, Vcc=");
display.print(val_2);

display.display();
display.setTextSize(2);

} //Setup

//***** End of Setup function *****

void loop() {

if (Report_Info)
{//Report_Info
Serial.flush();
#if (DEBUG == 1 || DEBUG == 5)
// Serial.println("Measured Vcc Voltage: " + String(Vcc) + " volts");
Serial.print("Threshold: ");
Serial.print(Low_BAT_level,3);
Serial.println(" volts");
Serial.print("R3 Resistance: ");
Serial.print(Resistance,3);
Serial.println(" ohms");
Serial.print("Measured Vcc Voltage: ");
Serial.print(Vcc,4);
Serial.println(" volts");
sample = 0.0;

Serial.println("Index Actual(mA) PWM");
for (int i=0;i<Array_Size;i++)
{
//          Serial.println(          "["+String(i)+"]="+String(Current[i])+          mA
PWM["+String(i)+"]="+String(PWM[i]) );
Serial.print("[");
Serial.print(i);

```

```

Serial.print("]");
Serial.print(" ");
Serial.print(Current[i],DEC);
Serial.print(" ");
Serial.print(PWM[i],DEC);
Serial.println(" ");
}
#endif
Report_Info = false;
} //Report_Info

UP_Button.read();
Down_Button.read();
if (UP_Button.wasReleased() && PWM_Index < (Array_Size-1) && calc == false)
{
PWM_Value = PWM[++PWM_Index];
analogWrite(PWM_Pin,PWM_Value);

Display_UP_DOWN();
}

if (Down_Button.wasReleased() && PWM_Index > 0 && calc == false)
{
PWM_Value = PWM[--PWM_Index];
analogWrite(PWM_Pin,PWM_Value);

Display_UP_DOWN();
}

if (UP_Button.pressedFor (1000) && calc == false)
{
digitalWrite(Buzzer, HIGH);
delay(100);
digitalWrite(Buzzer, LOW);
display.clearDisplay();
timerInterrupt();
}
}

```

```
//***** End of Loop function *****
```

```
void timerInterrupt(){  
  calc = true;  
  while (Done == false) {(Done == false)  
    Second ++;  
    if (Second == 60) {  
      Second = 0;  
      Minute ++;  
    }  
    if (Minute == 60) {  
      Minute = 0;  
      Hour ++;  
    }  
  }
```

```
//***** Measuring Battery Voltage *****
```

```
for(int i=0;i< 100;i++)  
{  
  sample=sample+analogRead(BAT_Pin); //read the Battery voltage  
  delay (2);  
}  
sample=sample/100;  
BAT_Voltage = sample * Vcc / 1024.0;  
//*****
```

```
display.clearDisplay();  
display.setTextSize(2);  
display.setCursor(20,5);  
// display.print(String(Hour) + ":" + String(Minute) + ":" + String(Second));  
display.print(Hour);  
display.print(":");  
display.print(Minute);  
display.print(":");  
display.print(Second);  
  
display.setTextSize(1);
```

```

display.setCursor(0,25);
display.print("Disch Curr: ");
// display.print(String(Current[PWM_Index])+"mA");
display.print(Current_Value);
display.print("mA");

display.setCursor(2,40);
// display.print("Bat Volt:" + String(BAT_Voltage)+"V" );
display.print("Bat Volt:");
display.print(BAT_Voltage,3);
display.print("V");

Capacity = ((unsigned long)Hour * 3600) + ((unsigned long)Minute * 60) + (unsigned
long)Second;
Capacity_f = ((float)Capacity * Current_Value) / 3600.0;

display.setCursor(2, 55);
// display.print("Capacity:" + String(Capacity) + "mAh");
display.print("Capacity:");
display.print(Capacity_f,1);
display.print("mAh");
display.display();

#if (DEBUG == 4 || DEBUG == 2)
Print_DEBUG_4();
#endif

if (BAT_Voltage < Low_BAT_level)
{//BAT_Voltage < Low_BAT_level

#if (DEBUG == 4 || DEBUG == 5)
Serial.println("\nCurrent_Value PWM_Value");
Serial.print(Current_Value);
Serial.print(" ");
Serial.println(PWM_Value);
Serial.println("\nHour Minute Second PWM_Index");
Serial.print(Hour);
Serial.print(" ");

```

```

Serial.print(Minute);
Serial.print(" ");
Serial.print(Second);
Serial.print(" ");
Serial.println(PWM_Index);
#endif

// When total seconds is greater than 32767 the statement below did not work until the byte
values
// Hour, Minute and Second were cast to an unsigned long. Apparently the compiler cast the
byte
// values to an "int" first which cannot represent 32768 correctly
Capacity = ((unsigned long)Hour * 3600) + ((unsigned long)Minute * 60) + (unsigned
long)Second;

#if (DEBUG == 4 || DEBUG == 5)
Serial.println("Capacity HMS");
Serial.println(Capacity);
#endif

Capacity_f = ((float)Capacity * Current_Value) / 3600.0;

#if (DEBUG == 4 || DEBUG == 5)
Serial.println("Capacity HMS*PWM");
Serial.println(Capacity_f,1);
#endif

display.clearDisplay();
display.setTextSize(2);
display.setCursor(2,15);
display.print("Capacity:");
display.setCursor(2,40);
// display.print(String(Capacity) + "mAh");
display.print(Capacity_f,1);
display.print("mAh");
display.display();
Done = true;
PWM_Value = 0;
analogWrite(PWM_Pin, PWM_Value);

```



```

digitalWrite(Buzzer, HIGH);
delay(100);
digitalWrite(Buzzer, LOW);
delay(100);
digitalWrite(Buzzer, HIGH);
delay(100);
digitalWrite(Buzzer, LOW);
delay(100);
} //BAT_Voltage < Low_BAT_level
delay(1000);
} // (Done == false)

} // timerInterrupt

void Display_UP_DOWN()
{ //Display_UP_DOWN()
Current_Value = Current[PWM_Index];

display.clearDisplay();
display.setCursor(2,25);
display.print("Curr:");
display.print(Current_Value);
display.print("mA ");
display.setCursor(2,40);
display.print("PWM=");
display.print(PWM_Value);
display.display();
} //Display_UP_DOWN()

void Print_DEBUG_4()
{ //Print_DEBUG_4()
Serial.print(Hour);
Serial.print(":");
Serial.print(Minute);
Serial.print(":");
Serial.print(Second);
Serial.print(" ");
Serial.print(BAT_Voltage,3);

```

```
Serial.print("v ");  
Serial.print(Capacity_f,1);  
Serial.println("mAh");  
}//Print_DEBUG_4()
```