

ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:
ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΠΗΓΩΝ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΓΙΑ
ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Παπαστράτος Ναπολέον Γεώργιος

ΑΜ:15002

Επιβλέπων: Δουμένης Γρηγόριος

Άρτα, Μάρτιος 2021

[1]

**MEASUREMENT AND CHARACTERIZATION OF
ENERGY SOURCES AND CONVERTERS FOR
INTEGRATED SYSTEMS**

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Άρτα, 22 Μαρτίου 2021

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής:

Γρηγόριος Δουμένης,
Επίκουρος καθηγητής

2. Μέλος επιτροπής:

Αλέξανδρος Τζάλλας,
Επίκουρος καθηγητής

3. Μέλος επιτροπής:

Νικόλαος Γιαννακέας,
Επίκουρος καθηγητής

Ο Προϊστάμενος του Τμήματος :

Ευριπίδης Γλαβάς,
Καθηγητής

.....

© Παπαστράτος, Ναπολέον Γεώργιος, 2021.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Δήλωση μη λογοκλοπής

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

Παπαστράτος Ναπολέων Γεώργιος



Υπογραφή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή κ.Γρηγόριο Δουμένη καθώς και τον φίλο και συνάδελφο Ιωάννη Μασκλαβάνο για την πολύτιμη βοήθεια τους και την στήριξη που μου παρείχαν κατά την διάρκεια διεκπεραίωσης της πτυχιακής μου εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σχεδόν παγκόσμια ανάπτυξη και εξάπλωση του Internet, σε συνδυασμό με την μείωση του κόστους του πυριτίου έχουν φέρει μεγάλη αύξηση στο πλήθος των ενσωματωμένων συστημάτων γύρω μας. Το διαρκώς αυξανόμενο πλήθος τέτοιων συστημάτων έχει δημιουργήσει νέες ανάγκες σχετικά με την τροφοδοσία και την επέκταση ζωής τους. Έρευνες και πειράματα πραγματοποιούνται διαρκώς για την εύρεση νέων τρόπων συγκομιδής ενέργειας από το περιβάλλον αλλά και νέων τρόπων για την αποθήκευση της ενέργειας αυτής καθώς επίσης και μεθόδων για την βελτίωση των ήδη υπάρχων. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα διάφορα είδη μορφών ενέργειας που χρησιμοποιούνται σήμερα καθώς και οι τρόποι συλλογής/συγκομιδής της (energy harvesting). Αναλύονται επίσης η τρόποι αποθήκευσης της ενέργειας για χρήση σε ενσωματωμένα συστήματα και δίνεται έμφαση στην μακροχρόνια αποθήκευση της με την χρήση των μπαταριών. Ακόμα γίνεται εκτενής αναφορά στους τρόπους αξιολόγησης των σύγχρονων μπαταριών και τέλος δημιουργείται πρόγραμμα σε λογισμικό υπολογιστή (NI LabVIEW) μέσω του οποίου μας επιτρέπεται ο έλεγχος ηλεκτρονικών οργάνων εργαστηρίου με σκοπό την μέτρηση και αξιολόγηση μπαταριών μέσω των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης.

Λέξεις Κλειδιά: ενσωματωμένα συστήματα, ενέργεια, μπαταρίες, αξιολόγηση μπαταριών, LabVIEW

ABSTRACT

The almost global growth and spread of the Internet, combined with the reduction in the cost of silicon have brought a big increase in the number of built-in systems around us. The ever-increasing number of such systems has created new needs regarding their power supply and life extension. Research and experiments are constantly being carried out to find new ways of harvesting energy from the environment and new ways to store this energy as well as methods to improve existing ones. This paper presents the different types of energy used today as well as the ways of collecting/harvesting it. The ways of storing energy for use in integrated systems are also analyzed and emphasis is placed on long-term storage using batteries. There is also extensive reference to the ways of evaluating modern batteries and finally the focal point of the thesis is a program created in computer software (NI LabVIEW) through which we are allowed to control electronic laboratory instruments for the measurement and evaluation of batteries through charge and discharge cycles.

Keywords: embedded systems, energy, batteries, battery evaluation, LabVIEW

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
ABSTRACT.....	8
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	9
1. Ενσωματωμένα συστήματα και ενεργειακές ανάγκες.	11
2. Μορφές ενέργειας.....	15
2.1. Μηχανική.....	16
2.1.1. Κινητική.....	16
2.1.2. Δυναμική.....	16
2.2. Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια.	16
2.2.1. Ηλεκτρική.....	17
2.2.2. Ακτινοβολούμενη ενέργεια.....	17
2.3. Πυρηνική ή Ατομική ενέργεια.	18
2.4. Θερμική ενέργεια.	18
2.5. Χημική Ενέργεια.	19
2.6. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.	19
2.6.1. Αιολική ενέργεια.	19
2.6.2. Γεωθερμική ενέργεια.....	20
2.6.3. Υδροηλεκτρική ενέργεια.	21
2.6.4. Βιομάζα.	21
3. Τρόποι συλλογής/συγκομιδής ενέργειας για χρήση σε ενσωματωμένα συστήματα. (Energy Harvesting/Scavenging).....	23
3.1. Σύλλογή Αιολικής ενέργειας	24
3.2. Σύλλογή Ηλιακής ενέργειας.....	25
3.3. RF Harvesting	27
3.4. Σύλλογή Θερμικής ενέργειας.....	28
3.5. Μηχανική (Τριβή/Δονήσεις)	29
4. Αποθήκευση Ενέργειας.....	35
4.1. Περιστασιακή	35

4.2. Μακροχρόνια	37
4.3. Σύγκριση μεταξύ περιστασιακής και μακροχρόνιας.	38
5. Τεχνολογίες μπαταριών.	39
5.1. Ιστορική αναδρομή	39
5.2. Βασικά μεγέθη.....	43
5.3. Μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σήμερα.....	46
5.3.1. Πρωτεύοντες μπαταρίες (Primary Batteries).....	47
5.3.2. Δευτερεύοντες μπαταρίες (Secondary Batteries)	51
5.3.3. Εναλλακτικά συστήματα μπαταριών	63
5.4. Μελλοντικές μπαταρίες	67
6. Αξιολόγηση Μπαταριών.....	70
6.1. Βασικές αρχές στην αξιολόγηση μπαταριών	71
6.2. Τρόποι μέτρησης μπαταριών.	73
6.3. Αξιολόγηση μπαταριών με το LabVIEW	84
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	103

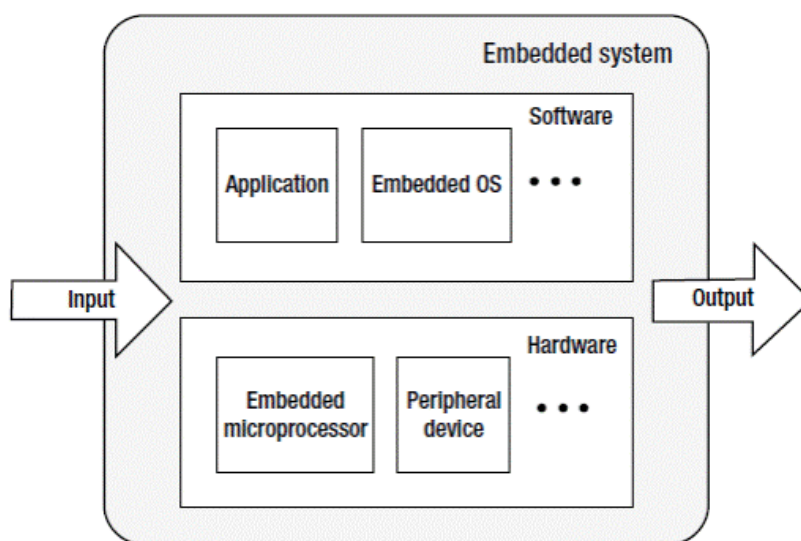
1. Ενσωματωμένα συστήματα και ενεργειακές ανάγκες.

Τα τελευταία χρόνια ο άνθρωπος περιτριγυρίζεται από όλο και περισσότερα υπολογιστικά συστήματα. Η ραγδαία αύξηση της γεωγραφικής κάλυψης του διαδικτύου σε όλο σχεδόν τον πλανήτη έχει ευνοήσει την εξάπλωση των συστημάτων αυτών. Τα συστήματα αυτά πολλές φορές είναι ορατά στο ανθρώπινο μάτι και άλλες όχι.^[1]

Ένα ενσωματωμένο σύστημα είναι ένα σύστημα ηλεκτρονικού υπολογιστή με μια ειδική λειτουργία μέσα σε ένα μεγαλύτερο μηχανικό ή ηλεκτρικό σύστημα, συχνά με περιορισμούς πραγματικού χρόνου. Ένα σύστημα ονομάζεται ενσωματωμένο ως τμήμα μιας πλήρους διάταξης συχνά συμπεριλαμβανομένου του υλικού και τα μηχανικά μέρη. Ενσωματωμένα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα. Στη πραγματικότητα, σχεδόν κάθε σύγχρονη οικιακή συσκευή περιέχει έναν μικροεπεξεργαστή για τη διαχείριση των λειτουργιών της, με αποτέλεσμα το 98% των συστημάτων υπολογιστών που διατίθενται σήμερα παγκοσμίως, να είναι ενσωματωμένα.^[4-8]

Με τον όρο «ενσωματωμένα συστήματα» θα εννοούμε την ενσωμάτωση κάποιου μικροεπεξεργαστή στην λειτουργία ενός ολόκληρου συστήματος με ηλεκτρονικά, μηχανολογικά, και άλλα μέρη, αλλά θα μας αφορούν μόνο οι λειτουργίες του μικροεπεξεργαστή και η διεπαφή αυτού με το εξωτερικό περιβάλλον.

Είναι μικρά σε μέγεθος υπολογιστικά συστήματα, που ο άμεσος ρόλος τους δεν είναι η επεξεργασία δεδομένων. Εξυπηρετούν αυτοματισμούς και βρίσκονται πλέον σε κάθε τύπο ηλεκτρονικής συσκευής καθημερινής χρήσης, όπως κάμερες, οικιακές συσκευές, συσκευές γραφείου. Τα ενσωματωμένα συστήματα αλληλοεπιδρούν με τον πραγματικό κόσμο, καθώς συλλέγουν πληροφορίες και ανταποκρίνονται σ' αυτές. Για το λόγο αυτό, πολλές φορές λειτουργούν ως συστήματα πραγματικού χρόνου, καθώς είναι κρίσιμο να ανταποκρίνονται και να παράγουν τις εξόδους τους σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα.^[10]

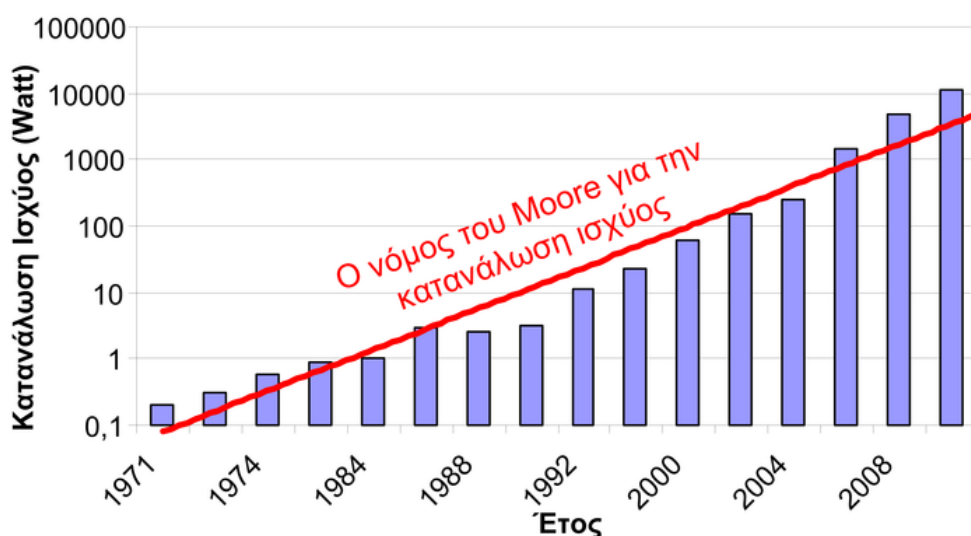


Εικόνα 1.1 Βασική αρχιτεκτονική ενσωματωμένου συστήματος

Γενικά, ως ενσωματωμένο σύστημα θα μπορούσαμε να περιγράψουμε οποιαδήποτε συσκευή η οποία περιλαμβάνει έναν προγραμματιζόμενο υπολογιστή, ο οποίος δεν είναι υπολογιστής γενικού σκοπού.

Απαντώνται σε συστήματα μετρήσεων, σε παιχνίδια, σε βιομηχανικούς αυτοματισμούς, σε αυτοκίνητα και όλα τα μέσα μεταφοράς, σε ηλεκτρονικά όργανα και τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Τα ενσωματωμένα συστήματα αποτελούν την ταχύτερα αναπτυσσόμενη βιομηχανία και αλλάζουν την καθημερινότητα, καθώς διεισδύουν παντού. Αποτελούν τη βάση της τεχνολογίας που αναφέρεται ως διαδίκτυο πραγμάτων (Internet of Things).^[10]

Μέχρι την προηγούμενη δεκαετία, οι σχεδιαστές είχαν ως στόχο τη μεγιστοποίηση της επίδοσης των συστημάτων αυτών, με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος. Έτσι, σχεδόν παντού οι μηχανικοί έδιναν ιδιαίτερη έμφαση στο να παρουσιάζουν προϊόντα ολοένα και πιο ‘γρήγορα’, παραμελώντας τελείως την κατανάλωση ενέργειας. Από τα μέσα περίπου της δεκαετίας του 1990, όμως, αυτό έχει αλλάξει δραματικά. Η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί ένα ισοδύναμο (ή και πιο σημαντικό) μετρικό χαρακτηρισμού ενός συστήματος που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη σε όλα τα στάδια του σχεδιασμού του. Σήμερα, είναι αδιανόητο να μην αναφέρεται η κατανάλωση ενέργειας ενός συστήματος (ή επεξεργαστή), μαζί με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά, όταν αυτό παρουσιάζεται στο καταναλωτικό κοινό. Οι λόγοι που έκαναν να αναδυθεί αυτό το μετρικό από την αφάνεια, κατά την τελευταία δεκαετία, και το έκαναν εξίσου σημαντικό με την επίδοση και το κόστος είναι πολλοί. Ο πιο σημαντικός λόγος από όλους είναι η εκτεταμένη χρήση των φορητών συσκευών. Προσωπικοί φορητοί υπολογιστές, ψηφιακοί βοηθοί, κινητά τηλέφωνα, φορητές μονάδες αναπαραγωγής βίντεο, φορητά τερματικά πολυμέσων και άλλες συσκευές έχουν υιοθετηθεί από τους περισσότερους καταναλωτές και έχουν γίνει αναπόσπαστα στοιχεία της καθημερινής τους ζωής. Η μέχρι τώρα εξέλιξή τους, μάλιστα, προδιαγράφει ένα λαμπρό μέλλον για τις φορητές συσκευές με ολοένα αυξανόμενα ποσοστά διεισδυτικότητας στην καταναλωτική αγορά.^[9]



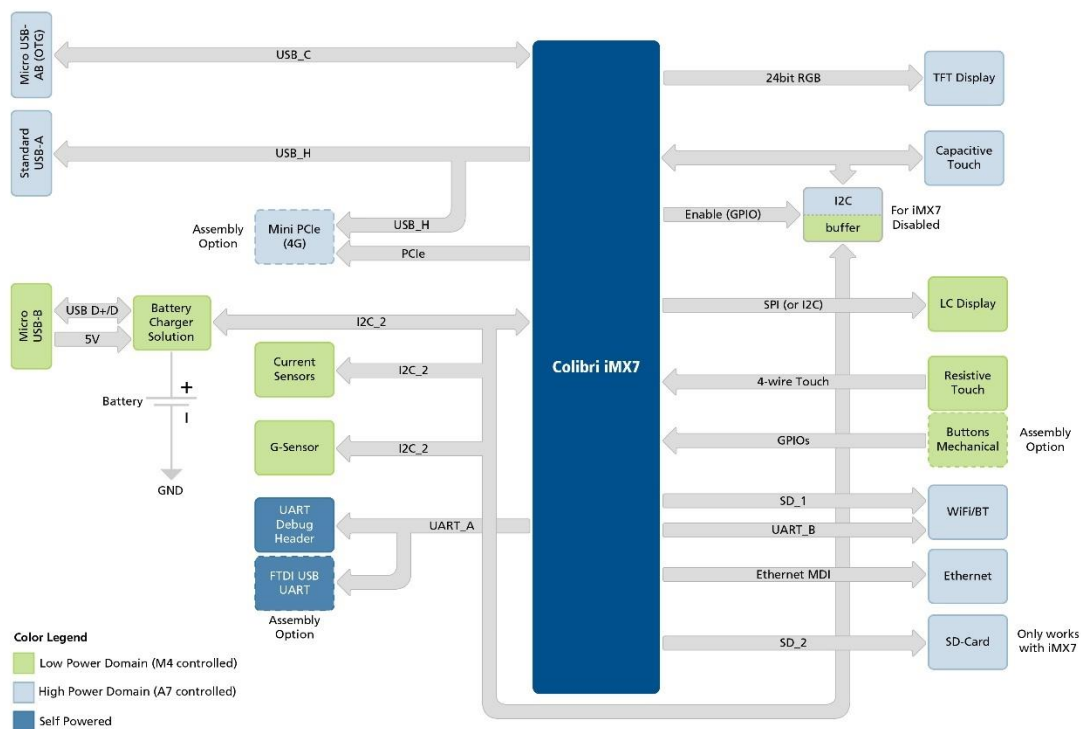
Εικόνα 1.2 Μία ερμηνεία του νόμου του Moore είναι ότι η κατανάλωση ενέργειας των συστημάτων αυξάνει εκθετικά με το ημερολογιακό έτος.

Η μπαταρία σε μία φορητή συσκευή είναι ένα ανεξάρτητο εξάρτημα που δίνει την απαραίτητη ηλεκτρική τροφοδοσία στην συσκευή για να λειτουργεί. Παρόλο που η εξέλιξη των φορητών συσκευών είναι ταχύτατη, δυστυχώς η εξέλιξη των μπαταριών γίνεται με πιο αργούς ρυθμούς.

Σχετικά με τις φορητές συσκευές, το πρόβλημα τις κατανάλωσης ενέργειας είναι πολύ πιο σοβαρό από ότι στα επιτραπέζια συστήματα. Οι σημερινές μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν μια ενεργειακή πυκνότητα περίπου 100 Wh/Kg. Αυτό σημαίνει ότι αν θέλαμε να χρησιμοποιήσουμε έναν επεξεργαστή που έχει απαίτηση ισχύος 50 Watt, θα απαιτούνταν μια μπαταρία 2 Kg, που δεν ενδείκνυται για μια φορητή συσκευή. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί εν μέρει, αυτό το πρόβλημα, οι εταιρείες έχουν παρουσιάσει στο καταναλωτικό κοινό επεξεργαστές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, οι οποίοι τις έχουν πολύ μικρές επιδόσεις και δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν στην πολυπλοκότητα των σημερινών εφαρμογών.

Προφανώς, η λύση στο πρόβλημα της κατανάλωσης ισχύος με μείωση των επιδόσεων δεν είναι αποτελεσματική. Οι χρήστες των φορητών συσκευών απαιτούν την εκτέλεση των εφαρμογών τους με όσο το δυνατόν μικρότερη κατανάλωση ισχύος, και όσο γίνεται πιο γρήγορα. Όταν δεν ικανοποιούνται οι επεξεργαστικές απαιτήσεις, ο χρήστης θα έχει κάποια προβλήματα (π.χ. να σταματάει η αναπαραγωγή κάποιας ταινίας, ή να διακόπτεται η επικοινωνία, ή να υπάρχουν αρκετές καθυστερήσεις στην επεξεργασία των δεδομένων του). Οι χρήστες αυτών των φορητών συστημάτων δεν μπορούν να ανεχθούν τέτοιες προβληματικές λειτουργίες, και έτσι σύντομα αντικαθιστούν αυτές τις συσκευές με άλλες που καλύπτουν αυτές τις απαιτήσεις. Αλλά, η μεγάλη κατανάλωση ισχύος δεν είναι το μόνο πρόβλημα στη φορητότητα. Η κατανάλωση ισχύος συνδέεται άμεσα με το κόστος ψύξης και ενσωμάτωσης τις στο σύστημα. Από τη στιγμή που η θερμότητα πρέπει να αποβάλλεται στο περιβάλλον μέσω τις συσκευασίας και τις μονάδας ψύξης, το κόστος γίνεται ιδιαίτερα υψηλό έως και απαγορευτικό. Ένας επεξεργαστής, με μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος από έναν άλλο, αποβάλλει περισσότερη θερμότητα στο περιβάλλον και χρειάζεται μια μεγαλύτερη μονάδα ψύξης. Εκτός από το μέγεθός τις, η μεγαλύτερη μονάδα ψύξης προκαλεί και περισσότερο θόρυβο (ηχορύπανση) λόγω των μηχανικών μερών που περιλαμβάνει.

Συνεπώς, υπάρχει ένα ξεκάθαρο πλεονέκτημα στη μείωση της κατανάλωσης ισχύος, τόσο για να μειωθεί το κόστος όσο και για να μειωθεί ο θόρυβος που θα παράγει η συσκευή.^[9]



Εικόνα 1.3 Block Diagram Colibri iMX7 Επίδειξη χαμηλής ισχύος

Εκτός από τα παραπάνω οφέλη, υπάρχει και το θέμα της αξιοπιστίας (reliability). Τα συστήματα με μεγάλη κατανάλωση ισχύος αναπτύσσουν υψηλές θερμοκρασίες. Οι υψηλές θερμοκρασίες επιδρούν αρνητικά στα κυκλώματα πολύ μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης (Very Large Scale Integration, VLSI) και οδηγούν σε διάφορες καταστάσεις αστοχίας. Μια αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10°C διπλασιάζει το ποσοστό αστοχίας του κυκλώματος. Επίσης, η λειτουργία ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος σε υψηλή θερμοκρασία μειώνει και τη διάρκεια ζωής του. Έτσι, λοιπόν, η μικρή κατανάλωση ισχύος δεν αφορά μόνον τις φορητές συσκευές, αλλά κάθε υπολογιστικό σύστημα, από το πιο απλό έως το πιο πολύπλοκο.

Όπως έγινε φανερό από παραπάνω, υπάρχει ένα σημαντικό πρόβλημα στο σχεδιασμό ενσωματωμένων συστημάτων ως προς την επίδοση (ταχύτητα) και την κατανάλωση ενέργειας. Το πρόβλημα εστιάζεται από τη μια μεριά στον κυρίαρχο ανασχετικό παράγοντα της μνήμης του ενσωματωμένου συστήματος και από την άλλη μεριά στην ικανοποίηση των επεξεργαστικών απαιτήσεων των σύγχρονων εφαρμογών. Το πρόβλημα αυτό έχει γίνει αντιληπτό από τους ερευνητές εδώ και χρόνια και για αυτό το λόγο έχει παρουσιαστεί μια πληθώρα μεθοδολογιών, τεχνικών, ή τρόπων για την αποτελεσματική αντιμετώπισή του. Συγκεκριμένα, η μεγάλη καθυστέρηση και το υψηλό κόστος της ενέργειας ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος μνήμης, έχει οδηγήσει ερευνητές να προτείνουν διάφορους τρόπους για την καλύτερη εκμετάλλευση, είτε της μνήμης δεδομένων είτε της μνήμης εντολών, ενώ οι υψηλές επεξεργαστικές απαιτήσεις αντιμετωπίζονται κυρίως με τη χρήση εξειδικευμένων κυκλωμάτων, ως προς τις λειτουργίες της εφαρμογής.^[9]

2. Μορφές ενέργειας.

Η ενέργεια είναι σε τέτοιο βαθμό συνυφασμένη με την καθημερινή μας ζωή που μόνο η έλλειψή της καθιστά πρόδηλη την αναγκαιότητά της. Το σύνολο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων δεσμεύει, παράγει, καταναλώνει, μετατρέπει, αποθηκεύει και υποβαθμίζει τεράστια ποσά ενέργειας.

Κάθε φυσικό σύστημα περιέχει (ή εναλλακτικά αποθηκεύει) μία ποσότητα που ονομάζεται ενέργεια. Ενέργεια, συνεπώς, είναι η ικανότητα ενός σώματος ή συστήματος να παράγει έργο.

Στο διεθνές σύστημα μετρικών μονάδων (S.I.), μονάδα μέτρησης της ενέργειας είναι το 1 Joule (Τζάουλ) και είναι το έργο που παράγεται όταν δύναμη 1 Newton κινεί ένα αντικείμενο σε απόσταση 1 μέτρου.

Για να εκτιμήσουμε το ρυθμό μεταβολής της ενέργειας ή το ρυθμό παραγωγής έργου μιας μηχανής, δηλαδή πόσο γρήγορα μια μηχανή κάνει ένα συγκεκριμένο έργο, χρησιμοποιούμε την ισχύ (P).

Ισχύ ονομάζουμε το μέγεθος που μας δηλώνει πόσο γρήγορα μετασχηματίζεται (ή χρησιμοποιείται) η ενέργεια. Μεγάλη ισχύς σημαίνει ότι μια ορισμένη ποσότητα ενέργειας μετασχηματίζεται (χρησιμοποιείται) σε μικρό χρόνο, ενώ μικρή ισχύς σημαίνει ότι χρειαζόμαστε πολύ χρόνο για να μετατρέψουμε (χρησιμοποιήσουμε) την ίδια ποσότητα ενέργειας.

Αν μια μηχανή ισχύος 1 KW λειτουργεί για μια ώρα καταναλώνει ενέργεια ίση με 1 κιλοβατώρα (1 KWh) ή 3.600.000 Joule, που είναι πλέον μονάδα έργου.^[12]

Οποιαδήποτε μορφή δράσης από τα παιδικά παιχνίδια μέχρι τη λειτουργία των μηχανών και από το μαγείρεμα τροφών μέχρι τη γραμμή παραγωγής στο εργοστάσιο προϋποθέτει κατανάλωση ενέργειας. Οι πράγματι πολυποίκιλες μορφές ενέργειας βρίσκονται πίσω από την ασύλληπτη ποικιλία των φυσικών φαινομένων.

Η πραγματική επανάσταση όμως στην αξιοποίηση των διαφόρων μορφών ενέργειας ξεκίνησε, μόλις πριν από δύο αιώνες, με την εξέλιξη της τεχνολογίας.

Κατασκευάσαμε σύνθετες συσκευές, που καθημερινά μετατρέπουν την ενέργεια από μία μορφή σε μία άλλη, διευκολύνοντας τη ζωή μας.

Χρησιμοποιούμε την ενέργεια, για να μαγειρέψουμε το φαγητό μας, για να διαμορφώσουμε τις κατάλληλες συνθήκες διαβίωσης, για να επικοινωνήσουμε, να μετακινηθούμε και να ψυχαγωγηθούμε.

Μπορεί οι συσκευές και οι μηχανές που κατασκευάζουμε, να είναι σήμερα πολύ πιο σύνθετες από τις παλιές, μπορεί να λειτουργούν πιο πολύπλοκα, η διαπίστωση όμως δεν άλλαξε:

Χωρίς ενέργεια δε γίνεται καμιά αλλαγή στη φύση!

Ανάλογα με τον τρόπο που έχει αποκτηθεί, ανταλλαχθεί ή αποθηκευτεί, μπορούμε να μιλήσουμε για πολλές μορφές ενέργειας.

Ακριβώς πόση ενέργεια περιέχεται σε ένα σύστημα μπορεί να υπολογιστεί παίρνοντας το άθροισμα ή το ολοκλήρωμα ενός αριθμού ειδικών εξισώσεων καθεμιά από τις οποίες δίνει την ενέργεια που έχει αποθηκευτεί κατά έναν ιδιαίτερο τρόπο.^[13] Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε αναφορικά τις πιο γνωστές από αυτές.



Εικόνα 2.1 Ο Ήλιος είναι η κύρια πηγή ενέργειας για την διατήρηση της ζωής στη Γη.

2.1. Μηχανική.

Μηχανική ενέργεια ονομάζεται το άθροισμα της δυναμικής και της κινητικής ενέργειας ενός σώματος. Η Κινητική και η Δυναμική ενέργεια θεωρούνται ως οι δύο μορφές της Μηχανικής ενέργειας. Κατά την κίνηση ενός σώματος ή φορτίου σε συντηρητικό πεδίο δυνάμεων, και εφόσον δεν υπάρχουν τριβές, η δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια και το αντίστροφο, το άθροισμά τους όμως είναι πάντα σταθερό και ίσο με τη μηχανική ενέργεια που αρχικά είχε το σώμα.^[14]

2.1.1. Κινητική.

Ως κινητική ενέργεια ενός σώματος ορίζεται η συνολική ενέργεια που χρειάζεται να απορροφήσει ένα σώμα προκειμένου να αποκτήσει ορισμένη μεταφορική ταχύτητα ή/και γωνιακή ταχύτητα ξεκινώντας από την ακινησία. Κινητική ενέργεια έχουν τα σώματα που εκτελούν κίνηση ή περιστροφή ή ταλάντωση. Ορίζονται δύο ειδών κινητικές ενέργειες, η **μεταφορική κινητική ενέργεια** και η **περιστροφική κινητική ενέργεια**, οι οποίες συμβολίζονται με K_{μ} και K_{π} αντίστοιχα.^[15-17]

2.1.2. Δυναμική.

Δυναμική ενέργεια ορίζεται η ενέργεια που κατέχει ένα σώμα, ή σύστημα, λόγω της θέσεως (σε σχέση με κάποια άλλη), ή της κατάστασής του. Η δυναμική ενέργεια διακρίνεται σε "ενέργεια θέσεως" και "ενέργεια μορφής", που εμφανίζεται όταν συστρέφουμε, συμπιέζουμε, τεντώνουμε ή λυγίζουμε ένα υλικό αλλάζοντας τη φυσική του μορφή. Στη δεύτερη αυτή περίπτωση, το σώμα μπορεί να παράγει έργο επανερχόμενο στη "φυσική" του μορφή.^[18]

2.2. Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια.

Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια συνδυάζει την ηλεκτρική και τη φωτεινή ή ενέργεια ακτινοβολίας.^[12]

2.2.1. Ηλεκτρική.

Είναι η ενέργεια που μεταφέρει το ηλεκτρικό ρεύμα, που αναφέρεται στην κινητική ενέργεια των κινούμενων ηλεκτρονίων (ηλεκτρικό ρεύμα), λόγω της ύπαρξης διαφοράς δυναμικού στα άκρα ενός αγωγού.

Ο σύγχρονος κόσμος εξαρτά την επιβίωση και την ευημερία του από αυτό το είδος ενέργειας. Η πλειονότητα των συσκευών λειτουργεί με ηλεκτρικό ρεύμα. Υπάρχουν πολλοί τρόποι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κυριότεροι είναι η καύση διαφόρων ουσιών (λιγνίτης, πετρέλαιο, κάρβουνο), τα πυρηνικά εργοστάσια, τα ηλιακά πάρκα, τα υδροηλεκτρικά φράγματα και τα αιολικά πάρκα. Τα τελευταία 20 χρόνια γίνονται έντονες προσπάθειες αύξησης του ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε.).

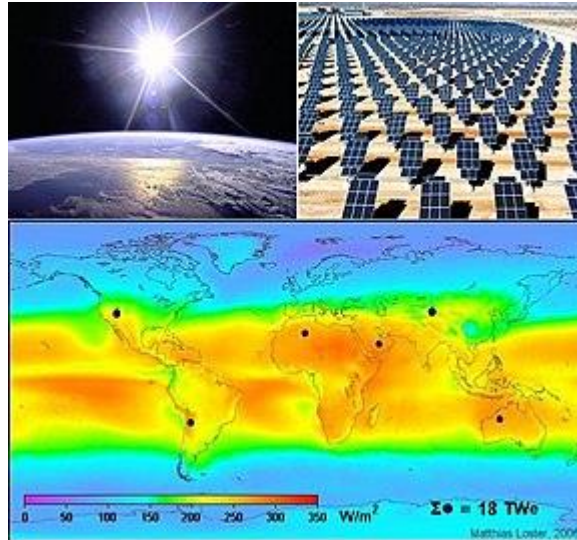
Μεγάλο μειονέκτημα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η δύσκολη, σχεδόν αδύνατη μακροχρόνια αποθήκευσή της. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να καταναλώνεται ταυτόχρονα με την παραγωγή της ή να αποθηκεύεται αφού πρώτα μετατραπεί σε άλλες μορφές ενέργειας.^[19]



Εικόνα 2.2 Μια αστραπή, περιέχει περίπου 500 γκιγκατζάουλ ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελεί ένα από τα πιο δραματικά φαινόμενα του ηλεκτρισμού.

2.2.2. Ακτινοβολούμενη ενέργεια.

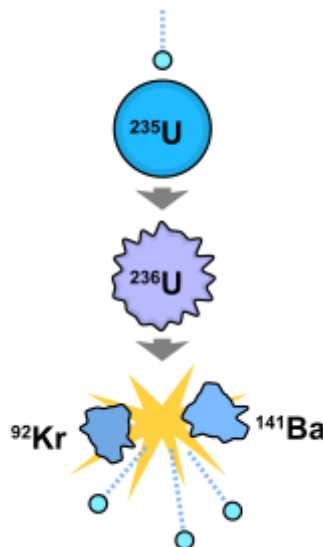
Η ακτινοβολούμενη ενέργεια προέρχεται από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα τριγύρω μας όπως το ορατό φάσμα φωτός, οι υπέρυθρες ακτινοβολίες ή ακόμη και τα ραδιοσήματα που χρησιμοποιούμε για τις τηλεπικοινωνίες. Στην ακτινοβολούμενη ενέργεια μπορούν να συμπεριληφθούν και τα ραδιενεργά υλικά που εκπέμπουν μια ακτινοβολία. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα αλλά είναι εξαιρετικά επικίνδυνα.^{[1][20]}



Εικόνα 2.3 Το ορατό φως όπως το φως του ήλιου φέρνει την ακτινοβολούμενη ενέργεια, η οποία χρησιμοποιείται στην παραγωγή ηλιακής ενέργειας.

2.3. Πυρηνική ή Ατομική ενέργεια.

Πυρηνική ενέργεια είναι η δυναμική ενέργεια που είναι εγκλωβισμένη στους πυρήνες των ατόμων λόγω της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων που τα συνιστούν. Η πυρηνική ενέργεια απελευθερώνεται κατά τη σχάση ή σύντηξη των πυρήνων και εφόσον οι πυρηνικές αντιδράσεις είναι ελεγχόμενες (όπως συμβαίνει στην καρδιά ενός πυρηνικού αντιδραστήρα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει ενεργειακές ανάγκες.^[21]



Εικόνα 2.4 Όταν ο πυρήνας ενός ατόμου ουρανίου βομβαρδίζεται από ένα νετρόνιο, προκαλείται «σχάση» απελευθερώνοντας ενέργεια και δύο νετρόνια που προκαλούν τη σχάση δύο πρόσθετων πυρήνων ουρανίου.

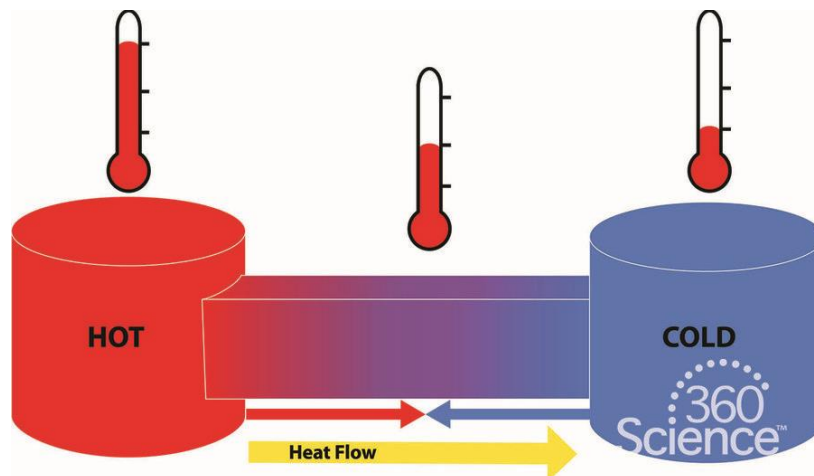
2.4. Θερμική ενέργεια.

Πρόκειται για εσωτερική ενέργεια ενός συστήματος που βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας.

Θερμική ενέργεια ονομάζουμε την κινητική ενέργεια των ατόμων και μορίων των ουσιών λόγω των συνεχών και τυχαίων κινήσεών τους. Όσο πιο έντονη είναι η

κίνηση αυτών, τόσο πιο θερμό γίνεται το σώμα. Η κίνηση αυτή για να μεταβληθεί απαιτεί την είσοδο εξωτερικής ενέργειας, η οποία μπορεί να έχει διάφορες μορφές, όπως μεγάλου μήκους κύματος ηλιακή ενέργεια.

Με τον όρο θερμότητα εννοούμε ειδικά την ενέργεια που μεταφέρεται από ένα σώμα υψηλής θερμοκρασίας σε άλλο με χαμηλότερη θερμοκρασία, και ποτέ αντίστροφα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η κινητική ενέργεια των σωματιδίων του δεύτερου. Συνεπώς θερμική ενέργεια διαθέτουν όλα τα σώματα είτε αυτά είναι ζεστά είτε είναι κρύα. Απλά το θερμό σώμα έχει περισσότερη θερμική ενέργεια η οποία και διαδίδεται με διάφορους τρόπους όπως είναι η θερμική ακτινοβολία.^[22]



Εικόνα 2.5 Μεταφορά θερμότητας.

2.5. Χημική Ενέργεια.

Χημική ενέργεια ορίζεται ως το σύνολο της δυναμικής ενέργειας που απαιτείται από διάφορα άτομα για τη συγκρότηση μορίων χημικών ουσιών, κάτω από την αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων ή που αποθηκεύεται σε χημικές ενώσεις.

Η χημική ενέργεια κυρίως αποδίδεται ως θερμική ενέργεια ή ηλεκτρική ενέργεια, εφόσον τα μόρια διασπώνται και πάλι σε άτομα ή μετασχηματίζεται στους οργανισμούς σε θερμική και κινητική ενέργεια, με βιολογικούς μηχανισμούς, και τότε ονομάζεται *ζωική ενέργεια*.^[23]

2.6. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ή ήπιες μορφές ενέργειας ή πράσινη ενέργεια είναι οποιοσδήποτε φυσικός πόρος μπορεί να αντικατασταθεί γρήγορα και αξιόπιστα. Αυτές οι πηγές ενέργειας είναι άφθονες, βιώσιμες, αναπληρώνονται φυσικά και είναι καλές για το περιβάλλον.^[24]

Οι κυριότεροι τύποι ή μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

2.6.1. Αιολική ενέργεια.

Η αιολική ενέργεια παράγεται από την εκμετάλλευση του ανέμου και είναι μια βιώσιμη και ανανεώσιμη ενέργεια και έχει πολύ μικρότερο αντίκτυπο στο περιβάλλον σε σύγκριση με την καύση ορυκτών καυσίμων, γι' αυτό αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Το «καύσιμο» της είναι

άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν. Δεν εκλύονται αέρια και άλλοι ρύποι, και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι μικρές σε σύγκριση με τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα. Τα οικονομικά οφέλη μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας είναι αξιοσημείωτα.^{[25][30]}



Εικόνα 2.6 Αιολικό πάρκο στον Καναδά.

2.6.2. Γεωθερμική ενέργεια.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι η ενέργεια που παράγεται από τη γη. Είναι καθαρή, βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον. Ορίζεται ως η φυσική θερμική ενέργεια της Γης που διαρρέει από το θερμό εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνεια. Η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται με δύο τρόπους:

α) Με αγωγή από το εσωτερικό προς την επιφάνεια με ρυθμό $0,04 - 0,06 \text{ W/m}^2$ ^[1]

β) Με ρεύματα μεταφοράς, που περιορίζονται όμως στις ζώνες κοντά στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, λόγω ηφαιστειακών και υδροθερμικών φαινομένων.

Η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να έχει οικιακή ή σε μεγαλύτερη κλίμακα βιομηχανική εφαρμογή. Οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις έχουν τυπικά χαμηλές εκπομπές ρύπων. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της γεωθερμικής ενέργειας είναι ότι μπορεί να παραχθεί μόνο σε επιλεγμένες τοποθεσίες σε όλο τον κόσμο. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι, όταν δεν υπάρχουν υπόγειες δεξαμενές, η δημιουργία γεωθερμικών μονάδων μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο σεισμού.^{[26][30]}



Εικόνα 2.7 Αντλίες Γεωθερμικής ενέργειας.

2.6.3. Υδροηλεκτρική ενέργεια.

Υδροηλεκτρική ενέργεια λέγεται η εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας του τρεχούμενου νερού με σκοπό, κυρίως, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι περισσότερες πόλεις στον κόσμο βασίζονται στην υδροηλεκτρική ενέργεια εδώ και τουλάχιστον έναν αιώνα. Δεν ρυπαίνει, δεν συνεπάγεται απόβλητα ή παράγει τοξικά αέρια και είναι φιλική προς το περιβάλλον. Τα προβλήματα που αντιμετωπίζει η υδροηλεκτρική ενέργεια έχουν πλέον σχέση με τη γήρανση των φραγμάτων. Πολλά από τα οποία χρειάζονται μεγάλες εργασίες αποκατάστασης για να παραμείνουν λειτουργικά και ασφαλή, και αυτό κοστίζει τεράστια χρηματικά ποσά. Η κατανάλωση της παγκόσμιας παροχής πόσιμου νερού προκαλεί επίσης προβλήματα, καθώς οι πόλεις ενδέχεται να καταλήξουν να χρειάζεται να καταναλώνουν το νερό που τους παρέχει ενέργεια.^{[27][30]}



Εικόνα 2.8 Υδροηλεκτρικός σταθμός σε φράγμα.

2.6.4. Βιομάζα.

Η βιομάζα είναι η πιο παλιά και διαδεδομένη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Ο πρωτόγονος άνθρωπος, για να ζεσταθεί και να μαγειρέψει, χρησιμοποίησε την ενέργεια (θερμότητα) που προερχόταν από την καύση των ξύλων, που είναι ένα είδος βιομάζας.

Με τον όρο βιομάζα ορίζεται το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και καταλοίπων βιολογικής προέλευσης από τη γεωργία (συμπεριλαμβανομένων των φυτικών και των ζωικών ουσιών), τη δασοκομία και τους συναφείς κλάδους, συμπεριλαμβανομένης της αλιείας και της υδατοκαλλιέργειας, καθώς και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των βιομηχανικών αποβλήτων και των οικιακών απορριμμάτων. Ουσιαστικά η βιομάζα αποτελεί την ύλη που έχει άμεση ή έμμεση βιολογική(οργανική) προέλευση. Σε περίπτωση που η βιομάζα χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας μιλάμε για στερεά, υγρά και αέρια βιοκαύσιμα.^{[29][30]}



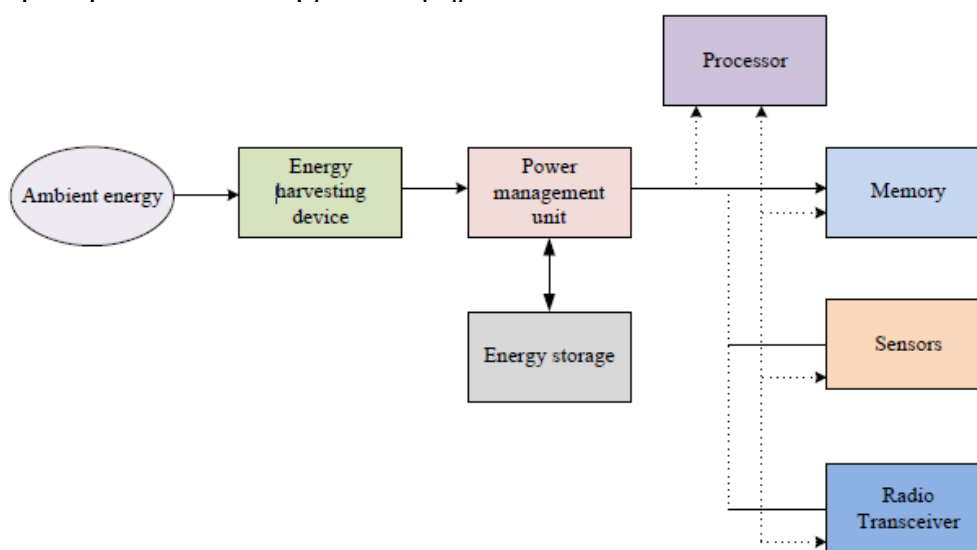
Εικόνα 2.9 Ξυλώδους βιομάζα: πέλλετ ξύλου.

3. Τρόποι συλλογής/συγκομιδής ενέργειας για χρήση σε ενσωματωμένα συστήματα. (Energy Harvesting/Scavenging)

Ένα από τα βασικά προβλήματα στο IoT είναι η διάρκεια ζωής των συστημάτων. Ορισμένα ενεργοβόρα συστήματα έχουν διάρκεια ζωής μερικές μέρες ή ώρες λόγω της μικρής χωρητικότητας της μπαταρίας ή της έλλειψης συνεχούς τροφοδοσίας από πρίζα. Τέτοια συστήματα είναι συνήθως αυτά που χρησιμοποιούν κάποιο υποσύστημα μετάδοσης των δεδομένων μέσω RF. Πολλές φορές όμως δεν είναι εφικτή η χρήση μπαταρίας μεγαλύτερης χωρητικότητας λόγω μεγέθους, οπότε πρέπει να βρεθεί ένας άλλος τρόπος για την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του συστήματος. Το πρόβλημα αυτό έρχεται να λύσει το energy harvesting. Το energy harvesting είναι η διαδικασία με την οποία η ενέργεια που προέρχεται από εξωτερικές πηγές (π.χ. ηλιακή ενέργεια, θερμική ενέργεια, αιολική ενέργεια, κινητική ενέργεια), καταγράφεται και αποθηκεύεται για μικρές, ασύρματες αυτόνομες συσκευές, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται σε φορητά ηλεκτρονικά και ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Η συλλεγμένη ενέργεια που λαμβάνεται μέσω του energy harvesting αποτελείται βασικά από τρία κύρια συστατικά: συγκεκριμένα, την πηγή ενέργειας, την αρχιτεκτονική συλλογής ενέργειας και την οντότητα που καταναλώνει την ενέργεια αυτή. Ένα σύστημα συλλογής ενέργειας συλλαμβάνει και σαρώνει την περιβαλλοντική ενέργεια και στη συνέχεια τροφοδοτεί τη συγκομιδή και μετατρεμμένη πλέον ηλεκτρική ενέργεια σε κόμβους αισθητήρων. Ο σχεδιασμός του συστήματος συλλογής ενέργειας μπορεί να διαφέρει από τη μία εφαρμογή στην άλλη ανάλογα με τον τύπο του φορτίου, της απαιτήσεως και τους όρους της περιοχής ανάπτυξης. Ο σχεδιασμός και η εφαρμογή ενός αποτελεσματικού συστήματος συλλογής ενέργειας δεν απαιτεί μόνο κατάλληλη επιλογή συσκευών με κατάλληλες βαθμολογίες, αλλά και τη σωστή ενσωμάτωση των ηλεκτρονικών στον κόμβο του αισθητήρα.^[31-37]

Το παρακάτω σχεδιάγραμμα δείχνει ένα συνηθισμένο σύστημα συλλογής ενέργειας ενσωματωμένο σε έναν κόμβο αισθητήρα.



Εικόνα 3.1 Sensor node with energy harvesting system

3.1. Συλλογή Αιολικής ενέργειας

Η αιολική ενέργεια είναι ένα είδος κινητικής ενέργειας ή απλώς ενέργειας σε κίνηση που προκαλείται από την επίδραση του ήλιου στην ατμόσφαιρα. Φυσικά, οι ακτίνες του ήλιου θερμαίνουν άμεσα την ατμόσφαιρα. Ολόκληρη η διαδικασία θέρμανσης, σε συνδυασμό με την περιστροφή της γης, παράγει άνεμο που διασκορπίζεται σε όλες τις διαφορετικές επιφάνειες της γης. Ο ίδιος άνεμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιστροφή των ανεμογεννητριών, με τη χρήση μεγάλων τουρμπινών για τη λήψη του διαθέσιμου ανέμου ως δύναμη περιστροφής, με την τουρμπίνα στη συνέχεια να στρέφει μια γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Δεδομένου ότι η ταχύτητα του ανέμου δεν είναι σταθερή, η ετήσια παραγωγή ενέργειας ενός αιολικού πάρκου δεν είναι ποτέ όσο το άθροισμα των ονομαστικών επιδόσεων γεννήτριας πολλαπλασιασμένο επί το σύνολο των ωρών σε ένα χρόνο. Ο λόγος της πραγματικής παραγωγικότητας σε ένα έτος προς αυτό το θεωρητικό μέγιστο ονομάζεται συντελεστής χωρητικότητας. Οι τυπικοί συντελεστές χωρητικότητας είναι 15-50%. Οι τιμές στο άνω άκρο του εύρους επιτυγχάνονται σε ευνοϊκές τοποθεσίες και οφείλονται σε βελτιώσεις σχεδιασμού ανεμογεννητριών.

Πρακτικά, οι εκτιμήσεις των συντελεστών χωρητικότητας για εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας κυμαίνονται από 35% έως 44%. Σε αντίθεση με τις μονάδες παραγωγής καυσίμων, ο συντελεστής χωρητικότητας επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένης της μεταβλητότητας του ανέμου στην τοποθεσία και του μεγέθους της γεννήτριας σε σχέση με την περιοχή σάρωσης του στροβίλου. Μια μικρή γεννήτρια θα είναι φθηνότερη και θα επιτυγχάνει υψηλότερο συντελεστή χωρητικότητας, αλλά θα παράγει λιγότερη ηλεκτρική ισχύ (και συνεπώς μικρότερο κέρδος) σε υψηλούς ανέμους. Αντίθετα, μια μεγάλη γεννήτρια θα κόστιζε περισσότερο, αλλά θα παράγει λίγη επιπλέον ισχύ και, ανάλογα με τον τύπο, μπορεί να σταματήσει με χαμηλή ταχύτητα ανέμου. Έτσι θα επιδιωκόταν ένας βέλτιστος συντελεστής χωρητικότητας περίπου 40-50%.

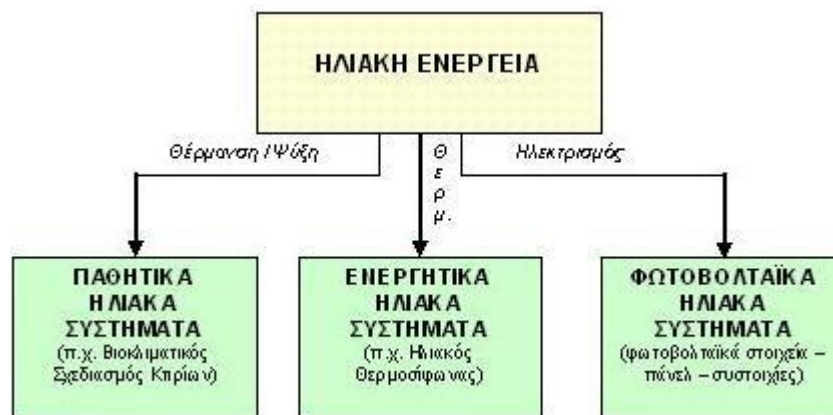
Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί όλη η αιολική ενέργεια για παραγωγή ενέργειας, αν και έχουν κατασκευαστεί ορισμένες μικρές ανεμογεννήτριες, σχεδιασμένες να λειτουργούν σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου.

Οι ανεμογεννήτριες υπακούουν στην αρχή διατήρησης της μάζας: η μάζα αέρα που εισέρχεται στην ανεμογεννήτρια θα πρέπει να είναι ίση με τη μάζα που εξέρχεται από αυτή. Σύμφωνα με το νόμο του Μπετζ, η μέγιστη αναλογία αιολικής/κινητικής ενέργειας είναι $16/27$ (59,3%).

Η αιολική ενέργεια γίνεται όλο και πιο συνηθισμένη. Οι νέες καινοτομίες που επιτρέπουν την εμφάνιση αιολικών πάρκων τις καθιστούν ένα πιο κοινό θέαμα. Η κατασκευή αιολικών πάρκων ωστόσο είναι πολυδάπανο έργο, και η ταχύτητα του ανέμου επίσης δεν είναι ομοιόμορφη κάθε φορά, γεγονός που επηρεάζει την παραγωγή ισχύος. Παρόλο που αυτό φαινόταν σαν μια ιδανική λύση για πολλούς, η πραγματικότητα των αιολικών πάρκων αρχίζει να αποκαλύπτει έναν απρόβλεπτο οικολογικό αντίκτυπο που μπορεί να μην το κάνει ιδανική επιλογή.^[25]

3.2. Συλλογή Ηλιακής ενέργειας

Η ηλιακή ενέργεια είναι η πιο ευρέως γνωστή από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η άφθονη ενέργεια του ήλιου που φτάνει καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας στη γη, την καθιστά πρωτοπόρο ανάμεσα στις υπόλοιπες πηγές. Χρησιμοποιεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο για την απευθείας μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ρεύμα. Για την μετατροπή αυτή χρησιμοποιούνται τα φωτοβολταϊκά συστήματα ή ηλιακά πάνελ. Τα ηλιακά πάνελ είναι κατασκευασμένα από υλικά τα οποία απορροφούν τα φωτόνια από το ηλιακό φως και απελευθερώνουν ηλεκτρικό φορτίο. Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της.^[38]



Εικόνα 3.2 Ηλιακή ενέργεια.

Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών: τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα ή Ηλιοθερμικά συστήματα, και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.^[39]

- **Ηλιοθερμικά συστήματα**

Τα ηλιοθερμικά συστήματα συλλέγουν ηλιακή ακτινοβολία και την μετατρέπουν σε θερμική ενέργεια που μετέπειτα μπορεί να παραγάγει ηλεκτρισμό. Υπάρχουν διάφορα είδη ηλιοθερμικών συστημάτων και η διαφορά τους έγκειται στο βαθμό θερμότητας που μπορούν να παραγάγουν δηλαδή ως χαμηλής, μέσης ή υψηλής θερμοκρασίας συλλέκτες. Τα ηλιοθερμικά συστήματα υψηλής θερμοκρασίας που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρισμού, είναι πιο αποδοτικά από τα φωτοβολταϊκά. Η χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας συλλέκτες είναι επίπεδες πλάκες που παγιδεύουν την ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιώντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου για να ζεστάνουν νερό μέσα στο πλαίσιο. Αυτά τα συστήματα δεν παράγουν ηλεκτρισμό αλλά ζεστό νερό για οικιακή ή βιομηχανική χρήση. Οι συλλέκτες με σωλήνες κενού (vacuum tubes) παγιδεύουν την ηλιακή ενέργεια στο εσωτερικό του γυαλοσωλήνα κενού (το κενό αέρος έχει τον μικρότερο συντελεστή θερμικής απώλειας), με αποτέλεσμα να έχουμε χαμηλές ως μηδαμινές θερμικές απώλειες στο περιβάλλον. Αντίθετα, οι

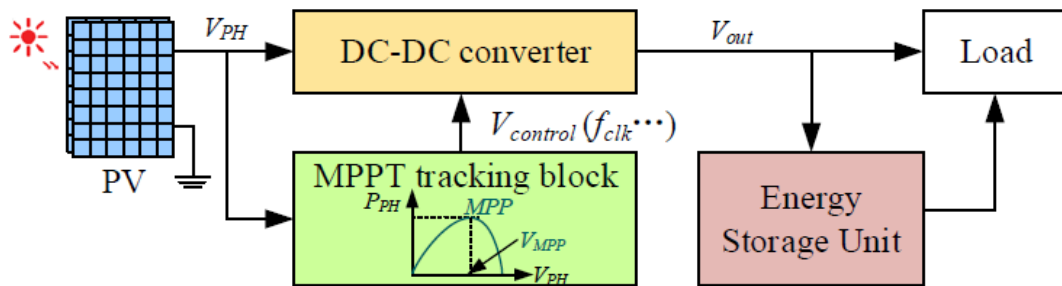
υψηλής θερμοκρασίας συλλέκτες συγκεντρώνουν την ηλιακή ενέργεια με κάτοπτρα ή φακούς σε ένα ντεπόζιτο νερού μετατρέποντας το σε ατμό, ο οποίος στην συνέχεια κινεί ατμογεννήτρια παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Για να λειτουργήσουν αποδοτικά, τα ηλιοθερμικά συστήματα χρειάζονται άμεση πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στους συλλέκτες ή τα κάτοπτρα. Εάν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια η απόδοση τους μειώνεται αισθητά.^[40]



Εικόνα 3.3 Ηλιακός συλλέκτης με κάτοπτρα στην Γαλλία.

- **Φωτοβολταϊκό σύστημα**

Ένα σύγχρονο ηλιακό πάνελ είναι κατασκευασμένο από διάφορα υλικά κάνοντας τον υπολογισμό της απόδοσης του περίπλοκη υπόθεση. Βάση της θεωρίας, ένα ηλιακό πάνελ είναι κατασκευασμένο από υλικά τα οποία απορροφώντας τα φωτόνια από το ηλιακό φως διεγείρουν τα ηλεκτρόνια του υλικού αυτού. Τα ηλεκτρόνια αυτά είτε μετατρέπουν την ενέργεια αυτή σε ρεύμα είτε σε θερμότητα. Για να αποφευχθεί το δεύτερο φαινόμενο, τα ηλιακά πάνελ είναι κατασκευασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να κατευθύνουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στις άκρες του πάνελ όπου είναι συνδεδεμένα τα ηλεκτρόδια. Το πυρίτιο που χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή αυτών, ντοπάρεται σε δύο επίπεδα. Στο ένα επίπεδο ντοπάρεται με βόριο και στο άλλο με φώσφορο. Το ρεύμα που παράγεται είναι συνεχές και για την μεταφορά του μέσω του δικτύου ηλεκτροδότησης πρέπει το μετατρέπουμε με τη βοήθεια ενός μετατροπέα σε εναλλασσόμενο. Στην περίπτωση που απαιτείται η τροφοδοσία ενός ενσωματωμένου συστήματος ή η αποθήκευση της ενέργειας που παράγεται, χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας ρεύματος DC/DC και συνδέεται στην έξοδο του το φορτίο ή η μονάδα αποθήκευσης. Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται από το ποσοστό της προσπίπτουσας ενέργειας που μετατρέπεται σε ρεύμα. Η πρώτη γενιά έχει αποδόσεις της τάξης του 22,7%. Η δεύτερη γενιά φτάνει στα 18,4% σε πειραματικές εφαρμογές ενώ μόλις το 13,4% σε εμπορικές εφαρμογές. Τέλος, η Τρίτη γενιά έχει αποδόσεις που ξεπερνούν το 30% αλλά δεν υπάρχουν ακόμη εμπορικές εφαρμογές.^{[1][41]}



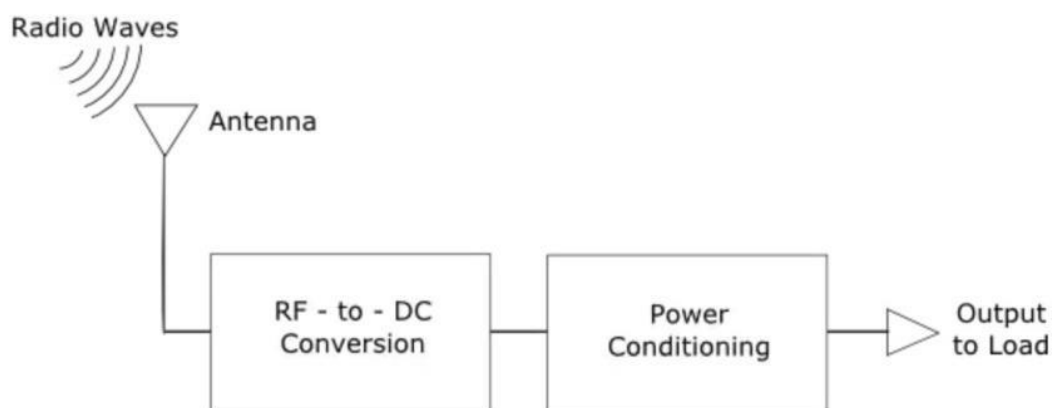
Εικόνα 3.4 Φωτοβολταϊκό σύστημα.

3.3. RF Harvesting

Τα ασύρματα δίκτυα γύρω μας αυξάνονται συνεχώς τα τελευταία χρόνια. Μετά τα τέλη της δεκαετίας του 1990 όταν εμφανιστήκαν τα κινητά 2ης γενιάς αυξήθηκε δραματικά η πληθυσμιακή κάλυψη καθώς τα κινητά άρχισαν να γίνονται ολοένα και πιο δημοφιλή. Το Wifi και τα υπόλοιπα πρωτόκολλα επικοινωνίας βοήθησαν στην κάλυψη σχεδόν όλου του πλανήτη με ραδιοσυχνότητες.^[42]

Ένα σύστημα συλλογής ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων (RF) επιτρέπει στα WSNs με περιορισμένη ενέργεια να συλλέγουν ενέργεια από τα ραδιοσήματα για την εκτέλεση των λειτουργιών τους. Είναι ένας συνδυασμός αντιστοίχισης σύνθετης αντίστασης, ανορθωτή και μετατροπέα DC-DC και έχει σχεδιαστεί για να συλλέγει ραδιοσήματα και να τα μετατρέπει σε αντίστοιχο ηλεκτρικό ισοδύναμο με μέγιστη απόδοση. Η χρήση της δίοδος Schottky στον ανορθωτή μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα της μετατροπής ισχύος. Η μετάδοση δεδομένων, η οποία είναι η διαδικασία που καταναλώνει περισσότερη ενέργεια, δεν πραγματοποιείται συνεχώς. Ως εκ τούτου, η αξιοποιημένη ενέργεια αποθηκεύεται κατά τις περιόδους χωρίς μετάδοση δεδομένων.^[36]

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα τυπικό σύστημα μετατροπής ραδιοσυχνοτήτων σε ενέργεια.^[43]



Εικόνα 3.5 RF Harvester circuit

Οι προκλήσεις στον χώρο των γεννητριών μετατροπής ραδιοσυχνοτήτων σε ηλεκτρικό ρεύμα είναι πολύ μεγάλες καθώς η γεννήτρια πρέπει να είναι αρκετά κοντά

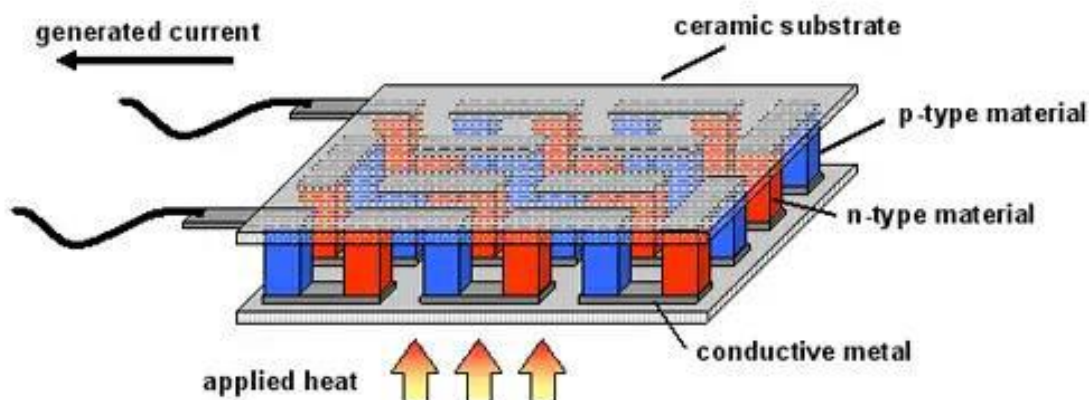
στον πομπό ώστε να μπορεί να μετατρέψει ικανοποιητικό ποσοστό της εκπεμπόμενης ισχύος σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα από τα προβλήματα που εμφανίζονται κατά τη σχεδίαση της εφαρμογής είναι η επιλογή της μπάντας συχνοτήτων που θα χρησιμοποιηθεί. Επίσης, η εκπεμπόμενη ενέργεια ραδιοσυχνοτήτων μπορεί να είναι αρκετή, αλλά στην παρούσα τεχνολογική στάθμη, η συνολική απόδοση είναι πολύ χαμηλότερη από οποιαδήποτε άλλη πηγή. Σε εφαρμογές εκτός αστικού περιβάλλοντος, το ενεργειακό περιεχόμενο από τις ραδιοσυχνότητες είναι πολύ μικρό. Στο μέλλον, όταν η κατανάλωση ενός τυπικού κόμβου IoT μειωθεί περαιτέρω, τότε πιθανότατα ο τομέας αυτός να γνωρίσει μεγαλύτερη άνθηση.^[1]

3.4. Συλλογή Θερμικής ενέργειας

Για την μετατροπή ενέργεια με τη χρήση της θερμικής ενέργειας σε ρεύμα χρησιμοποιούνται κάποιες συσκευές που ονομάζονται γεννήτριες Seebeck. Οι συσκευές αυτές εκμεταλλεύονται το φαινόμενο Seebeck. Οι συσκευές αυτές είναι κατασκευασμένες με ημιαγωγούς τύπου P και N συνδεδεμένοι σε σειρά μεταξύ τους. Η ενέργεια που παράγεται από αυτές εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας στις δύο επιφάνειες της συσκευής (ζεστή και ψυχρή πλευρά.)

Για την μετατροπή της θερμότητας σε ρεύμα υπάρχουν δύο διαδικασίες:

- Θερμοϊονική
ή Thermotunneling όπως είναι αλλιώς γνωστή αυτή η διαδικασία, στην οποία ηλεκτρόνια εκτοξεύονται από ένα ζεστό ηλεκτρόδιο προς ένα κρύο.
- Θερμοηλεκτρική
Η θερμοηλεκτρική ιδιότητα είναι μια ιδιότητα κάποιων υλικών, η οποία τους επιτρέπει να μετατρέπουν την ροή θερμότητας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Η μετατροπή αυτή γίνεται εκμεταλλεύοντας το φαινόμενο Seebeck που προαναφέραμε. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε από τον Γερμανό φυσικό Thomas Johann Seebeck το 1821, από όπου πήρε και την ονομασία του. Ο Γερμανός φυσικός παρατήρησε ότι όταν υπάρχει ροή θερμότητας από τη θερμή περιοχή προς την ψυχρή μεταξύ δύο ανόμοιων ηλεκτρικών ημιαγωγών, δημιουργείται διαφορά δυναμικού.



Εικόνα 3.6 Αρχιτεκτονική θερμοηλεκτρικής γεννήτριας

Το 1834 ο Γάλλος φυσικός Jean Charles Athanase Peltier ανακάλυψε το αντίστροφο φαινόμενο. Τροφοδοτώντας με ρεύμα μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια, δημιουργεί διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο επιφανειών της.

Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια κατασκευάζεται από ζευγάρια p και n ημιαγωγών τοποθετημένα σε σειρά. Το ρεύμα που παράγεται εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας στα δύο επίπεδα της γεννήτριας. Ορίζοντας ως T_h τη θερμοκρασία στην ζεστή πλευρά του TEG και T_c τη θερμοκρασία στην αντίστοιχη κρύα και $\alpha_p(T)$ και $\alpha_n(T)$ τους συντελεστές Seebeck των στοιχείων p και n του θερμοστοιχείου, το ρεύμα που παράγεται ορίζεται από τις εξισώσεις 1-3:

$$I = U_o / (R_l + R_g) \quad (1)$$

Όπου U_o η τάση (ανοιχτοκύκλωσης) στα άκρα του θερμοηλεκτρικού στοιχείου, R_l η αντίσταση του φορτίου και R_g η αντίσταση του θερμοηλεκτρικού στοιχείου. Η τάση στα άκρα του TEG ορίζεται από τον τύπο:

$$U_o = \int_{T_c}^{T_h} \alpha(T) dT \quad (2)$$

$$\alpha(T) = \alpha_p(T) - \alpha_n(T) \quad (3)$$

Από τους παραπάνω τύπους προκύπτει η ισχύς εξόδου ως:

$$P_{out} = U_o^2 / R_l \quad (4)$$

Η τάση που παράγεται από ένα θερμοηλεκτρικό στοιχείο είναι αρκετά μικρή γι' αυτό πολλές φορές τοποθετούνται περισσότερα του ενός σε σειρά. Η διάρκεια ζωής ενός τέτοιου στοιχείου είναι πολύ μεγάλη ξεπερνώντας τις 100.000 ώρες. Το πρόβλημα ωστόσο είναι η εύρεση περιβάλλοντος με συνεχή θερμοκρασιακή διαφορά, ώστε να δημιουργείται ροή θερμότητας προκειμένου να παραχθεί ενέργεια. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι συσκευές με πολύ χαμηλή θερμική αντίσταση, συνεπώς λειτουργούν ως «γέφυρες θερμότητας» ανάμεσα στην ζεστή και την κρύα πλευρά. Βασικό πρόβλημα των θερμοηλεκτρικών στοιχείων είναι η πολύ χαμηλή απόδοση μετατροπής (της τάξης του 1-5%).^{[43][44]}

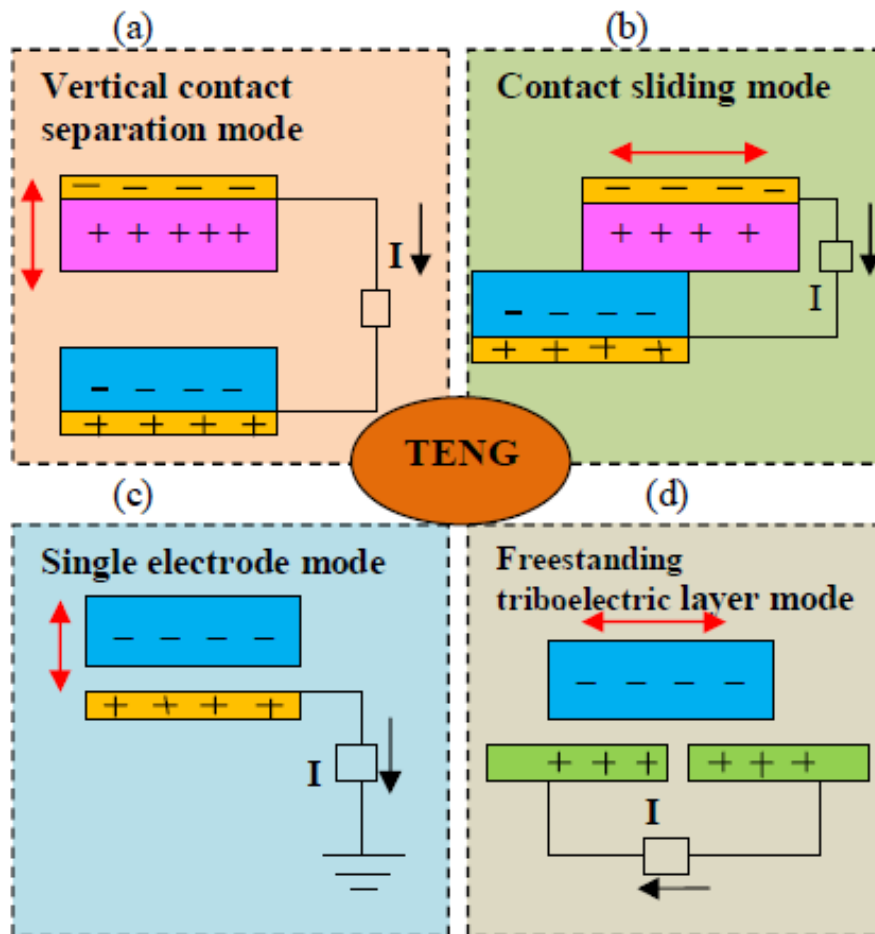
3.5. Μηχανική (Τριβή/Δονήσεις)

Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερη ανάπτυξη έχουν λάβει οι μικρογεννήτριες οι οποίες μετατρέπουν τις δονήσεις και την τριβή μεταξύ δύο διαφορετικών υλικών σε ηλεκτρικό ρεύμα. Τόσο στην κατηγορία των δονήσεων όσο και αυτή της τριβής γίνονται διαρκώς έρευνες και όλο και περισσότεροι ερευνητές ασχολούνται για την βελτίωση της απόδοσης των μικρογεννητριών αυτών. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τάση που παράγεται από μια τέτοια μικρογεννήτρια έχει μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με κάποια άλλη μορφή ενέργειας, αλλά το ρεύμα είναι πολύ μικρό.^[1]

ο Τριβή

Τριβοηλεκτρικό ονομάζεται το φαινόμενο που μελετά την μελετάει την παραγωγή ρεύματος από την τριβή δύο ανόμοιων υλικών. Η τριβή μεταξύ των υλικών αυτών δημιουργεί ένα χημικό δεσμό ο οποίος ονομάζεται προσκόλληση. Κατά τη διάρκεια του φαινομένου αυτού τα ηλεκτρόνια

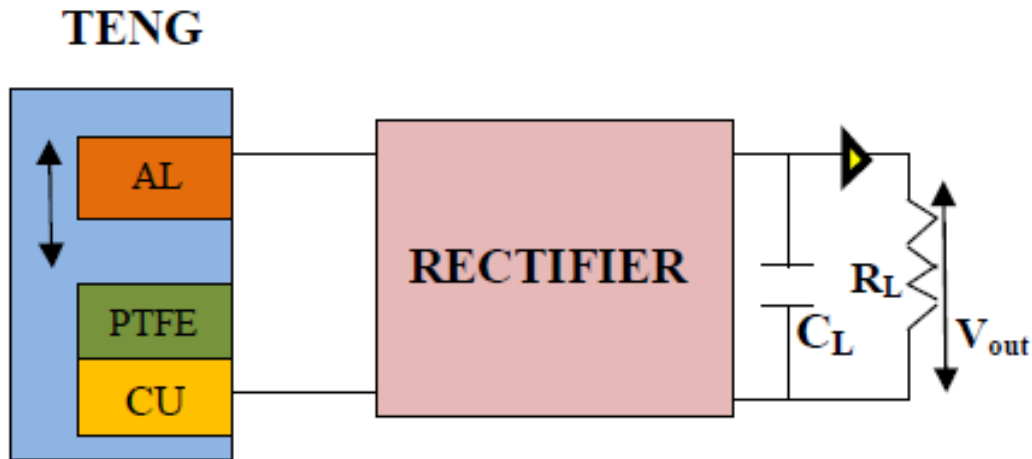
αρχίζουν να κινούνται από το ένα υλικό προς το άλλο δημιουργώντας έτσι ηλεκτρικό φορτίο. Ορισμένα υλικά όπως το μαλλί, ο άργυρος και το αλουμίνιο έχουν θετικό φορτίο και έχουν την τάση να χάνουν ηλεκτρόνια όταν τρίβονται με κάποιο άλλο υλικό. Από την άλλη, υλικά όπως το Teflon (PTFE), PVC, Πολυαιθυλένιο έχουν αρνητικό φορτίο και έχουν την τάση να λαμβάνουν ηλεκτρόνια. Η τριβή μεταξύ των δύο υλικών μπορεί να γίνει με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους. Οι τρόποι αυτοί φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.^{[45][46]}



Εικόνα 3.7 Τρόποι παραγωγής ενέργειας μέσω τριβής

- Στην πάνω αριστερά εικόνα φαίνεται η πιο απλή από τις μεθόδους. Τοποθετώντας δύο υλικά από τα προαναφερθέντα, ένα με θετικό και ένα με αρνητικό φορτίο, το ένα πάνω από το άλλο αφήνοντας ένα μικρό κενό αέρα ανάμεσά τους. Όταν στο σύστημα εφαρμοστεί εξωτερική μηχανική ενέργεια τότε δημιουργείται στην επιφάνεια ηλεκτροστατικό φορτίο. Όταν η κίνηση είναι συνεχόμενη έχουμε την παραγωγή συνεχούς φορτίου.
- Στην πάνω δεξιά εικόνα φαίνεται ένας από τους πιο γνωστούς τρόπους παραγωγής ηλεκτροστατικού φορτίου. Η παράλληλη τριβή δύο ανόμοιων υλικών μεταξύ τους. Όταν τα δύο υλικά τρίβονται μεταξύ τους, τότε υπάρχει ροή ρεύματος στο κύκλωμα.

- c) Στην κάτω δεξιά εικόνα φαίνεται η μέθοδος κατά την οποία το ένα από τα δύο υλικά παραμένει σταθερό ενώ το άλλο μετακινείται παράλληλα δημιουργώντας ηλεκτρικό φορτίο.
- d) Στην μέθοδο της κάτω δεξιά εικόνας το διηλεκτρικό υλικό είναι ελεύθερο χωρίς να ακουμπάει τα ηλεκτρόδια. Η κίνηση του δημιουργεί ασύμμετρο φορτίο το οποίο ρέει στο κύκλωμα.



Εικόνα 3.8 Σχηματικό κυκλώματος τριβοηλεκτρικής γεννήτριας.

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το σχηματικό μια τριβογεννητριάς. Πάνω στη γεννήτρια συνδέουμε έναν ανορθωτή για να μετατρέψουμε και να εξομαλύνουμε το ρεύμα πριν αυτό ρεύσει στο κύκλωμα μας. Η αντίσταση R_L προσομοιώνει το φορτίο.^[46]

ο Δονήσεις (Πιεζοηλεκτρισμός)

Εκτός από τη τριβή, μηχανική ενέργεια σε μορφή κίνησης, δονήσεων ακόμα και ήχου μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρικό φορτίο. Τα πιεζοηλεκτρικά συστήματα εκμεταλλεύονται το νόμο το Faraday ο οποίος αναφέρει ότι “όταν μεταβάλλεται το μαγνητικό πεδίο γύρω από ένα πηνίο ή καλώδιο, τότε δημιουργείται ηλεκτρικό φορτίο”.

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, που ανακαλύφθηκε από τ' αδέρφια Pierre και Jacques Curie, συνδυάζει ηλεκτρικές με μηχανικές ιδιότητες των υλικών και αντίστροφα. Για παράδειγμα, αν πιεζοηλεκτρικά υλικά (π.χ. χαλαζίας, τουρμαλίνης) υπόκεινται σε ηλεκτρικές διεγέρσεις κατά μήκος συγκεκριμένων κρυσταλλικών προσανατολισμών, τότε εμφανίζονται, κατά μήκος καλώς ορισμένων κρυσταλλικών προσανατολισμών, μηχανικές παραμορφώσεις. Αντίθετα, μια μηχανική παραμόρφωση του υλικού προκαλεί τη δημιουργία ηλεκτρικών φορτίων πόλωσης. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο εμφανίζεται τόσο σε μονοκρυσταλλικά όσο και σε πολυκρυσταλλικά υλικά. Στις μέρες μας, τα υλικά με πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες απέκτησαν τεράστια

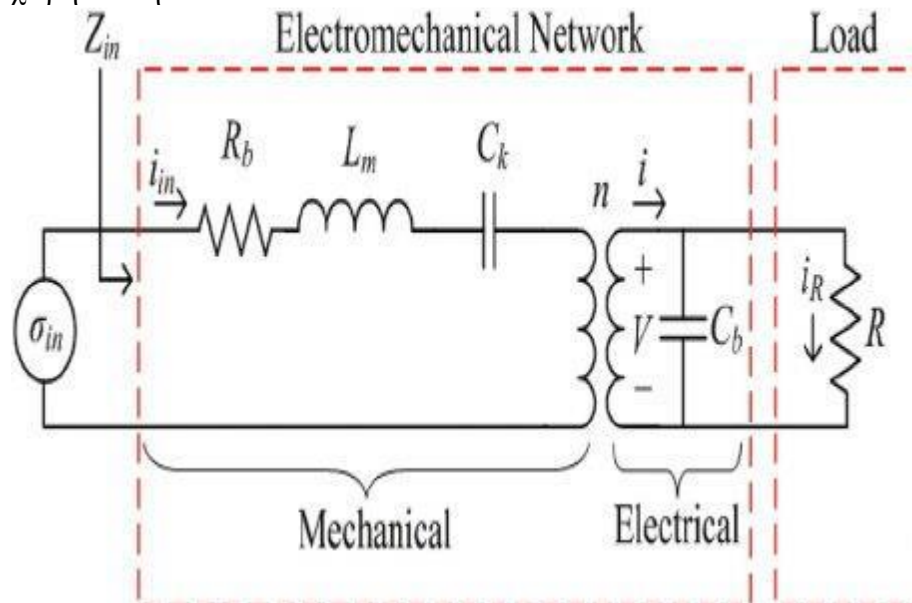
τεχνική σημασία ως λειτουργικά υλικά. Τα πολυκρυσταλλικά κεραμικά, όπως είναι το BaTiO₃ και η PZT, είναι πιεζοηλεκτρικά υλικά με ευρεία χρήση εξαιτίας του χαμηλού κόστους κατασκευής και των σχεδόν αυθαίρετων δυνατών σχημάτων που μπορούν να πάρουν, σε σύγκριση με τα μονοκρυσταλλικά πιεζοηλεκτρικά υλικά. Επιπλέον, τα συγκεκριμένα υλικά παρουσιάζουν εξαιρετικές πιεζοηλεκτρικές και διηλεκτρικές ιδιότητες, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμα στο πεδίο των πιεζοηλεκτρικών διεγερτών.^[47]

Όπως και στην περίπτωση της τριβής, η γεννήτρια αποτελείται από δύο υλικά τα οποία έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες. Τα υλικά αυτά όταν είναι σε κατάσταση ηρεμίας, τα ηλεκτρόνια τους είναι οργανωμένα. Όταν εφαρμοστεί εξωτερική δύναμη στα υλικά αυτά τα ηλεκτρόνια τους αναδιατάσσονται στο χώρο δημιουργώντας ηλεκτρικό φορτίο.

Σε ένα τέτοιο σύστημα η ενέργεια που συγκομιδείται μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$E = 1/(2 * Q * V) = Q^2 / (2 * C)$$

Όπου Q είναι το φορτίο στα άκρα των υλικών, V είναι η τάση και C η χωρητικότητα.^[48-50]



Εικόνα 3.9 Σχηματικό τυπικής πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας

Όπως και στην τριβογεννήτρια, είναι απαραίτητη η χρήση ανορθωτή για την μετατροπή του σήματος πριν το συνδέσουμε στην κύκλωμα.

Οι δυνατότητες του πιεζοηλεκτρισμού δεν έχουν φτάσει σε τελικό στάδιο.

Ακόμα γίνονται έρευνες για το πώς μπορεί να αυξηθεί η απόδοση του πιεζοηλεκτρισμού έτσι ώστε να μπορεί να ενταχθεί και στο αστικό περιβάλλον αλλά και στην κατοικία.

Αν και η χρήση του δεν είναι ευρέως διαδεδομένη, υπάρχουν παραδείγματα εφαρμογής του^[51]:

- Στο Ισραήλ γίνεται έρευνα έτσι ώστε τοποθετώντας πλάκες πιεζοηλεκτρισμού κάτω από το οδόστρωμα να μπορούν να μετατρέπουν σε ηλεκτρισμό την ενέργεια από τα διερχόμενα αυτοκίνητα, τα οποία

πιέζουν τις πλάκες. Ήδη έχουν τοποθετηθεί σε τμήμα δρόμου του Ισραήλ το οποίο πρόκειται να επεκταθεί σε μήκος ενός χιλιομέτρου και θα παράγουν περίπου 200 κιλοβατώρες για κάθε λωρίδα κυκλοφορίας.

- Μια ακόμα εφαρμογή υπάρχει σε μια αλυσίδα σουπερ μάρκετ στην Βρετανία όπου έχουν τοποθετήσει μια εγκατάσταση στην είσοδο του. Έχουν ενσωματώσει στο έδαφος τις πλάκες, πάνω από τις οποίες περνούν τα οχήματα, πιέζοντάς τις. Η πίεση αυτή ενεργοποιεί ένα υπόγειο υδραυλικό σύστημα το οποίο με τη σειρά του ενεργοποιεί τους ηλεκτροκινητήρες που βρίσκονται ακριβώς από κάτω, παράγοντας τελικά γύρω στα 30 kW/ώρα. Με αυτό λειτουργούν οι ταμιακές μηχανές του.
- Αρκετή ενέργεια δαπανάται στη σύγχρονη εποχή για τη θέρμανση του νερού. Για τον λόγο αυτό, ομάδα επιστημόνων και σχεδιαστών από το Μεξικό, τη Φινλανδία και τη Γερμανία ανέπτυξαν το «πιεζο-ντουζ», όπου είναι τοποθετημένα πιεζοηλεκτρικά υλικά τα οποία παράγουν ηλεκτρισμό από το τρεχούμενο νερό που πέφτει πάνω τους.

Συγκεντρωτικός πίνακας

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι αποδόσεις διαφόρων πηγών ενέργειας.

Πηγή ενέργειας	Διαθέσιμη ενέργεια	Ενέργεια που εξορύχθηκε	Απόδοση
Ηλιακό φως (εξωτερικός χώρος)	100mW/cm ²	15mW/cm ²	15%
Ηλιακό φως (εσωτερικός χώρος)	0.1mW/cm ²	10μW/cm ²	10%
Άνεμος	177mW/cm ²	1200mWh/day	
Θερμική (ανθρώπινο δέρμα)	20mW/cm ²	30μW/cm ²	0.6%
Θερμική (βιομηχανικό περιβάλλον)	100mW/cm ²	1-10mW/cm ²	<10%
Δονήσεις (ανθρωπογενής)		4μW/cm ²	
Δονήσεις (Βιομηχανικό περιβάλλον)		100mW/cm ²	
RF (GSM)		0.3mW/cm ²	
RF (Wi-Fi)		0.15mW/cm ²	
RF(AM)		2mW/cm ²	

Κίνηση δακτύλου	19mW	2.1mW	11%
Περπάτημα	67W	5W	7.5%

Πίνακας 3.1 Απόδοση πηγών μικροενέργειας.

Στον παρακάτω πίνακα γίνεται αναφορά σε πηγές ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα με χαμηλές απαιτήσεις και στα χαρακτηριστικά τους.

Πηγή ενέργειας	Χαρακτηριστικά	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ηλιακή	Άφθονο, μη ελεγχόμενο, προβλέψιμο	Διαθέσιμο καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας, Υψηλή τάση εξόδου	Μη διαθέσιμο τη νύχτα, χαμηλή απόδοση όταν έχει σύννεφα
Αιολική	Μη ελεγχόμενη, προβλέψιμη	Διαθέσιμη σε ανοιχτό χώρο	Μη διαθέσιμη σε κλειστό χώρο
Δονήσεις (ανθρωπογενής)	Πλήρως ελεγχόμενη	Διαθέσιμη όταν χρειάζεται	Διαθέσιμη μόνο όταν ο άνθρωπος κινείται
Δονήσεις (Βιομηχανικό περιβάλλον)	Άφθονες, μη ελεγχόμενες, απρόβλεπτες	Δεν χρειάζεται ρεύμα εισόδου	Εύθραυστα υλικά
RF	Μερικώς ελεγχόμενη, μερικώς προβλέψιμη	Πολύ αποδοτική σε αστικές περιοχές, μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα	Μικρή απόδοση σε μη αστικές περιοχές, ραδιενεργά υλικά
Περπάτημα	Πλήρως ελεγχόμενη, μερικώς προβλέψιμη		Μεταβλητή έξοδος
Αναπνοή	Παθητική ενέργεια του ανθρώπου, μη ελεγχόμενη, μη προβλέψιμη		Διαθέσιμη πάντα
Κυκλοφορία του αίματος	Παθητική ενέργεια του ανθρώπου, Μη ελεγχόμενη		Διαθέσιμη πάντα

Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά διαφόρων πηγών μικροενέργειας.

4. Αποθήκευση Ενέργειας

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα μετά την μετατροπή ενέργειας σε ρεύμα, είναι η αποθήκευση της. Η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί με διάφορους τρόπους. Κάποιοι από αυτούς περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε μπαταρίες ή υπερπυκνωτές.

Εναλλακτικά, η ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε αέριο όπως βιοαέριο, βιομεθάνιο ή υδρογόνο και να αποθηκευτεί ως καύσιμο και όχι ως ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα αέρια καύσιμα, γνωστά και ως «ηλεκτρονικά καύσιμα» μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αποκεντρωμένες μονάδες μηχανών αερίου υψηλής απόδοσης για την παραγωγή τόσο ηλεκτρικής ενέργειας όσο και θερμότητας, στο σημείο χρήσης, συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση χρημάτων και την απαλλαγή των εγκαταστάσεων κοινής ωφελείας από εκπομπές άνθρακα.

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να παρέχουν λειτουργίες μετατόπισης χρόνου ενέργειας, αποθηκεύοντας σε περιόδους πλεονάσματος και απελευθερώνοντας σε περιόδους ελλείμματος, συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης.

Υπάρχουν πολλά πεδία εφαρμογής για τις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της παροχής υπηρεσιών υποστήριξης στο ηλεκτρικό δίκτυο ή σε μεμονωμένους καταναλωτές «πίσω από τον μετρητή». Η τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να αξιοποιηθεί με τη μορφή αυτόνομων συστημάτων ή με τη μορφή παραγωγής ενέργειας ως μέρος υβριδικών συστημάτων ή μικροδικτύων.

Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να χωριστεί σε δύο επιμέρους υποκατηγορίες. Την περιστασιακή και την μακροχρόνια. Πριν αποφασιστεί όμως η κατάλληλη μορφή, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες. Ένας από τους βασικότερους είναι το μέγεθος του ίδιου του συστήματος. Ένας άλλος είναι η δυσκολία πρόσβασης που θα έχει ο χρήστης στο σύστημα ώστε να μπορεί να αντικαταστήσει την μπαταρία και πόσο συχνά θα χρειάζεται αυτό.^[52]

4.1. Περιστασιακή

Για την περιστασιακή αποθήκευση ενέργειας χρησιμοποιούνται οι υπερπυκνωτές. Ο υπερπυκνωτής διαφέρει από έναν κανονικό πυκνωτή, καθώς έχει πολύ υψηλή χωρητικότητα. Ένας πυκνωτής αποθηκεύει ενέργεια μέσω ενός στατικού φορτίου σε αντίθεση με μια ηλεκτροχημική αντίδραση. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι η πολύ μεγάλη πυκνότητα ισχύος. Οι υπερπυκνωτές χωρίζονται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες^[1]:

- 1) Ηλεκτροχημικοί ψευδοπυκνωτές
Οι πυκνωτές της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν την μεγαλύτερη πυκνότητα. Αυτό οφείλεται στη χρήση ηλεκτροδίων μεταλλικού οξειδίου ή άλλου αγωγίμου πολυμερούς με μεγάλη ψευδοχωρητικότητα επιπλέον της χωρητικότητας του διπλού στρώματος. Η ψευδοχωρητικότητα επιτυγχάνεται με την μεταφορά ηλεκτρονίων Faradaic με αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, παρεμβολών ή ηλεκτροδιάτρησης.
- 2) Ηλεκτροστατικοί πυκνωτές διπλής στρώσης (EDLC)
Οι ηλεκτροστατικοί πυκνωτές διπλής στρώσης λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο που λειτουργούν και οι κανονικοί πυκνωτές. Η αποθήκευση της ενέργειας γίνεται με χημική αντίδραση, διαχωρίζοντας το φορτίο. Μπορούμε να

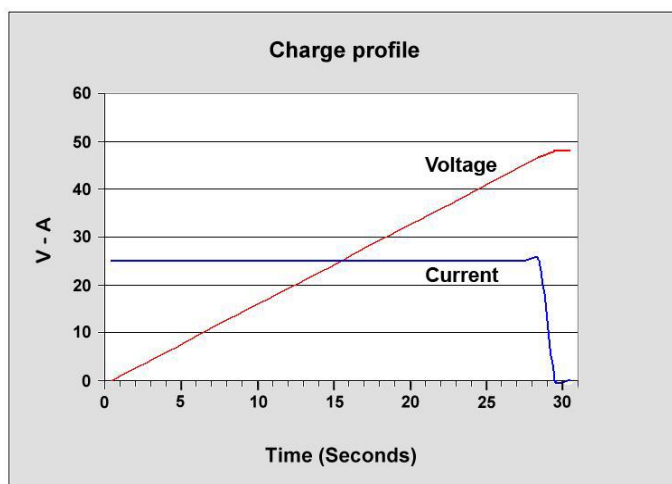
υπολογίσουμε το φορτίο του λοιπόν με τη χρήση του τύπου $C = \frac{Q}{V}$, όπου C είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή, Q είναι το φορτίο και V η τάση.

3) Υβριδικοί πυκνωτές

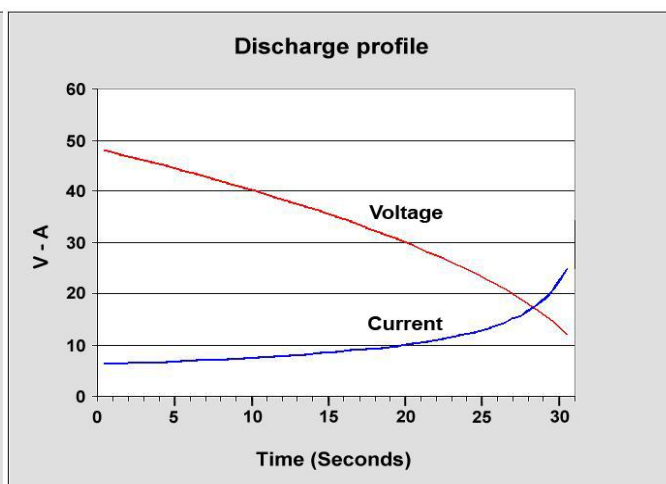
Τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί πυκνωτές που παρουσιάζουν υβριδικές ιδιότητες. Ο πυκνωτής ιόντων για παράδειγμα, χρησιμοποιεί ηλεκτρόδια με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Το ένα εμφανίζει ηλεκτροστατική χωρητικότητα και το άλλο ηλεκτροχημικό δυναμικό.

Μερικά από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά ενός υπερπυκνωτή είναι:

- Χωρητικότητα
Η χωρητικότητα ενός υπερπυκνωτή είναι ίσως και το βασικό από τα χαρακτηριστικά του. Ισοδυναμεί με την αναλογία του ηλεκτρικού φορτίου ως προς τη διαφορά δυναμικού.
- Τάση λειτουργίας
Η τιμή αυτή ισοδυναμεί με το εύρος τάσεων που μπορεί να λειτουργήσει σωστά ένας πυκνωτής.
- Εσωτερική Αντίσταση
Η εσωτερική αντίσταση δείχνει το χρόνο που χρειάζεται ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής για να φορτίσει. Όσο μικρότερη τόσο το καλύτερο.
- Ρεύμα φορτίου
Το ρεύμα φορτίου σε έναν υπερπυκνωτή είναι η τιμή του μέγιστου στιγμιαίου φορτίου που μπορεί να εκφορτιστεί από αυτόν. Το ρεύμα αυτό μπορεί να είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό της μπαταρίας.
- Ενεργειακή χωρητικότητα
Οι υπερπυκνωτές δημιουργήθηκαν με σκοπό να γεφυρώσουν το κενό μεταξύ πυκνωτών και μπαταριών. Η ενεργειακή χωρητικότητα μας δείχνει την ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί μέσα σε αυτόν.
- Διάρκεια ζωής
Ένα επίσης βασικό χαρακτηριστικό των πυκνωτών έναντι των μπαταριών είναι η διάρκεια ζωής. Ένας υπερπυκνωτής μπορεί να αντέξει έως και 15 χρόνια λειτουργώντας σε θερμοκρασία δωματίου.
- Ρεύμα διάρροής
Το ρεύμα διαρροής ισοδυναμεί με τη διαρροή ενέργειας ενός υπερπυκνωτή όταν αυτός είναι σε κατάσταση αποθήκευσης.



Εικόνα 4.1 Προφίλ φόρτισης ενός υπερπυκνωτή.



Εικόνα 4.2 Προφίλ εκφόρτισης ενός υπερπυκνωτή.

4.2. Μακροχρόνια

Για την πιο αποθήκευση ηλεκτρικού ρεύματος για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα χρησιμοποιούμε τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές ή μπαταρίες. Οι μπαταρίες είναι συσκευές οι οποίες αποθηκεύουν την ενέργεια σε χημική μορφή και την αποδιδουν σε ηλεκτρικό ρεύμα. Η μπαταρία αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια που απομονώνονται από ένα διαχωριστικό και εμποτίζονται σε ηλεκτρολύτη για την προώθηση της κίνησης των ιόντων. Κατά τη φόρτιση, δημιουργείται μια συσσώρευση θετικών ιόντων στη διεπαφή καθόδου / ηλεκτρολύτη. Αυτό οδηγεί τα ηλεκτρόνια να κινούνται προς την κάθοδο, δημιουργώντας δυναμικό τάσης μεταξύ της καθόδου και της ανόδου. Η απελευθέρωση γίνεται με ένα ρεύμα από τη θετική κάθοδο μέσω ενός εξωτερικού φορτίου και πίσω στην αρνητική άνοδο. Με φορτίο, το ρεύμα ρέει προς την άλλη κατεύθυνση.

Δοκιμάζονται νέα ενεργά υλικά, το καθένα από τα οποία προσφέρει μοναδικά χαρακτηριστικά, αλλά κανένα δεν παρέχει μια απόλυτη λύση.

Η έρευνα μπαταριών προχωρά με ταχείς ρυθμούς, γεγονός που αποτελεί σαφή ένδειξη ότι η “Super Battery” δεν έχει βρεθεί ακόμα, αλλά μπορεί να βρίσκεται προ των πυλών. Ενώ οι σημερινές μπαταρίες ικανοποιούν τις περισσότερες φορητές εφαρμογές, οι βελτιώσεις απαιτούνται εάν αυτή η πηγή δύναμης πρόκειται να γίνει ένας σοβαρός υποψήφιος για εφαρμογές όπως τα ηλεκτρικά οχήματα. Παρακάτω ακολουθούν μερικά πολύ χαρακτηριστικά στην εποχή μας παραδείγματα χρήσης ηλεκτρικών συσσωρευτών^[53]:

- Στα αεροπλάνα χρησιμοποιούνται πολύ οι αλκαλικοί ηλεκτρικοί συσσωρευτές αργύρου - ψευδαργύρου και αργύρου-καδμίου. Τα πλεονεκτήματά τους είναι η μεγάλη ειδική ενέργεια και η ικανότητα να λειτουργούν σε ερμητικά κιβώτια και σε ύψος (με χαμηλή θερμοκρασία και πίεση). Το μειονέκτημά τους είναι ότι έχουν κόστος 4-10 φορές μεγαλύτερο από τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές μολύβδου-οξέος. Οι αλκαλικοί ηλεκτρικοί συσσωρευτές χρησιμοποιούνται επίσης, σε όργανα βαρηκοΐας κ.α.

- Στα αυτοκίνητα ο συσσωρευτής χρησιμεύει για την εναποθήκευση του ηλεκτρικού ρεύματος που προέρχεται από τη δυναμομηχανή (δυναμό) και τη διανομή του στη συνέχεια στις διάφορες συσκευές της ηλεκτρικής εγκατάστασης του οχήματος. Μεταξύ του δυναμό και του συσσωρευτή παρεμβάλλεται αυτόματος διακόπτης, ο οποίος παρεμποδίζει την εκφόρτιση του συσσωρευτή προς το δυναμό όταν ο κινητήρας εργάζεται στο ρελαντί ή δεν εργάζεται.
- Στην αστροναυτική οι συσσωρευτές τεχνητών δορυφόρων, πρέπει να έχουν μεγάλη χωρητικότητα, μικρό βάρος, αντοχή στις επιταχύνσεις και τους κλυδωνισμούς. Τις καλύτερες προϋποθέσεις προς αυτή την κατεύθυνση συγκεντρώνουν οι αλκαλικοί συσσωρευτές νικελίου-καδμίου ή αργύρου-ψευδάργυρου. Οι πρώτοι έχουν ως θετικό ηλεκτρόδιο πλάκες από νίκελ και αρνητικό πλάκες καδμίου και σιδήρου. Οι δεύτεροι ως θετικό ηλεκτρόδιο έχουν άργυρο σε σκόνη και ως αρνητικό ψευδάργυρο. Η ανάγκη εφοδιασμού των διαστημικών σκαφών με πηγές ενέργειας με μεγαλύτερη διάρκεια και ελαφρότερες λύθηκε με τα ηλιοκύτταρα.

Υπάρχουν πολλά και διαφορετικά είδη μπαταριών, με τις πιο συνηθισμένες να ανήκουν στις εξής κατηγορίες: **πρωτεύοντες** και **δευτερεύοντες**.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα μελετήσουμε τις μπαταρίες αναλυτικά μέσω των τεχνολογιών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή τους στο παρελθόν, στο παρόν αλλά και τεχνολογιών που βρίσκονται υπό ανάπτυξη για πιθανή μελλοντική χρήση.

4.3. Σύγκριση μεταξύ περιστασιακής και μακροχρόνιας.

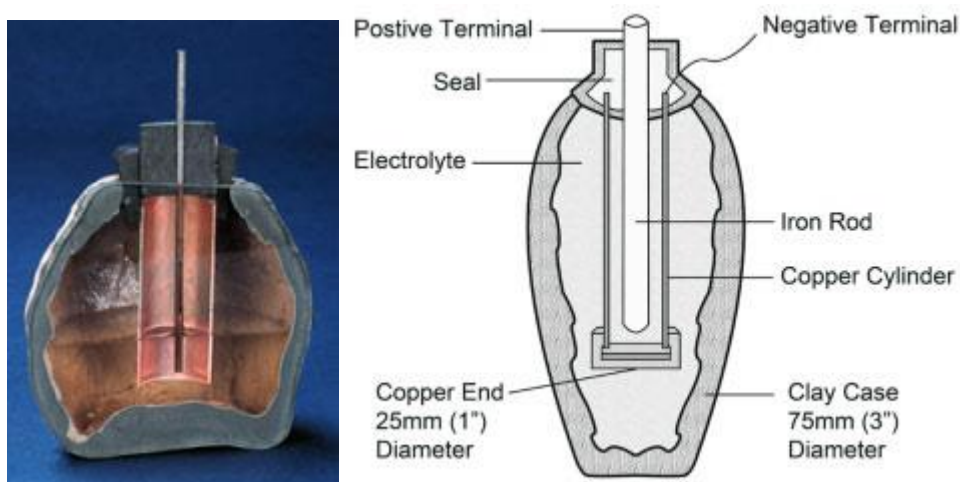
Η σύγκριση του υπερπυκνωτή με μια μπαταρία έχει αξία, αλλά η εξάρτηση από ομοιότητες αποτρέπει μια βαθύτερη κατανόηση των δύο αυτών ξεχωριστών συσκευών. Εδώ είναι οι βασικές διαφορές μεταξύ της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή^[54]:

- Η χημεία μιας μπαταρίας καθορίζει την τάση λειτουργίας. Η φόρτιση και η εκφόρτιση είναι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Συγκριτικά, ο πυκνωτής δεν είναι ηλεκτροχημικός και η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση καθορίζεται από τον τύπο του διηλεκτρικού υλικού που χρησιμοποιείται ως διαχωριστής μεταξύ των πλακών. Η παρουσία ηλεκτρολύτη σε ορισμένους πυκνωτές αυξάνει την χωρητικότητα και αυτό μπορεί να προκαλέσει σύγχυση.
- Επειδή ο υπερπυκνωτής είναι μη χημικό, η τάση είναι ελεύθερη να αυξηθεί έως ότου αποτύχει το διηλεκτρικό. Αυτό είναι συχνά με τη μορφή βραχυκυκλώματος. Αποφύγετε την υψηλότερη από την καθορισμένη τάση.

5. Τεχνολογίες μπαταριών.

5.1. Ιστορική αναδρομή

Μια από τις πιο αξιοσημείωτες και νέες ανακαλύψεις τα τελευταία 400 χρόνια ήταν ο ηλεκτρισμός. Παρότι ο ηλεκτρισμός υπήρχε πάντα στην φύση, η πρακτική του χρήση είναι στη διάθεσή μας μόνο από τα μέσα έως τα τέλη του 1800 και στην αρχή με περιορισμένο τρόπο. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις όπου η χρήση του ηλεκτρισμού χρονολογείται πολύ νωρίτερα. Κατά την κατασκευή ενός σιδηροδρόμου το 1936 κοντά στη Βαγδάτη, οι εργαζόμενοι αποκάλυψαν αυτό που φάνηκε να είναι μια προϊστορική μπαταρία, επίσης γνωστή ως Parthian Battery. Το αντικείμενο χρονολογείται από την Παρθική αυτοκρατορία και πιστεύεται ότι είναι 2.000 ετών. Η μπαταρία αποτελείται από ένα πήλινο δοχείο γεμισμένο με διάλυμα ξιδιού στο οποίο εισήχθη μια ράβδος σιδήρου που περιβάλλεται από έναν χαλκό κύλινδρο. Αυτή η συσκευή παρήγαγε 1,1 έως 2,0 βολτ ηλεκτρικής ενέργειας.^[55]



Εικόνα 5.1 Parthian Battery.

Δεν δέχονται όλοι οι επιστήμονες όμως την μπαταρία Parthian ως πηγή ενέργειας. Είναι πιθανό ότι η συσκευή χρησιμοποιήθηκε για ηλεκτρολυτική επικάλυψη, προσθέτοντας ένα στρώμα χρυσού ή άλλων πολύτιμων μετάλλων σε μια επιφάνεια. Οι Αιγύπτιοι λέγεται ότι είχαν επιμεταλλωμένο αντιμόνιο σε χαλκό πριν από 4.300 χρόνια. Αρχαιολογικά στοιχεία δείχνουν ότι οι Βαβυλώνιοι ήταν οι πρώτοι που ανακάλυψαν και χρησιμοποίησαν μια γαλβανική τεχνική στην κατασκευή κοσμημάτων χρησιμοποιώντας έναν ηλεκτρολύτη βασισμένο σε χυμό σταφυλιού σε χρυσό. Οι Παρθίοι, που κυβέρνησαν τη Βαγδάτη (περίπου 250 π.Χ.), μπορεί να έχουν χρησιμοποιήσει μπαταρίες για να επιμεταλλώσουν το ασήμι.

Μια από τις πρώτες μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη σύγχρονη εποχή ήταν με τη δημιουργία στατικού φορτίου. Το 1660, ο Otto von Guericke κατασκεύασε μια ηλεκτρική μηχανή χρησιμοποιώντας μια μεγάλη σφαίρα θείου, η οποία, όταν τρίβεται και περιστρέφεται, προσέλκυσε φτερά και μικρά κομμάτια χαρτιού. Ο Guericke μπόρεσε να αποδείξει ότι οι σπινθήρες που παράγονται είχαν ηλεκτρικό χαρακτήρα.

Το 1744, ο Ewald Georg von Kleist ανέπτυξε το βάζο Leyden που αποθηκεύει

στατικό φορτίο σε ένα γυάλινο βάζο που ήταν επενδεδυμένο με μεταλλικό φύλλο στο εσωτερικό και το εξωτερικό του δοχείου. Πολλοί επιστήμονες, συμπεριλαμβανομένου του Peter van Musschenbroek, καθηγητή στο Leiden της Ολλανδίας, πίστευαν ότι η ηλεκτρική ενέργεια μοιάζει με ένα υγρό που θα μπορούσε να συλληφθεί σε ένα μπουκάλι. Δεν ήξεραν ότι τα δύο μεταλλικά φύλλα σχηματίζουν έναν πυκνωτή. Όταν φορτίστηκε με υψηλή τάση, το βάζο Leyden έδωσε στους κυρίους ένα ανεξήγητο και βαρύ σοκ όταν άγγιζαν το μεταλλικό φύλλο. ^[55]

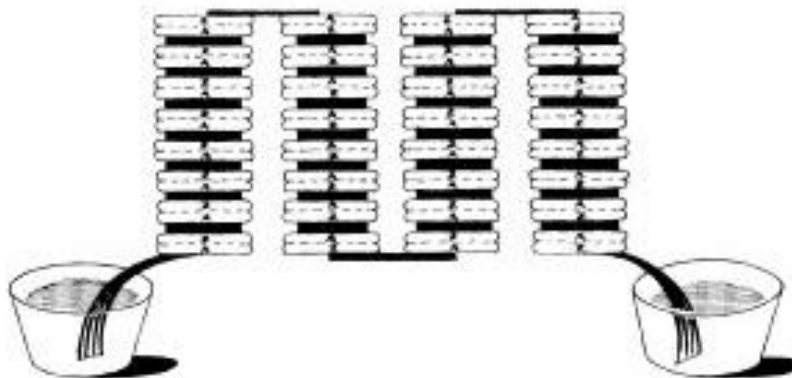
Η πρώτη πρακτική χρήση του στατικού ηλεκτρισμού ήταν το «ηλεκτρικό πιστόλι» που εφευρέθηκε ο Alessandro Volta (1745–1827). Ο Volta σκέφτηκε ότι θα μπορούσε να παρέχει επικοινωνία μεταξύ μεγάλων αποστάσεων, μόνο με ένα Boolean bit. Ένα σιδερένιο σύρμα που στηρίζεται από ξύλινους στύλους έπρεπε να κρεμαστεί από το Κόμο στο Μιλάνο της Ιταλίας. Στο άκρο λήψης, το σύρμα θα τερματίζει σε ένα βάζο γεμάτο με αέριο μεθάνιο. Για να σηματοδοτήσει ένα κωδικοποιημένο συμβάν, ένας ηλεκτρικός σπινθήρας θα σταλεί μέσω καλωδίου για να πυροδοτήσει το βάζο. Αυτός ο σύνδεσμος επικοινωνίας δεν κατασκευάστηκε ποτέ.

Το 1791, ενώ εργαζόταν στο Πανεπιστήμιο της Μπολόνια, ο Luigi Galvani ανακάλυψε ότι ο μυς ενός βατράχου θα συρρικνωθεί όταν αγγίξει ένα μεταλλικό αντικείμενο. Αυτό το φαινόμενο έγινε γνωστό ως ηλεκτρική ενέργεια των ζώων. Προτρέποντας αυτά τα πειράματα, ο Volta ξεκίνησε μια σειρά πειραμάτων χρησιμοποιώντας ψευδάργυρο, μόλυβδο, κασσίτερο και σίδηρο ως θετικές πλάκες (κάθοδος), και χαλκός, ασήμι, χρυσός και γραφίτης ως αρνητικές πλάκες (άνοδος). Το ενδιαφέρον για γαλβανική ηλεκτρική ενέργεια σύντομα έγινε ευρέως διαδεδομένο.

Ο Volta ανακάλυψε το 1800 ότι ορισμένα υγρά θα δημιουργούσαν συνεχή ροή ηλεκτρικής ισχύος όταν χρησιμοποιείται ως αγωγός. Αυτή η ανακάλυψη οδήγησε στην εφεύρεση του πρώτου βολταϊκού στοιχείου, πιο κοινώς γνωστό ως *μπαταρία*. Ο Volta έμαθε περαιτέρω ότι η τάση θα αυξανόταν όταν στοιβάζονται το ένα πάνω στο άλλο. Το παράτω σχήμα απεικονίζει μια τέτοια σύνδεση σειράς. ^[55]



Εικόνα 5.2 Τα μέταλλα αργύρου (A) και ψευδάργυρου (Z) βυθίζονται σε κύπελλα γεμάτα ηλεκτρολύτη και συνδέονται σε σειρά.



Εικόνα 5.3 Τα ηλεκτρόδια ασημιού και ψευδαργύρου συνδέονται σε σειρά, διαχωρίζονται με χαρτί εμποτισμένο με ηλεκτρολύτη.

Οι Εικόνες 5.2 & 5.3 απεικονίζουν τα πειράματα του Volta με την ηλεκτρική μπαταρία το 1796.

Τα μέταλλα σε μια μπαταρία έχουν διαφορετική συγγένεια ηλεκτρονίων. Η Volta παρατήρησε ότι το δυναμικό τάσης ανόμοιων μετάλλων έγινε ισχυρότερο όσο πιο μακριά, οι αριθμοί συγγένειας μετακινήθηκαν.

Ο πρώτος αριθμός στα μέταλλα που αναφέρονται παρακάτω δείχνει τη συγγένεια να προσελκύουν ηλεκτρόνια. το δεύτερο είναι η κατάσταση οξείδωσης.

Ψευδάργυρος = 1,6 / -0,76 V

Μόλυβδος = 1,9 / -0,13 V

Κασσίτερος = 1,8 / -1,07 V

Σίδηρο = 1,8 / -0,04 V

Χαλκός = 1,9 / 0,159 V

Ασημί = 1,9 / 1,98 V

Χρυσός = 2,4 / 1,83 V

Άνθρακας = 2,5 / 0,13 V

Τα μέταλλα καθορίζουν την τάση της μπαταρίας. διαχωρίστηκαν με υγρό χαρτί εμποτισμένο με αλμυρό νερό.



Εικόνα 5.4 Alessandro Volta, ο εφευρέτης της ηλεκτρικής μπαταρίας.

Την ίδια χρονιά, ο Βόλτα κυκλοφόρησε την ανακάλυψη μιας συνεχούς πηγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Βασιλική Εταιρεία του Λονδίνου. Τα πειράματα δεν περιορίζονται πλέον σε μια σύντομη εμφάνιση σπινθήρων που διήρκεσαν ένα κλάσμα του δευτερολέπτου. Ένα ατελείωτο ρεύμα ηλεκτρικού ρεύματος φάνηκε τώρα δυνατό. Η Γαλλία ήταν ένα από τα πρώτα έθνη που αναγνώρισαν επίσημα τις ανακαλύψεις της Βόλτα. Αυτό ήταν σε μια εποχή που η Γαλλία πλησίαζε το ύψος των επιστημονικών εξελίξεων. Οι νέες ιδέες καλωσορίστηκαν με ανοιχτές αγκάλες καθώς βοήθησαν στην υποστήριξη της πολιτικής ατζέντας της χώρας. Σε μια σειρά διαλέξεων, ο Βόλτα απευθύνθηκε στο Ινστιτούτο της Γαλλίας.^[55]

Το 1800, ο Sir Humphry Davy, εφευρέτης της λυχνίας ασφαλείας του ανθρακωρύχου, άρχισε να δοκιμάζει τις χημικές επιδράσεις του ηλεκτρισμού και διαπίστωσε ότι η αποσύνθεση συνέβη κατά τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσω ουσιών. Αυτή η διαδικασία ονομάστηκε αργότερα *ηλεκτρόλυση*.

Έκανε και άλλες νέες ανακαλύψεις εγκαθιστώντας τη μεγαλύτερη και ισχυρότερη ηλεκτρική μπαταρία στον κόσμο στα θησαυροφυλάκια του Royal Institution του Λονδίνου, συνδέοντας την μπαταρία με ηλεκτρόδια άνθρακα που παρήγαγε το πρώτο ηλεκτρικό φως. Οι μάρτυρες ανέφεραν ότι η λάμπα του ηφαιστειακού τόξου του παρήγαγε «την πιο λαμπρή ανυψούμενη καμάρα του φωτός που έχει δει ποτέ».



Εικόνα 5.5 Ο Davy χρησιμοποιώντας μια βολταϊκή μπαταρία πειραματίζεται με την αποσύνθεση των αλκαλίων.

Το 1802, ο William Cruickshank σχεδίασε την πρώτη ηλεκτρική μπαταρία για μαζική παραγωγή. Τακτοποίησε τετράγωνα φύλλα χαλκού με φύλλα ψευδαργύρου ίσου μεγέθους τοποθετημένα σε ένα μακρύ ορθογώνιο ξύλινο κουτί και τα συγκόλλησε μαζί. Τα αυλάκια στο κουτί κράτησαν τις μεταλλικές πλάκες στη θέση τους. Το σφραγισμένο κουτί στη συνέχεια γεμίστηκε με έναν ηλεκτρολύτη άλμης, ή αραιωμένο οξύ. Αυτό μοιάζει με την μπαταρία υγρού κυττάρου που είναι ακόμα μαζί μας σήμερα.^[55]

5.2. Βασικά μεγέθη

Οι μπαταρίες καθορίζονται από τρία κύρια χαρακτηριστικά: χημεία, τάση και ειδική ενέργεια (χωρητικότητα). Μια μπαταρία εκκίνησης παρέχει επίσης ενισχυτές ψυχρής εκκίνησης (CCA), οι οποίοι σχετίζονται με την ικανότητα παροχής υψηλού ρεύματος σε κρύες θερμοκρασίες. ^[56]

- **Χημεία**

Οι πιο κοινές χημικές μπαταρίες είναι ο μόλυβδος, το νικέλιο και το λίθιο, και κάθε σύστημα χρειάζεται έναν καθορισμένο φορτιστή. Η φόρτιση μιας μπαταρίας σε φορτιστή που έχει σχεδιαστεί για διαφορετική χημεία μπορεί να φαίνεται να λειτουργεί στην αρχή αλλά ενδέχεται να αποτύχει να τερματίσει σωστά τη φόρτιση. Παρατηρήστε τη χημεία κατά την αποστολή και απόρριψη μπαταριών καθώς κάθε χημεία έχει διαφορετική κανονιστική απαίτηση. ^[56]

- **Τάση**

Οι μπαταρίες επισημαίνονται με ονομαστική τάση. Ωστόσο, η τάση ανοιχτού κυκλώματος (OCV) σε μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία είναι 5-7% υψηλότερη. Η χημεία και ο αριθμός των κυττάρων που συνδέονται σε σειρά παρέχουν το OCV. Η τάση κλειστού κυκλώματος (CCV) είναι η τάση λειτουργίας. Πάντα συνδέετε τη σωστή ονομαστική τάση πριν συνδέσετε μια μπαταρία. ^[56]

- **Χωρητικότητα**

Η χωρητικότητα αντιπροσωπεύει συγκεκριμένη ενέργεια σε αμπέρ-ώρες (Ah). Ah είναι το ρεύμα εκφόρτισης που μπορεί να αποδώσει μια μπαταρία με την πάροδο του χρόνου. Μπορείτε να εγκαταστήσετε μια μπαταρία με υψηλότερο Ah από το καθορισμένο και να έχετε μεγαλύτερο χρόνο εκτέλεσης. Μπορείτε επίσης να χρησιμοποιήσετε ένα ελαφρώς μικρότερο πακέτο και να περιμένετε μικρότερο χρόνο εκτέλεσης. Οι φορτιστές έχουν κάποια ανοχή ως προς την βαθμολογία Ah (με την ίδια τάση και χημεία). μια μεγαλύτερη μπαταρία θα διαρκέσει απλά περισσότερο από ένα μικρότερο πακέτο, αλλά η διαφορά Ah δεν πρέπει να υπερβαίνει το 25 τοις εκατό. ^[56]

- **Ενισχυτές ψυχρής εκκίνησης (CCA)**

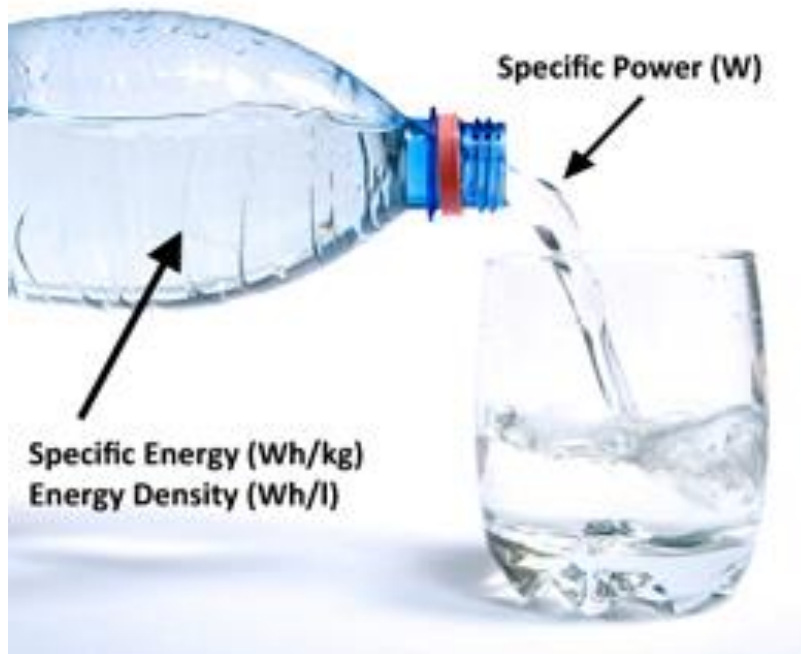
Οι αρχικές μπαταρίες, επίσης γνωστές ως SLI (ανάφλεξη φωτός εκκίνησης) επισημαίνονται με CCA. Ο αριθμός δείχνει το ρεύμα σε αμπέρ που μπορεί να αποδώσει η μπαταρία στους -18°C (0°F). Οι αμερικάνικοι και ευρωπαϊκοί κανόνες διαφέρουν ελαφρώς. ^[56]

- **Ειδική ενέργεια, ενεργειακή πυκνότητα**

Η ειδική ενέργεια, ή η βαρυμετρική ενεργειακή πυκνότητα, καθορίζει την χωρητικότητα της μπαταρίας σε βάρος (Wh/kg). Η ενεργειακή πυκνότητα, ή ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα, αντανακλά τον όγκο σε λίτρα (Wh/l). Τα προϊόντα που απαιτούν μεγάλους χρόνους εκτέλεσης με μέτριο φορτίο βελτιστοποιούνται για υψηλή ειδική ενέργεια. ^[56]

- **Ειδική ισχύς**

Η ειδική ισχύς, ή η βαρυμετρική πυκνότητα ισχύος, δείχνει την ικανότητα φόρτωσης. Οι μπαταρίες για ηλεκτρικά εργαλεία κατασκευάζονται για υψηλή ειδική ισχύ και διαθέτουν μειωμένη ειδική ενέργεια (χωρητικότητα). ^[56]



Εικόνα 5.6 Σχέση μεταξύ συγκεκριμένης ενέργειας και συγκεκριμένης ισχύος.

Το νερό στη φιάλη αντιπροσωπεύει συγκεκριμένη ενέργεια (χωρητικότητα). το στόμιο που ρίχνει το νερό διέπει συγκεκριμένη ισχύ (φόρτωση). ^[56]

Η μπαταρία AA μπορεί να έχει υψηλή ειδική ενέργεια αλλά κακή ειδική ισχύ όπως στην περίπτωση της αλκαλικής μπαταρίας, ή χαμηλή ειδική ενέργεια αλλά υψηλή ειδική ισχύ όπως ο υπερπυκνωτής. ^[56]

- **C-τιμές**

Η τιμή C καθορίζει την ταχύτητα φόρτισης ή αποφόρτισης της μπαταρίας. Στο 1C, η μπαταρία φορτίζει και αποφορτίζει με ρεύμα που είναι ισοδύναμο με την ένδειξη Ah. Στους 0,5C, το ρεύμα είναι μισό και ο χρόνος διπλασιάζεται και στους 0.1C το ρεύμα είναι το ένα δέκατο και ο χρόνος είναι 10 φορές περισσότερος. ^[56]

- **Φορτίο**

Ένα φορτίο καθορίζει το ρεύμα που αντλείται από την μπαταρία. Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας και η εξάντληση της κατάστασης φόρτισης (SoC) προκαλούν πτώση της τάσης υπό φορτίο, προκαλώντας το τέλος της εκφόρτισης. Η ισχύς σχετίζεται με την τρέχουσα παράδοση που μετράται σε Watt (W). Ενέργεια είναι η φυσική εργασία με την πάροδο του χρόνου που μετράται σε watt-ώρες (Wh). ^[56]

- **Watt και Volt-amp (VA)**

Ο πολλαπλασιασμός της τάσης με το ρεύμα παρέχει ισχύ. Η ισχύς μετράται σε βατ προς τιμήν του James Watt, του 18ου αιώνα κατασκευαστή της ατμομηχανής. Η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει μια μπαταρία εκφράζεται σε watt-ώρες (Wh). Το Watt είναι η πραγματική ισχύς που μετράται. Το VA είναι η φαινομενική ισχύς που επηρεάζεται από ένα άεργο φορτίο. Σε φορτίο καθαρής αντίστασης, οι ενδείξεις Watt και VA είναι ίδιες. Ένα αντιδραστικό φορτίο όπως ένας επαγωγικός κινητήρας ή ένα φως φθορισμού προκαλεί μετατόπιση φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος που μειώνει τον συντελεστή ισχύος (pf) από τον ιδανικό (1) σε 0,7 ή χαμηλότερο. Το μέγεθος της ηλεκτρικής καλωδίωσης και οι διακόπτες πρέπει να βασίζονται στην ισχύ VA. ^[56]

- **Φυσικές διαστάσεις**

Οι φυσικές διαστάσεις καθορίζονται κατ' όγκο σε λίτρα (l) και κιλά (kg). Η προσθήκη διάστασης και βάρους παρέχει ειδική ενέργεια σε Wh/kg, πυκνότητα ισχύος σε W/l και ειδική ισχύ σε W/kg. Οι περισσότερες μπαταρίες βαθμολογούνται σε Wh/kg, αποκαλύπτοντας πόση ενέργεια μπορεί να παράγει ένα δεδομένο βάρος. Wh/l σημαίνει watt-hour ανά λίτρο. ^[56]

5.3. Μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σήμερα.

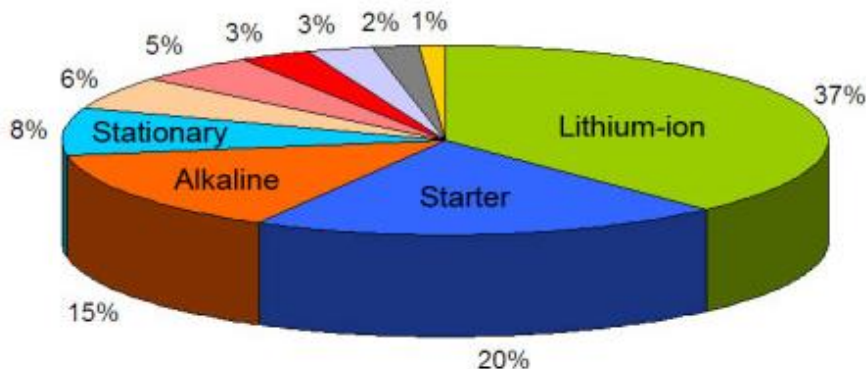
Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι πιο συνηθισμένες μπαταρίες ανήκουν σε 2 κατηγορίες: Πρωτεύοντες & Δευτερεύοντες.

Σύμφωνα με τον Όμιλο Freedonia, μια ερευνητική εταιρεία με έδρα το Κλίβελαντ, η παγκόσμια ζήτηση για πρωτεύοντες και δευτερεύοντες μπαταρίες προβλέπεται να αυξηθεί κατά 7,7% ετησίως, που ανέρχεται σε 120 δισεκατομμύρια δολάρια το 2019. Η πραγματική ανάπτυξη έγκειται σε δευτερεύουσες (επαναφορτιζόμενες) μπαταρίες και Σύμφωνα με την Frost & Sullivan, οι δευτερεύουσες μπαταρίες αντιπροσωπεύουν το 76,4% της παγκόσμιας αγοράς, αριθμός που αναμένεται να αυξηθεί σε 82,6% το 2015. Η ζήτηση οφείλεται σε κινητά τηλέφωνα και tablet. Παλαιότερες εκτιμήσεις υπερεκτίμησαν τη ζήτηση για ηλεκτρικά οχήματα και τα στοιχεία έχουν προσαρμοστεί από τότε προς τα κάτω.

Το 2009, οι πρωτεύοντες μπαταρίες αποτελούσαν το 23,6% της παγκόσμιας αγοράς και η Frost & Sullivan προέβλεψε πτώση 7,4% έως το 2015.^[57]

❖ Μια επισκόπηση των τύπων μπαταριών.

Οι μπαταρίες ταξινομούνται σύμφωνα με την χημεία τους και οι πιο συνηθισμένες είναι συστήματα με βάση το λίθιο, το μόλυβδο και το νικέλιο. Το σχήμα που ακολουθεί απεικονίζει την κατανομή αυτών των χημείων. Με μερίδιο εσόδων 37%, το Li-ion είναι η μπαταρία επιλογής για φορητές συσκευές και το ηλεκτρικό σύστημα μετάδοσης κίνησης. Δεν υπάρχουν άλλα συστήματα που απειλούν την κυριαρχία της σήμερα.^[57]



Εικόνα 5.7 Συνεισφορές εσόδων από μπαταρίες διαφορετικών χημικών ουσιών.

37% ιόντων λιθίου(Li-ion)

20% οξέων μολύβδου(lead acid), μπαταρία εκκίνησης

15% αλκαλικές(Alkaline), πρωτεύοντες

8% οξέων μολύβδου(lead acid), στάσιμες

6% ψευδαργύρου-άνθρακα (Zinc-carbon), πρωτεύοντες

5% οξέων μολύβδου(lead acid), deep-cycle

3% νικελίου-μετάλλου-υδριδίου(NiMH)

3% λιθίου, πρωτεύοντες(Lithium)

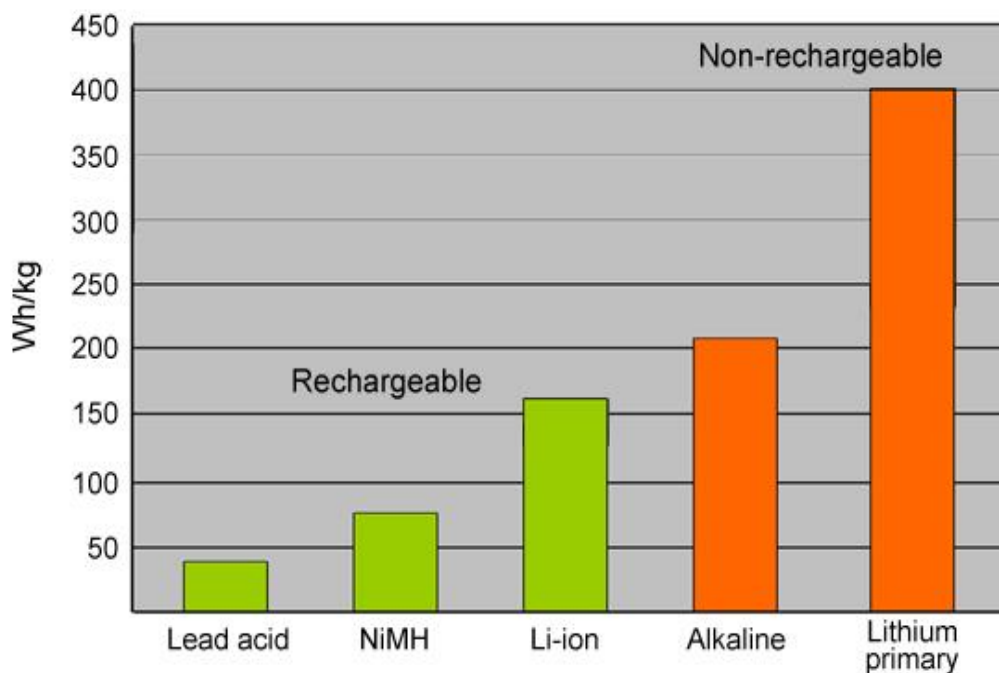
2% νικελίου-καδμίου(NiCd)

1% άλλο

5.3.1. Πρωτεύοντες μπαταρίες (Primary Batteries).

Πρωτεύοντες ή μη επαναφορτιζόμενες είναι οι μπαταρίες οι οποίες χρησιμοποιούνται καθημερινά στις περισσότερες συσκευές γύρω μας. Τα τελευταία χρόνια η αγορά των μπαταριών έχει επισκιάσει τις μη επαναφορτιζόμενες λόγω της μεγάλης και διαρκούς αύξησης της δημοτικότητας των δευτερευόντων.^[1] Μερικά χαρακτηριστικά των μπαταριών αυτών είναι^[58]:

- Οι μπαταρίες αυτές είναι κατασκευασμένες συνήθως από αλκαλικά υλικά.
- Παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα σε σχέση με τις επαναφορτιζόμενες.
- Η διάρκεια ζωής τους στο ράφι μπορεί να φτάσει και τα 10 χρόνια.
- Είναι κατάλληλες για εφαρμογές όπου η πρόσβαση στο σύστημα δεν είναι εύκολη ώστε να μπορούν να αντικατασταθούν.
- Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου η φόρτιση της μπαταρίας δεν είναι εφικτή όπως επίσης και,
- Σε εφαρμογές όπως βηματοδότες για καρδιοπαθείς, μετρητές πίεσης ελαστικών σε οχήματα, απομακρυσμένους φάρους φωτός, καθώς και ρολόγια χειρός, τηλεχειριστήρια και παιδικά παιχνίδια.
- Παρουσιάζουν άμεση ετοιμότητα καθώς είναι έτοιμες για χρήση ανά πάσα στιγμή
- Η πιο δημοφιλής πρωτεύον μπαταρία είναι η αλκαλική. Έχει υψηλή ειδική ενέργεια και είναι οικονομικά αποδοτική.
- Το αρνητικό τους είναι στα ρεύματα χαμηλού φορτίου, περιορίζοντας τη χρήση τους σε ελαφριά φορτία, όπως τηλεχειριστήρια, φακούς και φορητές συσκευές ψυχαγωγίας.



Εικόνα 5.8 Σύγκριση ειδικής ενέργειας μεταξύ πρωτευόντων και δευτερευόντων μπαταριών.

- **Μπαταρίες με βάση τον ψευδάργυρο (Zinc-based Batteries)**

- Αλκαλικές μπαταρίες (ψευδαργύρου/μαγγανίου)^{[59][60]}

Πρόκειται για μια πρωτεύον μπαταρία, δεδομένου ότι είναι έτοιμη για χρήση μετά τη συναρμολόγηση.

Πρόκειται για μία οικονομική μπαταρία με μακροχρόνια ιστορία.

Έχει υψηλή αξιοπιστία, και υψηλή ενεργειακή πυκνότητα.

Μερικοί κατασκευαστές έχουν κάνει εκδόσεις που θυσιάζουν την χωρητικότητα και την αξιοπιστία για την δυνατότητα επαναφόρτισης.

Οι περισσότερες dry-cell μπαταρίες είναι αλκαλικές μπαταρίες μαγγανίου.

Διαρκούν δύο φορές περισσότερο από τις μπαταρίες ψευδαργύρου-άνθρακα.

Οι αλκαλικές μπαταρίες μαγγανίου είναι κατάλληλες για

- ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές
- Συσκευές αναπαραγωγής κασέτας ραδιοφώνου CD
- στερεοφωνικά ακουστικά
- παιχνίδια με ηλεκτρικούς κινητήρες

Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά Αλκαλικών μπαταριών (ψευδαργύρου/μαγγανίου)

- *Specific energy: 85-190 Wh/kg*
- *Energy density: 250-434 Wh/L*
- *Specific power: 50 W/kg*
- *Discharge efficiency: 45-85% (low-rate discharge)*
- *Energy/consumer price: 0.5 Wh/dollar*
- *Self-discharge rate: 0.17%/month (newest types)*
- *Cycle durability: not applicable (primary battery, but see manufacturer for rechargeable versions)*
- *Nominal cell voltage: 1.3-1.5 V*
- *Cutoff voltage: 0.8 V per cell, loaded*

- Μπαταρία ψευδαργύρου-άνθρακα^{[59][60]}

Οι μπαταρίες ψευδαργύρου άνθρακα είναι οι πιο οικονομικές από τις πρωτεύον μπαταρίες.

Όπως και η αλκαλική, η μπαταρία ψευδαργύρου-άνθρακα χρησιμοποιείται εδώ και πολύ καιρό.

Είναι ιδανική για συσκευές που μπορούν να λειτουργήσουν με χαμηλή ηλεκτρική ενέργεια.

Είναι κατάλληλο για χρήση σε

- ρολόγια χειρός
- ρολόγια τοίχου
- απομακρυσμένοι ελεγκτές
- και άλλες συσκευές που απαιτούν ένα μικρό ηλεκτρικό φορτίο για μεγάλο χρονικό διάστημα

Πίνακας 5.2 Χαρακτηριστικά μπαταριών ψευδαργύρου-άνθρακα

- *Specific energy: 36 Wh/kg*

- *Energy density: 92 Wh/L*
- *Specific power: 10-27 W/kg*
- *Discharge efficiency: 50-60% (medium discharge)*
- *Energy/consumer price: 3.2 Wh/dollar*
- *Self-discharge rate: 0.32%/month (newest types, at four-year term)*
- *Cycle durability: not applicable (primary battery)*
- *Nominal cell voltage: 1.5 V*
- *Cutoff voltage: 0.75-0.9 V per cell, loaded (see manufacturer)*
- *Temperature range: -20 to +55°C*

ο Μπαταρίες ψευδαργύρου-αέρος ^[59]

Αυτός ο τύπος μπαταρίας έχει πολύ υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και είναι πολύ ελαφρύς.

Παράγει μεγαλύτερη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από άλλες μπαταρίες του ίδιου μεγέθους και είναι κατάλληλες για χρήση σε συσκευές που προορίζονται για συνεχόμενη χρήση όπως ακουστικά βαρηκοΐας.

Πίνακας 2.3 Χαρακτηριστικά μπαταριών ψευδαργύρου-αέρος

- *Specific energy: 442 Wh/kg*
- *Energy density: 1,673 Wh/L*
- *Specific power: approximately 100 W/kg*
- *Discharge efficiency: 50% (rechargeable version) or 60-70% (primary version, low-rate discharge)*
- *Energy/consumer-price: 2.8 Wh/dollar*
- *Self-discharge rate: 0.17%/month (sealed, use within three years)*
- *Cycle durability: high (with good care, rechargeable version)*
- *Nominal cell voltage: typically 1.45-1.65 V*
- *Cutoff voltage: 0.9 V per cell, loaded (see manufacturer, some use 1.05 Vpc)*
- *Temperature range: typically 0 to +50°C (see manufacturer)*

ο Η μπαταρία ψευδαργύρου / οξειδίου του αργύρου (Zn/Ag₂O) ^[59]

Αυτή η μπαταρία έχει χρησιμοποιηθεί ως εφεδρική πηγή ενέργειας στη διαστημική βιομηχανία, καθώς και για τον στρατό σε ορισμένες ειδικές περιοχές.

Η εμπορική της χρήση, βρίσκεται σε:

- Ακουστικά βαρηκοΐας
- ρολόγια
- αριθμομηχανές

Δυστυχώς, λόγω της περιεκτικότητας της σε ασήμι, είναι κάπως πιο ακριβή από άλλες μπαταρίες στην κατηγορία της.

Πίνακας 5.4 Χαρακτηριστικά μπαταριών Zn/Ag₂O

- *Specific energy: approximately 132 Wh/kg*

- *Energy density: approximately 505 Wh/L*
- *Specific power: high W/kg, but widely variable*
- *Discharge efficiency: 40-90% (highly dependent on load)*
- *Energy/consumer-price: 0.1 Wh/dollar*
- *Self-discharge rate: 0.7%/month (average)*
- *Cycle durability: (primary battery)*
- *Nominal cell voltage: 1.55 V typical (1.6 V no-load, fresh)*
- *Cutoff voltage: 1.2 V*
- *Temperature range: 0 to +60°C typical (storage to -40°C)*

- **Πρωτεύον μπαταρίες με βάση το λίθιο (Lithium-based Batteries)**

- Μπαταρία Θειονυλογλωριδίου-Λιθίου (Li-SOCl₂) ^[59]

Εκδόσεις πολύ χαμηλού ρεύματος αυτής της τεχνολογίας βρίσκουν χρήση σε μπαταρίες backup για μνήμες και την παρακολούθηση-μέτρηση ασθενών εξ-αποστάσεως, ενώ εκδόσεις υψηλότερου ρεύματος χρησιμοποιούνται σε μερικές στρατιωτικές και αυτοκίνητες εφαρμογές.

Οι ανησυχίες για την ασφάλεια και το υψηλό κόστος έχουν αποτρέψει την ευρύτερη χρήση αυτής της τεχνολογίας.

Πίνακας 5.5 Χαρακτηριστικά μπαταριών Li-SOCl₂

- *Specific energy: approximately 500 Wh/kg*
- *Energy density: approximately 1200 Wh/L*
- *Specific power: approximately 18 W/kg*
- *Discharge efficiency: 6 to 94 % (highly dependent on load)*
- *Energy/consumer-price: 5.1 Wh/dollar*
- *Self-discharge rate: 0.08 %/month*
- *Cycle durability: (primary battery)*
- *Nominal cell voltage: 3.5V typical (3.65V new, open circuit)*
- *Cut-off voltage: 3 volts per cell, loaded*
- *Temperature range: -55 to +85°C typical (some specialty types up to +130°C)*

- Μπαταρία Διοξειδίου του θείου-Λιθίου (LiSO₂) ^[59]

Αυτή η τεχνολογία μπαταριών είναι γνωστή για το ευρύ φάσμα θερμοκρασίας λειτουργίας και την υψηλή ενεργειακή πυκνότητα.

Ωστόσο, αυτά τα οφέλη έρχονται με μειονεκτήματα, όπως ο κίνδυνος έκρηξης και ότι αυτή είναι μια μπαταρία υψηλού κόστους.

Επιπλέον, οι μορφές αυτής της μπαταρίας που περιέχουν ακετονιτρίλιο μπορεί να παράγει μικρές ποσότητες πολύ δηλητηριώδες υδροκυάνιο όταν υποβάλλονται σε ακραίες θερμοκρασίες.

Αν και ο στρατός ήταν συνήθως ένας από τους μεγαλύτερους χρήστες αυτού του τύπου μπαταρίας, μία από τις πιο ενδιαφέρουσες

εφαρμογές είναι μέσα σε ένα διαστημόπλοιο που ονομάζεται Huygens που προσγειώθηκε σε ένα φεγγάρι του Κρόνου, τον Τιτάνα.

Πίνακας 5.6 Χαρακτηριστικά μπαταριών LiSO_2

• <i>Specific energy: approximately 250 Wh/kg</i> • <i>Energy density: approx. 400 Wh/L</i> • <i>Specific power: 15 W/kg (light loads)</i> • <i>Discharge efficiency: approx. 50-72%</i> • <i>Energy/consumer-price: 0.12 Wh/dollar</i> • <i>Service or shelf life: 10 years</i> • <i>Self-discharge: 0.25%/month</i> • <i>Cycle durability: primary battery/NA</i> • <i>Nominal cell voltage: 2.85 V (3.9 V with bromine monochloride added)</i> • <i>Open-circuit voltage: 3.0 V (varies by manufacturer)</i> • <i>Cut-off voltage: 2.0 V (varies by manufacturer and use)</i> • <i>Temperature: -55 to +70°C (selected versions to -60°C)</i>

Primary Cell	Alkaline	Lithium iron disulfide (LiFeS_2)	Lithium-thionyl chloride (LiSOCl_2 or LTC)	Lithium manganese dioxide (LiMnO_2 or Li-M)	Lithium sulfur dioxide (LiSO_2)
Specific energy	200Wh/kg	300Wh/kg	500Wh/kg	280Wh/kg	330Wh/kg
Voltage	1.5V	1.5V	3.6–3.9V	3–3.3V	2.8V
Power	Low	Moderate	Excellent	Moderate	Moderate
Passivation	N/A	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate
Safety	Good	Good	Precaution	Good	Precaution
Pricing	Low	Economical	Industrial	Economical	Industrial
Shelf life	10 years	15 years	10–20 years	10–20 years	5–10 years
Operating temp	0°C to 60°C	0°C to 60°C	-55°C to 85°C, higher for short time	-30°C to 60°C some enable from -55°C to 90°C	-54°C to 71°C
Usage	Consumer devices	Swaps alkaline for higher power and long runtime	Horizontal drilling, (fracking). Not for consumer use.	Meter sensing, medical devices, road toll sensors, cameras	Defense; being replaced by LiMnO_2

Πίνακας 5.7 Συνοπτικός πίνακας κοινών πρωτεύοντων μπαταριών. Οι τιμές εκτιμώνται.

5.3.2. Δευτερεύοντες μπαταρίες (Secondary Batteries)

Το 1836, ο John F. Daniell, ένας Άγγλος χημικός, ανέπτυξε μια βελτιωμένη μπαταρία που παρήγαγε ένα πιο σταθερό ρεύμα από τις προηγούμενες προσπάθειες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Το 1859, ο Γάλλος γιατρός Gaston Planté εφηύρε την πρώτη επαναφορτιζόμενη μπαταρία με βάση το μόλυβδο, ένα σύστημα που χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα. Μέχρι τότε, όλες οι μπαταρίες ήταν πρωτογενείς, πράγμα που σημαίνει ότι δεν μπορούσαν να επαναφορτιστούν. Το 1899, ο Waldmar Jungner από τη Σουηδία εφηύρε την μπαταρία νικελίου-καδμίου (NiCd) που χρησιμοποίησε το νικέλιο ως θετικό ηλεκτρόδιο (κάθοδο) και το κάδμιο

ως αρνητικό (άνοδος). Το υψηλό κόστος υλικού σε σύγκριση με τον μόλυβδο περιόρισε τη χρήση του. Δύο χρόνια αργότερα, ο Thomas Edison αντικατέστησε το κάδμιο με σίδηρο και αυτή η μπαταρία ονομάστηκε νικελίου-σιδήρου(NiFe). Η χαμηλή ειδική ενέργεια, η χαμηλή απόδοση σε χαμηλή θερμοκρασία και η υψηλή αυτοεκφόρτιση περιόρισαν την επιτυχία της μπαταρίας νικελίου-σιδήρου. Μόλις το 1932 οι Schlecht και Ackermann πέτυχαν υψηλότερα ρεύματα φορτίου και βελτίωσαν τη μακροζωία του NiCd εφευρίσκοντας την πυροσυσσωματωμένη πλάκα. Το 1947, ο Georg Neumann κατάφερε να σφραγίσει το cell.

Για πολλά χρόνια, η NiCd ήταν η μόνη επαναφορτιζόμενη μπαταρία για φορητές εφαρμογές. Στη δεκαετία του 1990, οι περιβαλλοντολόγοι στην Ευρώπη ανησυχούσαν για τη ζημία που προκλήθηκε όταν το NiCd απομακρύνονταν απρόσεκτα. Η οδηγία για τις μπαταρίες 2006/66 / ΕΚ περιορίζει τώρα την πώληση μπαταριών NiCd στην Ευρωπαϊκή Ένωση, εκτός από ειδική βιομηχανική χρήση για την οποία δεν υπάρχει κατάλληλη αντικατάσταση. Η εναλλακτική λύση είναι η νικελίου-μετάλλου-υδριδίου(NiMH), μια πιο φιλική προς το περιβάλλον μπαταρία που μοιάζει με την NiCd .

Οι περισσότερες ερευνητικές δραστηριότητες περιστρέφονται σήμερα γύρω από τη βελτίωση των συστημάτων με βάση το λίθιο , που εμπορεύονται για πρώτη φορά από τη Sony το 1991. Εκτός από την τροφοδοσία κινητών τηλεφώνων, φορητών υπολογιστών, ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών, ηλεκτρικών εργαλείων και ιατρικών συσκευών, το Li-ion χρησιμοποιείται επίσης για ηλεκτρικά οχήματα και δορυφόρους . Η μπαταρία έχει πολλά πλεονεκτήματα, κυρίως την υψηλή ειδική ενέργεια, την απλή φόρτιση, τη χαμηλή συντήρηση και το γεγονός ότι είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον. ^[55]

- **Δευτερεύον μπαταρίες με βάση το λίθιο (Lithium-based Batteries)**

- Η μπαταρία ιόντων λιθίου (Li-ion) ^{[59][60]}

Το λίθιο είναι το ελαφρύτερο από όλα τα μέταλλα, έχει το μεγαλύτερο ηλεκτροχημικό δυναμικό και παρέχει τη μεγαλύτερη ειδική ενέργεια ανά βάρος. Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες με μέταλλο λιθίου στην άνοδο θα μπορούσαν να παρέχουν εξαιρετικά υψηλή πυκνότητα ενέργειας. Ωστόσο, η εγγενής αστάθεια του μετάλλου λιθίου, ειδικά κατά τη φόρτιση, μετατόπισε την έρευνα σε μια μη μεταλλική λύση χρησιμοποιώντας ιόντα λιθίου.

Το 1991, η Sony εμπορευματοποίησε την πρώτη Li-ion, και σήμερα αυτή η χημεία έχει γίνει η πιο ελπιδοφόρα και ταχύτερα αναπτυσσόμενη μπαταρία στην αγορά.

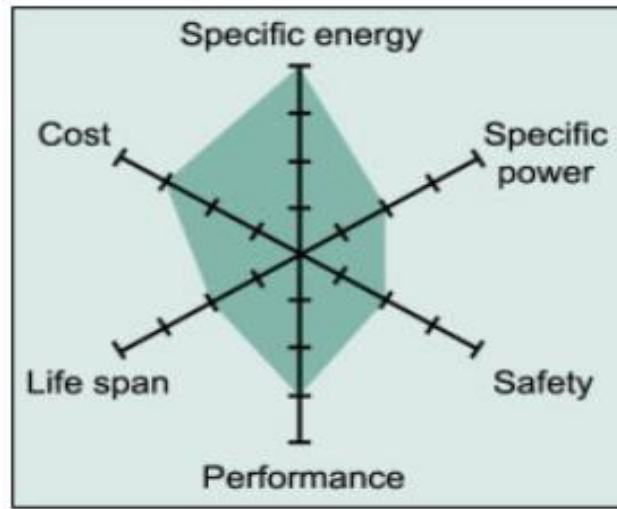
Χρησιμοποιούνται σε

- κινητά τηλέφωνα
- φορητοί υπολογιστές
- βιντεοκάμερες
- ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές
- και παρόμοιες συσκευές

Είναι οι πιο προηγμένες μπαταρίες και είναι η ψυχή των κινητών συσκευών.

Τύποι της μπαταρίας ιόντων λιθίου (Li-ion):

➤ Λιθίου-Οξειδίου του κοβαλτίου (LiCoO₂) ^[62]



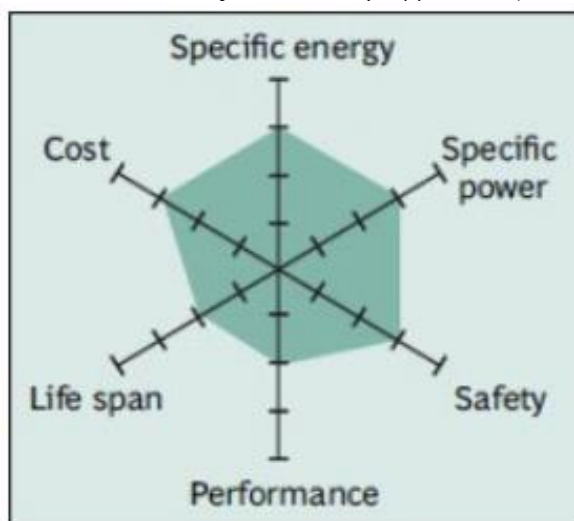
Εικόνα 5.9 Στιγμιότυπο μιας τυπικής μπαταρίας Li-cobalt.

Η Li-cobalt υπερέρχει στην υψηλή ειδική ενέργεια, αλλά προσφέρει μόνο μέτρια απόδοση, ισχύ και διάρκεια ζωής.

Lithium Cobalt Oxide: LiCoO ₂ cathode (~60% Co), graphite anode Short form: LCO or Li-cobalt. 1991		Since
Voltages	3.60V nominal; typical operating range 3.0–4.2V/cell	
Specific energy (capacity)	150–200Wh/kg. Specialty cells provide up to 240Wh/kg.	
Charge (C-rate)	0.7–1C, charges to 4.20V (most cells); 3h charge typical. Charge current above 1C shortens battery life.	
Discharge (C-rate)	1C; 2.50V cut off. Discharge current above 1C shortens battery life.	
Cycle life	500–1000, related to depth of discharge, load, temperature	
Thermal runaway	150°C (302°F). Full charge promotes thermal runaway	
Applications	Mobile phones, tablets, laptops, cameras	
Comments	Very high specific energy, limited specific power. Cobalt is expensive. Serves as Energy Cell. Market share has stabilized.	
2019 update:	Early version; no longer relevant.	

Πίνακας 5.8 Χαρακτηριστικά μπαταριών LiCoO₂

➤ Λιθίου-Οξειδίου του μαγγανίου (LiMn_2O_4) ^[62]



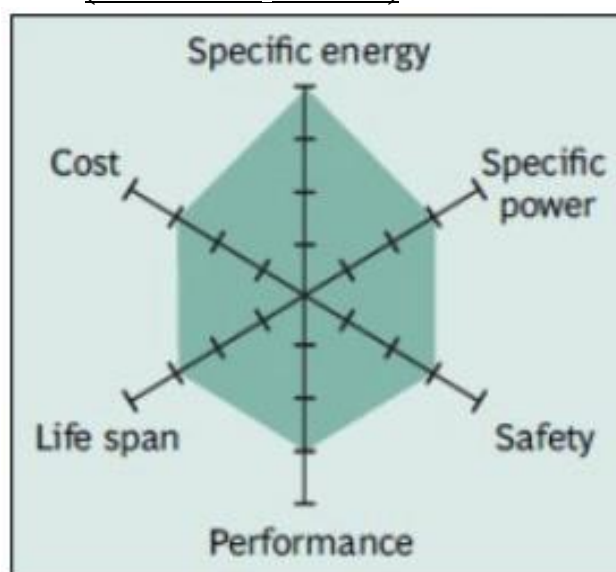
Εικόνα 5.10 Στιγμιότυπο μιας τυπικής μπαταρίας Li-manganese.

Οι αμιγείς μπαταρίες Li-manganese δεν είναι πλέον κοινές σήμερα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για ειδικές εφαρμογές.

Lithium Manganese Oxide: LiMn_2O_4 cathode, graphite anode Short form: LMO or Li-manganese (spinel structure) 1996		Since
Voltages	3.70V (3.80V) nominal; typical operating range 3.0–4.2V/cell	
Specific energy (capacity)	100–150Wh/kg	
Charge (C-rate)	0.7–1C typical, 3C maximum, charges to 4.20V (most cells)	
Discharge (C-rate)	1C; 10C possible with some cells, 30C pulse (5s), 2.50V cut-off	
Cycle life	300–700 (related to depth of discharge, temperature)	
Thermal runaway	250°C (482°F) typical. High charge promotes thermal runaway	
Applications	Power tools, medical devices, electric powertrains	
Comments	High power but less capacity; safer than Li-cobalt; commonly mixed with NMC to improve performance.	
2019 update:	Less relevant now; limited growth potential.	

Πίνακας 5.9 Χαρακτηριστικά μπαταριών LiMn_2O_4

- Λιθίου-Οξειδίου κοβαλτίου-νικελίου-μαγγανίου (LiNiMnCoO_2 or NMC) ^[62]



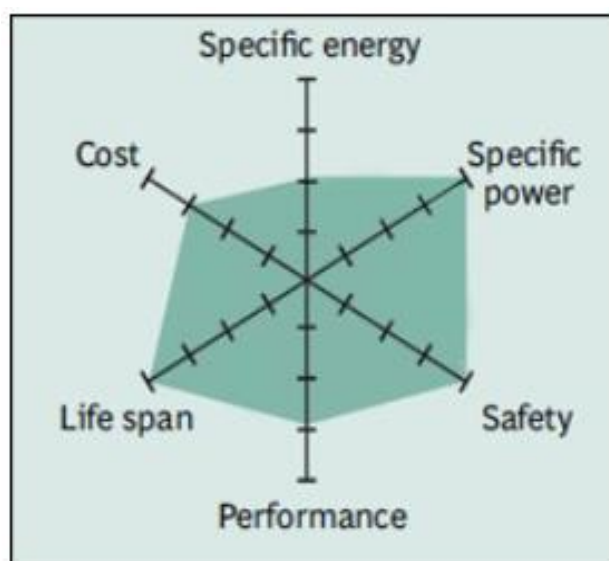
Εικόνα 5.11 Στιγμιότυπο μιας τυπικής μπαταρίας NMC.

Η NMC έχει καλή συνολική απόδοση και υπερέχει σε συγκεκριμένη ενέργεια. Αυτή η μπαταρία είναι ο προτιμώμενος υποψήφιος για το ηλεκτρικό όχημα.

Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide: LiNiMnCoO_2 . cathode, graphite anode Short form: NMC (NCM, CMN, CNM, MNC, MCN similar with different metal combinations) Since 2008	
Voltages	3.60V, 3.70V nominal; typical operating range 3.0–4.2V/cell, or higher
Specific energy (capacity)	150–220Wh/kg
Charge (C-rate)	0.7–1C, charges to 4.20V, some go to 4.30V; 3h charge typical. Charge current above 1C shortens battery life.
Discharge (C-rate)	1C; 2C possible on some cells; 2.50V cut-off
Cycle life	1000–2000 (related to depth of discharge, temperature)
Thermal runaway	210°C (410°F) typical. High charge promotes thermal runaway
Cost	~\$420 per kWh (Source: RWTH, Aachen)
Applications	E-bikes, medical devices, EVs, industrial
Comments	Provides high capacity and high power. Serves as Hybrid Cell. Favorite chemistry for many uses; market share is increasing.
2019 update:	Leading system; dominant cathode chemistry.

Πίνακας 5.10 Χαρακτηριστικά μπαταριών LiNiMnCoO_2

➤ Λιθίου-Φωσφορικού σιδήρου (LiFePO₄) ^[62]



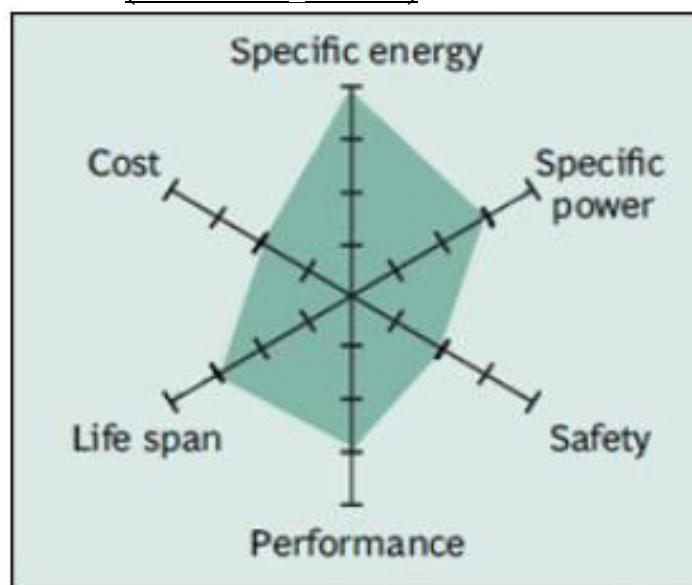
Εικόνα 5.12 Στιγμιότυπο μιας τυπικής μπαταρίας Li-phosphate.

Η Li-phosphate έχει εξαιρετική ασφάλεια και μεγάλη διάρκεια ζωής, αλλά μέτρια ειδική ενέργεια.

Lithium Iron Phosphate: LiFePO ₄ cathode, graphite anode Short form: LFP or Li-phosphate 1996		Since
Voltages	3.20, 3.30V nominal; typical operating range 2.5–3.65V/cell	
Specific energy (capacity)	90–120Wh/kg	
Charge (C-rate)	1C typical, charges to 3.65V; 3h charge time typical	
Discharge (C-rate)	1C, 25C on some cells; 40A pulse (2s); 2.50V cut-off (lower than 2V causes damage)	
Cycle life	2000 and higher (related to depth of discharge, temperature)	
Thermal runaway	270°C (518°F) Very safe battery even if fully charged	
Cost	~\$580 per kWh (Source: RWTH, Aachen)	
Applications	Portable and stationary needing high load currents and endurance	
Comments	Very flat voltage discharge curve but low capacity. One of safest Li-ions. Used for special markets. Elevated self-discharge.	
2019 update:	Used primarily for energy storage, moderate growth.	

Πίνακας 5.11 Χαρακτηριστικά μπαταριών LiFePO₄

- Λιθίου-Οξειδίου αργιλίου-νικελίου-κοβαλτίου-αργιλίου (LiNiCoAlO₂ or NCA) ^[62]



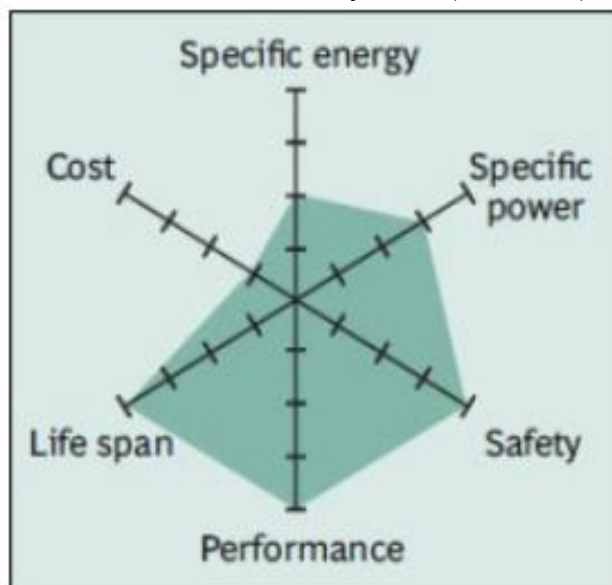
Εικόνα 5.13 Στιγμιότυπο μιας τυπικής μπαταρίας NCA.

Η υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, καθώς και η καλή διάρκεια ζωής, καθιστούν την NCA υποψήφιο για κινητήρες EV. Το υψηλό κόστος και η οριακή ασφάλεια είναι τα αρνητικά της.

Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide: LiNiCoAlO ₂ cathode (~9% Co), graphite anode Short form: NCA or Li-aluminum. Since 1999	
Voltages	3.60V nominal; typical operating range 3.0–4.2V/cell
Specific energy (capacity)	200-260Wh/kg; 300Wh/kg predictable
Charge (C-rate)	0.7C, charges to 4.20V (most cells), 3h charge typical, fast charge possible with some cells
Discharge (C-rate)	1C typical; 3.00V cut-off; high discharge rate shortens battery life
Cycle life	500 (related to depth of discharge, temperature)
Thermal runaway	150°C (302°F) typical, High charge promotes thermal runaway
Cost	~\$350 per kWh (Source: RWTH, Aachen)
Applications	Medical devices, industrial, electric powertrain (Tesla)
Comments	Shares similarities with Li-cobalt. Serves as Energy Cell.
2019 update:	Mainly used by Panasonic and Tesla; growth potential.

Πίνακας 5.12 Χαρακτηριστικά μπαταριών LiNiCoAlO₂

➤ Λιθίου-τιτανικού οξειδίου ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) ^[62]



Εικόνα 5.14 Στιγμιότυπο μιας τυπικής μπαταρίας Li-titanate.

Η Li-titanate υπερέχει στην ασφάλεια και τη διάρκεια ζωής. Καταβάλλονται προσπάθειες για τη βελτίωση της συγκεκριμένης ενέργειας και το χαμηλότερο κόστος.

Lithium Titanate: Can be lithium manganese oxide or NMC; $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (titanate) anode Short form: LTO or Li-titanate Commercially available since about 2008.	
Voltages	2.40V nominal; typical operating range 1.8–2.85V/cell
Specific energy (capacity)	50–80Wh/kg
Charge (C-rate)	1C typical; 5C maximum, charges to 2.85V
Discharge (C-rate)	10C possible, 30C 5s pulse; 1.80V cut-off on LCO/LTO
Cycle life	3,000–7,000
Thermal runaway	One of safest Li-ion batteries
Cost	~\$1,005 per kWh (Source: RWTH, Aachen)
Applications	UPS, electric powertrain (Mitsubishi i-MiEV, Honda Fit EV), solar-powered street lighting
Comments	Long life, fast charge, wide temperature range but low specific energy and expensive. Among safest Li-ion batteries.
2019 update:	Ability to ultra-fast charge; high cost limits to special application.

Πίνακας 5.13 Χαρακτηριστικά μπαταριών $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$

- Η μπαταρία Πολυμερές Λιθίου (LiPo or Li-poly)^[63]
Είναι μια σχετικά νέα κατηγορία μπαταριών η οποία παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτές των ιόντων λιθίου. Αυτές οι μπαταρίες παρέχουν υψηλότερη ειδική ενέργεια και μεγαλύτερη ασφάλεια από άλλους τύπους μπαταριών λιθίου και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου το βάρος είναι κρίσιμο χαρακτηριστικό, όπως σε κινητά, tablets και drones.



Εικόνα 5.15 Μια μπαταρία πολυμερούς λιθίου που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία ενός smartphone.

- **Μπαταρίες με βάση το νικέλιο (Nickel-based Batteries)**

- Μπαταρία νικελίου-καδμίου (NiCd)^{[60][64]}

Για 50 χρόνια, οι φορητές συσκευές βασίζονταν σχεδόν αποκλειστικά στις μπαταρίες νικελίου-καδμίου (NiCd). Οι μπαταρίες αυτές είναι φτιαγμένες για πιο heavy-duty εφαρμογές. Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και υψηλό ρεύμα αποφόρτισης. Είναι όμως τοξικές για το περιβάλλον.

Αυτές οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται σε:

- ασύρματα τηλέφωνα
- ηλεκτρικές οδοντόβουρτσες
- ηλεκτρικές ξυριστικές μηχανές
- ηλεκτρικά εργαλεία
- φώτα έκτακτης ανάγκης.
- ιατρικές εφαρμογές

- Μπαταρία νικελίου-μετάλλου υδριδίου (NiMH)^{[60][64]}

Οι μπαταρίες νικελίου-μετάλλου υδριδίου έχουν τα ίδια πλεονεκτήματα με τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου. Έχουν περίπου διπλάσια ισχύ από μπαταρίες νικελίου-καδμίου του ίδιου μεγέθους.

Στη δεκαετία του 1990, οι μπαταρίες NiMH ανέλαβαν τη βασιλεία για να

λύσει το πρόβλημα τοξικότητας των κατά τα άλλα ισχυρών NiCd.

Μπαταρίες μικρού μεγέθους χρησιμοποιούνται σε:

- στερεοφωνικά ακουστικά
- ηλεκτρικές ξυριστικές μηχανές
- φορητούς υπολογιστές και παρόμοιες συσκευές

ενώ μοντέλα μεσαίου μεγέθους χρησιμοποιούνται σε:

- υβριδικά οχήματα
- ηλεκτρικά ποδήλατα κ.λπ.

ο Μπαταρία νικελίου-ψευδαργύρου (NiZn) ^{[60][64]}

Οι μπαταρίες νικελίου-ψευδαργύρου είναι παρόμοιες με τις νικελίου-καδμίου.

Η NiZn έχει χαμηλό κόστος και υψηλή ισχύ εξόδου ενώ δεν έχει βαριά τοξικά υλικά και μπορεί εύκολα να ανακυκλωθεί.

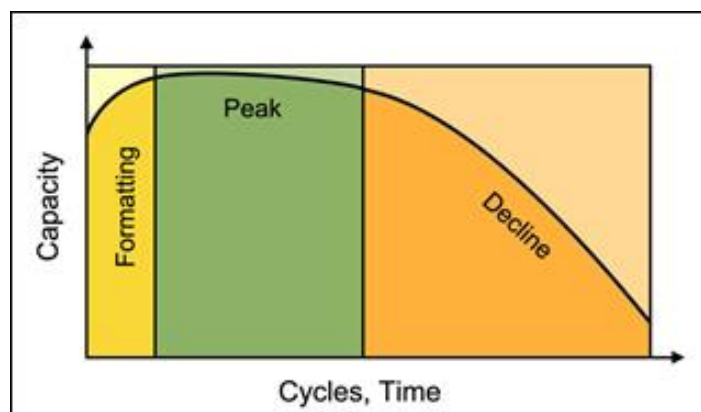
Πίνακας 5.14 Σύνθεση NiMH και NiCd.

NiMH, NiCd	Κάθοδος (θετική)	Άνοδος (αρνητική)	Ηλεκτρολύτης
Υλικό	Οξυϋδροξείδιο του νικελίου	NiMH: κράμα απορρόφησης υδρογόνου NiCd: Κάδμιο	Υδροξείδιο του καλίου

• **Μπαταρίες οξέος-μολύβδου (Lead-acid batteries)** ^{[59][60]}

Πρόκειται για μια δευτερέον μπαταρία που παρέχει πολύ χαμηλή αναλογία ενέργειας προς βάρος και χαμηλή αναλογία ενέργειας προς όγκο, αλλά το αντισταθμίζει παρέχοντας υψηλό ρεύμα εισροής σε χαμηλό κόστος. Οι μπαταρίες αυτού του τύπου έχουν περιορισμένους κύκλους ζωής.

Είναι όπως και νικελίου καδίου τοξικές για το περιβάλλον.



Εικόνα 5.16 Διάρκεια ζωής μίας τυπικής μπαταρίας οξέος-μολύβδου.

Οι μπαταρίες αυτές χρησιμοποιούνται σε

- αυτοκίνητα
- μοτοσυκλέτες
- ηλεκτρικά οχήματα
- μηχανοκίνητα περνοφόρα

Οι βιομηχανικές εφαρμογές περιλαμβάνουν

- αδιάλειπτα τροφοδοτικά (UPS)
- συστήματα ενέργειας έκτακτης ανάγκης για νοσοκομεία και δημόσιες εγκαταστάσεις
- συστήματα συναγερμών

Πίνακας 5.15 Χαρακτηριστικά μπαταριών οξέος-μολύβδου.

• <i>Specific energy: 30-40 Wh/kg</i> • <i>Energy density: 60-75 Wh/L</i> • <i>Specific power: 180 W/kg</i> • <i>Charge/discharge efficiency: 50-92%</i> • <i>Energy/consumer price: 7-to-18 Wh/\$</i> • <i>Self-discharge rate: 3-20%/month</i> • <i>Cycle durability: up to 800 cycles (500 typical)</i> • <i>Nominal cell voltage: 2.1 volts</i> • <i>Float-charge voltage per cell: 2.23 (gel), 2.32 (flooded), 2.25(AGM).</i> • <i>Cutoff voltage: 1.75 volts per cell (loaded)</i> • <i>Charging temperature: -40°C (min) to +49°C (max); see specific manufacturer for more details</i>
--

Πίνακας 5.16 Σύνθεση οξέος-μολύβδου..

Μολύβδου οξέος	Κάθοδος (θετική)	Άνοδος (αρνητική)	Ηλεκτρολύτης
Υλικό	Διοξείδιο του μολύβδου	Γκρι μολυβδος (σπογγώδης όταν σχηματίζεται)	Θειικό οξύ
Πλήρης χρέωση	Οξειδίο του μολύβδου (PbO_2), ηλεκτρόνια προστέθηκε σε θετική πλάκα	Μόλυβδος (Pb), αφαιρούμενα ηλεκτρόνια από την πλάκα	Ισχυρό θειικό οξύ
Αποφορτίζεται	Ο μολυβδος μετατρέπεται σε θειικό μολυβδο στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, τα ηλεκτρόνια οδηγούνται από θετική πλάκα σε αρνητική πλάκα		Αδύναμο θειικό οξύ (σαν νερό)

Πίνακας 5.17 Χαρακτηριστικά των πιο συνηθισμένων επαναφορτιζόμενων μπαταριών.

Specifications	Lead Acid	NiCd	NiMH	Li-ion ¹		
				Cobalt	Manganese	Phosphate
Specific energy (Wh/kg)	30–50	45–80	60–120	150–250	100–150	90–120
Internal resistance	Very Low	Very low	Low	Moderate	Low	Very low
Cycle life ² (80% DoD)	200–300	1,000 ³	300–500 ³	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000
Charge time ⁴	8–16h	1–2h	2–4h	2–4h	1–2h	1–2h
Overcharge tolerance	High	Moderate	Low	Low. No trickle charge		
Self-discharge/month (room temp)	5%	20% ⁵	30% ⁵	<5% Protection circuit consumes 3%/month		
Cell voltage (nominal)	2V	1.2V ⁶	1.2V ⁶	3.6V ⁷	3.7V ⁷	3.2–3.3V
Charge cutoff voltage (V/cell)	2.40 Float 2.25	Full charge detection by voltage signature		4.20 typical Some go to higher V		3.60
Discharge cutoff voltage (V/cell, 1C)	1.75V	1.00V		2.50–3.00V		2.50V
Peak load current Best result	5C ⁸ 0.2C	20C 1C	5C 0.5C	2C <1C	>30C <10C	>30C <10C
Charge temperature	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	0 to 45°C (32 to 113°F)		0 to 45°C ⁹ (32 to 113°F)		
Discharge temperature	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	–20 to 65°C (–4 to 49°F)		–20 to 60°C (–4 to 140°F)		
Maintenance requirement	3–6 months ¹⁰ (topping chg.)	Full discharge every 90 days when in full use		Maintenance-free		
Safety requirements	Thermally stable	Thermally stable, fuse protection		Protection circuit mandatory ¹¹		
In use since	Late 1800s	1950	1990	1991	1996	1999
Toxicity	Very high	Very high	Low	Low		
Coulombic efficiency ¹²	~90%	~70% slow charge ~90% fast charge		99%		
Cost	Low	Moderate		High ¹³		

5.3.3. Εναλλακτικά συστήματα μπαταριών

Όπως προαναφέρθηκε δεν ανήκουν όλες οι μπαταρίες στις 2 βασικές κατηγορίες που προηγήθηκαν. Υπάρχουν και άλλες των οποίων τα χαρακτηριστικά αποκλίνουν από αυτά των προηγούμενων κατηγοριών αφού οι συνθήκες υπό τις οποίες χρησιμοποιούνται επηρεάζουν σημαντικά την λειτουργία τους.

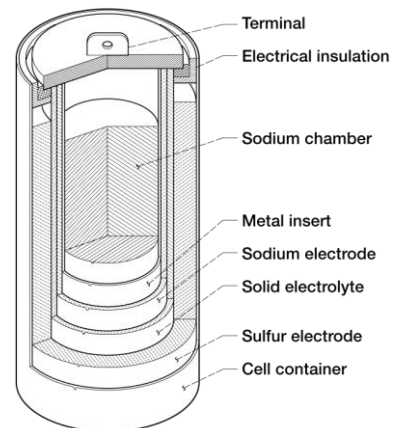
Τα μέσα ενημέρωσης προωθούν υπέροχες νέες μπαταρίες που υπόσχονται μεγάλους χρόνους εκτέλεσης, φορτίζονται σε λίγα λεπτά, είναι πιο λεπτές από χαρτί και θα τροφοδοτούν μια μέρα το ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Ενώ αυτές οι πειραματικές μπαταρίες παράγουν τάση, τα μειονεκτήματα σπάνια αναφέρονται. Τα τυπικά μειονεκτήματα είναι η χαμηλή χωρητικότητα φορτίου και η διάρκεια ζωής περιορισμένων κύκλων.

Όπως το λεμόνι μπορεί να μετατραπεί σε μπαταρία, έτσι και το θαλασσινό νερό έχει δοκιμαστεί ως ηλεκτρολύτης, αλλά η ανακτηθείσα ενέργεια είναι καλή μόνο για να ανάψει ένας φακός πυρακτώσεως για λίγο πριν η διάβρωση καταστήσει την μπαταρία άχρηστη. Πολλές χημικές διεργασίες προσπαθούν να παράγουν ηλεκτρισμό από διαφορετικά μέταλλα, αλλά μόνο μερικές υπόσχονται να ξεπεράσουν τα σημερινά συστήματα μολύβδου, νικελίου και λιθίου.^[65]

- **Η μπαταρία νατρίου-θείου (Na_2S_4)**^[59]

Αυτή η τεχνολογία μπαταρίας είναι γνωστή για την πολύ υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, την εξαιρετική διάρκεια ζωής, τα υλικά χαμηλού κόστους και την υψηλή απόδοση.

Ωστόσο, αυτό έρχεται με το μειονέκτημα της ανάγκης υψηλών θερμοκρασιών (300°C - 350°C) για να λειτουργήσει.



Εικόνα 5.17 Σχηματικό διάγραμμα μιας μπαταρίας νατρίου-θείου.

- *Specific energy: approximately 150-760 Wh/kg (high-temperature version)*
- *Energy density: approximately 151 Wh/L*
- *Specific power: 200 W/kg*
- *Discharge efficiency: approximately 72% to 90%*
- *Energy/consumer-price: 0.4 Wh/dollar*
- *Service or shelf life: Two to five years for most types (some to 15 years), hot*
- *Cycle durability: >4,200 at 80% DOD*
- *Nominal cell voltage: 2V*
- *Cut-off voltage: 1.78 to 1.9V*
- *Temperature: internal 350°C (original version), 100°C to 150°C (new versions)*

Πίνακας 5.18 Χαρακτηριστικά μπαταρίας Na_2S_4

- **Η μπαταρία ψευδαργύρου-αέρος (Πρωτεύον & Δευτερεύον)** ^[65]

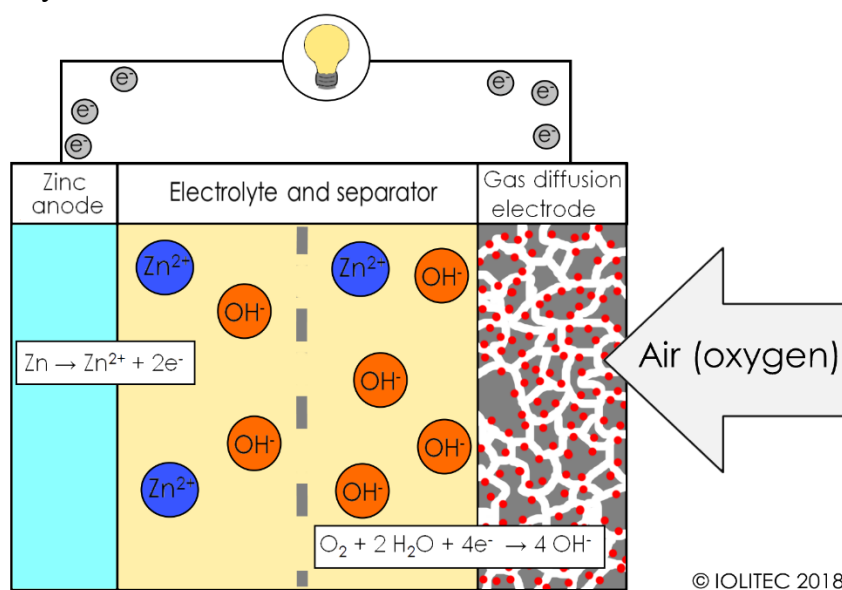
Η μπαταρία ψευδάργυρου-αέρος θεωρείται κύρια μπαταρία και έχουν δοκιμαστεί επαναφορτιζόμενες εκδόσεις για εφαρμογές υψηλής ισχύος. Στα 300–400Wh/kg, η μπαταρία αυτή έχει υψηλή ειδική ενέργεια, αλλά η ειδική ισχύς είναι χαμηλή.

Το κόστος κατασκευής της είναι χαμηλό.

Η μπαταρία είναι ευαίσθητη σε θερμές και κρύες θερμοκρασίες και υψηλή υγρασία.

Η ρύπανση επηρεάζει επίσης την απόδοση.

Τυπικές εφαρμογές είναι βοηθήματα ακοής και λαμπτήρες ασφαλείας σε εργοτάξια.



Εικόνα 5.18 Σχεδιάγραμμα λειτουργίας της μπαταρίας ψευδαργύρου-αέρος.

- **Η μπαταρία αργύρου-ψευδαργύρου (Πρωτεύον & Δευτερεύον)** ^[65]

Οι μικρές μπαταρίες με βάση το ασήμι σε κελιά τύπου κουμπιού ονομάζονται συνήθως οξειδίου-αργύρου και δεν είναι επαναφορτιζόμενες.

Οι επαναφορτιζόμενες εκδόσεις υψηλότερης χωρητικότητας αναφέρονται ως αργύρου-ψευδαργύρου.

Λόγω του υψηλού κόστους του αργύρου, αυτές οι μπαταρίες διατίθενται είτε σε πολύ μικρά μεγέθη, όπου η ποσότητα του αργύρου δεν συμβάλλει σημαντικά στο συνολικό κόστος του προϊόντος, ή διατίθενται σε μεγαλύτερα μεγέθη για κρίσιμες εφαρμογές, όπου η ανώτερη απόδοση υπερτερεί των απαιτήσεων κόστους.

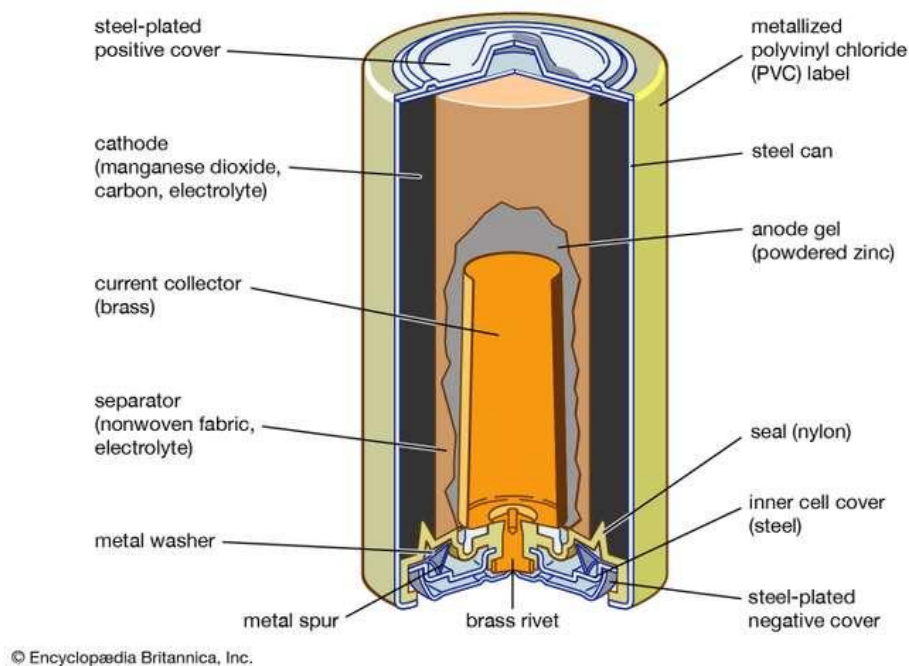
Τα κύρια κελιά χρησιμοποιούνται για ρολόγια, ακουστικά βαρηκοΐας και εφεδρικές μνήμες.

Η μεγαλύτερη επαναφορτιζόμενη έκδοση βρίσκεται σε υποβρύχια, πυραύλους και αεροδιαστημικές εφαρμογές.

Το υψηλό κόστος και η σύντομη διάρκεια ζωής απέκλεισαν την μπαταρία αυτή από την εμπορική αγορά, αλλά βρίσκεται στα πρόθυρα της αναγέννησης με βελτιώσεις.

Οι βελτιώσεις στο ηλεκτρόδιο ψευδαργύρου υπόσχονται μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και 40% υψηλότερη ειδική ενέργεια από την Li-ion.

Η μπαταρία αργύρου-ψευδαργύρου είναι ασφαλής, δεν έχει τοξικά μέταλλα και μπορεί να ανακυκλωθεί.



Εικόνα 5.19 Σχηματικό διάγραμμα της μπαταρίας αργύρου-ψευδαργύρου.

- **Η επαναχρησιμοποιήσιμη αλκαλική^[65]**

Η επαναχρησιμοποιήσιμη αλκαλική χρησίμευσε ως εναλλακτική λύση για τις μπαταρίες μιας χρήσης.

Αν και το κόστος κατασκευής λέγεται ότι είναι παρόμοιο με την κανονική αλκαλική, οι καταναλωτές δεν αποδέχθηκαν το προϊόν.

Ο περιορισμένος αριθμός κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης και η χαμηλή χωρητικότητα στην επαναλαμβανόμενη φόρτιση είναι σημαντικά μειονεκτήματα.

Η μακροζωία σχετίζεται επίσης άμεσα με το βάθος της εκφόρτισης. Σε βάθος εκφόρτισης 50%, η μπαταρία μπορεί να αποδώσει 50 κύκλους, αλλά οι περισσότεροι χρήστες αδειάζουν την μπαταρία πριν από την επαναφόρτιση.

Η NiMH σε κύτταρα AA και AAA έχει αντικαταστήσει ως επί το πλείστον τα επαναχρησιμοποιήσιμες αλκαλικές.

Chemistry	Sodium-sulfur; Sodium-nickel- chloride (ZEBRA)	Zinc-air (Primary and secondary)	Silver-zinc; Silver-oxide	Reusable Alkaline
Type	Molten-salt (Na) and sulfur (S). Economical with larger sizes, (Symbol NaS)	Mainly primary; shares similarity with fuel cell	Silver-zinc is rechargeable; silver-oxide is primary	Disposable alkaline made reusable at a similar cost to regular types
Voltage per cell	2.58V	1.40–1.65V	1.60V	1.50V
Specific Energy	90–120Wh/kg	300–400Wh/kg	250Wh/kg	200Wh/kg, less with each subsequent recharge
Activation	Operate at 270–350°C	Removal of seal enables airflow	Instant	Instant
Charging	Overnight charge	Charging by replacement of zinc electrodes	Similar to Li-ion	Voltage limiting (1.60–1.70V)
Discharging	High power burst	Low load	Similar to Li-ion	Low load (200–400mA)
Cycle life	3,000 cycles; 8 years	Once activated, battery is being consumed	Short cycle life; 2 year life span	50, depending on DoD. Recharge often
Maintenance	Keep battery hot	Only activate when needed	Keep inventory low	Do not discharge too low
Failure modes	Electrical shorts due to corrosion	Sensitive to cold heat, humidity and air pollution	Zinc electrode and separator decay; cycling causes dendrite formation	50% capacity drop with 2 nd charge; rising internal resistance
Packaging	Large systems of 10kWh and higher	Mostly small sizes	Button cells (silver-zinc)	AA, AAA, C, D, 9V
History	Conceived by Germans in World War II; NaS gained new interest in 1970s	“Breathing” discovered by Leclanché in 1878, offered to buyers in 1932	Spacecraft use because of high capacity. (Now replaced by Li-ion)	Introduced in 1992, alternate to disposables. Leak-proof
Applications	Primary: One-shot missiles; Secondary: UPS, load-leveling, EV (Think City), delivery vans	Hearing aids; large units for railway signaling, mines safety lamps	Primary: Watches, memory backup; Secondary: Aerospace, missiles, military, TV cameras	Flashlights, toys, entertainment devices
Comments	Heating consumes 14% of battery energy per day	High capacity, low cost but only one-time use	New designs show capacity gain over Li-ion: expensive raw material	Regular alkaline should not be charged; danger of leakage, gas, explosion

Πίνακας 5.19 Σύνοψη των πιο κοινών εναλλακτικών μπαταριών και των ισοδύναμων τους.

5.4. Μελλοντικές μπαταρίες

- **Η μπαταρία λιθίου-αέρος (Li-air)** ^[66]

Η μπαταρία λιθίου-αέρος προσφέρει ένα συναρπαστικό νέο ταβάνι, καθώς υπόσχεται να αποθηκεύσει πολύ περισσότερη ενέργεια από ότι είναι δυνατόν με τις τρέχουσες τεχνολογίες ιόντων λιθίου.

Η θεωρητική ειδική ενέργεια της λιθίου-αέρος είναι 13kWh/kg. Εάν αυτές οι ενέργειες μπορούσαν πράγματι να παραδοθούν, ο μέταλλου-αέρος, όπως είναι επίσης γνωστή αυτή η μπαταρία, θα ήταν ισοδύναμη με τη βενζίνη στα 13kWh/kg περίπου.

Η IBM, το MIT, το Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια και άλλα ερευνητικά κέντρα αναπτύσσουν την τεχνολογία.

- **Η μπαταρία λιθίου-μετάλλου (Li-metal)** ^[66]

Η συγκεκριμένη μπαταρία θεωρείται από καιρό ως η μελλοντική επαναφορτιζόμενη μπαταρία λόγω της υψηλής ειδικής ενέργειας και της καλής ικανότητας φόρτισης.

Ωστόσο, η ανεξέλεγκτη απομάκρυνση λιθίου προκαλεί ανάπτυξη δένδριτών που προκαλεί κινδύνους ασφαλείας διεισδύοντας στο διαχωριστή και παράγοντας ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα.

Μετά από πολλές αποτυχημένες προσπάθειες εμπορίας επαναφορτιζόμενων μπαταριών λιθίου-μετάλλων, η έρευνα και η περιορισμένη κατασκευή αυτής της μπαταρίας συνεχίζονται. Το 2010, μια δοκιμαστική έκδοση με χωρητικότητα 300Wh/kg εγκαταστάθηκε σε ένα πειραματικό ηλεκτρικό όχημα.

Ένα Audi A2 με αυτές τις μπαταρίες οδήγησε πάνω από 450km (284mi) από το Μόναχο στο Βερολίνο με μία μόνο φόρτιση. Υπάρχει μια φήμη ότι το αυτοκίνητο καταστράφηκε από πυρκαγιά ενώ ήταν σε εργαστηριακή δοκιμή. Μια λύση για την αναστολή της ανάπτυξης δένδριτών μπορεί να είναι επικείμενη.

- **Λιθίου στερεάς κατάστασης** ^[66]

Οι μπαταρίες στερεάς κατάστασης υπόσχονται να αποθηκεύουν διπλάσια ενέργεια σε σύγκριση με την κανονική ιόντων λιθίου.

Τα ερευνητικά εργαστήρια, συμπεριλαμβανομένης της Bosch, προβλέπουν ότι η μπαταρία στερεάς κατάστασης θα μπορούσε να είναι διαθέσιμη στο εμπόριο από το 2020 και να εφαρμοστεί σε αυτοκίνητα το 2025.

Οι κυβερνήσεις επιβραβεύουν εταιρείες που πραγματοποιούν έρευνα για μπαταρίες στερεάς κατάστασης με μεγάλες επιχορηγήσεις.

Οι εργαστηριακές εκθέσεις διαθέτουν υψηλή ειδική ενέργεια και ανώτερη ασφάλεια χωρίς να έχουν εύφλεκτο ηλεκτρολύτη, αλλά οι ειδικοί της μπαταρίας δεν έχουν πειστεί ακόμη για τη βιωσιμότητά του για αντικατάσταση της Li-ion.

- **Λιθίου-θείου (Li-S)** ^[66]

Οι μπαταρίες λιθίου-θείου προσφέρουν πολύ υψηλή ειδική ενέργεια 550Wh/kg, περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτή των ιόντων λιθίου.

Η Li-S έχει επίσης αξιοσέβαστη ειδική ισχύ 2.500W/kg.

Μια πρόκληση με το θείο λιθίου είναι η περιορισμένη διάρκεια ζωής μόνο 40-50 φορτίσεων/εκφορτίσεων.

- **Ιόντων νατρίου (Na-ion)** ^[66]

Η μπαταρία αυτή αντιπροσωπεύει μια πιθανή εναλλακτική λύση χαμηλότερου κόστους έναντι της ιόντων λιθίου καθώς το νάτριο είναι φθηνό και άμεσα διαθέσιμο.

Η μπαταρία μπορεί επίσης να αποσταλεί χωρίς να απαιτείται συμμόρφωση με τους κανονισμούς για επικίνδυνα εμπορεύματα.

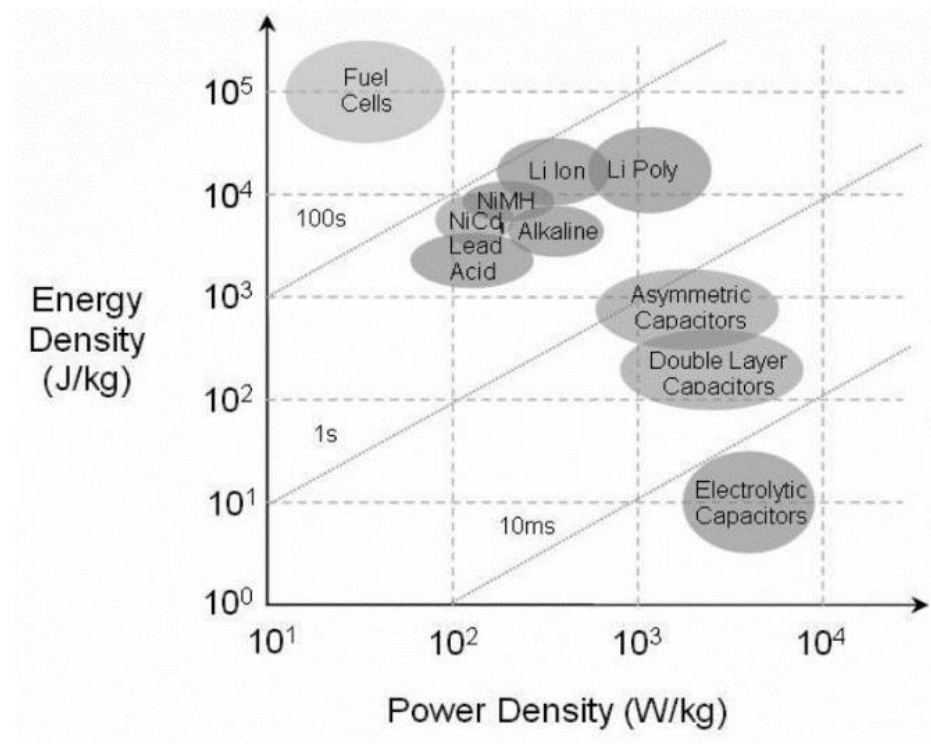
Η ειδική ενέργεια της είναι περίπου 90Wh/kg με το κόστος ανά kWh να είναι παρόμοιο με την μπαταρία οξέος μολύβδου.

Θα χρειαστεί περαιτέρω ανάπτυξη για τη βελτίωση του αριθμού κύκλων.

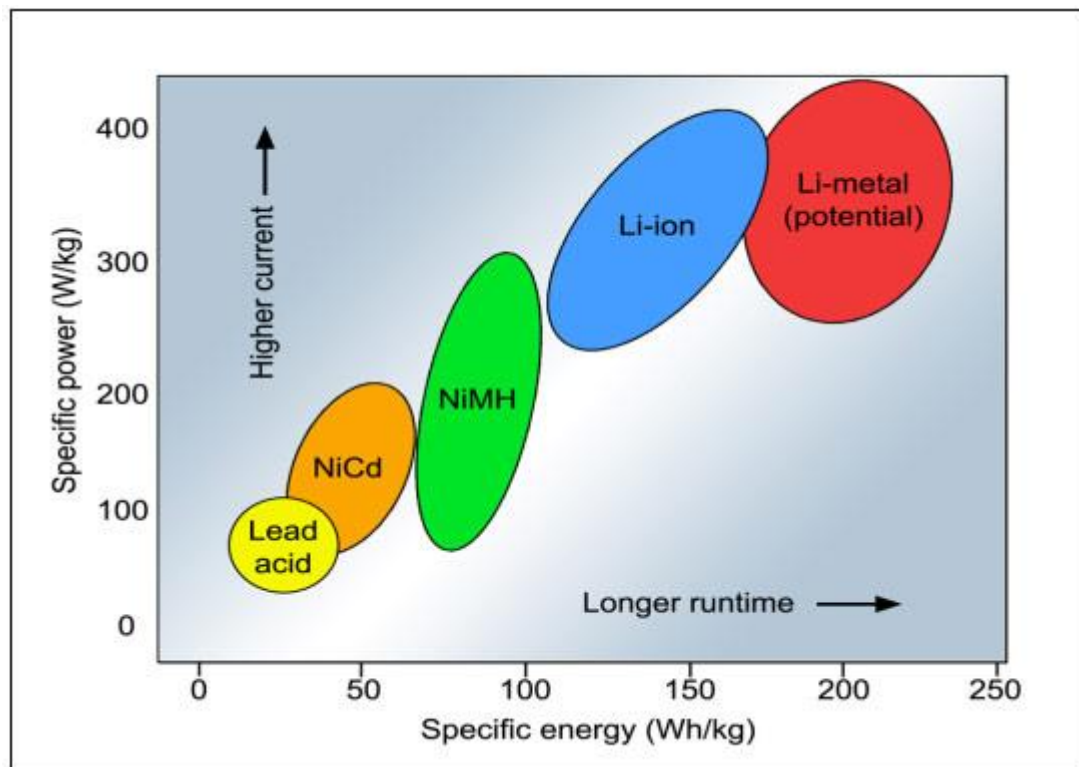
Chemistry	Lithium-air	Lithium-metal	Solid-state Lithium	Lithium-sulfur Li-S	Sodium-iron Na-ion
Type	Air cathode with lithium anode	Lithium anode; graphite cathode	Lithium anode; polymer separator	Lithium anode; sulfur cathode	Carbon anode; diverse cathodes
Voltage per cell	1.70–3.20V	3.60V	3.60V	2.10V	3.6V
Specific Energy	13kWh/kg (theoretical)	300Wh/kg	300Wh/kg (est.)	500Wh/kg or less	90Wh/kg
Charging	Unknown	Rapid charge	Rapid charge	0.2C (5h)	Unknown
Discharging	Low power; inferior when cold	High power band	Poor conductivity when cold	High power (2,500W/kg)	Unknown
Cycle life	50 cycles in labs	2,500	100, prototypes	50, disputed	50 typical
Packaging	Not defined	Not defined	Prismatic	Not defined	Not defined
Safety	Unknown	Needs improvement	Needs improvement	Protection circuit required	Safe; shipment by air possible
History	Started in 1970s; renewed interest in the 2000s. R&D by IBM MIT, UC, etc.	Produced in the 1980s by Moli Energy; caused safety recall	Similar to Li-polymer that started in 1970	New technology; R&D by Oxis Energy, Bosch and others.	Ignored in the 1980s in favor of lithium; has renewed interest
Failure modes	Lithium peroxide film stops electron movement with use. Air impurity causes damage.	Dendrite growth causes electric short with usage	Dendrite growth causes electric short; poor low temperature performance.	Sulfur degrades with cycling; unstable when hot, poor conductivity	Little research in this area
Applications	Not defined; potential for EV	EV, industrial and portable uses	EES, wheeled mobility; also talk about EV	Solar-powered airplane flight in August 2008	Energy storage
Comments	Borrowed from "breathing" zinc-air and fuel cell concept	Good capacity, fast charge and high power keep interest high	Similar to lithium-metal; may be ready by 2020; EVs in 2025	May succeed Li-ion due to lower cost and higher capacity	Low cost in par with lead acid. Can be fully discharged.

Πίνακας 5.20 Σύνοψη των πιο κοινών μελλοντικών μπαταριών.

Στην εικόνα 44, διακρίνονται οι διαφορές μεταξύ μπαταριών και υπερπυκνωτών διαφόρων τύπων όσον αφορά την ενεργειακή πυκνότητα και την πυκνότητα ισχύος που προσφέρουν.



Εικόνα 5.20 Ενεργειακή πυκνότητα/πυκνότητα ισχύος μπαταριών και υπερπυκνωτών.



Εικόνα 5.21 Ειδική ισχύς/ειδική ενέργεια των επαναφορτιζόμενων μπαταριών.

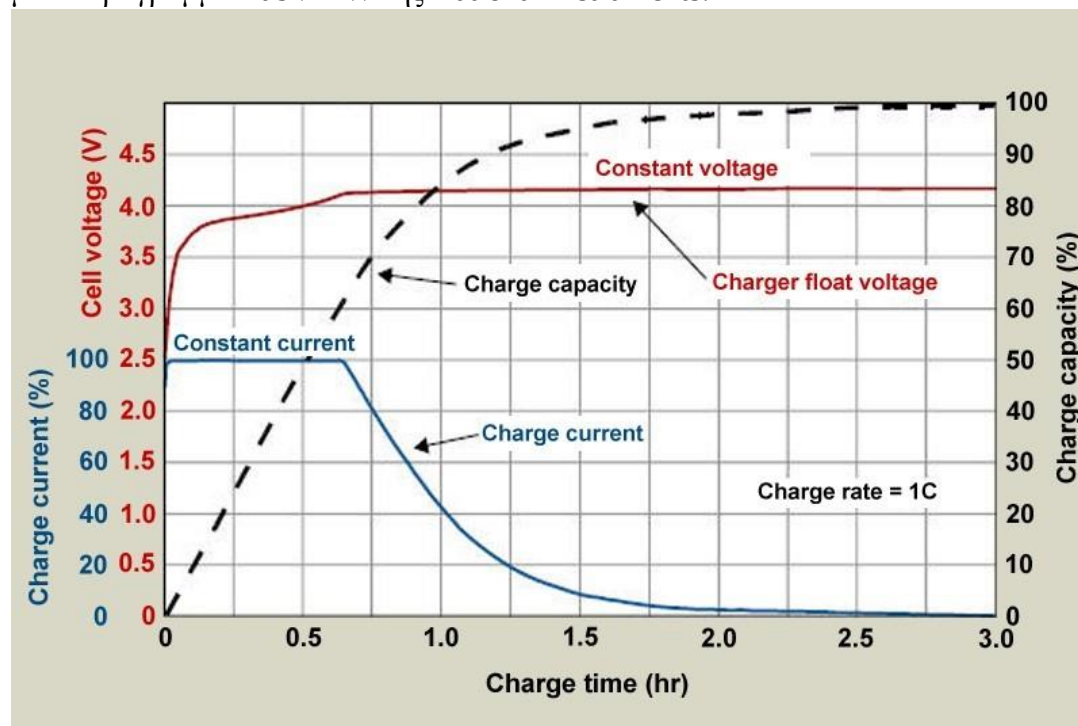
6. Αξιολόγηση Μπαταριών

Οι μπαταρίες έρχονται σε πολλές συνθήκες και μια φόρτιση μπορεί εύκολα να καλύψει ένα σύμπτωμα που επιτρέπει σε μια αδύναμη μπαταρία να λειτουργεί φαινομενικά καλά. Ομοίως, μια ισχυρή μπαταρία με χαμηλή φόρτιση μοιράζεται ομοιότητες με ένα πακέτο που εμφανίζει απώλεια χωρητικότητας. Τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας επηρεάζονται επίσης από μια πρόσφατη φόρτιση, εκφόρτιση ή μεγάλη αποθήκευση. Αυτές οι αλλαγές στη διάθεση πρέπει να αναγνωρίζονται σαφώς κατά τη δοκιμή μπαταριών.

Ο κύριος δείκτης υγείας μιας μπαταρίας είναι η χωρητικότητα, μια μέτρηση που αντιπροσωπεύει την αποθήκευση ενέργειας. Μια νέα μπαταρία πρέπει να παρέχει 100 τοις εκατό της ονομαστικής χωρητικότητας. Αυτό σημαίνει ότι ένα πακέτο 5Ah θα παραδώσει πέντε αμπέρ για 1 ώρα. Εάν η μπαταρία σταματήσει μετά από 30 λεπτά, τότε η χωρητικότητα είναι μόνο 50 τοις εκατό. Η χωρητικότητα υποστηρίζει επίσης υποχρεώσεις εγγύησης με αντικατάσταση που οφείλεται όταν πέφτει κάτω από το 80 τοις εκατό. Το πιο σημαντικό, η χωρητικότητα καθορίζει το τέλος της διάρκειας ζωής της μπαταρίας.

Οι κατασκευαστές βασίζονται τις προδιαγραφές της συσκευής σε μια νέα μπαταρία. Αυτή η κατάσταση είναι προσωρινή και δεν αντιπροσωπεύει μια μπαταρία σε πραγματικές καταστάσεις επειδή το ξεθώριασμα ξεκινά από την ημέρα που κατασκευάζεται. Η μείωση της απόδοσης γίνεται ορατή μόνο όταν έχει εξαντληθεί η λάμψη μιας νέας συσκευής και οι καθημερινές ρουτίνες θεωρούνται δεδομένες.

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει περαιτέρω ανάλυση στον τρόπο με τον οποίο αξιολογούνται οι μπαταρίες ως προς την απόδοσή τους στο χρόνο καθώς και το πρακτικό κομμάτι της εργασίας κατά το οποίο δημιουργήθηκε πρόγραμμα για αυτοματοποιημένη αξιολόγηση μπαταριών μέσω των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης με το πρόγραμμα LabVIEW της National Instruments.



Εικόνα 6.1 Φόρτιση με σταθερό ρεύμα και σταθερή τάση.

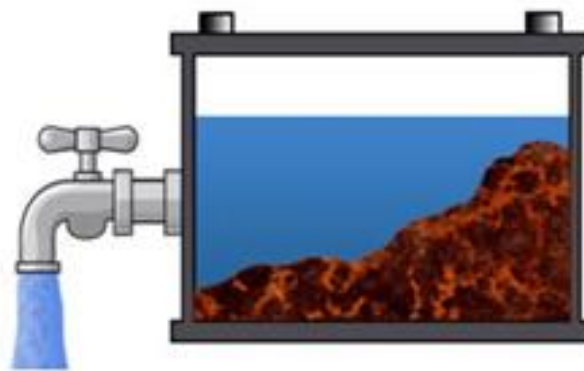
6.1. Βασικές αρχές στην αξιολόγηση μπαταριών

- **Κατάσταση υγείας (SoH-State of Health)** ^[56]

Δεν υπάρχει πρακτική μέθοδος για τον ποσοτικό προσδιορισμό όλων των συνθηκών μιας μπαταρίας σε μια σύντομη, περιεκτική δοκιμή. Η κατάσταση υγείας (SoH) δεν μπορεί να μετρηθεί αφ'εαυτής, μπορεί να εκτιμηθεί μόνο σε διάφορους βαθμούς ακρίβειας με βάση τα διαθέσιμα συμπτώματα. Εάν τα συμπτώματα είναι ασαφή ή δεν υπάρχουν, δεν είναι δυνατή μια αξιόπιστη μέτρηση. Κατά τη δοκιμή μιας μπαταρίας, πρέπει να αξιολογηθούν τρεις δείκτες SoH^[69]:

- 1) **Χωρητικότητα**, η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας
- 2) **Εσωτερική αντίσταση**, η ικανότητα παροχής ρεύματος και
- 3) **Αυτοεκφόρτιση**, που αντικατοπτρίζει μηχανική ακεραιότητα και συνθήκες που σχετίζονται με το στρεσάρισμα.

Στις μπαταρίες Li-ion το SoH υπολογίζεται μέσω της χωρητικότητας.



Εικόνα 6.2 Εννοιολογική απεικόνιση μπαταρίας που συμβολίζει τη χρησιμοποιήσιμη χωρητικότητα, το άδριο τμήμα που μπορεί να ξαναγεμιστεί, την μόνιμη απώλεια χωρητικότητας ως τα “κατακάθια” και η βρύση που συμβολίζει την παροχή ισχύος ως μέρος της εσωτερικής αντίστασης

Η εσωτερική αντίσταση και η αυτοεκφόρτιση παραμένουν χαμηλά υπό κανονικές συνθήκες. Το SoH είναι συνήθως κρυφό από τον χρήστη σε καταναλωτικά προϊόντα. Παρέχεται μόνο κατάσταση φόρτισης (SoC).

Το SoH μερικές φορές χωρίζεται σε:

- ο Απόλυτη κατάσταση υγείας (ASoH), η ικανότητα αποθήκευσης της καθορισμένης ενέργειας όταν η μπαταρία είναι καινούργια.
- ο Σχετική κατάσταση υγείας (RSoH), διαθέσιμη δυνατότητα αποθήκευσης όταν η μπαταρία έχει στρωθεί.

Σημείωση: Εκτός εάν αναφέρεται διαφορετικά, το RSoH αναφέρεται στο SoH.

- **Κατάσταση φόρτισης (SoC-State of Charge)** ^[56]

Το SoC αντικατοπτρίζει το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας, κάτι με το οποίο οι χρήστες είναι συνήθως πιο εξοικειωμένοι. Ο μετρητής στάθμης SoC μπορεί να

δημιουργήσει μια εσφαλμένη αίσθηση ασφάλειας καθώς είτε καλή είτε ξεθωριασμένη μια μπαταρία εμφανίζει 100% όταν φορτίζεται πλήρως.

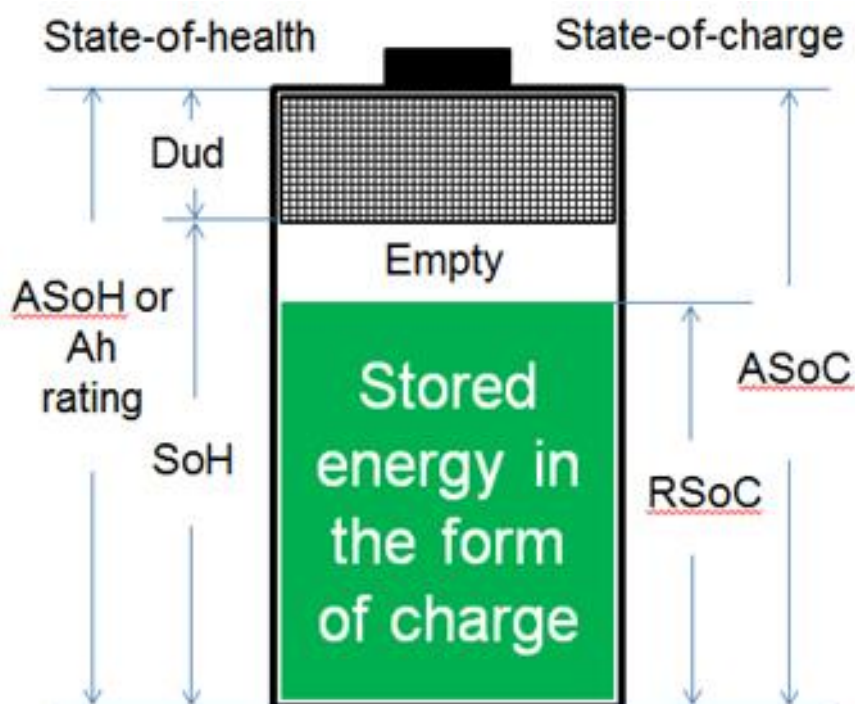
Το SoC μερικές φορές χωρίζεται σε:

- Απόλυτη κατάσταση φόρτισης (ASoC), η δυνατότητα λήψης της καθορισμένης φόρτισης όταν η μπαταρία είναι καινούργια
- Σχετική κατάσταση υγείας (RSoC), το διαθέσιμο επίπεδο φόρτισης λαμβάνοντας υπόψη τη χωρητικότητα.

Σημείωση: Εκτός εάν αναφέρεται διαφορετικά, το RSoC αναφέρεται στο SoC.

- **Κατάσταση λειτουργίας (SoF- State of Function)** ^[56]

Το SoF αντικατοπτρίζει την ετοιμότητα της μπαταρίας όσον αφορά τη χρησιμοποιήσιμη ενέργεια, παρατηρώντας την κατάσταση φόρτισης σε σχέση με τη διαθέσιμη χωρητικότητα. Αυτό μπορεί να φανεί με το μετρητή στάθμης τριών καταστάσεων στον οποίο η ωφέλιμη χωρητικότητα παριστάνεται ως αποθηκευμένη ενέργεια με τη μορφή φόρτισης (RSoH) το μέρος που μπορεί να γεμίσει ως κενό και το άχρηστο μέρος που δεν μπορεί να αποκατασταθεί ως dud. Οι μετρητές στάθμης τριών καταστάσεων χρησιμοποιούνται σπάνια λόγω φόβου για αυξημένες απαιτήσεις εγγύησης. Ορισμένες συσκευές προσφέρουν έναν κωδικό πρόσβασης έτσι ώστε το προσωπικό σέρβις να έχει την δυνατότητα να διαβάσει το SoF.



Εικόνα 6.3 Σχέση της κατάστασης της υγείας της μπαταρίας και της κατάστασης φόρτισης.

Ορισμός:

SoH: Κατάσταση υγείας. Γενικός όρος για την υγεία της μπαταρίας. Η χωρητικότητα είναι ο κορυφαίος δείκτης υγείας..

ASoH: Απόλυτη κατάσταση υγείας μιας νέας μπαταρίας.

RSoH: Σχετική κατάσταση υγείας σχετικά με τη διαθέσιμη ικανότητα

SoC: Κατάσταση φόρτισης. Γενικός όρος για επίπεδο φόρτισης..

ASoC: Απόλυτη κατάσταση φόρτισης μιας νέας μπαταρίας

RSoC: Σχετική κατάσταση φόρτισης, επίπεδο φόρτισης με εξασθενημένη χωρητικότητα.

6.2. Τρόποι μέτρησης μπαταριών.

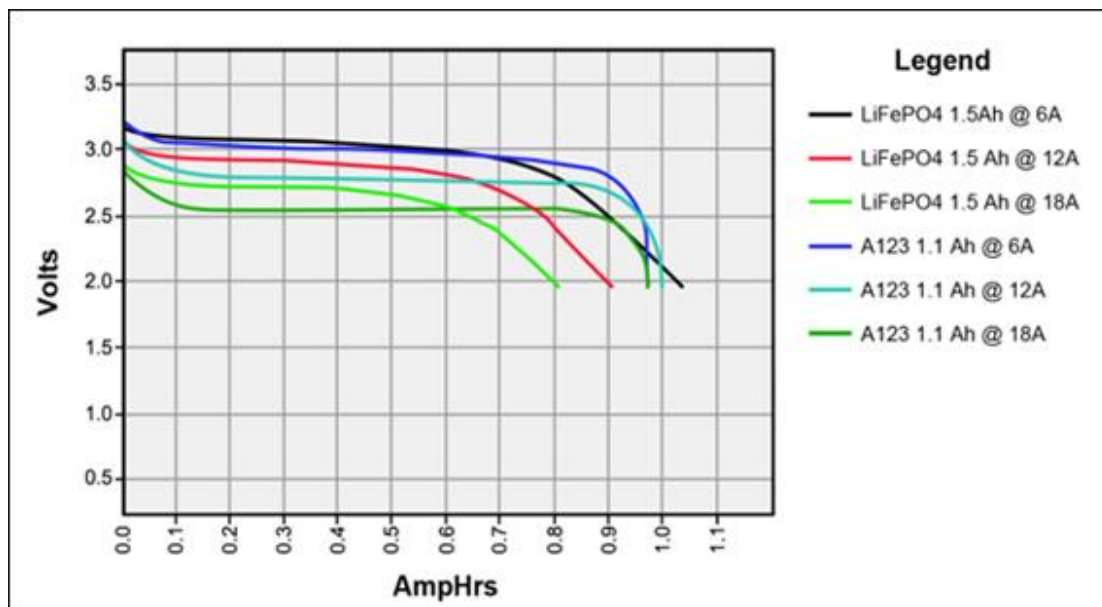
Μια μπαταρία μοιάζει με ζωντανό οργανισμό που δεν μπορεί να μετρηθεί, εκτιμάται μόνο από διαγνωστικά παρόμοια με έναν γιατρό που εξετάζει έναν ασθενή. Η ακρίβεια της ταχείας δοκιμής ποικίλλει ανάλογα με τα συμπτώματα που αλλάζουν με την κατάσταση φόρτισης (SoC), την ανάδευση μετά τη φόρτιση και την εκφόρτιση, τη θερμοκρασία και την αποθήκευση. Μια γρήγορη δοκιμή πρέπει να μπορεί να διακρίνει μεταξύ μιας καλής μπαταρίας που είναι μερικώς φορτισμένη και μιας αδύναμης που είναι πλήρως φορτισμένη. Και οι δύο θα προσφέρουν παρόμοιους χρόνους εκτέλεσης στα χέρια του χρήστη αλλά έχουν διαφορετικά επίπεδα απόδοσης. Ο κύριος δείκτης υγείας μιας μπαταρίας είναι η χωρητικότητα. Η χωρητικότητα αντιπροσωπεύει την αποθήκευση ενέργειας, μια ποιότητα που σταδιακά και μόνιμα εξασθενίζει με τη χρήση. Άλλα χαρακτηριστικά υπεύθυνα για το SoH είναι η εσωτερική αντίσταση που ρυθμίζει το ρεύμα φορτίου και την αυτοεκφόρτιση που εξετάζει τη μηχανική ακεραιότητα. Και τα τρία χαρακτηριστικά πρέπει να πληρούνται για να δώσουν μια μπαταρία καθαρό λογαριασμό υγείας. Η εκτίμηση της χωρητικότητας της χημικής μπαταρίας εν κινήσει είναι πιο περίπλοκη. Αυτό περιλαμβάνει αλγόριθμους και πίνακες που χρησιμεύουν ως πίνακες αναζήτησης παρόμοιοι με την αναγνώριση γραμμάτων ή προσώπων. Οι σύγχρονες μέθοδοι ταχείας δοκιμής κινούνται προς την προηγμένη μηχανική εκμάθηση, αποτυπώνοντας τις πολλές διαθέσεις μιας μπαταρίας.^[73]

Ακολουθεί μια σύνοψη απλών έως πολύπλοκων μεθόδων δοκιμής για την εξέταση μπαταριών.

- **Μετρήση της κατάστασης φόρτισης**^[70]
 - Μέθοδος τάσης

Η μέτρηση της κατάστασης φόρτισης με τάση είναι απλή, αλλά μπορεί να είναι ανακριβής επειδή τα υλικά και η θερμοκρασία των κυττάρων επηρεάζουν την τάση.

Το πιο εμφανές σφάλμα του SoC με βάση την τάση παρουσιάζεται όταν διαταράσσεται μια μπαταρία με φόρτιση ή εκφόρτιση. Η αναταραχή που προκύπτει παραμορφώνει την τάση και δεν αντιπροσωπεύει πλέον σωστή αναφορά SoC. Για ακριβείς μετρήσεις, η μπαταρία πρέπει να ξεκουραστεί σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος για τουλάχιστον τέσσερις ώρες. Οι κατασκευαστές μπαταριών συνιστούν 24 ώρες για το μόλυβδο. Αυτό καθιστά τη μέθοδο SoC με βάση την τάση ανέφικτη για μια μπαταρία σε ενεργή λειτουργία.



Εικόνα 6.4 Τάση εκφόρτισης λιθίου σιδήρου φωσφόρου.

○ Υδρόμετρο

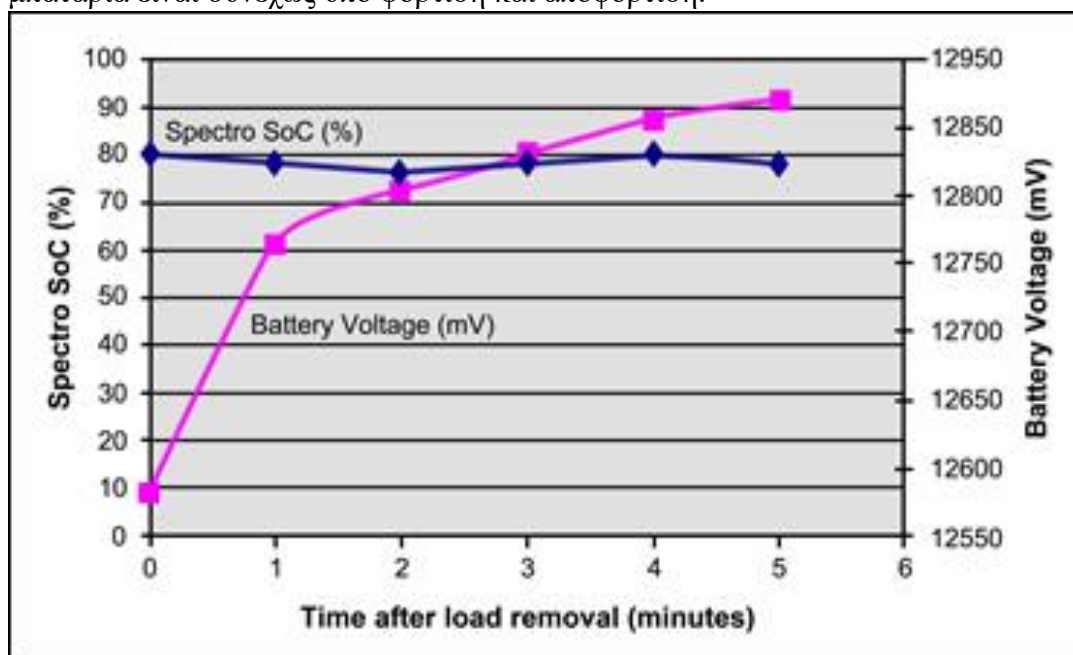
Το υδρόμετρο προσφέρει μια εναλλακτική λύση για τη μέτρηση SoC των πλημμυρισμένων μπαταριών μολύβδου. Εδώ είναι πώς λειτουργεί: Όταν η μπαταρία μολύβδου οξέος δέχεται φόρτιση, το θεικό οξύ γίνεται βαρύτερο, προκαλώντας την αύξηση του συγκεκριμένου βάρους (SG). Καθώς το SoC μειώνεται μέσω της εκφόρτισης, το θεικό οξύ απομακρύνεται από τον ηλεκτρολύτη και συνδέεται στην πλάκα, σχηματίζοντας θεικό μόλυβδο. Η πυκνότητα του ηλεκτρολύτη γίνεται ελαφρύτερη και πιο όμοια με το νερό και το ειδικό βάρος μειώνεται.

○ Καταμέτρηση Coulomb

Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη ανάλυση απόδοσης είναι η καταμέτρηση coulomb στην οποία μετρώνται ενέργειες εισερχόμενες και εκτός ροής. Η μέτρηση του Coulomb ξεκινά 250 χρόνια όταν ο Charles-Augustin de Coulomb καθιέρωσε για πρώτη φορά τον «Κανόνα Coulomb». Η μέτρηση coulomb έχει το δικό της πρόβλημα χάνοντας την ακρίβεια όταν η μπαταρία φορτίζεται και αποφορτίζεται τυχαία. Η εκτίμηση της κατάστασης της υγείας (SoH) από μια ψηφιακή λύση είναι ατελής χωρίς να περιλαμβάνεται η χημική μπαταρία.

- Φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης

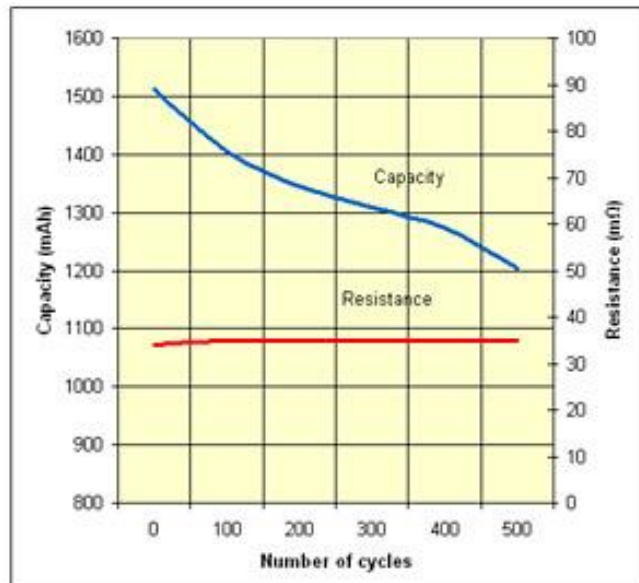
Η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας μπορεί επίσης να εκτιμηθεί με φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μοντελοποίησης Spectro™ complex. Αυτό επιτρέπει τη λήψη μετρήσεων SoC με σταθερό παρασιτικό φορτίο 30A. Η πώλωση τάσης και το επιφανειακό φορτίο δεν επηρεάζουν την ένδειξη καθώς το SoC μετράται ανεξάρτητα από την τάση. Αυτό ανοίγει εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία όπου ορισμένες μπαταρίες αποφορτίζονται περισσότερο από άλλες κατά τη δοκιμή και τον εντοπισμό σφαλμάτων και χρειάζονται φόρτιση πριν από τη μεταφορά. Η μέτρηση του SoC με φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για συστήματα ισοστάθμισης φορτίου όπου η μπαταρία είναι συνεχώς υπό φόρτιση και αποφόρτιση.



Εικόνα 6.5 Σχέση τάσης και μετρήσεις που λαμβάνονται με φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης μετά την αφαίρεση φορτίου.

- Μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης.^[71]

Η εσωτερική αντίσταση παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με μια μπαταρία, καθώς οι υψηλές ενδείξεις ανάγνωσης στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για συστήματα με βάση το νικέλιο. Η μέτρηση αντίστασης δεν είναι ο μόνος δείκτης απόδοσης καθώς η τιμή μεταξύ των παρτίδων μπαταριών μολύβδου οξέος μπορεί να κυμαίνεται κατά 5-10 τοις εκατό, ειδικά με σταθερές μονάδες. Λόγω αυτής της ευρείας ανοχής, η μέθοδος αντίστασης λειτουργεί καλύτερα κατά τη σύγκριση των μετρήσεων μιας δεδομένης μπαταρίας από τη δημιουργία έως τη απόσυρση. Οι ομάδες που ασχολούνται με το σέρβις καλούνται να τραβήξουν ένα στιγμιότυπο κάθε κελιού ή μονομπλόκ κατά τη στιγμή της εγκατάστασης και στη συνέχεια να μετρήσουν τις λεπτές αλλαγές καθώς τα κελιά “γερνούν”.



Εικόνα 6.6 Σχέση μεταξύ χωρητικότητας και αντίστασης προς τον αριθμό κύκλων φόρτισης.

Πριν δούμε όμως τις διάφορες μεθόδους μέτρησης της εσωτερικής αντίστασης μιας μπαταρίας, ας εξετάσουμε τι σημαίνει ηλεκτρική αντίσταση και κατανοήσουμε τη διαφορά μεταξύ της καθαρής αντίστασης (R) και της σύνθετης αντίστασης (Z). Το R είναι καθαρή αντίσταση και το Z περιλαμβάνει αντιδραστικά στοιχεία όπως πηνία και πυκνωτές. Και οι δύο μετρήσεις λαμβάνονται σε ohms (Ω), μια μέτρηση που επιστρέφει στον Γερμανό φυσικό Georg Simon Ohm, ο οποίος έζησε από το 1798 έως το 1854. (Ένα ω παράγει πτώση τάσης 1V με ρεύμα 1A.) Η ηλεκτρική αγωγιμότητα μετριέται επίσης σε siemens (s) που είναι αμοιβαία με ωμικές τιμές.

Η ηλεκτρική αντίσταση ενός καθαρού φορτίου, όπως ένα θερμαντικό στοιχείο, δεν έχει αντίσταση. Τάση και ρεύμα ροής ταυτόχρονα και δεν υπάρχει προχωρημένη ή τελική φάση. Η ωμική αντίσταση είναι η ίδια με συνεχές ρεύμα (DC) και εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Ο συντελεστής ισχύος (pf) είναι 1, παρέχοντας την πιο ακριβή μέτρηση της καταναλισκόμενης ισχύος.

Τα περισσότερα ηλεκτρικά φορτία είναι αντιδραστικά και αποτελούνται από χωρητική αντίδραση (πυκνωτής) και επαγωγική αντίδραση (πηνίο). Η χωρητική αντίδραση μειώνεται με υψηλότερη συχνότητα ενώ η επαγωγική αντίδραση αυξάνεται. Μια αναλογία επαγωγικής αντιδραστικότητας είναι ένας αποσβεστήρας λαδιού που σκληραίνει κατά την εφαρμογή μιας γρήγορης δράσης εμπρός και πίσω. Μια μπαταρία έχει αντίσταση, χωρητικότητα και αυτεπαγωγή, και ο όρος σύνθετη αντίσταση περιλαμβάνει και τα τρία σε ένα μοντέλο.

ο Μέθοδος φορτίου DC

Η ωμική μέτρηση είναι μία από τις παλαιότερες και πιο αξιόπιστες μεθόδους δοκιμής. Η μπαταρία λαμβάνει μια σύντομη εκφόρτιση για ένα δευτερόλεπτο ή περισσότερο. Το ρεύμα φόρτωσης για μια μικρή μπαταρία είναι 1A ή λιγότερο. Για μια μπαταρία εκκίνησης μπορεί να είναι 50A ή περισσότερο. Ένα βολτόμετρο μετρά την τάση ανοιχτού κυκλώματος (OCV) χωρίς φορτίο, ακολουθούμενη από τη δεύτερη ανάγνωση με φορτίο. Ο νόμος του Ohm υπολογίζει την τιμή αντίστασης (διαφορά τάσης δια του ρεύματος ισούται με αντίσταση).

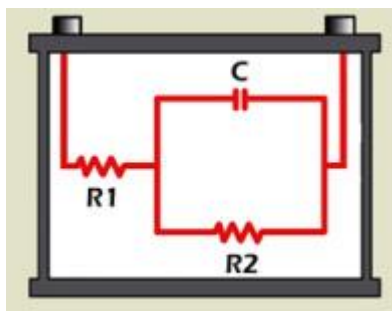
Οι μετρήσεις φορτίου DC λειτουργούν καλά για τον έλεγχο μεγάλων σταθερών μπαταριών και οι ωμικές ενδείξεις της συσκευής είναι πολύ ακριβείς και επαναλαμβανόμενες. Τα όργανα δοκιμής υψηλών προδιαγραφών απαιτούν μετρήσεις αντίστασης στην περιοχή των 10 μικρο-Ωμ. Πολλά συνεργεία χρησιμοποιούν το σωρό άνθρακα για τη μέτρηση των μπαταριών εκκίνησης και ένας έμπειρος μηχανικός παίρνει μια αρκετά καλή αξιολόγηση της μπαταρίας.

- Μέθοδος αγωγιμότητας AC

Η μέτρηση της αγωγιμότητας για την αξιολόγηση των αρχικών μπαταριών αναφέρθηκε για πρώτη φορά από τον Keith Champlin το 1975 καταδεικνύοντας μια γραμμική συσχέτιση μεταξύ δοκιμής φορτίου και αγωγιμότητας. Κατά την έγχυση συχνότητας περίπου 90 hertz, η χωρητική και επαγωγική αντίδραση συγκλίνουν με μπαταρία μολύβδου οξέος 70–90Ah, με αποτέλεσμα μια αμελητέα καθυστέρηση τάσης που ελαχιστοποιεί την αντίδραση. (Αυτή η συχνότητα αυξάνεται με μια μικρότερη μπαταρία και πέφτει με μια μεγάλη.) Οι μετρητές αγωγιμότητας AC χρησιμοποιούνται συνήθως στα συνεργεία αυτοκινήτων για τη μέτρηση της CCA.

- Ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης (EIS)

Τα ερευνητικά εργαστήρια χρησιμοποιούν EIS εδώ και πολλά χρόνια για να αξιολογήσουν τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας. Το υψηλό κόστος εξοπλισμού, οι αργοί χρόνοι δοκιμών και η ανάγκη για εκπαιδευμένους επαγγελματίες να αποκρυπτογραφήσουν τον μεγάλο όγκο δεδομένων έχουν περιορίσει αυτήν την τεχνολογία σε εργαστηριακά περιβάλλοντα. Το EIS διαβάζει τις τιμές R1, R2 και C στο μοντέλο Randles, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. Ωστόσο, η συσχέτιση των δεδομένων σε CCA και οι εκτιμήσεις χωρητικότητας απαιτεί πολύπλοκη μοντελοποίηση.



Εικόνα 6.7 Μέθοδος Spectro™. Τα R1, R2 και C μετρώνται ξεχωριστά, γεγονός που επιτρέπει μετρήσεις κατάστασης φόρτισης και χωρητικότητας.

- **Μέτρηση της χωρητικότητας**^[72]

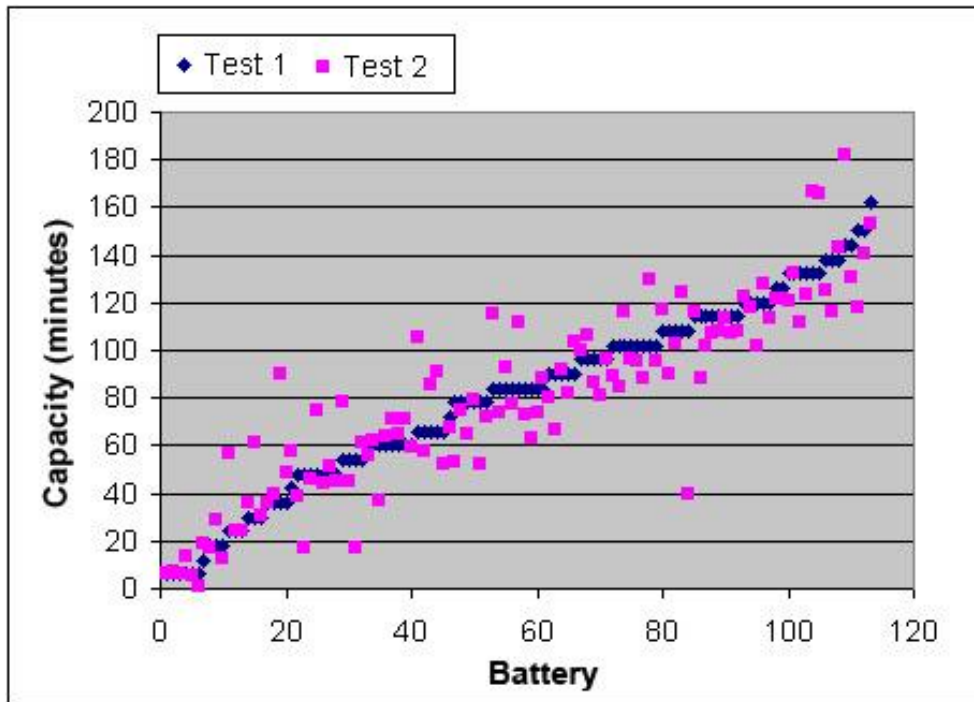
Η χωρητικότητα είναι ο κορυφαίος δείκτης υγείας μιας μπαταρίας, αλλά η εκτίμησή της εν κινήσει είναι περίπλοκη. Ο παραδοσιακός κύκλος φόρτισης / εκφόρτισης / φόρτισης εξακολουθεί να είναι η πιο αξιόπιστη μέθοδος μέτρησης της χωρητικότητας της μπαταρίας. Ενώ οι φορητές μπαταρίες μπορούν να περιστραφούν σχετικά γρήγορα, ένας πλήρης κύκλος σε μεγάλες μπαταρίες οξέος μολύβδου δεν είναι πρακτικός για τη μέτρηση χωρητικότητας.

Το SAE (Society of Automotive Engineers) καθορίζει τη χωρητικότητα μιας αρχικής μπαταρίας από την Reserve Capacity (RC). Το RC αντανακλά τον χρόνο εκτέλεσης σε λεπτά με σταθερή εκφόρτιση 25A. Οι DIN (Deutsches Institut für Normung) και IEC (Διεθνής Ηλεκτροχημική Επιτροπή) σηματοδοτούν την μπαταρία στο Ah με τυπική εκφόρτιση 0,2C-rate (5h eat) για αρχικές μπαταρίες. Μια μπαταρία 60Ah θα αποφορτιστεί στα 12A. Δεν υπάρχει ακριβής μετατροπή RC σε Ah, αλλά ο πιο συνηθισμένος τύπος είναι RC διαιρούμενος με 2 συν 16. Μια σύντομη μέθοδος είναι ο διαχωρισμός RC με 1,9.

- Μέθοδος απαλλαγής

Θα μπορούσε κανείς να υποθέσει ότι η μέτρηση χωρητικότητας με εκφόρτιση είναι η πιο ακριβής μέθοδος, αλλά αυτό δεν συμβαίνει πάντα, ειδικά με μπαταρίες μολύβδου. Ακόμη και όταν χρησιμοποιείτε εξαιρετικά ακριβή εξοπλισμό σε περιβάλλον ελεγχόμενης θερμοκρασίας και σύμφωνα με τα καθιερωμένα πρότυπα φόρτισης και εκφόρτισης, εμφανίζονται παραλλαγές μεταξύ πανομοιότυπων δοκιμών. Οι χημικές ουσίες με βάση το λίθιο και το νικέλιο παρέχουν πιο συνεπή αποτελέσματα εκφόρτισης από το μολύβδο.

Τα εργαστήρια της Cadex έλεγξαν 91 μπαταρίες εκκίνησης με διαφορετικά επίπεδα απόδοσης και τα αποτελέσματα απεικονίζονται παρακάτω. Ο οριζόντιος άξονας X παρουσιάζει τις μπαταρίες από αδύναμες έως ισχυρές και ο κατακόρυφος άξονας y αντικατοπτρίζει τη χωρητικότητα. Οι δοκιμές ακολούθησαν τα πρότυπα SAE J537 εφαρμόζοντας πλήρη φόρτιση και 24ωρη ανάπαυση, ακολουθούμενη από ρυθμιζόμενη εκφόρτιση 25A έως 10,50V (1,75V / cell). Τα αποτελέσματα σε διαμάντια αντιπροσωπεύουν τη δοκιμή 1. Η δοκιμή επαναλήφθηκε υπό πανομοιότυπες συνθήκες και οι ικανότητες που φαίνονται στα τετράγωνα χαρακτηρίζουν τη δοκιμή 2. Μόνο εντός ημερών μεταξύ τους, οι δοκιμές 1 και 2 διαφέρουν πολύ κατά μέσο όρο +/- 15%. Άλλα εργαστήρια παρατηρούν παρόμοιες αποκλίσεις.

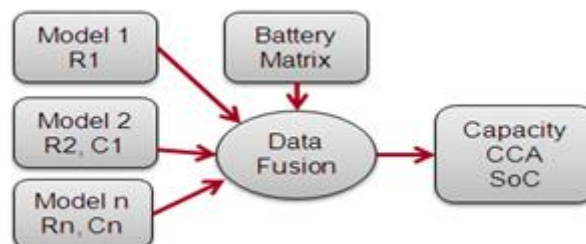


Εικόνα 6.8 Διακυμάνσεις χωρητικότητας σε δύο ίδιες δοκιμές φόρτισης/εκφόρτισης 91 μπαταριών.

- Μη επεμβατική μέθοδος

Το Spectro™ (από την Cadex) χρησιμοποιεί φασματοσκοπία ηλεκτροχημικής σύνθετης αντίστασης πολλαπλών μοντέλων (EIS) που ελέγχει την υγεία της μπαταρίας σε δευτερόλεπτα με μια διαδικασία σάρωσης. Η μη επεμβατική τεχνολογία συνδυάζει το EIS με πολύπλοκη μοντελοποίηση για την εκτίμηση της χωρητικότητας, CCA και SoC με τη βοήθεια πινάκων, επίσης γνωστών ως πίνακες αναζήτησης. Εδώ είναι πώς λειτουργεί:

Ένα ημιτονοειδές σήμα πολλαπλών συχνοτήτων εγχύεται στην μπαταρία σε λίγα χιλιοστά. Μετά το ψηφιακό φιλτράρισμα, το εξαγόμενο σήμα σχηματίζει μια γραφική παράσταση Nyquist πάνω στην οποία τοποθετούνται διάφορα ηλεκτροχημικά μοντέλα. Το Spectro™ επιλέγει τα καλύτερα μοντέλα που ταιριάζουν. απορρίπτονται μη κατάλληλα αντίγραφα. Στη συνέχεια, η συγχώνευση δεδομένων συσχετίζει τις τιμές των βασικών παραμέτρων που προκύπτουν σε εκτιμήσεις χωρητικότητας και CCA. Το σχήμα που ακολουθεί απεικονίζει την πατενταρισμένη διαδικασία με απλοποιημένο τρόπο.



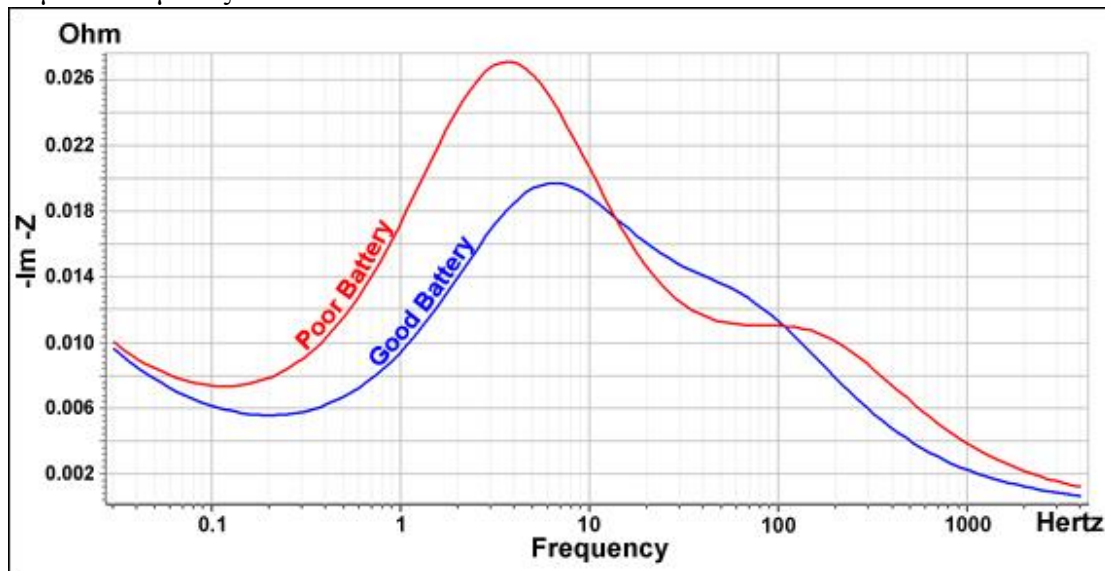
Εικόνα 6.9 Το Spectro™ συνδυάζει EIS με πολύπλοκη μοντελοποίηση για την εκτίμηση της χωρητικότητας της μπαταρίας και τη βελτίωση των μετρήσεων CCA.

- **Μέθοδοι ταχείας δοκιμής.** ^[73]

Οι περισσότερες μέθοδοι ταχείας δοκιμής βασίζονται σε *τομέα χρόνου* ή *τομέα συχνότητας*. Ο τομέας χρόνου διεγείρει την μπαταρία με παλμούς για να παρατηρήσει τη ροή ιόντων των μπαταριών ιόντων λιθίου. Ο τομέας συχνότητας σαρώνει την μπαταρία με πολλές συχνότητες για να δημιουργήσει ένα διάγραμμα Nyquist για ανάλυση. Και οι δύο μέθοδοι απαιτούν σύνθετους αλγόριθμους με παραμέτρους ή πίνακες που χρησιμεύουν ως πίνακες αναζήτησης.

Κανένα τεστ δεν μπορεί να καταγράψει όλους τους δείκτες υγείας μιας μπαταρίας. Πολλές συσκευές ταχείας δοκιμής βλέπουν μόνο τάση και εσωτερική αντίσταση. Ενώ η απώλεια χωρητικότητας ενός εξασθετισμένου NiCd ή NiMH μπορεί να σχετίζεται με την αύξηση της εσωτερικής αντίστασης, αυτή η σχέση είναι λιγότερο εμφανής με μπαταρίες λιθίου και μολύβδου. Η εκτίμηση της ικανότητας διαφήμισης με έναν ελεγκτή που μετρά μόνο την τάση και την εσωτερική αντίσταση μπορεί να είναι παραπλανητική. Μπερδεύει τη βιομηχανία να πιστεύει ότι πολύπλοκα αποτελέσματα είναι εφικτά με απλοϊκές μεθόδους. Τα όργανα με βάση την αντίσταση θα αναγνωρίζουν πράγματι μια μπαταρία που έχει πεθάνει ή έχει πεθάνει. αλλά και ο χρήστης.

Η μπαταρία είναι μια αντιδραστική συσκευή και η μέθοδος με την οποία λαμβάνονται οι μετρήσεις αντίστασης έχει σημασία. Μια μέτρηση DC εξετάζει καθαρές τιμές αντίστασης, ενώ το AC περιλαμβάνει αντιδραστικά συστατικά που παρέχουν πρόσθετες πληροφορίες. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η σύνθετη αντίσταση μιας καλής και ξεθωριασμένης μπαταρίας ιόντων λιθίου όταν σαρώνεται με εναλλασσόμενο ρεύμα από 0,1Hz έως 1kHz. Οι ισχυρότερες διακυμάνσεις στην σύνθετη αντίσταση ($-Im-Z$) παρατηρούνται στην κλίμακα χαμηλής συχνότητας που κυμαίνεται μεταξύ 1Hz και 10Hz.



Εικόνα 6.10 Σάρωση συχνοτήτων μιας καλής και μιας αδύναμης μπαταρίας κινητού τηλεφώνου.

- **Σύστημα διαχείρισης μπαταριών (BMS)** ^[73]

Τα Συστήματα Διαχείρισης Μπαταριών εκτιμούν το SoC παρακολουθώντας την τάση, το ρεύμα και τη θερμοκρασία. Μερικά BMS για Li-ion μετρούν επίσης coulombs. Ένα BMS μπορεί να εντοπίσει ένα ελάττωμα της μπαταρίας, αλλά δεν μπορεί να εκτιμήσει με ακρίβεια τη χωρητικότητα.

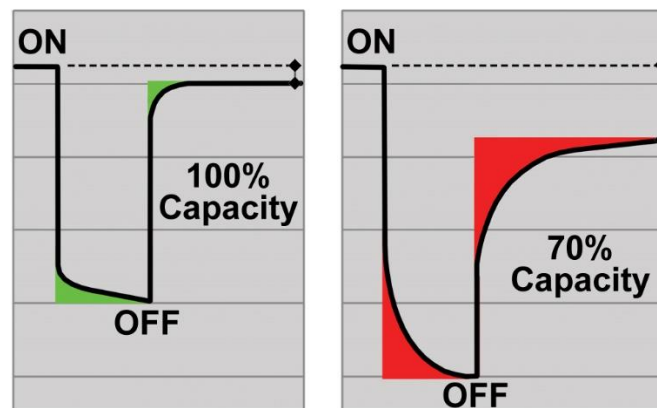
- **Ειδικό μοντέλο γρήγορης ταξινόμησης (QSMS)** ^[73]

Το QSMS παρατηρεί διαφορά στις τιμές αντίστασης κατά την αξιολόγηση μιας μπαταρίας με μεθόδους DC και AC. Για παράδειγμα, η αντίσταση του ιόντος λιθίου σε μια κυψέλη 18650 είναι περίπου 110mOhm με μέτρηση DC και περίπου 36mOhm με σήμα AC 1000Hz. Η διακύμανση μεταξύ των δύο μετρήσεων παρέχει πληροφορίες απόδοσης σε σύγκριση με τις παραμέτρους της μπαταρίας που είναι αποθηκευμένες σε έναν πίνακα αναζήτησης.

Ο αλγόριθμος είναι σχετικά απλός και ο χρόνος δοκιμής είναι μικρός, αλλά η εφοδιαστική της δημιουργίας των παραμέτρων που προέρχονται από καλές, οριακές και κακές μπαταρίες αυξάνει την πολυπλοκότητα. Το QSMS είναι μία από τις πολλές μεθόδους ταχείας δοκιμής που έχει αναπτύξει η Cadex για την ταξινόμηση των μπαταριών κινητών τηλεφώνων εν κινήσει.

- **Ηλεκτροχημική δυναμική απόκριση (EDR)** ^[73]

Το EDR μετρά την κινητικότητα της ροής ιόντων μεταξύ των ηλεκτροδίων εφαρμόζοντας παλμούς φορτίου και αξιολογώντας το χρόνο απόκρισης κατά την επίθεση και ανάκτηση. Οι χρόνοι ανάκτησης συγκρίνονται με αποθηκευμένες παραμέτρους που σχετίζονται με την απόδοση της μπαταρίας. Η παρακάτω εικόνα μας δείχνει μια καλή μπαταρία που είναι σταθερή και έχει γρήγορη ανάκτηση έναντι μιας αδύναμης μπαταρίας που δείχνει απαλότητα και έχει αργή ανάκαμψη.



Εικόνα 6.11 Ηλεκτροχημική δυναμική απόκριση. Το EDR μετρά τη ροή ιόντων μεταξύ των θετικών και αρνητικών πλακών. Μια ισχυρή μπαταρία ανακάμπτει γρήγορα από μια επίθεση, ενώ μια πιο αδύναμη είναι σαφώς πιο αργή.

- **Εξοπλισμός δοκιμής μπαταρίας^[74]**

Η ενέργεια που κρατά μια μπαταρία μπορεί να μετρηθεί με έναν αναλυτή μπαταρίας εφαρμόζοντας μια πλήρη εκφόρτιση. Η μπαταρία φορτίζεται πρώτα και στη συνέχεια αποφορτίζεται με ελεγχόμενο ρεύμα, ενώ μετράται ο χρόνος για να φτάσει στο σημείο τελικής εκφόρτισης. Η χωρητικότητα 100% παρέχει το καθορισμένο Ah. 50% εμφανίζεται αν ο χρόνος εκφόρτισης μειωθεί στο μισό.

Η μέτρηση της χωρητικότητας με εκφόρτιση παρέχει την πιο αξιόπιστη αξιολόγηση, μια μέθοδο που είναι πιο αποτελεσματική με φορητές μπαταρίες. Μια περιοδική ανάλυση διασφαλίζει ότι οι μπαταρίες διατηρούνται εντός ενός αποδεκτού εύρους απόδοσης και ζητά την αντικατάσταση εάν η χωρητικότητα είναι κάτω από το απαιτούμενο όριο στόχου και δεν μπορεί πλέον να αυξηθεί. Οι μεγαλύτερες μπαταρίες συνήθως δεν είναι κύκλοι καθώς αυτό είναι χρονοβόρο και τονίζει την μπαταρία. Εκεί μπαίνουν μη επεμβατικές μέθοδοι δοκιμής.

Οι τεχνικοί δοκιμάζουν πιο άνετα μια μπαταρία με βολτόμετρο. Οι ενδείξεις χημείας, τάσης και Ah στην μπαταρία συχνά δεν είναι καλά κατανοητές, ούτε οι υπεύθυνοι συντήρησης είναι σίγουροι τι πρέπει να αναζητήσουν σε μια μπαταρία. Πολλά φορητά πακέτα έχουν πολλαπλές συνδέσεις με ασαφείς ενδείξεις. Ο δισταγμός είναι κατανοητός καθώς οι μπαταρίες έρχονται σε πολλές χημείες και ποικίλουν σε μέγεθος από νόμισμα έως εγκαταστάσεις που γεμίζουν ολόκληρο το κτίριο. Μια ένδειξη τάσης δίνει άμεσα αποτελέσματα δείχνοντας ότι κάτι είναι ζωντανό και μια σύντομη φόρτωση επαληθεύει την ισχύ, αλλά αυτό δεν διασφαλίζει τη συνεχή παράδοση που είναι τόσο κρίσιμη σε μια μπαταρία.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα μέρη του εξοπλισμού που θα μας βοηθήσουν στην αξιολόγηση μπαταριών.

- **Αναλυτής μπαταρίας**

Οι αναλυτές μπαταριών έγιναν δημοφιλείς τη δεκαετία του 1980 και του 1990 για την επαναφορά μπαταριών νικελίου-καδμίου που επηρεάστηκαν από τη «μνήμη».

Σήμερα, αυτά τα εργαστήρια χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ενός ευρέος φάσματος μπαταριών ως μέρος της διαχείρισης του στόλου και τη διασφάλιση της ακεραιότητας του συστήματος. Απαιτείται περιοδική ανάλυση μπαταρίας, επειδή οι μπαταρίες τείνουν να έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής από τον κεντρικό υπολογιστή που τροφοδοτεί. Οι αναλυτές μπαταριών ενεργούν ως φύλακες για να αποσύρουν τα πακέτα όταν πέφτουν κάτω από ένα καθορισμένο κριτήριο απόδοσης.



Εικόνα 6.12 Παράδειγμα αναλυτή μπαταρίας.

Το πιο συνηθισμένο πρόγραμμα είναι αυτόματο που φορτίζει μια μπαταρία, εφαρμόζει μια απαλλαγή για τη μέτρηση της χωρητικότητας και ολοκληρώνει το πρόγραμμα με τελική φόρτιση. Άλλα προγράμματα περιλαμβάνουν ρύθμιση Custom για να τοποθετήσετε την μπαταρία σε μια μοναδική επιλογή φόρτισης, εκφόρτισης, αναμονής και επανάληψης. Το πρόγραμμα κύκλου ζωής φορτίζει και αποφορτίζει την μπαταρία έως ότου η χωρητικότητα μειωθεί στην προκαθορισμένη χωρητικότητα στόχου ενώ μετράει τους κύκλους. Αυτό το πρόγραμμα χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αντοχής της μπαταρίας.

ο Λογισμικό υπολογιστή

Ένας αναλυτής μπαταριών δεν θα ήταν πλήρης χωρίς διαισθητικό λογισμικό. Με το λογισμικό, ο υπολογιστής γίνεται το κέντρο εντολών και εμφανίζει τα χαρακτηριστικά φόρτισης και εκφόρτισης σε πραγματικό χρόνο. Κάνοντας κλικ στο ποντίκι σε οποιαδήποτε από τις 3.000 μπαταρίες που αναφέρονται στη βάση δεδομένων ή σύροντας τον γραμμικό κώδικα στην ετικέτα μπαταρίας διαμορφώνεται ο αναλυτής.



Εικόνα 6.13 Πλήρες σύστημα ανάλυσης μπαταριών.

- ο Συστήματα δοκιμής μπαταρίας

Τέλος, ενώ οι αναλυτές μπαταριών ελέγχουν τις μπαταρίες σε λειτουργία και προβλέπουν αντικατάσταση, τα συστήματα δοκιμών μπαταριών παρέχουν λειτουργίες δοκιμής πολλαπλών χρήσεων για ερευνητικά εργαστήρια. Οι τυπικές εφαρμογές είναι ο έλεγχος κύκλου ζωής για την προσομοίωση της φόρτωσης της μπαταρίας και της επαλήθευσης της αντοχής στο πεδίο, καθώς και ο έλεγχος της ισορροπίας κυττάρων ενός πακέτου πολλαπλών κυψελών σε προσομοίωση πεδίου. Αυτές οι δοκιμές μπορούν να αυτοματοποιηθούν πλήρως με ένα προσαρμοσμένο πρόγραμμα που συνθέτει ο χρήστης.



Εικόνα 6.14 Σύστημα δοκιμής μπαταριών κινητών τηλεφώνων, φορητών υπολογιστών και ηλεκτρικών εργαλείων.

6.3. Αξιολόγηση μπαταριών με το LabVIEW

Όπως είδαμε παραπάνω ένας από τους πιο αποδοτικούς τρόπους ανάλυσης της ζωής μιας επαναφορτιζόμενης μπαταρίας είναι η ο συνδυασμός της χρήσης οργάνων και του κατάλληλου λογισμικού σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Για το λόγο αυτό λοιπόν κατά την διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας δημιουργήθηκε πειραματική μέθοδος που αυτοματοποιημένα θα φορτίζει και θα εκφορτίζει πλήρως τις μπαταρίες και θα αποθηκεύει τα δεδομένα της κάθε ενέργειας με σκοπό την αξιολόγηση μπαταριών μέσω της μελέτης και ανάλυσης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν σε βάθος χρόνου. Για την υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε όργανα και εξοπλισμός του Εργαστηρίου Αυτόνομων Υπολογιστικών Συστημάτων του Πανεπιστημίου και για τον έλεγχο της λειτουργίας τους επιλέχθηκε το πρόγραμμα LabVIEW της National Instruments. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα επιλέχθηκε κυρίως για την μεγάλη υποστήριξη και την πλούσια σε drivers βάση δεδομένων που έχει η εταιρία. Για τα όργανα δημιουργήθηκε block διάγραμμα που υλοποιούσε την σύνδεση, αρχικοποίηση, έλεγχο και λήψη μετρήσεων από το όργανο. Η σύνδεση των οργάνων έγινε με USB και RS232. Μέσω του LabVIEW η σύνδεση των οργάνων γίνεται με το πρωτόκολλο NI-Visa της ίδιας εταιρίας.

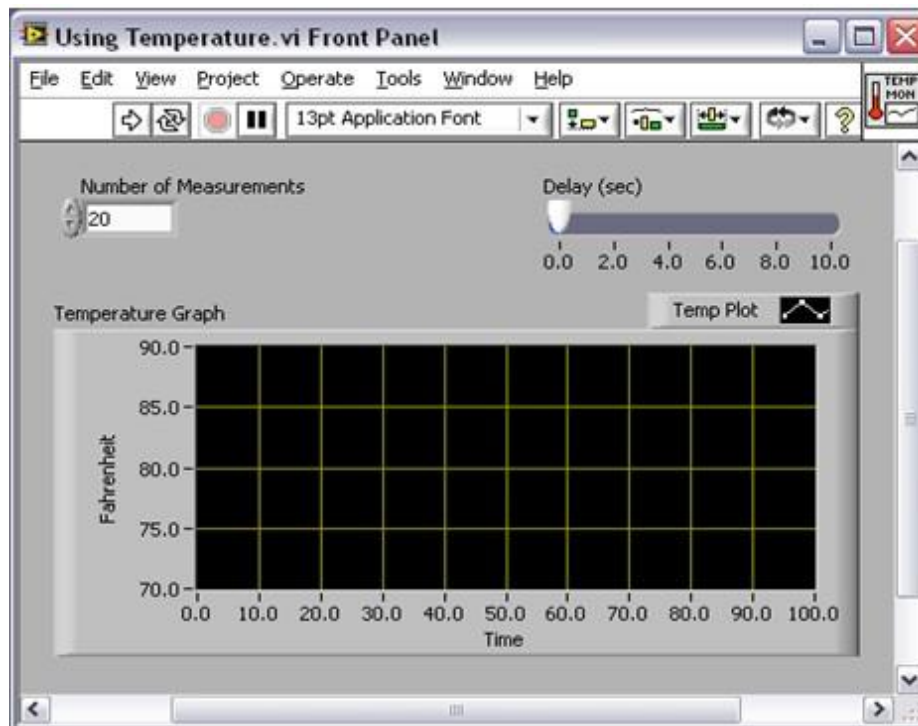
Λίγα λόγια για το LabVIEW:

Το LabVIEW(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)^[76] είναι μια πλατφόρμα σχεδιασμού συστήματος και ένα περιβάλλον ανάπτυξης για μια οπτική γλώσσα προγραμματισμού από την National Instruments. Η γραφική γλώσσα ονομάζεται "G". Η γλώσσα ροής δεδομένων G αναπτύχθηκε αποκλειστικά για το LabVIEW^[77], Το LabVIEW χρησιμοποιείται συνήθως για την απόκτηση δεδομένων, τον έλεγχο οργάνων , και των βιομηχανικών αυτοματισμών σε μια ποικιλία λειτουργικών συστημάτων (ΛΣ), συμπεριλαμβανομένων των Microsoft Windows όπως επίσης και διάφορες εκδόσεις του Unix , Linux , και macOS. Οι τελευταίες εκδόσεις του LabVIEW είναι LabVIEW 2020 και LabVIEW NXG 5.0, κυκλοφόρησαν τον Μάιο του 2020. ^[78] Η NI κυκλοφόρησε τις δωρεάν εκδόσεις για μη εμπορική χρήση LabVIEW και LabVIEW NXG Community στις 28 Απριλίου 2020. ^[79]

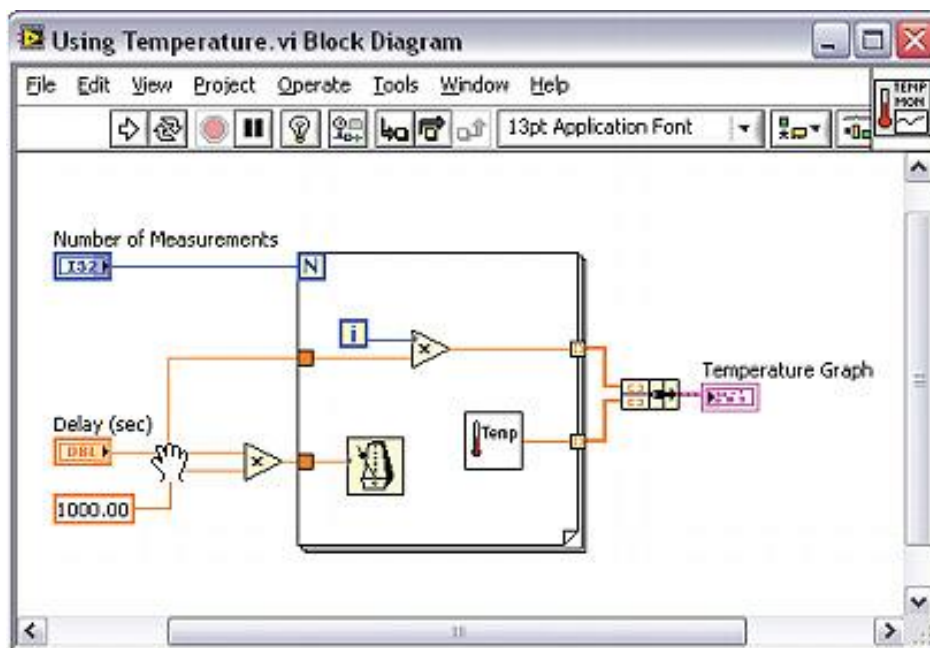
- **Γραφικός προγραμματισμός**^[75]

Το LabVIEW ενσωματώνει τη δημιουργία διεπαφών χρήστη (front panels) στον κύκλο ανάπτυξης. Τα προγράμματα-υπορουτίνες LabVIEW ονομάζονται virtual instruments (VIs). Κάθε VI έχει τρία στοιχεία: ένα μπλοκ διάγραμμα, ένα μπροστινό πίνακα(front panel) και ένα παράθυρο σύνδεσης. Ο μπροστινός πίνακας είναι κατασκευασμένος χρησιμοποιώντας χειριστήρια και δείκτες. Τα στοιχεία ελέγχου είναι είσοδοι: επιτρέπουν σε έναν χρήστη να παρέχει πληροφορίες στο VI. Οι δείκτες είναι έξοδοι: υποδεικνύουν ή εμφανίζουν τα αποτελέσματα με βάση τις εισόδους που δίνονται στο VI. Ο πίσω πίνακας, που είναι ένα μπλοκ διάγραμμα, περιέχει τον γραφικό πηγαίο κώδικα. Όλα τα αντικείμενα που τοποθετούνται στον μπροστινό πίνακα θα εμφανίζονται στον πίσω πίνακα ως τερματικά. Ο πίσω πίνακας περιέχει επίσης δομές και λειτουργίες που εκτελούν λειτουργίες σε χειριστήρια και παρέχουν δεδομένα σε δείκτες. Οι δομές και οι λειτουργίες βρίσκονται στην παλέτα λειτουργιών και μπορούν να τοποθετηθούν στο μπλοκ διάγραμμα.

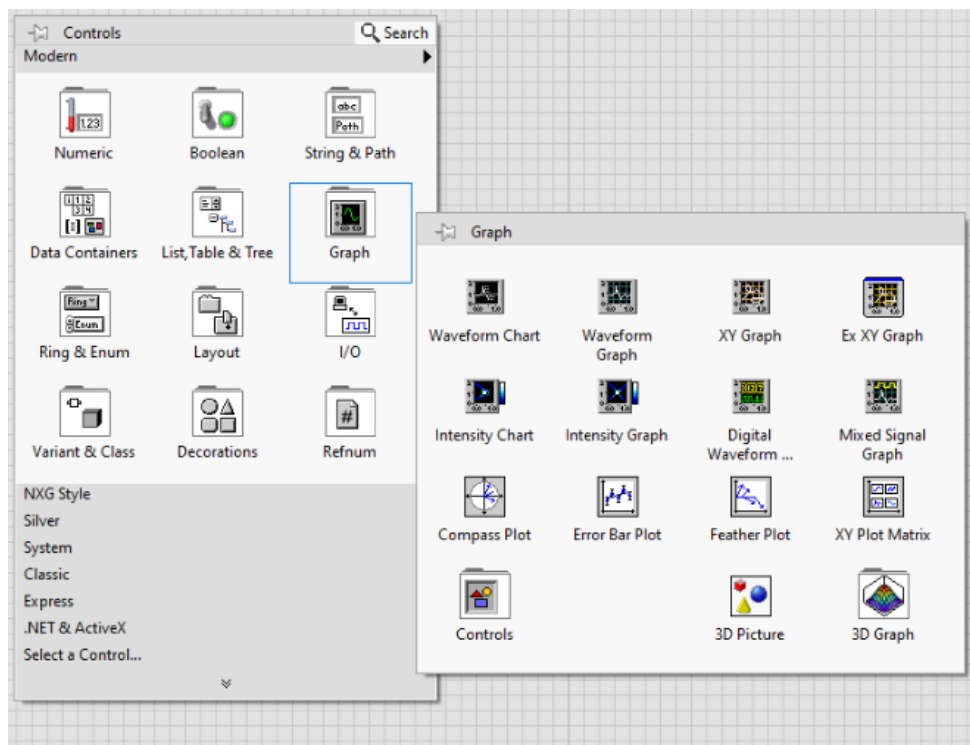
Οι εικόνες που ακολουθούν απεικονίζουν τα front panel και μπλοκ διάγραμμα του ίδιου προγράμματος(VI) «γραμμένου» στο LabVIEW.



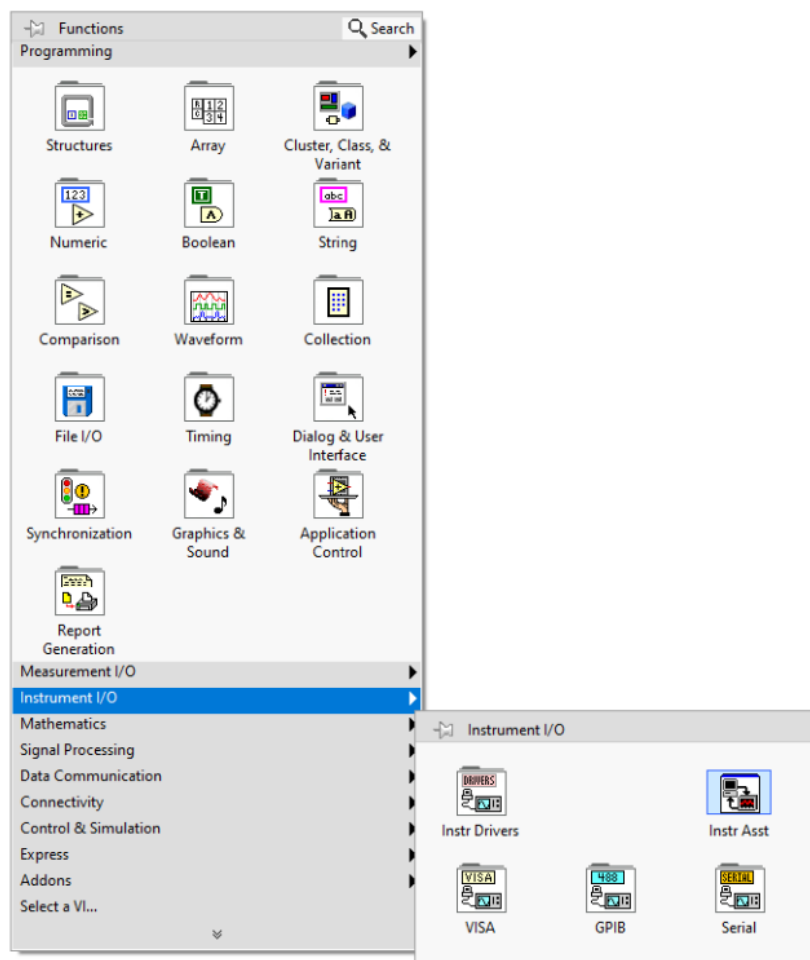
Εικόνα 6.15 Το front panel ενός απλού VI στο LabVIEW



Εικόνα 6.16 Το μπλοκ διάγραμμα ενός απλού VI στο LabVIEW



Εικόνα 6.17 Η παλέτα λειτουργιών του μπροστινού πίνακα(front panel)



Εικόνα 6.18 Η παλέτα λειτουργιών του μπλοκ διαγράμματος

Η γραφική προσέγγιση επιτρέπει επίσης σε μη προγραμματιστές να δημιουργούν προγράμματα με μεταφορά και απόθεση εικονικών αναπαραστάσεων εργαστηριακού εξοπλισμού με τον οποίο είναι ήδη εξοικειωμένοι. Το περιβάλλον προγραμματισμού LabVIEW, με τα παραδείγματα και την τεκμηρίωση που περιλαμβάνονται, καθιστά απλή τη δημιουργία μικρών εφαρμογών. Αυτό είναι ένα όφελος από τη μία πλευρά, αλλά υπάρχει επίσης ένας ορισμένος κίνδυνος υποτίμησης της εμπειρίας που απαιτείται για τον υψηλής ποιότητας προγραμματισμό G. Για πολύπλοκους αλγόριθμους ή κώδικα μεγάλης κλίμακας, είναι σημαντικό ο προγραμματιστής να διαθέτει εκτεταμένη γνώση της ειδικής σύνταξης LabVIEW και της τοπολογίας της διαχείρισης μνήμης του.

- **Οφέλη^[75]**

- Διασύνδεση με συσκευές

Το LabVIEW περιλαμβάνει εκτεταμένη υποστήριξη για διασύνδεση με συσκευές όπως όργανα, κάμερες και άλλες συσκευές. Οι χρήστες διασυνδέονται με υλικό είτε γράφοντας απευθείας εντολές διαύλου (USB, GPIB, Serial) είτε χρησιμοποιώντας προγράμματα οδήγησης υψηλού επιπέδου, ειδικά για τη συσκευή που παρέχουν εγγενείς κόμβους λειτουργίας LabVIEW για τον έλεγχο της συσκευής.

- Σύνταξη κώδικα

Το LabVIEW περιλαμβάνει έναν μεταγλωττιστή που παράγει εγγενή κώδικα για την πλατφόρμα CPU. Ο γραφικός κώδικας μετατρέπεται σε Dataflow Intermediate Representation και μετά μεταφράζεται σε κομμάτια εκτελέσιμου κώδικα μηχανής από έναν μεταγλωττιστή που βασίζεται σε LLVM .

- Μεγάλες βιβλιοθήκες

Πολλές βιβλιοθήκες με μεγάλο αριθμό λειτουργιών για την απόκτηση δεδομένων, τη δημιουργία σήματος, τα μαθηματικά, τα στατιστικά στοιχεία, τη ρύθμιση του σήματος, την ανάλυση κ.λπ., καθώς και πολλές για λειτουργίες όπως ενοποίηση, φίλτρα και άλλες εξειδικευμένες ικανότητες που συνήθως σχετίζονται με τη λήψη δεδομένων από αισθητήρες υλικού είναι τεράστιο.

- Παράλληλος προγραμματισμός

Το LabVIEW είναι μια εγγενώς ταυτόχρονη γλώσσα , επομένως είναι πολύ εύκολο να προγραμματίσετε πολλές εργασίες που εκτελούνται παράλληλα μέσω πολλαπλών νημάτων. Αυτό είναι ένα μεγάλο όφελος για τον αυτοματισμό του συστήματος δοκιμών, όπου είναι συνήθης πρακτική να εκτελούνται διαδικασίες όπως η αλληλουχία δοκιμών, η εγγραφή δεδομένων και η διασύνδεση υλικού.

- Οικοσύστημα

Λόγω της μακροζωίας και της δημοτικότητας της γλώσσας LabVIEW και της ικανότητας των χρηστών να επεκτείνουν τις λειτουργίες της, ένα μεγάλο οικοσύστημα πρόσθετων τρίτων έχει αναπτυχθεί μέσω συνεισφορών από την κοινότητα. Αυτό το οικοσύστημα είναι διαθέσιμο στο LabVIEW Tools Network, το οποίο είναι μια αγορά για δωρεάν και επί πληρωμή πρόσθετα LabVIEW.

Το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε για την αξιολόγηση μπαταριών:

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το συγκεκριμένο πρόγραμμα κατασκευάστηκε για τον έλεγχο οργάνων.

Χρησιμοποιήθηκαν:

- Τροφοδοτικό DC της Keysight (Model E3632A) για την φόρτιση των μπαταριών.



Εικόνα 6.19 Keysight E3632A Power Supply

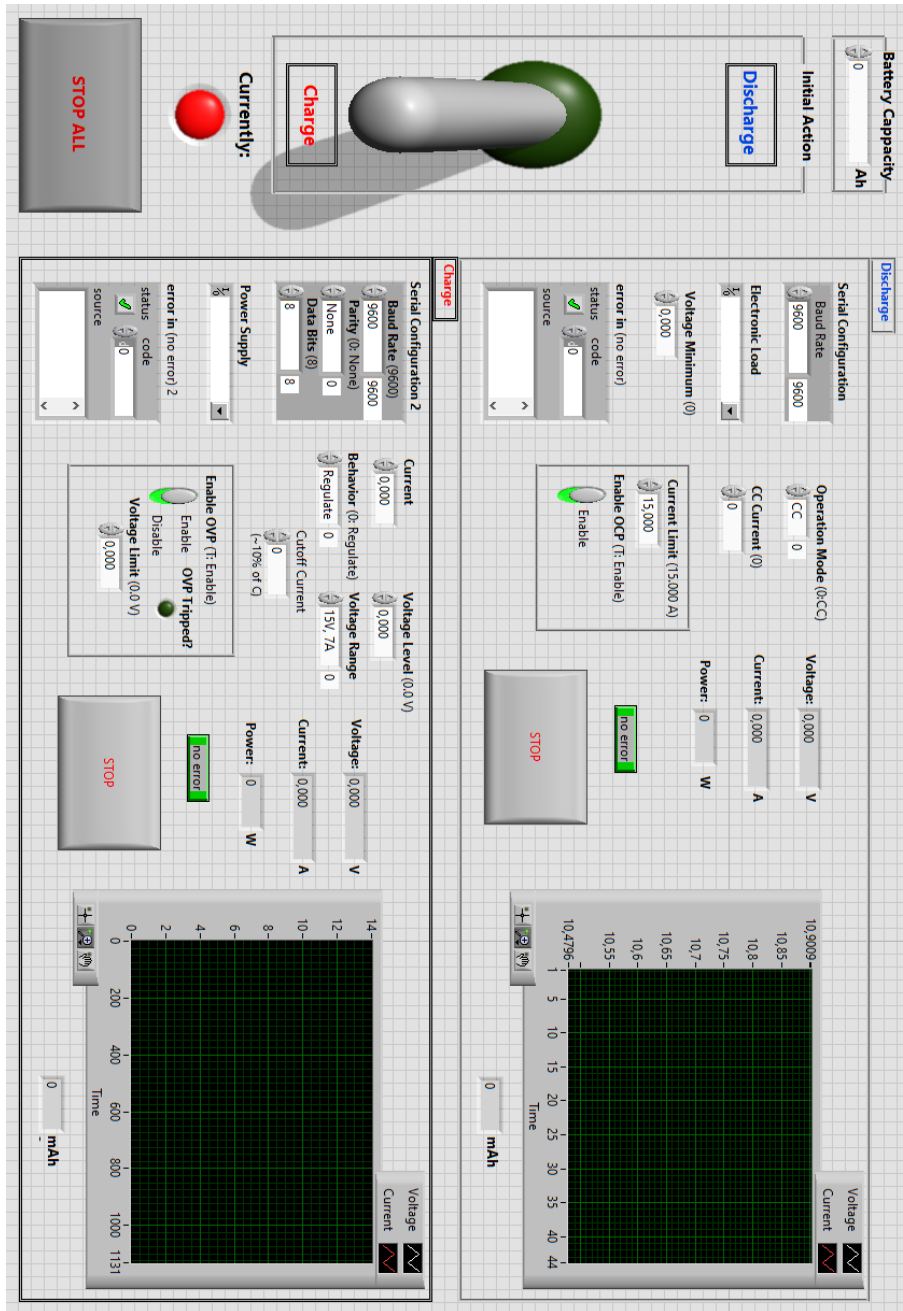
- Ηλεκτρονικό φορτίο της BK Precision (Model 8601) για την εκφόρτιση των μπαταριών.



Εικόνα 6.20 BK Precision 8601 DC Electronic Load

Ακόμα χρειάζονται βεβαίως μια μπαταρία με δυνατότητα επαναφόρτισης και τα κατάλληλα καλώδια για την σύνδεση. Οι πόλοι των οργάνων και της μπαταρίας συνδέονται σε σειρά έτσι ώστε να είναι δυνατή τόσο η φόρτιση όσο και η εκφόρτιση χωρίς την ανάγκη για αλλαγή της συνδεσμολογίας μεταξύ των ενεργειών. Αυτό αποτέλεσε και μία από τις προκλήσεις στην δημιουργία του προγράμματος στο LabView.

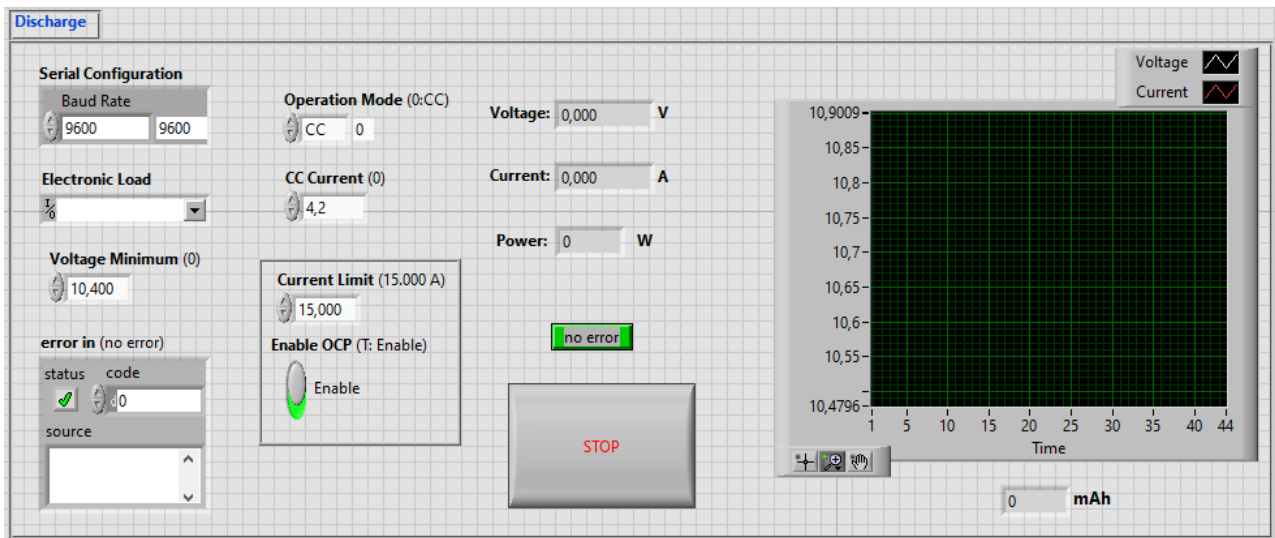
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται το συνολικό κύκλωμα που κατασκευάστηκε στο μπλοκ διάγραμμα καθώς και το front panel μέσω του οποίου ο χρήστης διαχειρίζεται τα δεδομένα.



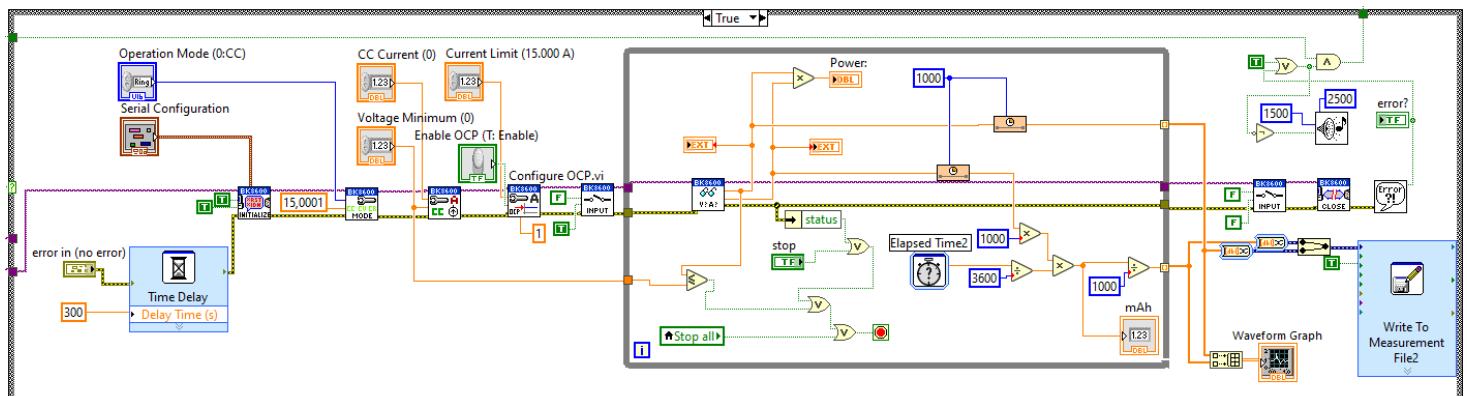
Εικόνα 6.21 Front panel κυκλώματος ελέγχου ηλεκτρονικών οργάνων

Στην συνέχεια γίνεται περαιτέρω ανάλυση των επιμέρους στοιχείων και των δύο πινάκων.

BK Precision Electronic Load:



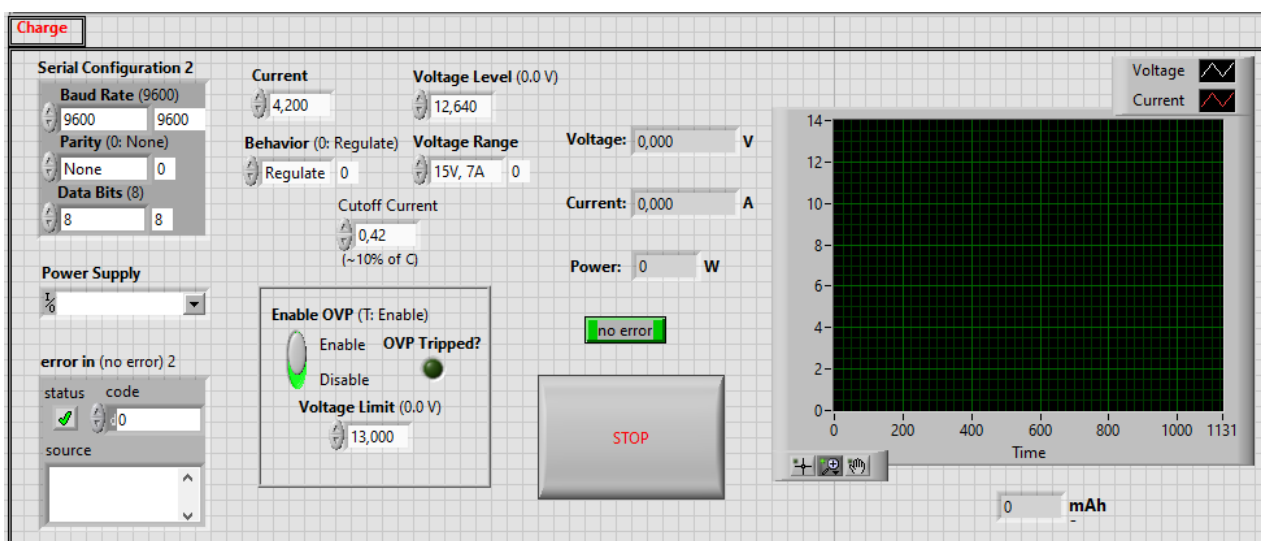
Εικόνα 6.23 BK Precision Electronic Load Front Panel



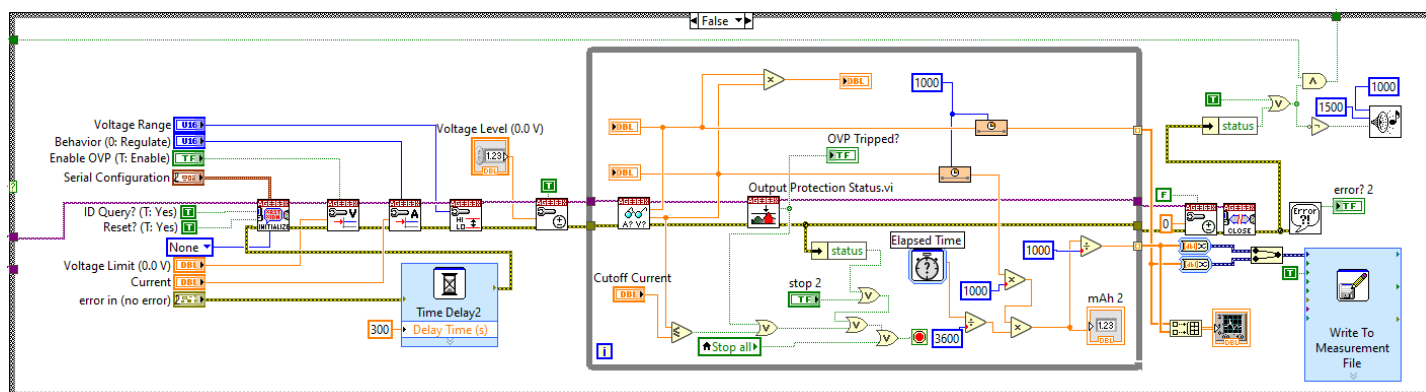
Εικόνα 6.24 BK Precision Electronic Load Block Diagram

Στις παραπάνω εικόνες απεικονίζονται το front panel διαχείρισης του οργάνου που προσομοιώνει το ηλεκτρονικό φορτίο στο πείραμα και το κύκλωμα στο μπλοκ διάγραμμα που καθιστά δυνατή την λειτουργία του οργάνου όπως και την εξατομίκευση της εμφάνισης του front panel.

Keysight DC Power Supply:



Εικόνα 6.25 Keysight Power Supply Front Panel



Εικόνα 6.26 Keysight Power Supply Block Diagram

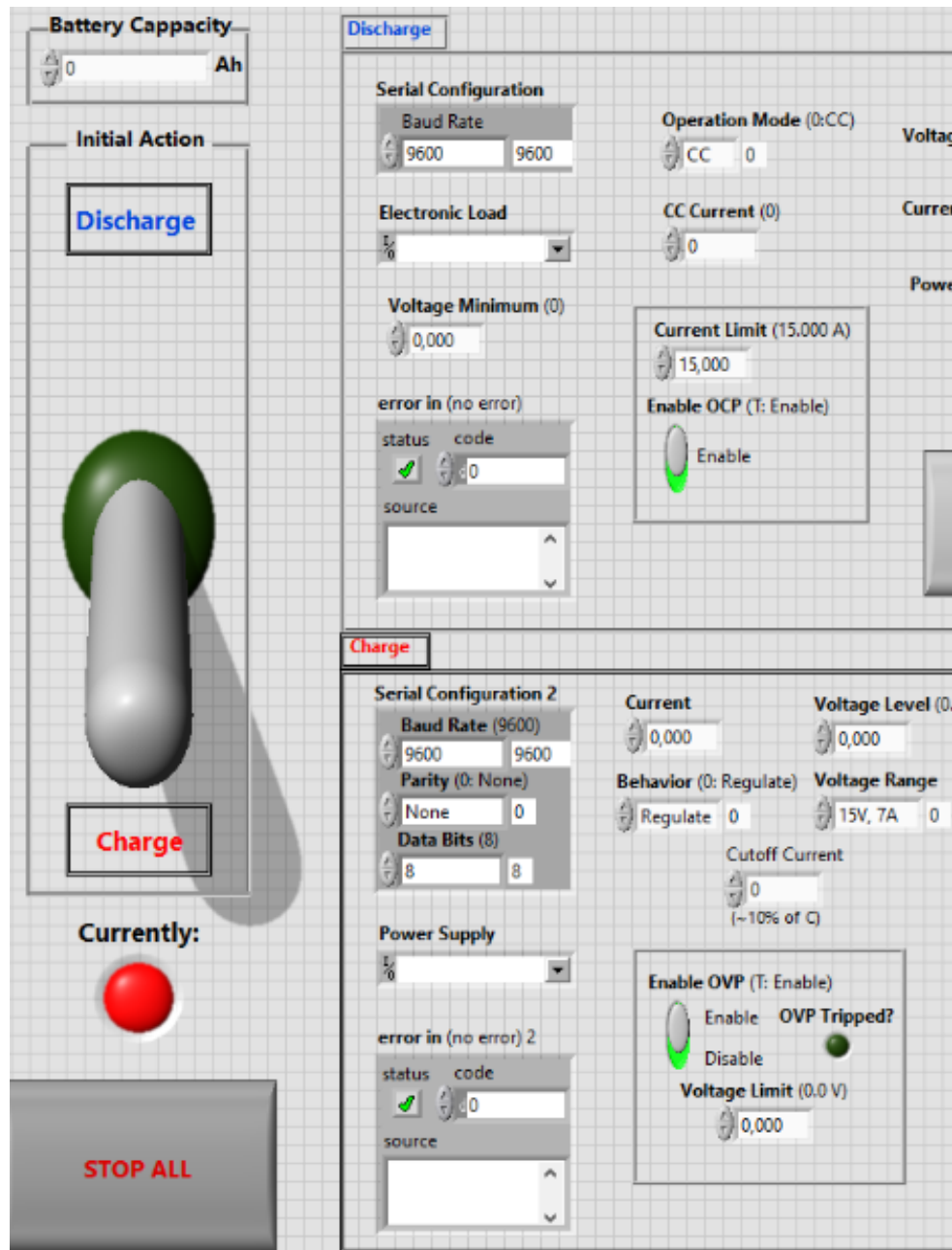
Αντίστοιχα με προηγούμενως, οι παραπάνω εικόνες απεικονίζουν το front panel το οποίο αφορά το τροφοδοτικό και το μπλοκ διάγραμμα που το συνοδεύει.

Όπως μπορεί κανείς να διακρίνει υπάρχουν κομμάτια τόσο του κυκλώματος όσο και των front panels και στις δύο περιπτώσεις (charge/disharge) που παρότι διαφορετικά μεταξύ τους διατηρούν μια ομοιομορφία στον τρόπο που είναι τοποθετημένα. Αυτό δεν είναι προαπαιτούμενο από το ίδιο το LabVIEW, αλλά περνάει από το χέρι του δημιουργού το πώς θα ταξινομήσει τα επιμέρους blocks, structures, κλπ. Έτσι, για λόγους που έχουν να κάνουν τόσο με την οπτική ομοιομορφία που διευκολύνει τον χρήστη να «προσανατολίζεται» άνετα μέσα στο κύκλωμα όσο περίπλοκο και αν αυτό καταλήξει, όσο και με την ευκολία επεξήγησης του κυκλώματος σε τρίτους που δεν είναι εξοικειωμένοι με το πρόγραμμα, το κύκλωμα θα χωριστεί σε τρία κομμάτια:

- Το πρώτο είναι αυτό της αρχικοποίησης,
- το δεύτερο είναι το κύριο κομμάτι κατά το οποίο γίνεται η φόρτιση και η εκφόρτιση και
- το τρίτο στο οποίο γίνεται η έξοδος των αποτελεσμάτων της εκάστοτε ενέργειας και ο τερματισμός της χρήσης του οργάνου.

Με τον διαχωρισμό αυτό γίνεται πιο εύκολη και η ανάλυση των επιμέρους στοιχείων του προγράμματος.

- **Αρχικοποίηση:**

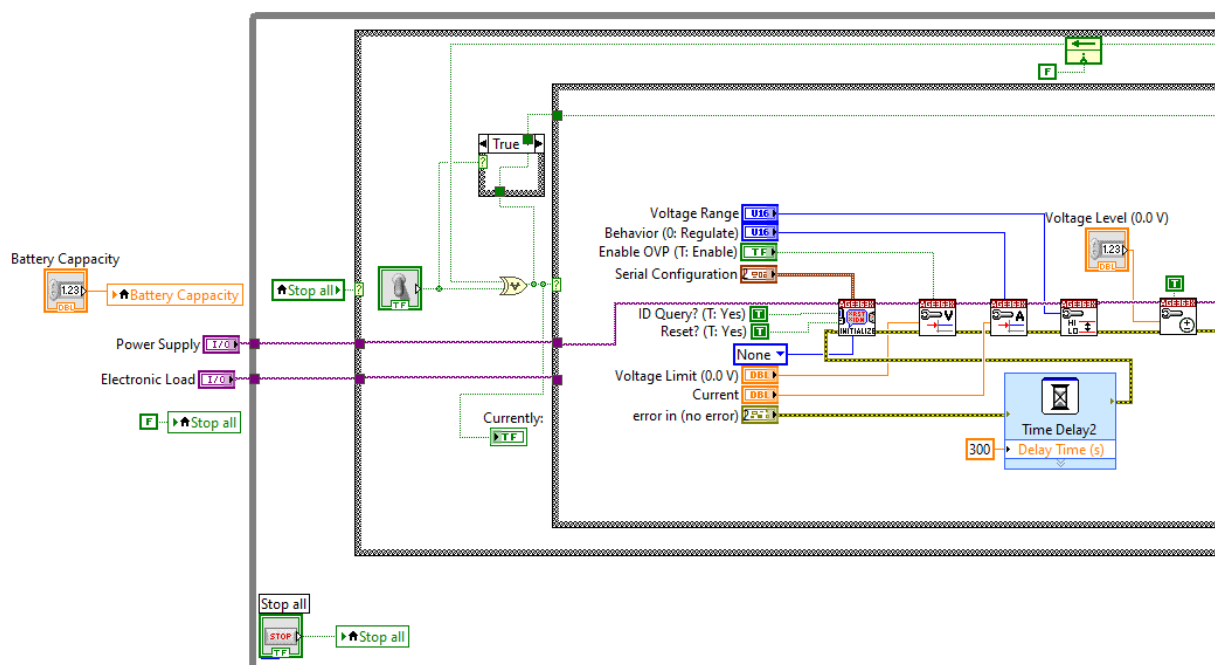


Εικόνα 6.27 Front panel initialization part.

Στην παραπάνω εικόνα διακρίνονται τα πεδία εκείνα που ο χρήστης καλείται να ορίσει και έχουν να κάνουν κυρίως με τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας που έχει συνδέσει στο κύκλωμα. Ακόμα, υπάρχει από ένα πλαίσιο στο οποίο ορίζει της θύρες σύνδεσης του H/Y με τα όργανα και από ένα πλαίσιο για κάθε ενέργεια που του επιτρέπει να ορίσει (προαιρετικά) τιμές ασφαλείας οι οποίες αν ξεπεραστούν τερματίζουν την λειτουργία του εκάστοτε οργάνου. Τέλος, υπάρχει ένας εικονικός μοχλός που ορίζει ποια ενέργεια (φόρτιση/εκφόρτιση) θα πραγματοποιηθεί αρχικά,

έναν εικονικό δείκτη Led που καθώς το πρόγραμμα τρέχει ενημερώνει τον χρήστη για την ενέργεια που εκτελείτε ανά πάσα στιγμή (μπλε για εκφόρτιση, κόκκινο για φόρτιση) και ένα μεγάλο κουμπί 'STOP ALL' το οποίο σε οποιαδήποτε στιγμή και αν «πατηθεί» τερματίζει την λειτουργία του VI.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι το VI δεν μπορεί να εκτελεστεί αν δεν έχουν οριστεί οι θύρες διασύνδεσης και των δύο οργάνων.

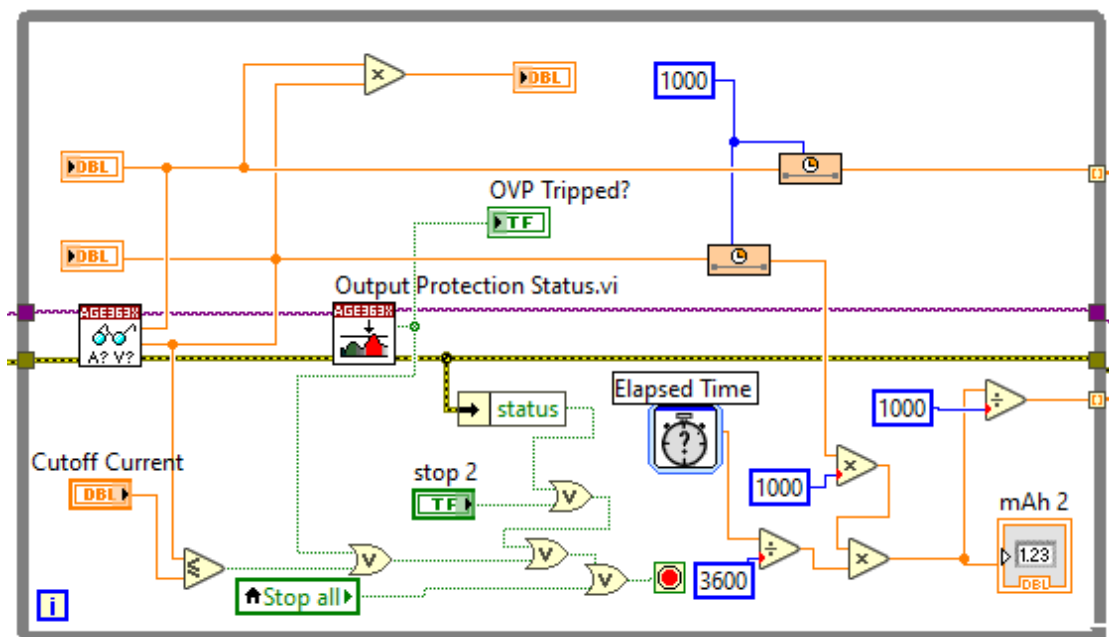


Εικόνα 6.28 Block Diagram Initialization Part

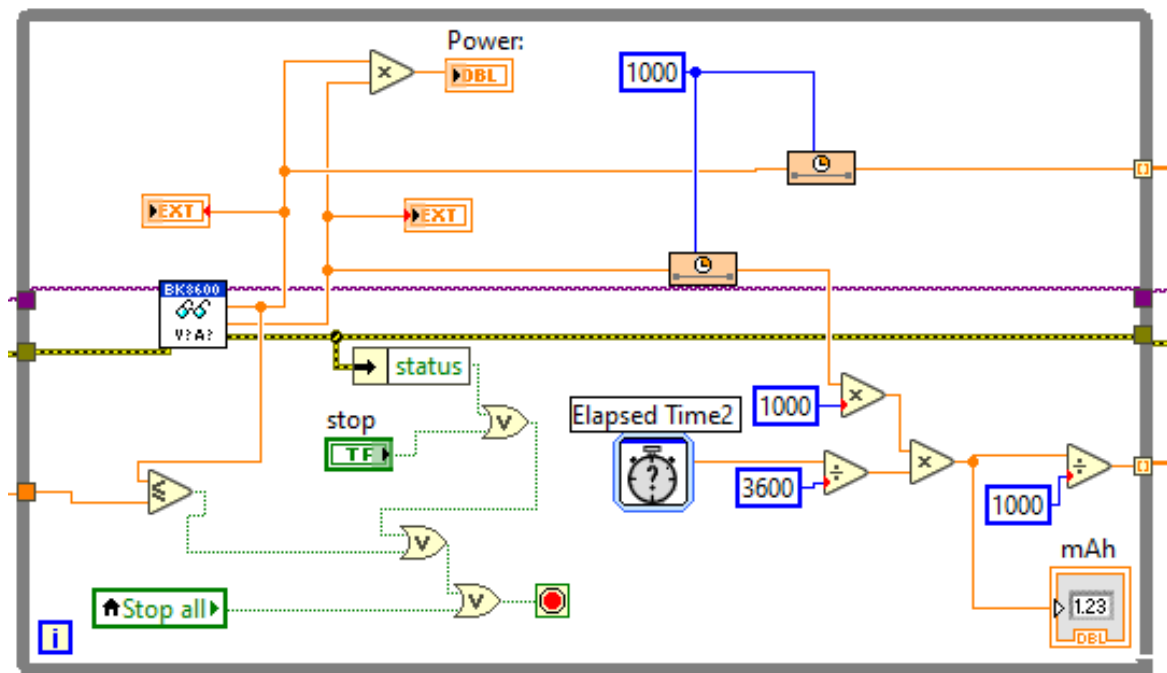
Στην εικόνα αυτή βλέπουμε τα έτοιμα μπλοκ που έχουν χρησιμοποιηθεί από την βιβλιοθήκη που παρέχουν οι drivers του κάθε υποστηριζόμενου από το LabVIEW οργάνου, τα οποία διαβάζουν τις τιμές που έχει ορίσει ο χρήστης στο front panel και τις «ορίζουν» στο μηχανήμα. Στην εικόνα ακόμα διακρίνουμε μέρος της μεθόδου που δημιουργήθηκε με χρήση λογικών πυλών και έτοιμων δομών προγραμματισμού για την αναγνώριση και εκτέλεση της αρχικής ενέργειας που επέλεξε ο χρήστης όπως και την εναλλάξ εκτέλεση της φόρτισης/εκφόρτισης όπως επίσης διακρίνεται και η έτοιμη συνάρτηση Time Delay την οποία έχουμε ορίσει στην σταθερή τιμή 300s(5 min.) και έχει χρησιμοποιηθεί έτσι ώστε να δημιουργεί χρονική καθυστέρηση μεταξύ των ενεργειών φόρτισης και εκφόρτισης προκειμένου η θερμοκρασία της μπαταρίας να πέφτει και τα Volt να σταθεροποιούνται πριν εκτελεστεί η επόμενη ενέργεια. Τέλος τα δύο ειδών πλαίσια που διακρίνονται στην εικόνα αποτελούν έτοιμες δομές προγραμματισμού με το εξωτερικό πλαίσιο(γκρι) να είναι το κύριο 'For Loop' το οποίο ιδανικά θα εκτελείτε επ' άπειρον μέχρις ότου ο χρήστης να διακόψει την λειτουργία του VI και τα τρία πλαίσια μέσα στην 'for' να είναι 'Case Structures' των οποίων το περιεχόμενο αλλάζει ανάλογα με την τιμή που έχει συνδεθεί στον 'case selector' (True/False). Αξίζει να σημειωθεί ότι στην εικόνα απεικονίζονται τα blocks από την βιβλιοθήκη του τροφοδοτικού και υπάρχουν αντίστοιχα blocks για την περίπτωση της εκφόρτισης που πραγματοποιείται όταν αλλάξει η τιμή της περιβάλλουσας case structure.

- **Εκτέλεση φόρτισης και εκφόρτισης**

Το δεύτερο αυτό κομμάτι είναι το κυρίως κομμάτι κατά το οποίο πραγματοποιούνται οι φάσεις φόρτισης & εκφόρτισης και δεν είναι τίποτα παραπάνω από ένα for loop το οποίο «κρατάει» τα μηχανήματα σε λειτουργία μέχρι να ολοκληρωθεί η διαδικασία ή να συμβεί κάποιο σφάλμα. Σε κάθε εκτέλεση της επανάληψης οι έτοιμες συναρτήσεις 'Read' διαβάζουν τις τιμές των Current & Voltage που μετράει την συγκεκριμένη στιγμή το εκάστοτε μηχάνημα και τις απεικονίζει στο front panel μαζί με την τιμή Power που προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των δύο σε πραγματικό χρόνο. Επίσης σε κάθε εκτέλεση της επανάληψης γίνεται έλεγχος για τυχόν σφάλματα όπως σφάλμα σύνδεσης ή αν ξεπεράστηκε το όριο ασφαλείας και το ενδεχόμενο να έχει «πατηθεί» από τον χρήστη κάποιο εκ των 'STOP' και 'STOP ALL' τα οποία υπάρχουν για τον τερματισμό της ενέργειας που εκτελείται την συγκεκριμένη στιγμή και για τον τερματισμό της εκτέλεσης του VI αντίστοιχα. Τέλος, μέσω της έτοιμης συνάρτησης 'Elapsed Time' η οποία χρονομετρεί τον χρόνο που το πρόγραμμα βρίσκεται μέσα στην επανάληψη και μέσω μαθηματικών πράξεων με την τιμή του Current που περνάει από το καλώδιο κάθε 1000ms, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες, επιστρέφει στο χρήστη τον αριθμό των mAh σε πραγματικό χρόνο που έχει «χάσει» ή «πάρει» η μπαταρία μέχρι εκείνη την στιγμή.



Εικόνα 6.29 Εκτέλεση φόρτισης.



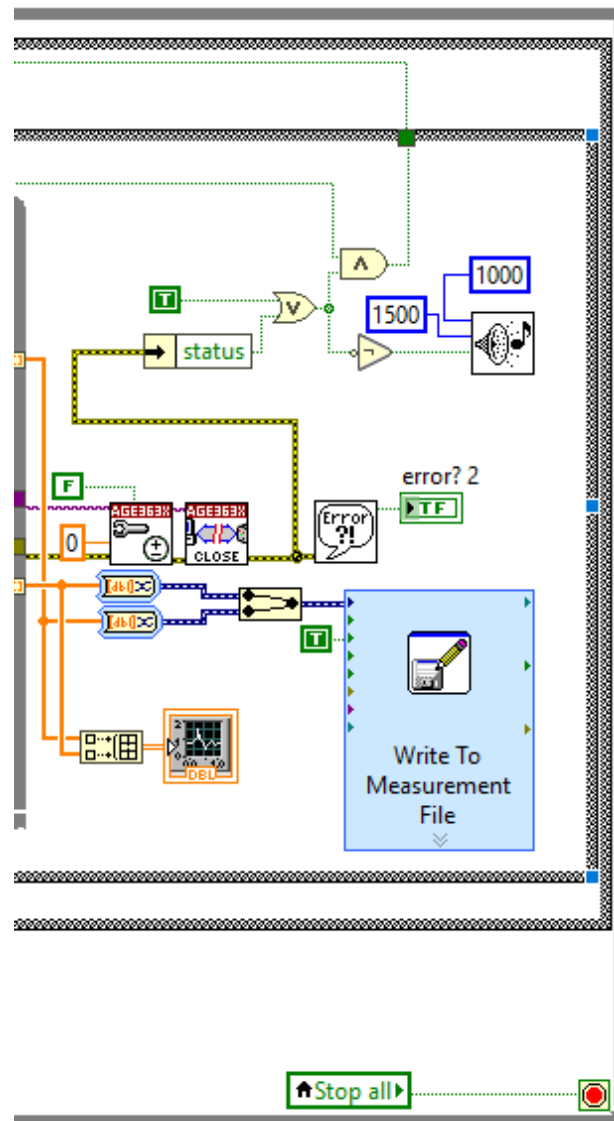
Εικόνα 6.30 Εκτέλεση εκφόρτισης

- **Έξοδος Αποτελεσμάτων και Τερματισμός εργασίας**

Στην τελευταία φάση της εκτέλεσης της εργασίας, οι έτοιμες συναρτήσεις αναλαμβάνουν να τερματίσουν την λειτουργία των οργάνων και να εμφανίσουν στο front panel ένα μήνυμα σφάλματος σε περίπτωση που αυτό έχει προκύψει, αλλιώς δεν εμφανίζεται κανένα μήνυμα και η ένδειξη 'no error' παραμένει πράσινη.

Ακόμα, οι τιμές των Voltage και mA που από την δεύτερη φάση του προγράμματος έχουν αποθηκευτεί προσωρινά σε arrays απεικονίζονται σε γράφημα με 2 plots και μέσω της συνάρτησης 'Write To Measurement File' οι τιμές αυτές εξάγονται αυτοματοποιημένα σε αρχείο Excel μορφής .xlsx με όνομα που έχουμε ορίσει από το παράθυρο της συνάρτησης ακολουθούμενο από την ώρα και την ημερομηνία της δημιουργίας.

Η εργασία ολοκληρώνεται με την αναπαραγωγή ενός ήχου(beep) και την επιστροφή της κατάλληλης τιμής(True/False) στην αρχή της case structure έτσι ώστε να αρχίσει η επόμενη διαδικασία.



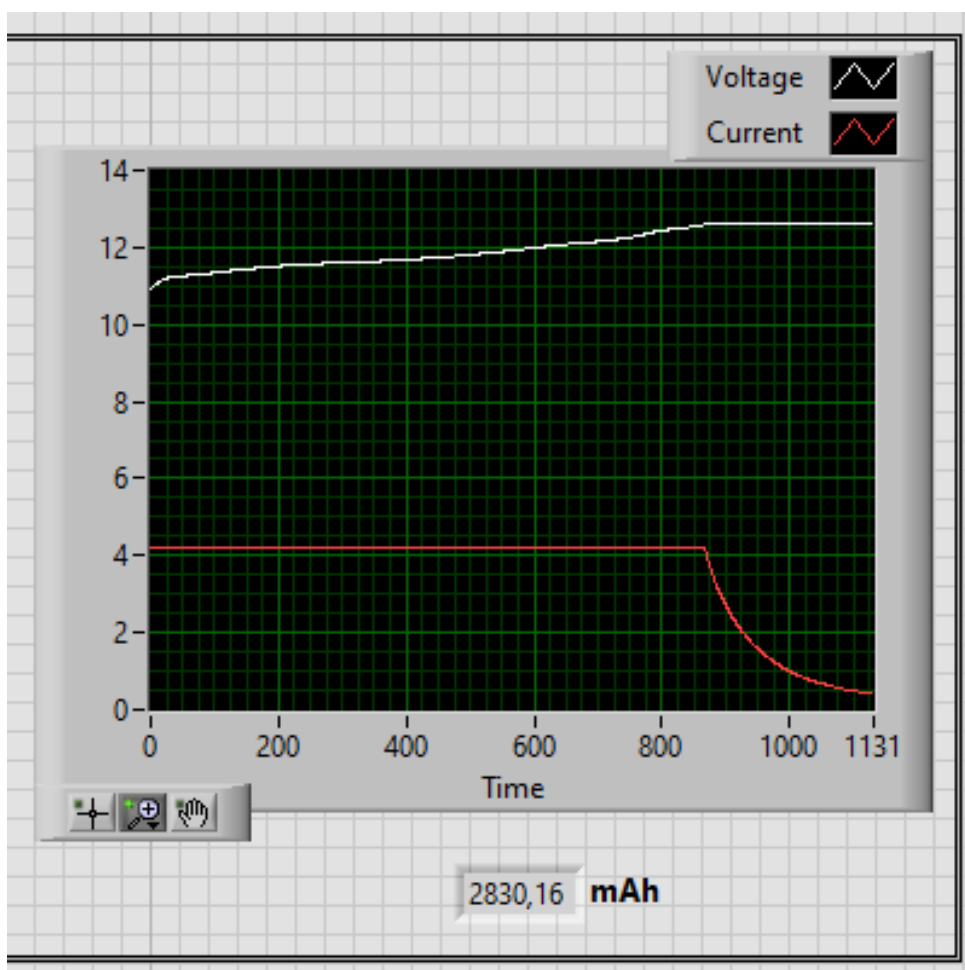
Εικόνα 6.31 Block Diagram Finalization part



Εικόνα 6.32 Front Panel outputs

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζονται:

- οι ενδείξεις Voltage, Current, Power και mAh οι οποίες κατά την εκτέλεση του VI εμφανίζονται στον χρήστη σε πραγματικό χρόνο αφού δημιουργούνται κατά την εκτέλεση της εσωτερικής επανάληψης που περιγράφεται στο δεύτερο κομμάτι,
- τα γραφήματα Voltage/Current τα οποία στο τέλος της εκτέλεσης των εργασιών εμφανίζουν την πορεία των volt και των ampere,
- η ένδειξη 'error/no error' καθώς και
- το πλήκτρο 'STOP' που χρησιμοποιείται για την διακοπή της εκάστοτε εργασίας.



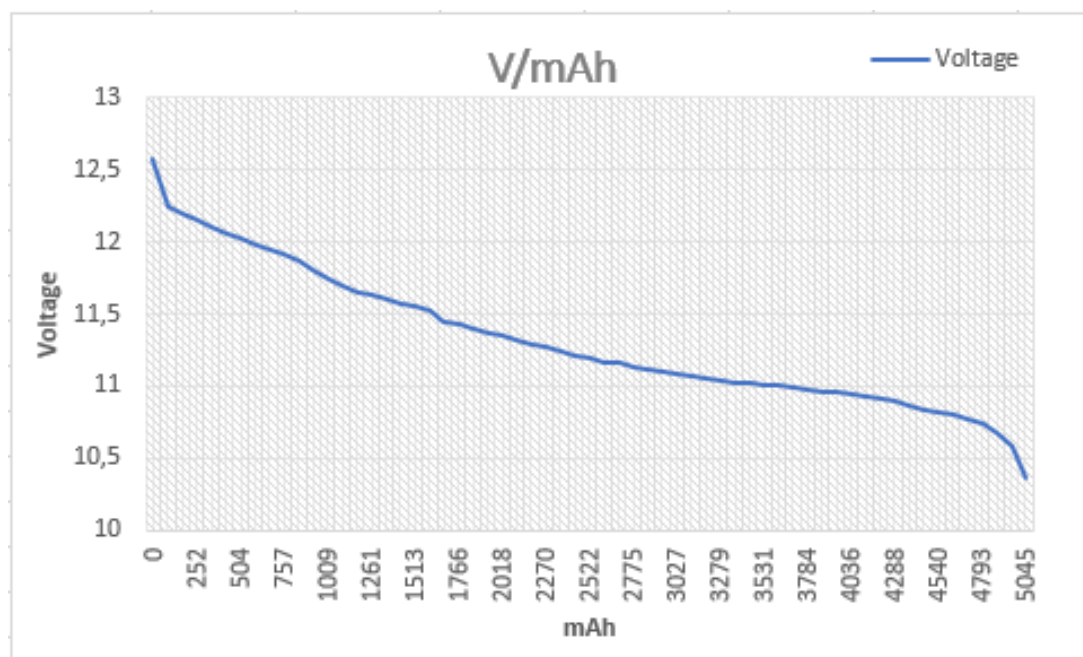
Εικόνα 6.33 Πλήρης φόρτιση με το LabVIEW

Αποτελέσματα

Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει την πλήρη φόρτιση μίας εξασθενημένης μπαταρίας πολυμερούς λιθίου με ονομαστική χωρητικότητα 4,2Ah όπως φαίνεται στο front panel του προγράμματος LabVIEW. Στο διάγραμμα διακρίνονται τα Volt της μπαταρίας με λευκή γραμμή και με κόκκινη γραμμή το ρεύμα το οποίο ήταν σταθερά στο 1C με την τιμή αυτή να μειώνεται σταδιακά την στιγμή που τα volt έφτασαν στο μέγιστο. Η ένδειξη mA κάτω από το γράφημα μας λέει ότι η μπαταρία κατά την διάρκεια αυτής της πλήρους φόρτισης προσέλαβε μόνο 2830mA γεγονός που μας επιτρέπει να πούμε ότι η συγκεκριμένη μπαταρία έχει εξασθενήσει αισθητά. Αξίζει να σημειωθεί ότι αφού μια εργασία έχει ολοκληρωθεί και τα αποτελέσματα βρίσκονται στο γράφημα όπως βλέπουμε στην εικόνα, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να τα αποθηκεύσει με τη μορφή αρχείου Excel μορφής .xlsx πατώντας πάνω στο κάθε διάγραμμα με τη επιλογή export.

Εκτός όμως από τα γραφήματα του LabVIEW, όπως είπαμε παραπάνω το κύκλωμα που δημιουργήσαμε έχει την δυνατότητα να αποθηκεύει τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αυτοματοποιημένα σε αρχείο Excel.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί βλέπουμε την πλήρη εκφόρτιση μιας καλής μπαταρίας πολυμερούς λιθίου με ονομαστική χωρητικότητα 5,1Ah με σταθερό ρεύμα έντασης 1C.



Διάγραμμα 6.1 Πλήρης εκφόρτιση V/mAh

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι μεμονωμένα και δεν είναι σε θέση να μας δώσουν αξιολόγηση για τον χρόνο ζωής και την απόδοση των σύγχρονων μπαταριών καθώς όπως είπαμε παραπάνω στο κεφάλαιο για την αξιολόγηση των μπαταριών χρειάζεται χρόνος και στενή παρακολούθηση της μπαταρίας καθ' όλη την διάρκεια της ζωής της, πράγμα το οποίο δεν ήταν εφικτό στο διάστημα εκτέλεσης των πειραμάτων για την συγκεκριμένη εργασία όπως επίσης δεν ήταν εφικτό για τον λόγο ότι οι μπαταρίες του εργαστηρίου χρησιμοποιούνταν και σε άλλες εργασίες κάτι το οποίο τις καθιστά ακατάλληλες για ελεγχόμενη αξιολόγηση.

Ωστόσο, το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε κατά το πειραματικό κομμάτι της εργασίας καθιστά δυνατή την αξιολόγηση μπαταριών μέσω κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης και της σύγκρισης των αποτελεσμάτων σε βάθος χρόνου εφόσον υπάρχει ο εξοπλισμός και οι παραπάνω προϋποθέσεις καλύπτονται.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μασκλαβάνος, Ι., *Αξιολόγηση πηγών και μεθόδων για την τροφοδοσία αυτόνομων ενσωματωμένων συστημάτων*. Μεταπτυχιακή εργασία. Άρτα: Τ.Ε.Ι. Ηπείρου. Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών . Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής Τ.Ε., 2019
2. Agarwal, T., Agarwal, T.A.T., Agarwal, T., Saichand and Edgefx Technologies Pvt Ltd, *Buy Electronics Electrical Projects in India*, 2014. <https://www.edgefx.in/embedded-systems-basics-with-applications/>
3. *Typical Architecture of an Embedded System*. https://ebrary.net/22041/computer_science/typical_architecture_embedded_system
4. *Ενσωματωμένα συστήματα*, Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Embedded_system. Accessed 21 Sep. 2020
5. Michael Barr. «Embedded Systems Glossary». Neutrino Technical Library.
6. Michael Barr; Anthony J. Massa. «Introduction». *Programming embedded systems: with C and GNU development tools*, 2006
7. Barr, Michael, «Real men program in C». *Embedded Systems Design*. TechInsights (United Business Media), 1 Aug 2009.
8. Heath, Steve, *Embedded systems design. EDN series for design engineers* (2η έκδοση), 2003
9. Μηνάς Δασυγένης, Λέκτορας και Δημήτριος Σούντρης, Αναπληρωτής Καθηγητής, *Ενσωματωμένα Συστήματα, Ο αθέατος ψηφιακός κόσμος*, 2015. http://repfiles.kallipos.gr/html_books/1285/bookES.html
10. Απόστολος Δόλλας, *Ενσωματωμένα συστήματα μικροεπεξεργαστών*, 2006.
11. <https://www.toradex.com/blog/toradex-colibri-imx7-low-power-demo-hardware>
12. *Ενέργεια*, Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Energy> Accessed 28 Sep 2020
13. *Φυσική Ε' Δημοτικού*, ΟΕΔΒ, http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/2190/Fysika_E-Dimotikou_html-empl/index_3.html Accessed 28 Sep 2020
14. *Μηχανική ενέργεια*, Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Mechanical_energy Accessed 29 Sep 2020
15. https://en.wikipedia.org/wiki/Potential_energy
16. Beiser, Arthur, *Σύγχρονη Φυσική* (στα Αγγλικά). Μεταφραστές: Αθηνά Πάκου, Νικόλαος Νικολής, 2001
17. *Φυσική Β' Γυμνασίου*. Αθήνα: ΟΕΔΒ. 2004
18. *Δυναμική ενέργεια*, Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Potential_energy Accessed 29 Sep 2020
19. *Ηλεκτρική Ενέργεια*, Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_energy Accessed 29 Sep 2020
20. *Ενέργεια Ακτινοβολίας*, Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Radiant_energy Accessed 29 Sep 2020
21. *Πυρηνική ενέργεια*, Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power Accessed 29 Sep 2020

22. *Θερμική ενέργεια*, Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_energy Accessed 29 Sep 2020
23. *Χημική ενέργεια*, Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Chemical_energy Accessed 29 Sep 2020
24. *Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας*, Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy Accessed 30 Sep 2020
25. *Αιολική Ενέργεια*, Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power Accessed 30 Sep 2020
26. *Γεωθερμική ενέργεια*, [online] Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_energy Accessed 30 Sep 2020
27. *Υδροηλεκτρική ενέργεια*, [online] Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydroelectricity> Accessed 30 Sep 2020
28. <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=288&language=el-GR> Accessed 30 Sep 2020
29. *Βιομάζα*, [online] Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Biomass> Accessed 30 Sep 2020
30. Rinkesh, *What are Different Alternative Sources of Energy?*, Available at: <https://www.conserve-energy-future.com/different-energy-sources.php> Accessed 30 Sep 2020
31. Chalasani, S. and Conrad, J.M., *A survey of energy harvesting sources for embedded systems*. IEEE SoutheastCon 2008, 2008
32. El-Sayed, A.-R., Tai, K., Biglarbegan, M. and Mahmud, S., *A survey on recent energy harvesting mechanisms*. 2016 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2016
33. Fan, P.M.-Y., Wong, O.-Y., Chung, M.-J., Su, T.-Y., Zhang, X. and Chen, P.-H., *Energy harvesting techniques: Energy sources, power management and conversion*. 2015 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD), 2015
34. Garg, N. and Garg, R., *Energy harvesting in IoT devices: A survey*. 2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS), 2017
35. Sharma, S., Panwar, V., Yadav, S., Sachin and Lokesh, *Different sources of energy harvesting: A survey*. 2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA), 2017
36. Singh, K. and Moh, S., *A Comparative Survey of Energy Harvesting Techniques for Wireless Sensor Networks*, 2016
37. Yildiz, F., *Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques*. *The Journal of Technology Studies*, 2009
38. Szabo, L., *The history of using solar energy*. 2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS), 2017
39. *Ηλιακή ενέργεια*, Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy Accessed 3 Oct 2020
40. *Ηλιοθερμικά συστήματα*, Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_thermal_energy Accessed 3 Oct 2020
41. *Φωτοβολταϊκά συστήματα*, Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_system Accessed 3 Oct 2020

42. Fuqiang Cheng, *Calculation Methods for Thermoelectric Generator Performance*, December 21st 2016, DOI: 10.5772/65596
43. Hughes, M., *Wireless RF Energy Harvesting: RF-to-DC Conversion and a Look at Powercast Hardware*. All About Circuits, 2018.
<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/wireless-rf-energy-harvesting-rf-to-dc-conversion-powercast-hardware/>
44. Ding, L., Akbarzadeh, A. and Tan, L., *A review of power generation with thermoelectric system and its alternative with solar ponds*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81, pp.799–812.
45. Bertacchini, A., Larcher, L., Lasagni, M. and Pavan, P., *Ultra low cost triboelectric energy harvesting solutions for embedded sensor systems*. 2015 IEEE 15th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO), 2015
46. Khushboo and Azad, P., *Triboelectric nanogenerator based on vertical contact separation mode for energy harvesting*. 2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA), 2017
47. *ΕΥΦΥΗ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (Μηχανική των πιεζοηλεκτρικών υλικών)*, Κεφάλαιο 6
http://ecourse.uoi.gr/pluginfile.php/112867/mod_resource/content/1/%CE%9A%CE%95%CE%A6%CE%91%CE%9B%CE%91%CE%99%CE%9F-6.pdf
Accessed 8 Oct 2020
48. Woodford, C., *Piezoelectricity - How does it work?: What is it used for?* Explain that Stuff, 2018.
<https://www.explainthatstuff.com/piezoelectricity.html>
49. Al Ahmad, Mahmoud & Elshurafa, Amro & Salama, Khaled & Alshareef, Husam, *Determination of maximum power transfer conditions of bimorph piezoelectric energy harvesters*. *Journal of Applied Physics*, 2012, DOI: 111.10.1063/1.4714644.
50. Rafique, S., *Piezoelectric Vibration Energy Harvesting: Modeling & Experiments*. Cham: Springer International Publishing, 2018
51. Μαρία Γρυσμπολάκη, Αγγελική Μαρία Ζαγουράκη, *Πιεζοηλεκτρισμός*, http://courses.arch.ntua.gr/fsr/142082/Grysmpolakh_Zagoyrakh.pdf. Accessed 8 Oct 2020
52. *Αποθήκευση Ενέργειας*, ClarkeEnergy <https://www.clarke-energy.com/el/energy-storage/> Accessed 8 Oct 2020
53. *Μπαταρία*, Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_battery Accessed 12 Oct 2020
54. *BU-209: How does a Supercapacitor Work?*, Battery types, Basics You Should Know, Battery University. https://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor Accessed 12 Oct 2020
55. *BU-101: When Was the Battery Invented?*, Crash Course on Batteries, Basics You Should Know, Battery University. https://batteryuniversity.com/learn/article/when_was_the_battery_invented Accessed 15 Oct 2020
56. *BU-105: Battery Definitions and what they mean*, Crash Course on Batteries, Basics You Should Know, Battery University.

- https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/battery_definitions
Accessed 15 Oct 2020
57. *BU-103: Global Battery Markets*, Crash Course on Batteries, Basics You Should Know, Battery University.
https://batteryuniversity.com/learn/article/global_battery_markets Accessed 15 Oct 2020
58. *BU-106: Advantages of Primary Batteries*, Crash Course on Batteries, Basics You Should Know, Battery University.
https://batteryuniversity.com/learn/article/primary_batteries Accessed 21 Oct 2020
59. Ivan Cowie, *All About Batteries*, EE times, 2013-2014.
60. *Battery characteristics and applications*, Battery Association of Japan.
<http://www.baj.or.jp/e/knowledge/feature.html> Accessed 21 Oct 2020
61. *Variety of batteries*, Battery Association of Japan.
<http://www.baj.or.jp/e/knowledge/type.html> Accessed 22 Oct 2020
62. *BU-205: Types of Lithium-ion*, Battery types, Basics You Should Know, Battery University.
https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion Accessed 25 Oct 2020
63. *Lithium polymer battery*, From Wikipedia, the free encyclopedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_polymer_battery Accessed 25 Oct 2020
64. *BU-203: Nickel-based Batteries*, Battery types, Basics You Should Know, Battery University.
https://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries Accessed 25 Oct 2020
65. *BU-211: Alternate Battery Systems*, Battery types, Basics You Should Know, Battery University.
https://batteryuniversity.com/learn/article/alternate_battery_systems Accessed 29 Oct 2020
66. *BU-212: Future Batteries*, Battery types, Basics You Should Know, Battery University.
https://batteryuniversity.com/learn/article/experimental_rechargeable_batteries Accessed 29 Oct 2020
67. *Using Lithium-Ion Batteries in Embedded Systems*, Toradex, 5 September 2018. <https://www.toradex.com/blog/using-lithium-ion-batteries-in-embedded-systems> Accessed 29 Oct 2020
68. *BU-104b: Battery Building Blocks*, Crash Course on Batteries, Basics You Should Know, Battery University.
https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_104b_building_blocks_of_a_battery Accessed 2 Nov 2020
69. *BU-901: Fundamentals in Battery Testing*, Battery Testing and Monitoring, The Battery and You, Battery University.
https://batteryuniversity.com/learn/article/difficulties_with_testing_batteries Accessed 2 Nov 2020
70. *BU-903: How to Measure State-of-charge*, Battery Testing and Monitoring, The Battery and You, Battery University.

- https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_state_of_charge
Accessed 4 Nov 2020
71. BU-902: *How to Measure Internal Resistance*, Battery Testing and Monitoring, The Battery and You, Battery University.
https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_internal_resistance Accessed 5 Nov 2020
 72. BU-904: *How to Measure Capacity*, Battery Testing and Monitoring, The Battery and You, Battery University.
https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_capacity Accessed 7 Nov 2020
 73. BU-907a: *Battery Rapid-test Methods*, Battery Testing and Monitoring, The Battery and You, Battery University.
https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_907a_battery_rapid_test_methods Accessed 8 Nov 2020
 74. BU-909: *Battery Test Equipment*, Battery Testing and Monitoring, The Battery and You, Battery University.
https://batteryuniversity.com/learn/article/battery_test_equipment Accessed 12 Nov 2020
 75. LabVIEW, From Wikipedia, the free encyclopedia
<https://en.wikipedia.org/wiki/LabVIEW> Accessed 20 Nov 2020
 76. Jeffrey., Travis, *LabVIEW for everyone : graphical programming made easy and fun*. Kring, Jim. (3rd ed.), 2006.
 77. H. A. Andrade and S. Kovner, "Software synthesis from dataflow models for G and LabVIEW/sup TM/," Conference Record of Thirty-Second Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (Cat. No.98CH36284), Pacific Grove, CA, USA, 1998, pp. 1705-1709 vol.2, DOI: 10.1109/ACSSC.1998.751616.
 78. Daniel Parrott, "Announcing LabVIEW NXG 4.0 and LabVIEW 2019 SP1", NI Forums, 11 May 2019 <https://forums.ni.com/t5/LabVIEW/Announcing-LabVIEW-NXG-4-0-and-LabVIEW-2019-SP1/td-p/3984709?profile.language=en> Accessed 12 Dec 2020
 79. NI Releases Free Editions of Flagship Software: LabVIEW, businesswire, 28 April 2020
<https://www.businesswire.com/news/home/20200428005266/en/NI-Releases-Free-Editions-Flagship-Software-LabVIEW> Accessed 13 Dec 2020