
**ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ Τ.Ε.**



**ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ
MATLAB**

ΤΟΥ

ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ

Επιβλέπων: ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΚΟΣΜΑΝΗΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΣΙΝΔΟΣ, 2018

Table of Contents

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
	ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ.....	3
2	ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗΣ.....	4
2.1	ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ.....	4
2.1.1	ΟΔΗΓΟΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ.....	4
2.1.2	ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	7
2.2	ΕΙΔΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ.....	10
2.2.1	ΜΟΛΥΒΔΟΥ-ΟΞΕΟΣ (Lead-Acid).....	10
2.2.2	ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΝΙΚΕΛΙΟΥ.....	19
2.2.3	ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΛΙΘΙΟΥ.....	41
3	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ.....	59
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	59
3.2	ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ.....	60
3.2.1	ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	60
3.2.2	ΤΥΠΟΙ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ.....	61
3.3	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....	61
3.3.1	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	61
3.3.2	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ.....	63
3.4	ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	64
3.4.1	ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	64
4	ΣΥΛΛΟΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	69
4.1	ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	69
4.1.1	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	69
4.1.2	ΧΡΗΣΗ MATLAB.....	70
4.2	ΑΝΑΛΥΣΗ & ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	71
4.2.1	ΣΚΟΠΟΣ, ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ & ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ.....	71
4.2.2	ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ & ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΜΕΣΩ MATLAB.....	72
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	82
6	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	82
7	ΠΗΓΕΣ.....	86

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

Η πρώτη ιστορικά καταγεγραμμένη μπαταρία που μπόρεσε να παρέχει συνεχόμενα ρεύμα σε ένα κύκλωμα, ήταν η «βολταϊκή στήλη» (voltaic pile) η οποία πήρε το όνομα της από τον Ιταλό φυσικό-χημικό Αλεσσάντρο Βόλτα. Οι πρώτες δημοσιεύσεις των πειραμάτων του Βόλτα το 1799, πυροδότησαν κι άλλες ανακαλύψεις όπως την ηλεκτρόλυση του νερού από τον Γουίλιαμ Νίκολσον και Άντονη Καρλάιλ το 1800 και την ανακάλυψη διάφορων των από το 1807 έως το 1808 από τον Χάμφρη Ντέιβη.

Η ηλεκτρική βιομηχανία του 19^{ου} αιώνα βασίστηκε σε εξελιγμένες εκδοχές της μπαταρίας του Βόλτα (ή κελί Ντάνιελ και κελί Γκρόουβ), μέχρι την εμφάνιση του «δυναμό» τη δεκαετία του 1870.

Η εφεύρεση του Βόλτα βασίστηκε στην ανακάλυψη του Λουίτζι Γκαλβάνι του 1780 η οποία χρησιμοποιούσε το πόδι βατράχου ως ηλεκτρολύτη. Έχοντα ήδη παρουσιάσει το 1794 ότι όταν δύο μέταλλα και ένα πανί εμποτισμένο σε άλμη σχηματίζουν κύκλωμα παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα, το 1800 τοποθέτησε αρκετά ζευγάρια δίσκων χαλκού (ή ασήμι) και ψευδάργηρου (ηλεκτρόδια), διαχωριζόμενα από κομμάτια πανί ή χαρτί και εμποτισμένα σε άλμη, για να αυξηθεί η αγωγιμότητα. Με την σύνδεση των επαφών στο πάνω και το κάτω μέρος της στήλης με χρήση σύρματος (καλωδίου), δημιουργούταν ηλεκτρικό ρεύμα εντός της στήλης και του καλωδίου.

Επεκτείνοντας την έρευνα της ηλεκτρικής στήλης του Βόλτα και την δουλειά του μέντορά του στον ηλεκτρομαγνητισμού, ο Μάικλ Φάραντεϊ πιστεύοντας πως όλες οι προσεγγίσεις του ηλεκτρισμού μέχρι εκείνη την εποχή (βολταϊκή, μαγνητική, θερμική και ζωική) επρόκειτο για την ίδια επιστήμη και πως έπρεπε να μελετηθούν παράλληλα. Η δουλειά του ώστε να αποδείξει την υπόθεσή του τον οδήγησαν στην διατύπωση δύο νόμων αντίθετων με την επικρατούσα θεωρία. Ωστόσο λόγω της συνεισφοράς του Βόλτα και του Φάραντεϊ στην κατανόηση και εδραίωση της επιστήμης της Ηλεκτροχημείας και οι δύο θεωρήθηκαν “πατέρες” του ηλεκτρισμού και τιμήθηκαν με την ονομασία δύο μονάδων μέτρησης στο σύστημα SI αντίστοιχα (volt=ηλεκτρική τάση, farad=ηλεκτρική χωρητικότητα). Οι λέξεις «ηλεκτρόδιο» και «ηλεκτρολύτης» που χρησιμοποιούνται για την επεξήγηση του βολταϊκού κελιού καθιερώθηκαν μετά από 10 χρόνια από την εφεύρεση του από τον Φάραντεϊ.

Βέβαια, η όποια εξέλιξη στον τομέα της ηλεκτροχημείας μέχρι το 1836 αφορούσε σε πρωτεύοντα κελία όπως ονομάστηκαν μεταγενέστερα, δηλαδή σε μπαταρίες μίας χρήσης. Η πρώτη κατά τα σύγχρονα δεδομένα δευτερεύουσα μπαταρία, δηλαδή επαναφορτίσιμη, εφευρέθηκε το 1836 από τον Άγγλο Χημικό Τζον Φ. Ντάνιελ. Το επόμενη πρωτότυπη επαναφορτιζόμενη μπαταραία εμφανίστηκε το 1842 από τον Γερμανό φυσικό Γιόχαν Κρίστιαν Πόκεντορφ, αλλά η πατέντα καταχωρήθηκε στον Γάλλο Γιουτζίν Γκρένεντ τον νεότερο, ο οποίος βελτιστοποίησε την κατασκευή, η οποία πήρε και το όνομα του (κελί Γκρένεντ). Χρησιμοποιήθηκε για πάνω από 60 χρόνια μετά την ανακάλυψη της, μέχρι που σταδιακά αντικαταστάθηκε πλήρως από την μπαταρία Μολύβδου-Οξέος του Γάλλου φυσικού Γκαστόν Πλάντ, την οποία εφηύρε το 1859.

Το 1886 αναπτύχθηκαν τα πρώτα «στεγνά κελιά» και αυτό ήταν μεγάλη πρόοδος για φορητές εφαρμογές και όπως έχει αποδειχθεί μετά από χρόνια, για την ηλεκτροκίνηση.

Το 1899 ο Σουηδός Γουόλντμαρ Γιούγκερ εφευρίσκει την τεχνολογία Νικελίου-Καδμίου όπου μετά από δύο χρόνια βελτιώθηκε από τον Τόμας Έντισον με την αντικατάσταση του καδμίου με σίδηρο.

Έχοντας ακολουθηθεί μια αφάνταστα μεγάλη πορεία εξέλιξης της επιστημονικής σκέψης παράλληλα με αυτή των μπαταριών, η εποχή της αναβίωσης της ηλεκτροκίνησης είναι γεγονός με κάποιες βασικές τεχνολογίες μπαταριών να διαφαίνονται ή να ξεχωρίζουν από την γκάμα των ηλεκτροχημικών συστημάτων που ξέρουμε, αλλά και να προκύπτουν νέες πιο εξεζητημένες και αποδοτικές τεχνολογίες.

2 ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

2.1.1 ΟΔΗΓΟΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

Η μπαταρία είναι μια συσκευή που μετατρέπει χημική ενέργεια σε ηλεκτρική και το αντίθετο. Η κατανόηση της ορολογίας που χρησιμοποιείται για την περιγραφή, την κατηγοριοποίηση και τη σύγκριση μπαταριών για ηλεκτρικά υβριδικά, ενσύρματα υβριδικά και πλήρως ηλεκτρικά οχήματα. Αυτός ο οδηγός βοηθάει στην κατανόηση του προφίλ κάθε μπαταρίας καθορίζοντας τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν τις συνθήκες λειτουργίας της κάθε μίας και περιγράφοντας τις προδιαγραφές που έχει ορίσει ο εκάστοτε κατασκευαστής για το αντίστοιχο μοντέλο μπαταρίας.

2.1.1.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Κελί, Μονάδα & Πακέτο – Τα υβριδικά ηλεκτρικά και τα ηλεκτροκίνητα οχήματα είναι εξοπλισμένα με ένα πακέτο μπαταριών υψηλής τάσης που αποτελείται από μονάδες κελιών, οι οποίες συνδέονται σε σειρά αλλά και παράλληλα. Μια μονάδα αποτελείται από μερικά κελιά τα οποία με τη σειρά τους μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους και με τους δύο τρόπους.

Η τεχνολογία συνδεσμολογίας του πακέτου μονάδων επηρεάζει δραματικά τα χαρακτηριστικά απόδοσης και λειτουργίας ενός πακέτου μονάδων, επομένως και του ίδιου το οχήματος. Λόγω της σημασίας της συνδεσμολογίας η βιομηχανία πραγματοποιεί έρευνα ανάλογα την εφαρμογή του κάθε πακέτου. Η τεχνολογία συνδεσμολογίας διαφέρει από εταιρεία σε εταιρεία και αποτελεί επιχειρησιακό μυστικό.

Κατηγοριοποίηση Μπαταριών - Κάθε μπαταρία κατασκευάζεται διαφορετικά από μία άλλη και διαφορές συναντιόνται ακόμα και σε μπαταρίες ίδιας χημείας. Ο *μεγάλος συμβιβασμός* στην ανάπτυξη μιας μπαταρίας γίνεται μεταξύ της *ισχύος* και της *ενέργειας*. Οι μπαταρίες μπορούν να παρέχουν είτε υψηλή ισχύ, είτε υψηλή ενέργεια, αλλά όχι και τα δύο. Συχνά οι κατασκευαστές κατηγοριοποιούν τις μπαταρίες χρησιμοποιώντας αυτά τα δύο χαρακτηριστικά. Μία ακόμα κοινή κατηγοριοποίηση είναι η *υψηλή ανθεκτικότητα*, δηλαδή η χημεία της μπαταρίας έχει τροποποιηθεί έτσι ώστε να παρέχει υψηλή διάρκεια ζωής, θυσιάζοντας υψηλές τιμές ισχύος και ενέργειας.

Ρυθμοί E- και C- - Συνήθως, περιγράφοντας μια μπαταρία, το ρεύμα εκφόρτισης εκφράζεται σε ρυθμό C (C-rate) ούτως ώστε να συσχετιστεί με την χωρητικότητα της μπαταρίας, η οποία διαφέρει από μοντέλο σε μοντέλο και από χημεία σε χημεία. Ο ρυθμός C είναι η μέτρηση του ρυθμού με τον οποίο το ρεύμα εκφόρτισης θα εκφορτίσει πλήρως την μπαταρία σε μία ώρα. Για μια μπαταρία χωρητικότητας 100 Amp-hrs, συνεπάγεται με ρεύμα εκφόρτισης 100 Amps. Ένας ρυθμός 5C για αυτή την μπαταρία θα ισούται με 500 Amps και ρυθμός C/2 θα ισούται με 50 Amps. Ομοίως, ο ρυθμός E χαρακτηρίζει την ισχύ εκφόρτισης. Ρυθμός 1E είναι η ισχύς εκφόρτισης που απαιτείται για να εκφορτιστεί μία μπαταρία σε μία ώρα.

Πρωτεύοντα & Δευτερεύοντα Κελιά – Παρά την ασυνήθιστη ακουστική του χαρακτηρισμού, οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται για ηλεκτροκίνητα οχήματα και φορητές συσκευές αποκαλούνται *δευτερεύουσες*. Ένα πρωτεύον κελί δεν μπορεί να επαναφορτιστεί. Παρά τις αναρίθμητες προσπάθειες ανά τα χρόνια να εφευρεθεί τρόπος επαναφόρτισης ενός πρωτεύοντος κελιού από εταιρείες και ιδιώτες, αυτή η πρακτική έχει εγκαταλειφθεί καθώς έστω και η ελάχιστη αντιστροφή της χημικής αντίδρασης εντός ενός κελιού του είδους μπορεί να αποφέρει καταστροφικά αποτελέσματα με την πιθανότητα ελάχιστης αποκατάστασης της ενέργειας.

2.1.1.2 ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

Οι παρακάτω παράμετροι χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την παρούσα κατάσταση μιας μπαταρίας σε πραγματικό χρόνο.

Κατάσταση Φόρτισης (State Of Charge) (%) – Είναι μια ποσότητα της παρούσας κατάστασης μιας μπαταρίας, ως ποσοστό της μέγιστης χωρητικότητάς της. Η SOC γενικά υπολογίζεται από την ολοκλήρωση των τιμών του ρεύματος, ώστε να αποφασιστεί η αλλαγή στην χωρητικότητα της μπαταρίας με τη πάροδο του χρόνου.

Βάθος Εκφόρτισης (Depth Of Discharge) (%) – Το ποσοστό της χωρητικότητας της μπαταρίας που έχει εκφορτιστεί εκφράζεται ως ποσοστό της μέγιστης χωρητικότητας. Εκφόρτιση έως 80% τουλάχιστον, αναφέρεται ως βαθιά εκφόρτιση.

Τελική Τάση (Terminal Voltage) (V) - Η τάση μεταξύ των ακροδεκτών της μπαταρίας με εφαρμοζόμενο φορτίο. Η τελική τάση ποικίλει ανάλογα την SOC και την τάση φόρτισης/εκφόρτισης.

Το επίθετο “terminal” μεταφράζεται ως “τελικός” με χορική έννοια.

Τάση Ανοικτού Κυκλώματος (Open-circuit Voltage) (V) – Η τάση μεταξύ των ακροδεκτών της μπαταρίας χωρίς εφαρμοζόμενο φορτίο. Η τάση ανοικτού κυκλώματος επηρεάζεται από την SOC ευθέως ανάλογα.

Εσωτερική Αντίσταση (Ω) – Η αντίσταση που προβάλλεται στην μετακίνηση των ηλεκτρονίων λόγω της φύσης της χημείας της κάθε μπαταρίας. Γενικά διαφέρει από φόρτιση σε εκφόρτιση και είναι μέγεθος εξαρτημένο από την SOC. Όσο αυξάνεται η εσωτερική αντίσταση, η αποδοτικότητα της μπαταρίας μειώνεται και η θερμοκρασιακή σταθερότητα διαταράσσεται καθώς περισσότερη ενέργεια φόρτισης μετατρέπεται σε θερμότητα.

2.1.1.3 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

Κάθε εταιρεία είναι υποχρεωμένη να παρέχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά μιας μπαταρίας σε συνοδευτικό εγχειρίδιο, μαζί με το προϊόν. Κάποια από τα παρακάτω στοιχεία συνήθως αναγράφονται και στο εξωτερικό των ίδιων των μπαταριών.

Ονομαστική Τάση (Nominal Voltage) (V) – Η αναφερόμενη ή τάση αναφοράς μιας μπαταρίας, λανθασμένα αναγνωρίσιμη ως η κανονική τάση μιας μπαταρίας.

Τάση Ανακοπής (Cut-off Voltage) – Η ελάχιστη επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας. Είναι η τάση που γενικά καθορίζει την “άδεια” κατάσταση μιας μπαταρίας, η οποία στην πραγματικότητα ποτέ δεν υποδεικνύει μηδενική ύπαρξη φορτίου εντός της μπαταρίας.

Ονομαστική Χωρητικότητα (Ah για συγκεκριμένο ρυθμό C) – Η συνολικά διαθέσιμη χωρητικότητα σε Amp-hours όταν η μπαταρία εκφορτίζεται σε συγκεκριμένο ρεύμα εκφόρτισης (καθορισμένη ως ρυθμό C), από 100% SOC έως της τάση αποκοπής. Η χωρητικότητα υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το ρεύμα εκφόρτισης (Amperes) με τον χρόνο εκφόρτισης (hours) και μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού C.

Ονομαστική Ενέργεια (Wh για συγκεκριμένο ρυθμό C) – Η ενεργειακή χωρητικότητα μιας μπαταρίας, η συνολικές Watt-hours διαθέσιμες όταν η μπαταρία είναι εκφορτισμένη σε συγκεκριμένο ρεύμα εκφόρτισης (καθορισμένη ως ρυθμό C) από το 100% της SOC έως την τάση αποκοπής. Η ενέργεια υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την ισχύ εκφόρτισης (Watts) με τον χρόνο εκφόρτισης (hours). Όπως με την χωρητικότητα, η ενέργεια μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού C.

Κύκλος Ζωής (για συγκεκριμένο DOD) – Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης που μπορεί να πραγματοποιήσει μία μπαταρία πριν σταματήσει να λειτουργεί, ώστε να ανταποκριθεί σε συγκεκριμένα κριτήρια απόδοσης. Ο αριθμός αυτός υπολογίζεται για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Η πραγματική ζωή λειτουργίας μιας μπαταρίας επηρεάζεται από τον ρυθμό και το βάθος εκφόρτισης, αλλά και από άλλες συνθήκες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία του περιβάλλοντος στο οποίο χρησιμοποιείται. Όσο βαθύτερο γίνεται το DOD, τόσο μειώνονται και οι κύκλοι ζωής.

Ειδική Ενέργεια (Wh/kg) – Η ονομαστική ενέργεια μια μπαταρίας ανά μονάδα μάζας, μερικές φορές αποκαλείται και ως βαρυτική ενεργειακή πυκνότητα (gravimetric). Η ειδική ενέργεια είναι σημαντικό χαρακτηριστικό της χημείας των μπαταριών και των πακέτων. Παράλληλα με την ενεργειακή κατανάλωση ενός οχήματος, καθορίζει το βάρος της μπαταρίας που απαιτείται για να επιτευχθεί μια δεδομένη ηλεκτρική αυτονομία.

Ειδική Ισχύς (W/kg) – Η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς ανά μονάδα μάζας. Η ειδική ισχύς είναι το εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό της χημείας των μπαταριών και των πακέτων. Καθορίζει το βάρος της μπαταρίας που απαιτείται για να επιτευχθεί μια δεδομένη κατάσταση επιδόσεων.

Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/L) – Η ονομαστική ενέργεια της μπαταρίας ανά μονάδα όγκου, μερικές φορές αποκαλούμενη και ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα. Η ειδική ενέργεια είναι ένα χαρακτηριστικό της χημείας μιας μπαταρίας. Παράλληλα με την ενεργειακή κατανάλωση του οχήματος, καθορίζει και το απαιτούμενο μέγεθος της μπαταρίας για δεδομένη ενεργειακή αυτονομία.

Πυκνότητα Ισχύος (W/L) – Η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς ανά μονάδα όγκου. Η ειδική ισχύς είναι χαρακτηριστικό της χημείας μιας μπαταρίας. Καθορίζει το απαιτούμενο μέγεθος μπαταρίας για να επιτευχθεί δεδομένος στόχος επιδόσεων.

Μέγιστο Συνεχές Ρεύμα Εκφόρτισης – Η μέγιστη τιμή ρεύματος υπό την οποία η μπαταρία μπορεί να εκφορτιστεί συνεχόμενα. Αυτό το όριο συνήθως καθορίζεται από τον κατασκευαστή, ώστε να αποφευχθούν εκτεταμένοι ρυθμοί εκφόρτισης που θα ζημιώνανε τη μπαταρία ή θα μειώνανε την χωρητικότητά της. Παράλληλα με την μέγιστη συνεχόμενη ισχύ του ρότορα, καθορίζει και τη μέγιστη διατηρήσιμη ταχύτητα και επιτάχυνση του οχήματος.

Μέγιστο Παλμικό Ρεύμα Εκφόρτισης 30 Δευτερολέπτων – Μέγιστη τιμή ρεύματος στην οποία η μπαταρία μπορεί να εκφορτιστεί παλμικά έως 30 δευτερόλεπτα. Αυτό το όριο συνήθως καθορίζεται από τον κατασκευαστή, ώστε να αποφευχθούν εκτεταμένοι ρυθμοί εκφόρτισης που θα ζημιώνανε τη μπαταρία ή θα μειώνανε την χωρητικότητά της. Παράλληλα με την μέγιστη ισχύς του ηλεκτροκινητήρα, καθορίζει και την επιταχυντική επίδοση του οχήματος (0-100 km/h).

Τάση Φόρτισης – Η τάση με την οποία η μπαταρία φορτίζεται πλήρως. Συνήθως τα πλάνα φόρτισης αποτελούνται από σταθερά ρεύματα φόρτισης έως ότου η τάση της μπαταρίας φτάσει την τάση φόρτισης, έπειτα την σταθερή τάση φόρτισης, επιτρέποντας στην τάση να αυξομειώνεται ελάχιστα (tapering) έως ότου φτάσει μία πάρα πολύ μικρή τιμή.

Τάση Διατήρησης (Float Voltage) – Η τάση στην οποία η μπαταρία συντηρεί το φορτίο της μετά το πέρας της φόρτισης, δηλαδή του 100% της SOC, ώστε να διατηρηθεί η χωρητικότητά της καθώς η αυτοεκφόρτιση είναι ένα φαινόμενο που δεν αντιμετωπίζεται αλλιώς.

(Προτεινόμενη) Τάση Φόρτισης – Η ιδανική τιμή ρεύματος φόρτισης στην οποία η μπαταρία φορτίζεται αρχικά (έως και 70% SOC) υπό σταθερό πλάνο φόρτισης και πριν μεταβεί σε σταθερή τάση φόρτισης.

(Μέγιστη) Εσωτερική Αντίσταση – Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας, συνήθως διαφορετικής τιμής κατά την εκφόρτιση από την φόρτιση.

2.1.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Σύμφωνα με τη Freedonia Group, εταιρεία βιομηχανικής έρευνας, η παγκόσμια ζήτηση κύριων και δευτερευόντων μπαταριών, ορμώμενη κυρίως από ηλεκτρονικές συσκευές και ηλεκτρικά εργαλεία προβλέπεται να αυξηθεί κατά 7,7 % ετησίως, ύψους 120 δισεκατομμυρίων δολαρίων των ΗΠΑ, έως το 2019. Η πραγματική αύξηση όμως οφείλεται στις δευτερεύουσες (επαναφορτιζόμενες) μπαταρίες και σύμφωνα με την Frost & Sullivan, οι δευτερεύουσες μπαταρίες δικαιολογούν το 76,4 % της παγκόσμιας αγοράς, νούμερο που αναμένεται να έχει ξεπεράσει το 82,6 % έως το 2020.

Η αποτελεσματική χρήση χαμηλών και άνευ ρύπων πηγών ενέργειας, όπως οι ανανεώσιμες, αλλά διακοπτόμενες, ηλιακή και αιολική ενέργεια, απαιτεί στάσιμες, υψηλής απόδοσης, μακρόβιες και χαμηλής συντήρησης λύσης στην αποθήκευση ενέργειας.

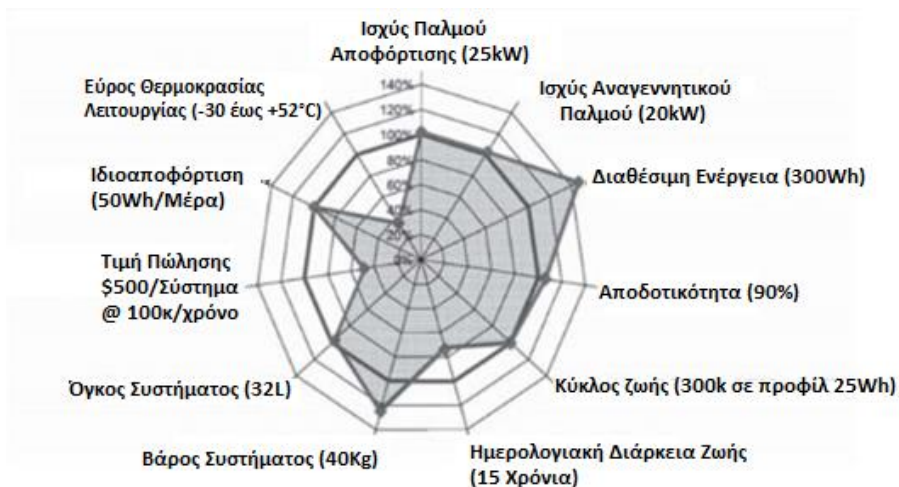
Για τις ΗΠΑ, όλα τα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα μπορούν να μειώσουν την απαίτηση σε αργό πετρέλαιο και θα συνεισφέρουν στην μελλοντική ζήτηση μπαταριών. Συνυπολογίζοντας την αποδοτικότητα των ηλεκτροκίνητων και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τα ηλεκτροκίνητα

οχήματα μπορούν να μειώσουν την χρήση καυσίμων κατά το ¼ της σημερινής κατανάλωσης στις ΗΠΑ και να μειώσουν την εξάρτηση από αργό πετρέλαιο κατά το 1/6 του σημερινού επιπέδου.

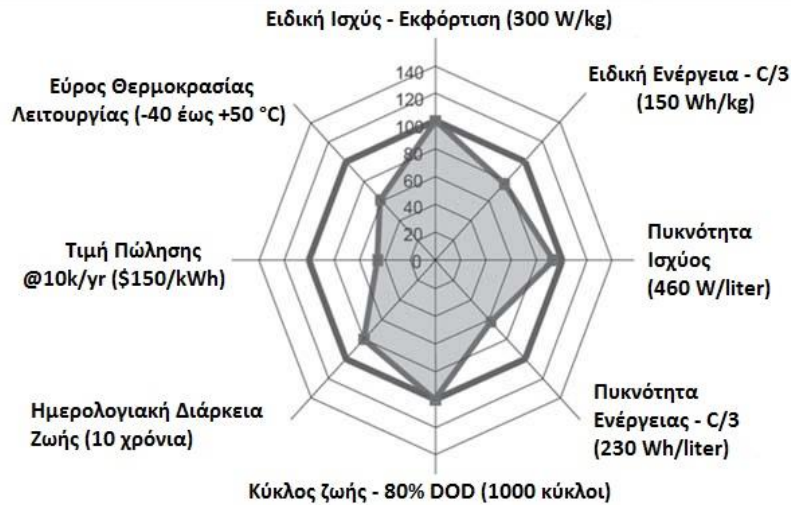
Το Πρόγραμμα Τεχνολογίας Οχημάτων του Τμήματος Ενέργειας των ΗΠΑ (ΤΕΗ), έχει εστιάσει στην ηλεκτροχημική αποθήκευση ενέργειας με βάση τα ιόντα λιθίου, λόγω της ηλεκτροχημικής δυνατότητας και θεωρητικής χωρητικότητας που παρέχεται από το σύστημα. Οι μπαταρίες Ιόντων-Λιθίου μπορούν να παρέχουν αξιόλογη αποθήκευση και επαναφόρτιση. Οι επικρατέστερες εκδοχές τέτοιου είδους μπαταριών είναι οι **Ιόντων-Λιθίου(Li-ion) (παραλλαγή, Li-ion manganese oxide), Ιόντων-Πολυμερούς Λιθίου(Li-Po)** και **Λιθίου-Μετάλλου(Li-M)**.

Οι βραχυπρόθεσμοι στόχοι του ΤΕΗ για το παραπάνω πρόγραμμα υποβολήθηκαν για την ισχύ των ηλεκτροκίνητων οχημάτων, έχουν επιτευχθεί ή ακόμα ξεπεραστεί σε 8 από 11 κατηγορίες, υποδεικνύοντας την σοβαρή επιτυχία του προγράμματος. Οι οκτώ κατηγορίες περιλαμβάνουν την παλμική ισχύ αποφόρτισης, ανακτήσιμη παλμική ισχύ, διαθέσιμη ενέργεια, αποδοτικότητα, κύκλο ζωής, βάρος συστήματος, όγκο συστήματος και αυτοεκφόρτιση*. Ωστόσο τρεις από τους στόχους φαίνεται να είναι οι πιο δύσκολοι επιτεύξιμοι: θερμοκρασία λειτουργίας από τους -30° έως 52°C, διάρκεια ζωής 15 χρόνων και τιμή πώλησης από 500 έως 800 δολάρια ανά σύστημα στις 100.000 μονάδες ανά χρόνο. Για τα Ενσύρματα Ηλεκτροκίνητα Υβριδικά Οχήματα (PHEVs) χρονικά άμεσα και για τα Ηλεκτροκίνητα (EVs) μακροπρόθεσμα, οι στόχοι είναι μακράν της επίτευξης, λόγω σημαντικών εμποδίων σε υλικά και μεθόδους ανάπτυξης και επεξεργασίας.

Στις εικόνες 1 και 2 παρουσιάζονται οι στόχοι και τα επιτεύγματα της Κοινοπραξίας Εξελιγμένων Μπαταριών για τις ΗΠΑ όπως και του ΤΕΗ.



Εικόνα 1 - Διάγραμμα αράχνη για EVs και HEVs. Το πολύγωνο που αντιστοιχεί στο 100% ισοσταθμίζει τους στόχους του DOE για HEVs και τους στόχους του USABC για EVs. Η γκριζα περιοχή αντιπροσωπεύει τα τεχνολογικά επιτεύγματα.



Εικόνα 2 - Διάγραμμα αράχνη για EVs και HEVs. Ισχύουν οι ίδιες ιδιότητες με το διάγραμμα της Εικόνας 1.

Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα εστιάζει σε χαρακτηριστικά όπως ονομαστικό κόστος, απόδοση, ασφάλεια και τη διάρκεια ζωής (Πίνακας 1) και αφορούν στο περιορισμό της επίδοσης και σχετίζονται με τα υλικά κατασκευής. Η χαμηλή επίδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι πρόβλημα που σχετίζεται με τη διάχυση σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η απώλεια ενέργειας λόγω χρήσης, είναι πρόβλημα που σχετίζεται με τη μηχανική συμπεριφορά, η εμφάνιση ρωγμών και επέκταση αυτών οφείλεται σε καταστροφικές συγκρούσεις και επακόλουθη δημιουργία στρωμάτων και παθητικοποίηση* των επιφανειών των ηλεκτροδίων.

Πίνακας 1 – Παράμετροι που σχετίζονται με τον Περιορισμό Απόδοσης και τα Υλικά Κατασκευής

Κόστος	Το κόστος των σύγχρονων μπαταριών βασισμένες στην τεχνολογία ιόντων-λιθίου ανά kW, είναι προσεγγιστικά «δύναμη» του δύο. Το ύψος αυτό οφείλεται στο μεγάλο κόστος των πρώτων υλών, στις διαδικασίες επεξεργασίας αυτών και στο κόστος της δημιουργίας κελιών, ομαδοποίησης/πακετάρισμα και στην βιομηχανική τους παραγωγή.
Απόδοση	Τα εμπόδια στο θέμα της απόδοσης, κυρίως συσχετίζονται με την μειωμένη ισχύ εκφόρτισης σε χαμηλές θερμοκρασίες και απώλεια ισχύος λόγω της χρήσης και συνεπώς της γήρανσης της μπαταρίας.
Ασφάλεια	Κατ' ουσία, η τεχνολογία ιόντων-λιθίου δεν είναι εξ ολοκλήρου ασφαλής. Βραχυκύκλωμα, υπερφόρτιση, υπερεκφόρτιση, σύγκρουση και υψηλή θερμοκρασία μπορούν να οδηγήσουν σε απότομη θερμική απαγωγή, φωτιά και εν τέλει σε έκρηξη.
Κύκλος ζωής	Υβριδικά συστήματα κίνησης έχουν ως εκτιμώμενη διάρκεια ζωής τα 15 χρόνια. Σε κύκλους ζωής αυτό μεταφράζεται ως 300.000 κύκλους φόρτισης. Ο κύκλος ζωής μιας μπαταρίας έχει επιδειχθεί, αλλά η ημερολογιακή διάρκεια ζωής δεν έχει εξακριβωθεί.

2.2 ΕΙΔΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

2.2.1 ΜΟΛΥΒΔΟΥ-ΟΞΕΟΣ (Lead-Acid)

Η εφεύρεση καταχωρείται στον Γάλλο φυσικό Γκαστόν Πλαντέ (Gaston Planté), με τον τίτλο της πρώτης επαναφορτιζόμενης μπαταρίας. Παρά την χαμηλή ειδική ενέργεια και ισχύ της, η αναλογία κόστους προς βατ (watt) είναι ο βασικός λόγος που η ηλικία της δεν έχει επηρεάσει την εμπορικότητα αυτού του προϊόντος. Αντιθέτως η μακρά ιστορία του συστήματος Μολύβδου-Οξέος έχει ωριμάσει την τεχνολογία με αποτέλεσμα να είναι ένα από τα πιο αξιόπιστα.

Μέχρι και σήμερα είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιημένος τύπος μπαταρίας στον τομέα της αυτοκίνησης και όχι μόνο. Η αφθονία των υλικών από τα οποία κατασκευάζεται η συγκεκριμένη μπαταρία έχει διατηρήσει την αγοραστική της αξία σχετικά χαμηλή, με αποτέλεσμα να την καθιστά προσιτή για την πλειοψηφία των κατασκευαστών. Τα αρνητικά αυτών των μπαταριών είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα λόγω του υψηλού μοριακού βάρους του μολύβδου και η πτωχή απόδοση τους σε χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω των 10°). Επίσης, η φύση του ΘΕΙΙΚΟΥ οξέος εγκυμονεί διάφορους κινδύνους όπως την αναφλεξιμότητά του, αλλά και την αύξηση πίεσης που δημιουργεί εντός του κλειστού περιβάλλοντος της μπαταρίας, λόγω αναθυμιάσεων που προκαλούνται από την απότομη αύξηση τάσης φόρτισης (πάνω από 14,4V). Τέλος, η επεξεργασία των οξέων αποβλήτων κατά την απόσυρση και ανακύκλωση μιας μπαταρίας είναι ένα ακόμα θέμα το οποίο εγκυμονεί κινδύνους προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

2.2.1.1 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Η θεωρητική τιμή τάσης ενός κελιού Μολύβδου-Οξέος είναι 2V με εύρος διακύμανσης από 1,8-2,1V για ανοιχτό κύκλωμα, πλήρους φορτισμένης μπαταρίας. Η τάση διατήρησης (float voltage) ποικίλει ανάλογα με τον τύπο της μπαταρίας, όπως εμβαπτισμένη, τζελ και με γυαλί (AGM), των οποίων οι τάσεις ανέρχονται έως και τα 2,27V. Η τάση εξισορρόπησης και η τάση φόρτισης για θεϊκά κελιά κυμαίνεται από 2,67-3V. Συγκεκριμένες τιμές δίνονται ανάλογα με το σχέδιο και τον κατασκευαστή, από τον δεύτερο και συνήθως αφορούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C με προτεινόμενες ρυθμίσεις για διαφορετικές θερμοκρασίες.

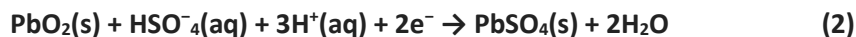
Όλες οι μπαταρίες Μολύβδου-Οξέος λειτουργούν βάσει των ίδιων θεμελιωδών χημικών αντιδράσεων. Στη κατάσταση εκφόρτισης και τα δύο ηλεκτρόδια μετατρέπονται σε θεϊκό μόλυβδο(II) (PbSO₄) και ο ηλεκτρολύτης στερείται μεγάλο μέρος του υδροποιημένου θεϊκού οξέος του και μετατρέπεται κυρίως σε νερό. Η διαδικασία της εκφόρτισης κινητοποιείται από την αγωγή ηλεκτρονίων από το αρνητικό δίκτυο πλακών στο θετικό.

Η γενική αντίδραση που λαμβάνει μέρος εντός της μπαταρίας είναι



Η οποία παράγει μέγιστη τάση ανοικτού κυκλώματος 2,041V (για μοναδιαίο κελί),

η χημική ένωση του μισού κελιού που λαμβάνει χώρα στο **θετικό δίκτυο** πλακών είναι



με παραγόμενη τάση 1,685V, ενώ στο **αρνητικό δίκτυο** η χημική αντίδραση είναι



Η απελευθέρωση δύο ηλεκτρονίων δίνει στο ηλεκτρόδιο ένα δικτυωτό αρνητικό φορτίο ή αρνητικό φορτίο δικτύου (όχι δίκτυο πλακών)*.

Στην κατάσταση πλήρους φόρτισης, το αρνητικό ηλεκτρόδιο αποτελείται από καθαρό μόλυβδο και το θετικό από διοξείδιο του μολύβδου, αφήνοντας τον ηλεκτρολύτη επίσης στην αρχική του σύσταση, δηλαδή ως συγκέντρωση θειικού οξέος.

Κατά την υπερφόρτιση με υψηλές τιμές τάσης, παράγονται αέρια οξυγόνου και υδρογόνου από την ηλεκτρόλυση του νερού, τα οποία απορροφώνται από τα ηλεκτρόδια. Όσο ο ηλεκτρολύτης εκφυλίζεται, χάνοντας την αρχική του σύσταση και ποσότητα, τόσο πιο ευάλωτος γίνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες και ειδικά κατά τη διαδικασία εκφόρτισης, όπου η συγκέντρωση θειικού οξέος στον ηλεκτρολύτη μειώνεται.

2.2.1.1.1 ΕΙΔΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΜΟΛΥΒΔΟΥ-ΟΞΕΟΣ

Με το πέρασμα των χρόνων, η βιομηχανία της μπαταρίας έχει αποφέρει πλήθος τύπων μπαταριών, η μία πιο αποτελεσματική από την άλλη. Γενικότερα οι τύποι προκύπτουν από το είδος των τροποποιήσεων που έχει υποστεί μια μπαταρία. Οι τροποποιήσεις θα αφορούν στην *χημική σύσταση των υλικών και σε κατασκευαστικά στοιχεία της μπαταρίας μαζί με χημικές παρεμβάσεις*, με αφορμή το σκοπό λειτουργίας της εκάστοτε μπαταρίας.

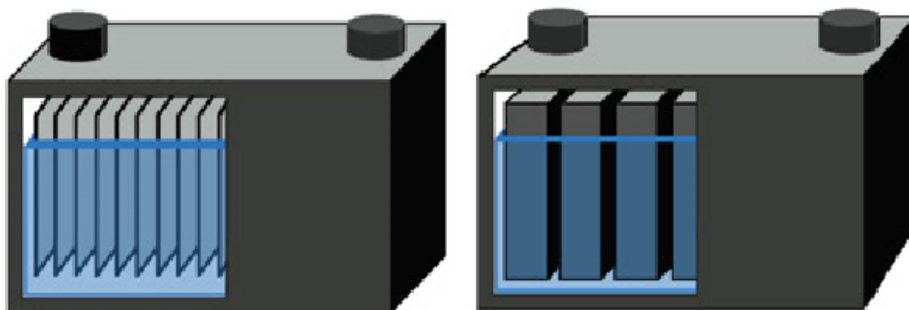
Δύο τύποι μπαταριών Μολύβδου-Οξέος των οποίων τα ηλεκτρόδια έχουν τροποποιηθεί χημικά συγκριτικά με την πρωτότυπη μπαταρία, είναι οι εξής: **Μολύβδου-Ασβεστίου, Μολύβδου-Αντιμονίου**

Οι υπόλοιποι τύποι έχουν υποστεί τόσο κατασκευαστικές όσο και χημικές παρεμβάσεις ώστε να βελτιωθεί η επίδοσή τους και είναι οι εξής: **Μολύβδου-Οξέος με Ρυθμιστική Βαλβίδα (VRLA), Απορροφημένου Ηλεκτρολύτη σε Μembrάνη Υαλονημάτων (AGM), Μολύβδου-Οξέος Τζελ, Μπαταρίες Εκκίνησης (SLI), Βαθείας εκφόρτισης, Εξελιγμένη Μολύβδου-Οξέος και Σούπερ Μολύβδου-Οξέος.**

Η κατηγορία των μπαταριών μολύβδου-οξέος βαθιάς (deep discharge) εκφόρτισης σχετίζεται με την κατάσταση εκφόρτισης (SOD) και αφορά στην ηλεκτροκίνηση ως η βέλτιστη επιλογή από την οικογένεια αυτών των μπαταριών. Σε αντίθεση, η μπαταρίες που χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση εκκινήτων σε οχήματα εξοπλισμένα με Μ.Ε.Κ. χαρακτηρίζονται από άμεση αποφορτισιμότητα με αποτέλεσμα να χρειάζονται συχνή φόρτιση.

Η αρχιτεκτονική και λειτουργία της εν λόγω μπαταρίας είναι αυτές μιας κλασσικής ηλεκτροχημικής μπαταρίας. Η κατασκευή αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, κατασκευασμένα από πορώδη μόλυβδο (Pb, άνοδος, ηλεκτρικά αρνητικό) και πορώδες οξείδιο του μολύβδου (PbO₂, κάθοδος, ηλεκτρικά θετικό) και από ένα υδατικό διάλυμα θειικού οξέος (2H⁺ + SO₄⁻⁴). Είναι κατασκευασμένη για μέγιστη χωρητικότητα και μεγάλο αριθμό κύκλων λειτουργίας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη σχεδίαση παχύτερων πλακών (Εικόνα 3). Ασχέτως του σχεδιασμού της

μπαταρίας για κυκλική λειτουργία, η πλήρης εκφόρτιση εξακολουθεί να καταπονεί τη μπαταρία. Τέτοιες μπαταρίες σημαδεύονται με στοιχεία σε Ah ή λεπτά λειτουργίας. Η τυπική ονομαστική χωρητικότητα κυμαίνεται από 5 έως 20 ώρες εκφόρτισης.



Εικόνα 3 – Ποιοτική απεικόνιση της διαφοράς στο πάχος των πλακών δύο μπαταριών Μολύβδου-Οξέος. Η αριστερή είναι μπαταρία εκκίνησης M.E.K. (SLI) και η δεξιά είναι μπαταρίας βαθιάς εκφόρτισης (Deep Discharge).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως οι δύο τύποι μπαταριών δεν μπορούν να αντικαταστήσουν η μία την άλλη. Ωστόσο υπάρχουν τύποι που συνδυάζουν χαρακτηριστικά και των δύο και προορίζονται για οχήματα βαρέως τύπου, καθώς πρόκειται για αρκετά μεγάλες μονάδες. Και λόγω του μολύβδου, μέγεθος σημαίνει μεγάλο βάρος.

2.2.1.2 ΥΛΙΚΑ

ΥΛΙΚΑ ΑΝΟΔΟΥ

Το αρνητικό δίκτυο είναι κατασκευασμένο από πορώδη μόλυβδο, υλικό το οποίο χρησιμοποιείται και ως προσθήκη σε ηλεκτρόδια μπαταριών Ιόντων-Λιθίου. Το 75-79% της δομής αποτελείται από κενό χώρο μεταξύ πόρων και μέρη με υψηλότερο βαθμό αραιότητας. Τέτοιου είδους υλικά παράγονται με την εισχώρηση αερίου ή την πρόσμιξη αφρώδους παράγοντα στο μέταλλο, σε κατάσταση τήξης. Μεταξύ ποικίλων χαρακτηριστικών, αυτά που εξυπηρετούν το σύστημα Lead-Acid είναι υψηλή στιβαρότητα, χαμηλή πυκνότητα, υψηλή ενεργειακή απορροφητικότητα, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και είναι πυρίμαχο.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΘΟΔΟΥ

Το θετικό δίκτυο αποτελείται από μόλυβδο επικαλυμμένο από πάστα διοξειδίου του μολύβδου. Η σύγχρονη σύσταση της πάστας αποτελείται από αιθάλη (carbon black, C), θειικό βάριο (barium sulfate, $BaSO_4$), λιγνοσουλφονικά άλατα (lignosulphonates, $C_{20}H_{24}CaO_{10}S_2$).

Το θειικό βάριο δρα ως σποροκρύσταλλος (seed crystal)* βοηθώντας στη δημιουργία δενδροειδών, για την «μόλυβδο προς μόλυβδο» θεική αντίδραση. Προκειμένου να γίνει κάτι τέτοιο, το θειικό βάριο πρέπει να έχει κατανεμηθεί ομοιόμορφα στην πάστα για να είναι αποτελεσματικό.

Τα λιγνοσουλφονικά άλατα αποτρέπουν το αρνητικό μέρος της μπαταρίας να σχηματίσει μια στερεά μάζα κατά την εκφόρτιση και αντί αυτού, βοηθάει στον σχηματισμό δενδροειδών κρυστάλλων. Τέτοιες μικροκρυσταλλικές δομές προσφέρουν μεγαλύτερη επιφάνεια, άρα δυνατότητα αποθήκευσης περισσότερου φορτίου. Σε αντίθεση με τα δενδρύλλια στις μπαταρίες Ιόντων-Λιθίου, στην περίπτωση

των μπαταριών Μολύβδου-Οξέος, τα δενδρύλλια επιστρέφουν στην κατάσταση που βρίσκοντας πριν σχηματιστούν κατά τη φόρτιση. Σε μπαταρίες υψηλότερων επιδόσεων χρησιμοποιείται διασπώμενο συμπύκνωμα σουλφονομένης ναφθαλίνης (C₁₀H₈ SO₄) γιατί αναμειγνύεται καλύτερα με την πάστα και επιταχύνει την δημιουργία δενδρυλλίων.

ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΗΣ

Τα συστήματα Lead-Acid πρώτης γενιάς περιείχαν υδατικό διάλυμα θειικού οξέος (ή θειικού οξέος) ενώ μεταγενέστερα εισήχθησαν και άλλοι τύποι ηλεκτρολυτών μορφής τζελ, αλλά και στερεάς μορφής.

Η αφθονία του θείου, αλλά και η ευκολία παρασκευής θειικού οξέος βοήθησε στην καθολική του χρήση σε μπαταρίες τέτοιου είδους. Ωστόσο, ο πιθανός κίνδυνος που παρουσιάζει στους επιβαίνοντες ενός οχήματος είναι μεγάλος, λόγω της διαβρωτικότητάς του αλλά και της υψηλής ευφλεκτότητας του παραγόμενου υδρογόνου, ακόμη και σε μικρή συγκέντρωση. Ο κίνδυνος του ηλεκτρολύτη συνεπαγωγικά επεκτείνεται και στο υπόλοιπο περιβάλλον κατά την διαφυγή του από το εσωτερικό της μπαταρίας με οποιοδήποτε τρόπο.

Στην εκδοχή της μπαταρίας Μολύβδου-Οξέος με υαλονημάτινους διαχωριστές (AGM), ο ηλεκτρολύτης είναι εμποτισμένος σε αυτούς, ώστε να είναι απλά βρεγμένοι. Η χρήση ημιεμβαπτισμένων επιφανειών με ηλεκτρολύτη γίνεται για την διευκόλυνση της κίνησης του υδρογόνου και του οξυγόνου κατά τη υπερφόρτιση. Αυτός ο μηχανισμός επανασύνθεσης του αερίου, επέτρεψε τον σχεδιασμό ερμητικά σφραγισμένων μπαταριών, δημιουργώντας τη δυνατότητα χρήσης τους σε μεταφερόμενες εφαρμογές, σε όποια διάταξη κρίνει κατάλληλη ο κατασκευαστής. Σε εκτεταμένη καταπόνηση μπαταριών μολύβδου-Οξέος (υπερφόρτιση και βαθεία εκφόρτιση), η δημιουργία αερίων είναι πιο έντονη, γεγονός που οδήγησε στην δημιουργία της εκδοχής με τη ρυθμιστική βαλβίδα (VRLA). Επίσης, λόγω της “στερεοποίησης” του ηλεκτρολύτη, αποτρέπεται η συγκέντρωση των βαρέων μορίων του ηλεκτρολύτη στον πάτο της μπαταρίας, όταν αυτή παραμένει αφόρτιστη καιρό, αποτρέποντας την ανομοιόμορφη εκφύλιση των ηλεκτροδίων και την τήξη του νερού που θα σχηματιζόταν σε κάποια κοινή μπαταρία Μολύβδου-Οξέος. Όπως είναι επίσης φυσικό, η μπαταρία αποκτά μεγαλύτερη ανθεκτικότητα και σε μηχανικές καταπονήσεις, όχι μόνο διατηρώντας τη λειτουργικότητά της, αλλά παρουσιάζοντας μεγαλύτερη χωρητικότητα λόγω της πίεσης μεταξύ των ηλεκτροδίων και των επιφανειών που τα διαχωρίζουν και περιέχουν τον ηλεκτρολύτη.

Μια άλλη μορφή κλειστού τύπου μπαταρίας βασίζεται στη χρήση ηλεκτρολύτη μορφής τζελ. Παρέχοντας αρκετά από τα πλεονεκτήματα του προηγούμενου τύπου μπαταρίας, η Μολύβδου- Οξέος τζελ είναι ακόμη πιο ανθεκτική στην εξάτμιση και είναι ιδανική για περιπτώσεις όπου η συντήρηση τους είναι σύμφορη. Επίσης τέτοιου είδους κελιά είναι ανθεκτικά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, χωρίς να παγώνει ο ηλεκτρολύτης. Το μειονέκτημα αυτού του τύπου μπαταρίας έγκειται στην αδυναμία ραγδαίας κίνησης των ηλεκτρονίων εντός του ημιστερεού ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα να περιορίζει τη χρήση τους σε περιπτώσεις όπου δεν χρειάζεται άμεσα παραγωγή ενέργειας, όπως ενεργειακά συστήματα εκτός δικτύου.

ΜΟΝΩΤΕΣ

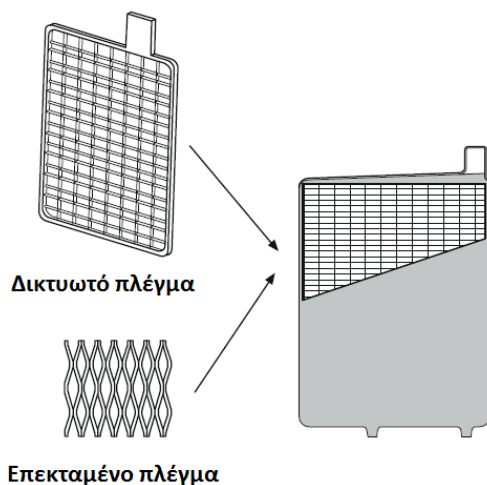
Η βασική λειτουργία των διαχωριστών/μονωτών δεν διαφέρει από αυτή των προηγούμενων μοντέλων. Επίσης αποτρέπουν την φυσική επαφή των πλακών λόγω της δημιουργίας δενδρυλλίων,

όπως και στις μπαταρίες Ιόντων-Λιθίου. Κατά καιρούς έχει χρησιμοποιηθεί μέχρι και ξύλο, κοινό λάστιχο, επιφάνεια υαλοϊνών, κυτταρίνη και πολυαιθυλενικό πλαστικό. Το ξύλο αποτέλεσε την πρωταρχική λύση, αλλά σύντομα αποδείχθηκε ευδιάβρωτο στον όξινο ηλεκτρολύτη. Όπως και στις προηγούμενες μπαταρίες, έτσι και για το σύστημα Μολύβδου-Οξέος, τα συνθετικά πλαστικά πλέον αποτελούν την κυρίαρχη επιλογή, καθώς συνδυάζουν μηχανικές και ηλεκτροχημικές ιδιότητες επιθυμητές από τους κατασκευαστές.

2.2.1.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Για αυτοκινητιστικές εφαρμογές όπου η ισχύς, το βάρος και το κόστος είναι περιοριστικοί παράγοντες, χρησιμοποιούνται κυρίως ηλεκτρόδια “τύπου δικτύου”, όπως στην *εικόνα 4*. Το δίκτυο (χύτευση, σφυρηλασία και διαμόρφωση) κατασκευάζεται με υλικά που βρίσκονται σε ένα πρώιμο στάδιο και έπειτα επεξεργάζονται και διαμορφώνονται στο τελικό ενεργό εξάρτημα που χρησιμοποιείται ως ηλεκτρόδιο.

Τυπικά, το θετικό και το αρνητικό δίκτυο διατηρούνται χωριστά από τον διαχωριστή, όπου όταν τοποθετηθούν όλα μαζί σχηματίζουν ένα κελί, τοποθετώντας τα εντός πλαστικού δοχείου. Μια ομάδα 6 κελιών αποτελεί μια μπαταρία τάσης ανοικτού κυκλώματος των 12V. Στα περισσότερα μοντέλα υπάρχει ένας κεντρικός όγκος εντός του οποίου συγκεντρώνονται τα αέρια και εξαερίζονται μέσω μια συσκευής που φιλτράρει τα αέρια ώστε να εξέλθουν στο περιβάλλον χωρίς τον κίνδυνο να αναφλεγούν από εξωτερικούς παράγοντες (flame arrester frit). Σε μερικές περιπτώσεις οι πλάκες τοποθετούνται σπειροειδώς εντός κυλινδρικού δοχείου (*Εικόνα 5*). Αυτή η διάταξη χαρακτηρίζεται από μηχανική σταθερότητα για το κελί και επιτρέπει τη χρήση αγνού μολύβδου (99,999%), υλικό εύθραυστο εκ φύσεως, αλλά με υψηλή αντοχή στη διάβρωση. Κατά αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μακρά διάρκεια ζωής. Η πιο αναγνωρίσιμη όλων των μορφών είναι η πρισματική (*Εικόνα 6*), καθώς χρησιμοποιείται ως μπαταρία εκκίνησης (SLI) για πολλές δεκαετίες.



Εικόνα 4 – Ποιοτική απεικόνιση ηλεκτροδίου τύπου “δικτύου”.



Εικόνα 5 – Ποιοτική απεικόνιση κυλινδρικού κελιού (αριστερά) και μπαταρίας (δεξιά)



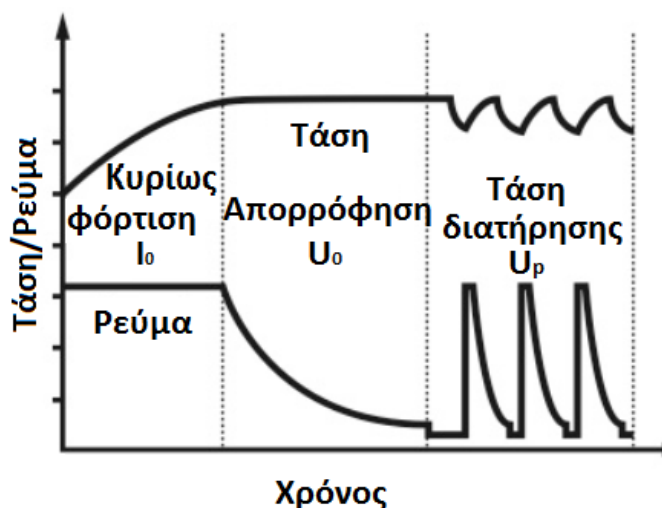
Εικόνα 6 – Ανεπτυγμένη οπτική της πρισματικής εκδοχής μιας μπαταρίας Μολύβδου-Οξέος 12V

2.2.1.4 ΦΟΡΤΙΣΗ - ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ

Βασική προϋπόθεση της ορθής επαναφόρτισης και συντήρησης της μπαταρίας, είναι ένα “έξυπνο σύστημα φόρτισης”. Ένα τέτοιο σύστημα διαμορφώνει την τάση φόρτισης λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση φόρτισης (SOC), τη θερμοκρασία αλλά και άλλες παραμέτρους, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ανάγκη για συντήρηση της μπαταρίας. Η τάση φόρτισης ανέρχεται στα 13,6V, προερχόμενα από μονάδα πολλαπλασιασμού της τάσης (charger/converter). Ένα τυπικό ποιοτικό προφίλ φόρτισης τριών βημάτων, φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 7. Η κυρίως φόρτιση τερματίζεται όταν η μπαταρία είναι φορτισμένη κατά 80% (εντοπισμός καθορισμένης τιμής τάσης). Ακολουθεί φόρτιση σταθερής τάσης κατά την οποία το ρεύμα μειώνεται για την επίτευξη

αποτελεσματικότερης φόρτισης και ως αποτέλεσμα της μείωσης της τάσης μειώνεται η παραγωγή αερίων. Αυτή η φάση είναι γνωστή ως κωνοειδής φόρτιση (taper charging)*. Στο τελευταίο βήμα της φόρτισης (trickle charging)* εξισορροπείται το φορτίο στα «εν σειρά» συνδεδεμένα κελιά χωρίς να προκαλείται σημαντική εξαέρωση, αποτρέπεται η εκφόρτιση της μπαταρίας από διαρρέομενο ρεύμα (leakage current) και περιστασιακά, εφαρμόζεται παλμική τάση για την αντιστροφή της θειοποίησης των ηλεκτροδίων και διατήρηση του φορτίου σε μέγιστα επίπεδα, αντισταθμίζοντας τις απώλειες λόγω ιδιοεκφόρτισης.

Κατά την επαναφόρτιση πραγματοποιείται η διαδικασία της «**θειοποίησης**» (sulfation), κατά την οποία το θειικό μόλυβδο των ηλεκτροδίων, επανέρχεται στη μορφή του μολύβδου (ηλεκτρόδια) και θειικού οξέος (ηλεκτρολύτης). Με την ολοκλήρωση κάθε κύκλου επαναφόρτισης, υπολείμματα θείου παραμένουν στα ηλεκτρόδια και με το πέρασμα του χρόνου η μπαταρία θα χάνει την δυνατότητα να αποθηκεύει την μέγιστη ονομαστική ενέργεια, έως το σημείο που θα είναι αχρείαστη.



Εικόνα 7 – Προφίλ φόρτισης τριών βημάτων

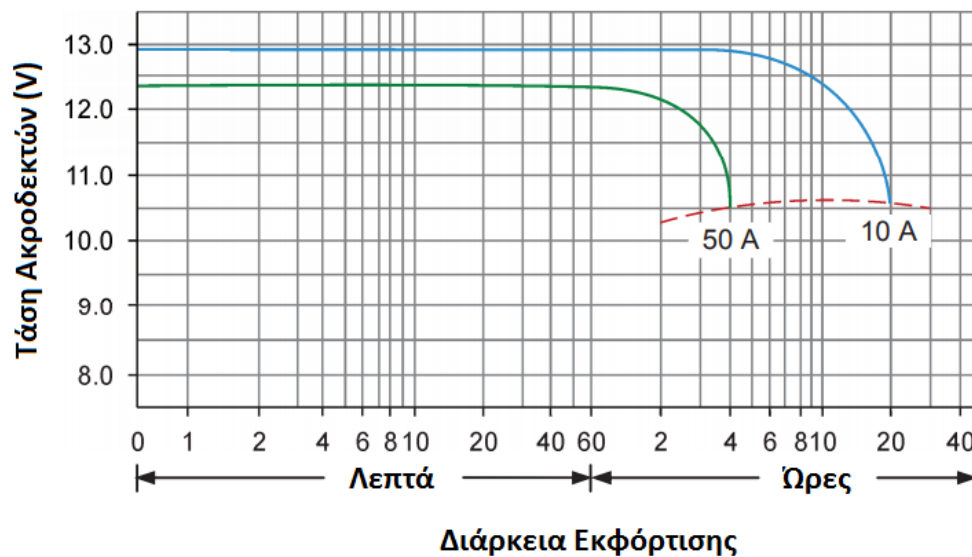
Επίσης κατά την επαναφόρτιση, το νερό μετατρέπεται στα θεμελιώδη υδρογόνο και οξυγόνο (ηλεκτρόλυση), προκαλώντας εξαέρωση και την παράλληλη μείωση της στάθμης του νερού. Πλέον, τα περισσότερα συστήματα Μολύβδου-Οξέος είναι εφοδιασμένα με συστήματα επανάμειξης των παραπάνω στοιχείων σε νερό, αν και οι απώλειες είναι και πάλι υπαρκτές. Όμως τα αποτελέσματα της θειοποίησης μπορούν να μετριαστούν από «**φόρτιση εξισορρόπησης**» (14,4V), διαδικασία που είναι καλό να συμβαίνει τουλάχιστον μία φορά το μήνα. Η αυξημένη τάση προκαλεί εκτεταμένη εξαέρωση η οποία αναμειγνύει (εξισορροπεί) το διάλυμα του ηλεκτρολύτη.

Αναφορικά με την εκφόρτιση, είναι το μέγεθος στο οποίο βασίζεται ο ορισμός της **χωρητικότητας** μιας μπαταρίας και το «**βάθος**» της οποίας καθορίζει επίσης τόσο την παρεχόμενη ενέργεια, όσο και τη διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας.

Η **χωρητικότητα** μιας μπαταρίας μετράται κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας, μέχρι το σημείο που να θεωρείται τελείως αφόρτιστη. Καταγράφοντας το μέσο όρο της τάσης και την τελική τιμή της (cut-off voltage), σημείο στο οποίο οι μπαταρίες προγραμματίζονται ώστε να μην παρέχουν την ελάχιστη εναπομείνουσα ηλεκτρική ενέργεια γιατί αυτό τις ζημιώνει. Μια μπαταρία ονομαστικής χωρητικότητας

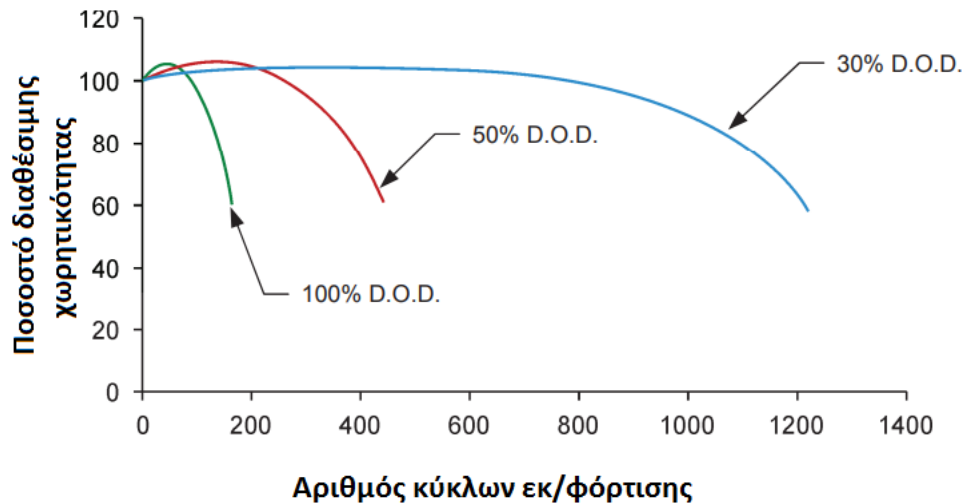
200Ah, θα δώσει 10A ρεύματος σε 20h ή 50A σε 4h. Πρόκειται για ιδανική περίπτωση μπαταρίας και οι καμπύλες εκφόρτισης παρουσιάζονται στην *εικόνα 8*.

Η διάρκεια της ζωής της μπαταρίας καθορίζεται απόλυτα από τον τρόπο εκφόρτισής της. Πολλοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν τον αριθμό κύκλων λειτουργίας (θερμοκρασία περιβάλλοντος, χώρος αποθήκευσης/λειτουργίας, ρυθμός εκφόρτισης), αλλά οι δύο σημαντικότεροι είναι ο τρόπος φόρτισης και το **βάθος εκφόρτισης**. Στο διάγραμμα της *εικόνας 9* φαίνεται η σχέση των κύκλων ζωής με το βάθος εκφόρτισης και πώς αυτό επηρεάζει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Για “κυκλικές” εφαρμογές ηλεκτροκίνητων και υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων σχεδιάζονται ειδικά συστήματα Μολύβδου-Οξέος σε βαθιές και επαναλαμβανόμενες εκφορτίσεις.



Εικόνα 8 – Καμπύλες εκφόρτισης για μια ιδανική μπαταρία Μολύβδου-Οξέος 200Ah.

Η αυτοεκφόρτιση του συστήματος Μολύβδου-Οξέος ανήκει στα χαμηλότερα ποσοστά μεταξύ των ηλεκτροχημικών μπαταριών, 2-5% ανά μήνα, με εκδοχές της όπως Μολύβδου-Αντιμονίου, όπου να ανέρχεται στο 2-10% ανά βδομάδα. Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το ποσοστό εκφόρτισης και αυτό λόγω ακαθαρσιών εντός του ηλεκτρολύτη που προκύπτουν από τη διάβρωση των ηλεκτροδίων ή από τη χρήση μη απιονισμένου νερού σε περίπτωση εμβαπτισμένων μπαταριών. Η αυτοεκφόρτιση προκαλεί θεικοποίηση (sulfation) των ηλεκτροδίων, φαινόμενο το οποίο αντιμετωπίζεται με στένωση φορτίου (trickle charging).



Εικόνα 9 – Κύκλοι λειτουργίας συναρτήσει χαρακτηριστικών εκφόρτισης

2.2.1.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Μπορεί η χημεία του συστήματος Μολύβδου-Οξέος να είναι η παλαιότερη από τις υπόλοιπες, όμως αυτό δεν σημαίνει ότι δεν είναι πλέον κατάλληλο για το μέλλον της αυτοκίνησης και την “ηλεκτρική” της κατεύθυνση. Βάσει των αυτοκινητοπαραγωγών, αλλά και των παγκόσμιων οργανισμών ενέργειας, οι μπαταρίες που βασίζονται στον μόλυβδο είναι ακόμα αναγκαίες, τουλάχιστον για τα επόμενα δέκα χρόνια. Όπως και με όλες τις τεχνολογίες, υπάρχουν κάποιες που υπερτερούν έναντι άλλων, αλλά για συγκεκριμένους λόγους και συγκεκριμένες εφαρμογές. Για παράδειγμα, με βάση τις ηλεκτρικές ανάγκες ενός οχήματος, χρησιμοποιείται και η ανάλογη ηλεκτροχημεία. Πετυχημένα υβριδικά οχήματα όπως το Toyota Prius, το Ford Fusion και το Chevrolet Volt, χρησιμοποιούν μπαταρίες Μολύβδου-Οξέος 12V, ενώ για οχήματα με ατόφιο ηλεκτρικό σύστημα προώθησης, χρησιμοποιούν Ιόντων-Λιθίου και Νικελίου-Μετάλλων Υδριδίου.

Η επιβίωση των μπαταριών Μολύβδου-Οξέος βασίζεται σε πολλά θετικά στοιχεία, όχι μόνο τεχνικής φύσεως, αλλά και οικονομικής που συνδέεται άρρηκτα με την περιβαλλοντική επίπτωση της εν λόγω τεχνολογίας. Ο συνεχής, πάνω από 140 χρόνια πειραματισμός με το σύστημα Μολύβδου οξέος, του έχει προσδώσει **ωριμότητα** και **αξιοπιστία**. Πρόκειται για **στιβαρή κατασκευή**, ειδικά οι πιο σύγχρονες εκδοχές (VRLA, VGA), με τη μεγαλύτερη **ανθεκτικότητα** και **σε ηλεκτροχημικές καταπονήσεις**. Άλλα θετικά χαρακτηριστικά του συστήματος Μολύβδου-Οξέος είναι η ικανότητα παροχής **υψηλών τιμών ρεύματος**, προϋπόθεση μέγιστης σημασίας για ηλεκτροκίνητες εφαρμογές, η **χαμηλή εσωτερική αντίσταση**, η δυνατότητα εφαρμογής στενής φόρτισης (**trickle charging**) για μεγάλο **χρονικό διάστημα**, η «**επ’ άπειρον**» **αποθήκευση χωρίς ηλεκτρολύτη**. Όμως, όλα τα παραπάνω τεχνικά χαρακτηριστικά της Μολύβδου-Οξέος δεν θα είχαν μεγάλη επίπτωση στην επικράτηση και διατήρηση του μεριδίου της αγοράς που κατέχει σήμερα, χωρίς ένα **ισχυρό οικονομικό μοντέλο** και **φιλικότητα προς το περιβάλλον** (sustainability). Η αφθονία των ενεργών υλικών και το χαμηλό κόστος παραγωγής, σε συνδυασμό με την σχεδόν ολοκληρωμένη ανακύκλωση αυτών (μετά την απόσυρση της μπαταρίας), δίνουν τη δυνατότητα στην τεχνολογία Μολύβδου-Οξέος να συναγωνίζεται άλλες τεχνολογίες σε επιδόσεις, με πολύ χαμηλότερο κόστος αγοράς.

Ωστόσο, το συγκεκριμένο σύστημα χαρακτηρίζεται από αρνητικά στοιχεία τα οποία ώθησαν στο πειραματισμό και εφεύρεση άλλων ηλεκτροχημικών συστημάτων παροχής τάσης. Πρόκειται για το σύστημα με τις **μικρότερες «ειδικές» τιμές** (ειδική ενέργεια/ισχύς) καθώς το μοριακό βάρος του μολύβδου είναι ανώτερο των υπολοίπων ενεργών υλικών. Το τυπικό **ποσοστό απόδοσης** κυμαίνεται από **70-90%** ($\geq 80\%$ για εξελιγμένες, πιο ακριβές εκδοχές) και η **πιθανότητα υπερθέρμανσης** κατά τη φόρτιση είναι μεγαλύτερη των άλλων μπαταριών. Επίσης αυτές οι μπαταρίες **δεν υποστηρίζουν γρήγορη φόρτιση, μικρή μέση διάρκεια ζωής** για τυπικές μπαταρίες. Από τη στιγμή που φορτιστεί για πρώτη φορά μια μπαταρία Μολύβδου θα πρέπει μονίμως να **παραμένει φορτισμένη** και να **περιέχει ηλεκτρολύτη** για την αποφυγή αλλοίωσης των ενεργών υλικών.

2.2.2 ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΝΙΚΕΛΙΟΥ

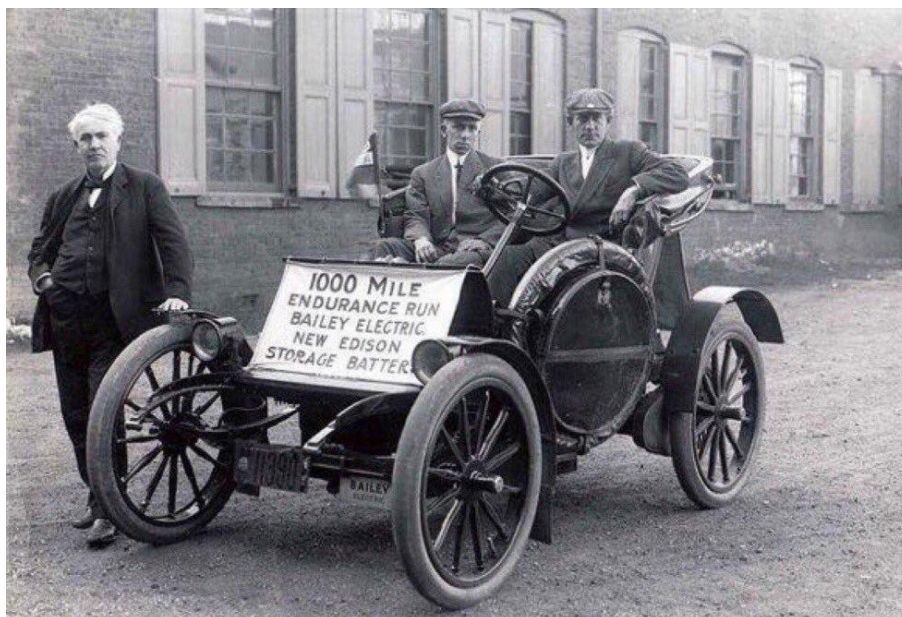
Για 50 χρόνια οι φορητές συσκευές λειτουργούσαν σχεδόν αποκλειστικά με μπαταρίες νικελίου-καδμίου (NiCd). Τη δεκαετία του 1990, οι μπαταρίες νικελίου-μετάλλου υδριδίου εισήχθησαν στην αγορά και αντικατέστησαν σχεδόν εξ ολοκλήρου την προηγούμενη έκδοση μπαταρίας νικελίου και μαζί της εξαλείφθηκε και το πρόβλημα της τοξικότητάς της. Πολλά από τα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας νικελίου-καδμίου μεταφέρθηκαν στην καινούρια έκδοση, προσφέροντας έναν εν μέρει αντικαταστάτη καθώς τα δύο συστήματα είναι παρόμοια. Λόγω περιβαλλοντικών κανονισμών η χρήση των μπαταριών νικελίου-καδμίου έχει περιοριστεί σε ειδικές εφαρμογές.

Οι μπαταρίες νικελίου διαδέχθηκαν τις μπαταρίες μολύβδου καθώς το νικέλιο είναι ελαφρύτερο μέταλλο από τον μόλυβδο και έχει πολύ καλές ηλεκτροχημικές ιδιότητες, επιθυμητές για εφαρμογές μπαταριών. Υπάρχουν τέσσερα διαφορετικά είδη μπαταριών που βασίζονται στο νικέλιο: νικελίου-σιδήρου, νικελίου-ζirkονίου, νικελίου-καδμίου και νικελίου-μετάλλου υδριδίου.

2.2.2.1 ΜΠΑΤΑΡΙΑ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΣΙΔΗΡΟΥ (Ni-Fe)

Το σύστημα νικελίου-σιδήρου εφευρέθηκε το 1899 από τον Σουηδό Γουόλντεμαρ Γιούνγκνερ, ο οποίος προσπάθησε να αντικαταστήσει το κάδμιο με σίδηρο για να εξοικονομήσει πόρους. Ωστόσο η χαμηλή απόδοση φόρτισης σε συνδυασμό με την παραγωγή αερίων υδρογόνου τον ώθησαν να εγκαταλείψει την ανάπτυξη του συστήματος αυτού, χωρίς να καταχωρήσει την πατέντα. Το 1901, ο Τόμας Έντισον συνέχισε την ανάπτυξη του μοντέλου ως τον ανερχόμενο αντικαταστάτη των μπαταριών μολύβδου-οξέος για ηλεκτροκίνητα οχήματα. Ισχυριζόταν πως οι μπαταρίες νικελίου-σιδήρου ήταν μακράν ανώτερες των μολύβδου-οξέος και βασιζόταν στην ανερχόμενη αγορά της ηλεκτροκίνησης. Με την επικράτηση των μηχανών εσωτερικής καύσης ο Έντισον απογοητεύτηκε όσο και ζημιώθηκε με την απόρριψη του συστήματός του ως πηγή ενέργειας για το σύστημα εκκίνησης των βενζινο/πετρελαιοκίνητων οχημάτων. Ωστόσο, λόγω της εμπορικής κυριαρχίας της μπαταρίας του εκείνη την εποχή και λόγω της ισχύος της αμερικανικής αγοράς σε παγκόσμιο επίπεδο, ο Έντισον πέτυχε την υστεροφημία καθώς έκτοτε, μπαταρίες που βασίζονται στην τεχνολογία NiFe, άτυπα ονομάζονται «μπαταρίες Έντισον».

Οι εφαρμογές της νικελίου-σιδήρου αφορούσαν κυρίως σε βαρέως τύπου οχήματα όπως περνοφόρα ανυψωτικά, σιδηροδρομικές μηχανές πολιτικής και εμπορικής χρήσης, μηχανοκίνητα φορτηγά χειρός (motorized hand trucks), έως βόμβες και ρουκέτες κατά τον Β' ΠΠ. Στη σύγχρονη βιομηχανία της ηλεκτροκίνησης δεν λαμβάνουν σημαντικό μερίδιο, όμως χρησιμοποιούνται.



Εικόνα 10- Για την απόδειξη της ικανότητας της μπαταρίας του, ο Thomas Edison εφοδίασε ένα πρωτότυπο μοντέλο Bailey (Electric Phaeton), με πακέτο μπαταριών Nife με σκοπό την ολοκλήρωση ενός αγώνα αντοχής χιλίων μιλίων εναντίων βενζινοκίνητων οχημάτων. Αν μη τι άλλο, το Bailey ολοκλήρωσε τον αγώνα που ξεκίνησε στις 17 Σεπτεμβρίου 1910, Σύλλογος Τουρισμού Αμερικής (Touring Club of America).

2.2.2.1.1 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ

Το σύστημα αποτελείται από μία κάθοδο (+) κατασκευασμένη από υδροξείδιο του νικελίου (NiOH) και άνοδο (-) από μεταλλικό σίδηρο (Fe). Ο ηλεκτρολύτης είναι μια συμπυκνωμένη λύση υδροξειδίου της ποτάσας (τυπικά 240g/L) περιέχοντας υδροξείδιο του λιθίου (50kg/L) και ονομαστική τάση 1,2V.

Η χημική ένωση του μισού κελιού που λαμβάνει χώρα στη θετική πλάκα είναι



Και στην αρνητική πλάκα είναι

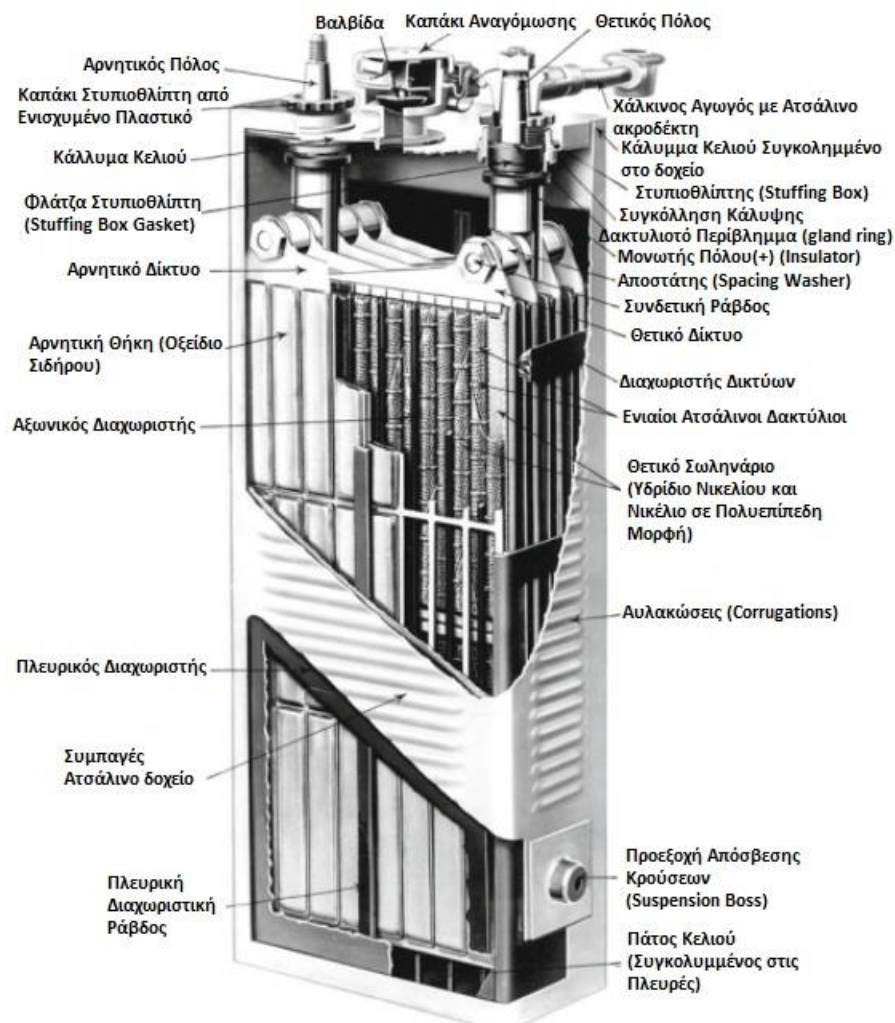


Η εκφόρτιση γίνεται αντιληπτή διαβάζοντας τις παραπάνω χημικές αντιδράσεις από αριστερά προς τα δεξιά και η φόρτιση διαβάζοντάς τες αντίστροφα. Η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι 1,4V, με πτώση στα 1,2V κατά την εκφόρτιση. Το μείγμα του ηλεκτρολύτη αποτελείται από υδροξείδιο της ποτάσας και υδροξείδιο του λιθίου και δεν απορροφάται από κανένα ηλεκτρόδιο κατά τη διάρκεια ροής ηλεκτρονίων μεταξύ τους. Ωστόσο η χημεία γύρω από την ορθή και αποδοτικότερη λειτουργία της είναι ένα αρκετά πιο πολύπλοκο ζήτημα.

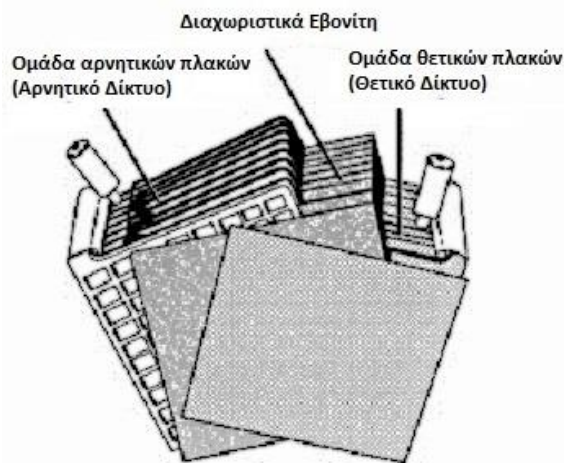
2.2.2.1.2 ΥΛΙΚΑ

Τα ενεργά υλικά των πλακών της μπαταρίας περιέχονται σε πολυάριθμα σωληνάρια ή θήκες, ασφαλώς πακτωμένα και πλήρως εφραπτόμενα σε υποστηρικτικό και πλήρως αγώγιμο πλαίσιο. Το τελευταίο είναι ένα ελαφριάς κατασκευής εξωσκελετικό πλαίσιο αποτελούμενο από ατσάλινα φύλλα με ενισχυμένο καπάκι στην κορυφή.

Τα δίκτυα (θετικό και αρνητικό), όπως απεικονίζονται και στην *εικόνα 11* και *12*, όπως και άλλες εσωτερικές μεταλλικές επιφάνειες είναι επενδυμένες με νικέλιο για την αποφυγή διάβρωσης. Όλα τα εσωτερικά στοιχεία πρέπει να είναι εμβαπτισμένα σε ηλεκτρολύτη. Σε περίπτωση αποστράγγισης του εσωτερικού της μπαταρίας από ηλεκτρολύτη και συνεπαγωγικής έκθεσης των στοιχείων στο ατμοσφαιρικό οξυγόνο, οι πλάκες του αρνητικού δικτύου οξειδώνονται και η φόρτιση απαιτεί αισθητά μεγαλύτερο διάστημα χρόνου ώστε να ολοκληρωθεί.



Εικόνα 11 – Απεικόνιση μπαταρίας Νικελίου-Σιδήρου σε τομή



Εικόνα 12 – Τρόπος διάταξης θετικών-αρνητικών πλακών και των διαχωριστών τους.

ΥΛΙΚΑ ΑΝΟΔΟΥ

Το ενεργά υλικά των αρνητικών πλακών είναι οξειδίο σιδήρου (FeO), σίδηρο με πρόσμιξη γραφίτη (Fe-C), ή αλλιώς γκρίζο σίδηρο και προσμίξεις ελάχιστου άνθρακα (C) και ατσαλιού. Οι θήκες συγκράτησης είναι κατασκευασμένες από λεπτές ασάλινες πλάκες πάχους $\frac{1}{8}$ ίντσας ($3,175\text{mm}$), διάτρητες με ακρίβεια και επενδυμένες με νικέλιο ορθογώνιας κατασκευής, $\frac{1}{2}$ ίντσας ($12,7\text{cm}$) φάρδος και 3 ίντσες ($7,62\text{cm}$) μήκος. Το οξειδίο του σιδήρου, σε μορφή υπέρλεπτης σκόνης βάλλεται στις θήκες οι οποίες με τη σειρά τους τοποθετούνται στο δίκτυο. Την τοποθέτηση ακολουθεί η συμπίεση τους ώστε να προκύψει στενή επαφή. Ως αποτέλεσμα οι πλευρές των θηκών πτυχώνονται ώστε να παρέχουν μια ελατηριωτή επαφή με το ενεργό υλικό.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΘΟΔΟΥ

Το ενεργά υλικά των πλακών του θετικού δικτύου είναι οξει-υδροξείδιο του νικελίου (Ni_2O_3), χλωρίδιο του νικελίου ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), υποχλωριώδες νάτριο (NaClO), υδρίδιο νικελίου και νιφάδες νικελίου αγνής σύστασης. Οι κυλινδρικοί συγκρατητές είναι κατασκευασμένοι από λεπτή ασάλινη ταινία, λεπτομερώς διάτρητη και επενδυμένη με νικέλιο. Οι συνήθεις διαστάσεις ενός κυλινδρικού συγκρατητή είναι 4 και $\frac{1}{4}$ ίντσες, διαμέτρου $\frac{1}{8}$ ίντσας. Συγκεκριμένα, η ταινία που σχηματίζει τους ασάλινους, διάτρητους κυλίνδρους είναι σπειροειδώς τυλιγμένη, με επικαλυπτόμενες ραφές και ενίσχυση με ασάλινα δαχτυλίδια πάχους $\frac{1}{2}$ ίντσας σε απόσταση μεταξύ τους. Εντός των σωληνώσεων τοποθετούνται και συναρμολογούνται εφαρμοστά σε πολυεπίπεδη διάταξη, υδρίδιο νικελίου και νιφάδες νικελίου αγνής σύστασης (περίπου 350 στρώσεις το κάθε υλικό). Ο σκοπός της νιφάδας νικελίου είναι να παρέχει την καλύτερη δυνατή επαφή μεταξύ του υδριδίου του νικελίου και των σωληνώσεων. Όπως είναι ευδιάκριτο στην εικόνα 13, τα διάτρητα σωληνάρια ατσαλιού, όταν γομωθούν και σφραγιστούν, τοποθετούνται κάθετα εντός του θετικού πλέγματος.



Εικόνα 13 – Διάτρητοι κύλινδροι θετικό δίκτυο (αριστερά). Διάτρητες ατσάλινες πλάκες αρνητικού δικτύου (δεξιά).

ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΗΣ

Ο ηλεκτρολύτης μιας μπαταρίας NiFe είναι υγρής μορφής και αποτελείται από μέρος υδατικού διαλύματος υδροξειδίου της ποτάσας (KOH) ή γνωστή και ως καυστική ποτάσα, με το νερό να καταλαμβάνει 121gr ανά 100ml. Εναλλακτικά, χρησιμοποιείται υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλές τιμές τάσης. Τα δύο προαναφερθέντα διαλύματα είναι γνωστά και ως «αλυσίβες» (lye). Σε πιο πρόσφατες εκδοχές των NiFe προστίθεται και λίθιο(Li), προσδίδοντας τους χαρακτηριστικά του λιθίου ως έντονα αντιδραστικό υλικό με την βασική ικανότητα να αποθηκεύει αρκετή ενέργεια εντός των ατομικών δεσμών του.

Κατά την μεταφορά ηλεκτρικού φορτίου, ο ηλεκτρολύτης σε αυτόν τον τύπο μπαταρίας δεν εισέρχεται σε χημικό συνδυασμό ώστε να πραγματοποιηθεί η λειτουργία του κελιού και δρα απλά ως μεταφορέας ή αγωγός. Η ειδική του βαρύτητα παραμένει ανεπηρέαστη κατά τη διάρκεια της φόρτισης και εκφόρτισης, μόνο κατά την εξάτμιση του και την αλλαγή της θερμοκρασίας. Μη αμελητέες διακυμάνσεις είναι επιτρεπτές, επηρεάζοντας μόνο την επίδοση της μπαταρίας.

ΜΟΝΩΤΕΣ

Για την αποστασιοποίηση και αποτροπή επαφής μεταξύ των πλακών των δικτύων της NiFe, χρησιμοποιείται εβονίτης, γνωστός και ως βουλκανίτης (ebonite,vulcanite), ή απλά σκληρό λάστιχο. Πρόκειται για πλαστικό υψηλής σκληρότητας και αντοχής και είναι κατάλληλο λόγω της αντιδιαβρωτικής του ικανότητας σε όξινα περιβάλλοντα. Επομένως λόγω της αρκετά πιο ήπιας οξύτητας του περιβάλλοντος μιας μπαταρίας νικελίου-σιδήρου, η ανθεκτικότητα του εβονίτη σε συνδυασμό με την αδυναμία του ηλεκτρολύτη να διαβρώσει τα υλικά των δικτύων της μπαταρίας, συνεπάγονται την εγγυημένη πενήνταετή διάρκεια ζωής, τουλάχιστον, αυτών των μπαταριών.

Ο παρακάτω πίνακας περιέχει τα βασικότερα στοιχεία μιας μπαταρίας NiFe.

Πίνακας 2 - Τεχνικά χαρακτηριστικά μπαταρίας νικελίου-σιδήρου

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Στόχοι έως το 2020	Επίδραση στην επίδοση του οχήματος
Ονομαστική Τάση (V)	1,2 - 1,4	
Τάση Φόρτισης (V)	1,65-1,7	
Βέλτιστη Τάση Φόρτισης/Εκφόρτισης	C/4	
Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	20-30	Αυτονομία και Βάρος
Ενεργειακή Πυκνότητα(Wh/L)	35	Αυτονομία και Μέγεθος
Απόδοση Φόρτισης/Εκφόρτισης	>65%	
Ρυθμός Ιδιοεκφόρτισης/μήνα	20-30%	
Διάρκεια Ζωής (χρόνια)/Διάρκεια Ζωής σε αχρηστεία	40-60/85	Κόστος Κύκλου ζωής
Κύκλοι Ζωής	11.000 με 80% βάθος εκφόρτισης (Επαναλαμβανόμενες βαθείες φορτίσεις/εκφορτίσεις επηρεάζουν ελάχιστα την διάρκεια ζωής)	Κόστος Κύκλου ζωής
Εσωτερική αντίσταση (Ω)	-	
Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)	-45 έως 50	Ζωή της Μπαταρίας
Τιμή Πώλησης (\$/kWh)	150-660	Κόστος Απόκτησης και Αντικατάστασης

2.2.2.1.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Τα ηλεκτρόδια και ο ηλεκτρολύτης συναρμολογούνται εντός μεταλλικής θήκης επενδυμένης με νικέλιο. Στο πάνω μέρος της θήκης, συγκολλούνται ειδικά καπάκια που φέρουν οπές που επιτρέπουν μόνο στα ηλεκτρόδια να προεξέχουν από το εσωτερικό περιβάλλον της μπαταρίας. Επίσης τα καπάκια είναι διαμορφωμένα με μικρότερες οπές για την εξέταση και αλλαγή (αν είναι αναγκαία) του ηλεκτρολύτη.

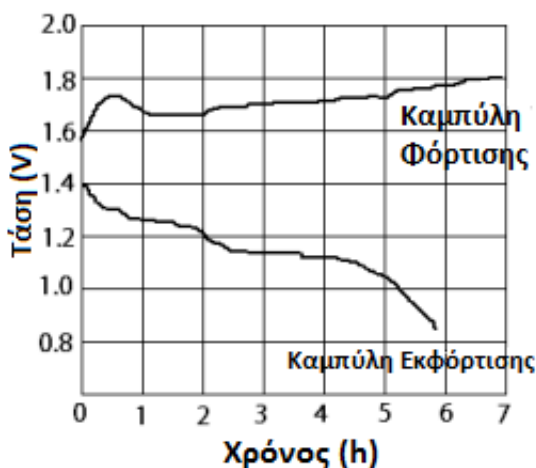
Οι πλάκες των δικτύων ομαδοποιούνται και τοποθετούνται παράλληλα και εφαπτόμενα η μία με την άλλη με το διαχωριστικό-μονωτικό υλικό (συνήθως εβονίτης) για την αποτροπή βραχυκυκλωμάτων. Το αρνητικό δίκτυο αποτελείται από μία επιπλέον πλάκα συγκριτικά με το θετικό δίκτυο, με τις δύο ακραίες πλάκες του πρώτου να συνδέονται με το εξωτερικό μεταλλικό κέλυφος της μπαταρίας.

2.2.2.1.4 ΦΟΡΤΙΣΗ - ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ

Η μεταφορά φορτίου σε ένα κελί NiFe συμπεριλαμβάνει την μεταφορά οξυγόνου από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο, γι αυτό και αποκαλείται ως “oxygenlift cell” (το κελί που παρέχει μεταφορά στο οξυγόνο). Σε κατάσταση πλήρους φόρτισης το ενεργό υλικό των ενεργών πλακών είναι υπεροξειδωμένο και το αντίστοιχο υλικό των αρνητικών πλακών παραμένει σπογγώδες ή αλλιώς σε υποβαθμισμένη κατάσταση (reduced state, redox*).

Αν η χωρητικότητα του κελιού είναι ανεπαρκής, συνίσταται η ελάχιστη αύξηση του ρυθμού φόρτισης, δεδομένου ότι η θερμοκρασία δεν θα υπερβαίνει τους 46 °C. Τέτοιου είδους φόρτιση είναι ευεργετική για μια μπαταρία χωρίς να προκαλεί κάποια παράπλευρη ζημιά στην δομή των ενεργών υλικών. Επίσης ρυθμοί φόρτισης τριπλάσιοι του κανονικού C (ον. χωρητικότητα μπαταρίας σε Ah/1h) μπορούν να εφαρμοστούν για διάρκεια μισής ώρας. Η πρόποσα τάση διατήρησης του πλήρους φορτίου ενός κελιού είναι 1,45V. Αν μιλάγαμε για μπαταρία δέκα κελιών, τότε η τάση θα έπρεπε να ναι 14,5V, ενώ η τάση φόρτισης για κανονικό ρυθμό C, είναι 1,46 με 1,55V ανά κελί. Σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες κελιών, η ακρίβεια της τάσης φόρτισης σε ένα κελί NiFe δεν είναι μείζονος σημασίας.

Η πλήρης φόρτιση ενός κελιού NiFe απαιτεί επτά ώρες σε κανονικό ρυθμό φόρτισης του κελιού. Κατά τη κατανάλωση του φορτίου, το εναπομείναν φορτίο καθορίζεται εξολοκλήρου από το φορτίο που ήδη έχει χρησιμοποιηθεί. Για παράδειγμα, αν έχει καταναλωθεί το μισό φορτίο, θα απομένουν ακόμα 3,5 ώρες χρήσης της μπαταρίας σε κανονικό ρυθμό εκφόρτισης. Κατά την υπερφόρτιση, σπαταλάται φορτίο και προκαλείται ραγδαία ατμοποίηση του νερού, που περιέχεται στον ηλεκτρολύτη. Για ρυθμούς «στενής φόρτισης»*, θα πρέπει να διατηρηθεί ένας μέσος όρος τάσης φόρτισης 1,67V κατά μήκος των ακροδεκτών καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης. Στην αρχή της φόρτισης η τάση θα είναι περίπου διπλάσια της τάσης κανονικού ρυθμού φόρτισης και προς το τέλος της διαδικασίας η τάση φόρτισης θα είναι περίπου το 40% της τάσης φόρτισης υπό κανονικό ρυθμό φόρτισης.



Εικόνα 14 – Ποιοτικό διάγραμμα Φόρτισης και Εκφόρτισης συναρτήσει του χρόνου για κελί Νικελίου-Σιδήρου.

Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, το θετικό δίκτυο υποβαθμίζονται χημικά (redox), δηλαδή αποξειδώνονται. Το οξυγόνο, λόγω της φυσικής του προτίμησης για τον σίδηρο, μεταπηδά στις πλάκες του αρνητικού δικτύου, οξειδώνοντάς τες. Είναι επιτρεπτό να γίνεται συνεχόμενη εκφόρτιση σε οποιοδήποτε ρυθμό, έως και 25% μεγαλύτερο από το κανονικό και για μικρές περιόδους και έως τρεις φορές μεγαλύτερο ρυθμό του κανονικού.

2.2.2.1.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Η NiFe είναι γενικότερα στιβαρή και λόγω βελτιώσεων που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια, ήδη θεωρείται βιώσιμη εναλλακτική των μπαταριών μολύβδου-οξέος, κυρίως σε εφαρμογές εκτός δικτύου. Η τεχνολογία «rocket plate»* έχει καταστήσει τη μπαταρία νικελίου-

σιδήρου σχεδόν άνοση σε βαθιά φόρτιση και εκφόρτιση και μπορεί να αντέξει περισσότερο από 50 χρόνια. Σε αντιστοιχία, μια μπαταρία μολύβδου-οξέος βαθιάς λειτουργίας αντέχει έως 12 χρόνια, και η τιμή μιας μπαταρίας Νικελίου-Σιδήρου αγγίζει την τιμή μιας Ιόντων-Λιθίου.

Το συγκεκριμένο σύστημα χαρακτηρίζεται από την ιδιότητα της «στένωσης φορτίου»* (taper charge) όπως και οι μπαταρίες NiCd και NiMH. Οι προηγούμενες δεν χρησιμοποιούν συνεχές φορτίο τάσης όπως οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος και ιόντων-λιθίου, αλλά επιτρέπει στην τάση να επιπλέει ελεύθερα.

Παρομοίως με τις υπόλοιπες μπαταρίες που βασίζονται στο νικέλιο, η τάση του κελιού μιας NiFe ξεκινάει να μειώνεται σε κατάσταση πλήρους φόρτισης με το αέριο να αυξάνεται εντός της μπαταρίας, άρα και της πίεσης που συνεπάγεται την αύξηση της θερμοκρασίας. Συνίσταται η αποφυγή υπερφόρτισης καθώς είναι βασικός λόγος εξαέρωσης του νερού και πρόκλησης ξηρασίας εντός της μπαταρίας.

Εκτός από εξαερισμό λόγω της δημιουργίας υδρογόνου, οι μπαταρίες NiFe πάσχουν από διάβρωση και προβλήματα ιδιοεκφόρτισης. Όλα τα παραπάνω έχουν μερικώς ή εξολοκλήρου λυθεί σε πρωτότυπα μοντέλα που δεν έχουν ακόμα κυκλοφορήσει μαζικά στην αγορά. Πρόκειται για ένα πολύπλοκο σύστημα του οποίου η ορθή λειτουργία απαιτεί συντήρηση και παρακολούθηση. Είναι ανάγκη να διατηρείται το επιπέδου της στάθμης του νερού σταθερό και η ασφαλής απομάκρυνση του υδρογόνου και του οξυγόνου που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης. Ένα ακόμα αδύνατο σημείο αυτών των μπαταριών είναι η φτωχή τους λειτουργία σε χαμηλές/υψηλές θερμοκρασίες.

2.2.2.2 ΜΠΑΤΑΡΙΑ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΚΑΔΜΙΟΥ (Ni-Cd)

Η επικρατέστερη συντόμωση που χρησιμοποιείται για την περιγραφή κελιών νικελίου-καδμίου είναι η «NiCd», ενώ χρησιμοποιείται και η «NiCad». Η δεύτερη αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία και σήμα κατατεθέν για βολταϊκά προϊόντα της εταιρίας SAFT, κατασκευαστής μπαταριών και άλλων πηγών ενέργειας. Επομένως, ο όρος NiCd είναι η γενική συντομογραφία που χρησιμοποιείται για αναφορές σε όλα τα είδη ηλεκτροχημικών συστημάτων νικελίου-καδμίου.

Ιστορικά, η ανάπτυξη αυτού του συστήματος συνέπεσε με την ανάπτυξη των μπαταριών νικελίου-σιδήρου, γεγονός που επηρέασε την ομοιότητα των χαρακτηριστικών επίδοσης και απόδοσης τους. Η πρώτη μπαταρία NiCd δημιουργήθηκε από τον Waldemar Jungner, το 1899 στη Σουηδία. Εκείνη την περίοδο η μόνη ανταγωνιστική τεχνολογία ήταν η μπαταρία μολύβδου-οξέος, που ήταν υποδεέστερη κατασκευή σε όρους φυσικής και χημικής ανθεκτικότητας. Με ελάχιστες βελτιώσεις των πρωτότυπων αυξήθηκε δραματικά η ενεργειακή πυκνότητα, σχεδόν στο διπλάσιο από αυτή των πρωτευόντων μπαταριών της εποχής και αρκετά μεγαλύτερη από της μολύβδου-οξέος. Ο Jungner πειραματίστηκε με τον σίδηρο σε διάφορες ποσότητες, ως υποψήφιο αντικαταστάτη του καδμίου, αλλά αποδείχθηκε αρκετά απαιτητικό εγχείρημα με αποτέλεσμα να μην συνεχιστεί. Στις Ηνωμένες Πολιτείες το έργο του Jungner ήταν κυρίως άγνωστο. Μετά από δύο χρόνια, από την εφεύρεση του Jungner, έγινε ευρέως γνωστό το σύστημα νικελίου ή κοβαλτίου-καδμίου στις Ηνωμένες Πολιτείες, από τον Thomas Edison.

Μετά από μόνο δύο δεκαετίες κυριαρχίας στην αγορά, 1940 και 1950, οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου εκλείπουν καθώς αντικαθίστανται σταδιακά από νέες πιο αποδοτικές τεχνολογίες, αλλά κυρίως πολύ πιο ασφαλείς για το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Στην Ευρώπη η χρήση κελιών NiCd έχει

περιοριστεί σε πολύ εξειδικευμένες εφαρμογές χερσαίων, θαλάσσιων αλλά και εναέριων οχημάτων, με κύριους κατασκευαστές μπαταριών νικελίου-καδμίου να είναι οι εταιρείες SAFT και VARTA.

2.2.2.2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Το σύστημα νικελίου-καδμίου χρησιμοποιεί το ίδιο θετικό ηλεκτρόδιο και ηλεκτρολύτη με το νικελίου-σιδήρου, σε συνδυασμό με αρνητικό ηλεκτρόδιο μεταλλικού καδμίου. Η αντίδραση του κελιού είναι

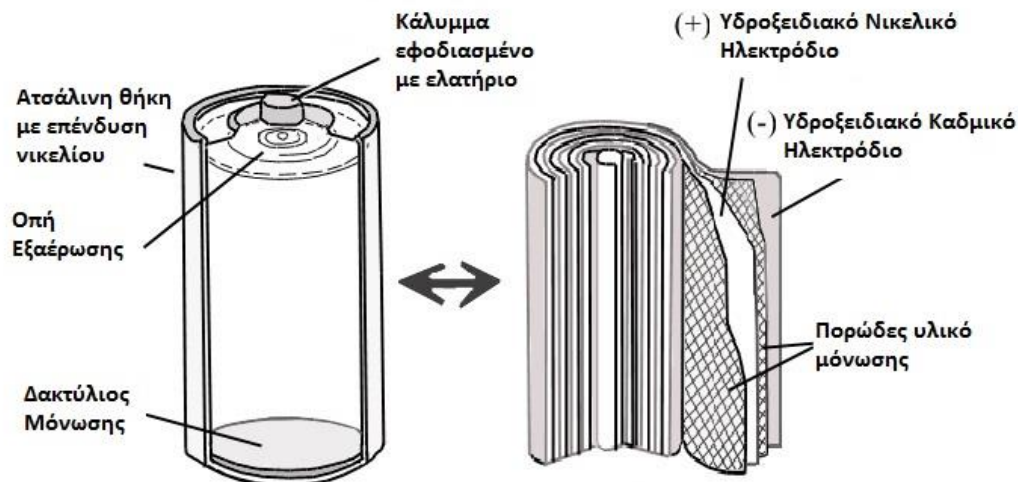


και διαβάζοντας την χημική εξίσωση από αριστερά προς τα δεξιά έχουμε την εκφόρτιση της μπαταρίας και αντιστρόφως την φόρτιση.

Ο μέγιστος ρυθμός εκφόρτισης (C-rate) ποικίλει από μέγεθος σε μέγεθος. Για ένα κοινό κελί AA, ο μέγιστος ρυθμός μπορεί να είναι 1,8 amp, ενώ για ένα κελί μεγέθους D μπορεί να φτάσει και τα 3,5 amp (Πίνακας 3). Η ονομαστική τάση ενός κελιού Ni-Cd είναι 1,2V και διατηρείται σχεδόν σταθερή για το μεγαλύτερο μέρος της εκφόρτισης, με εμφανή πτώση της τιμής όταν το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου έχει καταναλωθεί. Η τάση μπορεί να φτάσει έως και 1,4V σε πλήρη φόρτιση. Η διατήρηση της τάσης εξόδου επιτυγχάνεται πολύ καλύτερα συγκριτικά με τα ομόλογα πρωτεύοντα αλκαλικά κελιά και κελιά ψευδαργύρου-άνθρακα (zinc-carbon), αλλά και από συστήματα μολύβδου-οξέος (lead-acid), τα οποία παρουσιάζουν σταθερή πτώση τάσης κατά τη διάρκεια ζωής τους. Άρα η χαμηλή τάση ανά κελί, αντισταθμίζεται από το χαρακτηριστικό της ισχυρότερης παράδοσης τάσης καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας. Κάποιοι κατασκευαστές συνήθιζαν να αυξάνουν την ονομαστική τάση προσθέτοντας κελιά, το βάρος των οποίων δεν ήταν ισχυρός περιοριστικός παράγοντας. Ένας ακόμα λόγος για την ισχυρή τάση εξόδου των μπαταριών NiCd είναι η χαμηλή εσωτερική τους τάση, που σημαίνει χαμηλή ιδιοεκφόρτιση. Επίσης η χαμηλή εσωτερική αντίσταση συμβάλει και στην γρήγορη αποβολή και παραλαβή ενέργειας πολύ γρήγορα, χωρίς έντονη αύξηση της θερμοκρασίας. Η μέση τάση φόρτισης είναι 1,45V και η τάση βραδείας φόρτισης (trickle charging) είναι 1,35V. Περεταίρω στοιχεία παρατίθενται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3 – Ονομασία και βασικά χαρακτηριστικά ορισμένων εμπορικών κελιών

ΤΥΠΟΣ ΚΕΛΙΟΥ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (MM)	ΥΨΟΣ (MM)
AAA	10.5	44.5
AA	14.5	50.5
C	26.2	50.0
D	34.2	61.5



Εικόνα 15 – Σχηματική αναπαράσταση κελύφους και χημικών στοιχείων κελιού Νικελίου-Καδμίου, σε τομή.

ΕΙΔΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΚΑΔΜΙΟΥ

Η μπαταρίες νικελίου-καδμίου διαχωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, δηλαδή τις αεριζόμενες και τις σφραγισμένες.

Η αεριζόμενη μπαταρία πυροσυσσωματώματος/σύντηξης* (vented sintered-plate) είναι η τεχνολογικά πιο “ώριμη” από τις δύο κύριες κατηγορίες. Αναπτύχθηκε μεταγενέστερα της σφραγισμένης έκδοσης της μπαταρίας νικελίου και χαρακτηρίζεται από μεγάλη ειδική ενέργεια εξαιρετική μακροπρόθεσμη αποθηκευτική ικανότητα. Επίσης διακρίνεται από το οριζόντιο προφίλ τάσης εκφόρτισης, τον ανώτερο ρυθμό εκφόρτισης και την ορθή λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μπαταρίας είναι η διατήρηση της χωρητικότητας της αλλά και η ανάκτηση ανεξαρτήτως ποσοστού μείωσης της μετά από επαναφόρτιση (**διατήρηση χωρητικότητας***). Βέβαια όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά συνεπάγονται υψηλό οικονομικό κόστος, το «φαινόμενο μνήμης»* και την ανάγκη για ύπαρξη TMS για τη φόρτιση με σκοπό την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής.

Μια μπαταρία νικελίου-καδμίου «κλειστού τύπου» ενσωματώνει ένα συγκεκριμένο σχεδιαστικό χαρακτηριστικό κελιού ώστε να αποτρέπει την αύξηση της πίεσης λόγω εξαέρωσης κατά την υπερφόρτιση. Ως αποτέλεσμα, αυτός ο τύπος μπαταρίας (VRPP) *δεν χρειάζεται συντήρηση*. Χάρη στην ειδική ρυθμιστική βαλβίδα του συστήματος, η απώλεια νερού παρουσιάζει μείωση 5-15% σε σύγκριση με το 30-40% της αεριζόμενης έκδοσης της μπαταρίας νικελίου-καδμίου. Μια μπαταρία κλειστού τύπου με ειδική ρυθμιστική βαλβίδα, μπορεί να διατηρηθεί χωρίς συντήρηση έως και 20 χρόνια αν η τάση φόρτισης κυμαίνεται από 1,4 - 1,42V/κελί. Σε περίπτωση πτώσης της στάθμης του νερού υπάρχει ενσωματωμένο σύστημα αναγόμωσης.

2.2.2.2.2 ΥΛΙΚΑ

Η κατασκευή μια μπαταρίας Νικελίου-Καδμίου είναι σχεδόν ίδια με αυτή μιας Νικελίου-Σιδήρου, αν εξαιρεθεί ότι η πρώτη αποτελείται από μία παραπάνω θετική πλάκα σε αντίθεση με τη δεύτερη όπου περιέχει μία παραπάνω αρνητική πλάκα. Οι θετικές πλάκες σε μία NiCd είναι τοποθετημένα στα άκρα του δικτύου.

ΥΛΙΚΑ ΑΝΟΔΟΥ

Το αρνητικό δίκτυο από πλάκες είναι κατασκευασμένο από πορώδες κάδμιο (Cd), ένα ειδικά επεξεργασμένο παράγωγο του καδμίου με το 75-95% του όγκου του να είναι κενός χώρος. Οι σπόγγοι καδμίου είναι κυτταρικές δομές με μεγάλα τεμάχια πόρων. Συνήθως χρησιμοποιείται κεραμικός αφρός για την επικάλυψη όλων των εσωτερικών επιφανειών στην ολότητα της αφρώδους δομής και λειτουργεί ως υπόστρωμα για καταλύτες* που απαιτούν μεγάλη εσωτερική επιφάνεια από ένα υλικό. Στα βασικά χαρακτηριστικά μιας πορώδους δομής περιλαμβάνονται: χαμηλή πυκνότητα (εξοικονόμηση βάρους σε συγκεκριμένο όγκο), υψηλή στιβαρότητα (αντοχή σε κρούσεις και ταλαντώσεις), υψηλή ενεργειακή απορροφητικότητα, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (αποτροπή αύξησης και διατήρησης της θερμοκρασίας σε ζωτικά μέρη μιας μπαταρίας), πυρίμαχες ιδιότητες, χαμηλή μαγνητική διαπερατότητα*.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΘΟΔΟΥ

Το ενεργό υλικό του θετικού δικτύου είναι υδρίδιο νικελίου (NiOOH), ένα κράμα νικελίου και υδρογόνου σε περιεκτικότητα 0,002% κατά όγκο. Το δεύτερο δρα ως σκληρυντικός παράγοντας, αποτρέποντας τις μετατοπίσεις στο κρυσταλλικό ατομικό πλέγμα του νικελίου. Συγκεκριμένα σε εφαρμογές που αφορούν την ηλεκτροχημεία, προτιμάται μικρό ποσοστό πρόσμιξης νικελίου για την διατήρηση μιας σχετικής ελαστικότητας σε συνδυασμό με την ανθεκτικότητα του κράματος, έτσι ώστε να το τελευταίο να είναι ανθεκτικό σε φυσική καταπόνηση.

ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΗΣ

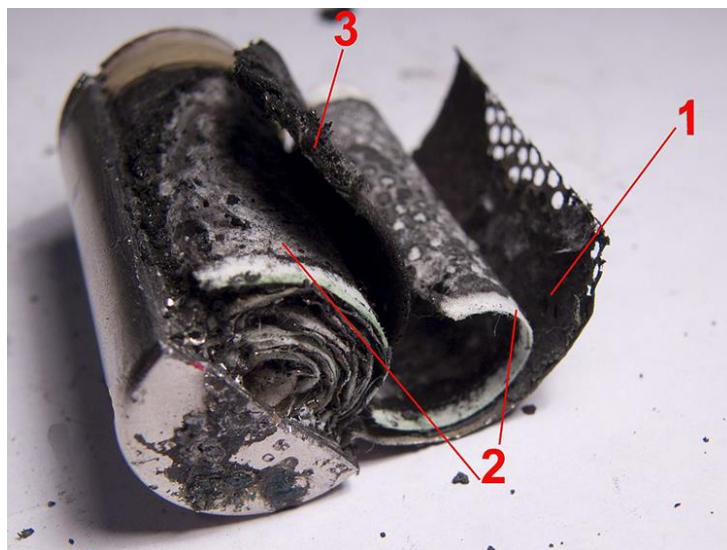
Ο ηλεκτρολύτης είναι υδατικό διάλυμα υδροξειδίου της ποτάσας (KOH), ή υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) σε συγκέντρωση 20-34 % προς το βάρος καθαρού KOH. Ο πρώτος είναι καλύτερος αγωγός, ενώ ηλεκτρολύτης από NaOH έχει παρατηρηθεί ότι προκαλεί σπανιότερες διαρροές.

ΜΟΝΩΤΗΣ

Όπως και στις μπαταρίες Νικελίου-Σιδήρου, έτσι και στις NiCd ο Εβονίτης είναι μια απ τις κύριες επιλογές.

2.2.2.2.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Σε ερμητικά σφραγισμένα κελιά είναι υψίστης σημασίας η καλή μόνωση μεταξύ των κελιών αλλά και από το εξωτερικό περιβάλλον, διότι αναπτύσσεται αέριο οξυγόνου κατά τη διάρκεια υπερφόρτισης, από τις θετικές πλάκες και ανασυντίθεται χημικά μαζί με πλεονάζον κάδμιο, στις αρνητικές πλάκες. Υπερφόρτιση μπορεί να συμβαίνει συνεχόμενα σε καλά σχεδιασμένα κελιά, χωρίς όμως να προξενείται ζημιά σε αυτά. Σε αεριζόμενα κελιά, το ατμοσφαιρικό οξυγόνο μπορεί να αντιδράσει με το ενεργό υλικό των αρνητικών πλακών (Cd) και να το εκφορτίσει χημικά.



Εικόνα 16 - Τομή σε κελί NiCd: 1.Κάθοδος 2.Διαχωριστές 3.Ανοδος

Για αυτό το λόγο, οι αεραγωγοί σχεδιάζονται με τη χρήση ελατηρίων ώστε να σφραγίζουν αεροστεγώς το εσωτερικό περιβάλλον του κελιού. Επιπλέον, το διοξείδιο του άνθρακα στον ατμοσφαιρικό αέρα μπορεί να αντιδράσει με το υδροξείδιο της ποτάσας (KOH) του ηλεκτρολύτη, για να σχηματίσει K_2CO_3 και $CdCO_3$ επί των επιφανειών των αρνητικών πλακών. Οι παραπάνω ενώσεις παρεμβαίνουν στην ομαλή λειτουργία του κελιού. Επομένως η σημασία της μόνωσης γίνεται άμεσα αντιληπτή.

Συντηγμένα κελιά Νικελίου-Καδμίου (Sintered cells) έχουν σχετικά λεπτά συντηγμένα/πυροσυσσωματωμένα πλαίσια (matrices/matrices) ως πλάκες δικτυωτής κατασκευής. Τέτοιου είδους πλαίσια είναι αρκετά πορώδη και εμποτίζονται με ενεργά, θετικά ή αρνητικά υλικά, σε διαλυματική κατάσταση. Οι πλάκες σχηματίζονται ηλεκτροχημικά και ακολουθεί ξέπλυμα και στέγνωμα. Σε άλλες παραλλαγές της παραπάνω διαδικασίας, το ενεργό υλικό στο συντηγμένο πλαίσιο μετατρέπεται χημικά, ή θερμικά, σε ενεργή κατάσταση και στη συνέχεια σχηματίζεται. Γενικά, υπάρχουν βήματα στους κύκλους εμποτισμού και τελικού σχηματισμού και οι γραμμές παραγωγής επιβάλλεται να είναι αυτοματοποιημένες ώστε να μειωθεί το κόστος του τελικού προϊόντος. Αυτός ο τρόπος κατασκευής κελιών θεωρείται ιδανικός για πολύ υψηλούς ρυθμούς φόρτισης και εκφόρτισης.

Ένα άλλο είδος κελιών που εμπεριέχονται σε θύλακες-πλάκες (Pocket plate cells) και χρησιμοποιούν είτε πλαστική είτε μεταλλική θήκη. Οι θήκες από μέταλλο πρέπει να θερμομονώνονται η μία από την άλλη εντός πακέτου κελιών, καθώς η θήκη των κελιών αποτελεί συνήθως τον αρνητικό δέκτη του κελιού. Επίσης, οι μεταλλικές θήκες προτιμώνται για εφαρμογές που απαιτούν αντοχή σε κραδασμούς και δονήσεις. Αντιθέτως, οι πλαστικές θήκες, συνήθως πολυπροπυλενιακές, προτιμώνται για φωτοβολταϊκές εφαρμογές με απώτερο σκοπό την αποτροπή δημιουργίας διαδρομών διαρροής προς το έδαφος.

Σε κελιά αντοχής τοποθετείται αρκετή ποσότητα πλεονάζοντος ηλεκτρολύτη, που υπερκαλύπτει τις θήκες των κελιών, ώστε να παρατείνεται η διαδικασία συντήρησης συμπληρώνοντας νερό, σχεδόν σε μία φορά ανά δύο χρόνια, ανάλογα με το ποσό υπερφορτίσεων και τη θερμοκρασία λειτουργίας. Η εμβαπτισμένη έκδοση αυτών των κελιών (Flooded Cells) έχει χαμηλό ρυθμό επανασύνθεσης εσωτερικού αερίου. Γι αυτό το λόγο και τα καλύμματα τέτοιων μπαταριών διαθέτουν

ελατηριωτούς ανακουφιστικούς αεραγωγούς, για την αποβολή αχρείαστου οξυγόνου σχηματιζόμενου κατά τη διάρκεια υπερφορτίσεων. Το εύρος εξαέρωσης κυμαίνεται από 2 έως 10 psi.

2.2.2.2.4 ΦΟΡΤΙΣΗ - ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ

Οι NiCd μπορούν να φορτιστούν σε αρκετά διαφορετικούς ρυθμούς, κάτι που εξαρτάται βέβαια από τον τρόπο κατασκευής και τις προδιαγραφές του κελιού. Ανεξαρτήτως της ταχύτητας φόρτισης, μια μπαταρία πρέπει να τροφοδοτείται με περισσότερη ενέργεια από αυτή της πραγματικής της χωρητικότητας για την υπερκάλυψη των απωλειών κατά τη φόρτιση. Οι ενεργειακές απώλειες οφείλονται στην εκπεμπόμενη θερμότητα λόγω εσωτερικής αντίστασης των ενεργών υλικών της μπαταρίας. Σε υψηλούς ρυθμούς φόρτισης, για παράδειγμα 4C, μπορεί μια μπαταρία να φορτίζεται πιο γρήγορα (1,5 ώρα έως και 15 λεπτά), ωστόσο αυξάνεται κατά πολύ ο κίνδυνος υπερθέρμανσης και πρόκλησης αερίων που μπορούν να αυξήσουν επικίνδυνα την πίεση εντός της μπαταρίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας εντός της μπαταρίας επηρεάζεται από την εσωτερική αντίσταση και το τετράγωνο του ρυθμού φόρτισης. Επομένως γίνεται αντιληπτό πως τετραπλάσιες θερμοκρασίες σε υψηλούς ρυθμούς φόρτισης είναι εφικτές και γι αυτό το λόγο υπάρχουν μπαταρίες και φορτιστές ειδικού σχεδιασμού και κατασκευής που μπορούν να διαχειριστούν τέτοιες θερμοκρασίες.

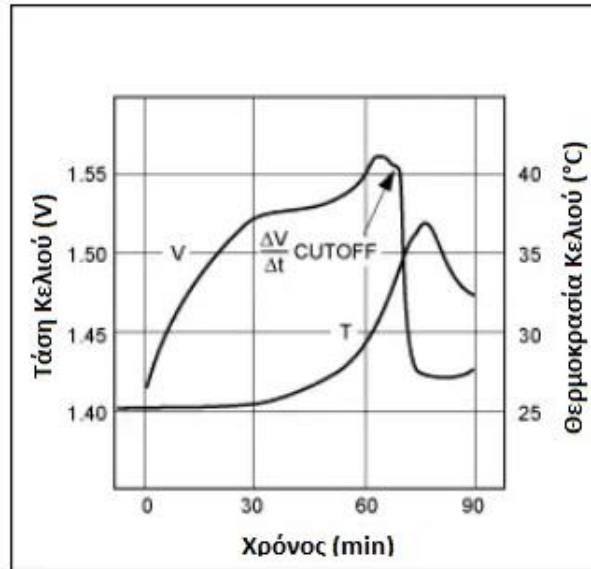
Το ασφαλές θερμοκρασιακό περιθώριο λειτουργίας μιας μπαταρίας NiCd είναι -20 έως 45°C. Κατά τη φόρτιση, η θερμοκρασία μένει σταθερά χαμηλή στην αρχή καθώς η χημική αντίδραση απορροφάει τη θερμότητα. Όμως όσο πλησιάζει το μέγιστο φορτίο της, η θερμοκρασία θα αυξάνεται από 45 έως και 55 °C. Μέσω φορτιστών ανίχνευσης θερμοκρασίας (dV/dtT^*) η φόρτιση μπορεί να σταματήσει μόλις η θερμοκρασία φτάσει την οριοθετημένη τιμή, με σκοπό την αποφυγή της υπερφόρτισης.

Στην *εικόνα 17* φαίνεται η τάση των ακροδεκτών (terminal voltage) ενός κελιού NiCd συναρτήσει του χρόνου. Η κλίματα του τελευταίου μπορεί να παρουσιάζεται από λεπτά έως και λεπτά εκφρασμένα σε δεκάδες ανάλογα το μέγεθος της μπαταρίας και εξαρτάται από τις σταθερές της θερμοκρασίας και του χρόνου και τότε έχει προγραμματιστεί η παύση της φόρτισης. Επίσης εξαρτάται και από τον ρυθμό φόρτισης, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας και ο ρυθμός της είναι συνάρτηση της θερμικής χωρητικότητας και της ενέργειας που μπορεί να παραδώσει (το οποίο είναι συνάρτηση του ρεύματος φόρτισης).

Όταν μια μπαταρία NiCd δεν βρίσκεται υπό χρήση ή φόρτιση, θα αυτόεκφορτίζεται περίπου 10% ανά μήνα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες η αυτοεκφόρτιση αγγίζει το 20% ανά μήνα.

2.2.2.2.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Η τεχνολογία του συστήματος νικελίου-καδμίου έχει λάβει τεράστια τεχνική βελτίωση εξ αιτίας των πλεονεκτημάτων της υψηλής ειδικής ενέργειας (>200W/Kg), της εκτεταμένης διάρκειας ζωής (~2000 κύκλους), υψηλή ανοχή σε ηλεκτρική και μηχανική καταπόνηση, μικρή πτώση τάσης σε μια ευρεία περιοχή τιμών ρεύματος, ικανότητα ραγδαίας φόρτισης (40-80% εντός 18min), ευρύ θερμοκτικό φάσμα λειτουργίας (-40 έως 85°C), χαμηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης (<0,5% ανά μέρα), εξαιρετική μακροπρόθεσμη αποθήκευση λόγω αμελητέας διάβρωσης και τέλος διαθεσιμότητα σε ποικίλα σχέδια και μεγέθη.



Εικόνα 17 - Οι καμπύλες δείχνουν τα χαρακτηριστικά τάσης και θερμοκρασίας ενός κελιού NiCd, κατά τη προσέγγιση και υπέρβαση της κατάστασης πλήρους φόρτισης.

Ωστόσο, η μπαταρία νικελίου-καδμίου έχει κάποια μειονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης και της αρχικής υψηλής τιμής, της σχετικά χαμηλής τάσης κελιού και την καρκινογένεση σε συνδυασμό με τον γενικότερο κίνδυνο που θέτει το κάδμιο στο περιβάλλον.

Πίνακας 4 – Τεχνικά χαρακτηριστικά μπαταρίας Νικελίου-Καδμίου

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Στοιχεία	Επίδραση στην επίδοση του οχήματος
Ονομαστική Τάση (V)	1,2-1,3	
Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	40-70	Αυτονομία και Βάρος
Ενεργειακή Πυκνότητα(Wh/L)	55-160	Αυτονομία και Μέγεθος
Ειδική Ισχύς Εκφόρτισης (W/kg)	150-160	Επιτάχυνση και Βάρος
Απόδοση Φόρτισης/Εκφόρτισης	75-91%	
Ρυθμός Ιδιοεκφόρτισης	10-8%	
Ρυθμός Εκφόρτισης	10C	
Διάρκεια Ζωής (χρόνια)	40-60	Κόστος Κύκλου ζωής
Κύκλοι Ζωής	2000	Κόστος Κύκλου ζωής
Εσωτερική αντίσταση (mΩ)	155	Ρυθμός ιδιοεκφόρτισης
Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)	-25 έως 70	Ζωή της Μπαταρίας
Τιμή Πώλησης (\$/kWh)	140	Κόστος Απόκτησης και Αντικατάστασης

2.2.2.3 ΜΠΑΤΑΡΙΑ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΜΕΤΑΛΛΟΥ ΥΔΡΙΔΙΟΥ (Ni-MH)

Η έρευνα για την μπαταρία νικελίου-καδμίου ξεκίνησε το 1967 στο κέντρο ερευνών Battelle της Γενεύης, ωστόσο λόγω αστάθειας του μεταλλικού υδριδίου οδήγησε στην τότε πιο εύκολα προσεγγίσιμη επιλογή της μπαταρίας νικελίου-υδρογόνου (NiH) από την Philips και το Εθνικό Γαλλικό Κέντρο Επιστημονικής Έρευνας (CNRS). Περίπου 15 χρόνια μετά, με την ανακάλυψη νέων κραμάτων υδριδίου, που βελτίωσαν θέματα σταθερότητας, η ανάπτυξη του συστήματος Ni-MH έχει φτάσει στο σημείο να προσφέρει 40% περισσότερη ειδική ενέργεια από μια μπαταρία NiCd, βασιζόμενη στα σχέδια της μπαταρίας NiH. Βέβαια αποτελεί μια εύθραυστη κατασκευή, απαιτώντας επιδέξια διαχείριση ώστε να φορτιστεί. Με 20% αυτοεκφόρτιση εντός των πρώτων 24 ωρών μετά τη φόρτιση και 10% ανά μήνα έπειτα, η NiMH συγκαταλέγεται μεταξύ των ανώτερων της κατηγορίας. Βέβαια, τροποποιώντας τα υλικά υδριδίου μειώνεται ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης όπως και η διάβρωση του κράματος, με κόστος την πτώση της ειδικής ενέργειας και αύξηση της αρχικής τιμής αγοράς. Έως το 2008, περισσότερα από δύο εκατομμύρια υβριδικά οχήματα, παγκοσμίως, είχαν κατασκευαστεί με μπαταρίες Ni-MH. Το 2015, η εταιρεία BASF παρήγαγε μια τροποποιημένη μικροδομή, ενισχύοντας το σύστημα Νικελίου-Μετάλλου Υδριδίου με μεγαλύτερη κατασκευαστική και ηλεκτροχημική ανθεκτικότητα. Ακολούθησαν αλλαγές στον σχεδιασμό κελίου μειώνοντας το βάρος, επιτρέποντας στην βαρυτική ενεργειακή πυκνότητα να φτάσει τα 140 Wh/kg.

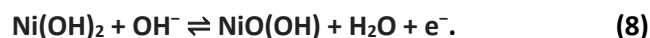
2.2.2.3.1 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Το σύστημα Ni-MH βρίσκεται στην αγορά από το 1992. Τα χαρακτηριστικά του είναι παρόμοια με αυτά της μπαταρίας νικελίου-καδμίου. Η ουσιαστική τους διαφορά έγκειται στη χρήση υδρογόνου, απορροφημένο από το μεταλλικό υδρίδιο του ενεργού υλικού που βρίσκεται στο αρνητικό ηλεκτρόδιο. Λόγω της ανώτερης ειδικής ενέργειας ως προς την αντίστοιχη του συστήματος NiCd και λόγω της απώλειας τοξικότητας και πρόκληση καρκινογένεσης, η μπαταρία Ni-MH αντικαθιστά την νικελίου-καδμίου.

Η γενική αντίδραση που λαμβάνει μέρος εντός μια μπαταρίας νικελίου-μετάλλου υδριδίου είναι



Στο θετικό ηλεκτρόδιο σχηματίζεται οξυ-υδροξείδιο του νικελίου (NiO(OH)) και η αντίδραση είναι



ενώ στο αρνητικό ηλεκτρόδιο η αντίδραση είναι

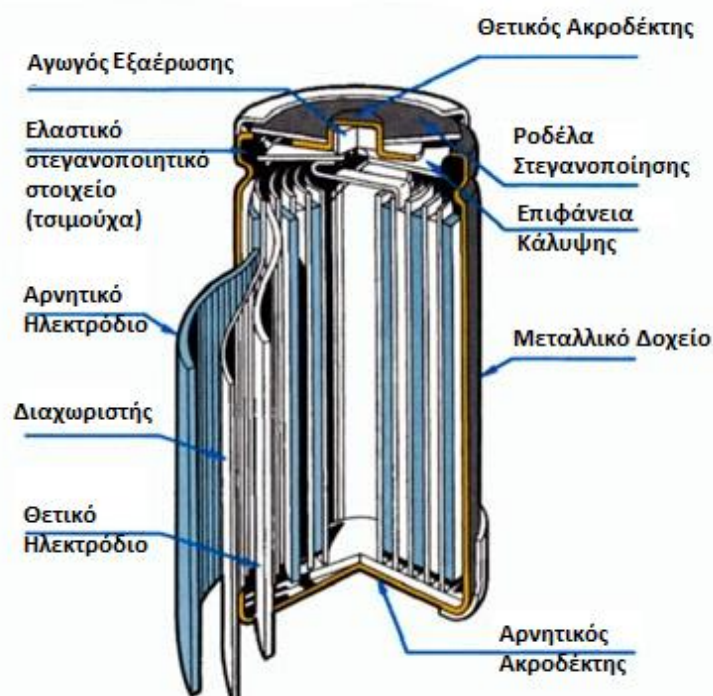


Όταν η μπαταρία εκφορτίζεται, το μεταλλικό υδρίδιο εντός του αρνητικού ηλεκτροδίου οξειδώνεται για να σχηματίζει ένα κράμα μετάλλου και το οξυ-υδροξείδιο του νικελίου εντός του θετικού ηλεκτροδίου μεταπίπτει σε υδροξείδιο του νικελίου. Κατά τη φόρτιση συμβαίνει η αντίστροφη αντίδραση. Προς το παρόν, η τεχνολογία της μπαταρίας Ni-MH έχει ονομαστική τάση 1,2V και κατέχει ειδική ενέργεια των 65 Wh/kg και ειδική ισχύ των 200 W/kg.

Κατά την υπερφόρτιση του συστήματος σε χαμηλό ρυθμό, επίσης παράγεται οξυγόνο στο θετικό ηλεκτρόδιο που διαπερνά τους διαχωριστές και επανασυνδυάζεται με την επιφάνεια του αρνητικού

ηλεκτροδίου. Η ανάπτυξη υδρογόνου καταστέλλεται και η ενέργεια της φόρτισης μετατρέπεται σε θερμότητα. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει στα κελιά να παραμείνουν σφραγισμένα σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας με αποτέλεσμα να μπορούν να λειτουργούν χωρίς συντήρηση.

Λόγω συνεχόμενης ανάπτυξης της εν λόγω μπαταρίας, τα πλεονεκτήματά της βάσει της σημερινής τεχνολογίας αναγράφονται προσεγγιστικά στον πίνακα 4.



Εικόνα 18 – Σχεδιαστική απεικόνιση κελιού Νικελίου-Καδμίου σε τομή.

2.2.2.3.2 ΥΛΙΚΑ

ΥΛΙΚΑ ΑΝΟΔΟΥ

Το μέταλλο (M) στο αρνητικό ηλεκτρόδιο αντιπροσωπεύει ενδομεταλλικά κράματα. Πολλά διαφορετικά κράματα έχουν αναπτυχθεί για αυτή την εφαρμογή, αλλά αυτά που χρησιμοποιούνται πλέον ανήκουν σε δύο κατηγορίες. Η πιο κοινή είναι η AB_5 όπου A είναι μια μείξη σπάνιων γήινων μετάλλων όπως λανθάνον νικέλιο(La), δημήτριο(Ce), νεοδύμιο(Nd), πρασεοδύμιο(Pr) και B είναι νικέλιο(Ni), κοβάλτιο (Co), μαγγάνιο(Mn) και αλουμίνιο(Al) και AB_2 όπου αποτελεί κωδικοποίηση για μια ομάδα κραμάτων βασισμένα στο τιτάνιο και το ζirkόνιο (περιορισμένα αποθέματα και των τριών βρίσκονται στον φλοιό της γης). Παρ όλα τα χαρακτηριστικά αυξημένης χωρητικότητας που προσδίδουν τα κράματα AB_2 , προτιμάται το AB_5 λόγω καλύτερης κατακράτησης φορτίου (χαμηλότερος ρυθμός ιδιοεκφόρτισης) και χαρακτηριστικών σταθερότητας.

Γενικότερα, όλα τα παραπάνω σύνθετα μέταλλα εξυπηρετούν τον ίδιο σκοπό, σχηματίζοντας αντιστρέψιμες μίξεις σύνθετων μεταλλικών υδριδίων (MH).

ΥΛΙΚΑ ΚΑΘΟΔΟΥ

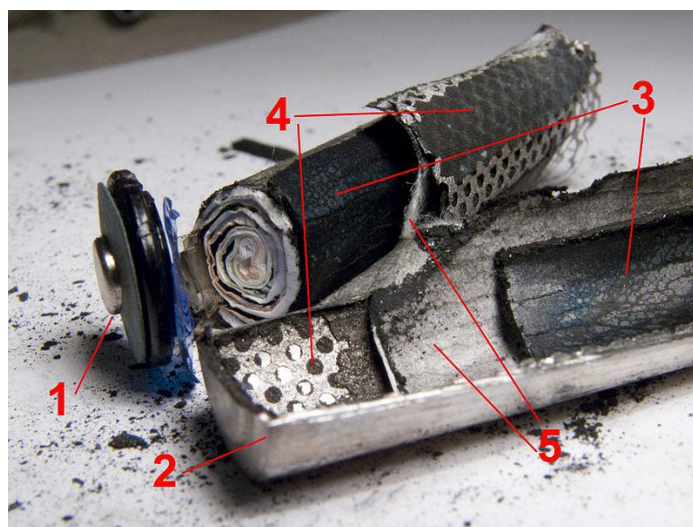
Το υδροξείδιο του νικελίου Ni(OH)_2 είναι ανόργανο συνθετικό μέταλλο (πράσινο, στερεό) που διαλύεται μέσω της αποσύνθεσης σε αμμωνία και αμίνες και αντιδρά έντονα με οξέα. Η ηλεκτροενεργή του φύση ως οξυ-υδροξείδιο του νικελίου (NiOOH) το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές σε επαναφορτίσιμες μπαταρίες.

ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΗΣ

Τυπικό διάλυμα αλκαλικού ηλεκτρολύτη από υδροξείδιο της ποτάσας ή νατρίου, βρίσκεται και στο σύστημα NiMH. Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι σύγχρονες μπαταρίες της οικογένειας νικελίου με υδατικά διαλύματα αλκαλικών ηλεκτρολυτών, προσφέρουν καλύτερη αποδοτικότητα από μπαταρίες που περιέχουν όξινα διαλύματα.

ΜΟΝΩΤΗΣ

Οι διαχωριστές-μονωτές είναι κατασκευασμένοι από μη υφασμένες ίνες υδροφιλούς πολυολεφίνης ($\text{C}_2\text{H}_2\text{n}$). Πρόκειται για πολυμερές πλαστικό, που ανάλογα με τη χρήση και την εφαρμογή της μπαταρίας, προσαρμόζεται και η σκληρότητα κατά την κατασκευή των διαχωριστικών επιφανειών. Η φυσική αντίσταση αυτού του πλαστικού σε διάβρωση από χημικά υδατικά διαλύματα, είναι μια από τις ιδιότητες που καθιστούν αυτό το υλικό κατάλληλο για αυτή τη χρήση. Αυτού του είδους τα πολυμερή είναι επίσης γνωστά για την διατήρηση της μοριακής τους δομής σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Εκτός των μπαταριών, τα εν λόγω πολυμερή χρησιμοποιούνται ευρέως στην προστασία συνδέσεων ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών διατάξεων.



Εικόνα 19 – Αποσυναρμολογημένο κελί AA NiMH: 1.Θετικός ακροδέκτης 2.Εξωτερική μεταλλική θήκη & αρνητικός ακροδέκτης 3.Θετικό ηλεκτρόδιο 4.Αρνητικό ηλεκτρόδιο με συλλέκτη ρεύματος (μεταλλικό πλέγμα συνδεδεμένο με μεταλλική επίστρωση) 5. Διαχωριστής

2.2.2.3.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Το σύστημα φέρει παρόμοια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, ως προς τη χωροταξία των υλικών εντός του κυλινδρικού κελύφους, αλλά και ως προς τα κατασκευαστικά στοιχεία εξαέρωσης. Η

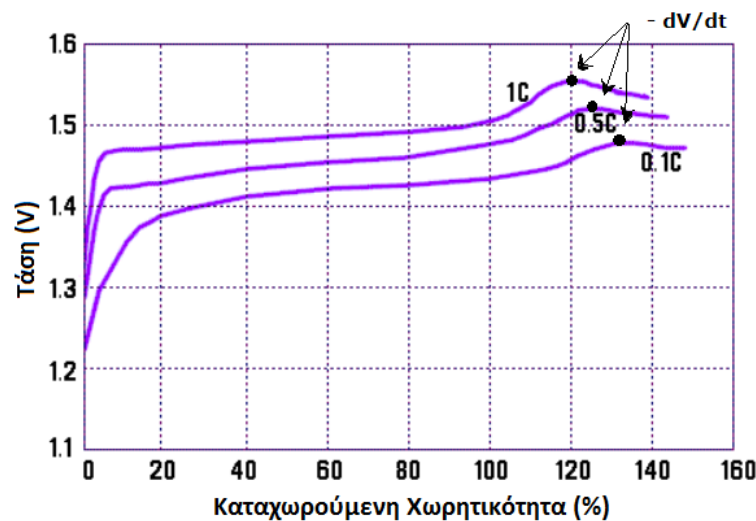
ουσιαστική τους διαφορά έγκειται στα ίδια τα υλικά που απαρτίζουν το ηλεκτροχημικό μέρος της μπαταρίας.

2.2.2.3.4 ΦΟΡΤΙΣΗ - ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ

Ο αλγόριθμος φόρτισης για μια NiMH είναι παρόμοιος με αυτόν μιας NiCd, με τη διαφορά ότι της πρώτης είναι πιο πολύπλοκος. Το σύστημα NiMH χαρακτηρίζεται από την απαιτητική διαχείριση της συμπεριφοράς της τάσης.

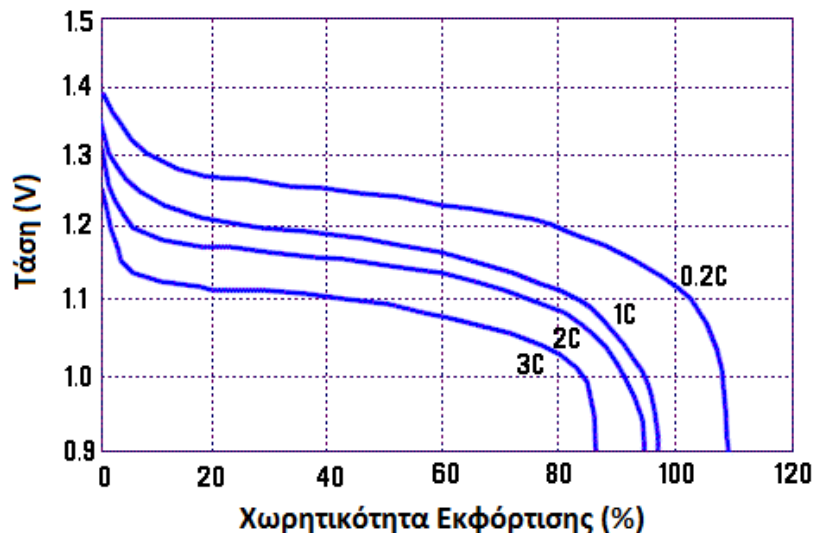
Η φόρτιση κυμαίνεται από 1,4-1,6V ανά κελί και εξαρτάται από την εφαρμογή κάθε κελιού (διαφορετικές ανάγκες λειτουργίας=διαφορετικούς C (εικόνα 20). Γενικότερα, η φόρτιση σταθερής τιμής δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτόματη φόρτιση (εμπορική χρήση). Είναι σίφρων τα κελιά NiMH να φορτίζονται με τη χρήση έξυπνων φορτιστών για την αποφυγή υπερφορτίσεων, που μπορούν να οδηγήσουν έως και σε αντιστροφή πολικότητας ενός κελιού.

Ο πρώτος εκ των τριών τρόπων φόρτισης, στένωση τάσης, φόρτιση ΔV και ΔT, είναι ο απλούστερος και μπορεί να πραγματοποιηθεί πολύ χαμηλές τάσεις με ή χωρίς τη χρήση χρονομετρητή. Αρκετοί κατασκευαστές (Panasonic, Duracell, Energizer) ισχυρίζονται πως η υπερφόρτιση είναι ασφαλής σε φόρτιση ίση ή μικρότερη του 0,1C (C/10). Η παρακολούθηση των μεταβολών της τάσης δεν συνίσταται για κελιά NiMH διότι η μεταβολή της τάσης (ΔV) τους κατά τη διάρκεια της φόρτισης είναι ανεπαίσθητη (σε χαμηλά επίπεδα C είναι σχεδόν μηδενική (εικόνα 20 και 21), άρα δύσκολα ανιχνεύσιμη. Η τρίτη και καταλληλότερη μέθοδος φόρτισης είναι η ανίχνευση μεταβολής της θερμοκρασίας (ΔT) που παρατηρείται στο τέλος της φόρτισης μιας μπαταρίας, καθώς η ενέργεια που προσφέρεται παύει να μετατρέπεται σε χημική και μεταπίπτει σε θερμικές απώλειες.



Εικόνα 20 – Επιρροή του ρυθμού φόρτισης C στην τάση φόρτισης V. Στην κορυφή κάθε γραφήματος η μεταβολή τάσης είναι μηδενική, όπου ακολουθείται από αρνητική μεταβολή (Negative Delta V).

Αναφορικά με την εκφόρτιση, ένα πλήρως φορτισμένο κελί NiMH μπορεί να παραγάγει κατά μέσο όρο 1,25V, ελαττώνοντας σε τάση του 1,0-1,1V προς το τέλος της φόρτισης. Υπό ελαφρύ φορτίο (~0,5A) η τάση εκκίνησης μπορεί να ανέρχεται και στα 1,4V. Όπως γίνεται αντιληπτό και από την εικόνα 20, η μεταβολή του ρυθμού εκφόρτισης επηρεάζει την τάση εξόδου αλλά και τα αποθέματα ενέργειας.



Εικόνα 21 – Συσχέτιση ρυθμών εκφόρτισης με τη χωρητικότητα.

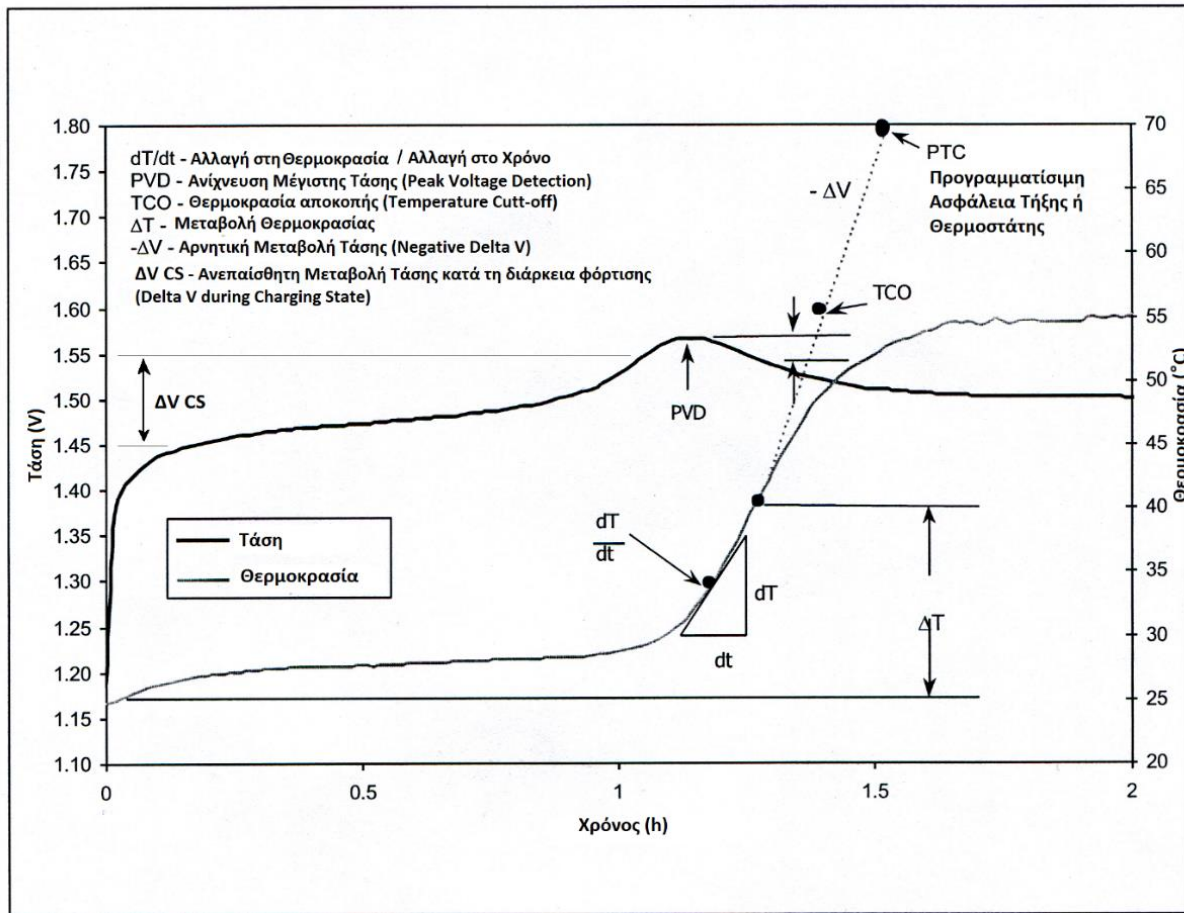
Τέλος, συγκρίνοντας μια μπαταρία NiCd με ένα σύστημα NiMH, το δεύτερο παρουσιάζει υψηλότερο ρυθμό αυτοεκφόρτισης, αν και ο αριθμός ποικίλει αναλογικά με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έχει παρατηρηθεί ότι σε θερμοκρασία δωματίου παρουσιάζεται πτώση τάσης 5-20% την πρώτη μέρα, με ακόλουθη πτώση της τάξεως του 0,5-4%, όπου και σταθεροποιείται. Όσο η θερμοκρασία αποκλίνει προς τα κάτω, ο ρυθμός αυτόεκφόρτισης μειώνεται, ενώ σε θερμοκρασίες γύρω στους 45°C η αυτόεκφόρτιση τριπλασιάζεται.

Το 2005 λανσαρίστηκε από την Eneloop, θυγατρική της Sanyo, το κελί NiMH χαμηλής αυτοεκφόρτισης (LSD NiMH), το οποίο απαρτίζει μπαταρίες με σημαντικά χαμηλότερο ρυθμό απώλειας φορτίου κατά την παύση λειτουργίας τους. Με τη χρήση εξελιγμένων διαχωριστών και θετικού ηλεκτροδίου, η εταιρεία ισχυρίζεται ότι σε διάστημα ενός χρόνου αποθήκευσης, η μπαταρία χάνει μόνο το 30-15% του φορτίου της σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C.

2.2.2.3.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ, ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ & ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η στιβαρή κατασκευή καθιστά την χρήση του συστήματος Ni-MH κατάλληλη για την ηλεκτροκίνηση. Η ανθεκτικότητά της εκτείνεται και στην ανοχή της μπαταρίας σε υπερφόρτιση/υπερεκφόρτιση. Εκτός της υψηλότερης ειδικής ενέργειας (+50%) και ισχύος, συγκριτικά με τις υπόλοιπες μπαταρίες νικελίου, η τεχνολογία νικελίου-μετάλλου υδριδίου είναι φιλική προς το περιβάλλον και πολύ πιο ασφαλής από μπαταρίες λιθίου σε περίπτωση ατυχήματος, αφού περιέχει μικρή ποσότητα ήπιων χημικών και το νικέλιο ανακυκλώνεται. Έχει ευθύ προφίλ εκφόρτισης (25°C), με απότομη πτώση προς το τέλος του κύκλου σύμφωνα με το διάγραμμα της εικόνας 23. Χαρακτηρίζεται από χαμηλή εσωτερική αντίσταση (320mΩ), όχι όμως τόσο όσο της NiCd (150mΩ). Οι κύκλοι ζωής κυμαίνονται μεταξύ 3000-350.000 αναλόγως το βάθος εκφόρτισης (DOD). Τυπικά η διάρκεια ζωής υπερβαίνει τους 3000 κύκλους με 100% DOD, αλλά σε αρκετά πιο ήπιες συνθήκες εκφόρτισης, της τάξεως του 5% DOD, μπορεί να επιτευχθούν έως και 350.000 κύκλοι ζωής. Αναφορικά με την φόρτιση, μια μπαταρία Ni-MH μπορεί φορτιστεί ταχέως με τη χρήση συστήματος «dT/dt»* επιτυγχάνοντας πλήρη φόρτιση περίπου σε 1 ώρα, αλλά και με τη μέθοδο της βραδείας φόρτισης

(trickle charge)* με συνοδευτική λειτουργία χρονοδιακόπτη για την αποφυγή της παράτασης της χρήσης της μεθόδου.



Εικόνα 22 – Ονοματολογία μεθόδου τερματισμού φόρτισης για κελί Νικελίου-Μετάλλου Υδριδίου NiMH.

Ένα σύστημα Ni-MH έχει την δυνατότητα να «ξαναβιώσει» καθώς μπορεί να επανέλθει περίπου στην αρχική της κατάσταση σε περίπτωση που έχει μειωθεί κατά πολύ η χωρητικότητά της λόγω αχρηστίας μέσω της μεθόδου αποκατάστασης*.

Πίνακας 5– Τεχνικά χαρακτηριστικά μπαταρίας Νικελίου-Μετάλλου Υδριδίου.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Στοιχεία	Επίδραση στην επίδοση του οχήματος
Ονομαστική Τάση (V)	1,2	
Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	70-120	Αυτονομία και Βάρος
Ενεργειακή Πυκνότητα(Wh/L)	200-310	Αυτονομία και Μέγεθος
Ειδική Ισχύς Εκφόρτισης (W/kg)	250-1100	Επιτάχυνση και Βάρος
Απόδοση Φόρτισης/Εκφόρτισης (%)	66-95	
Ρυθμός Ιδιοεκφόρτισης (%) /μήνα	13,9-70,6 σε Θερμοκρασία δωματίου 36,4-97,6 υπό 45°C	

	1,3-2,9 υπό 20°C	
Ρυθμός Εκφόρτισης	10C	
Διάρκεια Ζωής (χρόνια)	40-60	Κόστος Κύκλου ζωής
Κύκλοι Ζωής	3000-350.000(ανάλογα το DOD)	Κόστος Κύκλου ζωής
Εσωτερική αντίσταση (Ω)	Λίγο υψηλότερη από NiCd	
Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)	-25 έως 70	Ζωή της Μπαταρίας

Αναμφισβήτητα, τα πλεονεκτήματα ενός συστήματος Ni-MH είναι αρκετά ώστε να την έχουν τοποθετήσει στις προτιμήσεις των κατασκευαστών. Βέβαια, με τόσα θετικά χαρακτηριστικά, το αρχικό κόστος κατατάσσεται κι αυτό στα πρώτα και σημαντικότερα μειονεκτήματα.

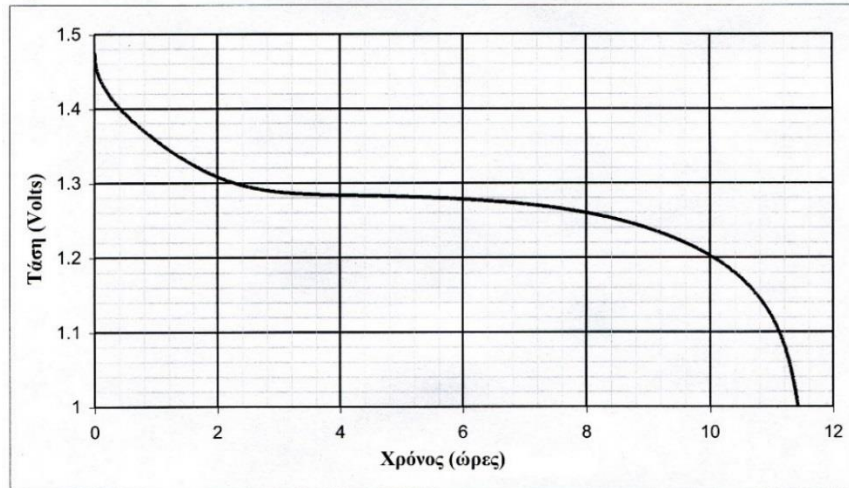
Όπως και τα περισσότερα είδη μπαταριών, έτσι και η Ni-MH χωλαίνει λόγω χαρακτηριστικών φόρτισης/εκφόρτισης. Βασικό μειονέκτημά της είναι ότι πάσχει από το «φαινόμενο μνήμης»*, σε μικρότερο βαθμό από τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου και περισσότερο από τις ιόντων-λιθίου. Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα είναι το χαμηλό ποσοστό αποδοτικότητας* το οποίο είναι μόλις 65% σε σύγκριση με την 99% αποδοτικότητας μιας μπαταρίας Li-ion. Επίσης απαιτείται πολύπλοκος αλγόριθμος φόρτισης και είναι αρκετά ευαίσθητο σύστημα σε υπερφόρτιση, καθώς το επιπλέον φορτίο δεν απορροφάται ικανοποιητικά με αποτέλεσμα η τάση κατά τη βραδεία φόρτιση (trickle charge) να πρέπει να παραμένει χαμηλότερη από τη τάση της θεωρητικής τάσης μέγιστης απόδοσης της μεθόδου αυτής. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό των Ni-MH είναι ότι εξωτερικεύουν ποσά θερμότητας κατά τη διάρκεια ταχέων φορτίσεων και εκφορτίσεων. Όσο για την ταχεία, αλλά και την βαθιά εκφόρτιση, έχει αποδειχθεί πως μειώνουν την διάρκεια ζωής του συστήματος.

Η τεχνολογία των μπαταριών Ιόντων-Λιθίου παρουσιάζει ραγδαία εξέλιξη με σκοπό την αποτελεσματικότερη «ηλεκτροποίηση» του συστήματος μετάδοσης κίνησης και παρέχει σταθερές λύσεις αποθήκευσης ενέργειας ώστε να επιτρέψει την αποτελεσματική χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται σε εφαρμογές χαμηλής σε απαίτησης ισχύς (οικιακές συσκευές, προσωπικές ηλεκτρονικές συσκευές κ.α.), σε ηλεκτροκίνητες εφαρμογές (υβριδικές και μη), και ως μαζικός αποθηκευτικός χώρος για λογαριασμό δικτύου ηλεκτροδότησης.

Ωστόσο, η ασφάλεια είναι ένα θέμα που ακόμα τίθεται υπό αμφισβήτηση, η διάρκεια ζωής δεν είναι ακόμα ικανοποιητική συγκριτικά με το κόστος παραγωγής και απόκτησης, καθώς τα νούμερα παραμένουν ακόμα υψηλά.

Για τις αυτοκινητοβιομηχανίες, η κινητήριος δύναμη για την ακατάπαυστη παροχή πόρων σε έρευνα και ανάπτυξη των μπαταριών Ιόντων-Λιθίου είναι τα όλο και πιο αυστηρά μέτρα εκπομπών CO₂ που επιβάλλονται από αρμόδιους οργανισμούς ανά την υφήλιο.

Για την ετήσια επίτευξη των επιβαλλόμενων στόχων, οι αυτοκινητοβιομηχανίες (κυρίως οι κατασκευαστές πολυτελών αυτοκινήτων) πρέπει να παράξουν όλο και περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα όπως ηλεκτρικά υβριδικά (HEV), υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα που φορτίζονται με ρευματολήπτη (PHEV) και τα εν γένει ηλεκτρικά οχήματα (EV).



Εικόνα 23 – Ποιοτικό διάγραμμα Τάσης-Χρόνου για κελί Νικελίου-Μεταλλού Υδριδίου

Για τις παραπάνω εφαρμογές η τεχνολογία Ιόντων-Λιθίου (Li-ion) είναι το κλειδί για αρκετά από τα ακόλουθα χρόνια. Η ανάπτυξη του προϊόντος έχει επικεντρωθεί στην αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας με σκοπό της αύξηση της αυτονομίας, της ασφάλειας, της μακροβιότητας, της αξιοπιστίας και του κόστους ενός ηλεκτρικού οχήματος.

2.2.3 ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΛΙΘΙΟΥ

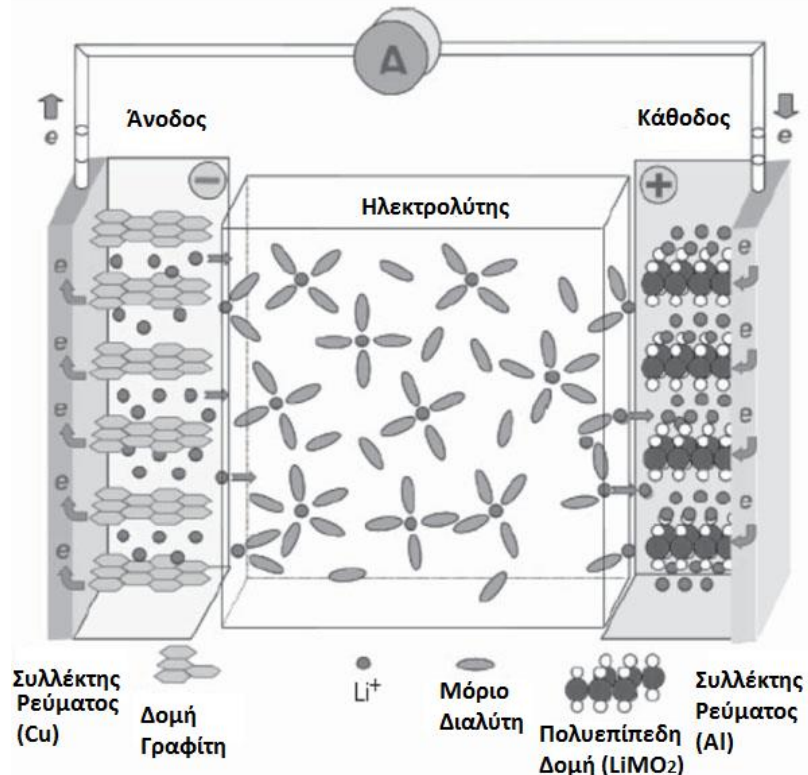
2.2.3.1 ΜΠΑΤΑΡΙΑ ΙΟΝΤΩΝ-ΛΙΘΙΟΥ (Li-ion)

2.2.3.1.1 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Κελί. Η μικρότερη λειτουργική μονάδα σε μια μπαταρία είναι το *ηλεκτροχημικό κελί*, αποτελούμενο από την κάθοδο και την άνοδο που διαχωρίζονται και ενώνονται από τον ηλεκτρολύτη. Ο τελευταίος, άγει ιόντα αλλά δρα και ως μονωτής για τα ηλεκτρόνια. Σε κατάσταση φόρτισης, η άνοδος περιέχει λίθιο (intercalated lithium*) σε μεγάλη συγκέντρωση, ενώ η κάθοδος στερείται πλήρως του λιθίου. Κατά την εκφόρτιση, ιόντα λιθίου αποχωρούν από την άνοδο και μεταναστεύουν μέσω του ηλεκτρολύτη στην κάθοδο, ενώ τα συσχετιζόμενα ηλεκτρόνια του συλλέγονται από τον συλλέκτη ρεύματος ώστε το δεύτερο να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδότηση των συστημάτων του οχήματος.

Υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση στα σχέδια και στους συνδυασμούς των μονάδων και πακέτων μπαταριών.

Τα ηλεκτρόδια στις μπαταρίες Ιόντων-Λιθίου είναι πάντα στερεά υλικά. Πρώτη βασική διαφοροποίηση προκύπτει από τα διαφορετικά είδη ηλεκτρολυτών, όπως υγρής μορφής, σε ημιστερεά μορφή (αλλιώς τζελ), ή σε στερεά μορφή. Στην περίπτωση χρήσης ηλεκτρολύτη στις δύο τελευταίες μορφές του, τα υλικά χρησιμοποιούνται ως κατασκευαστικά στοιχεία και δεν απαιτείται ο επιπρόσθετος διαχωρισμός για την αποτελεσματική αποστασιοποίηση των ηλεκτροδίων και την αποφυγή βραχυκυκλώματος.

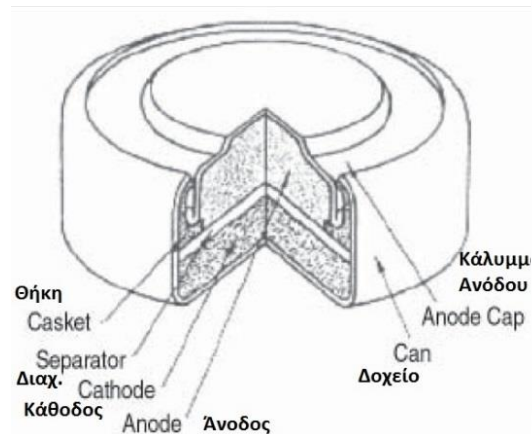


Εικόνα 24 - Ηλεκτροχημικό κελί Ιόντων-Λιθίου με οξείδιο μετάλλου ως άνοδο και γραφίτη ως άνοδο.

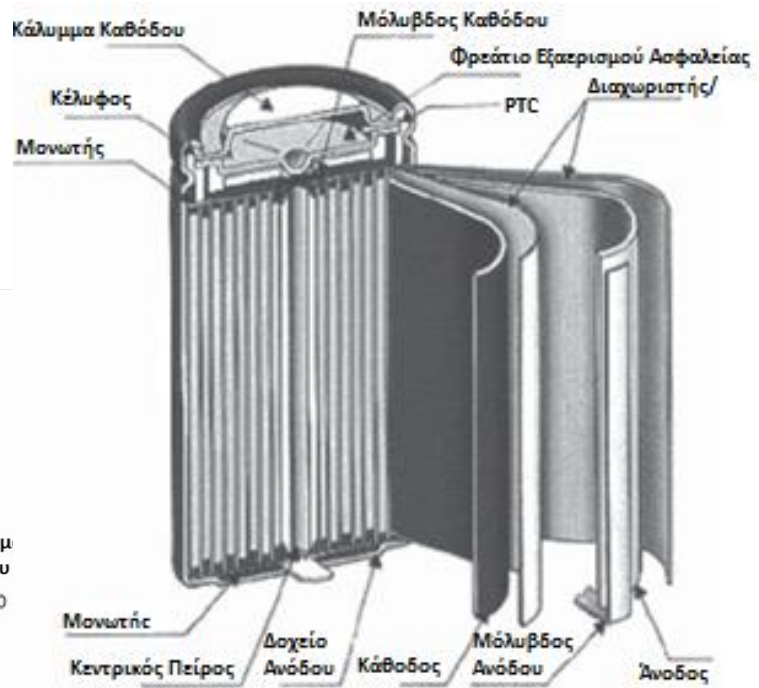


Εικόνα 25 – Σχηματική απεικόνιση τυλίγματος κελιού τζελ

Κελιά μορφής κουμπιού, κυλινδρικής και πρισματικής μορφής (Εικόνα 4.1-4.3). Για εφαρμογές χαμηλής ισχύος και ενέργειας, ένα μεμονωμένο κελί αποτελεί μία πλήρη μπαταρία. Σε περιπτώσεις υψηλών απαιτήσεων σε ισχύ και ενέργεια, όπως μεταφορά και στάσιμη αποθήκευση ενέργειας, πολλαπλά κελιά ομαδοποιούνται σε μία μονάδα και πολλές μονάδες δημιουργούν μια μπαταρία.



Εικόνα 26 – Κελί μορφής κουμπιού



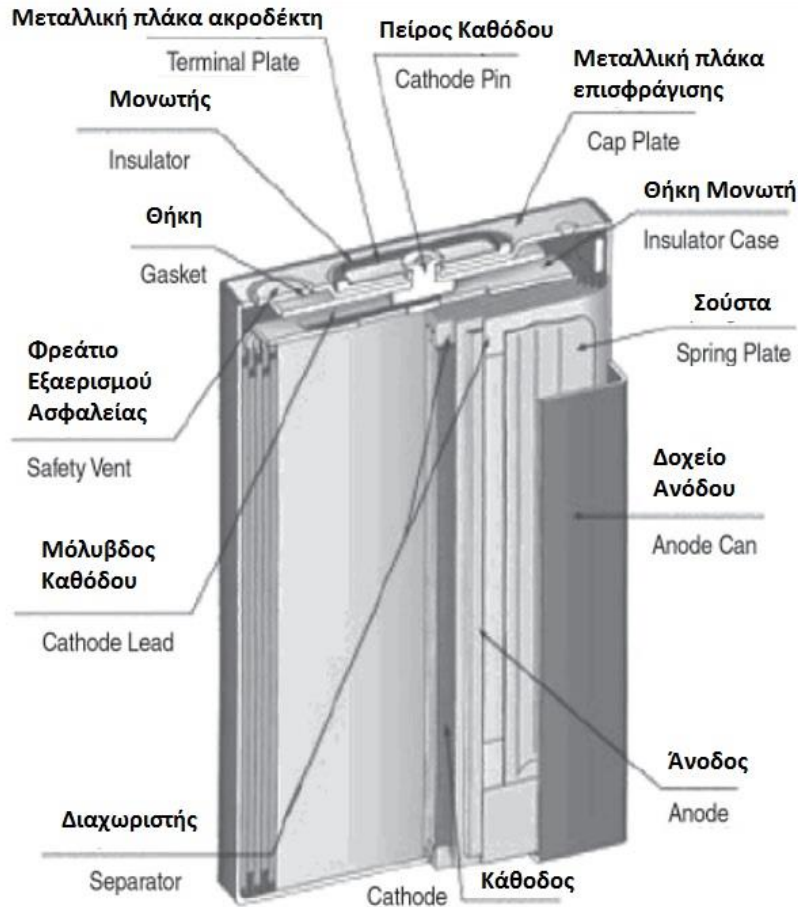
Εικόνα 27 – Κελί κυλινδρικής μορφής (DIN 91252)

Μια ειδική κατηγορία μπαταριών είναι αυτή της στερεάς μορφής και υπέρλεπτης κατασκευής. Ο ηλεκτρολύτης είναι ιοντικό γυαλί στερεάς μορφής ή κρύσταλλος και τα εξαρτήματα τοποθετούνται μετά από επεξεργασία καθαίρεσης ατμού. Αυτό το σχέδιο προσφέρει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, ασφάλεια και κατασκευαστική ανοχή, αλλά είναι εφαρμόσιμο σε μικρές συσκευές που προορίζονται για ειδικές εφαρμογές. Η μέθοδος παραγωγής αυτών των μπαταριών παρουσιάζουν το μεγαλύτερο κόστος.

Μονάδα και Πακέτο. Μία μονάδα αποτελείται από κάποια κελιά είτε μέσω φυσικής σύνδεσης είτε μέσω συγκόλλησης αυτών. Μία μπαταρία είναι ουσιαστικά ένα πακέτο από μονάδες που έχουν τοποθετηθεί σε έναν χώρο με σκοπό την ευκολότερη θερμική τους διαχείριση.

Χωρητικότητα. Η Χωρητικότητα (Ah) είναι το συνολικό φορτίο που μπορεί να εκφορτιστεί από μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Η *Ονομαστική Χωρητικότητα* αντιστοιχεί στην εργοστασιακή τιμή μιας καινούριας πλήρως φορτισμένης μπαταρίας υπό συνθήκες που προσδιορίζονται από τον κατασκευαστή εκ των προτέρων.

Για την περιγραφή μιας μπαταρίας, το ρεύμα εκφόρτισης συνήθως εκφράζεται ως ρυθμός C (C-rate), αριθμός που διαφέρει πολύ από μπαταρία σε μπαταρία. Το **C-rate** μετράει τον ρυθμό στον οποίο η μπαταρία εκφορτίζεται συγκριτικά με τη μέγιστη χωρητικότητά της. Ρυθμός της τάξεως του 1C, σημαίνει ότι το ρεύμα **εκφόρτισης** θα εκφορτίσει την μπαταρία σε **1 ώρα**.



Εικόνα 28 – Κελί πρισματικής μορφής (Pouch cell) (DIN SPEC 91252)

Για μία μπαταρία χωρητικότητας **100 Amp-hrs**, αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα εκφόρτισης **100 Amps**. Ένας ρυθμός 5C για την ίδια μπαταρία σημαίνει 500 Amps και για ρυθμό C/2 θα είναι 50 Amps. Ομοίως, το *E-rate* περιγράφει την ισχύ. Ένας ρυθμός της τάξης του 1 E, είναι η ισχύς εκφόρτισης για να εκφορτιστεί μια μπαταρία σε 1 ώρα.

Ονομαστική Ενέργεια σε Wh = Ονομαστική Χωρητικότητα σε Ah × Ονομαστική Τάση σε V (1.1)

Για μια μπαταρία 1,6 Ah, το C ισούται με την εκφόρτιση ή την φόρτιση της μπαταρίας με 1,6 A.

Ειδική Ενέργεια. Η ειδική ενέργεια, επίσης αποκαλείται και βαρυμετρική *(gravimetric) ενεργειακή πυκνότητα, χρησιμοποιείται για να οριστεί πόση ενέργεια εμπεριέχεται στη μονάδα βάρους μιας μπαταρίας. Εκφράζεται σε Βατώρες ανά Χιλιόγραμμα (Wh/kg) ως

$$\text{Ειδική Ενέργεια} = (\text{Ονομαστική Χωρητικότητα σε Wh}) / (\text{Μάζα Μπαταρίας σε kg}) \quad (1.2)$$

Η ειδική ενέργεια είναι η παράμετρος κλειδί για τον προσδιορισμό του συνολικού βάρους για μια δεδομένη **αυτονομίας** ενός EV.

Ειδική Ισχύς. Η ειδική ισχύς, επίσης αποκαλείται και βαρυμετρική πυκνότητα ισχύος, χρησιμοποιείται για να οριστεί η μέγιστη ισχύ στη μονάδα της μάζας. Εκφράζεται σε Watt ανά Χιλιόγραμμα (W/kg) ως

$$\text{Ειδική ισχύς} = (\text{Ονομαστική Μέγιστη Ισχύς σε W}) / (\text{Μάζα μπαταρίας σε kg}) \quad (1.3)$$

Η **ισχύς** είναι ο δεύτερος παράγοντας κλειδί για την αξιολόγηση της επίδοσης ενός EV.

Επομένως, οι δύο κυριότερες απαιτήσεις για πάσης φύσεως ηλεκτροκίνητα οχήματα (EVs, PHEVs, HEVs) είναι η **αυτονομία** και η **ισχύς**. Τυπικές τιμές για την ενέργεια και την ισχύ σε επίπεδο κελιού αλλά και μπαταρίας ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις του αγοραστικού κοινού παρουσιάζονται στους Πίνακες 2 και 3 αντίστοιχα.

Σε επίπεδο κελιού, τα απαραίτητα επίπεδα τιμών ώστε να επιτευχθούν οι απαιτούμενες τιμές σε επίπεδο μπαταρίας, για την **ενεργειακή πυκνότητα** και την **πυκνότητα ισχύς** σε μέγιστη εκφόρτιση, είναι **120-140 Wh/kg** και **800-1500 W/kg** αντίστοιχα. Έως το

2020 αναμένονται τιμές ενεργειακής πυκνότητας της τάξεως 200-250 Wh/kg. Ένα κελί πρέπει να είναι ικανό να λειτουργεί ομαλά σε θερμοκρασίες μεταξύ -40-+60 °C εν ώρα λειτουργίας και -40-+80 °C κατά την αποθήκευση.

Πίνακας 6 – Βασικά Λειτουργικά Στοιχεία για Μοναδιαίο Κελί Ιόντων - Λιθίου

Κελί	Ενέργεια (Wh)	Αξιοποίηση (%)	Ισχύς (W)	Ποσοστό Ισχύς/Ενέργεια
HEV	12-20	40-70	25-60	≈80
PHEV	75-180	60-90	40-150	≈20
EV	180-800	80-100	800-1200	3-10

Πίνακας 7 - Βασικά Λειτουργικά Στοιχεία για Μπαταρία Ιόντων - Λιθίου

Μπαταρία	Ενέργεια (kWh)	Αξιοποίηση (%)	Ισχύς (kW)	Ποσοστό Ισχύς/Ενέργεια
HEV	1-3	40-70	20-60	30-40
PHEV	5-15	60-90	40-150	5-10
EV	20-50	80-100	50-350	3-7

Ενεργειακή Πυκνότητα. Η ενεργειακή πυκνότητα, επίσης γνωστή και ως ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα, είναι η ονομαστική ενέργεια της μπαταρίας ανα μονάδα όγκου (Wh/l).

Πυκνότητα Ισχύος. Η πυκνότητα ισχύος είναι η μέγιστη ισχύς ανά μονάδα όγκου της μπαταρίας (W/l).

Εσωτερική Αντίσταση. Η εσωτερική αντίσταση είναι η συνολική ισοδύναμη αντίσταση εντός της μπαταρίας. Διαφέρει από φόρτιση σε εκφόρτιση και μπορεί να ποικίλει ανάλογα τις συνθήκες λειτουργίας.

Μέγιστη Ισχύς. Σύμφωνα με τον ορισμό της Κοινοπραξίας Εξελιγμένων Μπαταριών των ΗΠΑ (USABC), η μέγιστη ισχύς (peak power) ορίζεται ως

$$P = \frac{2V_{oc}^2}{9R}, \quad (10)$$

Όπου V_{oc} είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος και R η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας. Η Μέγιστη Ισχύς ουσιαστικά ορίζεται από τη συνθήκη ότι η τερματική τάση είναι ίση με τα 2/3 της τάσης ανοικτού κυκλώματος.

Τάση Αποκοπής. Η τάση αποκοπής είναι η ελάχιστη επιτρεπόμενη τάση που ορίζει ο κατασκευαστής. Μπορεί να μεταφραστεί ως η «άδεια» κατάσταση της μπαταρίας.

Κατάσταση Φόρτισης (SOC). Η κατάσταση φόρτισης ορίζεται ως η εναπομείνουσα χωρητικότητα της μπαταρίας και επηρεάζεται από τις συνθήκες λειτουργίας όπως το ρεύμα φορτίου και η θερμοκρασία.

$$SOC = \frac{\text{Εναπομείνουσα Χωρητικότητα}}{\text{Ονομαστική Χωρητικότητα}} \quad (11)$$

Η SOC είναι μια κρίσιμη κατάσταση παράμετρος για την διαχείριση της μπαταρίας. Η ακριβής παρακολούθηση της SOC είναι πρόκληση, αλλά το κλειδί στην ασφαλή και ορθή λειτουργία των μπαταριών.

Βάθος Εκφόρτισης (DOD). Το βάθος εκφόρτισης δηλώνει το ποσοστό της συνολικής ποσότητας της μπαταρίας που έχει εκφορτιστεί. Για μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης, η εκφόρτιση αγγίζει ποσοστά μεγαλύτερα του 80%.

$$DOD = 1 - SOC \quad (12)$$

Κατάσταση Υγείας (SOH). Η κατάσταση υγείας μπορεί να οριστεί ως το ποσοστό της μέγιστης χωρητικότητας μιας εκφυλισμένης μπαταρίας προς τη μέγιστη χωρητικότητά της όταν ήταν καινούρια. Η SOH είναι σημαντική παράμετρος για την ένδειξη υποβάθμισης του βαθμού απόδοσης μιας μπαταρίας και την εκτίμηση της εναπομείνουσας διάρκειας ζωής.

$$SOH = \frac{\text{Χωρητικότητα Γηραιάς Μπαταρίας}}{\text{Ονομαστική Χωρητικότητα Μπαταρίας}} \quad (13)$$

Κύκλος Ζωής. Ο κύκλος ζωής είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης που μπορεί να πραγματοποιήσει μια μπαταρία σε προκαθορισμένο βάθος εκφόρτισης DOD (συνήθως DOD=80%), πριν καταστεί ανίκανη να ικανοποιήσει κάποια κριτήρια επιδόσεων. Η πραγματική διάρκεια ζωής λειτουργίας επηρεάζεται από το ρυθμό «φορτο-εκφορτίσεων», το DOD, και άλλες συνθήκες όπως η θερμοκρασία. Όσο υψηλότερο είναι το DOD, τόσο μικρότερος είναι και ο κύκλος ζωής. Για την επίτευξη μακροβιότερου κύκλου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερη μπαταρία ώστε να επιτυγχάνεται μικρότερο DOD σε κανονική λειτουργία.

Ημερολογιακή Ζωή. Η ημερολογιακή διάρκεια ζωής είναι το προσδόκιμο ζωής μιας μπαταρίας υπό συνθήκες αποθήκευσης ή περιοδικής χρήσης. Μπορεί να έχει άμεση σχέση με την θερμοκρασία και την SOC κατά την αποθήκευση.

Αντιστροφή Μπαταρίας (Battery Reversal). Η αντιστροφή συμβαίνει όταν η μπαταρία αναγκάζεται να λειτουργήσει υπό αρνητική τάση (όταν η τάση του θετικού ηλεκτροδίου είναι χαμηλότερη από αυτή του αρνητικού). Αυτό μπορεί να συμβεί σε ένα σχετικά αδύναμο κελί, σε μπαταρία σειριακής διάταξης. Καθώς η χρησιμοποιούμενη χωρητικότητα του εν λόγω «αδύναμου κελιού» εξασθενεί, τα υπόλοιπα κελιά της ίδιας σειράς θα συνεχίσουν να τροφοδοτούν ρεύμα και να

αναγκάζουν το ελαττωματικό κελί να αντιστρέψει την τάση του. Το αποτέλεσμα της αντιστροφής της μπαταρίας είναι η μείωση της ζωής της μπαταρίας ή η πλήρης αποτυχία λειτουργίας.

Σύστημα Διαχείρισης Μπαταρίας (BMS). Το σύστημα αυτό είναι ένας συνδυασμός αισθητήρων, ελεγκτών και συνδυασμός λογισμικών επικοινωνίας και υπολογισμών, σχεδιασμένα να εκλέγουν την ύψιστη διάρκεια και τάση φόρτισης/εκφόρτισης από την εκτίμηση της SOC και SOH του πακέτου μπαταριών.

Περιλαμβάνει συχνά το **σύστημα θερμικής διαχείρισης της μπαταρίας (TMS)** που είναι σχεδιασμένο ώστε να αποτρέπει τη μπαταρία να υπερθερμαίνεται και συνεπαγωγικά να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής της. Ένα απλό αερόψυκτο κύκλωμα εξαερισμού επαρκεί για να διατηρήσει μια μπαταρία Νικελίου-Μετάλλου Υδριδίου (NiMH) σε επιθυμητά θερμικά επίπεδα, ενώ για πιο αυτοκινητιστικές εφαρμογές όπως μπαταρίες Ιόντων-Λιθίου (Li-Ion), απαιτείται ένα πιο εξελιγμένο υδρόψυκτο σύστημα

Μία ακόμα σημαντική απαίτηση είναι η διάρκεια ζωής. Ένα κελί Li-ion πρέπει να σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργεί πλήρως για τουλάχιστον 10 χρόνια, βάσει των οδηγικών προφίλ πελατών. Η ζωή ενός κελιού ολοκληρώνεται όταν αυτό φτάσει το 80% της ονομαστικής χωρητικότητας ή το 80% της ονομαστικής ισχύος. Ανάλογα με την απαίτηση ισχύος και τη χιλιομετρική προσδοκία, η ζωή ενός δεκαετούς οχήματος αντιπροσωπεύει συνολική ενεργειακή διεκπεραιωτικότητα έως και 800.000 kWh.

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα βασικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά μιας μπαταρίας και οι τομείς που επηρεάζονται από το κάθε χαρακτηριστικό αντίστοιχα.

Πίνακας 8 – Τεχνικά χαρακτηριστικά μπαταριών Li-ion όπως πρέπει να έχουν διαμορφωθεί έως το 2020

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Στόχοι έως το 2020	Επίδραση στην επίδοση του οχήματος
Ονομαστική Ισχύς(V)	3,38-4,7	
Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	265-300	Αυτονομία και Βάρος
Ενεργειακή Πυκνότητα(Wh/L)	300-693	Αυτονομία και Μέγεθος
Ειδική Ισχύς Εκφόρτισης (W/kg)	400	Επιτάχυνση και Βάρος
Πυκνότητα ισχύος εκφόρτισης(W/L)	600	Επιτάχυνση και Μέγεθος
Απόδοση Φόρτισης-Εκφόρτισης	80-90%	
Ποσοστό Ιδιοεκφόρτισης	1,5%/μήνα	
Ειδική Αναγεννητική ισχύς (W/kg)	200	Εξοικονόμηση Ενέργειας και Βάρος
Αναγεννητική Ισχύς (W/L)	300	Εξοικονόμηση Ενέργειας και Μέγεθος
Διάρκεια Ζωής (χρόνια)	10	Κόστος Κύκλου ζωής
Κύκλοι Ζωής	1000-1200	Κόστος Κύκλου ζωής
Εσωτερική Αντίσταση(mΩ)	320	
Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)	-40 έως 85	Ζωή της Μπαταρίας, Βελτιωμένη λειτουργία σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες
Τιμή Πώλησης (\$/kWh)	100	Κόστος Απόκτησης και Αντικατάστασης

Τεχνικά Χαρακτηριστικά		Επίδραση στην επίδοση του οχήματος
Χωρητικότητα (mAh)		Αύξηση Εμβέλειας
Ονομαστική Τάση Κελιού(V)		
Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)		Αυτονομία και Βάρος
Ενεργειακή Πυκνότητα(Wh/L)		Αυτονομία και Μέγεθος
Ειδική Ισχύς Εκφόρτισης (W/kg)		Επιτάχυνση και Βάρος
Πυκνότητα ισχύος εκφόρτισης(W/L)		Επιτάχυνση και Μέγεθος
Απόδοση Φόρτισης-Εκφόρτισης	99-90	Κόστος Ενέργειας Φόρτισης, Ταχύτητα Εκ/Φόρτισης
Ποσοστό Ιδιοεκφόρτισης (%/mnth)	~0,1 (+3% λόγω κυκλώματος προστασίας)	Διάρκεια Διατήρησης Φορτίου
Εσωτερική Αντίσταση (mΩ)		Ποσοστό Ιδιοεκφόρτιση
Ειδική Αναγεννητική ισχύς (W/kg)		Εξοικονόμηση Ενέργειας και Βάρος
Αναγεννητική Ισχύς (W/L)		Εξοικονόμηση Ενέργειας και Μέγεθος
Διάρκεια Ζωής (χρόνια)		Κόστος Κύκλου ζωής
Κύκλοι Ζωής (80% DoD)		Κόστος Κύκλου ζωής
Εσωτερική Αντίσταση(mΩ)		Ρυθμός Ιδιοεκφόρτισης Αποθήκευσης
Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)		Ζωή της Μπαταρίας
Θερμοκρασία Φόρτισης (°C)		Ζωή της Μπαταρίας
Θερμοκρασία Αποθήκευσης (°C)		Ζωή της Μπαταρίας
Τιμή Πώλησης (\$/kWh)	-	Κόστος Απόκτησης και Αντικατάστασης

Μέχρι σήμερα, έχει σημειωθεί μεγάλη πρόοδος και οι αυτοκινητοβιομηχανίες βρίσκονται στη σωστή τροχιά επίτευξης των παραπάνω στόχων. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4., τα πιο διαδεδομένα από εμπορικής άποψης ηλεκτροκίνητα μοντέλα έχουν θέσει τα στάνταρ για όλες τις κατηγορίες αυτών.

Πίνακας 9 – Ηλεκτρικά Οχήματα με τύπο μπαταρίας, αυτονομία και χρόνο φόρτισης

Model	Battery	Charge Time
Toyota Prius PHEV	4,4kWh Li-ion, 18km (11miles) πλήρους ηλεκτρικής αυτονομίας	3h με 115VAC 15A 1,5h με 230VAC 15A
Chevy Volt PHEV	16kWh, Li-manganese/NMC, υδρόψυκτη, 181kg (400lb), 64km(40miles) πλήρους ηλ. αυτονομίας	10h με 115VAC 15A 4h με 230VAC 15A
Mitsubishi iMiEV	16kWh, 88κελιά σε μονάδες των 4, Li-ion, 109Wh/kg, 330V, αυτονομία 128km (80miles)	13h με 115VAC 15A 7h με 230VAC 15A
Smart Fortwo ED	16,5kWh, κελιά Li-ion 18650, αυτονομία 136km (85miles)	8h με 115VAC 15A 3,5h με 230VAC 15A

BMW i3	22kWh (χρησιμοποιήσιμες μόνο οι 18,8), LMO/NMC, πρισματικά κελιά 60A, 204kg (450lb), αυτονομία 130-160km (80-100 miles)	~4h με 230VAC 30A, 50kW Supercharger 80% σε 30min
Nissan Leaf	30kWh, Li-manganese, 192 κελιά, αερόψυκτη, 272kg (600lb), αυτονομία έως και 250km (156miles)	8h με 230VAC 15A 4h με 230VAC 30A
Tesla S*	70 και 90 kWh, κελιά NCA 18560 3,4Ah, υδρόψυκτη, πακέτο μπαταρίας 90kWh αποτελούμενο από 7.616 κελιά, 540kg(1.200lb), Το μοντέλο S85: αυτονομία 424km (265 miles)	9h με φορτιστή 10kW, 30min, 80% με υπερφορτιστή 120kw

2.2.3.1.2 ΥΛΙΚΑ

ΥΛΙΚΑ ΑΝΟΔΟΥ

Τα πιο διαδεδομένα υλικά είναι τα: λίθιο (Li), κράματα λιθίου (Li_xX_n), ενδομεταλλικά κράματα ή απλώς κράματα μετάλλων με άλλα μη μεταλλικά υλικά, ή σιλικόνη (Si). Το λίθιο φαίνεται να είναι το καταλληλότερο υλικό αν και παρουσιάζει προβλήματα κατά την κυκλική διαδικασία της εκ/φόρτισης και ανάπτυξη δενδροειδών* (dendritic growth), που προκαλούν βραχυκύκλωμα. Οι ανθρακοειδείς άνοδοι είναι οι πιο χρησιμοποιήσιμες χάρη στο χαμηλό κόστος και τη διαθεσιμότητα. Ωστόσο, η θεωρητική χωρητικότητα (372mAh/g) είναι χαμηλή συγκριτικά με την πυκνότητα φόρτισης του λιθίου (3,862mAh/g). Προσπάθειες έχουν γίνει να χρησιμοποιηθούν νανοσολινάρια από ευγενείς ποικιλίες γραφίτη και άνθρακα, με σκοπό την αύξηση της χωρητικότητας με αντίτιμο την ακριβή παραγωγική διαδικασία. Άνοδοι κατασκευασμένες από κοινά ή ενδομεταλλικά κράματα έχουν υψηλή χωρητικότητα αλλά παρουσιάζουν δραματική αλλαγή στον όγκο, οδηγώντας σε φτωχή κυκλική συμπεριφορά. Προσπάθειες για την καταπολέμηση αυτών των αλλαγών έχουν γίνει, χρησιμοποιώντας νανοκρυσταλλικά υλικά και έχοντας την φάση κράματος (alloy phase) (με Al, Bi, Mg, Sb, Sn, Zn και άλλα) μέσα σε νανοκρυσταλλική μήτρα σταθεροποίησης (με Co, Cu, Fe, ή Ni). Η σιλικόνη έχει άκρως υψηλή χωρητικότητα των 4,199mAh/g σε αντιστοιχία με τη σύνθεση $S_{15}L_{122}$. Ωστόσο, η κυκλική συμπεριφορά είναι υψηλή και η πτώση χωρητικότητας, μέχρι σήμερα, μη κατανοητή.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΘΟΔΟΥ

Υπερσύγχρονα υλικά για την κάθοδο, συμπεριλαμβανομένου λιθιομεταλλικών οξέων [όπως $LiCoO_2$, $LiMn_2O_4$ και $Li(NixMnyCoz)O_2$], οξέων βαναδίου, ολιβινών (όπως $LiFePO_4$), επαναφορτιζόμενα οξέα λιθίου. Τα πιο μελετημένα όμως υλικά για μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι τα πολυεπίπεδα οξειδία με περιεκτικότητα σε κοβάλτιο και νικέλιο. Παρουσιάζουν υψηλή σταθερότητα σε εύρος υψηλής τάσης, αλλά το κοβάλτιο βρίσκεται σε περιορισμένη διαθεσιμότητα στον φλοιό της γης και είναι τοξικό, γεγονός που εμποδίζει την μαζική παραγωγή. Το μαγγάνιο αποτελεί ένα χαμηλής τιμής υποκατάστατο με υψηλή θερμική αντοχής και εξαιρετικές «ονομαστικές» ικανότητες, αλλά περιορισμένη κυκλική συμπεριφορά. Συνεπαγωγικά, μείγματα κοβαλτίου, νικελίου και μαγνησίου χρησιμοποιούνται συνήθως για να συνδυάσουν τις καλύτερες ιδιότητες και να ελαχιστοποιήσουν τα αρνητικά. Τα οξειδία βαναδίου παρουσιάζουν μεγάλη χωρητικότητα και σπουδαία κινητικότητα. Όμως λόγω της συνεχόμενης αντίδρασης με το λίθιο, το υλικό τείνει να γίνει άμορφο, το οποίο εμποδίζει την κυκλική δραστηριότητα της μπαταρίας. Οι ολιβίνες είναι μη τοξικές και παρουσιάζουν μέτρια χωρητικότητα με χαμηλή φθορά λόγω κυκλικής συμπεριφοράς, αλλά η αγωγιμότητά τους είναι χαμηλή. Διάφορες

μέθοδοι επένδυσης του υλικού έχουν δοκιμαστεί που αντισταθμίζουν την περιορισμένη αγωγιμότητα, αλλά προσθέτουν κόστος στο σύνολο της παραγωγής.

ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΗΣ

Μια ασφαλής και μακροπρόθεσμα ανθεκτική μπαταρία απαιτεί έναν στιβαρό ηλεκτρολύτη που να αντέχει τις ήδη υπάρχουσες τιμές τάσης και υψηλών θερμοκρασιών και να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής ενώ να μπορεί να προσφέρει αυξημένη κινητικότητα ιόντων λιθίου. Στους διαθέσιμους τύπους ηλεκτρολυτών εντάσσονται ο υγρός, ο πολυμερής και ο στερεάς μορφής.

Ένας ηλεκτρολύτης υγρής μορφής είναι κυρίως οργανικός. Η πιο σημαντική παράμετρος είναι η **ευφλεκτικότητα**. Ένας κατάλληλος ηλεκτρολύτης έχει **χαμηλό σημείο βρασμού** και σημείο εξάτμισης (flash point) γύρω στους 30°C. Επομένως, η εκτόνωση της πίεσης (venting) ή η έκρηξη ενός κελιού καθιστά μια μπαταρία επικίνδυνη. Η αποσύνθεση του ηλεκτρολύτη και οι υψηλά εξωθερμικές παράπλευρες αντιδράσεις μπορούν να οδηγήσουν στο φαινόμενο γνωστό ως «*θερμική διαφυγή*» (Thermal Runaway). Κατά αυτόν τον τρόπο, η επιλογή ενός ηλεκτρολύτη συνήθως περιλαμβάνει συμβιβασμό μεταξύ ευφλεκτικότητας και ηλεκτροχημικών ιδιοτήτων.

Οι μονωτές (seperators) διαθέτουν ενσωματωμένους μηχανισμούς αποτροπής θερμικών επεισοδίων και εξελιγμένα εξωτερικά συστήματα διαχείρισης, που προστίθενται στις μονάδες ελέγχου διαχείρισης της μπαταρίας. Τα Ιοντικά υγρά θεωρούνται μια βιώσιμη επιλογή για το ρόλο του ηλεκτρολύτη λόγω της θερμικής τους σταθερότητας, αν και ένας αριθμός μειονεκτημάτων, όπως η διάλυση του λιθίου εντός ανόδου, καθλώνουν τα ιοντικά υγρά ακόμα στο στάδιο της έρευνας.

Οι πολυμερείς ηλεκτρολύτες είναι ιοντικά αγώγιμα πολυμερή υλικά. Συνήθως αναμειγνύονται με κεραμικά νανοσωματίδια, οδηγώντας σε μεγαλύτερη αγωγιμότητα και αντίσταση σε υψηλότερη τάση. Επιπλέον, λόγω του υψηλού ιξώδους και της ημιστερεάς τους συμπεριφοράς, οι πολυμερείς ηλεκτρολύτες θα μπορούσαν να περιορίσουν τα λιθικά δενδρύλλια* (dendrites) από το να αναπτυχθούν, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή λιθιομεταλλικών ανόδων.

Οι στερεοί ηλεκτρολύτες είναι κατασκευασμένοι από κεραμικό γυαλί και από κρυστάλλους που άγουν τα ιόντα λιθίου. Παρουσιάζουν φτωχές επιδόσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες λόγω της μείωσης κινητικότητας του λιθίου σε τέτοιες θερμοκρασίες. Επίσης, οι στερεοί ηλεκτρολύτες χρειάζονται ειδικές συνθήκες επιμετάλλωσης (plating/deposition) και θερμοκρασιακή μεταχείριση ώστε να αποκτήσουν αποδεκτή συμπεριφορά, γεγονός που τους καθιστά εξαιρετικά ακριβούς στη χρήση. Ωστόσο αποκλείουν την ανάγκη για μονωτές και την πρόκληση βίαιης θερμικής απαγωγής* (thermal runaway).

ΜΟΝΩΤΕΣ

Οι μονωτές ή διαχωριστές (seperators), όπως αναφέρονται στην αγγλική βιβλιογραφία, διαχωρίζουν τα ηλεκτρόδια με φυσικό τρόπο το ένα από το άλλο με σκοπό την αποφυγή βραχυκυκλωμάτων. Στην περίπτωση υγρών ηλεκτρολυτών, οι μονωτές αντικαθίστανται με αφρώδεις εκδόσεις αυτών, αφού έχουν εμποτιστεί με ηλεκτρολυτικό υγρό. Το υλικό, εκτός από *μονωτικές ιδιότητες*, πρέπει να παρουσιάζει ελάχιστη *ηλεκτρολυτική αντίσταση*, μέγιστη *μηχανική σταθερότητα* και *χημική αντίσταση στην αποδόμηση* (degradation) στο εξαιρετικά ηλεκτροχημικό (διαβρωτικό) περιβάλλον μιας μπαταρίας. Συνήθως οι μονωτές παρέχουν παθητική ασφάλεια μέσω της «*θερμικής διακοπής*» (thermal shutdown). Σε αυξημένες θερμοκρασίες λιώνει ή κλείνει τους πόρους του για να

αποκλείσει την διέλευση των ιόντων λιθίου, χωρίς να θυσιάζεται η μηχανική του σταθερότητα. Οι μονωτές κατασκευάζονται είτε σε λεπτά φύλλα και συναρμολογούνται τα ηλεκτρόδια ή εναποτίθενται σε ένα ηλεκτρόδιο το οποίο βρίσκεται ήδη στη θέση που πρέπει να βρίσκεται. Από κοστολογικής άποψης, η δεύτερη διαδικασία προτιμάται, αλλά θέτει άλλα μηχανικά, διαχειριστικά και προβλήματα στην σύνθεση. Οι στερεάς μορφής ηλεκτρολύτες και κάποιοι πολυμερείς δεν χρειάζονται μόνωση/διαχωρισμό ηλεκτροδίων.

2.2.3.1.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Η αποφόρτιση μιας μπαταρίας βασίζεται στην διάσπαση του λιθίου (lithium diffusion) από την άνοδο στην κάθοδο μέσω του συλλέκτη ρεύματος, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2. Αυτός ο μηχανισμός μετακίνησης βασίζεται κυρίως διαδικασίες που συμβαίνουν κατά την διάσπαση: παράδοση ιόντων λιθίου στην επιφάνεια της ανόδου, μετάβαση σε και διάσπαση μέσω του ηλεκτρολύτη και μετάβαση σε και διάσπαση εντός της καθόδου.

Η διάσπαση είναι ο πιο περιοριστικός παράγοντας σε αποφορτίσεις και φορτίσεις υψηλών τιμών ρεύματος όπως και σε περίπτωση χαμηλών θερμοκρασιών. Επίσης, οι διαδικασίες της παρεμβολής (intercalation) και αντίστροφής της, δημιουργούν αλλαγές στην τάση στα ενεργά υλικά των ηλεκτροδίων. Η περιοδικότητα της διαδικασίας αυτής μπορεί να προκαλέσει ρωγμές που με τη σειρά τους μπορούν να καταλήξουν σε διάσπαση με αποτέλεσμα το ηλεκτρόδιο να αδυνατεί να λειτουργήσει ορθά λόγω αποκοπής από τον συλλέκτη ρεύματος ή λόγω βραχυκυκλώματος. Στην περίπτωση μπαταριών Λιθίου-Μετάλλου τίθεται θέμα ασφάλειας λόγω της σκλήρυνσης της ανόδου και της δημιουργίας δενδρυλλίων.

Οι προσπάθειες επεξεργασίας και παραγωγής υλικών με σκοπό την αύξηση της απόδοσης και διαχείρισης αναπόφευκτων διακυμάνσεων του ρεύματος, οδηγούν σε συνθετικά υλικά αποτελούμενα από μικρό/νανοσωματίδια. Συγκεκριμένα, τα νανοσωματίδια μπορούν να καταστήσουν τις διακυμάνσεις του ρεύματος δυνατές, χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος των ρωγμών και τα συσσωματώματα και συνθετικά υλικά με προσμίξεις μικροσωματιδίων έχουν ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση του μήκους των μονοπατιών διάχυσης μέσω των αργών φάσεων όπου αυτή συμβαίνει.

Η κατασκευή κελιών σε κυλινδρική μορφή πραγματοποιείται ακολούθως. Οι ηλεκτρολύτες σχηματίζονται από πάστες σκόνης ενεργών υλικών, κολλώδη υλικά, διαλύτες, διάφορα άλλα προσθετικά και μέσω ειδικών μηχανών επενδύονται ελάσματα συλλεκτών ρεύματος, όπως αλουμίνιο για την κάθοδο και χαλκό για την άνοδο. Επακολουθεί η διαδικασία έλασης (calendering rolling process) για την ομογενοποίηση του πάχους και των σωματιδίων των ελασμάτων και τέλος η διαδικασία του σχισίματος για την διαμόρφωση του επιθυμητού πλάτους. Έπειτα τα εξαρτήματα στοιβάζονται σε διάταξη μονωτή-ανόδου-μονωτή με την τύλιξη να είναι η τελευταία διαδικασία για την μορφοποίηση ενός κυλινδρικού κελιού. Τέλος το κάθε κελί εισέρχεται σε μια κυλινδρική θήκη, όπου η δεύτερη συγκολλάται με ένα αγωγίμο καπάκι. Ακολουθεί η εμφύσηση των κελιών με ηλεκτρολύτη ο οποίος πρέπει να εμποτίσει τον διαχωριστή (seperators) και με τη σειρά του να εμποτιστεί και τα ηλεκτρόδια. Η τελευταία διαδικασία είναι και η πιο χρονοβόρα και αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα στην ταχύτητα της παραγωγής. Όλοι οι υπόλοιποι απαραίτητοι μονωτές (insulators), προστατευτικά και συσκευές ασφαλείας προσαρμόζονται και συνδέονται στο κελί τελευταίοι. Τέλος η πρώτη φόρτιση και δοκιμή του κελιού πραγματοποιείται.

Οι πρώτοι κύκλοι φόρτισης ακολουθούν πολύπλοκα πρωτόκολλα για να ενισχύσουν την απόδοση, την κυκλική συμπεριφορά και την διάρκεια ζωής των κελιών. Πρόσφατα, έγιναν προσπάθειες για τον συνδυασμό διαδικασιών, όπως η απευθείας εναπόθεση μονωτών σε ηλεκτρόδια και ραγδαία θερμική επεξεργασία.

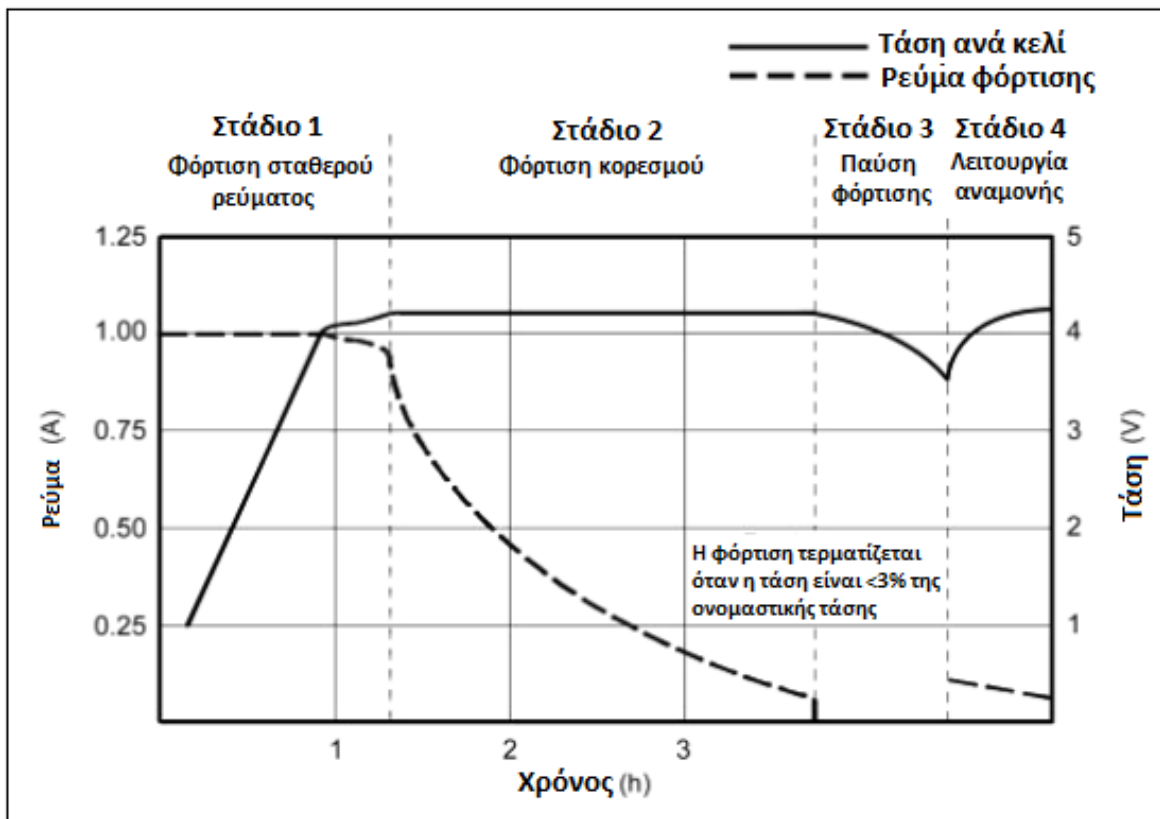
2.2.3.1.4 ΦΟΡΤΙΣΗ - ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ

Οι συστήματα Ιόντων-Λιθίου με τα “παραδοσιακή” κάθοδο από κοβάλτιο, νικέλιο, μαγγάνιο και αλουμίνιο, φορτίζουν τυπικά με 4,2V ανά κελί, με την ανοχή διακύμανσης να είναι +/- 50mV. Μερικές Li-ion υψηλής χωρητικότητας φορτίζονται τουλάχιστον με 4,3V/κελί. Αυξάνοντας την τάση φόρτισης μπορεί αν αυξάνει την χωρητικότητα, αλλά ξεπερνώντας κάποια όρια εκφυλίζουν τη μπαταρία και διακυβεύεται η ασφάλεια (ύπαρξη κυκλωμάτων προστασίας).

Στην *εικόνα 29* φαίνεται το σήμα της τάσης και του ρεύματος καθώς ιόντα λιθίου περνούν τα στάδια παροχής συνεχούς ρεύματος και στενού φόρτισης (trickle charging). Πλήρες φορτίο επιτυγχάνεται μόλις το ρεύμα μειωθεί μεταξύ 3 και 5% της ονομαστικής χωρητικότητας C (Ah) της μπαταρίας. Αύξηση στο ρεύμα φόρτισης δεν επισπεύδει σημαντικά την πλήρη φόρτιση. Αν και επιτυγχάνεται γρηγορότερη μέγιστη τιμή τάσης, το στάδιο φόρτισης κορεσμού (Στάδιο 2) θα διαρκέσει περισσότερο. Ωστόσο, υψηλότερη τιμή ρεύματος θα φορτίσει πολύ γρήγορα περίπου το 70% της μπαταρίας.

Οι μπαταρίες Li-ion δεν είναι χρειάζονται πλήρη φόρτιση όπως οι Lead-Acid, ούτε είναι επιθυμητό. Αντιθέτως, όταν η παράταση του κύκλου ζωής της μπαταρίας είναι ο απώτερος σκοπός και όχι συνεχής πλήρη φόρτιση, όπως σε ένα ηλεκτροκίνητο όχημα. Επειδή η υψηλή τάση μπορεί να καταπονήσει τη μπαταρία προτιμάται ένα χαμηλότερο κατώφλι για την μέγιστη τάση και αποφεύγεται η φόρτιση πλήρωσης σε μέγιστες τιμές τάσης. Σε αντίθεση με την αυτοκίνηση, οι φορτιστές μπαταριών ηλεκτρονικών συσκευών, αλλά και τα κυκλώματα προστασίας των περισσότερων συσκευών επιτρέπουν τη γρηγορότερη και πιο πλήρη φόρτιση των μπαταριών (κινητά, τάμπλετ).

Ο συνιστώμενος ρυθμός φόρτισης για ένα κελί είναι μεταξύ 0,5 και 1C εντός χρονικού περιθωρίου 2-3h. Συνήθως το 0,8C θεωρείται από τους ιδανικότερους ρυθμούς ώστε να συνδυαστεί και η εύρυθμη λειτουργία και να παραταθεί η ζωή της μπαταρίας. Η απόδοση φόρτισης αγγίζει το 99% χωρίς να αναπτύσσεται θερμοκρασία εντός της μπαταρίας. Μερικές μπαταρίες μπορεί να θερμαίνονται έως 5°C περισσότερο από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, όταν φορτιστούν πλήρως και αυτό λόγω του κυκλώματος προστασίας ή την εσωτερική αντίσταση (αναλόγως τη χημεία της μπαταρίας).



Εικόνα 29 – Στάδια φόρτισης συστήματος Li-ion: Στάδιο 1: Η τάση ανέρχεται σε σταθερό ρεύμα, Στάδιο 2: Η τάση κορυφώνεται και το ρεύμα φθίνει, Στάδιο 3: Τερματισμός φόρτισης, Στάδιο 4: Περιστασιακή φόρτιση για διατήρηση πλήρους φορτίου (λειτουργία αναμονής). Η περιστασιακή φόρτιση πραγματοποιείται όταν η τάση φθάσει ένα κατώτατο όριο που έχει τεθεί από τους κατασκευαστές.

2.2.3.1.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΓΙΑ ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΣΗΣ

Οι απαιτήσεις των πακέτων μπαταριών για υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα διαφέρουν αυτές των ενσύρματων και καθαρά ηλεκτρικών. Ο στόχος για τις τιμές που έχει θέσει το Τμήμα Ενέργειας των ΗΠΑ ανέρχεται στα 500\$ με 800\$ για τα υβριδικά και 1.700\$ έως 3.400\$ για ενσύρματα υβριδικά ηλεκτροκίνητα οχήματα.

ΥΛΙΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΣ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Οι ανάγκες σε πρώτες ύλες και το κόστος αυτών βασίζονται σε μελέτη των L.Gaines και R. Cuenza. Ένα τυπικό κυλινδρικό κελί, γνωστό και ως «κελί 18650» (18mm διάμετρο και 65mm μήκος), έχει συνολικής μάζας 40g (συμπεριλαμβανομένων και των ανενεργών υλικών και του κελύφους) και χωρητικότητας 1.35 Ah. Οι μάζες των υλικών που χρησιμοποιούνται για μπαταρίες υβριδικών και ηλεκτροκίνητων οχημάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Για παράδειγμα, το κόστος των υλικών και της επεξεργασίας τους, για ένα κελί 18650 βασισμένο σε LiCoO₂ (λιθικό διοξείδιο του κοβαλτίου), εκτιμάται στα \$1.28.

Ο διαχωρισμός των εξόδων της επεξεργασίας των υλικών από τα ίδια τα υλικά είναι αρκετά δύσκολος και για αυτό συμπεριλαμβάνονται στον ίδιο τομέα. Επίσης λαμβάνονται υπόψιν και οι διακυμάνσεις

του συνολικού κόστους, ανάλογα το είδος επεξεργασίας αλλά και το ίδιο το υλικό. Ωστόσο, η εύρεση νέων τεχνικών επεξεργασίας μπορεί να μειώσει το κόστος των ακατέργαστων υλικών.

ΚΟΣΤΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η τελευταία λέξη της τεχνολογίας για την παρασκευή ενός κυλινδρικού κελιού σε γραμμή παραγωγής συμπεριλαμβάνει:

- Μείξη και επένδυση (Mixing and coating)
- Λέπτυνση, σχίσμο και γενικότερο φινίρισμα (slitting and calendaring)
- Κόψιμο (cutting)
- Συγκόλληση (Welding)
- Αυτοματοποιημένη συναρμολόγηση (automated assembly)
- Επιθεώρηση, Έλεγχος, Δοκιμή και Συσκευασία (inspection, testing, cycling, packaging)

Για την παραγωγή 100.000 μονάδων ανά χρόνο, το εργατικό δυναμικό ανέρχεται στους 76 με 100 ανθρώπους που θα εργάζονται στην γραμμή παραγωγής, σε δύο βάρδιες. Το εκτιμώμενο εργατικό κόστος ανά κελί 18650 είναι μόλις \$0,42.

ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ

Το συνολικό κόστος ενός κελιού 18560 ανέρχεται τελικά στα \$1,70. Σε κλίμακα μπαταρίας υβριδικής ηλεκτροκίνησης, το κόστος φτάνει τα \$1.700 (διπλάσιο του απώτερου στόχου). Για την εξ ολοκλήρου ηλεκτροκίνηση δεν έχει τεθεί ακόμα στόχος. Ωστόσο, βάσει του πρόχειρου παραπάνω υπολογισμού, κάποιος θα μπορούσε να υποπτευθεί ένα ποσό των \$17.000 ανά μπαταρία.

Πίνακας 10 - Εκτιμώμενα Υλικά Κατασκευής Τυπικής Μπαταρίας Ιόντων-Λιθίου

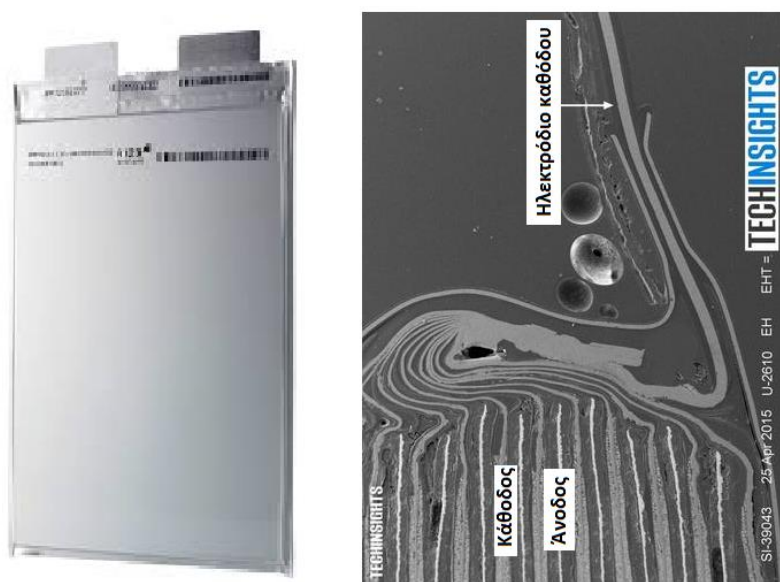
		Υψηλής Ενέργειας (100Ah) κελί για EVs		Υψηλής Ισχύς (10Ah) κελί για HEVs	
Εξάρτημα	Υλικό	Ποσότητα(g)	Μέρος (%)	Ποσότητα(g)	Μέρος (%)
Άνοδος					
	Ενεργό υλικό (γραφίτης, C)	563,6	16,4	14,1	4,3
	Συνδετικό Υλικό	67,7	2,0	3,1	1,0
	Συλλέκτης Ρεύματος (Χαλκός, Cu)	151,9	4,4	41,6	12,8
Κάθοδος					
	Ενεργό Υλικό	1.408,6	41,0	74,4	22,9
	Άνθρακας (C)	46,6	1,4	3,2	1,0
	Συνδετικό Υλικό	92,9	2,7	6,3	1,9

	Συλλέκτης Ρεύματος (Αλουμίνιο, Al)	63,0	1,8	19,4	6,0
Ηλεκτρολύτης		618,0	18,0	44,0	13,5
	Διαχωριστής	60,5	1,8	16,4	5,0
Υπόλοιπο κελί					
	Πώματα, Πλάκες, συναρμογές ακροδεκτών	66,2	1,9	32,2	9,9
	Πυρήνας	0,9	0,0		
	Περίβλημα	291,0	8,5	70,1	21,6
Σύνολο		3.432,7		324,8	

Οι παραπάνω τιμές, έστω και σε προσεγγιστικό επίπεδο, δηλώνουν ότι η ανάγκη για μείωση του κόστους είναι επιτακτική. Η μείωση μπορεί να επιτευχθεί μέσω μείωσης κόστους πρώτων υλών, μείωση κόστους επεξεργασίας αυτώ και τέλος γενικότερη μείωση απαιτούμενων υλικών.

2.2.3.2 ΜΠΑΤΑΡΙΑ ΙΟΝΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ (Li-Po)

Τα κελιά LiPo έπονται ιστορικά των Ιόντων-Λιθίου και των Μετάλλου-Λιθίου, τα οποία μελετήθηκαν εκτενώς κατά τη δεκαετία του 80', με αποκορύφωμα το πρώτο εμπορικά επιτυχημένο κελί Li-ion της Sony, το 1991. Ακολούθησαν εξελίξεις στον τομέα τον υλικών και της εργονομίας, όπως η διάταξη "σακούλα" (pouch format battery), μορφή της οποίας η έννοια έχει γίνει συνυφασμένη με μπαταρίες Li-Po (όπως και η πρισματική κατασκευή).



Εικόνα 30 – Μπαταρία Li-Po σε διάταξη "σακούλα".

Η εν λόγω μπαταρία διαφέρει από τα υπόλοιπα συστήματα ως προς τον ηλεκτρολύτη της. Στα μάτια όμως του καταναλωτή, οι υπόλοιποι τύποι μπαταριών λιθίου σε σύγκριση με την λιθίου-πολυμερούς είναι πανομοιότυπες. Χρησιμοποιούνται παρόμοια υλικά για τα ηλεκτρόδιά τους και περιέχουν ανάλογη ποσότητα ηλεκτρολύτη.

2.2.3.2.1 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Όπως και οι προκάτοχοι του συστήματος Li-Po, έτσι κι αυτό βασίζεται στην αντιστρέψιμη παρεμβολή μορίων (ή ιόντων) εντός υλικών με πολυεπίπεδη μοριακή δομή. Τέτοιου είδους μπαταρίες χρησιμοποιούν λίθιο και παρένθετο οξείδιο μεταβατικού μετάλλου* ($M_y O_z$) ως αρνητικό και θετικό ηλεκτρόδιο αντίστοιχα. Αυτού του είδους το μέταλλο κατέχει μια πολυεπίπεδη δομή που την καθιστά ιδανική για αποθήκευση ιόντων, ή από την οποία μπορούν να αφαιρεθούν, κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης και φόρτισης αντίστοιχα. Η γενική χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα σε ένα κελί Li-Po είναι



Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, ιόντα λιθίου ήδη σχηματισμένα στο αρνητικό ηλεκτρόδιο μεταφέρονται μέσω του στερεού ηλεκτρολύτη (SPE) και εισέρχονται στην κρυσταλλική δομή του θετικού ηλεκτροδίου. Κατά την φόρτιση η διαδικασία αντιστρέφεται.

Η πιο εμπορική τεχνολογία της οικογενείας των Li-Po, χρησιμοποιεί φύλλα λιθίου ως αρνητικό ηλεκτρόδιο και οξείδιο βαναδίου (V_6O_{13}) ως θετικό. Ένα κελί Li/SPE/ V_6O_{13} παρουσιάζει ονομαστική τάση 3V, ειδική ενέργεια 155 Wh/kg και ειδική ισχύ 315 W/kg.

Η ευελιξία που μπορούν να έχουν τα κελιά Li-Po λόγω της φυλλώδους κατασκευής τους δίνει μεγάλο πλεονέκτημα έναντι συμβατικών κελιών Li-ion, τα οποία απαιτούν στιβαρή θήκη ώστε τα ηλεκτρόδια να συμπιέζονται μεταξύ τους. Τέτοιου είδους περιέλιξη μειώνει το βάρος μιας μπαταρίας περισσότερο από 20% υπέρ του κλασσικού κυλινδρικού σχεδιασμού σκληρής μεταλλικής θήκης. Επίσης, αυτή η τεχνολογία απελευθερώνει το σχεδιαστικό κομμάτι και επιτρέπει την δημιουργία οποιουδήποτε σχήματος και πάχους (έως και πάχος μιας πιστωτικής κάρτας) παρέχοντας εργονομία.

Πίνακας 11

Τεχνικά Χαρακτηριστικά		Επίδραση στην επίδοση του οχήματος
Χωρητικότητα (mAh)	60-4100	Αύξηση Εμβέλειας
Ονομαστική Τάση Κελιού(V)	2,7-4,2	
Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	100-265	Αυτονομία και Βάρος
Ενεργειακή Πυκνότητα(Wh/L)	250-730	Αυτονομία και Μέγεθος
Ειδική Ισχύς Εκφόρτισης (W/kg)	315	Επιτάχυνση και Βάρος
Πυκνότητα ισχύος εκφόρτισης(W/L)	600	Επιτάχυνση και Μέγεθος
Απόδοση Φόρτισης-Εκφόρτισης	90-80	Κόστος Ενέργειας Φόρτισης, Ταχύτητα Εκ/Φόρτισης

Ποσοστό Ιδιοεκφόρτισης (%/μήνα)	~0,1 (+3% λόγω κυκλώματος προστασίας)	Διάρκεια Διατήρησης Φορτίου
Εσωτερική Αντίσταση (mΩ)	~320	Ποσοστό Ιδιοεκφόρτιση
Ειδική Αναγεννητική Ισχύς (W/kg)	-	Εξοικονόμηση Ενέργειας και Βάρος
Αναγεννητική Ισχύς (W/L)	-	Εξοικονόμηση Ενέργειας και Μέγεθος
Διάρκεια Ζωής (χρόνια)	5-6	Κόστος Κύκλου ζωής
Κύκλοι Ζωής (80% DoD)	500-2000	Κόστος Κύκλου ζωής
Εσωτερική Αντίσταση(mΩ)	~320	Ρυθμός Ιδιοεκφόρτισης Αποθήκευσης
Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)	Ανάλογα τη χημεία	Ζωή της Μπαταρίας
Θερμοκρασία Φόρτισης (°C)	0-60	Ζωή της Μπαταρίας
Θερμοκρασία Αποθήκευσης (°C)	-20-60	Ζωή της Μπαταρίας
Τιμή Πώλησης (\$/kWh)	-	Κόστος Απόκτησης και Αντικατάστασης

Η ελαφριά κατασκευή όμως είναι πλεονέκτημα μόνο όταν και η εφαρμογή απαιτεί το ελάχιστο δυνατό βάρος, όπως μοντέλα ελεγχόμενα με ραδιοκύματα. Ωστόσο έχει εξακριβωθεί ότι έστω και η μέτρια εφαρμογή πίεσης επί των επιπέδων της μπαταρίας έχει ως αποτέλεσμα την *αύξηση* της χωρητικότητας. Καθώς η επαφή μεταξύ των εξαρτημάτων μεγιστοποιείται, αποτρέπεται η αποφύλλωση (delamination)* και η παραμόρφωση, φαινόμενα που σχετίζονται με την αύξηση της εσωτερικής αντίστασης (impedance / internal resistance) και την φυσική εκφύλιση των υλικών.

2.2.3.2.2 ΥΛΙΚΑ

Ως παραλλαγή άλλων μοντέλων μπαταριών Li-ion, έτσι και τα υλικά της ανόδου και της καθόδου καθορίζονται από την αντίστοιχη τεχνολογία (Li-Manganese Oxide, Li-Iron Phosphate, Li-Nickel Manganese Cobalt Oxide, Li-Nickel Cobalt Aluminum Oxide, Li-Titanate κ.α.).

ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΗΣ

Όπως προαναφέρθηκε, η ουσιαστική διαφορά λοιπόν του εν λόγω συστήματος με τους προκατόχους του, εντοπίζεται στον ηλεκτρολύτη, ο οποίος κατασκευάζεται σε μορφή υπέρλεπτου φιλμ από πολυμερή στερεάς κατάστασης, όπως PEO, PAN, PMMA ή PVdF και τυπικά κατηγοριοποιείται σε τρεις κλάσεις. Αυτές είναι η *στεγνή*, η *τζελ* και η *πορώδης* μορφή (dry/gelled/porous SPE), όπου και οι τρεις μορφές διαχωριστών εφευρέθηκαν με παρόμοια σειρά το διάστημα μεταξύ του 1965 και 1996.

Το πρωτότυπο σχέδιο χρησιμοποιούσε στεγνό στερεό ηλεκτρολύτη σε μορφή υπέρλεπτης μεμβράνης που έμοιαζε με πλαστικό. Όμως, λόγω της φτωχής αγωγιμότητας του σε θερμοκρασία δωματίου, η μπαταρία έπρεπε να ανέλθει στους 60°C για να πραγματοποιηθεί ομαλά η ροή των ηλεκτρονίων. Αυτό το χαρακτηριστικό εξαλείφθηκε με την προσθήκη ηλεκτρολύτη ημιστερεάς μορφής (gel) και την χρήση μονωτών μικροπορώδους δομής. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλά άλλα συστήματα όπως Li-cobalt, Li-phosphate και Li-manganese. Επομένως η ειδοποιός διαφορά μιας των μπαταριών Li-ion και Li-Po έγκειται στην πορώδη νανοδιάταξη του διαχωριστή.

ΜΟΝΩΤΗΣ

Ο όρος «πολυμερές» χρησιμοποιείται ουσιαστικά για να περιγράψει συγκεκριμένα είδη μπαταριών Ιόντων-Λιθίου των οποίων οι μονωτές βασίζονται σε πολυμερή υλικά. Η ανάπτυξη στον τομέα της νανοτεχνολογίας έχει επιτρέψει στην χρήση διαχωριστών πορώδους μικροδομής, προσφέροντας αυξημένη ειδική ενέργεια λόγω των ηλεκτροχημικών χαρακτηριστικών τους και λόγω μικρότερου όγκου και μάζας. Τέτοια πολυμερή μπορεί να είναι μικροπορώδες πολυαιθυλένιο (PE) υπέρλεπτης κατασκευής (φιλμ) ή πολυπροπυλένιο (PP). Με αυτόν τον τρόπο, ακόμη και αν ο ηλεκτρολύτης είναι υγρής μορφής, το πολυμερές μπορεί να περιέχεται εντός μιας μπαταρίας.

2.2.3.2.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Η παραγωγή ενός κελιού Li-Po ξεκινάει από την προετοιμασία των υλικών για τα ηλεκτρόδια. Τα υλικά που πρόκειται να επενδυθούν επί της ανόδου και της καθόδου αναμειγνύονται και φορτώνονται στην μηχανή επένδυσης, όπου και εφαρμόζονται στους μεταλλικούς ακροδέκτες, περνώντας από μια σειρά κυλινδρικών διατάξεων. Μέσω παρόμοιων μηχανημάτων τα υλικά τροφοδοτούνται σε φούρνους όπου και ομογενοποιείται η επένδυση επί του μεταλλικού ακροδέκτη σε διαδρομή περίπου 20m. Υπάρχουν δύο διαφορετικές, παράλληλες διαδρομές, μια για την άνοδο (χρήση αλουμινίου) και μια για την κάθοδο (χρήση χαλκού). Στο τέλος αυτής της διαδικασίας τα υλικά έχουν περιτυλιχθεί και σχηματίζει μεγάλους κυλίνδρους όπου στη συνέχεια τροφοδοτούνται σε μηχανήματα που κόβουν τη μονοκόμματη κορδέλα σε συγκεκριμένες διαστάσεις. Όταν συγκεντρωθεί συγκεκριμένη ποσότητα ελασμάτων ανόδου και καθόδου ίδιας διάστασης, η ελατή μεμβράνη που διαδραματίζει το ρόλο του μονωτή-διαχωριστή, εισέρχεται ενδιάμεσως των ηλεκτροδίων και τοποθετούνται σε μηχανήμα όπου αναδιπλώνονται για να σχηματίσουν κελιά.

Σε διαφορετικό δωμάτιο και γραμμή παραγωγής πραγματοποιείται η παρασκευή και ο σχηματισμός του ηλεκτρολύτη και της εύκαμπτης θήκης. Αφού μηχανές έχουν κόψει την θήκη στις κατάλληλες κάθε φορά διαστάσεις, τα ηλεκτρόδια εισέρχονται εντός της θήκης και γίνεται συγκόλληση του πακέτου σε τρία μέρη για να χορηγηθεί τελικά ο ηλεκτρολύτης ημιστερεάς μορφής και στη συνέχεια να σφραγιστεί. Οι παραπάνω διαδικασίες πραγματοποιούνται χειρωνακτικά σε πλήρως ελεγχόμενο χώρο, με βασικούς παράγοντες την θερμοκρασία και την υγρασία.

Ακολουθεί η πρώτη φόρτιση και για λόγους απρόσμενης δημιουργίας αερίων ή διαρροής ηλεκτρολύτη κατά τη διαδικασία, η εύκαμπτη θήκη σχηματίζει έναν δεύτερο θάλαμο, ο οποίος επικοινωνεί με το κυρίως μέρος της μπαταρίας, στον οποίο μπορούν να διαφύγουν τα πιθανά ανεπιθύμητα προϊόντα. Μόλις οι μπαταρίες φορτιστούν, συμπιέζονται (~27N) για δύο βασικούς λόγους: την αποβολή του αέρα εντός της μπαταρίας και για την δημιουργία καλύτερης επαφής μεταξύ των στοιχείων της. Τελευταίο βήμα είναι η αφαίρεση του δεύτερου θαλάμου και του πλεονάζοντος ηλεκτρολύτη, ώστε το κελί να σφραγιστεί τελειωτικά και να του προστεθεί το προστατευτικό κύκλωμα.

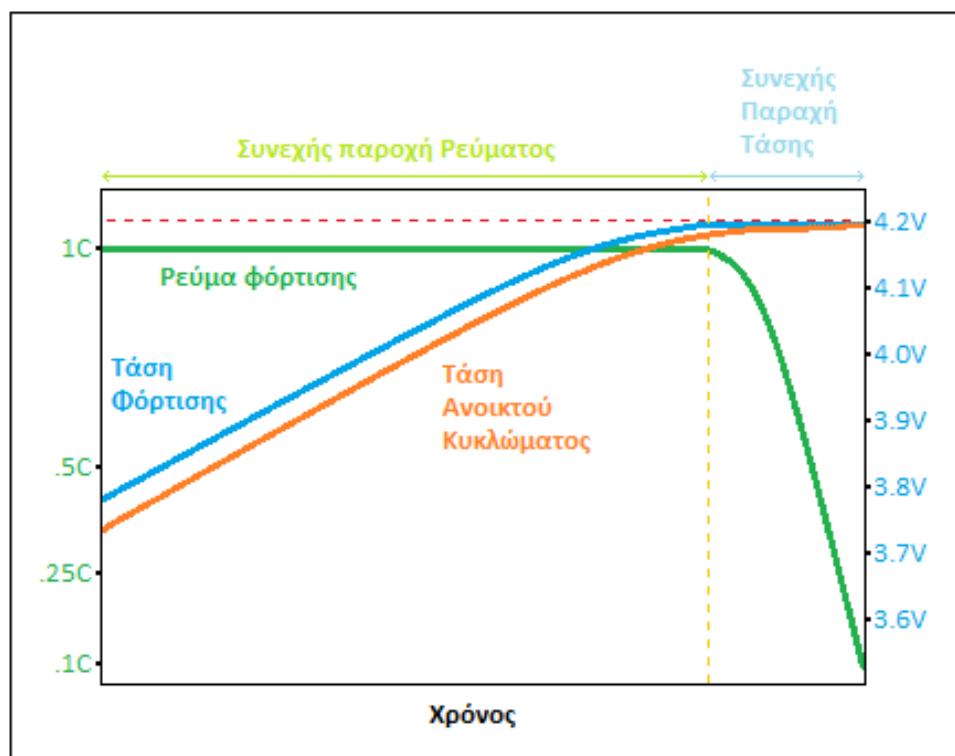
Κάπως έτσι ολοκληρώνεται η διαδικασία παρασκευής ενός «κελιού σακούλα» και μετά από μηχανικά και ηλεκτροχημικά τεστ κοπώσεως, εκτιμάται ο δείκτης αποτυχίας και τα κελιά προετοιμάζονται σε στοίβες για διανομή.

2.2.3.2.4 ΦΟΡΤΙΣΗ- ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ

Όπως και τα υλικά των ηλεκτροδίων, έτσι και τα χαρακτηριστικά της εκ/φόρτισης καθορίζονται από την χημεία της κάθε μπαταρίας. Η τάση εκφόρτισης σε παραλλαγές της χημείας Li-ion κυμαίνεται από 2,7-3,0V έως 4,2V σε πλήρες φορτίο για κελιά Li-Metal Oxide και περίπου 1,8-2,0V, 3,6-3,8V κατά την εκφόρτιση και φόρτιση αντίστοιχα, για Li-Phosphate Oxide.

Τα ακριβή στοιχεία για τον ρυθμό εκ/φόρτισης θα πρέπει να αναγράφονται στο εγχειρίδιο της κάθε μπαταρίας, για εγκυκλοπαιδικούς σκοπούς, καθώς τα όρια της εφαρμοζόμενης τάσης πρέπει να τηρούνται μέσω της χρήσης ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Η υπερφόρτιση απαγορεύεται από τους κατασκευαστές καθώς η υπερβολική απομάκρυνση ιόντων από την άνοδο μπορεί να καταστρέψει το ηλεκτροχημικό ζεύγος.



Εικόνα 31 – Ποιοτικό διάγραμμα φόρτισης μπαταρίας Li-Po. Μέχρι η χωρητικότητα να φτάσει περίπου το 80% της συνολικής υποθηκεύσιμης ενέργειας, η τάση παραμένει σταθερή. Όσο η μπαταρία πλησιάζει SoC 100%, το παρεχόμενο ρεύμα πρέπει να μειώνεται καθώς η τάση φτάνει στην ανώτερη τιμή τάσης μια μπαταρίας Li-Po.

Κατά την εκφόρτιση, το προφίλ της τάσης αντιστρέφεται, με την τάση στην αρχή της SoD να παραμένει σταθερή και στη συνέχεια να μειώνεται σχεδόν γραμμικά. Λόγω της φύσης της τεχνολογίας Li-ion, τα ιόντα κατά την εκφόρτιση δεν μπορούν να μεταφερθούν εξολοκλήρου στην άνοδο. Ένα μέρος

τους παραμένει στην κάθοδο ώστε να εξασφαλιστεί η ύπαρξη ιόντων εντός του χημικού περιβάλλοντος των κελιών, αλλιώς το προσδόκιμο ζωής της μπαταρίας θα μειωνόταν αρκετά. Για να εξασφαλιστεί η ύπαρξη ιόντων εντός της πολυεπίπεδης δομής της ανόδου, μια ελάχιστη τιμή τάσης εκφόρτισης θα πρέπει να περιορίζεται ώστε να μην μηδενιστεί ποτέ. Επομένως, το σύστημα Li-Po δεν μπορεί να υπερεκφορτιστεί. Επίσης είναι σημαντικό να σημειωθεί πως εκφόρτιση μεγαλύτερη ρυθμού 3C απαγορεύεται. Και οι δύο παραπάνω λειτουργίες ελέγχονται από ολοκληρωμένο κύκλωμα ασφαλείας.

2.2.3.2.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Υπάρχουν αρκετά στοιχεία που ξεχωρίζουν αυτόν τον τύπο μπαταρίας από τις υπόλοιπες της οικογενείας, ωστόσο το σημαντικότερο όλων είναι το ελάχιστο βάρος και η ανθεκτικότητα της. Ένα τυποποιημένο κελί 3,7V ζυγίζει μόλις 3,2 gr, προσδίδοντας ξεκάθαρο πλεονέκτημα έναντι άλλων μπαταριών, στο θέμα της ειδικής ενέργειας και ειδικής ισχύς. Το παραπάνω στοιχείο σε συνδυασμό με την στιβαρή φύση της κατασκευής, καθιστούν το σύστημα Li-Po ιδανικό για χρήση σε οχήματα που αναμένεται να δοκιμάζουν τις μπαταρίες σε αντίξοες συνθήκες. Η δυνατότητα παροχής μεγάλων ποσών ενέργειας ($\leq 3C$) σε μικρό χρονικό διάστημα, τις καθιστά επίσης ιδανικές για απαιτητικές εφαρμογές, από τηλεκατευθυνόμενα οχήματα μοντελισμού, έως και τους ηλεκτροκίνητα οχήματα ιδιωτικής, εμπορικής και αγωνιστικής χρήσης. Με μεταχείριση που τηρεί τις οδηγίες του κατασκευαστή, μια μπαταρία Li-Po μπορεί να πραγματοποιήσει έως και χιλιάδες κύκλους ζωής και να διατηρηθούν οι πιθανότητες διαρροής ηλεκτρολύτη στο ελάχιστο.

Όπως και οι υπόλοιπες μπαταρίες λιθίου, έτσι και η Li-Po μοιράζεται πολλά χαρακτηριστικά μαζί τους. Ο κίνδυνος της εξώθερμης αντίδρασης που θα οδηγήσει το 90% των περιπτώσεων παραμένει, αν το πρόγραμμα ρύθμισης της τάσης κατά τη φόρτιση δεν είναι προγραμματισμένο ανάλογα, ή αν αποτύχει να λειτουργήσει, ή αν η μπαταρία υπερθερμανθεί ή της προξενηθεί ζημιά από εξωτερικούς παράγοντες. Εκτός της αμέριστης προσοχής που χρειάζονται κατά την φόρτισή τους, οι μπαταρίες Li-Po χρειάζονται και ειδικά σχεδιασμένους φορτιστές με σκοπό τον λεπτομερή έλεγχο της τάσης. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά, που αφορούν στη φόρτιση της μπαταρίας, συνεπάγονται και το ανάλογο αυξημένο κόστος μιας τέτοιας μπαταρίας, το οποίο δεν μπορεί παρά να ανήκει στα αρνητικά στοιχεία μιας Li-Po. Συγκρίνοντας την τελευταία με τις υπόλοιπες της οικογενείας, είναι ξεκάθαρο πως η αποθηκευτική ικανότητα όπως και η διάρκεια ζωής δεν είναι από τα δυνατά σημεία της εν λόγω τεχνολογίας.

3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Προσομοίωση είναι η πράξη της δημιουργίας ενός πρότυπου συστήματος (**μοντελοποίηση**) που “δανείζεται” τα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς ενός φυσικού ή αφηρημένου συστήματος. Μια προσομοίωση μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους, από μια απλοποιημένη φυσική αναπαράσταση του συστήματος έως ένα υπερπολύπλοκο μαθηματικό πρότυπο που συμπεριλαμβάνει υπολογιστικό μοντέλο υψηλών επιδόσεων. Η προσομοίωση καθίσταται ιδανική εναλλακτική λύση όταν ένα πρόβλημα γίνεται ή είναι εξαρχής πολύ δύσκολο για να λυθεί αναλυτικά και όταν το πρόβλημα

αντιμετωπίζεται στην ολότητα του εκάστοτε συστήματος. Αυτό που επιτυγχάνεται με την προσομοίωση, είναι η καλύτερη κατανόηση της αλληλεπίδρασης των σχέσεων που διέπουν τα μεμονωμένα “εξαρτήματα” ενός συστήματος και την γρήγορη εύρεση εναλλακτικών διατάξεων αυτού.

Όσον αφορά στη μοντελοποίηση ηλεκτροχημικών «συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικού φορτίου» από την βιομηχανία, χρησιμοποιείται η μέθοδος της «συνεχούς προσομοίωσης»* μέσω του λογισμικού MATLAB. Σκοπός είναι η δημιουργία αξιόπιστων προτύπων λειτουργίας για την εκάστοτε μπαταρία, όσο το δυνατόν ρεαλιστικά. Κάθε ηλεκτροχημικό σύστημα διαθέτει τη δικιά του “προσωπικότητα”, δηλαδή, τα δικά του μοναδικά χαρακτηριστικά λειτουργίας (τάση κελιού, χρόνος εκ/φόρτισης, χωρητικότητα κ.τλ.) και αντιδρά δυναμικά, αναλόγως τις συνθήκες λειτουργίας, γεγονός που καθιστά το σύστημα/πρόβλημα τόσο πολύπλοκο ώστε να χρίζει προσομοίωσης.

Για λόγους διευκόλυνσης και επιτάχυνσης της διεκπεραίωσής της εργασίας, θα χρησιμοποιηθούν έτοιμα μοντέλα και στοιχεία από μετρήσεις φυσικής μπαταρίας, τα οποία παρέχονται ελεύθερα από την ιστοσελίδα της MathWorks (αναζήτηση: Lithium Battery Model, Simscape Language and Simulink Design Optimization). Αφού πρώτα εξηγηθούν κάποιες βασικές έννοιες της προσομοίωσης και της μοντελοποίησης θα παρουσιαστεί αναλυτικά η διαδικασία της μοντελοποίησης μιας μπαταρίας.

3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

3.2.1 ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Ελέγχοντας εικονικά τη λειτουργία ενός συστήματος, είναι ένας τρόπος εξοικονόμησης πόρων και χρόνου και οδηγεί στην ανάπτυξη ενός προϊόντος πολύ πιο γρήγορα και αποδοτικά. Στην περίπτωση των μπαταριών υπάρχουν ποικίλες ανάγκες μοντελοποίησης.

Η βελτιστοποίηση της **φυσικής δομής** μιας μπαταρίας ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόδοση και επίδοση της είναι το πρώτο μέλημα των μηχανικών της συγκεκριμένης βιομηχανίας.

Όσο πιο πολύπλοκα γίνονται τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα, τόσο αυξάνεται και η ανάγκη για πιο “έξυπνη” διαχείριση της διαθέσιμης ενέργειας. Η προσομοίωση διαφόρων **σεναρίων λειτουργίας** βοηθάει στον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση σύγχρονων και πολύπλοκων συστημάτων ελέγχου μιας μπαταρίας (Battery Management System)

Εκτός της πρόβλεψης σεναρίων λειτουργίας σε καθορισμένες συνθήκες λειτουργίας, οι μηχανικοί που σχεδιάζουν το σύστημα τροφοδοσίας ενός ηλεκτροκίνητου οχήματος, πρέπει και να προβλέψουν την κάθε πιθανή κατανάλωση ενέργειας (παρασιτικής και μη) εκ των προτέρων. Σε αυτό το κομμάτι της προσομοίωσης, η εξοικονόμηση πόρων και χρόνου βρίσκει ίσως και τη μεγαλύτερη ανταπόκριση καθώς τα διάφορα σενάρια οδήγησης και τα πιθανά αποτελέσματα, πραγματοποιούνται και καταγράφονται σε ένα υπολογιστικό σύστημα και όχι ξοδεύοντας ώρες επί της ασφάλτου.

3.2.2 ΤΥΠΟΙ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

Το κομμάτι της μηχανικής που ασχολείται με τον *σχεδιασμό* και την *κατασκευή κελιών* και μπαταριών είναι ο *πρώτος* τύπος μοντελοποίησης. Αυτός ο κλάδος ασχολείται με την ηλεκτροχημική πλευρά της μπαταρίας και ο τρόπος με τον οποίο μεταφέρονται τα ηλεκτρόνια εντός ενός τέτοιου συστήματος. Για την παρακολούθηση και προσομοίωση τέτοιων λειτουργιών χρησιμοποιούνται Τεχνικές Πεπερασμένων Στοιχείων FEA (Finite Element Method) και Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής CFD (Computational Fluid Dynamics). Επίσης γίνεται παραμετροποίηση των μοντέλων χρησιμοποιώντας πειραματικά στοιχεία που προέρχονται από τις ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων κατασκευαστικών υλικών.

Όμως το είδος μοντελοποίησης που *αφορά σε αυτή την περίπτωση* είναι το «**Ισοδύναμο κύκλωμα**», δηλαδή μια ψηφιακή μορφή της μπαταρίας που συμπεριφέρεται ως αληθινή και είναι το επίκεντρο ενασχόλησης των μηχανικών ενσωμάτωσης συστημάτων (system integration engineering). Σε αυτήν την περίπτωση η μοντελοποίηση και μελέτη αφορά στην επίδοση ενός κελιού ή μιας μπαταρίας ως “μαύρο κουτί”, δηλαδή ως μια συσκευή που έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύει και να απελευθερώνει ενέργεια όσο πιο αποδοτικά γίνεται.

3.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Για την προσομοίωση και μελέτη ενός κελιού συγκεκριμένης χημείας ή ομάδας κελιών (μπαταρίας) ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Δημιουργία ενός μοντέλου κελιού ή μπλοκ μπαταρίας με τη χρήση της *αναλογίας του ισοδύναμου κυκλώματος* μέσω της «*πλατφόρμας αναπαράστασης φυσικών διατάξεων*», *simscape (μοντελοποίηση)*
- *Συλλογή πειραματικών δεδομένων* από μία φυσική πηγή ενέργειας ορισμένης ηλεκτροχημείας υπό ποικίλες συνθήκες λειτουργίας.

Ακολουθεί η *εισαγωγή των στοιχείων* στο MATLAB μέσω επεξεργασίας και ανάλυσης.

Συσχετισμός του μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα (*παραμετροποίηση*).

Για εξοικονόμηση χρόνου χρησιμοποιείται πλέον η *τεχνική της κατανομής μαθηματικών υπολογισμών σε πολλαπλούς πυρήνες μέσω των επιλογών παραμετροποίησης (parameterization options)*.

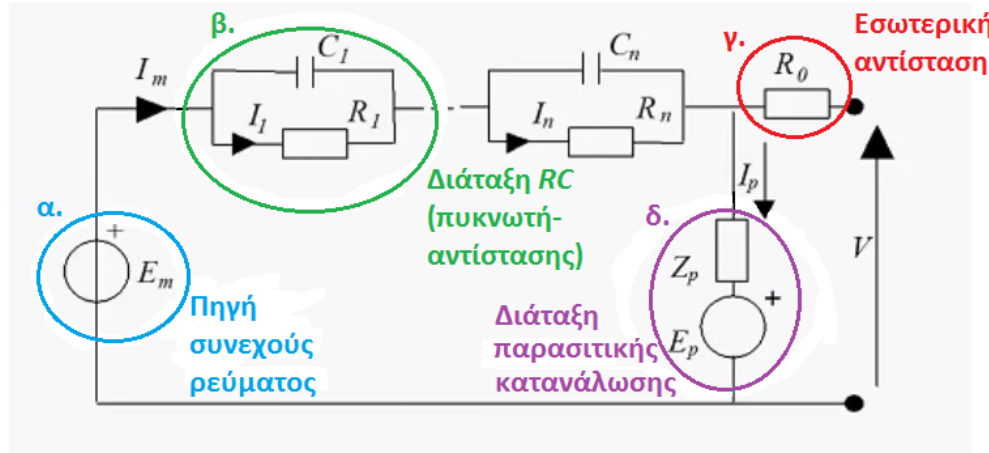
3.3.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Μοντελοποίηση, είναι η διαδικασία δημιουργίας ενός ισοδύναμου κυκλώματος γνωστού και ως «**ηλεκτρική αναλογία**» της μπαταρίας, με τη χρήση της διεπαφής (interface) του MATLAB. Παραμετροποιώντας το ισοδύναμο κύκλωμα αναλόγως, κατά την διέγερση του αντιδρά ως φυσική μπαταρία και παρέχει αριθμητικά αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε μεγέθη που θα καταγράφονταν και από μία φυσική μπαταρία.

Η ηλεκτρική αναλογία είναι ουσιαστικά ένα κύκλωμα ψηφιακών διατάξεων που είναι προγραμματισμένες να μιμούνται από άποψη “συμπεριφοράς” τις ομώνυμες φυσικές διατάξεις και η ομαδοποίηση τους να αποφέρει παρόμοια αποτελέσματα με μια μπαταρία. Βρίσκονται στο Simscape,

την “πλατφόρμα μοντελοποίησης” του MATLAB (ηλεκτρικών διατάξεων στην περίπτωση αυτή) και όταν τοποθετηθούν σε κατάλληλη διάταξη, αναπαριστούν γραφικά και λειτουργικά μια φυσική μπαταρία. Για παράδειγμα μια διάταξη αντίστασης όπως η R_0 της εικόνας 32, είναι ουσιαστικά μια λειτουργία του MATLAB προγραμματισμένη σε γλώσσα του ίδιου του προγράμματος και περιέχει τον Νόμο του Ωμ ($V=R \cdot i$).

Για τη καλύτερη κατανόηση του ισοδύναμου κυκλώματος και των επιμέρους εξαρτημάτων του, ας θεωρήσουμε την ανάγκη της εκφόρτισης της μπαταρίας που αντιπροσωπεύει το παραπάνω μοντέλο μπαταρίας, για συγκεκριμένο χρόνο όπως φαίνεται στο πρώτο διάγραμμα της εικόνας 33.



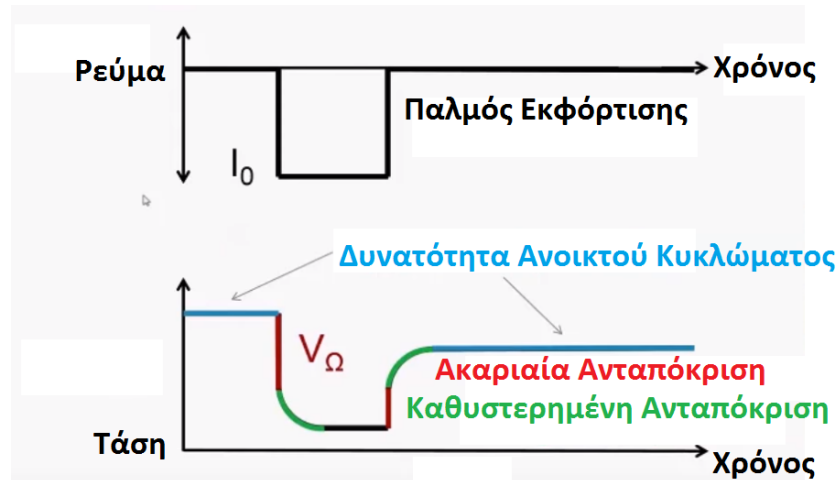
Εικόνα 32 – Ισοδύναμο κύκλωμα μπαταρίας: α. Πηγή ρεύματος DC που αντιστοιχεί στην τάση ανοικτού κυκλώματος, β. Διάταξη RC που αντιστοιχεί στην δυναμική αντίδραση της εκάστοτε μπαταρίας. γ. Εσωτερική αντίσταση που αντιπροσωπεύει την αντίσταση που προβάλλει στην κίνηση των ηλεκτρονίων ο διαχωριστής. Είναι πολύ σημαντικό στοιχείο γιατί η τιμή της αντίστασης επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. δ. Διάταξη παρασιτικής κατανάλωσης που αντιπροσωπεύει την ιδιοεκφόρτιση της μπαταρίας και άλλες μορφές μη επιθυμητής κατανάλωσης. Σε κάποιες ηλεκτροχημείες αποτελεί σημαντική προσθήκη, ενώ σε μπαταρίες Ιόντων-Λιθίου συνήθως παραλείπεται λόγω αμελητέων παρασιτικών καταναλώσεων.

Η εκφόρτιση μπαταριών σε αυτοκινητιστικές εφαρμογές πρέπει συνήθως να πραγματοποιείται με σταθερούς παλμούς εκφόρτισης από μετρήσιμες και σταθερές καταναλώσεις, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο πρώτο διάγραμμα της εικόνας 33 και θεωρούμε ότι αρχικά η μπαταρία βρίσκεται σε κατάσταση πλήρους φόρτισης (SoC=100%).

Η συμπεριφορά της τάσης μεταβάλλεται ακαριαία με το που υπάρξει η ανάγκη για φορτίο και αυτή η συμπεριφορά επηρεάζεται από την εσωτερική αντίσταση R_0 (γ. εικόνα 32). Στη συνέχεια παρατηρείται μια εκθετική μείωση της τάσης μέχρι το σημείο στο οποίο σταθεροποιείται. Όταν η ανάγκη για φορτίο σταματάει, τότε αρχικά η τιμή της τάσης αυξάνεται εν μέρει ακαριαία με μια σταδιακή αύξηση πριν την σταθεροποίηση της τιμής. Η εκθετική προσαρμογή της τιμής της τάσης οφείλεται στην διάταξη RC του ισοδύναμου κυκλώματος (β. εικόνα 32) που προσδίδει τη χαρακτηριστική διαμόρφωση της τιμής της τάσης του μοντέλου μπαταρίας το οποίο προσομοιώνει. Για πολύπλοκα ηλεκτροχημικά συστήματα χρησιμοποιούνται από ένα έως “n” αριθμοί παρόμοιων διατάξεων για να αποτυπωθεί ακριβέστερα η ιδιαιτερότητα της εκάστοτε ηλεκτροχημείας. Όσο για τα κυανά κομμάτια του δεύτερου διαγράμματος της εικόνας 33 που αντιπροσωπεύουν τη τιμή τάσης ανοικτού κυκλώματος, είναι φανερό πως μετά την

άντληση ενέργειας για κάποιο χρονικό διάστημα η τιμή της τάσης θα ναι χαμηλότερη σε σύγκριση με πριν την εκφόρτιση.

Μετρώντας τη διαφορά τάσης μπορεί να **εκτιμηθεί η κατάσταση φόρτισης** της μπαταρίας (SoC), διαδικασία η οποία είναι ένας από τους βασικούς στόχους της προσομοίωσης λειτουργίας μιας μπαταρίας.



Εικόνα 33 - Εκφόρτιση μπαταρίας για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, η επίδραση στην τιμή της τάσης και ο συσχετισμός των διατάξεων ισοδύναμου κυκλώματος με την συμπεριφορά της γραφικής παράστασης (Ποιοτικές γραφικές παραστάσεις).

3.3.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ

Η παραμετροποίηση είναι μια χρονοβόρα διαδικασία κατά την οποία στοιχεία συλλέγονται από πραγματικά πειράματα υπό διάφορες συνθήκες και στη συνέχεια τροφοδοτούνται στο σύστημα προσομοίωσης ώστε να τροποποιηθούν οι διαδικασίες που πραγματοποιούνται και τα αποτελέσματα του προγράμματος να βασίζονται και να προσεγγίζουν το πραγματικό σύστημα.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των μπαταριών, όταν μία καινούρια ηλεκτροχημεία πρόκειται να προσομοιωθεί, η μπαταρία υποβάλλεται σε κύκλους φορτίσεων-εκφορτίσεων διαφόρων ρυθμών, εντάσεων και θερμοκρασιών και καταγράφεται η κατάσταση φόρτισης και εκφόρτισης.

Συσχετίζοντας τις παραμέτρους των δύο συστημάτων (φυσικό και ψηφιακό) τίθεται ως σκοπός το ψηφιακό μοντέλο να αποκτήσει την "ταυτότητα" της φυσικής μπαταρίας. Αυτό σημαίνει πως υποβάλλοντας την ψηφιακή μπαταρία σε διάφορα σενάρια λειτουργίας θα μπορεί να εκτιμηθεί το είδος της μπαταρίας που χρειάζεται η κάθε εφαρμογή ή η τροποποιήσεις που χρειάζεται μια τεχνολογία ώστε να γίνει κατάλληλη για μια εφαρμογή. Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά μια μπαταρίας ανά πάσα στιγμή σε πολύ λιγότερο χρόνο, από ότι θα χρειαζόταν η πραγματοποίηση μετρήσεων σε φυσική μπαταρία.

Με τη χρήση της μεθόδου «**εκτίμησης παραμέτρων**» (parameter estimation technique) και την χρήση των εργαλείων παραμετροποίησης του Simulink και του Simscape, προγραμματίζεται το ψηφιακό μοντέλο με κάποιες υποθετικές τιμές (παραμέτρους).


Όταν όλα τα στοιχεία συγκεντρωθούν, εισάγονται στο πρόγραμμα και μέσω της μεθόδου «βελτιστοποίησης παραμέτρων» (parameter optimization technique) τα μοντέλα συσχετίζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα του πειράματος με τα αλγοριθμικά αποτελέσματα. Το MATLAB προσαρμόζει τις αρχικά δοθείσες εκτιμώμενες τιμές, μέχρι τα αποτελέσματα του πειραματικού μοντέλου να προσεγγίζουν στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό τα πειραματικά αποτελέσματα. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα πρότυπο μοντέλο λειτουργίας ενός κελιού/μονάδες/πακέτου μπαταρίας της εκάστοτε ηλεκτροχημείας.

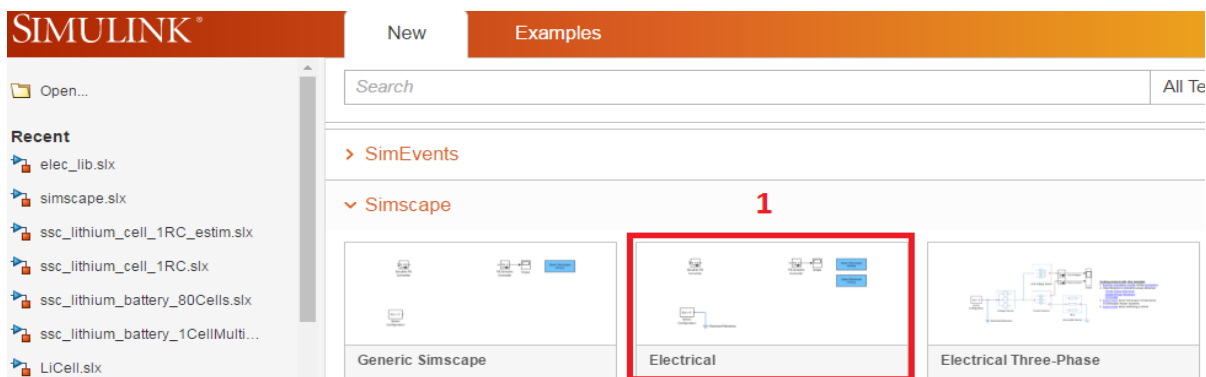
Μεγίστης σημασίας είναι το γεγονός ότι η παραμετροποίηση μιας μπαταρίας είναι μια πολύπλοκη διαδικασία όχι μόνο από εκτελεστικής άποψης, αλλά και λόγω της ποικιλίας των παραμέτρων που απαιτούν οι διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας των οχημάτων και οι διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες λειτουργούν τα οχήματα. Επομένως, πριν από τη παραμετροποίηση κάποιας μπαταρίας, εξετάζονται παράγοντες όπως συνθήκες εργασίας (τύπος οχήματος, περιβαλλοντικές συνθήκες κ.α.) και πιθανά σενάρια οδήγησης (π.χ. κίνηση σε πόλη, διάνυση μεγάλων αποστάσεων σε υψηλή ταχύτητα).

3.4 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

3.4.1 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

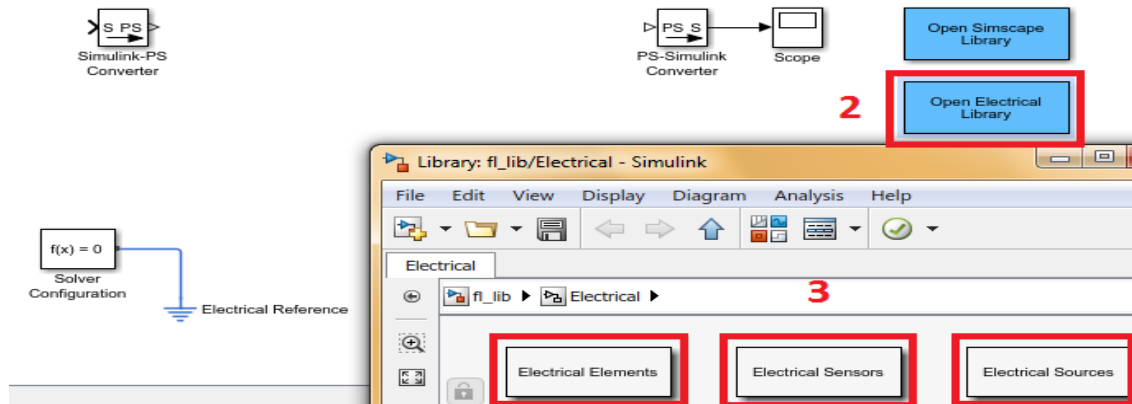
3.4.1.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ

Ανοίγοντας το γραφικό περιβάλλον του Simulink, επιλέγοντας την εικόνα  στο επάνω μέρος του χώρου εργασίας του Matlab, αποκτάμε πρόσβαση στην πλατφόρμα φυσικής σχεδίασης δυναμικών συστημάτων. Για να αποκτήσουμε περαιτέρω πρόσβαση σε ηλεκτρικές διατάξεις, ακολουθούμε το παρακάτω μονοπάτι: Simscape/Electrical/Open Electric Library/Electrical Elements-Sensors-Sources, όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 34 – Περιβάλλον περιήγησης του λογισμικού MATLAB

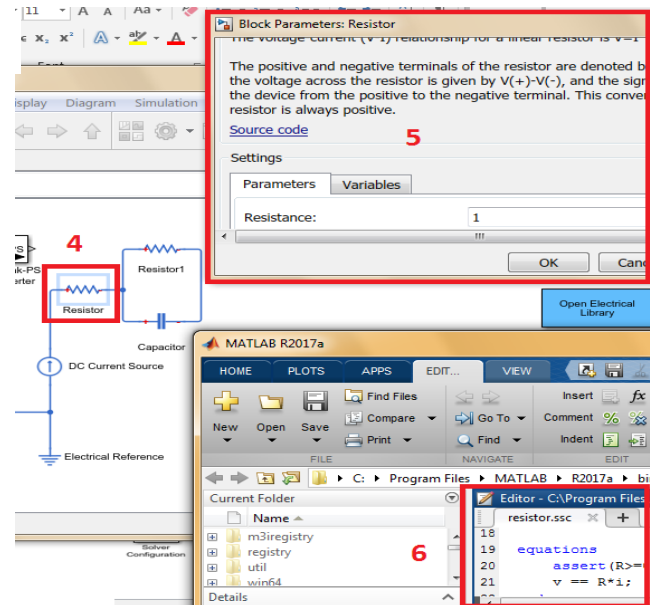
Στην κάτω δεξιά εικόνα, φαίνεται η βασική τοπολογία μιας ηλεκτρικής αναλογίας για ένα κελί, η οποία δημιουργήθηκε από διατάξεις από τις “βιβλιοθήκες” (3) της εικόνας 35. Με διπλό κλικ σε οποιοδήποτε στοιχείο (4) της εικόνας 36, οδηγούμαστε σε παράθυρο με την επεξήγηση του εκάστοτε στοιχείου (5) της εικόνας 36. Με την επιλογή “Source code” που βρίσκεται στο παράθυρο επεξήγησης (5), αποκτάμε πρόσβαση στον κώδικα λειτουργίας του στοιχείου. Ο κώδικας αποκαλείται «γλώσσα Simscare» και είναι πλήρως τροποποιήσιμος. Στην συγκεκριμένη περίπτωση βλέπουμε τον Νόμο του Ohm (6), που διέπει τη λειτουργία της αντίστασης (4).



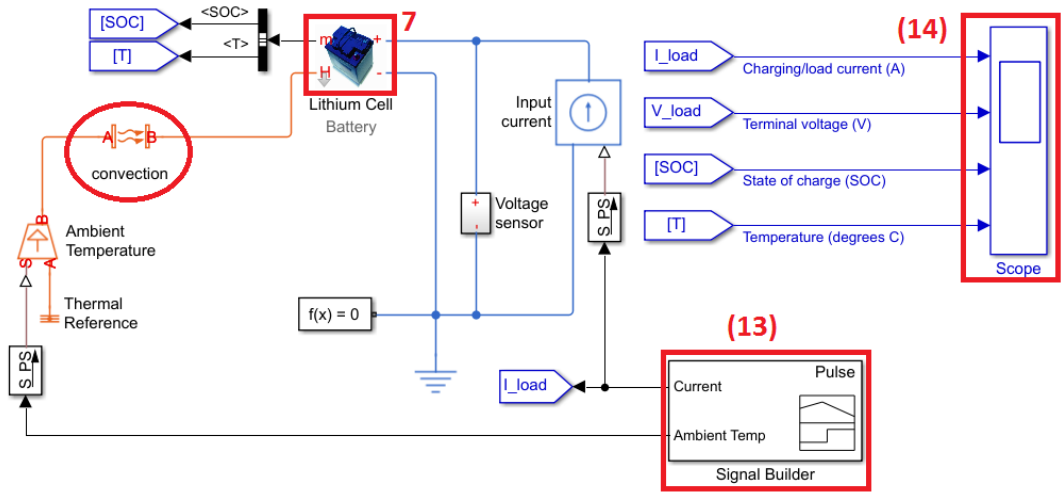
Εικόνα 35- Περιβάλλον περιήγησης του λογισμικού MATLAB

Τροποποιώντας τις τιμές της αντίστασης “R” εντός του κώδικα, προσομοιώνονται οι διαφορετικές θερμοκρασίες υπό τις οποίες θα λειτουργεί το μοντέλο, οι οποίες όπως έχει προαναφερθεί, επηρεάζουν κατά πολύ την εσωτερική αντίσταση ενός ηλεκτροχημικού συστήματος.

Χαρακτηριστικό στοιχείο του Simscare είναι ο εύκολος τρόπος διαχείρισης και τροποποίησης της τοπολογίας του κυκλώματος που θέλουμε να δημιουργήσουμε. Η φιλοσοφία δημιουργίας αυτού είναι ίδια με αυτή του σχηματισμού ενός κυκλώματος επί μιας πειραματικής πλακέτας (breadboard).



Εικόνα 36 - Περιβάλλον περιήγησης του λογισμικού MATLAB

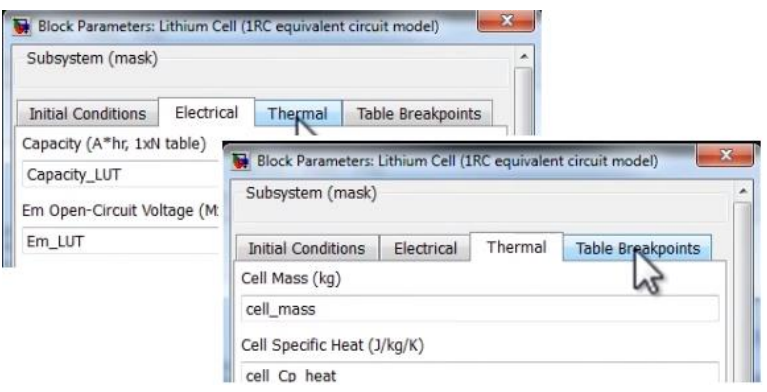


Εικόνα 37 – Ισοδύναμο κύκλωμα μπαταρία Ιόντων-Λιθίου ενός κελιού - μονής διακλάδωσης RC. Αυτό το παράδειγμα προσομοιώνει έναν κύκλο παλμικής λειτουργίας (εκ/φόρτιση) ενός κελιού Ιόντων-Λιθίου. Μία συμπαγής θερμική μάζα προσομοιώνει την εξέλιξη της θερμοκρασίας κατά την κυκλική λειτουργία της μπαταρίας. Θεωρείται ότι η ψύξη πραγματοποιείται κυρίως μέσω συναγωγής (convection cooling) και η θέρμανση κυρίως λόγω εσωτερικών αντιστάσεων. Μία μπαταρία μπορεί να μοντελοποιηθεί συνδέοντας πολλαπλά κελιά σε σειρά.

Χρησιμοποιώντας τα αρχεία που βρίσκονται στην ιστοσελίδα της Mathworks, έχουμε ένα πλήρες μοντέλο μιας μπαταρίας Ιόντων-Λιθίου ενός κελιού (7), το οποίο έχει δημιουργηθεί όπως και η απλοποιημένη μορφή του (4).

3.4.1.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ

Κάθε στοιχείο του προσομοιωτικού μοντέλου έχει μια χαρακτηριστική εικόνα ή οποία μπορεί και να τροποποιηθεί, όπως αυτή του κελιού Ιόντων-Λιθίου (7). Η απεικόνιση κάθε στοιχείου αποκαλείται «μάσκα» και με δεξί κλικ σε κάθε μάσκα, είναι δυνατή η προβολή και τροποποίηση των παραμέτρων που διέπουν τη λειτουργία του εκάστοτε στοιχείου. Το μοναδιαίο κελί Ιόντων-Λιθίου χαρακτηρίζεται από παραμέτρους ηλεκτρικής, θερμικής φύσεως (εικόνα 38).



Εικόνα 38 – Παράθυρο παραμέτρων υπό τη μάσκα του κελιού Ιόντων-Λιθίου.

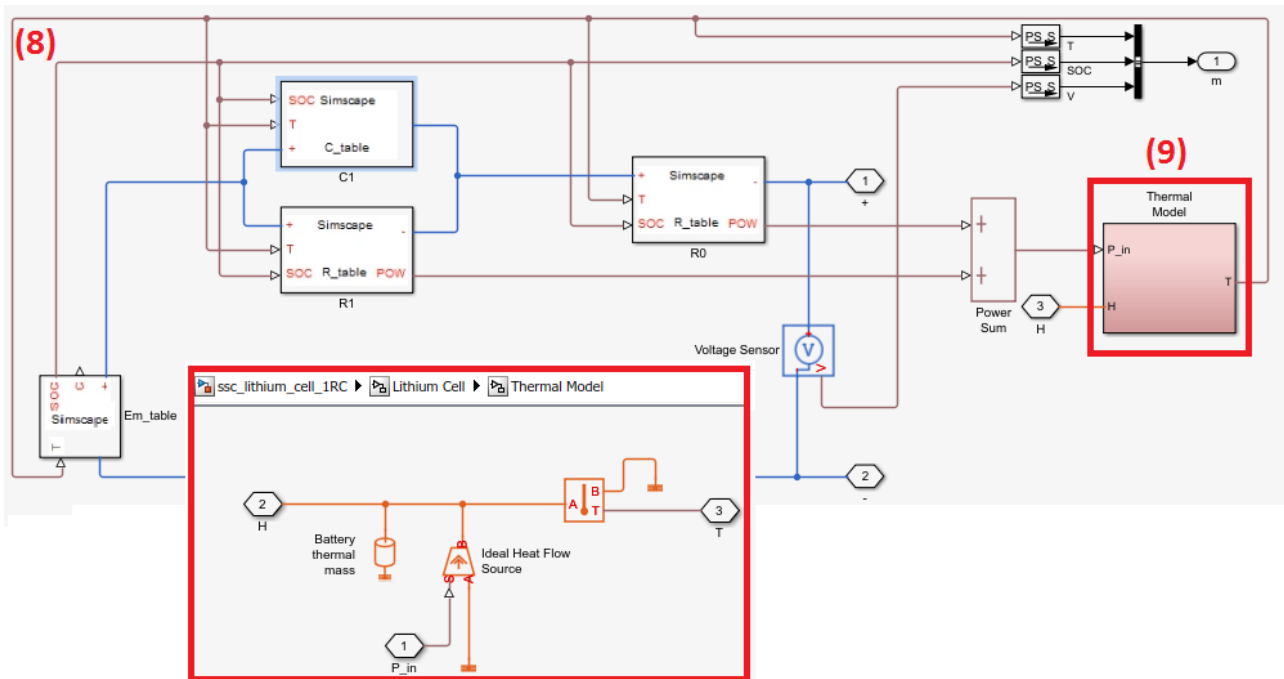
Με δεξί κλικ στη μάσκα του κελιού και επιλέγοντας “look under mask”, εμφανίζεται η ηλεκτρική αναλογία που προσομοιώνει μόνο τη λειτουργία του κελιού (8). Πρόκειται για μία απλή διάταξη πηγής συνεχούς ρεύματος E_m , ενός κλάδου RC και μιας εσωτερικής αντίστασης R_o , όπως φαίνεται και στο

παραπάνω παράδειγμα (4) της σελίδας 65. Κάθε στοιχείο έχει εισόδους κατάστασης φόρτισης (SOC) και θερμοκρασίας (T).

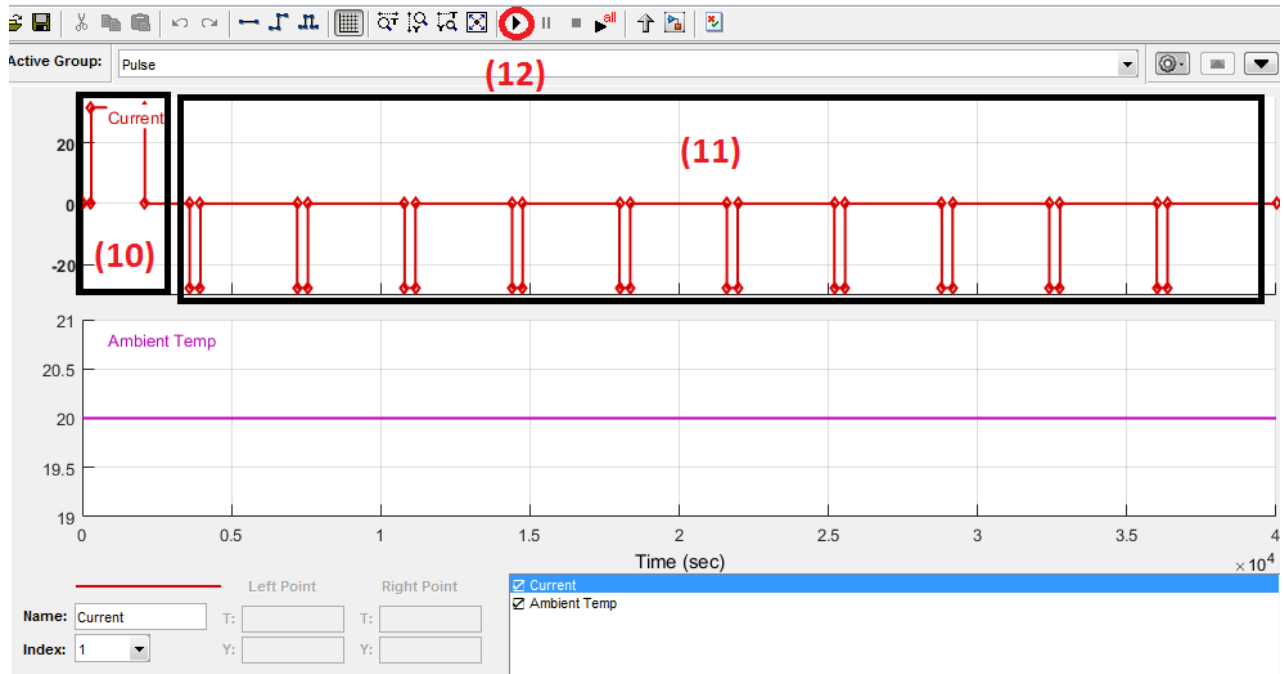
Επίσης ευδιάκριτο είναι και το θερμικό μοντέλο (9) στην εικόνα 39 που προσομοιώνει την αυξομείωση της θερμοκρασίας εντός του κελιού, λόγω εσωτερικής αντίστασης. Εισάγοντας το άθροισμα των απωλειών αντίστασης ως ροή θερμότητας στη θερμική μάζα της μπαταρίας, παρατηρείται ότι η μετρούμενη θερμοκρασία τροφοδοτείται στα στοιχεία της ηλεκτρικής αναλογίας (7). Με διπλό κλικ στη μάσκα του θερμικού μοντέλου (9), εμφανίζεται το ισοδύναμο θερμικό μοντέλο.

Στο κάτω δεξιά μέρος της εικόνας 37 βρίσκεται ο «δημιουργός σήματος» (13) όπου και δημιουργείται το προφίλ του ρεύματος και της θερμοκρασίας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η περιβαλλοντική θερμοκρασία διατηρείται σταθερή (κάτω σκέλος εικόνας 6) και η εκφόρτιση της μπαταρίας γίνεται με σταθερούς παλμούς (11) αφού πρώτα φορτιστεί η μπαταρίας (10).

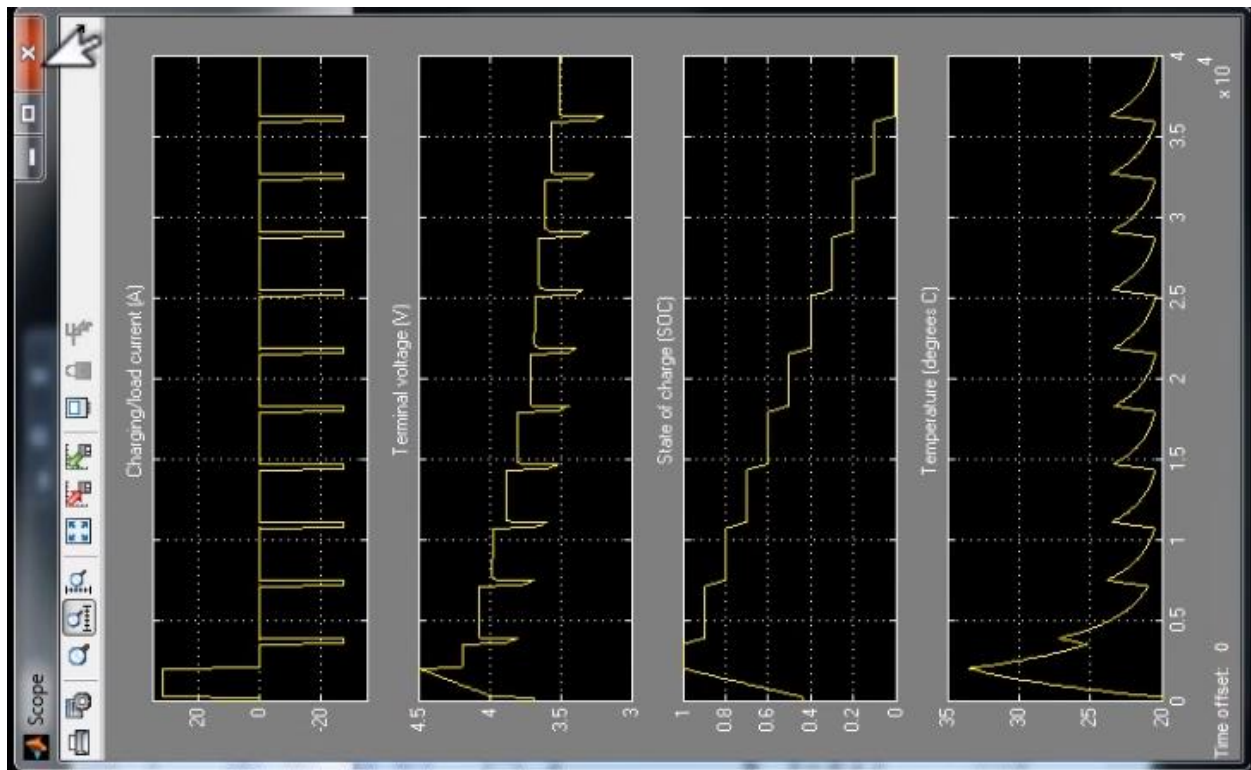
Προσομοιώνοντας τη λειτουργία της μπαταρίας επιλέγοντας την αναπαραγωγή (12), μπορούμε να επιστρέψουμε στο στοιχείο παρακολούθησης «Score» (14) της ηλεκτρικής αναλογίας της μπαταρίας και να παρακολουθήσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, μέσω των μεταβολών στα μεγέθη της έντασης ρεύματος (A), τάσης (V), θερμοκρασίας (T) και κατάστασης φόρτισης (SOC %) με την πάροδο του χρόνου.



Εικόνα 39 - Ηλεκτρική αναλογία (8) ενός κελιού Ιόντων-Λιθίου και του θερμικού μοντέλου (9) που προσομοιώνει την έκλυση θερμότητας λόγω εσωτερικής αντίστασης του ηλεκτροχημικού συστήματος στην διέλευση ηλεκτρονίων.



Εικόνα 40 -Διαχείριση εισαγόμενων σημάτων μέσω Signal Builder.



Εικόνα 41 - Παράθυρο παρακολούθησης παρατήρησης μεταβολής παραμέτρων μπαταρίας με την πάροδο του χρόνου.

Η ομοιότητα του πρώτου διαγράμματος της *εικόνας 33* με το αντίστοιχο της *εικόνας 41* είναι φανερή και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το διάγραμμα φόρτισης/ρεύματος φορτίου της *εικόνας 33* λειτουργεί ως επαλήθευση, καθώς λειτουργεί ως “καθρεπτισμός” της εντολής λειτουργίας του μοντέλου, μέσω του Signal Builder (13 *εικόνα 37*). Επίσης η ανάλυση των δύο πρώτων διαγραμμάτων της *εικόνας 41* αντιστοιχεί στην επεξήγηση των ιδανικών διαγραμμάτων της *εικόνας 33*. Όσο για το διάγραμμα της κατάστασης φόρτισης (SOC), είναι φανερό πως το σχέδιο που δημιουργείται υπακούει κάθε φορά στην ανάγκη για ενέργεια από το σύστημα που τροφοδοτεί η μπαταρία. Το διάγραμμα θερμοκρασίας φανερώνει πως η μπαταρία θερμαίνεται εκτενώς κατά τη φόρτιση της, διατηρώντας σχετικά υψηλή θερμοκρασία κατά την πρώτη τροφοδότηση του συστήματος με ενέργεια και ακολουθείται από ένα σχέδιο μιας τοπικής μέγιστης θερμοκρασίας η οποία επιτυγχάνεται κατά την παλμική εκφόρτιση της μπαταρίας.

Η παρακολούθηση των αποτελεσμάτων μέσω Scope δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς την εισαγωγή πειραματικών στοιχείων και την παραμετροποίηση των συναρτήσεων που διέπουν τη λειτουργία του μοντέλου της μπαταρίας. Η διαδικασία της παραμετροποιήσεως θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο.

4 ΣΥΛΛΟΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1.1 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται για την απόκτηση δεδομένων της λειτουργίας μιας μπαταρίας, αποτελεί ουσιαστικά ένα απλοποιημένο σύστημα ηλεκτρικής προώθησης ενός οχήματος, σε μικρογραφία και αποτελείται από εξαρτήματα που συναντιούνται σε ένα όχημα.

Η **μπαταρία** αλλάζει αναλόγως το ηλεκτροχημικό σύστημα που απαιτείται σε κάθε περίπτωση μελέτης και είναι ο λόγος συναρμολόγησης της πειραματικής διάταξης (*Εικόνα 42*).

Ο **ηλεκτροκινητήρας** βρίσκεται σε απευθείας σύζευξη με έναν **ρότορα**. Ο πρώτος εκμεταλλεύεται την ενέργεια της μπαταρίας ώστε να παραγάγει περιστροφική κίνηση, στην οποία αντιτίθεται ο ρότορας, σκοπός του οποίου είναι να προσομοιώνει την αντίσταση κύλισης που προβάλλει ο δρόμος στον τροχό ενός οχήματος.

Η οποιαδήποτε μεταβολή σε κάθε μετρήσιμο μέγεθος της μπαταρίας καταγράφεται από **κάρτες συλλογής δεδομένων** (data acquisition cards), όπως και το σύστημα συλλογής δεδομένων σε ένα ηλεκτροκίνητο όχημα. Οι κάρτες συνδέονται σε υπολογιστή μέσω θύρας USB για άμεση μετάδοση δεδομένων στο λογισμικό MATLAB.

Η χρήση ενός **υπολογιστικού συστήματος πραγματικού χρόνου** (real-time computer), προσαρμόζει την αντίσταση που προβάλλει ο ρότορας βάσει διαφόρων σεναρίων οδήγησης που έχουν σχεδιαστεί ώστε να εξεταστεί η απόδοση της μπαταρίας σε δυναμικές συνθήκες λειτουργίας.

Η επικοινωνία μεταξύ των υπολογιστών γίνεται μέσω διαύλου **CAN**, σύστημα μετάδοσης πληροφοριών που επίσης χρησιμοποιείται από ηλεκτροκίνητα και όχι μόνο οχήματα.

Το τελευταίο και αναπόσπαστο εργαλείο από κάθε πείραμα είναι ένας **ηλεκτρονικό υπολογιστής** με ικανότητα επεξεργασίας υπερμέγεθες όγκου δεδομένων σε κλάσματα δευτερολέπτου και φυσικά να φέρει το λογισμικό MATLAB.

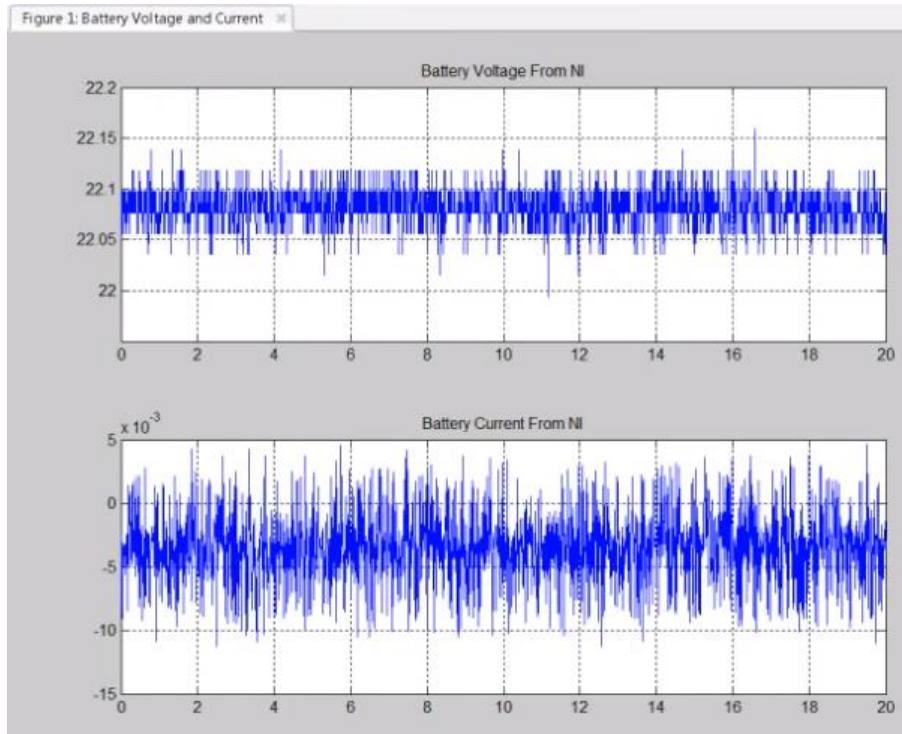
4.1.2 ΧΡΗΣΗ MATLAB

Για την εκκίνηση της λειτουργίας της παραπάνω πειραματικής διάταξης θα χρειαστεί η σύνταξη κώδικα σε γλώσσα MATLAB (script) που να το υποδεικνύει και να καταγράφει τις τιμές τάσης και έντασης, συναρτήσει του χρόνου, της μπαταρίας. Εκτελώντας σωστά τα παραπάνω, θα λάβουμε τα παρακάτω γραφήματα που υποδεικνύουν την τάση ανοικτού κυκλώματος και ρεύμα σχεδόν μηδενικό, καθώς δεν έχει τεθεί σε λειτουργία ο ηλεκτροκινητήρας.

Σταματώντας τη διαδικασία καταγραφής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, οι πληροφορίες αποθηκεύονται σε πίνακες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξομάλυνση, ανάλυση και “καθαρισμό” των δεδομένων (εικόνα 43).



Εικόνα 42 – Συνοπτική απεικόνιση πειραματικού εξοπλισμού συλλογής λειτουργικών δεδομένων μπαταρίας, για οχηματικούς σκοπούς.



Εικόνα 43 - Παρακολούθηση της τάσης & έντασης της μπαταρίας σε πραγματικό χρόνο



Εικόνα 44– Εντολή τερματισμού καταγραφής δεδομένων και αποθήκευση δεδομένων σε πίνακες (κάτω αριστερά).

4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ & ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.2.1 ΣΚΟΠΟΣ, ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ & ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

Ο στόχος της ανάλυσης των συλλεχθέντων στοιχείων είναι ο “καθαρισμός” των σημάτων από “θόρυβο” και αστοχίες στην καταγραφή τους ώστε να πραγματοποιηθεί όσο το δυνατόν πιο ακριβή παραμετροποίηση και μοντελοποίηση.

Τα βασικά βήματα για να γίνει εφικτή η ανάλυση είναι, η **απεικόνιση** των δεδομένων και η εφαρμογή μιας **αυτοματοποιημένης διαδικασίας επεξεργασίας**.

Προκλήσεις που μπορεί να συναντηθούν κατά τη διαδικασία επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων: πρόσβαση, διαχείριση, επινόνηση μοναδικών τρόπων οπτικοποίησης, αμφίβολη ποιότητα δεδομένων (συνδυασμός δειγμάτων με διαφορετική συχνότητα δειγματοληψίας, λήψη δεδομένων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, απώλεια, αδυναμία αναγνώρισης και ανάγνωσης).

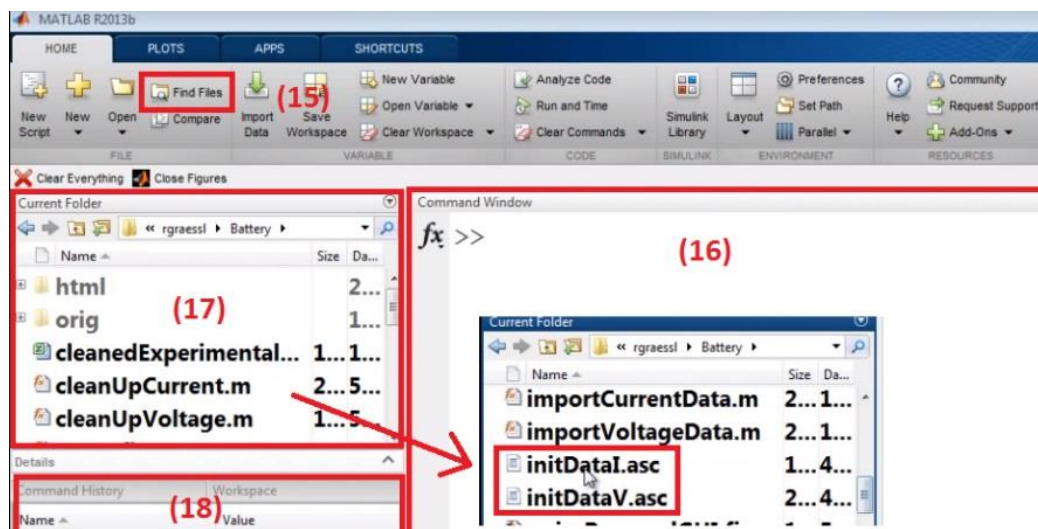
Τα παραπάνω προβλήματα πρέπει να αντιμετωπιστούν πριν από οποιαδήποτε μοντελοποίηση κάποιου συστήματος, διότι το «*κάθε μοντέλο είναι τόσο καλό όσο τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την παραμετροποίησή του*», όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται από το προσωπικό της MathWorks.

Εντοπίζοντας τα αρχεία που περιέχουν τα στοιχεία τάσης και έντασης της μπαταρίας (initDataI/V.asc) με “δεξί κλικ/import data...” χρησιμοποιούμε το εργαλείο εισαγωγής στοιχείων του MATLAB, με το οποίο θα **απεικονίζουμε** τις πληροφορίες. Μετά την χρήση του εργαλείου εισαγωγής (εικόνα 45) τα στοιχεία πρέπει να βρίσκονται στον χώρο εργασίας (18)(22) του MATLAB.

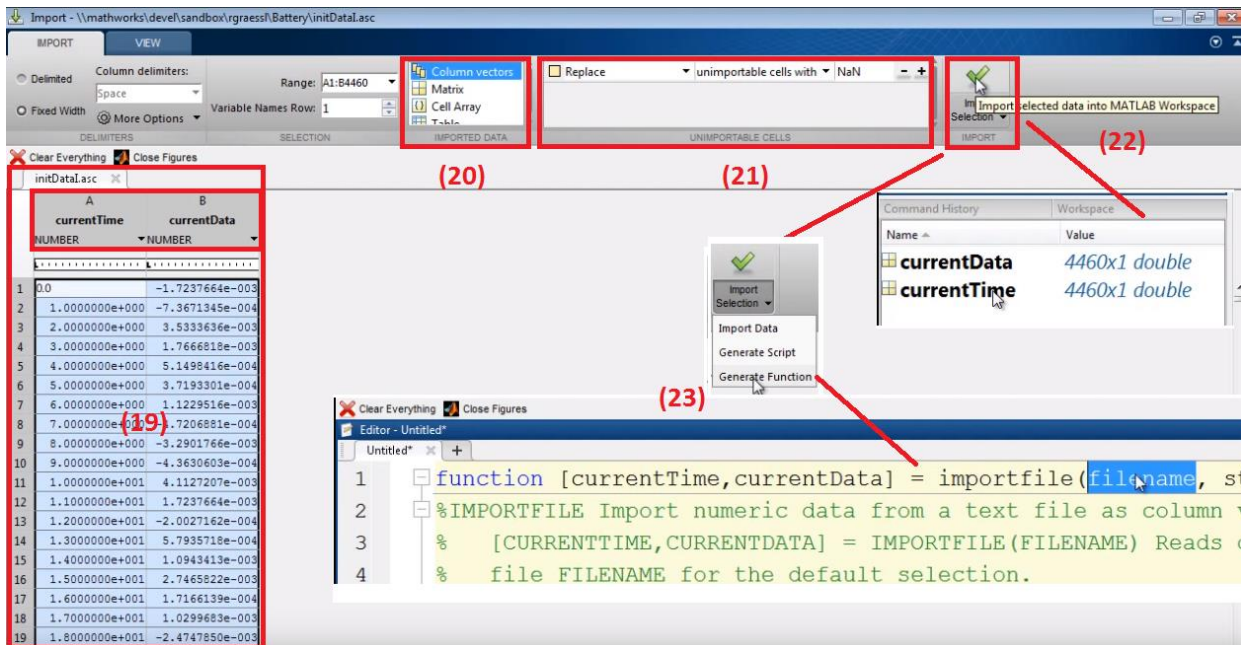
Αυτό το εργαλείο δίνει τη δυνατότητα να εισάγουμε στο MATLAB κομμάτια ή ολόκληρα τα αρχεία (το οποίο εξυπηρετεί διαφορετικούς σκοπούς), το πως να μεταφέρουμε τα αρχεία εντός του προγράμματος (20) και πως να διαχειριστούμε τα αγνοούμενα στοιχεία (παρουσιάζονται ως κενά κελιά) (21).

Επιλέγοντας να εισάγουμε τα στοιχεία στο χώρο εργασίας (18)(22) του MATLAB, δίνεται η επιλογή της δημιουργίας ή μιας συνάρτησης ή ενός script (23) ώστε να αναπαραχθεί η διαδικασία της επιλογής την πρώτη φορά που θα χρειαστεί να εισάγουμε στοιχεία ενός συγκεκριμένου τύπου. Με την επιλογή «Function» (συνάρτηση) το MATLAB αναπαράγει ένα κομμάτι κώδικα (23) το οποίο χρησιμοποιείται για την εισαγωγή νέων τύπων αρχείων, με τη προϋπόθεση να τροποποιηθεί κατάλληλα το όνομα το αρχείου στον κώδικα, ώστε να μπορέσει να κληθεί (23)(“filename”)

4.2.2 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ & ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΜΕΣΩ MATLAB

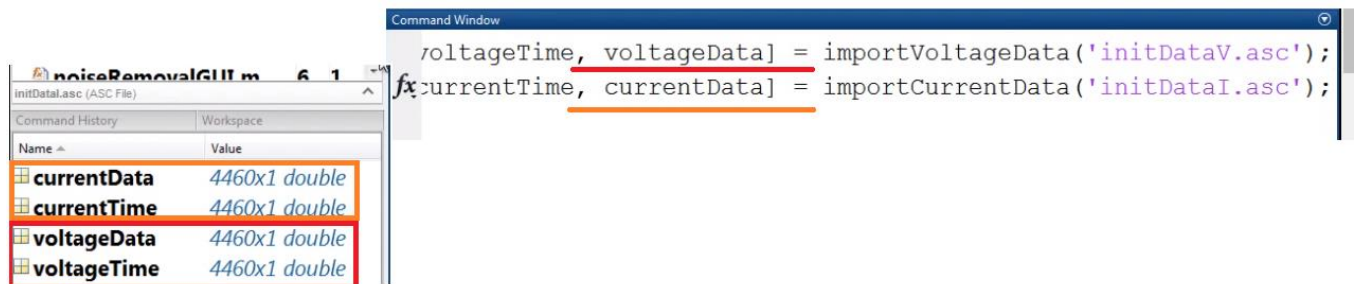


Εικόνα 45 - (15) Αναζήτηση αρχείων με δεδομένα για εισαγωγή, (16) παράθυρο σύνταξης και εκτέλεσης εντολών για διάδραση με το MATLAB, (17) περιηγητής εν χρήση φακέλων, (18) χώρος εργασίας όπου και διατηρούνται όλες οι ενέργειες, όπως εισαχθέντα αρχεία ή συσκευές που συνδέονται με το MATLAB και επιτρέπει την ανάγνωση τους



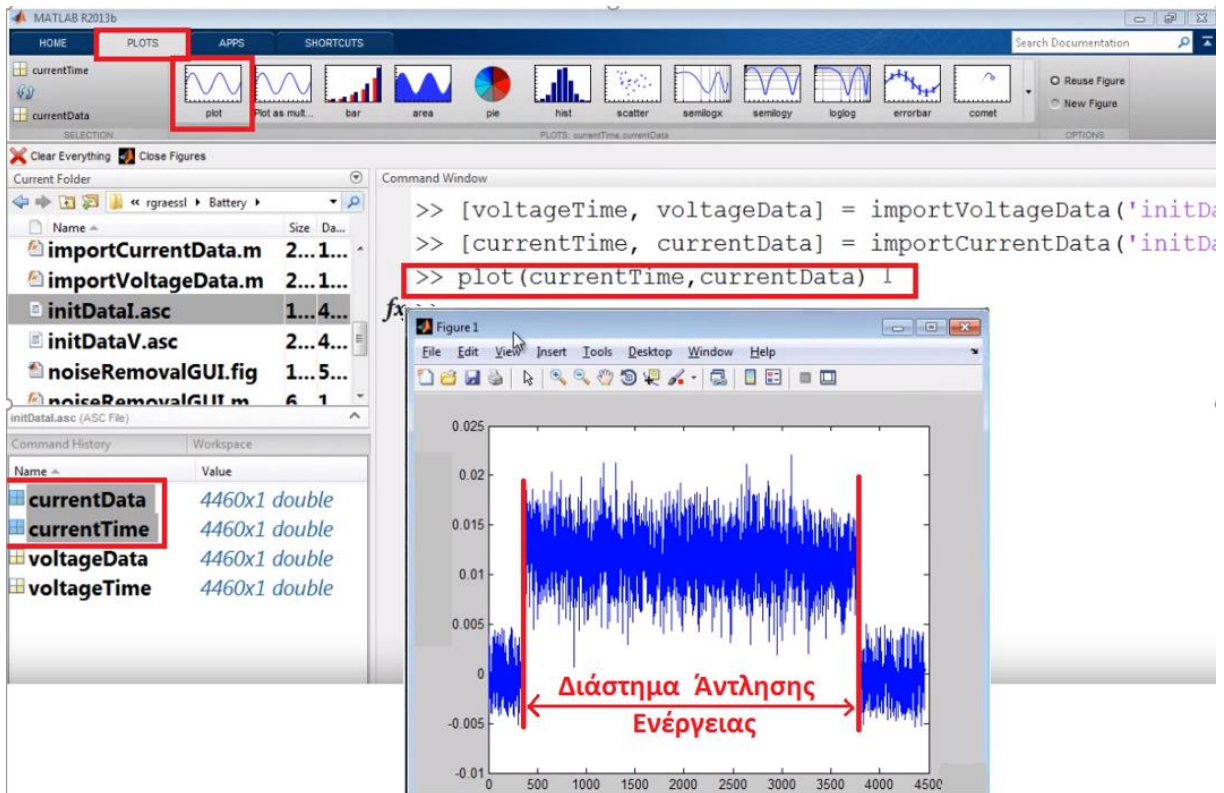
Εικόνα 46 - - Εργαλείο εισαγωγής δεδομένων

Έχει αποδειχθεί πως η μορφή των αρχείων της τάσης, έχουν διαφορά από αυτά της έντασης. Επομένως χρειάζεται η σύνταξη δύο διαφορετικών συναρτήσεων για τη κλήση αρχείων στον χώρο εργασίας του MATLAB. Στο παράθυρο εντολών (εικόνα 44) φαίνονται οι δύο διαφορετικές εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για την κλήση δύο διαφορετικών ομάδων αρχείων. Η μία ομάδα αποτελείται από τα στοιχεία τάσης και η άλλη από τα στοιχεία έντασης και οι δύο συναρτήσεις του χρόνου.



Εικόνα 47 - Χρήση διαφορετικών συναρτήσεων για την κλήση αρχείων τάσης και έντασης

Τώρα που τα αρχεία έχουν εισαχθεί, επιλέγοντας την καρτέλα «PLOT» μπορούμε να εμφανίζουμε το γράφημα με την κυματομορφή των στοιχείων που μας ενδιαφέρει. Επιλέγοντας ποιες ομάδες στοιχείων θέλω να εμφανίσω μαζί σε ένα γράφημα, επιλέγω τη μορφή γραφήματος από την μπάρα εργασίας της καρτέλας PLOT και παρατηρώ το αποτέλεσμα όπως στην εικόνα 45.



Εικόνα 48 – Απεικόνιση ακατέργαστης κυματομορφής. Με το που επιλεγεί το απλό γράφημα «plot» στην καρτέλα “PLOT”, εμφανίζεται η αντίστοιχη εντολή στο παράθυρο εντολών.

Ενώ το διάγραμμα απεικονίζει τη μεταβολή της έντασης του ρεύματος κατά την λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα, η διαβάθμιση του άξονα Y απεικονίζει τιμή τάσης διότι για την μέτρηση χρησιμοποιείται μια αντίσταση, της οποίας μετριέται η τάση στα άκρα της. Πολλαπλασιάζοντας τις

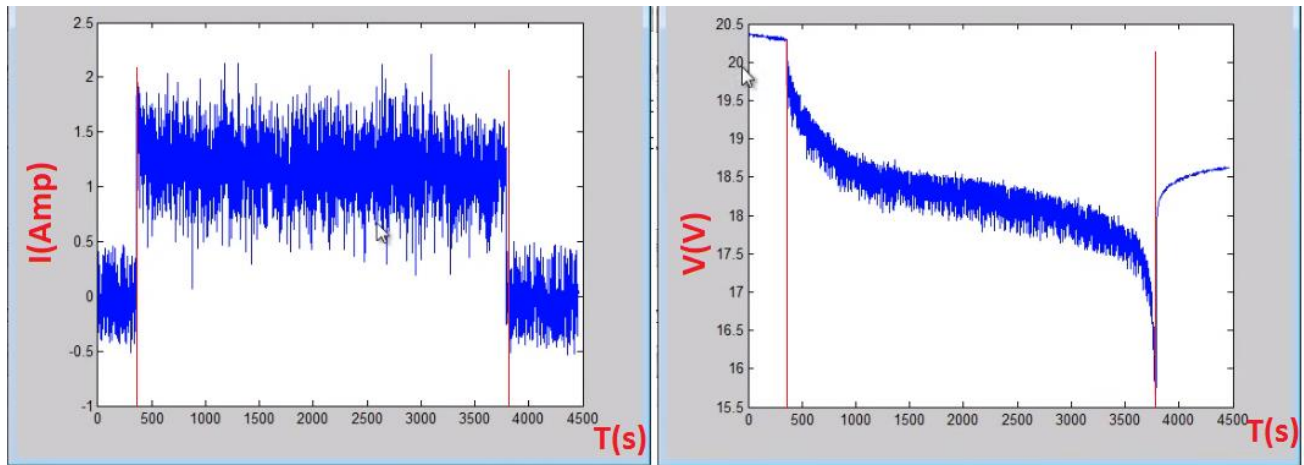
```
>> currentData = currentData * 100;
```

τιμές του πίνακα «currentData» επί εκατό (βαθμωτή τιμή που αντιπροσωπεύει την αντίσταση), λαμβάνουμε τη πραγματική διαβάθμιση των τιμών της έντασης. Αυτό γίνεται με την ακόλουθη εντολή:

Επίσης χρειάζεται να γίνει και μια διόρθωση στις τιμές της τάσης, καθώς κατά την λειτουργία του πειραματικού μοντέλου χρησιμοποιείται μια διάταξη διχασμού της τάσης ώστε αυτή να μειωθεί και είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμη. Αυτό γίνεται με την ακόλουθη εντολή:

```
>> voltageData = voltageData * 2;
```

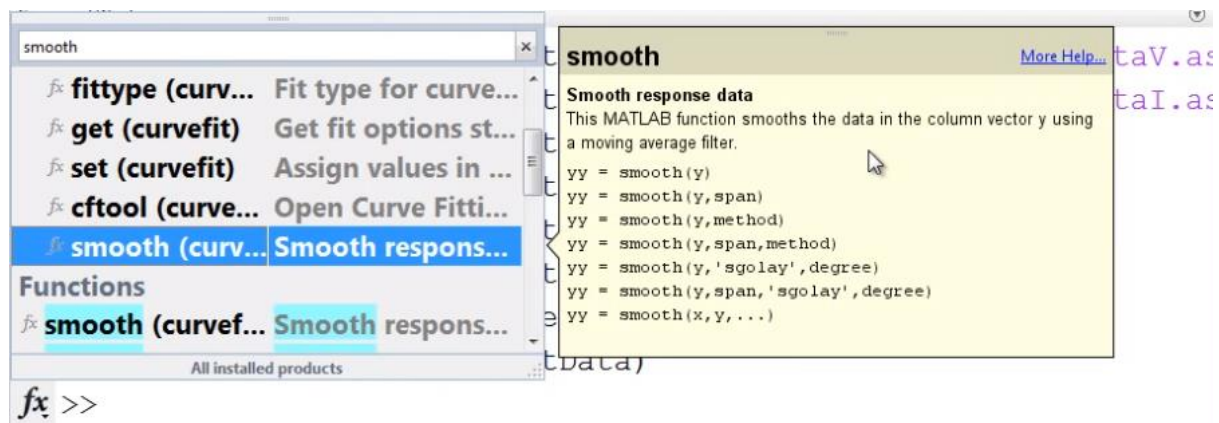
Μετά τη διόρθωση προκύπτουν οι ίδιες κυματομορφές με διαφορετικές διαβαθμίσεις στους άξονες Y.



Εικόνα 49 – Διορθωμένα τιμές κατά τους άξονες Y για τα σήματα έντασης και τάσης ρεύματος.

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, η **κυματομορφή που απεικονίζει την ένταση** συναρτήσε του χρόνου είναι αρκετά “θορυβώδης”, γεγονός που πρέπει να αντιμετωπιστεί πριν την ανάλυση του σήματος. Το MATLAB διαθέτει πολλούς και διάφορους τρόπους (εξισώσεις) για να διευκολύνει το χρήστη στην παραπάνω εργασία. Χρησιμοποιώντας την αρχικοποίηση, αποκτάμε πρόσβαση σε ένα ευρετήριο των εξισώσεων οι οποίες είναι εγκατεστημένες στο σύστημα. Επιλέγοντας το εικονίδιο **fx** που βρίσκεται στα αριστερά του παραθύρου εντολών, στο ευρετήριο, εντός του οποίου κάποιος μπορεί να περιηγηθεί ή να αναζητήσει με τις κατάλληλες λέξεις κλειδιά την εξίσωση που τον εξυπηρετεί.

Υπό τη λέξη “smoothing” παρέχονται κάποιες επιλογές της εργαλειοθήκης διαμόρφωσης καμπυλών (curvefit toolbox) σε διαγράμματα. Χρησιμοποιώντας τη γενική εξίσωση «smooth» χρησιμοποιείται ουσιαστικά ένα φίλτρο μετακινούμενο μέσου όρου. Με την δημιουργία μέσω τιμών από δέγματα εντός συγκεκριμένου εύρους τιμών, οι ακραίες τιμές που κατά πάσα πιθανότητα είναι “θόρυβος” αλληλοακυρώνονται, με αποτέλεσμα το σήμα να εξομαλύνεται (smoothing) μερικώς.

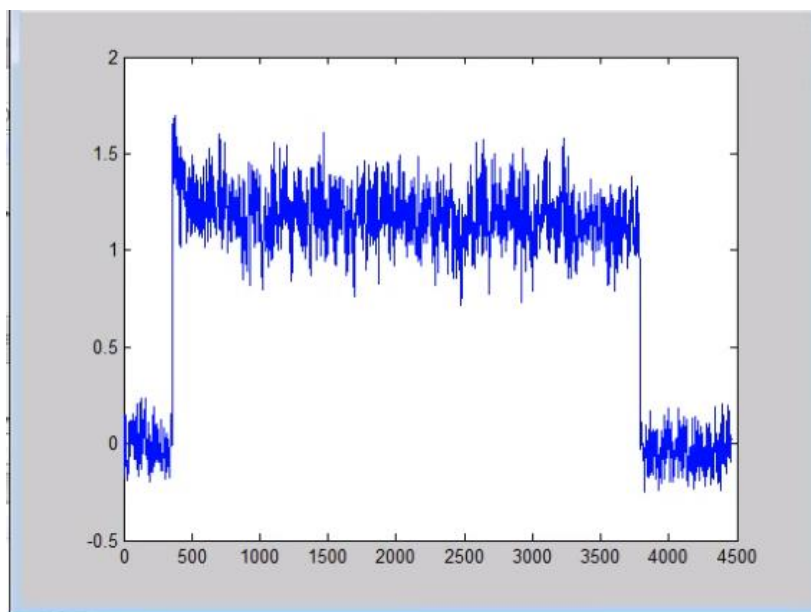


Εικόνα 50 – Ευρετήριο εξισώσεων του MATLAB και η βασική επεξήγηση της συνάρτησης smooth. Για περαιτέρω πληροφορίες και παραδείγματα ως προς τη χρήση κάθε εξίσωσης, υπάρχει η επιλογή “More Help...” στο πάνω δεξιό μέρος του παραθύρου της περιληπτικής ερμηνείας εξίσωσης.

Ορίζοντας μια καινούρια μεταβλητή «smoothedCurrent» και εισάγοντας ως αποτελέσματα τα αποτελέσματα της εξίσωσης smooth με “X” τον πίνακα των τιμών έντασης ρεύματος, όπως φαίνεται στην παρακάτω εντολή MATLAB

```
>> smoothedCurrent = smooth(currentData);
```

Έχουμε ως αποτέλεσμα έναν καινούριο πίνακα με τιμές που όταν εμφανιστούν σε καινούριο διάγραμμα, θα έχουμε μία πιο καθαρή κυματομορφή σε σχέση με την αρχική (εικόνα 48)




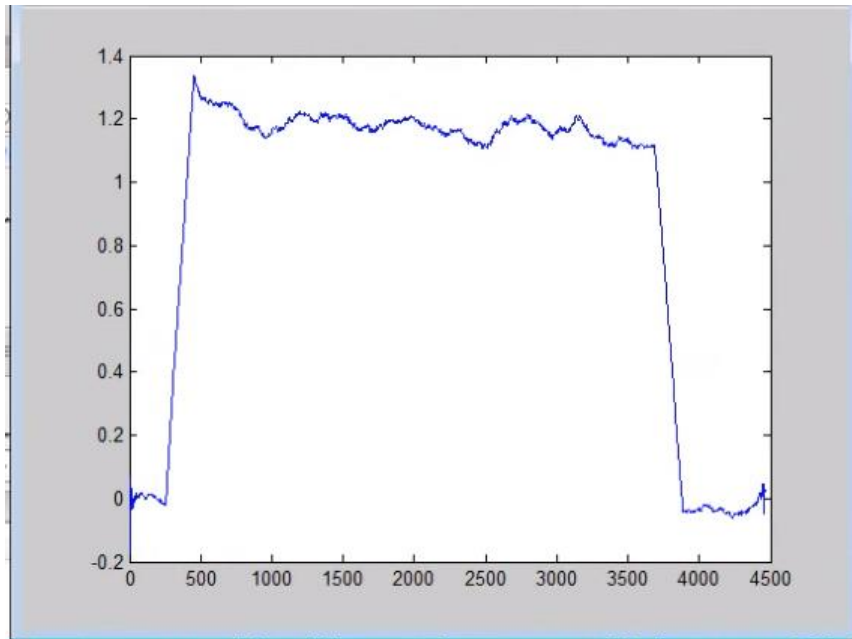
Εικόνα 51 -Κυματομορφή μερικής εξομάλυνσης με τη χρήση της εξίσωσης «smooth» του MATLAB.

Όμως, επειδή η κυματομορφή απαιτεί περαιτέρω εξομάλυνση, θα χρειαστεί να τροποποιήσουμε μια παράμετρο της εξίσωσης, η οποία επηρεάζει το εύρος των δειγμάτων τα οποία επηρεάζονται από την εξίσωση. Η εξίσωση περιέχει μία προεπιλεγμένη τιμή η οποία μπορεί να τροποποιηθεί, απλά ορίζοντας έναν αριθμό στην εντολή smooth (π.χ.200), πληκτρολογώντας την στο παράθυρο εντολών, όπως φαίνεται παρακάτω:

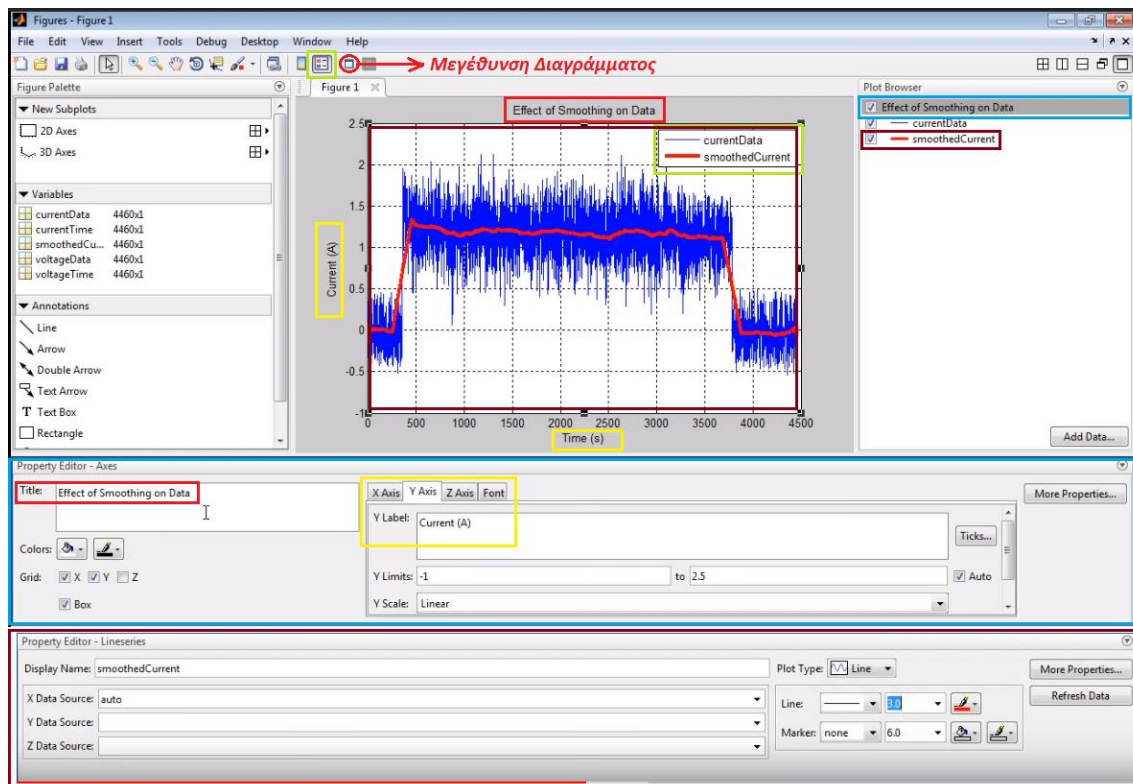
```
>> smoothedCurrent = smooth(currentData, 200);
```

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως όσο μεγαλύτερος ο αριθμός που ορίζει τον εύρος των στοιχείων του αρχικού πίνακα που χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθεί μέσος όρος δύο τιμών, τόσο περισσότερο αλλοιώνεται το σχήμα της κυματομορφής.

Επιλέγοντας το εικονίδιο εργαλείων διαγραμμάτων  στο πάνω μέρος του παραθύρου ενός διαγράμματος, δίνεται η δυνατότητα τροποποίησης του διαγράμματος. Επίσης, επιλέγοντας από το παράθυρο εργασίας (18) περισσότερους από δύο πίνακες, είναι ένας καλός τρόπος άμεσης σύγκρισης δύο παρομοίων διαγραμμάτων.



Εικόνα 52 – Κυματομορφή τροποποιημένου εύρους εξομαλυμένων σημείων.



Εικόνα 53 – Εργαλείο διαμόρφωσης διαγραμμάτων. Κάθε ομάδα πλαισίων αντιπροσωπεύει την επιλογή λειτουργίας και το αποτέλεσμα της στο διάγραμμα.

Ένα από τα σημαντικότερα σημεία της διαδικασίας δημιουργίας ενός τελικού διαγράμματος είναι το γεγονός ότι όταν γίνει μια φορά, υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής κώδικα, ο οποίος μπορεί να αναπαράγει κάθε φορά παρόμοιο αποτέλεσμα, ανεξαρτήτως εισαγόμενων δεδομένων. Επιλέγοντας “File/Generate Code...” εμφανίζεται ο κατάλληλος κώδικας, ο οποίος μπορεί να αποθηκευτεί και να επικαλεστεί από το παράθυρο εντολών (16) του MATLAB ως εξίσωση, όπως φαίνεται παρακάτω

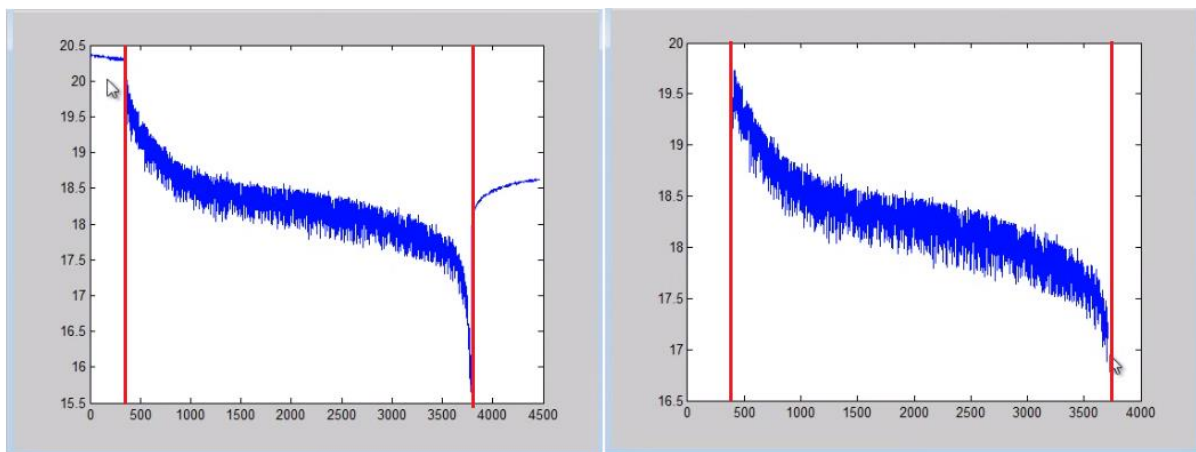
```
>> createfigure(currentTime, [currentData smoothedCurrent])
```

Αναφορικά με την εξομάλυνση του **σήματος της τάσης**, η διαδικασία που ακολουθείται είναι ελαχίστως διαφορετική. Κατά την διάρκεια μη λειτουργίας του κινητήρα, το σήμα είναι σχετικά «καθαρό», με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία. Επομένως χρειάζεται να αποκλείσουμε από τη διαδικασία της εξομάλυνσης τα σημεία του διαγράμματος τα οποία καταγράφηκαν κατά τη μη λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα. Από το διάγραμμα της έντασης συμπεραίνουμε ότι η τιμή του ρεύματος κατά την μη λειτουργία του κινητήρα είναι μικρότερη του ένα. Άρα θα περιορίσουμε τις τιμές της έντασης εντός του «1» (δηλαδή κατά τη περίοδο λειτουργίας του ρότορα), όπως φαίνεται παρακάτω και θα συσχετίσουμε αυτόν τον περιορισμό με τις τιμές του πίνακα της τάσης, ώστε να επιτύχουμε την κατάλληλη απομόνωση των ανεπιθύμητων τιμών.

```
>> voltageData = voltageData(smoothedCurrent > 1);
```

Η ίδια διαδικασία πρέπει να ακολουθηθεί και για τις τιμές του χρόνου

```
>> voltageTime = voltageTime(smoothedCurrent > 1);
```



Εικόνα 54 – Κυματομορφή τάσης πριν και μετά την εξαγωγή τιμών που δεν χρειάζονται εξομάλυνση.

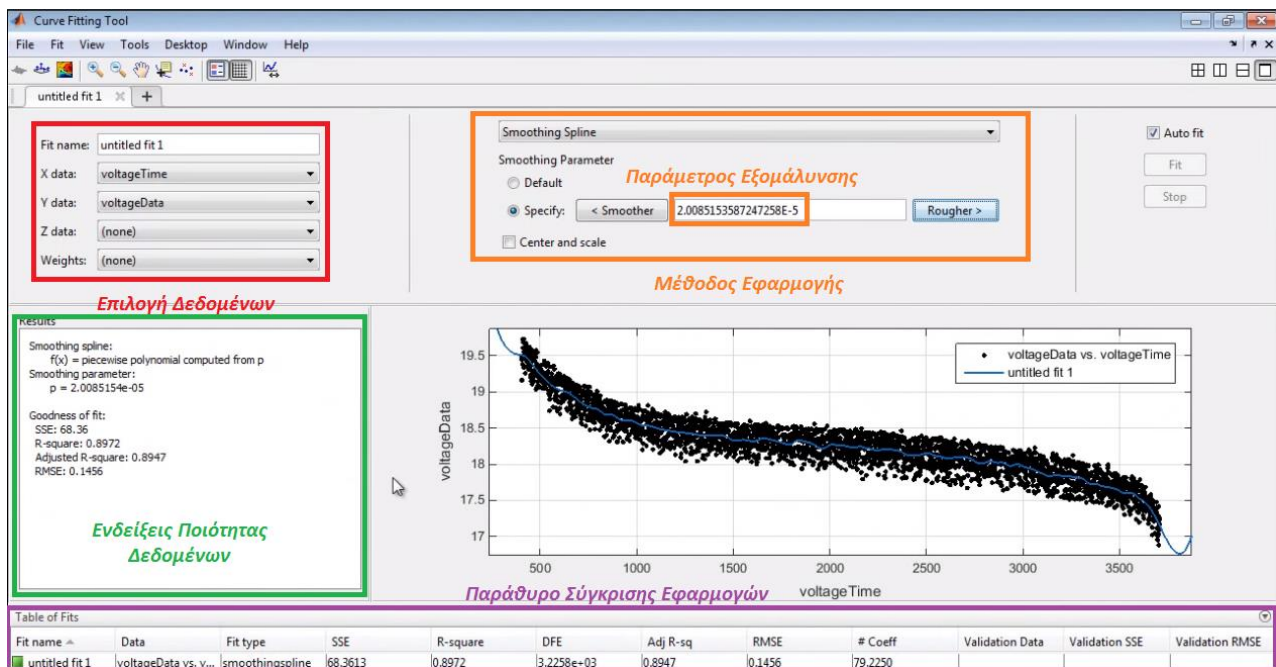
Ένας άλλος τρόπος να συνδυάζουμε διάφορες κυματομορφές στο ίδιο διάγραμμα, είναι χρησιμοποιώντας την εφαρμογή «Curve Fitting». Εισάγοντας τα δεδομένα στο κατάλληλο πεδίο, μπορούμε να επεξεργαστούμε τα στοιχεία χρησιμοποιώντας διάφορες μαθηματικές μεθόδους. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται η μέθοδος «εξομάλυνσης καμπυλών» (smoothing spline), η οποία είναι παρόμοια με την μέθοδο «Μετακινούμενου Μέσου Όρου» που χρησιμοποιήθηκε για την εξομάλυνση της προηγούμενης κυματομορφής (έντασης ρεύματος), αλλά πιο πολύπλοκη μαθηματικά.

Επίσης, είναι δυνατή και η εισαγωγή άλλων μαθηματικών μεθόδων οι οποίες δεν περιέχονται στο MATLAB.

Ομοίως με την προηγούμενη διαδικασία, μπορεί να παραχθεί κώδικας, ώστε να χρησιμοποιηθεί μέσω εντολής, για την εφαρμογή άλλων στοιχείων στο ίδιο διάγραμμα (file/Generate Code). Αποθηκεύοντας την εξίσωση και καλώντας την από το παράθυρο εντολών όπως φαίνεται παρακάτω,

```
>> model = createFit(voltageTime, voltageData)
```

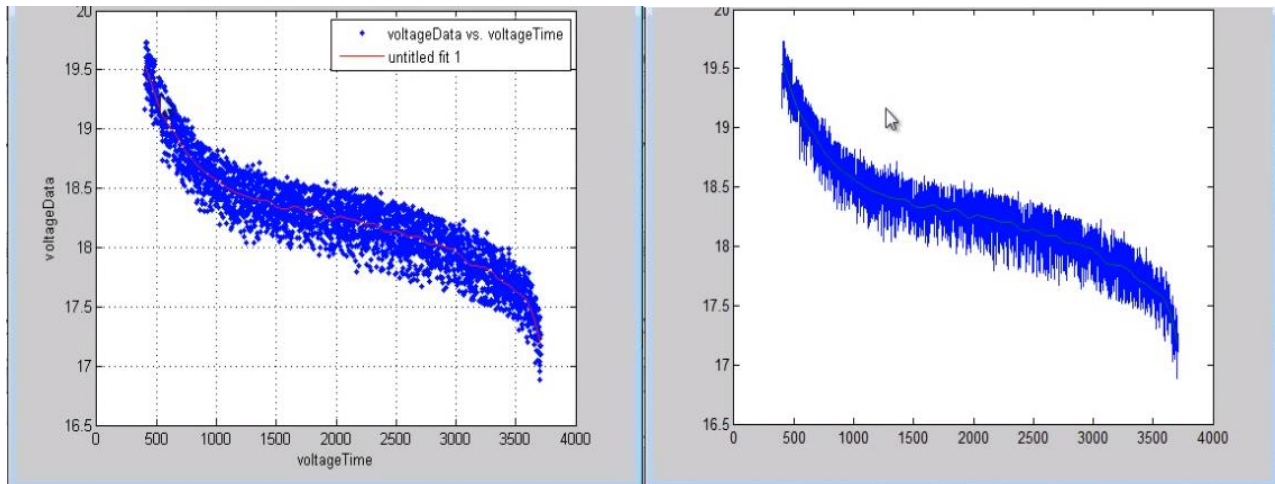
ώστε να δημιουργηθεί μια εφαρμογή και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την εξίσωση εξομάλυνσης καμπυλών όπως χρησιμοποιήθηκε και για την κυματομορφή της έντασης θα έχουμε παρόμοιο αποτέλεσμα.



Εικόνα 55 – Εφαρμογή εφαρμογής καμπυλών (Curve Fitting) που ανήκει στην εργαλειοθήκη εφαρμογής καμπυλών (Curve Fitting Toolbox) του MATLAB.

Εν κατακλείδι, οι παραπάνω διαδικασίες είναι οι βασικές οι οποίες πρέπει να ακολουθηθούν για να επεξεργαστούν και να απεικονιστούν τα πειραματικά δεδομένα πριν προχωρήσουμε στη διαδικασία της μοντελοποίησης. Στο παράθυρο εργασίας (18) υπάρχει μια ακόμη καρτέλα ή οποία περιέχει το ιστορικό όλων των εντολών που έχουν χρησιμοποιηθεί από τη στιγμή που ξεκίνησε να λειτουργεί το MATLAB στον συγκεκριμένο υπολογιστή.

Χρησιμοποιώντας το ιστορικό εντολών οποιασδήποτε διαδικασίας, είναι δυνατή η αυτοματοποίηση ολόκληρης διαδικασίας, στην προκειμένη περίπτωση της επεξεργασίας και απεικόνισης των πειραματικών δεδομένων της μπαταρίας. Επιλέγοντας όλες εκείνες τις εντολές που εξυπηρετούν τον κάθε σκοπό, μπορεί να δημιουργηθεί ένα αρχείο (script) στο οποίο θα εισάγονται κάθε φορά καινούρια δεδομένα και θα αναπαράγονται όλα τα παραπάνω διαγράμματα.



Εικόνα 56 - Αποτέλεσμα εφαρμογής της καμπύλης με τη χρήση της μεθόδου *Smooth Spline* (αριστερά) και το αποτέλεσμα της εξομάλυνσης ων δεδομένων με την εντολή "*smoothedVoltage = (voltageTime)*" (δεξιά).

4.2.2.1 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΓΝΟΟΥΜΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Υπάρχουν δύο βασικές τεχνικές για την αντιμετώπιση απώλειας πειραματικών δεδομένων, που μπορούν να καταστήσουν τα διαγράμματά μας ανακριβή και το μοντέλο μπαταρίας μη αναξιόπιστο.

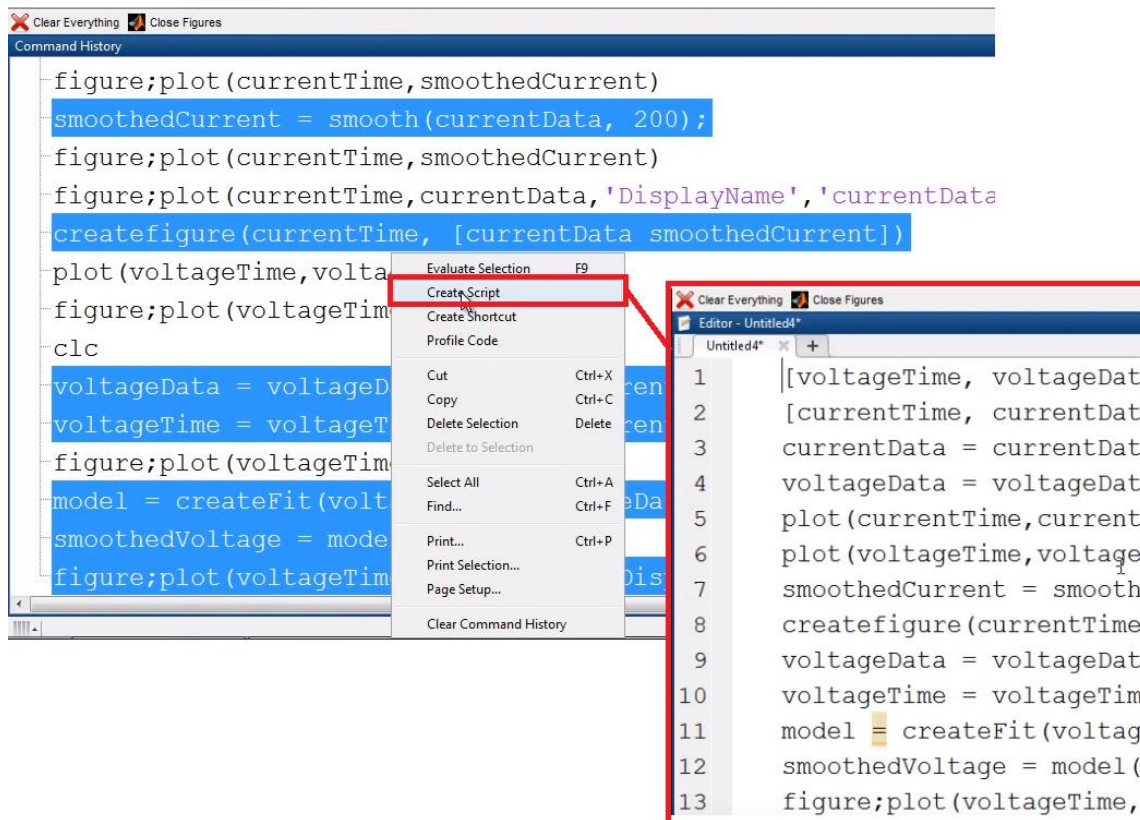
Η **διαγραφή**, είναι η πρώτη επιλογή, υπό την προϋπόθεση ότι τα απόντα δεδομένα είναι από τυχαία κομμάτια του σήματος και παρέχει μια αρκετά ρεαλιστική απεικόνιση του τελικού διαγράμματος. Το αρνητικό αυτής της επιλογής είναι η μείωση του μεγέθους των δειγμάτων, το οποίο αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα για μικρά σε μέγεθος δείγματα πειραματικών δεδομένων. Σε αρκετές εξισώσεις του MATLAB υπάρχει ενσωματωμένη η επιλογή της "έξυπνης διαγραφής" δεδομένων,

Η **υποκατάσταση**, είναι μια τεχνική κατά την οποία αντικαθίστανται ελλείψεις σε δεδομένα από μια προσεγγιστική κάθε φορά τιμή. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται κυρίως σε ομάδες ή περιοχές δεδομένων που θεωρούνται πολύ σημαντικά για να παραληφθούν.

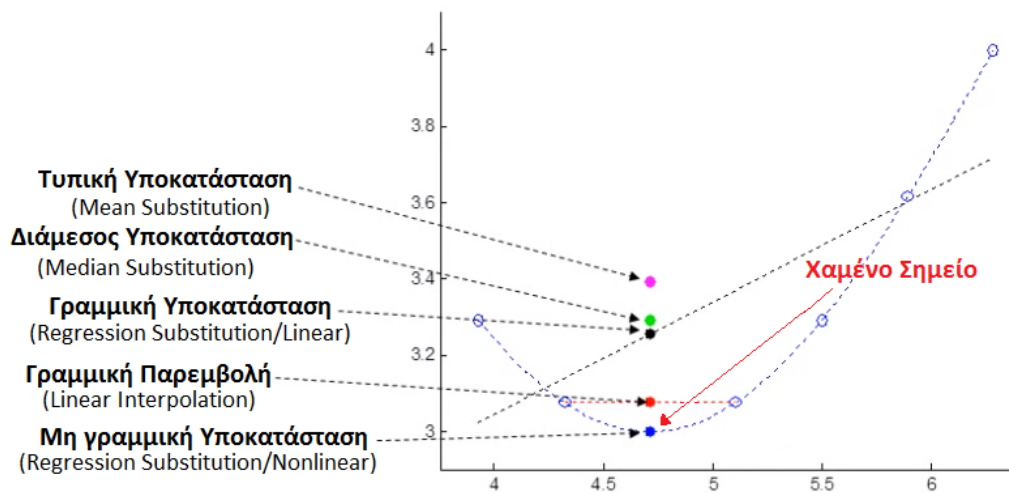
Επομένως το σημαντικό ερώτημα που τίθεται είναι, «τι θεωρείται λογικά προσεγγιστική τιμή». Υπάρχουν διάφοροι τρόποι αντικατάστασης ενός χαμένου σημείου, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της εικόνας 55. και στην εικόνα 55, η πιο αποτελεσματική μέθοδος για την πρόβλεψη του χαμένου σημείου είναι η «Μη Γραμμική Υποκατάσταση», μια αρκετά πολύπλοκη μαθηματική προσέγγιση.

Κάθε μέθοδος έχει το δικό της σκοπό και βρίσκει εφαρμογή ανάλογα την περίπτωση. Όσο πιο πολύπλοκο είναι το σχήμα του διαγράμματος από το οποίο λείπουν στοιχεία, τόσο πιο πολύπλοκη πρέπει να είναι η μαθηματική προσέγγιση της πρόβλεψης. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται

Η χειροκίνητη διαγραφή είναι η πιο προφανής και χρονοβόρα διαδικασία ή οποία χρησιμοποιείται επιλεκτικά, σε συνδυασμό με τις παραπάνω μεθόδους, όταν και όπου κριθεί αναγκαία από τους ενασχολούμενους.



Εικόνα 57 - Επιλογή κατάλληλων εντολών για τη δημιουργία script που αυτοματοποιεί την διαδικασία εξομάλυνσης και απεικόνισης των πειραματικών δεδομένων.



Εικόνα 58 - Εικονική απεικόνιση αντικατάστασης χαμένου σημείου με διάφορους τρόπους, σε τυχαία καμπύλη ν-οστού βαθμού.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

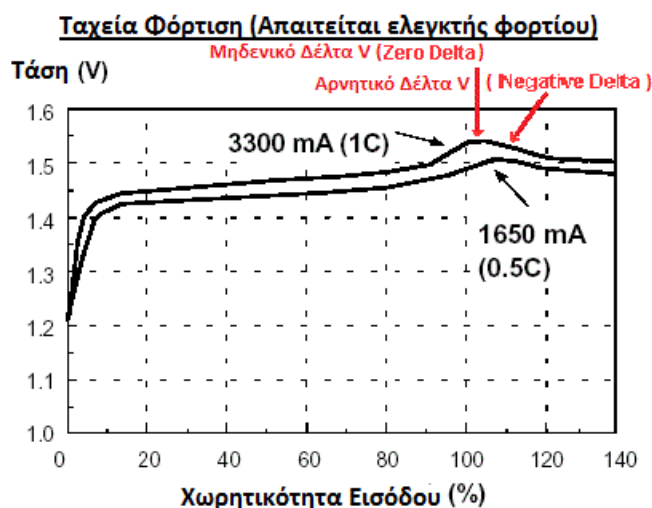
Εν κατακλείδι, η μοντελοποίηση και η προσομοίωση, σε συνδυασμό με τη θεωρία και τον πειραματισμό, είναι σημαντικά ερευνητικά εργαλεία που προσφέρουν ευκαιρίες για εξέλιξη τεχνολογιών κρίσιμες για την ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης. Αναπτύσσοντας δεδομένα από την εφαρμογή των παραπάνω εργαλείων μπορούν να παρέχουν τη βάση για αποφάσεις διοικητικής και τεχνικής φύσεως σε μια εταιρεία, που θα επηρεάσουν την πορεία του προϊόντος και της αγοράς. Ο συνδυασμός αυτός θα συνεχίσει να επηρεάζει την εξέλιξη των μπαταριών καθώς προωθεί την εξέλιξη σε τομείς όπως «Θερμική Συμπεριφορά και Χαρακτηριστικά μιας Μπαταρίας», «Σχεδιασμός και Ανάλυση Συστημάτων Ελέγχου Μπαταριών», «Τρισδιάστατη απεικόνιση μοντέλων Υψηλής πιστότητας», «Ανάπτυξη Τεχνικών Βελτιστοποίησης και Ανθεκτικότητας», καθώς τα ηλεκτροκίνητα οχήματα αποκτούν όλο και περισσότερη απήχηση στην αυτοκινητοβιομηχανία και στο αγοραστικό κοινό αντίστοιχα. Το επόμενο βήμα μετά την υποστήριξη και από τις δύο πλευρές είναι η οικονομικότερη κατασκευή και απόκτηση ηλεκτροκίνητων και υβριδικών ηλεκτροκίνητων οχημάτων και λόγω της αυξανόμενης πίεσης των κυβερνήσεων ανά τον κόσμο υπέρ οικονομικότερων Μ.Ε.Κ.

Επομένως η προσφορά της μοντελοποίησης και της προσομοίωσης στην ηλεκτροκίνηση προωθεί την εξέλιξη, άρα και την απήχηση των εν λόγω προϊόντων.

6 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

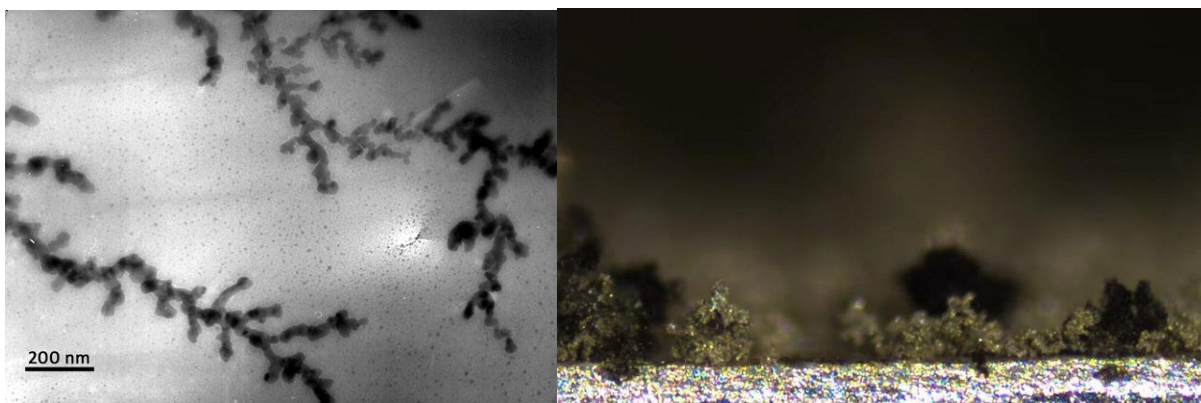
Αρνητική και μηδενική μεταβολή τάσης (Negative Delta V/Zero Delta V): Γενικότερα dV δηλώνει την μεταβολή του φορτίου στο πέρασμα του χρόνου. Το αρνητικό dV ($-dV$) προκύπτει όταν η τάση του κελιού ουσιαστικά πέφτει όταν η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη. Το μηδενικό dV προκύπτει από την παύση φόρτισης.

Η συμπεριφορά της τάσης στο τέλος κάθε φόρτισης (eoc =end of charge) διαφέρει από κελί σε κελί. Κελιά NiCd παρουσιάζουν εμφανή αρνητική τάση σε πλήρες φορτίο, ενώ κελιά Ni-MH παρουσιάζουν είτε σταθερότητα είτε μια ανεπαίσθητη αρνητική τιμή σε πλήρες φορτίο.



Βραδεία Φόρτιση (Trickle charging): Η μέθοδος της βραδεία φόρτισης χρησιμοποιείται για να φορτίζεται μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία με ρυθμό ισodύναμο με τον ρυθμό αυτοεκφόρτισης. Με αυτόν τον τρόπο η μπαταρία παραμένει μονίμως φορτισμένη. Η τάση φόρτισης αυτή ονομάζεται «επιπλέουσα τάση» και κατά τη διαδικασία αυτή, η μπαταρία βρίσκεται υπό «επιπλέουσα φόρτιση» (float-charging).

Δενδροειδή/Δενδρύλλια & Βίαιη Απελευθέρωση Θερμότητας (Dendrite Growth & Thermal Runaway): Κατά την εκφόρτιση μιας μπαταρίας λιθίου, εκτός της ροής των ηλεκτρονίων του θετικού (μεταλλικού) ηλεκτροδίου (καθόδου) παρατηρείται και η ροή θετικά φορτισμένων σωματιδίων (ιόντων) μέσω του ηλεκτρολύτη προς το αρνητικό ηλεκτρόδιο (άνοδο). Κατά την φόρτιση της μπαταρίας η διαδικασία αντιστρέφεται. Η φύση του λιθίου ως μέταλλο είναι και η πηγή του προβλήματος της δημιουργίας των δενδρυλλίων. Τα επιστρεφόμενα ιόντα (φόρτιση) σχηματίζουν στην επιφάνεια του λιθίου αγκαθωτές δομές που θυμίζουν δέντρα. Με την πάροδο του χρόνου μπορεί να σχηματιστούν επιμήκεις δομές που θα φέρουν τα δύο ηλεκτρόδια σε επαφή. Άμεσο αποτέλεσμα η δημιουργία βραχυκυκλώματος και διακεκομμένη εκφόρτιση. Αυτή η ανεξέλεγκτη απελευθέρωση ενέργειας οδηγεί σε υπερθέρμανση της μπαταρίας και τελικά σε έκρηξη αυτής. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή και ως **Βίαιη Απελευθέρωση Θερμότητας (Thermal Runaway)**.



Διαπερατότητα (permeability): Στον ηλεκτρομαγνητισμό, η διαπερατότητα είναι το μέτρο ικανότητας ενός υλικού να υποστηρίξει το σχηματισμό ενός μαγνητικού πεδίου εντός του ίδιου. Πρόκειται δηλαδή για τον βαθμό μαγνητισμού που περιέχεται σε ένα υλικό, αντιδρώντας σε ένα εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Η μαγνητική διαπερατότητα χαρακτηρίζεται από το πλάγιας γραφής, ελληνικό γράμμα μ (H/m).

Δικτυωτό φορτίο ή Φορτίο δικτύου (net charge): Ένα πολυτονικό ιόν είναι μια ομάδα στοιχείων που συμβαίνουν μαζί, συνήθως ως ένα ιόν και έχουν ένα δικτυωτό ηλεκτρικό φορτίο. Ο όρος «δικτυωτό φορτίο» προέρχεται από το άθροισμα των φορτίων μοναδιαίων στοιχείων. Προσθέτοντας τις τιμές των φορτίων όσων σωματιδίων διαμορφώνουν το πολυατομικό ιόν προκύπτει το άθροισμα ή φορτίο δικτύου, καθώς το πολυατομικό ιόν συμπεριφέρεται ως μονάδα. Ένα παράδειγμα είναι αυτό του πολυατομικό ιόν υδροξειδίου (OH⁻). Αποτελείται από ένα μόριο οξυγόνου (φορτίου -2) και ένα υδρογόνο (φορτίου +1). Το συνολικό άθροισμα των παραπάνω φορτίων είναι $-2+1=-1$. Επομένως το φορτίο δικτύου είναι -1.

Μέθοδος αποκατάστασης (Battery recondition/restoration/rejuvenation): Υπάρχει μια αρκετά κοινή παρανόηση σχετικά με την αποκατάσταση και μια κοινή επαναφόρτιση μιας *δευτερεύουσας*

μπαταρίας, ότι πρόκειται για παρόμοιες διαδικασίες. Η βασική τους διαφορά έγκειται στην χωρητικότητα της μπαταρίας. Ενώ η επαναφόρτιση παρέχει στην μπαταρία φορτίο με βάση τη μέγιστη χωρητικότητα στο εκάστοτε στάδιο της ζωής της, η αποκατάσταση, επαναφέρει την ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας. Η διαδικασία και ο τρόπος αποκατάστασης διαφέρει σε κάθε τύπο μπαταρίας και χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για την πρακτική εφαρμογή τους. Ωστόσο, πρόκειται για διαδικασίες που μπορούν να εκτελεστούν τόσο ατομικά όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο, καθώς υπάρχουν ήδη επιχειρήσεις που ασχολούνται με την μαζική αποκατάσταση μπαταριών

Παθητικοποίηση: Στην φυσική χημεία και μηχανική, η παθητικοποίηση αναφέρεται σε ένα υλικό που έχει γίνει «παθητικό», δηλαδή επηρεάζεται λιγότερο ή διαβρώνεται από το περιβάλλον στο οποίο χρησιμοποιείται. Πρακτικά, κατά την παθητικοποίηση, το υλικό περιβάλλεται από τη δημιουργία ενός μικροστρώματος που το θωρακίζει.

Σποροκρύσταλλος (Seed Crystal): Ένας σποροκρύσταλλος είναι ένα μικρό κομμάτι πολυκρυσταλλικού υλικού από το οποίο ένας μεγαλύτερος κρύσταλλος, συνήθως του ίδιου υλικού, αναπτύσσεται από τον πρώτο. Η βασική του χρήση είναι η αναπαραγωγή υλικών, αποφεύγοντας την αργή τυχαιότητα που χαρακτηρίζει την διαδικασία ανάπτυξης ενός φυσικού κρυστάλλου και επιτρέποντας την παραγωγή σε βιομηχανικό επίπεδο.

Σύστημα Φόρτισης dT/dt & dV/dt : Πρόκειται για μία μέθοδο αυτόματου τερματισμού φόρτισης και βασίζεται στην παρακολούθηση της μεταβολής θερμότητας προς το χρόνο. Μαζί με την μέθοδο dV/dt , χρησιμοποιούνται σε συστήματα NiCd και NiMH. Με το πέρας της πλήρους φόρτισης μιας μπαταρίας, εκκινούνται διαφορετικές χημικές διαδικασίες ώστε να απορροφηθεί το επιπλέον, αχρείαστο ρεύμα. Σε μπαταρίες που χρησιμοποιούν υδροξείδιο νικελίου, η παραπάνω διαδικασία συμβάλει στον κύκλο της παραγωγής και επανασύνθεση οξυγόνου, με αποτέλεσμα να παράγεται θερμότητα με κάθε ολοκλήρωση ενός κύκλου. Η ξαφνική αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τερματιστεί η φόρτιση.

Μία ακόμα ιδιότητα του κύκλου του οξυγόνου είναι η ελάχιστη «ύφεση τάσης» (voltage depression). Ανιχνεύοντας την ύφεση τάσης και αξιοποιώντας αυτό το σήμα, είναι δυνατός ο τερματισμός φόρτισης. Η παραπάνω μέθοδος είναι η “ dV/dt ” και είναι η ευκολότερα εφαρμόσιμη από τις δύο, καθώς δεν απαιτείται επιπλέον αισθητήρας θερμοκρασίας. Η dT/dt αποτελεί την καλύτερη από τις δύο μεθόδους για τις NiMH. Οι δύο βασικοί λόγοι είναι, η ελάχιστη «ύφεση τάσης» που την καθιστά δύσκολα ανιχνεύσιμη και η παραγωγή λανθασμένων μέγιστων τάσεων σε πρώιμο στάδιο της φόρτισης, με αποτέλεσμα η χρήση της μεθόδου dV/dt να διακόπτει (επίσης πρώιμα) τη διαδικασία φόρτισης.

Φαινόμενο Μνήμης & Ύφεση Τάσης (battery memory effect & voltage depression): Το *φαινόμενο μνήμης* παρατηρήθηκε πρώτα σε δευτερεύουσες μπαταρίες της οικογένειας νικελίου και προκαλεί τη διατήρηση λιγότερου φορτίου σε σύγκριση με την ονομαστική τους χωρητικότητα. Αυτό συμβαίνει λόγω της επαναλαμβανόμενης μερικής εκφόρτισης μιας μπαταρίας πριν φορτιστεί ξανά πλήρως. Η μπαταρία παρουσιάζεται σαν να «θυμάται» την μειωμένη χωρητικότητα της.

Το πραγματικό φαινόμενο μνήμης προέρχεται από μια αεροναυπηγική εφαρμογή μιας μπαταρίας Νικελίου-Καδμίου, στην οποία τα κελιά της εκφορτίζονταν επαναλαμβανόμενα σε ποσοστό 85%, με χρήση ακριβούς υπολογιστικού ελέγχου και στη συνέχεια φορτιζονταν πλήρως. Μακροπρόθεσμα, λόγω του κυκλικού σχεδίου φόρτισης/εκφόρτισης η μπαταρία έχασε περίπου το 25% της χωρητικότητας της.

Επομένως, το πραγματικό φαινόμενο μνήμης μπορεί να υπάρξει μόνο αν η μπαταρία: επαναλαμβανόμενα δεν φορτίζεται πλήρως, αν σε κάθε κύκλο επαναφορτίζεται ακριβώς στο ίδιο ποσοστό εκφόρτισης και η τάση εκφόρτισης να είναι μεγαλύτερη ή ίση του 1 volt ανά κελί.

Άλλα προβλήματα που προκαλούν μείωση στο μέγιστο υποθηκεύσιμο φορτίο μιας μπαταρίας και γίνονται αντιληπτά ως αποτελέσματα του φαινομένου μνήμης είναι η ύφεση τάσης λόγω μακροπρόθεσμης επαναλαμβανόμενης υπερφόρτισης, υψηλή θερμοκρασία κατά τη φόρτιση που περιορίζει τη μέγιστη τάση φόρτισης και την αποδεχόμενη τάση από το ίδιο το κελί. Επίσης, η λειτουργία σε θερμοκρασίες κοντά στους 0 °C, υψηλοί ρυθμοί εκφόρτισης (> 5C) σε μπαταρίες που δεν είναι σχεδιασμένες για τέτοια χρήση, ανεπαρκής χρόνος φόρτισης και ελαττωματικοί φορτιστές, είναι οι κυριότεροι λόγοι **ύφεσης τάσης** που μπορεί να αποφέρει μια μπαταρία.

Η επίδραση του **“φαινομένου μνήμης”** ή πιο σωστά **ύφεσης τάσης**, μπορεί να μετριαστεί από επιμελή χρήση της μπαταρίας (πλήρη εκφόρτιση και πλήρη φόρτιση). Βέβαια, η μπαταρία μπορεί να επιδιορθωθεί με βαθιές εκφορτίσεις και κύκλους φορτίσεων σε κάθε ένα κελί ξεχωριστά. Αυτό είναι αναγκαίο γιατί το κάθε κελί φορτίζεται και εκφορτίζεται διαφορετικά, με αποτέλεσμα η **ύφεση** να συμβαίνει σε μεμονωμένα κελιά και να εξαπλώνεται και στο σύνολο τους. Επομένως, είναι απόλυτα λογικό, η επιδιόρθωση να πρέπει να γίνει επίσης μεμονωμένα ώστε να επιδιορθωθεί η μπαταρία ως προς το σύνολο των κελιών της. Μερικοί φορτιστές έχουν συγκεκριμένες λειτουργίες για επιδιόρθωση μπαταριών, θέτοντάς τες σε κατάσταση βαθιάς εκφόρτισης και φόρτισης.

Ωστόσο, η παραπάνω διαδικασία αν εφαρμοστεί σε μια μπαταρία (σε όλα τα κελιά ταυτόχρονα), τα αποτελέσματα θα είναι επιζήμια καθώς τα κελιά μιας μπαταρίας είναι πανομοιότυπα μεταξύ τους και όχι ίδια. Αυτό συνεπάγεται την διαφορετικότητά τους και ως προς την μέγιστη χωρητικότητα φορτίου. Κατά τη βαθιά εκφόρτιση, το κελί με την μικρότερη χωρητικότητα μπορεί να εκφορτιστεί πλήρως και να υποστεί **«αντίστροφη φόρτιση»** αφού τα υπόλοιπα κελιά εξαναγκάζουν το ρεύμα να διαρρέει το πλήρως εκφορτισμένο κελί.

Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί πως για να απορριφθεί η ύφεση τάσης μιας μπαταρίας με επιμελή χρήση και συντήρηση, η ύφεση είναι αναπόφευκτη, αλλά θα γίνει σταδιακά και θα επιτρέψει στη μπαταρία να εξαντλήσει ολόκληρη τη διάρκεια ζωής λειτουργίας της. Πρόκειται για το φυσικό γήρας και τη φθορά που μπορεί να υποστεί κάθε μπαταρία, λόγω δευτερευουσών χημικών αντιδράσεων, ακόμα κι αν αυτές παραμένουν ανενεργές.

Φορτιστής στένωσης φορτίου (Taper Charger): Πρόκειται για φορτιστή που χρησιμοποιεί ένα καθεστώς φόρτισης που επιτρέπει σχετικά υψηλό ρυθμο ρεύμα φόρτισης όταν η μπαταρία είναι σε κατάσταση χαμηλού φορτίου και «στενεύει» το ρεύμα (βραδεία φόρτιση) σε χαμηλότερους ρυθμούς όταν η μπαταρία πλησιάζει το μέγιστο της χωρητικότητάς της. Ένας τέτοιος φορτιστής μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την διατήρηση της μπαταρίας, απαλείφοντας τον κίνδυνο να ζημιώσουν τη μπαταρία, σε περίπτωση που παραμείνει συνδεδεμένος για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα μετά το πέρας της φόρτισης της μπαταρίας και δεν αλλάζει τα χαρακτηριστικά φόρτισής του αν η γραμμή τάσης αλλάξει.

Καταλύτης: Στην επιστήμη της χημείας, ο καταλύτης (catalyst) είναι μια ουσία που επιταχύνει μια χημική διαδικασία, αλλά δεν αφομοιώνεται από την αντίδραση. Λόγω αυτού, ο καταλύτης μπορεί να

ανακτηθεί χημικά αναλλοίωτος στο τέλος της εκάστοτε αντίδρασης στην οποία χρησιμοποιήθηκε για να την επιταχύνει.

7 ΠΗΓΕΣ

https://en.wikipedia.org/wiki/Alessandro_Volta

<http://www.dictionary.com/browse/voltaic>

https://en.wikipedia.org/wiki/Voltaic_pile

<http://www.grenetcell.com/Home.html>

https://en.wikipedia.org/wiki/Rechargeable_battery

<http://www.edisontechcenter.org/batteries.html>

https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Edison

<http://ethw.org/Batteries>

http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_1501_battery_history

https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_electric_vehicle

<http://www.edisontechcenter.org/ElectricCars.html>

http://evbatterymonitoring.com/batterybook2/Types_of_Lead-Acid_Batteries.htm

<http://educyclopedia.karadimov.info/library/battery.pdf>

<http://ecee.colorado.edu/~ecen4517/materials/Battery.pdf>

http://www.progressivedyn.com/battery_basics.html

<http://www.rpc.com.au/information/faq/batteries/glossary.html>

<http://vonwenzel.net/Battery/01.Type/index.html>

<https://www.frost.com/prod/servlet/market-insight-print.pag?docid=SBRD-575K2N>

<http://www.sure-power.com/2014/01/flooded-vs-sealed-rechargeable-batteries/>

<http://www.lesterelectrical.com/news/newsletters/2006feb01.PDF>

http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_the_lead_acid_battery

http://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries

http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_215_summary_table_of_nickel_based_batteries

<http://www.epectec.com/batteries/nickel-battery-technologies.html>

http://www.mpoweruk.com/nickel_hydrogen.htm

<http://www.mpoweruk.com/nimh.htm>

https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93zinc_battery

<https://chargedevs.com/newswire/powergenix-demonstrates-the-benefits-of-nickel-zinc-batteries-for-stop-start-and-auxiliary-applications/>

https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93metal_hydride_battery

<https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&ved=0ahUKewiMoNalutnUAhVlDZoKHZMsD8MQFghRMAU&url=http%3A%2F%2Fwww.rdrop.com%2Fev%2Fhybrid.pdf&usg=AFQjCNHLiKlyz5jitWYqpVMAFjh6zeDPKg>

<https://electronicspani.com/nickel-iron-battery/>

https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93iron_battery

http://www.iala-aism.org/wiki/dictionary/index.php/Taper_charge

<https://www.doityourself.com/stry/4-best-battery-charging-techniques>

<https://electronics.stackexchange.com/questions/11914/how-to-modify-a-taper-charger-of-lead-acid-batteries-to-be-a-constant-current-ch>

<http://www.globalspec.com/reference/67815/203279/chapter-27-vented-sintered-plate-nickel-cadmium-batteries>

<http://www.sbsbattery.com/products-services/by-product/batteries/nickel-cadmium-batteries-1/vrpp-series-ni-cad-valve-regulated-pocket-plate.html>

https://www.google.nl/search?q=capacity+retention+definition&rlz=1C1GGRV_enNL751NL751&oq=capacity+retention+&aqs=chrome.0.0j69i57j0l4.4603j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8

<http://www.cadmium.org/cadmium-applications/nickelcadmium-batteries>

<https://en.globtek.com/nimh-battery-safety-notes/>

<https://www.powerstream.com/NiMH.htm>

<http://www.candlepowerforums.com/vb/showthread.php?395935-What-does-CC-CV-and-dV-dt-stand-for>

<https://www.google.gr/search?q=negative+delta+voltage&oq=negative+delta+voltage+&aqs=chrome..69i57j69i60l2j0.12003j1j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

<http://www.freeway-batteries.com/faqs/what-causes-voltage-depression/>

<https://www.tamiyaclub.com/forum/index.php?/topic/47763-peak-charging-for-idiots/>

<http://whatis.techtarget.com/definition/battery-memory-effect>

http://opensourceecology.org/wiki/Nickel-Iron_Battery#Anode_Compound

<https://en.wikipedia.org/wiki/Ebonite#Applications>

<https://sweetbeacon.files.wordpress.com/2011/09/edison-electric-car-jan2011wpa.pdf>

<https://www.americanelements.com/cadmium-sponge-7440-43-9>

<https://www.chemicool.com/definition/catalyst.html>

https://en.wikipedia.org/wiki/Memory_effect

<https://www.sciencelearn.org.nz/resources/1733-metals-alloys-and-metal-compounds>

https://en.wikipedia.org/wiki/Alkaline_water_electrolysis

[https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel\(II\)_hydroxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel(II)_hydroxide)

<https://electronicspani.com/nickel-iron-battery/>

http://opensourceecology.org/wiki/Nickel-Iron_Battery/Chemistry

http://www.mpoweruk.com/nickel_iron.htm

<https://www.nickel-iron-battery.com/>

https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93iron_battery

<https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/4496>

http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_nickel_metal_hydride

<https://en.globtek.com/nimh-battery-safety-notes/>

http://www.e-radiocontrol.com.ar/en/?Baterias_Charger%2FCycler

<http://www.mpoweruk.com/chargers.htm>

<http://www.ti.com/lit/an/snva557/snva557.pdf>

http://www.gonzales.com.au/joe/projects/videolink2/video_link_2.htm

<https://patents.google.com/patent/EP1581590A1>

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nimh_disassembled.jpg

<https://circuitdigest.com/electronic-circuits/ni-cd-battery-charge-circuit>

http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells

<http://jes.ecsdl.org/content/160/8/A1031.abstract>

<https://ewi.org/ultrasonic-metal-welding-for-lithium-ion-battery-cells-2/>

<http://www.techinsights.com/Blog.aspx?id=27917288231&blogid=2147484418#sthash.mluSA01Q.dpbs>

<https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/material-matters/electrode-materials-for-lithium-ion-batteries.html>

<http://blogg.improveme.se/michaelcotter/2016/02/>

<http://www.cadex.com/en/batteries/safety-of-lithium-ion-batteries>

<http://www.electric-cars-are-for-girls.com/electric-car-batteries.html>

<https://cleantechnica.com/2016/01/06/a-tale-of-3-battery-packs/>

<http://www.tms.org/pubs/journals/jom/0809/daniel-0809.html>

http://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/li_ion_ev.html

<http://www.electric-cars-are-for-girls.com/lithium-polymer-batteries.html>

http://www.e-transportation.eu/catalog/category.php?id_category=10

<http://evworld.com/news.cfm?newsid=25277>

<http://lithiumbatteryresearch.com/Plating.php>

http://batteryuniversity.com/learn/article/electric_vehicle_ev

[https://unstats.un.org/unsd/trade/s_geneva2011/refdocs/RDs/Lithium-Ion%20Batteries%20\(Gereffi%20-%20May%202010\).pdf](https://unstats.un.org/unsd/trade/s_geneva2011/refdocs/RDs/Lithium-Ion%20Batteries%20(Gereffi%20-%20May%202010).pdf)

https://www.researchgate.net/profile/Noshin_Omar/publication/234162888_Internal_resistance_of_cells_of_lithium_battery_modules_with_FreedomCAR_model/links/55fe9b9208aeafc8ac80635e/Internal-resistance-of-cells-of-lithium-battery-modules-with-FreedomCAR-model.pdf

<https://www.youtube.com/watch?v=OFWCFefmvnM&t=1016s>

https://www.youtube.com/watch?v=L_wVCoMyh5E

<https://www.youtube.com/watch?v=DN7aA3-fxyk&t=444s>

<https://www.youtube.com/watch?v=nX1lYvssAZw>

<https://www.youtube.com/watch?v=dbP5k4RI5s8&t=1615s>

https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=iEmdBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Advances+in+battery+technologies+for+electric+vehicles+pdf&ots=zy2SqUmXNH&sig=FqPR7MSDrWgKS0_8sNQkYRUQ9EA&redir_esc=y#v=onepage&q=Advances%20in%20battery%20technologies%20for%20electric%20vehicles%20pdf&f=false

https://en.wikipedia.org/wiki/Electric-vehicle_battery

<https://eurobat.org/battery-technologies>

http://batteryuniversity.com/learn/article/electric_vehicle_ev

<http://www.popularmechanics.com/cars/hybrid-electric/a20657/making-batteries-better/>

<https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/495750>

<https://www.autoevolution.com/news/hybrids-plug-ins-and-electric-cars-what-batteries-are-best-104634.html>

<https://www.google.com/patents/US5744937>

<https://www.tesla.com/blog/bit-about-batteries>

<https://chargedevs.com/features/teslas-batteries-past-present-and-future/>

https://www.theccc.org.uk/archive/aws/IA&S/CCC%20battery%20cost_%20Element%20Energy%20report_March2012_Public.pdf

<https://www.psi.ch/media/memory-effect-now-also-found-in-lithium-ion-batteries>

http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf

<http://www.edisontechcenter.org/ElectricCars.html>

<https://www.sae.org/publications/books/content/pt-176/>

<https://www.osti.gov/biblio/1279448-progress-modeling-simulation-batteries>

<https://arxiv.org/pdf/1602.08910.pdf>

<https://spectrum.ieee.org/computing/software/modeling-and-simulation-for-meeting-the-challenges-of-battery-design>

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/94/1/012165/pdf>

<https://www.powerstream.com/NiMH.htm>

<http://www.candlepowerforums.com/vb/showthread.php?395935-What-does-CC-CV-and-dV-dt-stand-for>

<https://www.google.gr/search?q=negative+delta+voltage&oq=negative+delta+voltage+&ags=chrome..69i57i69i60l2j0.12003j1j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

<http://www.freeway-batteries.com/faqs/what-causes-voltage-depression/>

<https://www.tamiyaclub.com/forum/index.php?/topic/47763-peak-charging-for-idiots/>

[**http://whatis.techtarget.com/definition/battery-memory-effect**](http://whatis.techtarget.com/definition/battery-memory-effect)

<https://www.theguardian.com/sustainable-business/automakers-new-renewable-energy-investors-sustainable-cars>

https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=7cCAASTW6IQC&oi=fnd&pg=PA1&dq=automotive+industry+energy+solving&ots=vvYY2ZiVnN&sig=xagzjfjNmPcEL_5uarYOgzCfF8s&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false