



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – 210-7723655 – epminfo@power.ece.ntua.gr

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΑΡΧΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ (LI-ION)»**

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Γεωργίου Ι. Κελίδη

Επιβλέπων

Σταύρος Παπαθανασίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

(Υπογραφή)

.....

Γεώργιος Ι. Κελίδης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

© 2023 – All rights reserved.

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: «Αναγνώριση αρχών λειτουργίας και μηχανισμών γήρανσης μπαταριών τεχνολογίας ιόντων λιθίου (Li-ion)»

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: Γεώργιος Ι. Κελίδης

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Σταύρος Παπαθανασίου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ: 2022-2023

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η βιβλιογραφική ανασκόπηση και καταγραφή μηχανισμών εκτίμησης απώλειας ζωής μπαταριών τεχνολογίας ιόντων λιθίου (Li-ion) και η συγκριτική τους αξιολόγηση μέσω εφαρμογής σε διαφορετικά προφίλ λειτουργίας σταθμού μπαταριών. Αρχικά γίνεται αναφορά στις βασικές χρήσεις των μπαταριών λιθίου και στη σημασία της αξιοποίησής τους στο πλαίσιο συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με χρήση μπαταριών (Battery Energy Storage Systems – BESS). Στη συνέχεια γίνεται καταγραφή μηχανισμών γήρανσης που απαντώνται στη βιβλιογραφία. Έπειτα παρουσιάζεται αριθμός από μοντέλα γήρανσης μπαταριών λιθίου. Τα υπόψη μοντέλα εξετάζονται στη βιβλιογραφία συνήθως ενσωματωμένα σε ευρύτερα μοντέλα μείωσης κόστους και βελτιστοποίησης λειτουργίας. Τα μοντέλα γήρανσης χρησιμοποιούν συναρτήσεις που εκφράζουν την απώλεια ζωής ανά κύκλο, χαρακτηριστικά/προφίλ λειτουργίας και πειραματικά δεδομένα, με σκοπό την εκτίμηση της απώλειας ζωής μιας μπαταρίας.

Κατόπιν επεξεργασίας και ανάλυσης διαφορετικών προφίλ λειτουργίας σταθμών μπαταριών, έγινε εξαγωγή βασικών παραμέτρων αυτών. Οι παράμετροι αυτές, σε συνδυασμό με στοιχεία από τη βιβλιογραφία, χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής μπαταρίας. Τόσο στο στάδιο της ανάλυσης των προφίλ λειτουργίας, όσο και στο πλαίσιο χρήσης των μαθηματικών διατυπώσεων των μοντέλων, έγινε ευρεία χρήση γλώσσας προγραμματισμού MATLAB.

Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων και εξάγονται συμπεράσματα, που αφορούν τη σύγκλιση ή μη των αποτελεσμάτων μεταξύ τους, σε σχέση με τη δυσκολία ανάπτυξης και χρήσης εκάστου μοντέλου.

Λέξεις κλειδιά: Μείωση χωρητικότητας μπαταριών ιόντων λιθίου, μοντελοποίηση γήρανσης μπαταριών ιόντων λιθίου, βιωσιμότητα ενεργειακών επενδύσεων, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με χρήση μπαταριών, αποθήκευση ενέργειας, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), ενεργειακή μετάβαση.

POST-GRADUATE THESIS: «Identification of aging principles and mechanisms of lithium-ion (Li-ion) technology batteries»
STUDENT: Georgios I. Kelidis
SUPERVISOR: Stavros Papathanassiou, Professor N.T.U.A.
ACADEMIC YEAR: 2022-2023

Abstract

The object of this work is the review and recording of life loss estimation mechanisms for lithium-ion (Li-ion) technology batteries and their comparative evaluation through application to different battery station operating profiles. First, reference is made to the basic uses of lithium batteries and the importance of their utilization in the context of battery energy storage systems (BESS). Then aging mechanisms found in the literature are recorded. A number of lithium battery aging models are then presented. The models in question are considered in the literature usually integrated into broader cost reduction and operation optimization models. Aging models use functions expressing cycle life loss, operating characteristics/profiles and experimental data to estimate battery life loss.

After processing and analyzing different operating profiles of battery stations, their main parameters were extracted. These parameters, combined with data from the literature, were used to calculate battery life. Both in the stage of analyzing the operating profiles, and in the context of using the mathematical formulations of the models, MATLAB programming language was widely used.

Finally, the results are compared and conclusions are drawn, regarding the convergence or non-convergence of the results, in relation to the difficulty of developing and using each model.

Keywords: Li-ion battery capacity fade, Li-ion battery aging modeling, energy investment sustainability, battery energy storage systems (BESS), energy storage, renewable energy sources (RES), energy transition.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Σταύρο Παπαθανασίου, που μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα τόσο επίκαιρο και ενδιαφέρον θέμα.

Παράλληλα, ευχαριστώ τον κ. Γεώργιο Ψαρρό, διδάκτορα της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, για τις κατευθύνσεις που μου έδωσε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ κ. Ευάγγελο Χατζηστυλιανό, για τις συνεχείς συμβουλές του, την έγκαιρη επίλυση όλων των αποριών μου και για το διαρκές ενδιαφέρον του.

Τέλος, ευχαριστώ τη σύζυγό μου Χριστίνα, για την υποστήριξη, κατανόηση και υπομονή της.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 Κλιματική αλλαγή και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	10
1.2 Προκλήσεις αυξανόμενης διείσδυση ΑΠΕ	13
1.3 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας	15
1.4 Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση μπαταριών ιόντων λιθίου	19
1.5 Αντικείμενο μεταπτυχιακής εργασίας	22
1.6 Δομή μεταπτυχιακής εργασίας	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΜΠΑΤΑΡΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ (LI-ION)	24
2.1 Γενικά	24
2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα	25
2.2.1 Πλεονεκτήματα	25
2.2.2 Μειονεκτήματα	26
2.3 Χρήσεις μπαταριών ιόντων λιθίου	27
2.4 Μηχανισμοί γήρανσης	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΛΙΘΙΟΥ	31
3.1 Γενικά	31
3.2 Μοντέλα γήρανσης (<i>degradation models</i>)	32
3.2.1 Μοντέλο γήρανσης ημιεμπειρικό	33
3.2.2 Μοντέλο βάσει κύκλων	35
3.2.3 Μοντέλο γήρανσης σταθερό ανά μονάδα ενέργειας	36
3.2.4 Μοντέλο γήρανσης πρακτικό	37
3.2.5 Μοντέλο γήρανσης πολυπαραγοντικό	38
3.2.6 Μοντέλο γήρανσης κυρτό	39
3.2.7 Μοντέλο γήρανσης ενεργειακής διεκπεραιωτικής ικανότητας	40
3.2.8 Μοντέλο γήρανσης λόγω ισχύος	40
3.2.9 Μοντέλο γήρανσης βάθους εκφόρτισης κύκλων	41
3.2.10 Μοντέλο γήρανσης ενεργειακού επιπέδου	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ	44
4.1 Προφίλ λειτουργίας BESS που χρησιμοποιήθηκαν	44
4.2 Παραδοχές – ορισμοί – συμβάσεις	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΕΞΕΤΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΗΡΑΝΣΗΣ	48
5.1 Μοντέλο γήρανσης ημιεμπειρικό	49
5.1.1 <i>Cycle aging</i> (κυκλική γήρανση)	49
5.1.2 <i>Calendar aging</i> (ημερολογιακή γήρανση, βάσει παρελθόντος χρόνου)	54
5.1.3 <i>Cycle – calendar aging</i> (συνδ. κυκλικής και ημερολογιακής γήρανσης)	56
5.1.4 Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων ημιεμπειρικού μοντέλου	59
5.2 Μοντέλο βάσει κύκλων	62
5.3 Μοντέλο γήρανσης σταθερό ανά μονάδα ενέργειας	63
5.4 Μοντέλο γήρανσης πρακτικό	64
5.5 Μοντέλο γήρανσης πολυπαραγοντικό	66
5.6 Μοντέλο γήρανσης κυρτό	68
5.7 Μοντέλο γήρανσης ενεργειακής διεκπεραιωτικής ικανότητας	71
5.8 Μοντέλο γήρανσης λόγω ισχύος	71

5.9	Μοντέλο γήρανσης βάθους εκφόρτισης κύκλων	72
5.10	Μοντέλο γήρανσης ενεργειακού επιπέδου	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		74
6.1	Διαδικασία	74
6.1.1	Δυσκολία ανάπτυξης μοντέλου	75
6.1.2	Δυσκολία χρήσης μοντέλου	76
6.1.3	Σύγκριση	77
6.2	Συμπεράσματα	78
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		82

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Κλιματική αλλαγή και ΑΠΕ

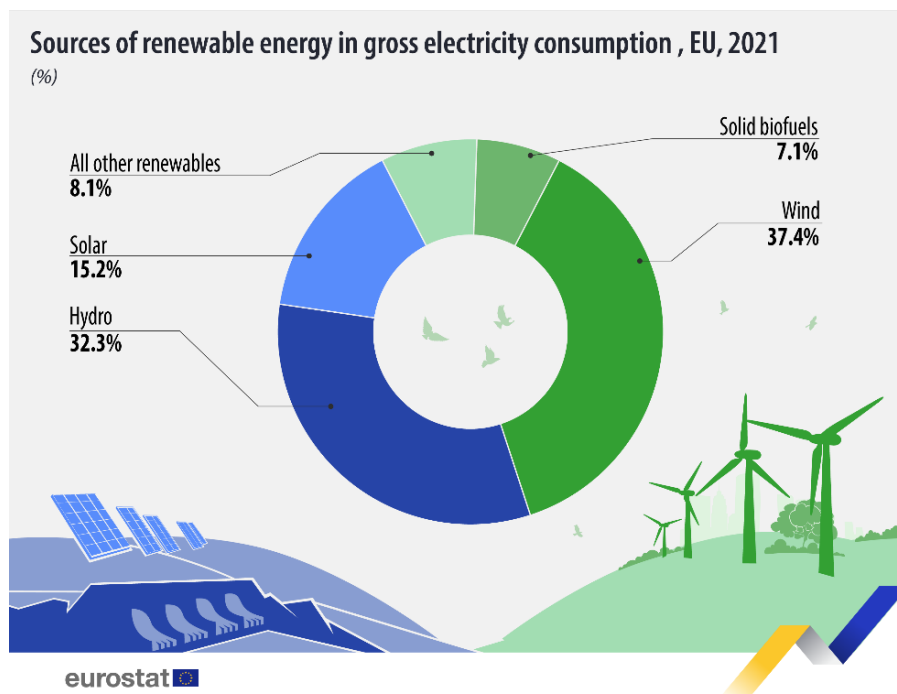
Η κλιματική αλλαγή αποτελεί μεγάλη πρόκληση στην εποχή μας, με τις επιπτώσεις της να είναι ολοένα και πιο ορατές παγκοσμίως. Όλες οι χώρες του πλανήτη, ανεξαρτήτως του μεριδίου τους στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, που αποτελούν βασική αιτία της ανθρωπογενούς θέρμανσης του πλανήτη, υφίστανται ήδη ή θα υποστούν μεσοπρόθεσμα τις επιπτώσεις της. Σε παγκόσμια κλίμακα, οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), μεταξύ αυτών και η Ελλάδα, βρίσκονται στην πρωτοπορία στην προσπάθεια αντιμετώπισης των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής. Στο πλαίσιο αυτό, τα κράτη – μέλη συνεργάζονται για την προώθηση και τη χρηματοδότηση δράσεων για το κλίμα..

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει υιοθετήσει φιλόδοξους στόχους για να επιτύχει κλιματική ουδετερότητα, συμμετέχοντας σε παγκόσμιες διασκέψεις για το κλίμα [1]. Στο πλαίσιο αυτό, το 2015 η Ένωση και όλα τα κράτη-μέλη υπέγραψαν και κύρωσαν τη Συμφωνία του Παρισιού για την κλιματική αλλαγή και το στόχο της για διατήρηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη σε ασφαλή επίπεδα. Η συμφωνία του Παρισιού περιλαμβάνει σχέδιο δράσης για τον περιορισμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη, όπως παρακάτω:

- Συγκράτηση της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη πολύ κάτω από τους 2°C άνω των προβιομηχανικών επιπέδων· προσπάθεια για περιορισμό στον 1,5°C.
- Ολοκληρωμένα εθνικά σχέδια δράσης από κάθε χώρα, με στόχο τη μείωση των εκπομπών τους.
- Ανά 5ετία κοινοποίηση των σχεδίων δράσης από κάθε χώρα, κάθε φορά και με πιο φιλόδοξους στόχους.
- Διαφάνεια και εποπτεία, με γνωστοποίηση από κάθε χώρα της προόδου επίτευξης των στόχων της.
- Παροχή χρηματοδότησης από τις ανεπτυγμένες χώρες προς τις αναπτυσσόμενες, ώστε να μειώσουν τις εκπομπές αλλά και να θωρακιστούν έναντι των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής.

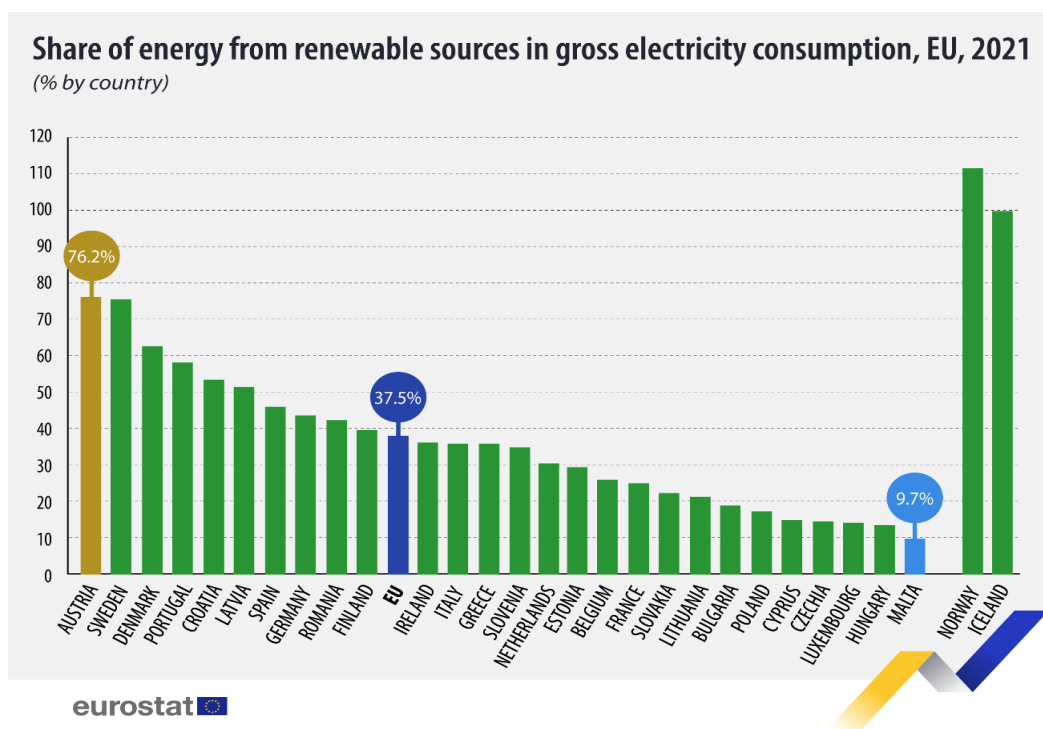
Η συμφωνία του Παρισιού άρχισε να ισχύει στις 4 Νοεμβρίου 2016, όταν εκπληρώθηκε η προϋπόθεση επικύρωσης από 55 τουλάχιστον χώρες που να αντιπροσωπεύουν τουλάχιστον το 55% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Τη συμφωνία έχουν επικυρώσει όλες οι χώρες της ΕΕ. Η επικύρωση της συμφωνίας σημαίνει τη διαμόρφωση πολιτικών και την ανάληψη δράσεων, ώστε η Ένωση να καταστεί σταδιακά η πρώτη κλιματικά ουδέτερη οικονομία και κοινωνία έως το 2050, με την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία να αποτελεί τη στρατηγική της. Αυτή περιλαμβάνει τη δέσμη μέτρων «Fit for 55»: Μια σειρά προτάσεων για την αναθεώρηση της νομοθεσίας όσον αφορά το κλίμα, την ενέργεια και τις μεταφορές και την ανάληψη νέων νομοθετικών πρωτοβουλιών για την ευθυγράμμιση της νομοθεσίας της ΕΕ με τους ενωσιακούς στόχους για το κλίμα.

Το Ευρωπαϊκό Νομοθέτημα για το Κλίμα [2] καθιστά νομική υποχρέωση για την ΕΕ τη μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Η Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση [3] θεσπίζει μέτρα για τη βελτίωση της εξοικονόμησης ενέργειας μέσω της αποδοτικότερης χρήσης των αποθεμάτων ενέργειας. Περιλαμβάνει αναθεωρημένο στόχο ενεργειακής απόδοσης 36% για την τελική κατανάλωση ενέργειας και 39% για την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, σε σύγκριση με τον αρχικό στόχο του 32.5%.



Σχήμα 1.1: Πηγές ΑΠΕ στη χονδρική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας 2021 [5]

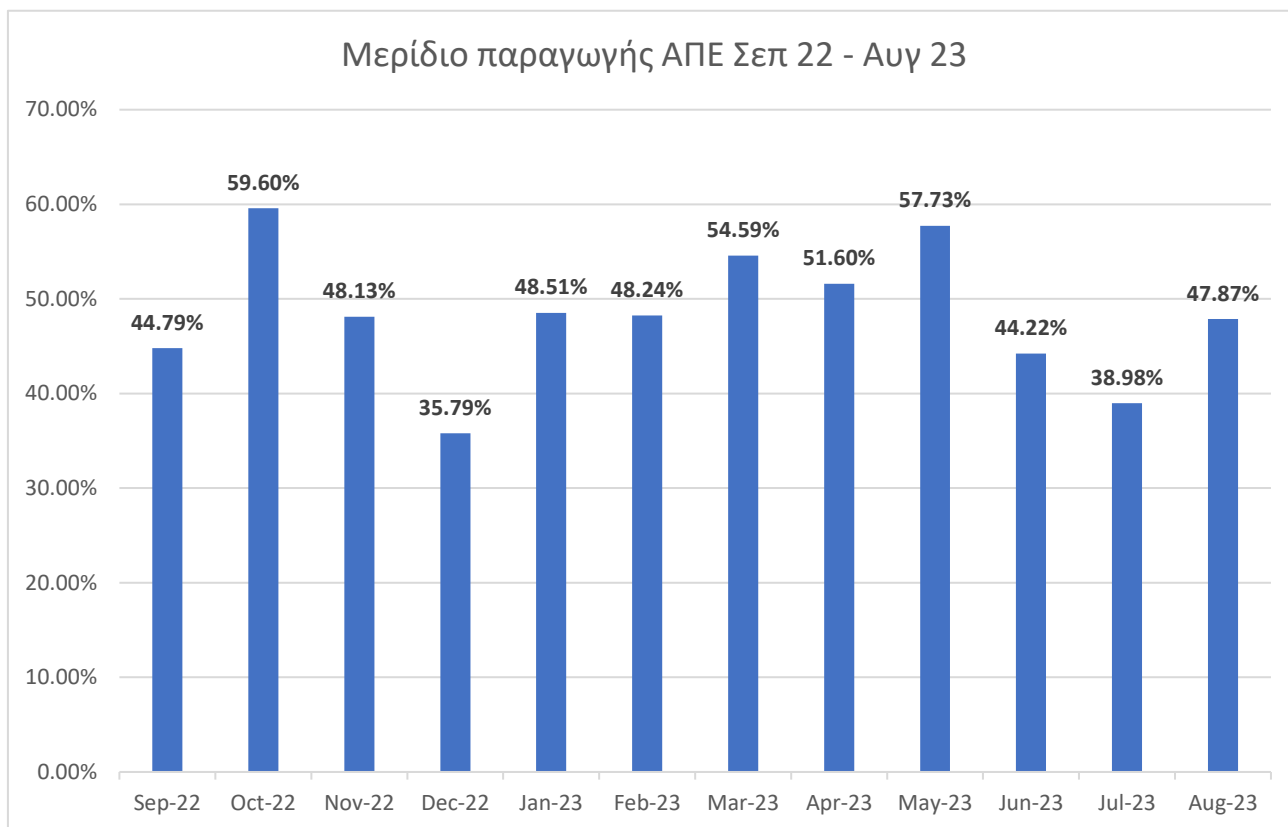
Παράλληλα, η ΕΕ, στοχεύοντας στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και δεδομένης της συμμετοχής της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις εκπομπές, λόγω καύσης ορυκτών καυσίμων, προωθεί πολιτικές και μοχλεύει σημαντικούς οικονομικούς πόρους προς την κατεύθυνση της αυξανόμενης διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Στο πλαίσιο αυτό εκδόθηκε η Οδηγία για τις ΑΠΕ [4], που αποσκοπεί στην αύξηση του μεριδίου τους στην οικονομία της ΕΕ. Περιλαμβάνει αναθεωρημένο στόχο μεριδίου 40% έως το 2030, έναντι αρχικού στόχου 32%. Στα σχήματα 1.1 και 1.2 φαίνεται η κατανομή των πηγών ΑΠΕ στη χονδρική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ και το μερίδιο ΑΠΕ στη χονδρική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά χώρα, για το έτος 2021.



Σχήμα 1.2: Μερίδιο ΑΠΕ στη χονδρική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά χώρα, 2021 [5]

Η διείσδυση των ΑΠΕ συμβάλλει στην απανθρακοποίηση του δικτύου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [6] και θα συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των εκπομπών ρύπων, ή ακόμα και στο μηδενισμό τους, εφόσον καταστούν τεχνολογίες μηδενικού ανθρακικού αποτυπώματος (zero carbon). Μακροπρόθεσμα, εκτιμάται ότι θα συμβάλλουν στο μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, της υπερθέρμανσης του πλανήτη και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Οι γεωγραφικές και κλιματολογικές συνθήκες στην Ελλάδα την καθιστούν κατάλληλη για ευρεία διείσδυση ΑΠΕ. Ενδεικτικά, κατά το διάστημα Σεπ 22 – Αυγ 23, το μερίδιο της παραγωγής ΑΠΕ στην Ελλάδα βρίσκεται σε σταθερά υψηλό επίπεδα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3.



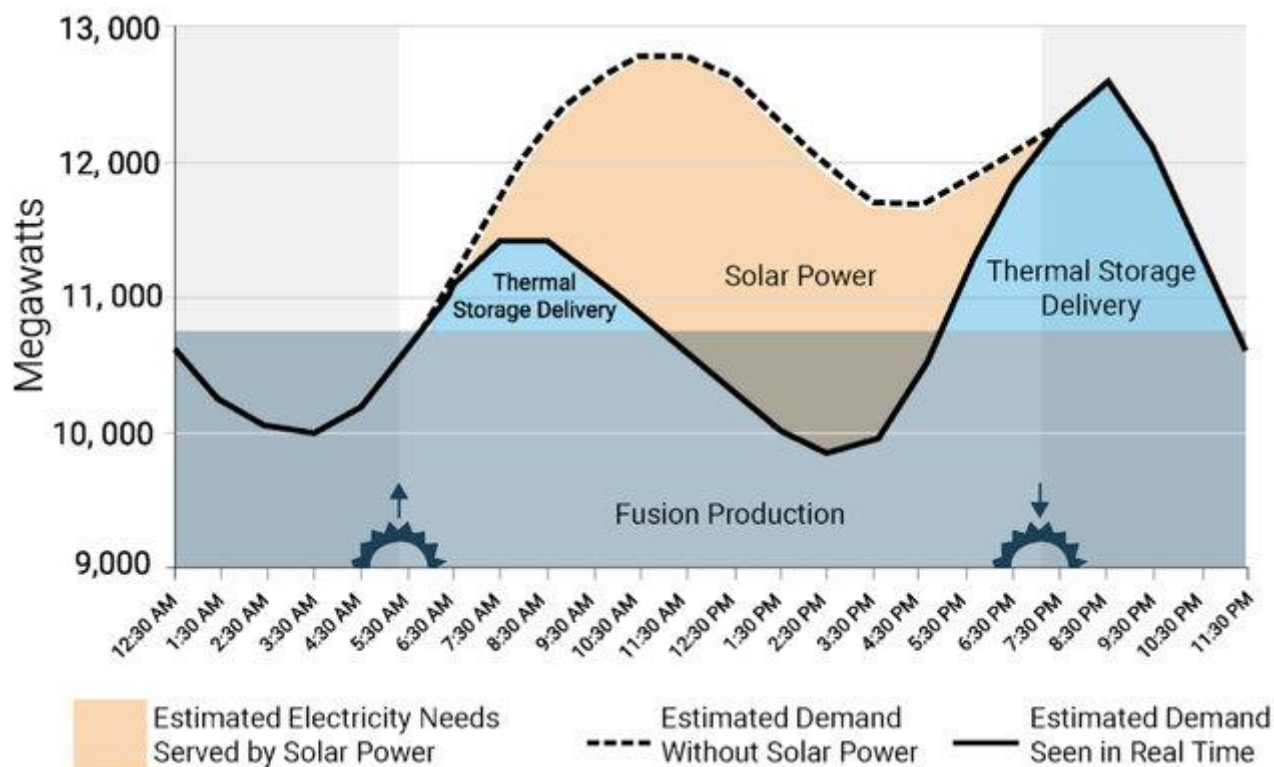
Σχήμα 1.3: Μερίδιο παραγωγής ΑΠΕ στην Ελλάδα Σεπ 22 – Αυγ 23 [7]

1.2 Προκλήσεις αυξανόμενης διείσδυση ΑΠΕ

Η αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα αναδεικνύει νέες προκλήσεις για τους διαχειριστές των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Λόγω της στοχαστικότητας και του απρόβλεπτου που τις χαρακτηρίζει, είναι απαραίτητη η μέριμνα για την ευστάθεια του συστήματος, σε περίπτωση μη επάρκειας κάλυψης του φορτίου από ΑΠΕ. Το πρόβλημα αυτό απαιτεί πολυπαραγοντική προσέγγιση, λαμβάνοντας υπόψη τα όρια λειτουργίας των συμβατικών μονάδων παραγωγής. Σε κάθε περίπτωση, μέχρι την επίλυσή του, δεν είναι δυνατή η πλήρης ανεξάρτηση από τη συμβατική ηλεκτροπαραγωγή, ήτοι με χρήση ορυκτών καυσίμων.

Μια άλλη πρόκληση αποτελεί η αντιμετώπιση της υπερπροσφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [8], δηλαδή συνθήκες υπέρβασης της συνολικής ζήτησης (φορτίο) από την προσφορά (παραγωγή). Για παράδειγμα, όπως έχει στο παρελθόν παρατηρηθεί, σε ημέρες κατά τις οποίες συνδυάζονται μεγάλη ηλιοφάνεια, ισχυροί άνεμοι και χαμηλό σχετικά φορτίο, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δύναται να ξεπεράσει την κατανάλωση. Η αντιμετώπιση της υπερπροσφοράς είναι κρίσιμης σημασίας για την

ευστάθεια του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, διότι τίθεται σε κίνδυνο η εξισορρόπηση παραγωγής – φορτίου. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί η υπερπροσφορά ηλεκτρικής ενέργειας λόγω παραγωγής από φωτοβολταϊκά: η μέγιστη παραγωγή λαμβάνει χώρα κατά τις μεσημβρινές ώρες, ωστόσο το μέγιστο φορτίο ζητείται από το σύστημα κατά τις απογευματινές – βραδινές ώρες. Υπάρχει συνεπώς μια χρονική υστέρηση της ζήτησης ως προς την προσφορά, η οποία αποτυπώνεται σε διάγραμμα με την ονομασία «duck curve», λόγω του χαρακτηριστικού του σχήματος (σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4: Πρόβλεψη ζήτησης ISO New England [9]

Η υπερπροσφορά χρήζει αντιμετώπισης, προκειμένου να εξασφαλισθούν η ευστάθεια και η αξιοπιστία του συστήματος. Πιθανοί τρόποι αντιμετώπισης είναι:

- Η γεωγραφική επέκταση του δικτύου σε άλλες περιοχές, που θα επιτύχει αντίστοιχη αύξηση της ζήτησης.
- Η επέκταση της ηλεκτροκίνησης, για την απορρόφηση της υπερπροσφοράς ενέργειας από την φόρτιση των υπόψη οχημάτων.
- Η ενεργειακή διαχείριση με μετατόπιση φορτίου, μέσω π.χ. θέσπισης κινήτρων στους πελάτες για κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους όπου αναμένεται υπερπροσφορά ενέργειας.

- Η προσαρμογή των μονάδων αιχμής, ώστε να ακολουθούν πιο αποτελεσματικά τις μεταβολές στο φορτίο.
- Η αύξηση της αποθήκευσης ενέργειας, με την οποία είναι δυνατή η μετατόπιση (shift) της πλεονάζουσας ενέργειας από χρονική περίοδο χαμηλού φορτίου, σε χρονική περίοδο υψηλού φορτίου, δηλαδή όταν θα είναι απαραίτητη στο σύστημα. Ο ρόλος της αποθήκευσης ενέργειας περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

1.3 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας αποκτά ολοένα και μεγαλύτερο ρόλο σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, όσο αυξάνεται η διείσδυση των ΑΠΕ στο μίγμα της ηλεκτροπαραγωγής. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται ευρέως στις περισσότερες χώρες της Ευρώπης και της Αμερικής, χάρις στα οικονομικά και τεχνικά πλεονεκτήματα που προσφέρει [10]. Είναι κατά συνέπεια άρρηκτα συνδεδεμένη με την ενεργειακή μετάβαση, στο πλαίσιο επίτευξης κλιματικής ουδετερότητας στην ηλεκτροπαραγωγή. Βασική της λειτουργία είναι η απορρόφηση και αποθήκευση ενέργειας, σε χρόνο που αυτή δεν είναι δυνατόν να απορροφηθεί από το δίκτυο και η απόδοσή της σε αυτό, όταν θα παραστεί ανάγκη. Με άλλα λόγια, η αποθήκευση επιτυγχάνει τη (χρονική) μετατόπιση (shifting) της παραγωγής στη ζήτηση. Ο μηχανισμός με τον οποίο το πετυχαίνει είναι η διαδοχική μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε άλλη μορφή, κατά το στάδιο της αποθήκευσης και η επαναφορά της στην αρχική της μορφή, κατά το στάδιο της έγχυσης στο δίκτυο.

Η σημασία της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έγκειται στη δυνατότητα παροχής των παρακάτω υπηρεσιών:

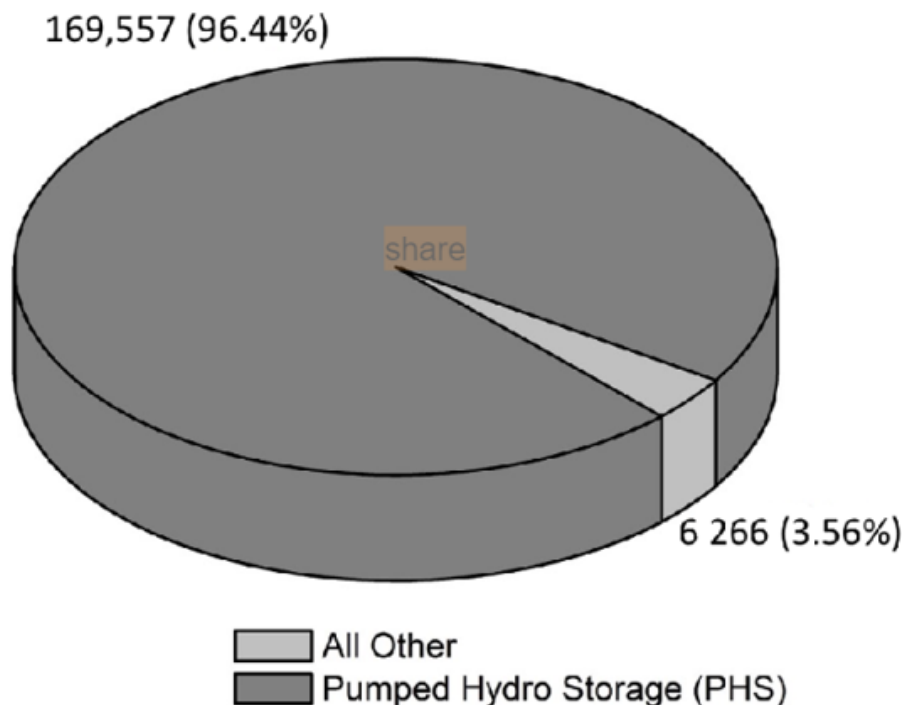
- Μετατόπιση ενέργειας (shifting): Η μετατόπιση της πλεονάζουσας ενέργειας από χρονική περίοδο χαμηλού φορτίου, σε χρονική περίοδο υψηλού φορτίου, δηλαδή όταν θα είναι απαραίτητη στο σύστημα (αποδέσμευση παραγωγής – ζήτησης).
- Αντιμετώπιση αιχμών (peak shaving): Η έγχυση ενέργειας από έναν σταθμό αποθήκευσης στο δίκτυο δίνει τη δυνατότητα προσωρινής μείωσης της παραγωγής. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η δημιουργία απότομων αιχμών στο φορτίο, με αποτέλεσμα την αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος.

- Μείωση απωλειών συστήματος: Οι σταθμοί αποθήκευσης απορροφούν ενέργεια από σταθμούς ΑΠΕ που ειδάλλως θα αποκόπτονταν, δίνοντας τη δυνατότητα αξιοποίησης ενέργειας που διαφορετικά θα χανόταν.
- Σταθεροποίηση της λειτουργίας έξυπνων δικτύων (smart grids), μέσω της ευελιξίας που προσφέρουν και υποστήριξη διεσπαρμένης παραγωγής.
- Συμμετοχή στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και καθορισμός τιμών.
- Εξασφάλιση ποιότητας ισχύος και αξιοπιστίας συστήματος.
- Έλεγχος αέργου ισχύος.
- Ρύθμιση συχνότητας και τάσης.
- Αντιμετώπιση μεταβατικών ρευμάτων.
- Λειτουργία εφεδρείας και αιχμής, για την κάλυψη απότομων αυξήσεων φορτίου. Παράλληλα μειώνεται η ανάγκη συμβατικών μονάδων εφεδρείας.
- Προσφορά αυξημένης χωρητικότητας στο σύστημα.
- Λειτουργία ως σύστημα αδιάλειπτης ισχύος σε επίπεδο δικτύου.

Η παλαιότερη και πλέον χρησιμοποιούμενη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας είναι η αντλησιοταμίευση, η οποία αξιοποιεί υδροηλεκτρικά έργα. Συνίσταται στην άντληση ύδατος από έναν ταμιευτήρα σε έναν δεύτερο, σε υψηλότερο επίπεδο, αποθηκεύοντας με αυτό τον τρόπο ενέργεια, υπό μορφή δυναμικής ενέργειας. Η ενέργεια θα αποδοθεί στο σύστημα σε μεταγενέστερο χρόνο με την αντίστροφη διαδικασία, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια από υδροστροβίλους. Η αντλησιοταμίευση κατέχει δεσπόζουσα θέση παγκοσμίως στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, με μερίδιο άνω του 96% [11]. Αποτελεί τεχνολογία μηχανικής αποθήκευσης ενέργειας.

Άλλες τεχνολογίες μηχανικής αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν η αποθήκευση με συμπιεσμένο αέρα και η αποθήκευση σε σφονδύλους. Η μεν πρώτη χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια για να συμπιέσει αέρα (φόρτιση), ο οποίος σε επιθυμητό χρόνο αποσυμπιέζεται (αποφόρτιση), περιστρέφοντας αεριοστροβίλους και παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Κατά την αποθήκευση σε σφονδύλους, η ηλεκτρική ενέργεια περιστρέφει μία ηλεκτρική μηχανή, προσδίδοντάς της κινητική ενέργεια (φόρτιση), η οποία με αντίστροφη διαδικασία (αποφόρτιση) αποδίδεται και πάλι ως

ηλεκτρική. Και οι δύο τεχνολογίες παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματα της άμεσης απόκρισης, της αυξημένης απόδοσης και των χαμηλών ή μηδενικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ωστόσο βρίσκονται ακόμα μακριά από ευρεία χρήση.



Σχήμα 1.5: Παγκόσμιο μερίδιο αντλιοσταμείωσης στην αποθήκευση ενέργειας [11]

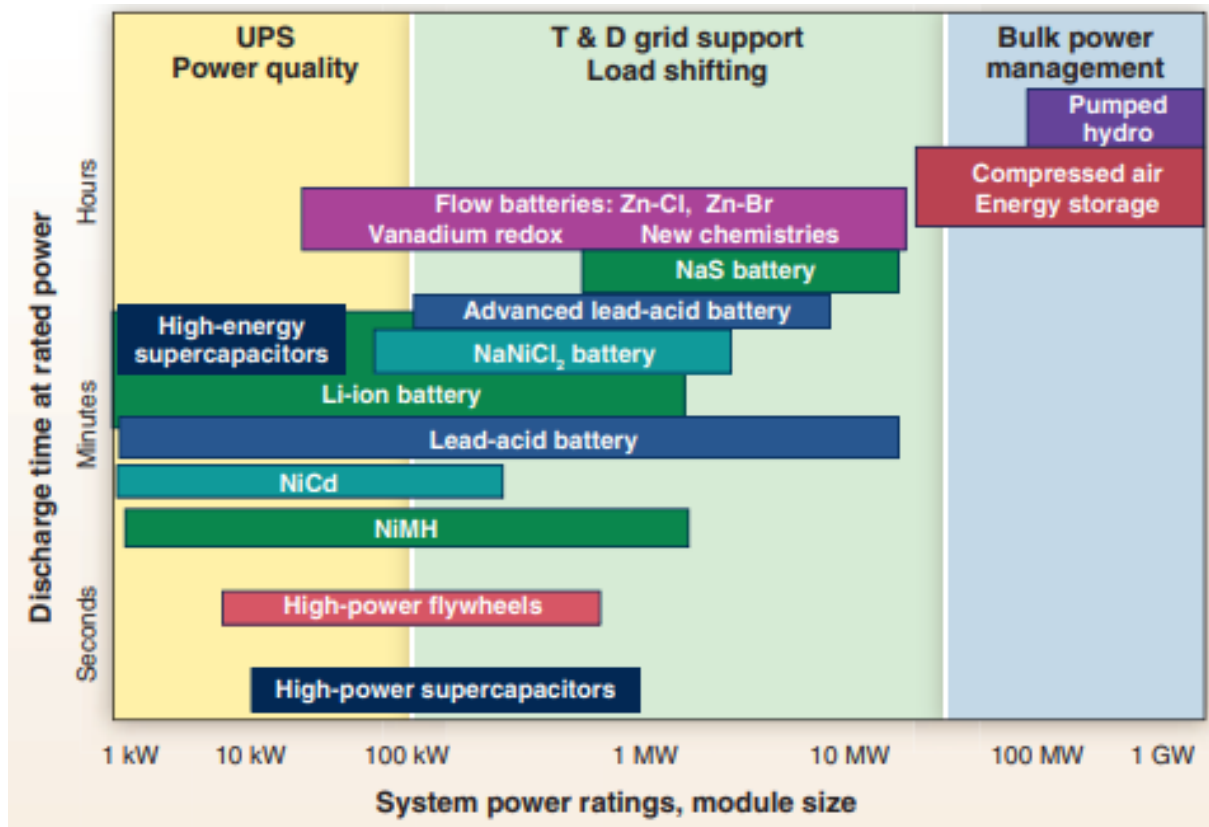
Στην κατηγορία των χημικών μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας βρίσκουμε την αποθήκευση ενέργειας με υδρογόνο: Ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για την ηλεκτρόλυση νερού και την παραγωγή υδρογόνου. Με την αντίστροφη διαδικασία, το υδρογόνο αντιδρά με οξυγόνο και παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι στην ΕΕ δίνεται βαρύτητα και ώθηση στην ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης με χρήση υδρογόνου, στο πλαίσιο της Στρατηγικής της ΕΕ για το υδρογόνο [12]. Μια άλλη κατηγορία τεχνολογιών αποθήκευσης είναι οι θερμικές μέθοδοι. Κατά την αποθήκευση ενέργειας με άντληση θερμότητας, γίνεται χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ 2 θερμικών δεξαμενών (φόρτιση). Αντιστρόφως, με τη μεταφορά θερμότητας προς την ψυχρή δεξαμενή παράγεται μηχανική ενέργεια, η οποία περιστρέφει μία γεννήτρια (αποφόρτιση). Οι θερμικές μέθοδοι δεν έχουν εμπορική εφαρμογή, λόγω χαμηλού βαθμού απόδοσης αλλά και χαμηλού βαθμού ωρίμανσης της τεχνολογίας.

Στην κατηγορία των ηλεκτρικών μεθόδων αποθήκευσης εμπίπτουν οι υπερπυκνωτές και η υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας. Σημαντικό πλεονέκτημά τους η γρήγορη απόκριση και ο μεγάλος αριθμός κύκλων ζωής (10.000)

Τελευταία κατηγορία είναι οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι αποθήκευσης, δηλαδή οι μπαταρίες. Ανεξαρτήτως τύπου, η αρχή λειτουργίας μιας μπαταρίας είναι η μεταφορά ιόντων μεταξύ 2 πλακών/ηλεκτροδίων, παρουσία ηλεκτρολύτη και κάποιου διαχωριστικού υλικού, για την αποφυγή επαφής μεταξύ των πλακών/ηλεκτροδίων. Το ηλεκτρικό ρεύμα φορτίζει και αποφορτίζει τις πλάκες, κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση αντίστοιχα. Παρακάτω αναφέρονται οι βασικές τεχνολογίες μπαταριών:

- Μολύβδου οξέος (lead-acid batteries): Η οικονομικότερη τεχνολογία μπαταρίας. Χρησιμοποιείται σε πλείστες εφαρμογές, μεταξύ των οποίων και ως μπαταρίες SLI οχημάτων. Παρουσιάζει μικρό αριθμό κύκλων ζωής και σχετικά χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα.
- Νικελίου – καδμίου (Ni-Cd Batteries): Προσφέρει σημαντικό αριθμό κύκλων ζωής και καλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από τις μολύβδου-οξέος. Ωστόσο η χρήση της έχει απαγορευθεί και περιοριστεί σε στρατιωτικές εφαρμογές, λόγω της τοξικότητας του καδμίου.
- Νικελίου – μετάλλου του υδριδίου (NiMH Batteries): Αποτελεί βελτιωμένη εκδοχή των μπαταριών νικελίου – καδμίου, παρουσιάζοντας μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα.
- Θείου – νατρίου (NaS Batteries): Παρουσιάζει μεγάλο πλήθος κύκλων και μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα, με αυξημένο παράλληλα κόστος.
- Ιόντων λιθίου: Παρουσιάζει μεγάλη διάρκεια ζωής και υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Έχει καταστεί κυρίαρχη στην αγορά των ηλεκτροκίνητων μεταφορών και των ηλεκτρονικών συσκευών. Η μπαταρία λιθίου παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2.

Στο σχήμα 1.6 γίνεται μια ποιοτική σύγκριση τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, ως προς τους χρόνους εκφόρτισης και την ονομαστική ισχύ.



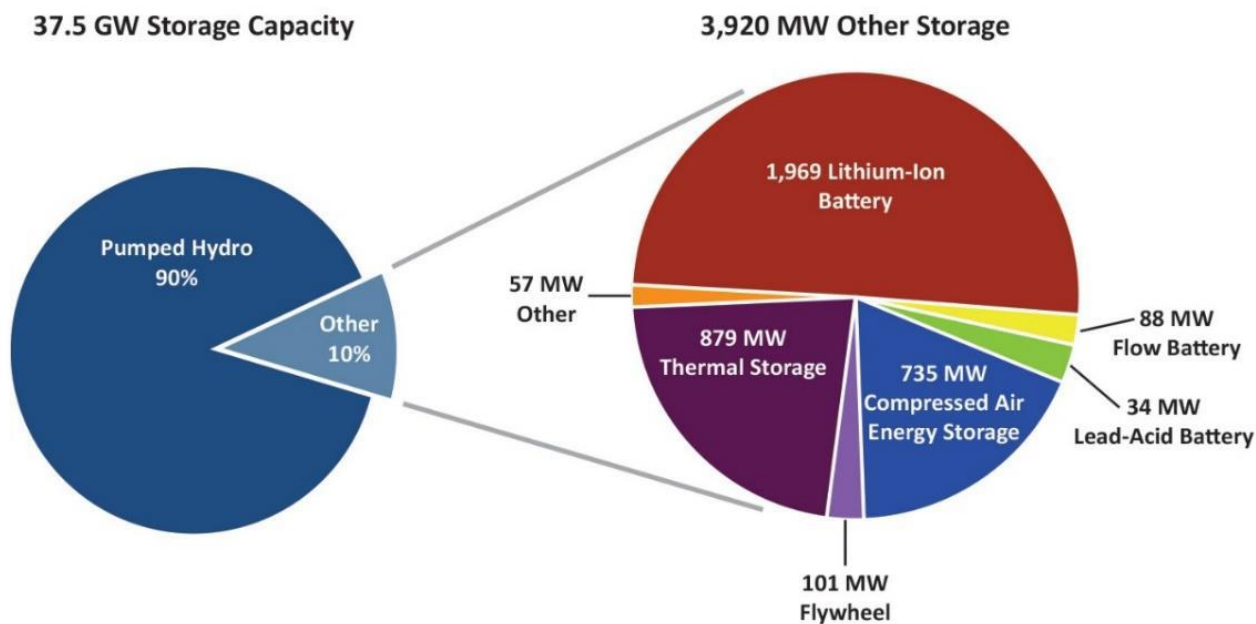
Σχήμα 1.6: Σύγκριση τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας [13]

1.4 Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση μπαταριών ιόντων λιθίου

Όπως έχει αναφερθεί, υπάρχουν διαφορετικές τεχνολογικές λύσεις για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και έκαστη παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το μεγάλο πλεονέκτημα των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση μπαταριών (Battery Energy Storage Systems – BESS) είναι ότι η τεχνολογία των μπαταριών βρίσκεται σε προχωρημένο επίπεδο ωριμότητας, καθώς έχει δοκιμαστεί στην αγορά εδώ και πολλές δεκαετίες, τόσο για ελαφριά, όσο και για βαριά χρήση. Ειδικά δε στην περίπτωση χρήσης μπαταριών λιθίου, η οποία είναι η επικρατούσα τεχνολογία μεταξύ των μπαταριών για αποθήκευση ενέργειας (περίπτωση η οποία εξετάζεται στην παρούσα εργασία) τα πλεονεκτήματα είναι περισσότερα: υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, μεγάλη διάρκεια ζωής, αντοχή σε βαθιές εκφορτίσεις, κόστος που διαρκώς μειώνεται.

Οι BESS έχουν τη δυνατότητα διαμόρφωσης για εξατομικευμένες ανάγκες πελατών, εύκολης ενσωμάτωσης σε υπάρχοντα δίκτυα και εύκολης κλιμακωσιμότητας. Η εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της μπαταρίας για την άμεση έγχυση ισχύος στο δίκτυο. Παρά το συγκριτικά υψηλότερο κόστος των μπαταριών λιθίου, διαχειριστές δικτύων αναπτύσσουν

μπαταρίες ιόντων λιθίου για αποθήκευση ενέργειας σε επίπεδο δικτύου, λόγω των πλεονεκτημάτων τους έναντι των λοιπών τεχνολογιών μπαταριών. Επιπρόσθετα, αναμένεται σημαντική πτώση του κόστους αποθήκευσης με χρήση μπαταριών ιόντων λιθίου [14]. Στο σχήμα 1.7 φαίνεται η δεσπόζουσα θέση της αντλησιοταμίευσης στην αποθήκευση ενέργειας σε ΗΠΑ – Καναδά με μερίδιο 90%, καθώς και η κυρίαρχη θέση της αποθήκευσης με χρήση μπαταριών ιόντων λιθίου εντός του υπόλοιπου 10%.



Σχήμα 1.7: Χωρητικότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας ΗΠΑ-Καναδά [15]

Οι μπαταρίες δεν καταναλώνουν καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ παράλληλα έχουν αμελητέο κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Όμως το κόστος αντικατάστασης εξοπλισμού και το κόστος κεφαλαίου είναι σημαντικά μεγαλύτερα από το κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Το γεγονός αυτό είναι σημαντικό, δεδομένου ότι οι μπαταρίες δεν έχουν τη δυνατότητα αέναης λειτουργίας και ο αριθμός φορτίσεων – εκφορτίσεων είναι σε κάθε περίπτωση πεπερασμένος. Αυτό οφείλεται σε μηχανισμούς που προκαλούν υποβάθμιση της χωρητικότητάς τους (capacity fade), που στο εξής θα ονομάζουμε «γήρανση». Έχει καταγραφεί πλήθος από μηχανισμούς γήρανσης, όπως το βάθος εκφόρτισης, το επίπεδο φόρτισης, η θερμοκρασία λειτουργίας, οι ρυθμοί φόρτισης/αποφόρτισης, ο παρελθών χρόνος, οι οποίοι περιγράφονται στο κεφάλαιο 2.

Αν η γήρανση δεν ληφθεί υπόψη από τον σχεδιαστή του BESS, η διάρκεια της ζωής των μπαταριών θα είναι χαμηλότερη της προσδόκιμης και σχετικά σύντομη. Εφόσον όμως ο σχεδιαστής και ο διαχειριστής του BESS ενδιαφέρονται για τη βέλτιστη τεχνικοοικονομικά αξιοποίηση των μπαταριών,

δηλαδή για την κατά το δυνατόν οικονομικά συμφέρουσα και προσοδοφόρα λειτουργία τους, θα πρέπει κατά τη σχεδίαση του συστήματος να λαμβάνουν υπόψη την απώλεια ζωής των μπαταριών, με στόχο διττό:

- Την εκτίμηση του χρόνου αντικατάστασης.

Η γήρανση των μπαταριών αποτελεί σημαντικό στοιχείο της ανάλυσης για την οικονομική βιωσιμότητα μιας επένδυση BESS. Αρχικά, ο ακριβής υπολογισμός της γήρανσης των μπαταριών μας δίνει μια εκτίμηση για το πότε η χωρητικότητά τους θα πέσει κάτω από ένα ορισμένο κατώφλι, το οποίο πρακτικά θα σημαίνει ότι χρήζουν αντικατάστασης. Ο χρόνος αντικατάστασης είναι σημαντικός για την οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης, τόσο για τον υπολογισμό της καθαρής παρούσας αξίας (Net Present Value - NPV) αυτής, όσο και για τον υπολογισμό του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (Internal Rate of Return - IRR).

- Την επιλογή προφίλ χρήσης που να βελτιστοποιεί τη λειτουργία του BESS.

Ένας BESS, δεδομένης της ευελιξίας και του μεγάλου πλήθους υπηρεσιών που δύναται να προσφέρει στους πελάτες, μπορεί να αξιοποιηθεί οικονομικά με τρόπο που να εξασφαλίζει στο διαχειριστή σημαντικό κέρδος. Η επιλογή προφίλ λειτουργίας ενδέχεται να είναι οικονομικά συμφέρουσα για μία προσφερόμενη υπηρεσία, αλλά λιγότερο συμφέρουσα για μια άλλη. Απαιτούνται λοιπόν μελέτη, σταθμίσεις, trade-offs και πολυπαραγοντική προσέγγιση, ώστε να επιλεγεί το τεχνοοικονομικά βέλτιστο προφίλ λειτουργίας του BESS. Για παράδειγμα, λειτουργώντας πιο συντηρητικά έναν BESS και προκαλώντας μικρότερη καταπόνηση στις μπαταρίες, ενδεχομένως το βραχυπρόθεσμο κέρδος να είναι μικρότερο, αλλά μακροπρόθεσμα να κερδίζει από τη σημαντική αύξηση της διάρκειας ζωής των μπαταριών και την επιχειρησιακή τους χρήση για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Η χρήση του μοντέλου θα δώσει μια αναπαράσταση της βέλτιστης λειτουργίας του BESS, από την εφαρμογή της οποίας μπορεί να επωφεληθούν ο σχεδιαστής και ο διαχειριστής του BESS. Θα βοηθήσει στην ανάπτυξη έξυπνων στρατηγικών [14], που θα στοχεύουν στο κέρδος ή/και στην εξοικονόμηση κόστους.

Πέρα από τα παραπάνω, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι η μπαταρία δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως αναλώσιμο. Πολλές συνθέσεις μπαταριών απαιτούν σπάνια υλικά (π.χ. κοβάλτιο, νικέλιο) και η διαχείρισή τους πρέπει να γίνεται με τρόπο προσεκτικό. Επομένως η μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής βελτιώνει και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα της επένδυσης [16]

Καλούνται λοιπόν οι σχεδιαστές και οι διαχειριστές του BESS ή/και του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να καταστρώσουν και να επιλύσουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης της λειτουργίας του σταθμού. Το πρόβλημα αυτό θα περιλαμβάνει στοιχεία που αφορούν την αγορά ενέργειας εν γένει, παραμέτρους των δικτύων και των γραμμών, τιμές ηλεκτρικής ενέργειας κ.ά. Σε κάθε περίπτωση όμως, θα πρέπει να έχουν ενσωματωμένο κάποιο μοντέλο γήρανσης μπαταρίας, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η γήρανση κατά τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του BESS. Το μοντέλο γήρανσης που θα επιλεγεί δύναται να είναι λιγότερο ή περισσότερο πολύπλοκο, αλλά σε κάθε περίπτωση η ενσωμάτωση και αξιοποίησή του θα επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής των μπαταριών.

Η μοντελοποίηση της γήρανσης αποτελεί διαδικασία εξελιγμένη, λόγω των πολλών παραγόντων που την προκαλούν και παρουσιάζει διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας. Ένα μοντέλο πολύπλοκο θα δώσει πιο ακριβείς εκτιμήσεις που θα βελτιστοποιήσουν τη λειτουργία του BESS, ωστόσο θα προσθέσει υπολογιστικές απαιτήσεις, ιδίως σε επίπεδο δικτύου. Αντίθετα, ένα απλό μοντέλο θα δώσει γρήγορα εκτιμήσεις, οι οποίες θα υπολείπονται σε ακρίβεια. Τα μοντέλα βελτιστοποίησης μπορεί να είναι γραμμικά, μη γραμμικά, με χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης, μοντέλα δυναμικού προγραμματισμού, μοντέλα βασισμένα στη φυσική της μπαταρίας.

1.5 Αντικείμενο μεταπτυχιακής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η βιβλιογραφική ανασκόπηση και καταγραφή μηχανισμών εκτίμησης απώλειας ζωής μπαταριών τεχνολογίας ιόντων λιθίου (Li-ion) και η συγκριτική τους αξιολόγηση μέσω εφαρμογής σε διαφορετικά προφίλ λειτουργίας σταθμού μπαταριών. Τα μοντέλα γήρανσης που εξετάζονται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας έχουν διαφορετικά επίπεδα δυσκολίας ανάπτυξης ή/και χρήσης. Κάποια από τα μοντέλα χρησιμοποιούν συναρτήσεις που εκφράζουν την απώλεια ζωής ανά κύκλο (stress models) και έχουν διάφορους τύπους, με πλέον συνηθέστερες την εκθετική και την πολυωνυμική. Χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής μπαταριών είτε ως έχουν, είτε κατόπιν περαιτέρω επεξεργασίας ή/και ενσωμάτωσης σε ευρύτερα μοντέλα. Κάποια άλλα μοντέλα χρησιμοποιούν κυρίως χαρακτηριστικά χρήσης και πειραματικά δεδομένα μπαταριών, για τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής. Η παρουσίαση και εξέταση των μοντέλων γίνεται στα κεφάλαια 3 και 5 αντίστοιχα.

Η ακριβής μοντελοποίηση της γήρανσης της μπαταρίας είναι ιδιαίτερα σημαντική στο σχεδιασμό αποθήκευσης ενέργειας. Στην κατεύθυνση αυτή έχουν αναπτυχθεί μοντέλα γήρανσης για την πρόβλεψη της απόδοσης μπαταριών λιθίου, εστιάζοντας κυρίως στον υπολογισμό του χρόνου ζωής τους. Τα μοντέλα ενσωματώνονται στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός σταθμού μπαταριών,

ενός δικτύου παροχής ενέργειας ή και γενικότερα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Τελικός σκοπός είναι ο προσδιορισμός του κόστους της γήρανσης των μπαταριών, μέσω της εκτίμησης της προσδόκιμης ζωής τους, που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την εκτίμηση και αξιολόγηση επενδύσεων. Επιπρόσθετα, σκοπός είναι η υιοθέτηση προφίλ χρήσης, όπως αυτά υποδεικνύονται από τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα, για βελτιστοποίηση της λειτουργίας. Τα μοντέλα εξετάζονται, εξάγονται αποτελέσματα τα οποία συγκρίνονται μεταξύ τους και καταγράφονται συμπεράσματα.

1.6 Δομή μεταπτυχιακής εργασίας

Η υπόλοιπη διπλωματική εργασία έχει την παρακάτω δομή:

Κεφάλαιο 2: Μπαταρία τεχνολογίας ιόντων λιθίου (Li-ion) – Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία σύντομη παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών, χρήσεων, πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων μιας μπαταρίας λίθου, καθώς και των μηχανισμών γήρανσης.

Κεφάλαιο 3: Μοντέλα γήρανσης μπαταριών λιθίου – Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση των μοντέλων γήρανσης, τα οποία μελετήθηκαν στο πλαίσιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

Κεφάλαιο 4: Παραδοχές – Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση των παραδοχών και αναλύσεων που έγιναν και που χρησιμοποιούνται στην εξέταση των μοντέλων. Περιγράφονται αναλυτικά οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν.

Κεφάλαιο 5: Εξέταση μοντέλων γήρανσης – Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η εξέταση των μοντέλων γήρανσης και η εξαγωγή αποτελεσμάτων.

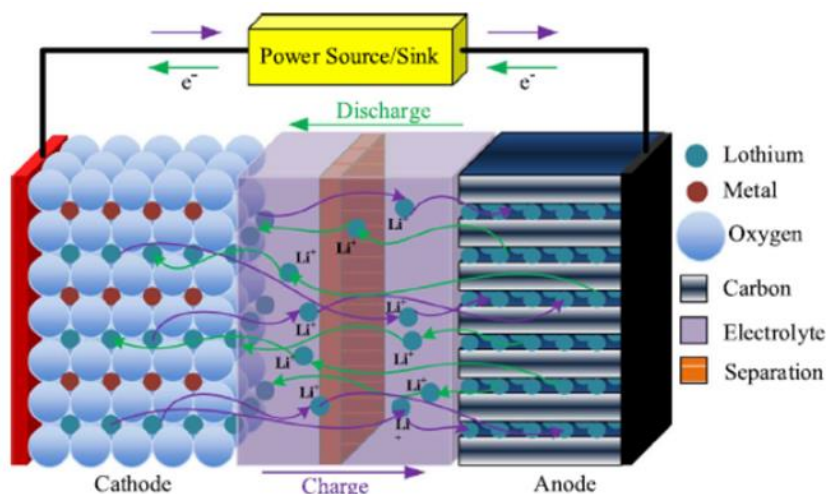
Κεφάλαιο 6: Σύγκριση αποτελεσμάτων & συμπεράσματα – Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται συγκεντρωτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και η εξαγωγή συμπερασμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΜΠΑΤΑΡΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ (LI-ION)

2.1 Γενικά

Η μπαταρία λιθίου (lithium-ion batteries – Li-ion) αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνολογία επαναφορτιζόμενης μπαταρίας. Είναι κυρίαρχη στην αγορά των ηλεκτροκίνητων μεταφορών και των ηλεκτρονικών συσκευών κατά την τελευταία 20ετία. Ανεξαρτήτως τύπου, αποτελείται [17] από την κάθοδο (ή θετικό ηλεκτρόδιο - cathode), την άνοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο - anode), τον ηλεκτρολύτη (electrolyte) και το διαχωριστή (separator). Η κάθοδος αποτελεί την πηγή των ιόντων λιθίου, η οποία καθορίζει τη χωρητικότητα και την τάση των μπαταριών και έχει δομή μεταλλικού οξειδίου λιθίου (LiFePO_4 , LiMnO_2 , LiCoO_2 , $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, LiNiCoAlO_2). Η άνοδος αποτελεί το τμήμα που αποθηκεύει και απελευθερώνει ιόντα μέσω μιας εξωτερικής μονάδας και περιλαμβάνει διάφορα υλικά (C, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, TiO_2 , οξείδιο σιδήρου, οξείδιο κοβαλτίου, πυρίτιο, κασσίτερος κ.ά). Ο ηλεκτρολύτης (οργανικός υδροφοβικός διαλύτης) αποτελεί το μέσο που μεταφέρει ιόντα μεταξύ της καθόδου και της ανόδου, ενώ ο διαχωριστής αποτελεί το φράγμα που εμποδίζει την κάθοδο και την άνοδο να έρθουν σε επαφή μεταξύ τους (σχήμα 2.1). Για την ορθή και ασφαλή διαχείριση της φόρτισης/εκφόρτισής τους περιλαμβάνουν μονάδα διαχείρισης (Battery Management System – BMS).

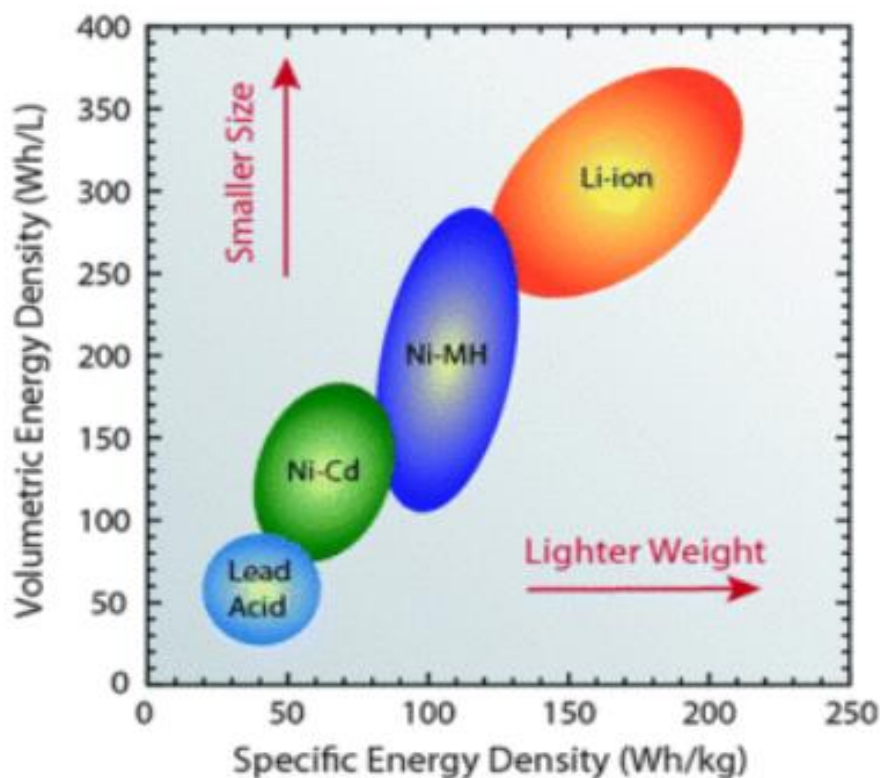


Σχήμα 2.1: Διάγραμμα απεικόνισης εσωτερικής λειτουργίας μπαταριών ιόντων λιθίου

2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

2.2.1 Πλεονεκτήματα

Η μεγάλη διάρκεια ζωής και η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα έχουν καταστήσει τη μπαταρία ιόντων λιθίου κυρίαρχη στην αγορά των ηλεκτροκίνητων μεταφορών και των ηλεκτρονικών συσκευών. Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες επαναφορτιζόμενων μπαταριών, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα [18]: Ενεργειακή πυκνότητα που πλησιάζει τις 300 Wh/kg, υψηλότερη από άλλες τεχνολογίες (σχήμα 2.2). Παράλληλα, οι κυψέλες ιόντων λιθίου μπορούν να παρέχουν τάση έως και 3.6 V, δηλαδή έως 3 φορές την τάση των εναλλακτικών, γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές υψηλής ισχύος. Οι επιδόσεις αυτές είναι εφικτές με μηδενικές ή χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης, όπως η ανάγκη για ύπαρξη μονάδας διαχείρισης BMS, για την ασφαλή και εντός ορίων φόρτιση και αποφόρτισή τους. Επίσης, η αυτοεκφόρτισή τους περιορίζεται στο 1.5 – 2% το μήνα.



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα σύγκρισης ενεργειακής πυκνότητας μπαταριών [18]

Πλέον των ανωτέρω επισημαίνεται ότι οι μπαταρίες ιόντων λιθίου δεν εμφανίζουν φαινόμενο μνήμης, μια διαδικασία όπου επαναλαμβανόμενοι κύκλοι μερικής εκφόρτισης/φόρτισης μπορούν

οδηγήσουν μια μπαταρία σε χαμηλότερη χωρητικότητα από την ονομαστική της. Το φαινόμενο μνήμης είναι χαρακτηριστικό των μπαταριών τεχνολογίας νικελίου – καδμίου (Ni-Cd Batteries) και νικελίου – μετάλλου υδριδίου (NiMH Batteries), κατά το οποίο η μπαταρία χάνει την ικανότητά της να αποδίδει ενέργεια σύμφωνη με την χωρητικότητά της, λόγω πρότερης λειτουργίας σε παράθυρο μικρότερου βάθους εκφόρτισης. Η μπαταρία τείνει να «θυμάται» το στενό παράθυρο χρήσης και εμφανίζει αντίστοιχη απώλεια χωρητικότητας. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι οι μπαταρίες λιθίου δεν περιέχουν τοξικά χημικά στοιχεία, όπως αντίστοιχα περιέχουν οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος και νικελίου-καδμίου. Υπενθυμίζεται ότι η περιεκτικότητα της τελευταίας σε κάδμιο οδήγησε στην απαγόρευση της εμπορικής της χρήσης και στον περιορισμό της σε στρατιωτικές εφαρμογές.

2.2.2 Μειονεκτήματα

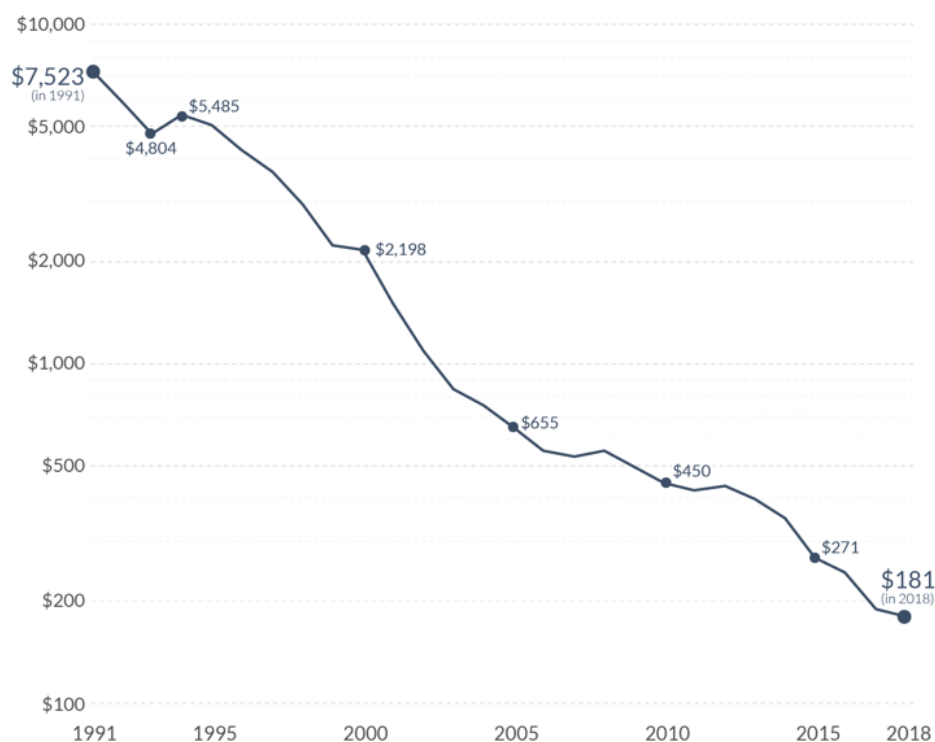
Όσον αφορά τα μειονεκτήματα των μπαταριών ιόντων λιθίου [18], έχουν την τάση να υπερθερμαίνονται, με πιθανότητα καταστροφής. Οι ηλεκτρολύτες ιόντων λιθίου είναι εύφλεκτοι, επομένως οι κατεστραμμένες μπαταρίες μπορεί να υποστούν θερμική διαρροή και καύση. Επιπρόσθετα, απαιτούν μηχανισμούς ασφαλείας για τον περιορισμό της τάσης και των εσωτερικών πιέσεων, γεγονός που μπορεί να αυξήσει το βάρος και να περιορίσει την απόδοση σε ορισμένες περιπτώσεις. Τέλος, το βασικό τους μειονέκτημα είναι το σχετικά αυξημένο κόστος των συστοιχιών [17], σε σχέση με λοιπές τεχνολογίες μπαταριών. Η σχέση του κόστους ανά kWh σε σχέση με αυτών λοιπών τεχνολογιών μπαταριών παρατίθεται στον πίνακα 2.1.

Τεχνολογία	Περιγραφή	Κόστος (\$/kWh)
Lead – acid	Μολύβδου – οξέος	200 – 400
NaS	Νατρίου – θείου	300 – 500
NiCd	Νικελίου – καδμίου	500 – 1500
Li – ion	Ιόντων λιθίου	1200 – 4000
ZnBr	Ψευδαργύρου – βρωμίου	700 – 2500

Πίνακας 2.1 Κόστος ανά kWh τύπων μπαταριών

Παρατηρούμε ότι το κόστος των μπαταριών λιθίου ανά kWh είναι σημαντικά μεγαλύτερο από τις λοιπές τεχνολογίες μπαταριών. Ωστόσο η διαρκής και εντατική τεχνολογική τους εξέλιξη, παράλληλα με την ολοένα αυξανόμενη χρήση τους, οδηγούν στην περαιτέρω πτώση των τιμών τους.

Στο παρακάτω σχήμα είναι εμφανής, σε λογαριθμική κλίμακα, η πτώση της τιμής ανά kWh (οι τιμές αφορούν την αγορά των ΗΠΑ και είναι προσαρμοσμένες βάσει πληθωρισμού στο έτος 2018).



Σχήμα 2.3 Εξέλιξη τιμής ανά kWh στην αγορά των ΗΠΑ [19]

2.3 Χρήσεις μπαταριών ιόντων λιθίου

Οι μπαταρίες λιθίου αποτελούν βασική επιλογή για φορητές συσκευές, οι οποίες από το τέλος του 20^{ου} αιώνα καταλαμβάνουν όλο και μεγαλύτερο μερίδιο στην αγορά «ελαφριάς» χρήσης: συσκευές αναπαραγωγής μουσικής, φορητές κονσόλες βιντεοπαιχνιδιών, ακουστικά, Η/Υ, κινητά, tablets, wearables, κ.ά. Τα τελευταία 15 έτη καθιερώνονται ως βασική επιλογή στην ηλεκτροκίνηση, η οποία με τη σειρά της καταλαμβάνει αυξανόμενο μερίδιο στην αυτοκίνηση. Ενδεικτικά, στην αγορά της ΕΕ το μερίδιο στην αγορά οχημάτων HEV-PHEV-BEV ήταν κάτω του 0.1% το 2010 (600 μονάδες), ενώ το 2022 πλησιάζει στο 35% (1.8 εκατ. μονάδες) [20]. Οι αριθμοί είναι ενδεικτικοί της εκρηκτικής αύξησης που παρατηρείται στην παραγωγή μπαταριών ιόντων λιθίου, η οποία είναι έτι περαιτέρω μεγαλύτερη, αν ληφθεί υπόψη η αυξανόμενη δημιουργία και λειτουργία σταθμών αποθήκευσης ενέργειας με χρήση μπαταριών. Υπενθυμίζεται ότι η θέση των μπαταριών λιθίου στους BESS είναι

κυρίαρχη. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται ενδεικτικές χρήσεις μπαταριών λιθίου, ανά τύπο [21].

Τεχνολογία	Περιγραφή	Χρήση (ενδεικτικά)
LFP	Φωσφορικού λιθίου – σιδήρου	Αντικατάσταση μπαταριών βαθέως κύκλου μολύβδου-οξέος
LCO	Οξειδίου κοβαλτίου λιθίου	Μικρά φορητά ηλεκτρονικά είδη όπως κινητά τηλέφωνα, tablet, φορητούς υπολογιστές και κάμερες
LMO	Οξειδίου μαγγανίου ιόντων λιθίου	Φορητά ηλεκτρικά εργαλεία, ιατρικά όργανα και ορισμένα υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα.
NMC	Λιθίου-Νικελίου- Μαγγανίου- Κοβαλτίου-Οξειδίου	Ηλεκτρικά εργαλεία, ηλεκτρονικά συστήματα κίνησης για ηλεκτρονικά ποδήλατα, σκούτερ και ορισμένα ηλεκτρικά οχήματα
NCA	Λιθίου-νικελίου- κοβαλτίου-αλουμινίου	Ηλεκτρικά οχήματα
LTO	Οξειδίου τιτανίου	λιθίου- Ηλεκτρικά οχήματα και σταθμοί φόρτισης, αδιάλειπτα τροφοδοτικά, αποθήκευση αιολικής και ηλιακής ενέργειας, ηλιακά φώτα δρόμου, συστήματα τηλεπικοινωνιών, αεροδιαστημικός και στρατιωτικός εξοπλισμός

Πίνακας 2.2 Ενδεικτικές χρήσεις μπαταριών λιθίου ανά τύπο

2.4 Μηχανισμοί γήρανσης

Μέσω μηχανισμών γήρανσης (degradation mechanisms), μειώνονται τόσο η εναπομένουσα ενεργειακή χωρητικότητα της μπαταρίας, όσο και η διάρκεια ζωής της. Η αγνόηση της γήρανσης της μπαταρίας για την προσαρμογή της λειτουργίας και της χρήσης της ενέχει τον κίνδυνο αυτή να φτάσει στο τέλος της ζωής της συντομότερα [16]. Αντίθετα, η ενσωμάτωση της γήρανσης στη βελτιστοποίηση λειτουργίας ενός σταθμού αποθήκευσης ενέργειας, μπορεί να επιμηκύνει σημαντικά

τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Ο υπολογισμός του κόστους γήρανσης στις λειτουργίες του συστήματος ισχύος είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της οικονομικής χρήσης των πόρων της μπαταρίας και της επένδυσης γενικότερα. Παράλληλα, πολλές συνθέσεις μπαταριών απαιτούν σπάνια υλικά όπως το νικέλιο και το κοβάλτιο, με τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο που έχουν οι διαδικασίες εξόρυξης των σπανίων γαιών. Επομένως η μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής βελτιώνει την περιβαλλοντική βιωσιμότητα της επένδυσης [16].

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση καταγράφηκαν οι παρακάτω μηχανισμοί, οι οποίοι προκαλούν γήρανση, δηλαδή βαθμιαία υποβάθμιση της μπαταρίας, που μεταφράζεται σε πτώση της διαθέσιμης χωρητικότητας:

- **Ρυθμός/ισχύς φόρτισης της μπαταρίας (charging rate/power) και ρυθμός/ισχύς εκφόρτισης της μπαταρίας (discharging rate/power):** Δίνει την τιμή έντασης ρεύματος ή ηλεκτρικής ισχύος με την οποία η μπαταρία φορτίζεται/εκφορτίζεται. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου παρουσιάζουν μη αμελητέα αύξηση του ρυθμού γήρανσης, όταν ο ρυθμός είναι μεγαλύτερος από 1C, δηλαδή πρακτικά όταν η φόρτιση ή η εκφόρτιση πραγματοποιούνται σε χρόνο μικρότερο της 1 ώρας.
- **Βάθος εκφόρτισης (Depth of Discharge, DoD):** Το ποσοστό μείωσης της χωρητικότητας σε έναν κύκλο. Για παράδειγμα, έστω κύκλος που ξεκινάει με την μπαταρία στο 90% της χωρητικότητας. Κατά τη διάρκειά του, η χωρητικότητα φτάνει στο 30% και στη συνέχεια επανέρχεται στο 90%. Στην περίπτωση αυτή το βάθος εκφόρτισης είναι 60%. Υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ του DoD και του ρυθμού γήρανσης, όπως θα φανεί από την εξέταση των μοντέλων, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.
- **Επίπεδο φόρτισης (State of Charge - SoC) ή επίπεδο ενέργειας (State of Energy – SoE):** Το επίπεδο χωρητικότητας/ενέργειας στο οποίο η μπαταρία βρίσκεται. Επισημαίνεται ότι υπό δεδομένη τάση, ένα επίπεδο φόρτισης μπαταρίας μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί σε ένα επίπεδο ενέργειας της μπαταρίας, με άλλα λόγια υπάρχει μία σύνδεση ένα προς ένα μεταξύ των δύο μεγεθών. Επομένως SoC (State of Charge) και SoE (State of Energy) δηλώνουν το ενεργειακό περιεχόμενο μιας μπαταρίας. Κατά την ανάλυση κύκλων, λαμβάνεται υπόψη η μέση τιμή του SoC/SoE κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου. Για παράδειγμα, έστω κύκλος που ξεκινάει με την μπαταρία στο 70% της χωρητικότητας. Κατά τη διάρκειά του, η χωρητικότητα φτάνει στο 20% και στη συνέχεια επανέρχεται στο 70%. Στην περίπτωση αυτή το μέσο επίπεδο φόρτισης (SoC_{av}) είναι 45%. Το SoC/SoE έχει αμελητέα επίδραση στο ρυθμό γήρανσης, όταν βρίσκεται περί του 50%, ενώ αυξάνει σημαντικά το ρυθμό γήρανσης όταν βρίσκεται προς τις ακραίες τιμές του,

δηλαδή όσο πλησιάζει το 0% ή το 100%. Κρίνεται σκόπιμο να επισημανθεί η σχέση DoD – SoC: Μια μπαταρία με DoD ίσο με d ολοκληρώνει τον κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης με εκφόρτιση από 100% SoC σε $(100 - d)\%$ SoC και στη συνέχεια επαναφόρτιση στο 100% SoC. Επομένως λαμβάνουμε συνήθως $\text{SoC} = 1 - \text{DoD}$, δηλαδή θεωρούμε ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών.

- **Θερμοκρασία λειτουργίας:** Η θερμοκρασία στο χώρο όπου λειτουργεί η μπαταρία. Η ιδανική θερμοκρασία για μια μπαταρία λιθίου θεωρείται το εύρος $10 - 50^\circ \text{C}$. Όσο απομακρυνόμαστε από αυτό το εύρος, παρατηρούμε σταδιακή αύξηση του ρυθμού γήρανσης και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μειώνεται.
- **Χρόνος χρήσης που παρήλθε:** Ο χρόνος που έχει παρέλθει από τη θέση σε ετοιμότητα λειτουργίας της μπαταρίας. Δεν ταυτίζεται απαραίτητα με το χρόνο έναρξης λειτουργίας της μπαταρίας, ο οποίος είναι μικρότερος ή το πολύ ίσος.
- **Πλήθος κύκλων εκφόρτισης/φόρτισης που έχουν λάβει χώρα:** Οι πλήρεις κύκλοι (πραγματικοί ή ισοδύναμοι) που έχουν πραγματοποιηθεί κατά τη χρήση της μπαταρίας. Μεγαλύτερο πλήθος κύκλων οδηγεί σε μεγαλύτερη φθορά και αντίστοιχα γήρανση της μπαταρίας.
- **Διεπαφή στερεού ηλεκτρολύτη (Solid-Electrolyte Interface, SEI):** Επιφανειακό στρώμα που σχηματίζεται στο ηλεκτρόδιο ανόδου της μπαταρίας από προϊόντα αποσύνθεσης του ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα τη μείωση της χωρητικότητας. Εμφανίζεται κατά τα πρώτα στάδια χρήσης της μπαταρίας και προκαλεί μόνιμη πτώση της χωρητικότητας, η οποία είναι μη αναστρέψιμη. Σε κάποιο βαθμό η εν λόγω πτώση είναι αναπόφευκτη και το σχηματιζόμενο στρώμα SEI εμποδίζει την περαιτέρω μείωση της χωρητικότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΛΙΘΙΟΥ

3.1 Γενικά

Η ενσωμάτωση/αξιοποίηση μοντέλων γήρανσης στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός BESS αφενός αυξάνει το προσδόκιμο ζωής των μπαταριών, αφετέρου βελτιώνει την απόδοση μιας επένδυσης. Η ακρίβεια ενός μοντέλου γήρανσης είναι ανάλογη της πολυπλοκότητάς του. Με άλλα λόγια όσο πιο ακριβές είναι, τόσο περισσότερα δεδομένα/παράμετροι και υπολογισμοί απαιτούνται για την ανάπτυξή του, γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα και τον απαιτούμενο χρόνο. Η αξιοποίηση των μοντέλων γήρανσης γίνεται με την ενσωμάτωσή τους σε ευρύτερα προβλήματα βελτιστοποίησης της λειτουργίας BESS ή/και στο πλαίσιο οικονομικής βελτιστοποίησης ενός ΣΗΕ. Ο βαθμός και ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνεται υπόψη η γήρανση των μπαταριών εξαρτάται από το μέγεθος και την οργάνωση του εκάστοτε συστήματος.

Σε διμερείς ενεργειακές αγορές, οι ιδιοκτήτες BESS έχουν μεγάλο βαθμό ελευθερίας στη βελτιστοποίηση συναλλαγών, για να διαχειριστούν τη γήρανση. Η πολυπλοκότητα των μοντέλων που θα επιλέξουν έχει μικρή σημασία, δεδομένου ότι πρόκειται για ένα μικρό πλήθος μπαταριών και η επίδραση στην επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι αμελητέα. Σε ενεργειακές αγορές κεντρικά δομημένες, οι ανεξάρτητοι διαχειριστές του συστήματος πραγματοποιούν κεντρική βελτιστοποίηση για να ταιριάξουν την προσφορά με τη ζήτηση ενέργειας, υπό τους περιορισμούς του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή, η ενσωμάτωση του μοντέλου γήρανσης είναι σημαντική, με σκοπό να διασφαλιστεί η χρήση (dispatch) των μπαταριών με τρόπο οικονομικό και συνδυαστικά με τα λοιπά ενεργητικά στοιχεία του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή, οι διαχειριστές αντιμετωπίζουν εκατοντάδες ή χιλιάδες γεννήτριες, γραμμές μεταφοράς, κόμβους. Μία έστω και μικρή αύξηση της πολυπλοκότητας του μοντέλου, αυξάνει σημαντικά την υπολογιστική δυσκολία επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Μελέτες ανεξάρτητων διαχειριστών συστημάτων δείχνουν μέχρι και διπλασιασμό του χρόνου υπολογισμού, όταν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης ενσωματώθηκαν 100-150 γραμμικά μοντέλα αποθήκευσης. Οι τελικοί χρόνοι ξεπερνούσαν τα 20 min, που αποτελούν το μέγιστο αποδεκτό χρονικό όριο (commitment solution time). Επιπρόσθετα, σε πείραμα κατά το οποίο δοκιμάστηκαν

μπαταρίες λιθίου, υπό προφίλ καθορισμένο από επίλυση προβλήματος οικονομικής βελτιστοποίησης, με ενσωματωμένο μη γραμμικό μοντέλο γήρανσης βασισμένο σε επίπεδο φυσικής της μπαταρίας (physics-based), τα αποτελέσματα έδειξαν μια αύξηση κατά 20% των εσόδων και μια μείωση κατά 30% της γήρανσης, συγκριτικά με απλά γραμμικά μοντέλα γήρανσης. Ωστόσο, η ταχύτητα επίλυσης του προβλήματος οικονομικής βελτιστοποίησης είναι 10.000 φορές πιο αργή [16]. Από τα παραπάνω γίνεται σαφές πως η επιλογή μοντέλου γήρανσης προϋποθέτει πολυπαραγοντική προσέγγιση: Στάθμιση των επιμέρους παραγόντων και επιλογή επί τη βάση των εκάστοτε απαιτήσεων.

3.2 Μοντέλα γήρανσης (degradation models)

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εξετάστηκαν μοντέλα γήρανσης ανεξάρτητα, ήτοι όχι στο πλαίσιο επίλυσης προβλημάτων οικονομικής βελτιστοποίησης. Κάποια από τα μοντέλα που εξετάστηκαν (π.χ. ημιεμπειρικό, πρακτικό) χρησιμοποιούν συναρτήσεις που εκφράζουν την απώλεια ζωής ανά κύκλο. Οι συναρτήσεις αυτές ονομάζονται stress models και έχουν διάφορους τύπους, με πλέον συνηθέστερες την εκθετική και την πολυωνυμική. Χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής μπαταριών είτε ως έχουν, είτε κατόπιν περαιτέρω επεξεργασίας ή/και ενσωμάτωσης σε ευρύτερα μοντέλα. Άλλα μοντέλα (π.χ. βάσει κύκλων, σταθερό ανά μονάδα ενέργειας), χρησιμοποιούν κυρίως χαρακτηριστικά χρήσης και πειραματικά δεδομένα μπαταριών, για τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής. Τα μοντέλα που μελετήθηκαν και παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους, είναι τα εξής:

- Μοντέλο γήρανσης ημιεμπειρικό (§3.2.1)
- Μοντέλο γήρανσης βάσει κύκλων (§3.2.2)
- Μοντέλο γήρανσης σταθερό ανά μονάδα ενέργειας (§3.2.3)
- Μοντέλο γήρανσης πρακτικό (§3.2.4)
- Μοντέλο γήρανσης πολυπαραγοντικό (§3.2.5)
- Μοντέλο γήρανσης κυρτό (§3.2.6)
- Μοντέλο γήρανσης ενεργειακής διεκπεραιωτικής ικανότητας (§3.2.7)
- Μοντέλο γήρανσης λόγω ισχύος (§3.2.8)
- Μοντέλο γήρανσης βάθους εκφόρτισης κύκλων (§3.2.9)
- Μοντέλο γήρανσης ενεργειακού επιπέδου (§3.2.10)

3.2.1 Μοντέλο γήρανσης ημιεμπειρικό

Στο [22] προτείνεται ένα πλαίσιο βελτιστοποίησης δύο επιπέδων (two-layer frame), για την εκτίμηση και βελτίωση του καθαρού κέρδους ενός BESS καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του: ένα επίπεδο για τη βελτιστοποίηση της ονομαστικής χωρητικότητας και ισχύος του BESS και ένα επίπεδο για τη βελτιστοποίηση της στρατηγικής της καθημερινής λειτουργίας του. Στο παραπάνω πλαίσιο βελτιστοποίησης δύο επιπέδων ενσωματώνεται ένα ημιεμπειρικό μοντέλο γήρανσης μπαταριών, που προτείνεται στο [23]. Το προτεινόμενο μοντέλο εξετάστηκε σε μπαταρίες LMO (οξειδίου μαγγανίου ιόντων λιθίου) του [24], ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μπαταρίες LFP (φωσφορικού λιθίου – σιδήρου) και NMC (οξειδίου -νικελίου-μαγγανίου-κοβαλτίου- λιθίου). Από εφαρμογή σε πραγματικές περιπτώσεις (case studies), φαίνεται ότι το ανωτέρω πλαίσιο βελτιστοποίησης δύο επιπέδων έχει καλύτερη απόδοση στο καθαρό κέρδος του BESS, όταν ενσωματώνεται το προτεινόμενο μοντέλο γήρανσης μπαταριών. Η γήρανση αποτυπώνεται ως κανονικοποιημένη απώλεια χωρητικότητας (L), με χρήση διαφορετικών μεταβλητών: κύκλοι, χρόνος ή συνδυασμός τους:

3.2.1.1 Cycle aging (κυκλική γήρανση, βάσει κύκλων)

Όταν λαμβάνονται υπόψη οι κύκλοι που έχει πραγματοποιήσει η μπαταρία, το μοντέλο χρησιμοποιεί την παρακάτω μαθηματική διατύπωση:

$$L = 1 - \alpha_{sei} e^{-N\beta_{sei} f_{d,1}} - (1 - \alpha_{sei}) e^{-N f_{d,1}} \quad (\text{Σχέση 3.1})$$

$$S_{\delta}(\delta) = k_{\delta,1} \delta e^{k_{\delta,2} \delta} \quad (\text{Σχέση 3.2})$$

$$f_{\delta,1} = S_{\delta}(\delta) + k_t t_c \quad (\text{Σχέση 3.3})$$

Όπου:

L: Απολεσθείσα χωρητικότητα κανονικοποιημένη

N: Πλήθος κύκλων (πλήρων)

$f_{d,1}$: Κανονικοποιημένος ρυθμός γήρανσης ανά κύκλο (καθαρός αριθμός)

S_{δ} : Απώλεια ζωής ανά κύκλο κανονικοποιημένη (stress model)

δ : DoD_{mean} (μέσο βάθος εκφόρτισης)

t_c : Μέση διάρκεια κύκλου (εκάστοτε προφίλ, σε μονάδες χρόνου)

$k_{\delta 1}, k_{\delta 2}$: Συντελεστές stress model

k_t : Συντελεστής μοντέλου (προσδιοριστέος)

α_{sei} : Συντελεστής του μοντέλου προσδιοριστέος, που εκφράζει το τμήμα της χωρητικότητας που χάνεται (μη αναστρέψιμα) λόγω του σχηματισμού στερεού στρώματος ηλεκτρολύτη (solid electrolyte interphase – SEI). Η τιμή του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σχεδίαση της μπαταρίας. Εξαρτάται από την ειδική επιφάνεια του γραφίτη καθώς και από τις συνθήκες σχηματισμού του στρώματος SEI. Ο βαθμός γήρανσης του SEI εξαρτάται από τη σύνθεση του ηλεκτρολύτη, από τη θερμοκρασία, από τις αντιδράσεις κατά τη λειτουργία της μπαταρίας, όπως οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ του θετικού και του αρνητικού ηλεκτροδίου. Οι τιμές του (βιβλιογραφία) κυμαίνονται από 3% έως 16%, σύμφωνα με τα [10] - [15]. Στα [7] και [8] λαμβάνει τιμές 0.03138 και 0.0575 αντίστοιχα.

β_{sei} : Συντελεστής του μοντέλου προσδιοριστέος. Το γινόμενο $\beta_{seifd,1}$ ή β_{seifd} τίθεται κατά περίπτωση ως συντελεστής στο όρισμα του εκθετικού και αφορά το τμήμα της χωρητικότητας που χάνεται λόγω του SEI (α_{sei}). Στα [22] και [23] λαμβάνει τιμές 95.14 και 121 αντίστοιχα.

Η χωρητικότητα χωρίζεται σε 2 τμήματα: α_{sei} και σε $(1 - \alpha_{sei})$. Καθένα από αυτά τα 2 τμήματα μειώνεται εκθετικά, με διαφορετικό ρυθμό: Το τμήμα α_{sei} μειώνεται με συντελεστή στο όρισμα του εκθετικού τα γινόμενα $\beta_{seifd,1}$ ή $\beta_{sei}f_d$. Το τμήμα $(1 - \alpha_{sei})$ μειώνεται με συντελεστή στο όρισμα του εκθετικού το $f_{d,1}$ ή f_d . Με αυτό τον τρόπο μοντελοποιείται ξεχωριστά η γήρανση της χωρητικότητας λόγω επίδρασης του σχηματισμού του στρώματος SEI, από τη γήρανση του υπόλοιπου τμήματος της χωρητικότητας.

3.2.1.2 Calendar aging (ημερολογιακή γήρανση, βάσει παρελθόντος χρόνου)

Όταν λαμβάνεται υπόψη ο παρελθών χρόνος, το μοντέλο χρησιμοποιεί την παρακάτω μαθηματική διατύπωση:

$$L = 1 - \alpha_{sei}e^{-t\beta_{seif_d}^t} - (1 - \alpha_{sei})e^{-tf_d^t} \quad (\text{Σχέση 3.4})$$

Όπου:

f_d : Κανονικοποιημένος ρυθμός γήρανσης ανά μονάδα χρόνου (h^{-1} ή sec^{-1})

t : Χρόνος (μονάδες χρόνου)

Λοιπά όπως §3.3.1.1

Στην περίπτωση αυτή μοντελοποιείται η γήρανση της μπαταρίας στην περίπτωση μη χρησιμοποίησής της, οπότε η γήρανση έχει ως αποκλειστική αιτία τον χρόνο που έχει παρέλθει.

3.2.1.3 Cycle – calendar aging (συνδυασμός κυκλικής και ημερολογιακής γήρανσης)

Στην περίπτωση λειτουργίας της μπαταρίας υπό σταθερούς κύκλους, είναι δυνατός ο συνδυασμός κυκλικής και ημερολογιακής γήρανσης. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται η μαθηματική διατύπωση της κυκλικής γήρανσης (§3.2.1.1). Η ημερολογιακή γήρανση ενσωματώνεται στην κυκλική γήρανση, μέσω της αύξησης του κανονικοποιημένου ρυθμού γήρανσης ανά κύκλο. Τότε το μοντέλο χρησιμοποιεί την παρακάτω μαθηματική διατύπωση:

Σχέσεις 3.1 έως 3.3 και επιπλέον:

$$f_{d,1} = t_c f_{d,t} + f_{d,cycle} \quad (\text{Σχέση 3.5})$$

Όπου:

$f_{d,cycle}$: Κανονικοποιημένος ρυθμός γήρανσης ανά κύκλο (καθαρός αριθμός)

$f_{d,1}$: Κανονικοποιημένος αθροιστικός ρυθμός γήρανσης ανά κύκλο (καθαρός αριθμός)

3.2.2 Μοντέλο γήρανσης βάσει κύκλων

Στο [31] παρουσιάζεται μία τεχνική αξιολόγησης της οικονομικής σκοπιμότητας εγκαταστάσεων αποθήκευσης ενέργειας μικρής έκτασης, για χρήση ΑΠΕ ή διεσπαρμένης αποθήκευσης. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται το πρόσθετο κόστος για κάθε μονάδα ενέργειας (kWh) που αποθηκεύεται και στη συνέχεια εγχύεται στο δίκτυο. Εξάγονται αποτελέσματα για διαφορετικές τεχνολογίες αποθήκευσης και γίνεται ανάλυση κόστους κύκλου ζωής και σύγκριση με τιμές ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουσες ή προβλεπόμενες. Η γήρανση αποτυπώνεται ως διάρκεια ζωής σε μονάδες χρόνου. Χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$r = \frac{C}{n * D} \quad (\text{Σχέση 3.6})$$

Όπου:

r: Διάρκεια ζωής σε κύκλους

C: Πλήθος ονομαστικών κύκλων ζωής

n: Κύκλοι ανά ημέρα (χαρακτηριστικό του κάθε προφίλ λειτουργίας)

D: Ημέρες λειτουργίας ανά έτος (χαρακτηριστικό του κάθε προφίλ λειτουργίας)

Μεταξύ των συμπερασμάτων της μελέτης είναι ότι το προστιθέμενο κόστος για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους σχεδιασμού του συστήματος (πλήθος κύκλων ανά ημέρα και ημέρες λειτουργίας ανά έτος), ενώ απόκλιση από τις παραμέτρους αυτές αυξάνει σημαντικά το λειτουργικό κόστος. Εξίσου σημαντική είναι η περίοδος αντικατάστασης της μπαταρίας: η σχεδίαση του συστήματος θα πρέπει να εξασφαλίζει ότι η περίοδος αντικατάστασης είναι ανάλογη με την προσδόκιμη ζωή των ηλεκτρονικών ισχύος της εγκατάστασης. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι σημαντικά μικρότερο από το κόστος κεφαλαίου και αντικατάστασης εξοπλισμού.

3.2.3 Μοντέλο γήρανσης σταθερό ανά μονάδα ενέργειας

Στο [32] προτείνεται μια προσέγγιση στοχαστικού δυναμικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση λειτουργίας ενός BESS μπαταριών λιθίου. Γίνεται χρήση διαθέσιμων προβλέψεων και ενός μοντέλου γήρανσης μπαταριών, που λαμβάνει υπόψη τη λειτουργική επίδραση στην απόδοση του συστήματος. Η μέθοδος συνίσταται στην επιλογή της βέλτιστης απόφασης φόρτισης ή αποφόρτισης, με γνώμονα τη μεγιστοποίηση της επιστρεφόμενης αξίας του BESS καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του. Η γήρανση αποτυπώνεται ως κανονικοποιημένη απώλεια χωρητικότητας ανά κύκλο. Χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$D_{\text{fixed}} = \frac{b_t}{CL_{\text{nom}} * \left(\frac{DoD_{\text{nom}}\%}{100} \right) * 2 * B} \quad (\text{Σχέση 3.7})$$

Όπου:

D_{fixed} : Κλάσμα της ζωής της μπαταρίας που χάνεται όταν b_t ενέργεια προσθαιρείται από αυτήν κατά τη φόρτιση/εκφόρτιση. Αν $D_{\text{fixed}} = 1$, η μπαταρία χρήζει αντικατάστασης.

b_t : decision variable. Ενέργεια που προσθαιρείται από την μπαταρία κατά το διάστημα t .

CL_{nom} : Πλήθος ονομαστικών κύκλων ζωής

DoD_{nom} : Ονομαστικό DoD

B : Χωρητικότητα μπαταρίας

Η μέθοδος αυτή, εφαρμοζόμενη σε σειρά δεδομένων από πραγματική εγκατάσταση BESS, δείχνει μια μεσοσταθμική αύξηση κατά 160% της διάρκειας ζωής, σε σχέση με μεθόδους ελέγχου set-point, που χρησιμοποιούνται ευρέως.

3.2.4 Μοντέλο γήρανσης πρακτικό

Στο [33] αναπτύσσεται ένα μοντέλο γήρανσης, που ενσωματώνεται σε πρόβλημα βελτιστοποίησης μικροδικτύου DC (microgrid) συνδεδεμένου στο δίκτυο, που αποτελείται από φωτοβολταϊκό σύστημα και BESS μπαταριών λιθίου. Στο υπόψη μοντέλο λαμβάνεται υπόψη το βάθος εκφόρτισης και η θερμοκρασία λειτουργίας:

a) **Βάθος εκφόρτισης:** Λαμβάνεται υπόψη ένα λογαριθμικό μοντέλο πρόβλεψης και η γήρανση αποτυπώνεται ως διάρκεια ζωής σε πλήθος κύκλων. Χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$h_Y(d) = \alpha \log(d) + \beta \quad (\text{Σχέση 3.8α})$$

Όπου:

$h_Y(d)$: Διάρκεια ζωής σε κύκλους εξαρτημένη από το DoD (d)

d: Βάθος εκφόρτισης (DoD)

α, β : Συντελεστές προσδιοριστέοι

Η σχέση 3.8α αποτελεί ουσιαστικά ένα stress model, δηλαδή μία συνάρτηση που δίνει την απώλεια χωρητικότητας ανά κύκλο κανονικοποιημένη. Τέτοιες συναρτήσεις συναντούμε επίσης στο κυρτό μοντέλο γήρανσης (§3.2.6) και στο ημιεμπειρικό μοντέλο γήρανσης (§3.2.1).

b) **Θερμοκρασία λειτουργίας:** Η γήρανση αποτυπώνεται ως διάρκεια ζωής σε πλήθος κύκλων. Χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$h_Y(T) = \begin{cases} \alpha_1 e^{-\beta_1 T} + \gamma_1 & -40^\circ \text{ C} \leq T < 0^\circ \text{ C} \\ \alpha_2 T + \beta_2 & 0^\circ \text{ C} \leq T < 18^\circ \text{ C} \\ \alpha_3 T + \beta_3 & -18^\circ \text{ C} \leq T < 50^\circ \text{ C} \\ \alpha_4 e^{-\beta_4(T-50)} + \gamma_4 & 50^\circ \text{ C} \leq T \leq 80^\circ \text{ C} \end{cases} \quad (\text{Σχέση 3.8β})$$

Όπου:

$h_Y(T)$: Διάρκεια ζωής σε κύκλους εξαρτημένη από τη θερμοκρασία λειτουργίας (T)

T: Θερμοκρασία λειτουργίας

α, β, γ : Συντελεστές προσδιοριστέοι

Η μέθοδος δύναται να γενικευθεί και σε άλλους τύπους μπαταριών. Με χρήση πραγματικών δεδομένων εξάγονται αποτελέσματα, που επιβεβαιώνουν ότι η ενσωμάτωση της γήρανσης μπαταρίας σε εφαρμογές μικροδικτύων επηρεάζει σημαντικά το λειτουργικό κόστος.

3.2.5 Μοντέλο γήρανσης πολυπαραγοντικό

Στο [34] προτείνεται μια μεθοδολογία πρόβλεψης των ρυθμών γήρανσης μπαταριών λιθίου, που λαμβάνει υπόψη πλήθος παραγόντων. Για κάθε ανεξάρτητο παράγοντα ή σύνολο παραγόντων, αναπτύσσεται ένα κανονικοποιημένο μοντέλο, προσαρμόζοντας τις σχετικές καμπύλες σε πειραματικά δεδομένα. Στη συνέχεια τα μοντέλα συνδυάζονται με ονομαστικές τιμές λειτουργίας μπαταριών, επιτρέποντας την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής, υπό διαφορετικά προφίλ χρήσης. Η γήρανση αποτυπώνεται ως διάρκεια ζωής σε κύκλους. Με χρήση δεδομένων από το [35], καταρτίζεται η παρακάτω εξίσωση:

$$CL(DOD, SOC_{av}) = q + \left(\frac{u}{2 * v} * (s + 100 * u) - 200 * t \right) * DOD + s * SOC_{av} + t * DOD^2 + u * DOD * SOC_{av} + v * SOC_{av}^2 \quad (\text{Σχέση 3.9})$$

Όπου:

CL: Διάρκεια ζωής σε κύκλους

q, s, t, u, v : Συντελεστές προσδιοριστέοι που προκύπτουν από πειραματικά σετ δεδομένων, με προσαρμογή στη συνάρτηση. Από τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει ότι η διάρκεια ζωής των μπαταριών μειώνεται για κύκλους τόσο σε περιοχές υψηλού, όσο και χαμηλού SoC, ενώ η υποβάθμιση είναι μικρότερη για κύκλους σε περιοχές μεσαίου SOC. Έτσι προκύπτει ότι απαιτείται πολυωνυμική συνάρτηση δεύτερης τάξης για το SoC_{av} . Επίσης ίδια εξάρτηση θεωρούν πως υπάρχει και από το DoD_{av} . Επιπρόσθετα θέτουν και όρους που περιλαμβάνουν και τις 2 μεταβλητές, διότι υπάρχει αλληλεξάρτηση μεταξύ τους.

Από εφαρμογή σε πραγματική περίπτωση (case study), πιστοποιήθηκε ότι η καθημερινή φόρτιση στο 81% της χωρητικότητας μπορεί να επιμηκύνει τη ζωή της μπαταρίας σημαντικά, σε σχέση με φόρτιση στο 100% ή πλήρη φόρτιση μόνο μετά από σχεδόν πλήρη αποφόρτιση. Αυτό δείχνει ότι μια προσαρμογή μόνο στη φόρτιση, χωρίς καμία άλλη απαίτηση από τον χρήστη, μπορεί να βελτιώσει

τη διαχείριση της μπαταρίας. Η προτεινόμενη μεθοδολογία δίνει μία βάση για αξιολόγηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας και βελτιστοποίηση της διαχείρισής της, για οποιαδήποτε εφαρμογή που σχετίζεται με μπαταρίες.

3.2.6 Μοντέλο γήρανσης κυρτό

Στο [36] αποδεικνύεται ότι το προτεινόμενο μοντέλο γήρανσης μπαταριών λιθίου, βασισμένο σε αλγορίθμους rainflow (που δεν έχουν κλειστή μορφή και επομένως ενσωματώνεται δύσκολα σε προβλήματα βελτιστοποίησης, [30]), είναι κυρτή συνάρτηση. Η κυρτότητα δίνει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης σε διαφορετικά προβλήματα βελτιστοποίησης μπαταριών με εγγύηση στην ποιότητα της λύσης. Η γήρανση αποτυπώνεται ως κανονικοποιημένη αθροιστική απώλεια χωρητικότητας (ΔL). Χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τύποι:

$$\Phi(u) = k_1 u e^{k_2 u} \quad (\text{Σχέση 3.10})$$

$$\Phi(u) = k_3 u^{k_4} \quad (\text{Σχέση 3.11})$$

$$\Delta L(x) = \sum_{i=1}^N \frac{\Phi(u_i)}{2}, \text{ για μισό κύκλο} \quad (\text{Σχέση 3.12})$$

$$\Delta L(x) = \sum_{i=1}^N \Phi(u_i), \text{ για ολόκληρο κύκλο} \quad (\text{Σχέση 3.13})$$

Όπου:

Φ : Απώλεια ζωής ανά κύκλο κανονικοποιημένη (stress model)

k : Συντελεστές stress model

u : DoD κάθε κύκλου

ΔL : Αθροιστική απώλεια ζωής (όλων των κύκλων)

Από εφαρμογή σε πραγματική περίπτωση (case study) σε μπαταρίες LMO, πιστοποιήθηκε ότι το προτεινόμενο μοντέλο γήρανσης δύναται να βελτιώσει σημαντικά τη λειτουργική χρησιμότητα και να αυξήσει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

3.2.7 Μοντέλο γήρανσης ενεργειακής διεκπεραιωτικής ικανότητας (energy throughput)

Το μοντέλο γήρανσης ενεργειακής διεκπεραιωτικής ικανότητας βασίζεται, όπως και το σταθερό ανά μονάδα ενέργειας (§3.2.3), στην παραδοχή ότι υπάρχει αναλογική εξάρτηση μεταξύ της ενέργειας που σωρευτικά φορτίζεται και αποφορτίζεται από τη μπαταρία [16]. Θεωρείται ισοδύναμο με το μοντέλο γήρανσης βάσει κύκλων (§3.2.2), με την προϋπόθεση ότι αυτό χρησιμοποιεί ενέργεια που ανακυκλώνει πλήρως μια μπαταρία ως μονάδα μέτρησης ενεργειακής διεκπεραιωτικής ικανότητας. Το υπόψη μοντέλο χρησιμοποιείται ευρέως για τον καθορισμό της εγγύησης μιας μπαταρίας και το κόστος της γήρανσης ανά μονάδα ενέργειας μπορεί να υπολογιστεί με απλή διαίρεση του κόστους αντικατάστασης με τη συνολική ενέργεια που θα διεκπεραιωθεί από τη μπαταρία. Το μοντέλο γήρανσης ενεργειακής διεκπεραιωτικής ικανότητας διέπεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta C = a \sum_t^n (p_t + q_t) \quad (\text{Σχέση 3.14})$$

Όπου:

ΔC : Η μεταβολή της απομένουσας χωρητικότητας

a : Συντελεστές μοντέλου

p_t : Συνολικά ενέργεια φόρτισης στη μπαταρία

q_t : Συνολικά ενέργεια εκφόρτισης από τη μπαταρία

t : Χρονικό βήμα

Το πλεονέκτημα του μοντέλου είναι η απλότητά του, χάρις στην οποία αποτελεί συνήθη επιλογή για τη μοντελοποίηση της γήρανσης σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Όσον αφορά την ακρίβεια του μοντέλου, είναι πιο κατάλληλο για μπαταρίες που δεν παρουσιάζουν ευαισθησία στο ρυθμό φόρτισης και στο βάθος εκφόρτισης (π.χ. LFP), ενώ είναι λιγότερο ακριβές σε μπαταρίες που η γήρανση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το βάθος εκφόρτισης και την ισχύ εξόδου (π.χ. NMC).

3.2.8 Μοντέλο γήρανσης λόγω ισχύος (power degradation model)

Το μοντέλο γήρανσης λόγω ισχύος διαφοροποιεί το ρυθμό γήρανσης της μπαταρίας, με βάση το μέγεθος της ισχύος φόρτισης ή εκφόρτισης. Το μέγεθος αυτό είναι πρακτικό ισοδύναμο με το ρυθμό φόρτισης ή εκφόρτισης αντίστοιχα, υπό δεδομένη τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας. Το μοντέλο βασίζεται στην παραδοχή ότι οι μεγαλύτεροι ρυθμοί φόρτισης επιφέρουν αύξηση στο ρυθμό

γήρανσης, κάτι που παρατηρείται σε αντίστοιχες δοκιμές [16]. Το μοντέλο γήρανσης λόγω ισχύος διέπεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta C = a \sum_t^n (f(d_t) + f(c_t)) \quad (\text{Σχέση 3.15})$$

Όπου:

ΔC : Η μεταβολή της απομένουσας χωρητικότητας

$f(c_t)$: Συνάρτηση που μοντελοποιεί τον αυξανόμενο ρυθμό γήρανσης λόγω υψηλότερης ισχύος φόρτισης

$f(d_t)$: Συνάρτηση που μοντελοποιεί τον αυξανόμενο ρυθμό γήρανσης λόγω υψηλότερης ισχύος αποφόρτισης

t : Χρονικό βήμα

a : Συντελεστές μοντέλου

Δεδομένου ότι υψηλότερος ρυθμός φόρτισης οδηγεί σε μεγαλύτερο ρυθμό γήρανσης, η συνάρτηση κόστους είναι κυρτή και είναι δυνατή η ενσωμάτωση του μοντέλου σε μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού. Το μοντέλο είναι πιο κατάλληλο για μπαταρίες που παρουσιάζουν ευαισθησία στο ρυθμό φόρτισης. Αυτό είναι σημαντικό σε BESS με κύκλους διάρκειας μικρότερες της 1 ώρας (ισοδύναμα: με ρυθμό φόρτισης μεγαλύτερο του 1C), αλλά όχι σημαντικό για BESS με μεγαλύτερης διάρκειες κύκλους (ισοδύναμα: με ρυθμό φόρτισης μικρότερο του 1C). Ωστόσο, τα σύγχρονα BESS χρησιμοποιούν κατά βάση κύκλους με διάρκεια μεγαλύτερη των 2 ωρών, με προοπτική να ξεπεράσουν τις 6 ώρες. Επομένως, ο αντίστοιχος ρυθμός φόρτισης είναι μικρότερος του 0.5C και το μοντέλο γήρανσης λόγω ισχύος δεν παρουσιάζουν πλέον χρηστικό ενδιαφέρον.

3.2.9 Μοντέλο γήρανσης βάθους εκφόρτισης κύκλων (cycle depth model)

Το μοντέλο γήρανσης βάθους εκφόρτισης κύκλων αναπτύχθηκε έπειτα από πειραματικά αποτελέσματα, που δείχνουν ότι ο ρυθμός γήρανσης εξαρτάται σημαντικά από την έκταση του κάθε κύκλου, δηλαδή το βάθος εκφόρτισης. Επομένως γίνεται υπολογισμός της αθροιστικής γήρανσης, που προκαλούν κύκλοι με διαφορετικό βάθος εκφόρτισης. Στο πλαίσιο αυτό, γίνεται χρήση αλγορίθμου rainflow counting algorithm. Οι αλγόριθμοι αυτοί χρησιμοποιούνται ευρέως για την εξαγωγή κύκλων από πολύπλοκα ιστορικά φορτίσεων [37], στο πλαίσιο ανάλυσης κόπωσης υλικών (material fatigue analysis). Ωστόσο αποτελεί κατάλληλο εργαλείο για την ανάλυση κύκλων λειτουργίας μπαταριών. Λαμβάνει ως είσοδο μία χρονοσειρά με το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας

και την κατακερματίζει σε έναν συνδυασμό επιμέρους κύκλων, διαφορετικού βάθους εκφόρτισης. Το μοντέλο γήρανσης βάθους εκφόρτισης κύκλων διέπεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta C = \sum_i^n f(m_i) | \{m_i\} = Rainflow (d_t - c_t) \quad (\text{Σχέση 3.16})$$

Όπου:

ΔC : Η μεταβολή της απομένουσας χωρητικότητας

m_i : Βάθος i-στού κύκλου

i : Αριθμός κύκλου

$f(m_i)$: Συνάρτηση που μοντελοποιεί το ρυθμό γήρανσης λόγω διαφορετικών βαθών κύκλων

c_i : Ισχύς φόρτισης

d_i : Ισχύς αποφόρτισης

Το μοντέλο γήρανσης βάθους εκφόρτισης κύκλων έχει υιοθετηθεί ευρέως για εκ των υστέρων εκτίμηση της γήρανσης, κατά την οποία ο σχεδιαστής επιδιώκει να εκτιμήσει το ρυθμό γήρανσης από δεδομένα προφίλ SoE. Η αύξηση του βάθους εκφόρτισης επιταχύνει τη γήρανση της μπαταρίας. Ο αλγόριθμος rainflow δεν έχει κλειστή μαθηματική μορφή και δεν μπορεί να ενσωματωθεί άμεσα σε μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού. Ωστόσο πρόσφατες μελέτες [36] δείχνουν ότι είναι κυρτός και δύναται συνεπώς να εκφρασθεί σε γραμμική μορφή. Η κυρτότητα δίνει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης σε προβλήματα βελτιστοποίησης μπαταριών.

3.2.10 Μοντέλο γήρανσης ενεργειακού επιπέδου (state-of-energy model)

Το μοντέλο γήρανσης ενεργειακού επιπέδου υποθέτει ότι ο ρυθμός γήρανσης εξαρτάται από το επίπεδο ενέργειας (state of energy - SoE) κατά την φόρτιση ή εκφόρτιση της μπαταρίας, κάτι που βασίζεται σε εργαστηριακά δεδομένα γήρανσης. Ενώ στο μοντέλο γήρανσης βάθους εκφόρτισης κύκλων λαμβάνεται υπόψη για τη γήρανση το βάθος του κάθε κύκλου ανεξάρτητα από το ενεργειακό επίπεδο, στην περίπτωση του μοντέλου γήρανσης ενεργειακού επιπέδου υπάρχει μια άμεση σχέση μεταξύ ενεργειακού επιπέδου και του ρυθμού γήρανσης.

Το μοντέλο γήρανσης ενεργειακού επιπέδου διέπεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta C = \sum_i^n f(e_t)(d_t + c_t) \quad (\text{Σχέση 3.17})$$

Όπου:

ΔC : Η μεταβολή της απομένουσας χωρητικότητας

$f(e_t)$: Συνάρτηση που μοντελοποιεί το ρυθμό γήρανσης λόγω διαφορετικών ενεργειακών επιπέδων

c_t : Ισχύς φόρτισης

d_t : Ισχύς αποφόρτισης

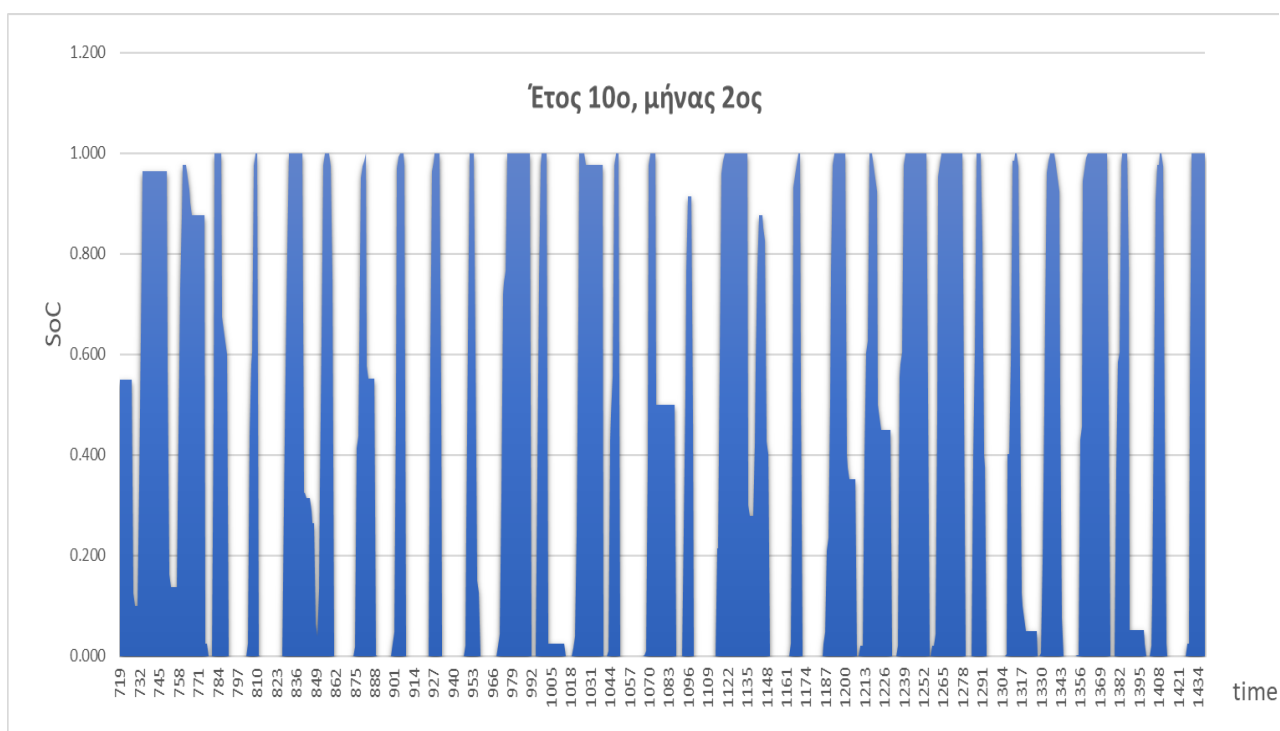
Το μοντέλο γήρανσης ενεργειακού επιπέδου χρησιμοποιείται ευρέως σε μελέτες ενσωμάτωσης μπαταριών για τη μοντελοποίηση της εξάρτησης του ρυθμού γήρανσης από το επίπεδο ενέργειας ή το βάθος εκφόρτισης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο ρυθμός γήρανσης είναι χαμηλότερος όταν το επίπεδο ενέργειας βρίσκεται κοντά στο 50%, ενώ μεγαλώνει καθώς αυτό πλησιάζει το 0% ή το 100%, όπου και μεγιστοποιείται. Συνεπώς, κύκλοι που έχουν υψηλή (προς το μέγιστο) ή χαμηλή (προς το ελάχιστο) κεντρική τιμή ενεργειακού επιπέδου επιταχύνουν τη γήρανση της μπαταρίας, ενώ κύκλοι με κεντρική τιμή ενεργειακού επιπέδου περί το 50% δεν επηρεάζουν σημαντικά το ρυθμό γήρανσης. Το μοντέλο γήρανσης ενεργειακού επιπέδου είναι υπολογιστικά ακριβό. Είναι μη γραμμικό, διότι περιλαμβάνει το γινόμενο ισχύος και ενεργειακού επιπέδου, που αποτελούν μεταβλητές βελτιστοποίησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

4.1 Προφίλ λειτουργίας BESS που χρησιμοποιήθηκαν

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, δοκιμάζουμε μοντέλα γήρανσης που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3. Ως δεδομένα εισόδου λαμβάνουμε 2 διαφορετικά προφίλ λειτουργίας σταθμών BESS, προφίλ A και προφίλ B αντίστοιχα. Για την επεξεργασία, ανάλυση και εξαγωγή στοιχείων από τα 2 προφίλ χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος rainflow counting algorithm (RCA, εντολή “rainflow” στο MATLAB). Οι αλγόριθμοι RCA χρησιμοποιούνται ευρέως για την εξαγωγή κύκλων από πολύπλοκα ιστορικά φορτίσεων [37], στο πλαίσιο ανάλυσης κόπωσης υλικών (material fatigue analysis). Η τεχνική χρησιμοποιείται ευρέως και στην ανάλυση κύκλων μπαταριών [23]. Ως είσοδο στον RCA θέτουμε το προφίλ SoC, δηλαδή μία χρονοσειρά που λαμβάνει τιμές από 0 έως 1 (πλήρως αποφορτισμένη και πλήρως φορτισμένη μπαταρία αντίστοιχα), ανά μία ώρα, για διάρκεια 20 ετών. Στο σχήμα 4.1 παρατίθεται τμήμα διάρκειας 1 μήνα (720 ζεύγη τιμών SoC – χρόνου) τυχαίου μήνα λειτουργίας του προφίλ A:



Σχήμα 4.1: State of charge αποθήκευσης για 720 ώρες ενός τυχαίου έτους για το Προφίλ A

Στον πίνακα 4.1 παρατίθεται η έξοδος του RCA που αντιστοιχεί στο τμήμα του προφίλ Α του σχήματος 4.1:

A/A	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	A/A	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
22	0.5000	1.0000	0.5000	664	704	44	0.5000	1.0000	0.5000	1124	1168
23	1.0000	0.6012	0.6913	735	752	45	0.5000	1.0000	0.5000	1168	1185
24	1.0000	0.9248	0.5376	711	719	46	0.5000	1.0000	0.5000	1185	1193
25	0.5000	1.0000	0.5000	704	760	47	0.5000	1.0000	0.5000	1193	1209
26	1.0000	0.9574	0.4787	777	782	48	1.0000	0.9966	0.5017	1217	1232
27	1.0000	0.2990	0.6981	850	853	49	0.5000	1.0000	0.5000	1209	1240
28	1.0000	0.9541	0.4974	816	832	50	0.5000	1.0000	0.5000	1240	1256
29	1.0000	0.9973	0.4987	794	808	51	1.0000	0.7528	0.4753	1280	1287
30	0.5000	1.0000	0.5000	760	861	52	0.5000	1.0000	0.5000	1256	1262
31	0.5000	1.0000	0.5000	861	881	53	0.5000	1.0000	0.5000	1262	1294
32	0.5000	1.0000	0.5000	881	896	54	0.5000	1.0000	0.5000	1294	1310
33	0.5000	1.0000	0.5000	896	902	55	0.5000	1.0000	0.5000	1310	1328
34	1.0000	0.8933	0.4467	920	928	56	0.5000	1.0000	0.5000	1328	1337
35	0.5000	1.0000	0.5000	902	934	57	0.5000	1.0000	0.5000	1337	1352
36	0.5000	1.0000	0.5000	934	951	58	0.5000	1.0000	0.5000	1352	1360
37	0.5000	1.0000	0.5000	951	982	59	0.5000	1.0000	0.5000	1360	1376
38	1.0000	0.9662	0.5169	999	1016	60	0.5000	1.0000	0.5000	1376	1385
39	0.5000	1.0000	0.5000	982	1023	61	0.5000	1.0000	0.5000	1385	1400
40	1.0000	0.9269	0.4634	1029	1049	62	0.5000	1.0000	0.5000	1400	1406
41	1.0000	0.7961	0.4036	1088	1120	63	0.5000	1.0000	0.5000	1406	1426
42	1.0000	0.9574	0.4787	1064	1071	64	0.5000	1.0000	0.5000	1426	1432
43	0.5000	1.0000	0.5000	1023	1124	65	1.0000	0.8768	0.4924	1452	1462

Πίνακας 4.1 Έξοδος αλγορίθμου RCA

Ο αλγόριθμος RCA δίνει σαν έξοδο τα παρακάτω (συσχέτιση με στήλες του πίνακα 4.1):

- A/A: Αύξων αριθμός κύκλου
- Στήλη (1): Χαρακτηρισμός κάθε κύκλου (0.5 = μισός, 1 = ολόκληρος)

- Στήλη (2): Πλάτος κάθε κύκλου (αντιστοιχεί στο DoD κάθε κύκλου)
- Στήλη (3): Μέση τιμή κάθε κύκλου (αντιστοιχεί στο μέσο SoC κάθε κύκλου)
- Στήλες (4), (5): Σημεία (ώρες) έναρξης και λήξης αντίστοιχα εκάστου κύκλου

Από τα παραπάνω στοιχεία, καθώς και από περαιτέρω επεξεργασία των 2 προφίλ λειτουργίας, λαμβάνουμε πίνακα 4.2:

Προφίλ	DOD _{av}	SoC _{av}	CpD _{av} (μ.ο. κύκλοι ανά ημέρα)	CpY _{av} (μ.ο. κύκλοι ανά έτος)	t _c (μέση διάρκεια κύκλου)	WDY (ημέρες λειτουργίας ανά έτος)
A	0.934	0.49720	1.020	372.55	8h	365
B	0.788	0.45838	0.802	293.00	11h	365

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά των προφίλ λειτουργίας

Παρατηρούμε ότι τα δύο προφίλ λειτουργίας διαφοροποιούνται ως προς το μέσο DoD, τους κύκλους ανά ημέρα και τη διάρκεια του κύκλου, ενώ σχετικά κοντά βρίσκονται όσον αφορά την τιμή του μέσου SoC, δηλαδή περί το 50%.

4.2 Παραδοχές – ορισμοί – συμβάσεις

Στα προτεινόμενα μοντέλα, που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, γίνονται οι παρακάτω παραδοχές:

- Για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής με χρήση των υπό εξέταση μοντέλων, δεν λαμβάνονται υπόψη οι ρυθμοί φόρτισης/αποφόρτισης και η θερμοκρασία λειτουργίας. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στα παρακάτω:
 - Οι ρυθμοί φόρτισης/αποφόρτισης (c-d rates) ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας στην πλευρά του χρήστη είναι χαμηλοί και ελεγχόμενοι. Φύλλα δεδομένων (datasheets) κατασκευαστών δείχνουν ότι c-d rates κάτω του 1C δεν επηρεάζουν τη χωρητικότητα της μπαταρίας, ούτε τη διάρκεια ζωής της. Αντίθετα, όταν c-d rates ξεπερνούν το 1C η χωρητικότητα μειώνεται. Σε συστήματα BESS οι c-d rates δεν υπερβαίνουν την τιμή 0.5C. Για τους παραπάνω λόγους η επίδραση των c-d rates θεωρείται αμελητέα.

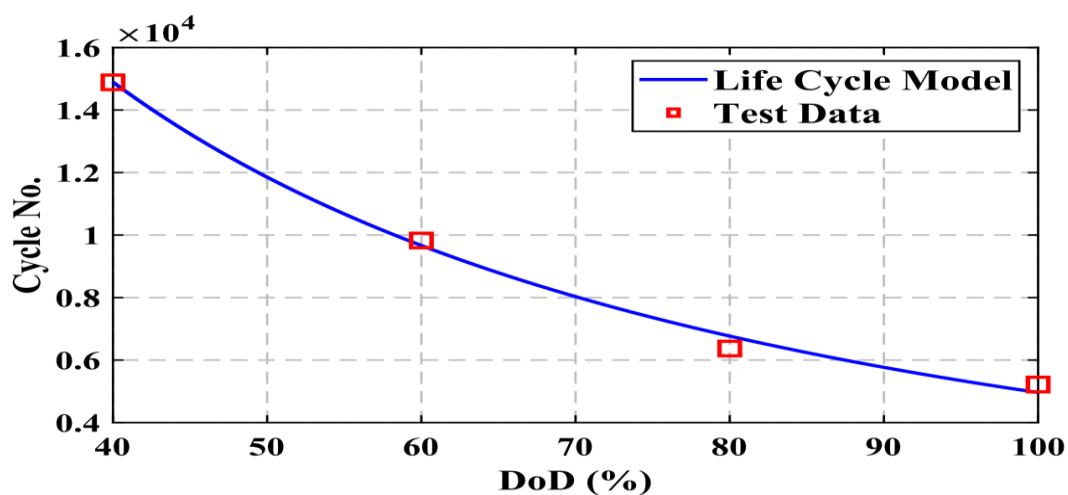
- Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι σχετικά σταθερή και ελεγχόμενη, ώστε να κινείται εντός ενός στενού εύρους τιμών. Επομένως δεν λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση.

Συνεπώς, οι μεταβλητές που λαμβάνονται υπόψη στα υπό εξέταση μοντέλα (κατά περίπτωση μοντέλου) είναι:

- DoD μέσο και κάθε κύκλου
- SoC μέσο
- CpDav (μ.ο. κύκλοι ανά ημέρα)
- t_c (μέση διάρκεια κύκλου)
- WDY (ημέρες λειτουργίας ανά έτος)

b) Μια πτώση 20% (ισοδύναμα: απομένουσα χωρητικότητα 80%) θεωρείται ως όριο ζωής (End Of Life – EOL) και η μπαταρία χρήζει αντικατάστασης. Η σύμβαση αυτή θεωρείται ευρέως αποδεκτή από τη βιβλιογραφία.

c) Ως **μπαταρία – βάση σύγκρισης** θεωρήθηκε μπαταρία, δεδομένα της οποίας χρησιμοποιήθηκαν στο [22]. Η σχέση κύκλων – DoD δίνεται στο σχήμα 4.2 και στον πίνακα 4.3:



Σχήμα 4.2 Καμπύλη κύκλων – DoD μπαταρίας – βάση σύγκρισης

DoD	0.400	0.600	0.800	1.000
Cycles	14800	9800	6350	5200

Πίνακας 4.3 Σημεία καμπύλης κύκλων – DoD

Ως εκ τούτου, κριτήριο σύγκρισης θεωρούμε τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν από το ημιεμπειρικό μοντέλο γήρανσης (**βασικό σενάριο**). Κατά την ανάλυση που ακολουθεί θεωρούμε ως ονομαστικές τιμές κύκλων ζωής και αντίστοιχου DoD το ζεύγος τιμών **5200@100%DoD**. Επιπρόσθετα, ισχύουν οι παρακάτω συμβάσεις:

N = διάρκεια ζωής σε κύκλους

r = διάρκεια ζωής σε έτη

$r = N / (\text{κύκλοι ανά έτος})$ (Σχέση 4.1)

RC: Απομένουσα χωρητικότητα (remaining capacity)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΕΞΕΤΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΗΡΑΝΣΗΣ

5.1 Μοντέλο γήρανσης ημιεμπειρικό

Στις §5.1.1 έως 5.1.3 γίνεται ανάλυση για 3 περιπτώσεις του υπόψη μοντέλου, ενώ στην §5.1.4 συνοψίζονται τα αποτελέσματα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή του μοντέλου, καθώς και οι αντίστοιχες πηγές:

Προφίλ λειτουργίας		Βιβλιογραφία		
CpDav	DoDav	tc	Τύπος μπαταρίας	Συντελεστές μοντέλου
Προφίλ Α	1.020	0.934	8h	$\alpha_{sei}=0.3138$
				$\beta_{sei}=95.14$
Προφίλ Β	0.802	0.788	11h	LMO
				$k_{\delta 1}=2.023e-05$
				$k_{\delta 2}=5.725e-1$
				$k_t=3.52e-10/s$

Πίνακας 5.1 Δεδομένα

Ο υπολογισμός συνίσταται στην εύρεση του σημείου (σε πλήθος κύκλων ή/και σε χρονικό σημείο) όπου η απομένουσα χωρητικότητα της μπαταρίας πέφτει κάτω από 80%:

$$RC < 0.80 \quad (\text{σχέση 5.1})$$

$$RC = 1 - L \quad (\text{σχέση 5.2})$$

Όπου L: απολεσθείσα χωρητικότητα (σχέσεις 3.1 και 3.4)

5.1.1 Cycle aging (κυκλική γήρανση)

Οι εξισώσεις που διέπουν το μοντέλο επαναλαμβάνονται για λόγους ευκολίας:

$$L = 1 - \alpha_{sei} e^{-N\beta_{sei} f_{d,1}} - (1 - \alpha_{sei}) e^{-N f_{d,1}} \quad (\text{Σχέση 3.1})$$

$$S_{\delta}(\delta) = k_{\delta,1} \delta e^{k_{\delta,2} \delta} \quad (\text{Σχέση 3.2})$$

$$f_{\delta,1} = S_{\delta}(\delta) + k_t t_c \quad (\text{Σχέση 3.3})$$

Όπου:

L: Απολεσθείσα χωρητικότητα κανονικοποιημένη

N: Πλήθος κύκλων (πλήρων)

$f_{d,1}$: Κανονικοποιημένος ρυθμός γήρανσης ανά κύκλο (καθαρός αριθμός)

S_{δ} : Απώλεια ζωής ανά κύκλο κανονικοποιημένη (stress model)

δ : DoD_{mean} (μέσο βάθος εκφόρτισης)

t_c : Μέση διάρκεια κύκλου (εκάστοτε προφίλ, σε μονάδες χρόνου)

$k_{\delta,1}$, $k_{\delta,2}$: Συντελεστές stress model

k_t : Συντελεστής μοντέλου (προσδιοριστέος)

Από σχέσεις 3.1 – 3.3, 4.1, 5.1 – 5.2 και από δεδομένα πίνακα 5.1, λαμβάνουμε τα εξής:

	DoD_{av}	f_{d,1}	N
Προφίλ Α	0.934	4.239e-5	4513
Προφίλ Β	0.788	3.897e-5	4910
Διαφορά	-15.6%	-8%	+8.8%

Πίνακας 5.2 Ρυθμοί γήρανσης και κύκλοι – σύγκριση

Παρατηρούμε ότι η διαφορά στο DoD και στη διάρκεια κύκλου των δύο προφίλ οδηγεί σε διαφορετικούς κανονικοποιημένους ρυθμούς γήρανσης και σε διαφορετικά πλήθος κύκλων ζωής. Επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα του πίνακα 5.3 αποτελούν το βασικό σενάριο, με το οποίο θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων των υπολοίπων μοντέλων. Στον επόμενο πίνακα φαίνονται αποκλειστικά οι εκτιμήσεις για τη διάρκεια ζωής, ανά προφίλ:

	Κύκλοι (N)	Έτη (r)
Προφίλ A	4513	12.11
Προφίλ B	4910	16.76

Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα

Συμπεράσματα: Το χαμηλότερο DoD_{av} του προφίλ B δίνει μεγαλύτερο αριθμό κύκλων από το προφίλ A, αποτέλεσμα αναμενόμενο από τη μαθηματική διατύπωση του μοντέλου. Για την περαιτέρω εξέταση του μοντέλου, ακολουθεί παραμετρική ανάλυση στις επόμενες παραγράφους.

5.1.1.1 Σταθερό α_{sei} και μεταβλητό t_c

Προκειμένου να φανεί η επίδραση μόνο της διάρκειας κύκλου, πραγματοποιούμε ανάλυση, μεταβάλλοντας την τιμή του. Λαμβάνουμε τις παρακάτω τιμές:

$$\alpha_{sei} = 0.03138$$

$$\beta_{sei} = 95.14$$

$$t_c = 1 - 13h \text{ με βήμα } 1$$

Λαμβάνουμε τα αποτελέσματα των πινάκων 5.4 και 5.5:

ΠΡΟΦΙΛ	t_c								
	1h	2h	4h	6h	8h	10h	11h	12h	13h
A									
N	5707	5500	5126	4800	4513	4259	4142	4032	3927
r	15.32	14.76	13.76	12.88	12.11	11.43	11.12	10.8	10.54

Πίνακας 5.4 Σταθερό α_{sei} , μεταβλητό t_c

ΠΡΟΦΙΛ B	t_c								
	1h	2h	4h	6h	8h	10h	11h	12h	13h
N	7275	6940	6356	5863	5440	5075	4910	4755	4610
r	24.83	23.68	21.69	20.01	18.57	17.32	16.76	16.23	15.73

Πίνακας 5.5 Σταθερό α_{sei} , μεταβλητό t_c

Συμπεράσματα: Η αύξηση της διάρκειας κύκλου οδηγεί σε αύξηση του κανονικοποιημένου ρυθμού γήρανσης ανά κύκλο. Επομένως λαμβάνουμε μικρότερο πλήθος εκτιμώμενων κύκλων.

5.1.1.2 Σταθερό t_c και μεταβλητό α_{sei}

Προκειμένου να φανεί η επίδραση μόνο του συντελεστή α_{sei} , πραγματοποιούμε ανάλυση, μεταβάλλοντας την τιμή του. Λαμβάνουμε τις παρακάτω τιμές:

$\alpha_{sei} = 0.03$ έως 0.16 (εύρος τιμών βιβλιογραφίας)

$\beta_{sei} = 95.14$

$t_c = 8h$ και $11h$ (βάσει προφίλ)

Λαμβάνουμε τα αποτελέσματα των πινάκων 5.6 και 5.7:

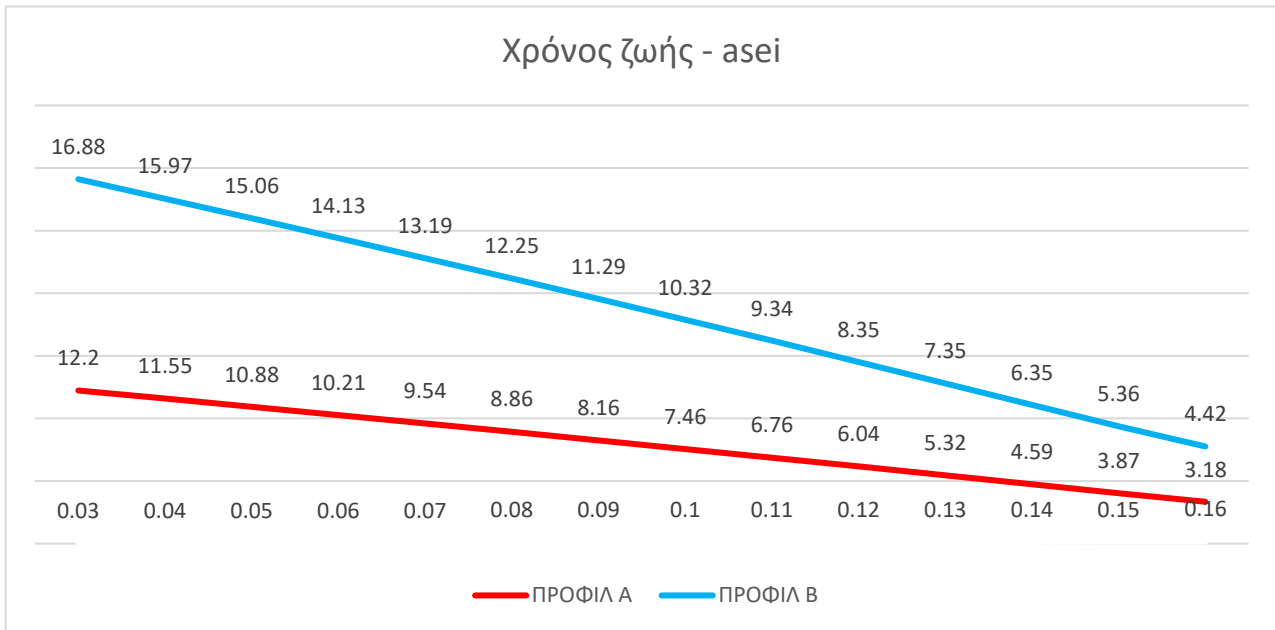
ΠΡΟΦΙΛ	α_{sei}													
	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16
A														
N	4517	4303	4055	3806	3554	3299	3041	2780	2517	2250	1981	1711	1442	1184
r	12.20	11.55	10.88	10.21	9.54	8.86	8.16	7.46	6.76	6.04	5.32	4.59	3.87	3.18

Πίνακας 5.6 Σταθερό t_c , μεταβλητό α_{sei}

ΠΡΟΦΙΛ	α_{sei}													
	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16
B														
N	4946	4680	4412	4140	3865	3588	3308	3024	2737	2448	2155	1862	1572	1296
r	16.88	15.97	15.06	14.13	13.19	12.25	11.29	10.32	9.34	8.35	7.35	6.35	5.36	4.42

Πίνακας 5.7 Σταθερό t_c , μεταβλητό α_{sei}

Η διάρκεια ζωής σε σχέση με το συντελεστή α_{sei} φαίνεται στο σχήμα 5.1:



Σχήμα 5.1 Μεταβολής χρόνου ζωής ως προς α_{sei}

Συμπεράσματα: Η επίδραση του συντελεστή α_{sei} είναι σημαντική, καθώς επιφέρει μεγάλη μεταβολή στον αριθμό των εκτιμώμενων κύκλων. Στην περίπτωση του προφίλ Β, αύξηση του α κατά 0.01 μειώνει κατά 1 έτος την προσδόκιμη διάρκεια ζωής.

5.1.1.3 Σταθερά t_c και α_{sei} και μεταβλητό β_{sei}

Προκειμένου να φανεί η επίδραση μόνο του συντελεστή β_{sei} , πραγματοποιούμε ανάλυση, μεταβάλλοντας την τιμή του. Λαμβάνουμε τα αποτελέσματα του πίνακα 5.8:

α_{sei}	β_{sei}							
	90	95	100	105	110	115	120	125
0.03	12.20	12.20	12.20	12.20	12.20	12.20	12.20	12.20
0.05	10.88	10.88	10.88	10.88	10.88	10.88	10.88	10.88
0.08	8.85	8.85	8.85	8.85	8.85	8.85	8.85	8.85
0.10	7.46	7.46	7.46	7.46	7.46	7.46	7.46	7.46
0.13	5.32	5.32	5.32	5.32	5.32	5.32	5.32	5.32
0.14	4.60	4.60	4.59	4.59	4.59	4.59	4.58	4.58
0.15	3.89	3.88	3.87	3.86	3.85	3.85	3.85	3.85
0.16	3.22	3.20	3.18	3.16	3.15	3.14	3.13	3.12

Πίνακας 5.8 Σταθερά t_c και α_{sei} και μεταβλητό β_{sei}

Για τον παραπάνω υπολογισμό, λάβαμε τις εξής τιμές:

$$\alpha_{sei} = 0.03138$$

$\beta_{sei} = 90$ έως 125 με βήμα 5 (εύρος περί των τιμών βιβλιογραφίας 95.14 και 121)

$$t_c = 8h$$

Συμπεράσματα: Από την παραπάνω ανάλυση είναι εμφανής η αμελητέα επίδραση του συντελεστή β_{sei} (έως 3% και μόνο στις απολύτως ακραίες τιμές που μπορεί να λάβει ο α_{sei}), σε σχέση με αυτή του συντελεστή α_{sei} . Για το λόγο αυτό στην περαιτέρω ανάλυση θα λάβουμε $\beta_{sei} = 95.14$ (τιμή βιβλιογραφίας).

5.1.2 Calendar aging (ημερολογιακή γήρανση)

Στην περίπτωση αυτή δεν λαμβάνονται υπόψη επιμέρους χαρακτηριστικά των προφίλ λειτουργίας και η ανάλυση είναι κοινή και για τα δύο (A και B). Λαμβάνουμε ως αποτέλεσμα το χρονικό σημείο, στο οποίο $RC < 0.8$. Οι εξισώσεις που διέπουν το μοντέλο επαναλαμβάνονται για λόγους ευκολίας:

$$L = 1 - \alpha_{sei} e^{-t\beta_{sei}f_d^t} - (1 - \alpha_{sei}) e^{-t f_d^t} \quad (\text{Σχέση 3.4})$$

Όπου:

f_d^t : Κανονικοποιημένος ρυθμός γήρανσης ανά μονάδα χρόνου (h^{-1} ή sec^{-1})

t: Χρόνος (μονάδες χρόνου)

Λοιπά όπως §3.3.1.1. Από σχέσεις 3.1 – 3.4, 5.1 – 5.2 και από δεδομένα πίνακα 5.1, λαμβάνουμε τα αποτελέσματα του πίνακα 5.9.

	Κύκλοι (N)	Έτη (r)
Προφίλ A	-	17.23
Προφίλ B	-	17.23

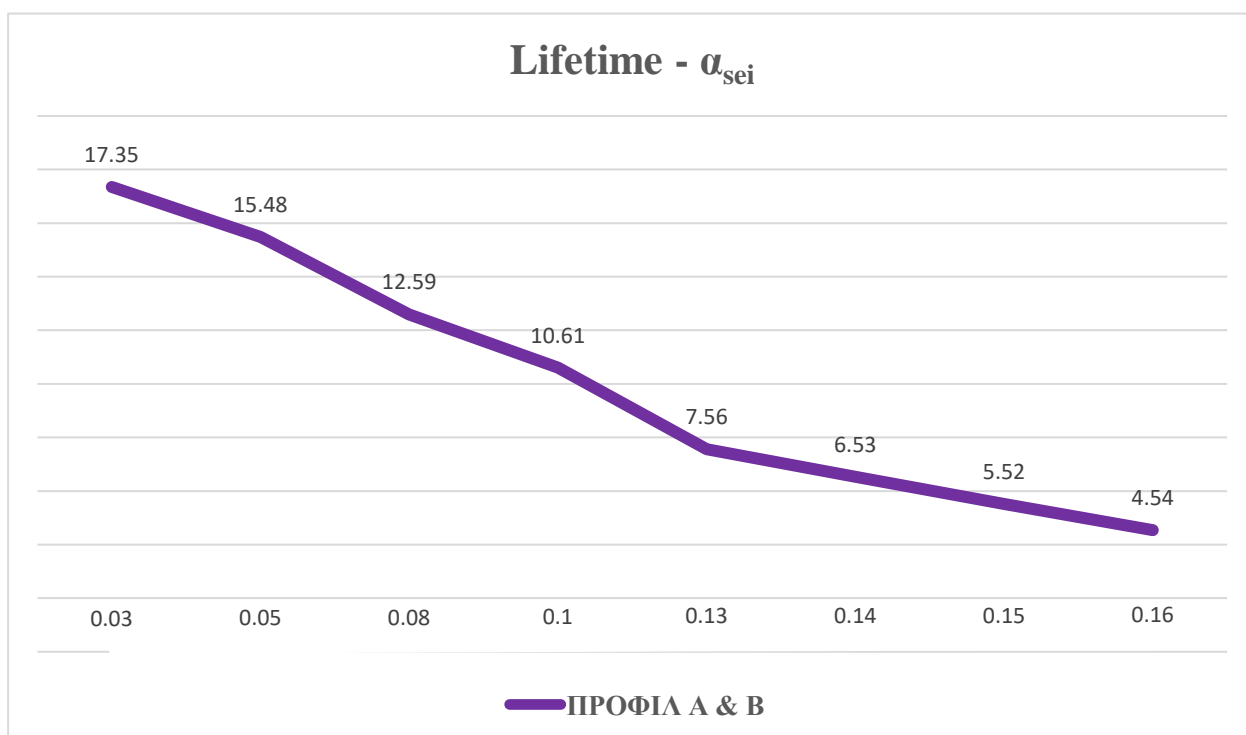
Πίνακας 5.9 Αποτελέσματα

Δεν υπάρχουν τιμές στη στήλη «Κύκλοι (N)», διότι η ανάλυση αφορά αποκλειστικά την ημερολογιακή γήρανση της μπαταρίας στην περίπτωση κατά την οποία δεν χρησιμοποιείται.

Προχωρούμε σε περαιτέρω ανάλυση, μεταβάλλοντας το συντελεστή α_{sei} και λαμβάνουμε τα αποτελέσματά του πίνακα 5.10 και του σχήματος 5.2.

α_{sei}	Έτη (r)
0.03	17.35
0.05	15.48
0.08	12.59
0.10	10.61
0.13	7.56
0.14	6.53
0.15	5.52
0.16	4.54

Πίνακας 5.10 Αποτελέσματα με μεταβολή α_{sei}



Σχήμα 5.2 Μεταβολής χρόνου ζωής ως προς α_{sei}

Συμπεράσματα: Η επίδραση του συντελεστή α_{sei} είναι σημαντική, καθώς επιφέρει μεγάλη μεταβολή στον αριθμό των εκτιμώμενων κύκλων. Αύξηση του α κατά 0.01 μειώνει κατά 1 έτος την προσδόκιμη διάρκεια ζωής.

5.1.3 Cycle – calendar aging (συνδυασμός κυκλικής και ημερολογιακής γήρανσης)

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται οι ίδιες σχέσεις με την κυκλική γήρανση της §5.1.1, με ενσωματωμένη την ημερολογιακή γήρανση της §5.1.2. Η ενσωμάτωση γίνεται με χρήση της σχέσης 3.5, όπου ο κανονικοποιημένος ρυθμός γήρανσης ανά κύκλο $f_{d,1}$ προκύπτει με συμπερίληψη και του κανονικοποιημένου ρυθμού γήρανσης ανά μονάδα χρόνου $f_{t,d}$. Σημειώνεται ότι η περίπτωση αυτή έχει εφαρμογή **μόνον όταν οι κύκλοι είναι σταθεροί**, κάτι που θα έδινε στους συντελεστές του μοντέλου διαφορετικές τιμές. Οι εξισώσεις που διέπουν το μοντέλο επαναλαμβάνονται για λόγους ευκολίας: Σχέσεις 3.1 έως 3.3 και επιπλέον:

$$f_{d,1} = t_c f_{d,t} + f_{d,cycle} \quad (\text{Σχέση 3.5})$$

Όπου:

$f_{d,cycle}$: Κανονικοποιημένος ρυθμός γήρανσης ανά κύκλο (καθαρός αριθμός)

$f_{d,1}$: Κανονικοποιημένος αθροιστικός ρυθμός γήρανσης ανά κύκλο (καθαρός αριθμός)

Λοιπά όπως §3.2.1.1. Από σχέσεις 3.1 – 3.3, 3.5, 4.1, 5.1 – 5.2 και από δεδομένα πίνακα 5.1, λαμβάνουμε τα εξής:

	DoD_{av}	f_{d,1}	N
Προφίλ Α	0.934	5.2528e-05	3643
Προφίλ Β	0.788	5.2908e-05	3617
Διαφορά	-15.6%	+0.7%	-0.7%

Πίνακας 5.11 Ρυθμοί γήρανσης και κύκλοι – σύγκριση

Στον επόμενο πίνακα φαίνονται αποκλειστικά οι εκτιμήσεις για τη διάρκεια ζωής, ανά προφίλ:

	Κύκλοι (N)	Έτη (r)
Προφίλ Α	3643	9.78
Προφίλ Β	3617	12.34

Πίνακας 5.12 Αποτελέσματα

Συμπεράσματα: Η συνδυαστική επίδραση κυκλικής – ημερολογιακής γήρανσης τείνει να μειώσει σημαντικά τη διαφορά στην προσδόκιμη διάρκεια ζωής μεταξύ των 2 προφίλ λειτουργίας. Για την περαιτέρω εξέταση του μοντέλου, ακολουθεί παραμετρική ανάλυση.

5.1.3.1 Σταθερό α_{sei} και μεταβλητό t_c

Προκειμένου να φανεί η επίδραση μόνο της διάρκειας κύκλου, πραγματοποιούμε ανάλυση, μεταβάλλοντας την τιμή του. Λαμβάνουμε τις παρακάτω τιμές:

$$\alpha_{sei} = 0.03138$$

$$\beta_{sei} = 95.14$$

$$t_c = 1 - 13h \text{ με βήμα } 1$$

Λαμβάνουμε τα αποτελέσματα των πινάκων 5.13 και 5.14:

ΠΡΟΦΙΛ Α	t_c								
	1h	2h	4h	6h	8h	10h	11h	12h	13h
N	5500	5126	4513	4032	3643	3322	3182	3054	2935
r	14.76	13.76	12.11	10.82	9.78	8.92	8.54	8.20	7.88

Πίνακας 5.13 Σταθερό α_{sei} , μεταβλητό t_c

ΠΡΟΦΙΛ Α	t_c								
	1h	2h	4h	6h	8h	10h	11h	12h	13h
N	6940	6356	5440	4755	4223	3798	3617	3451	3300
r	23.68	21.69	18.57	16.23	14.41	12.96	12.34	11.78	11.26

Πίνακας 5.14 Σταθερό α_{sei} , μεταβλητό t_c

Συμπεράσματα: Η αύξηση της διάρκειας κύκλου οδηγεί σε αύξηση του κανονικοποιημένου ρυθμού γήρανσης ανά κύκλο. Επομένως λαμβάνουμε μικρότερο πλήθος εκτιμώμενων κύκλων.

5.1.3.2 Σταθερό t_c και μεταβλητό α_{sei}

Προκειμένου να φανεί η επίδραση μόνο του συντελεστή α_{sei} , πραγματοποιούμε ανάλυση, μεταβάλλοντας την τιμή του. Λαμβάνουμε τις παρακάτω τιμές:

$\alpha_{sei} = 0.03$ έως 0.16 (εύρος τιμών βιβλιογραφίας)

$\beta_{sei} = 95.14$

$t_c = 8h$ και $11h$ (βάσει προφίλ)

Λαμβάνουμε τα αποτελέσματα των πινάκων 5.15 και 5.16:

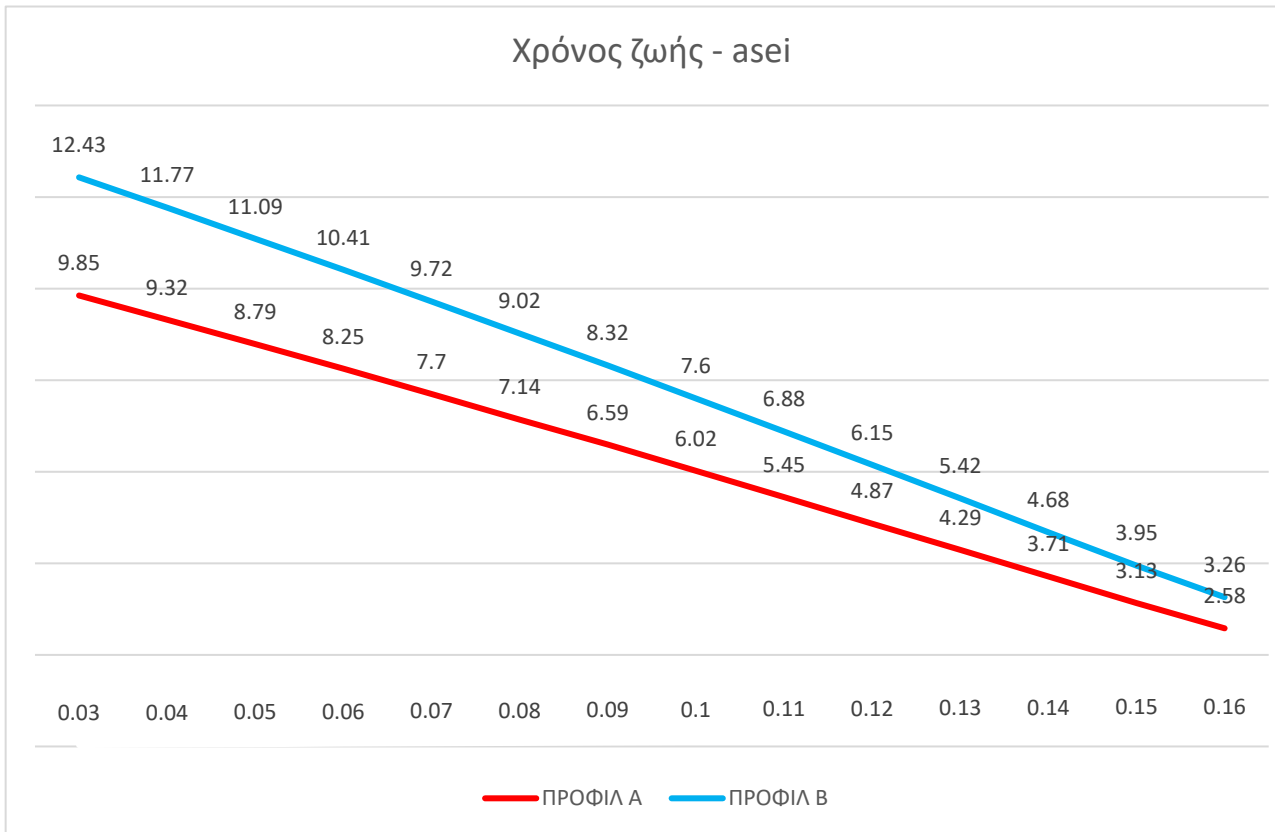
ΠΡΟΦΙΛ	α_{sei}													
	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16
A														
N	3670	3472	3273	3072	2868	2662	2454	2244	2031	1816	1599	1382	1166	962
r	9.85	9.32	8.79	8.25	7.70	7.14	6.59	6.02	5.45	4.87	4.29	3.71	3.13	2.58

Πίνακας 5.15 Σταθερό t_c και μεταβλητό α_{sei}

ΠΡΟΦΙΛ	α_{sei}													
	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16
B														
N	3643	3448	3250	3050	2847	2643	2437	2228	2017	1803	1588	1372	1158	955
r	12.43	11.77	11.09	10.41	9.72	9.02	8.32	7.60	6.88	6.15	5.42	4.68	3.95	3.26

Πίνακας 5.16 Σταθερό t_c και μεταβλητό α_{sei}

Η διάρκεια ζωής σε σχέση με το συντελεστή α_{sei} με όρους χρόνου φαίνεται στο σχήμα 5.3:

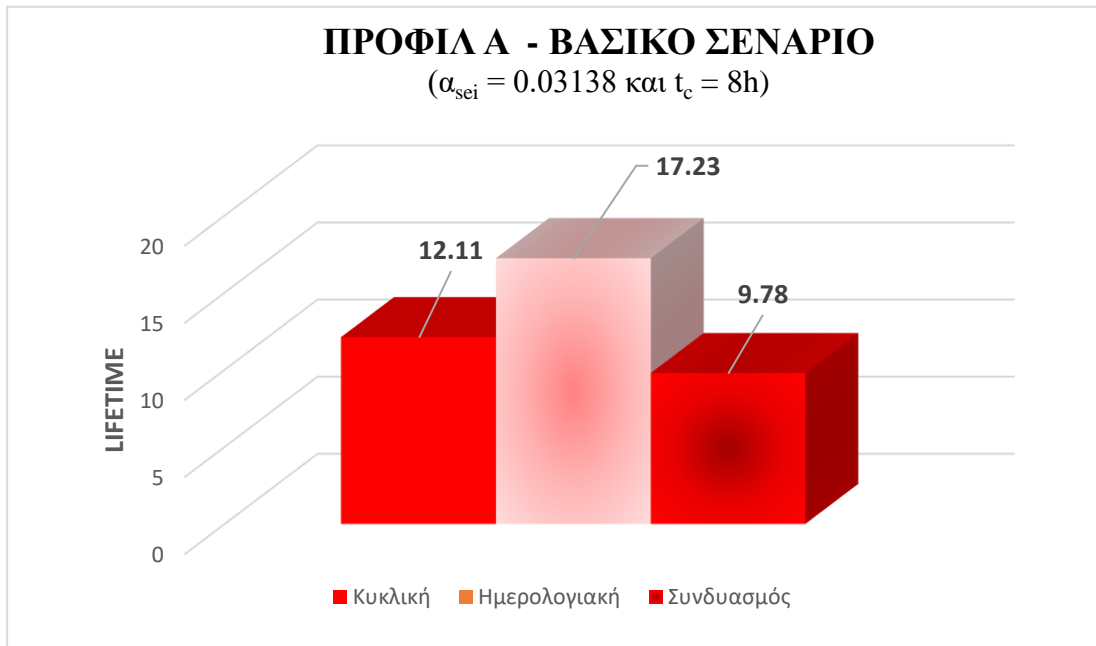


Σχήμα 5.3 Μεταβολής χρόνου ζωής ως προς a_{sei}

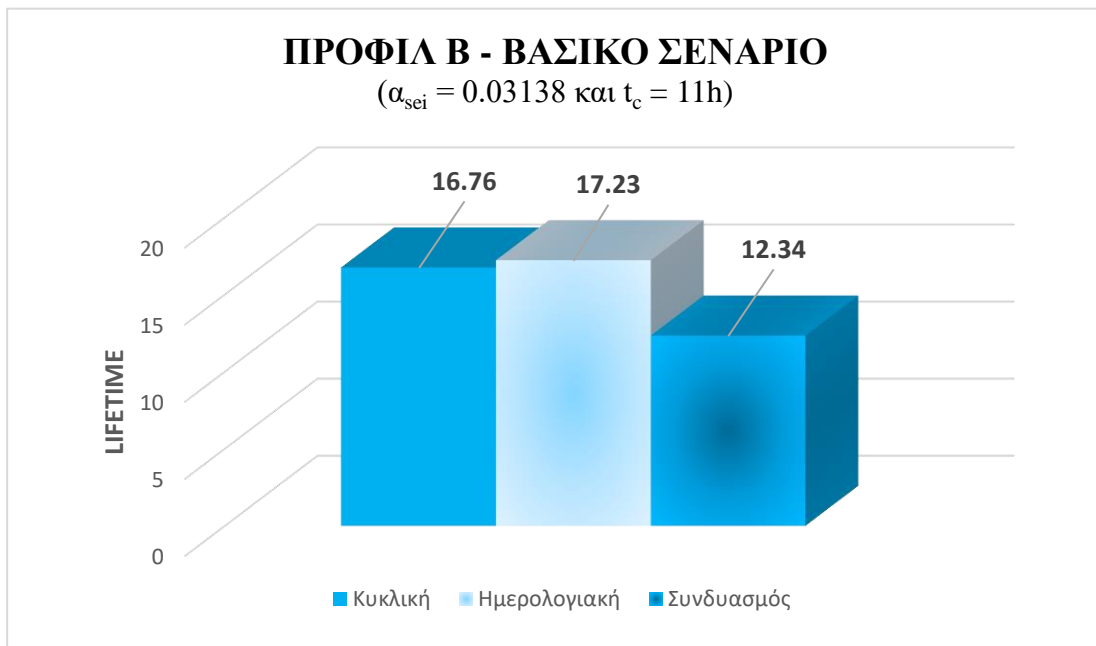
Συμπεράσματα: Η επίδραση του συντελεστή a_{sei} είναι σημαντική, καθώς επιφέρει μεγάλη μεταβολή στον αριθμό των εκτιμώμενων κύκλων. Στην περίπτωση του προφίλ Β, αύξηση του a κατά 0.01 μειώνει κατά 8 μήνες την προσδόκιμη διάρκεια ζωής.

5.1.4 Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων ημιεμπειρικού μοντέλου

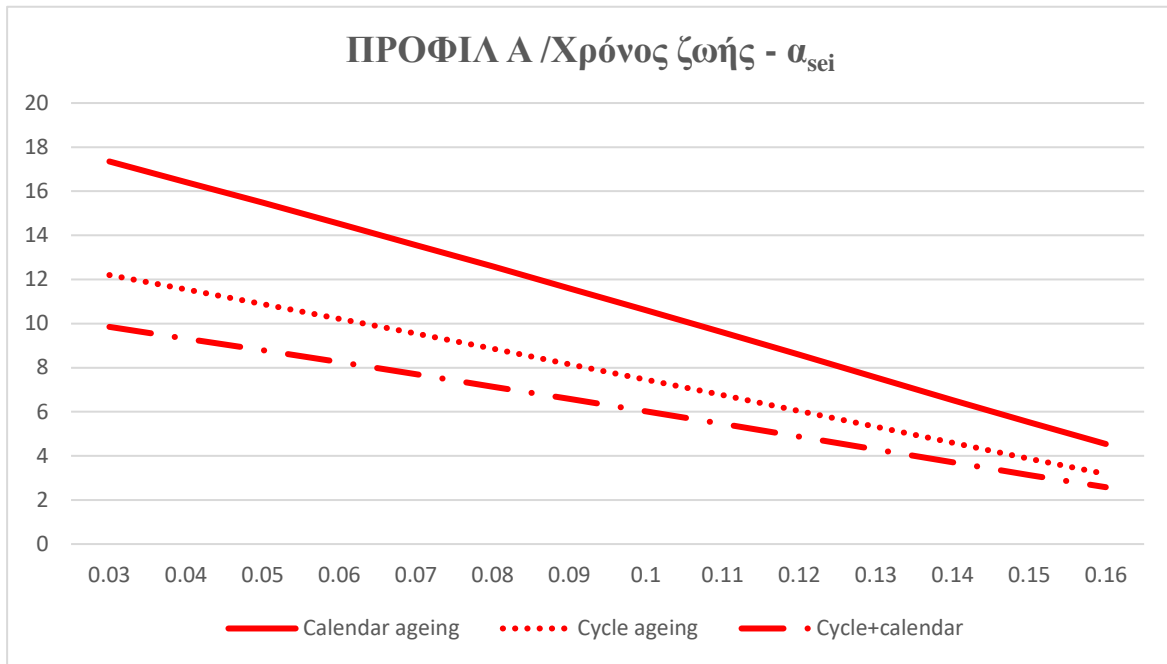
Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εξέταση των προφίλ Α και Β.



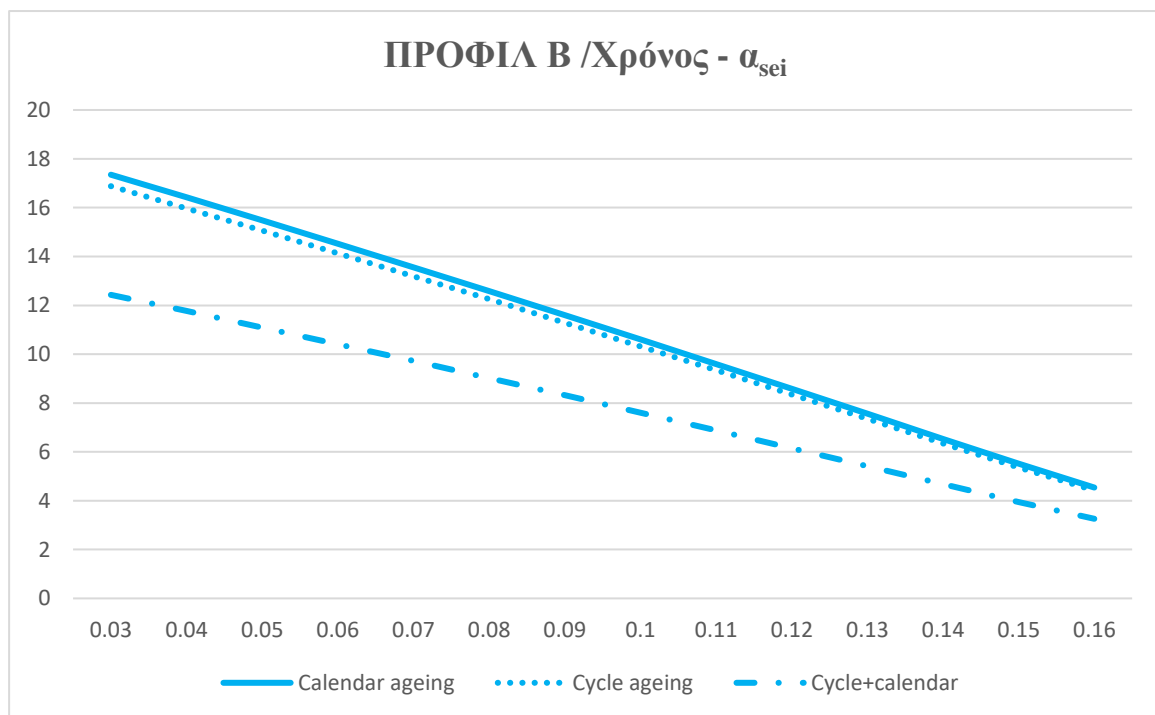
Σχήμα 5.4 Βασικά αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων



Σχήμα 5.5 Βασικά αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων



Σχήμα 5.6 Μεταβολής χρόνου ζωής ως προς α_{sei} για όλες τις περιπτώσεις



Σχήμα 5.7 Μεταβολής χρόνου ζωής ως προς α_{sei} για όλες τις περιπτώσεις

5.2 Μοντέλο γήρανσης βάσει κύκλων

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή του μοντέλου, καθώς και οι αντίστοιχες πηγές:

	Προφίλ λειτουργίας	Βιβλιογραφία
	CpD_{av}	Τύπος μπαταρίας
Προφίλ Α	1.020	Κάθε τύπος
Προφίλ Β	0.802	

Πίνακας 5.17 Δεδομένα

Η εξίσωση που διέπει το μοντέλο επαναλαμβάνεται για λόγους ευκολίας:

$$r = \frac{C}{n * D} \quad (\text{Σχέση 3.6})$$

C: Ονομαστικοί κύκλοι ζωής = 5200

n: Κύκλοι ανά ημέρα = CpD_{av}

D: Ημέρες λειτουργίας ανά έτος = 365

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5.18:

	Κύκλοι (N)	Έτη (r)
Προφίλ Α	5200	13.96
Προφίλ Β	5200	17.76

Πίνακας 5.18 Αποτελέσματα

Συμπεράσματα: Είναι φανερή η επίδραση του μέσου αριθμού κύκλων ανά ημέρα, αναμενόμενο από την απλή μαθηματική διατύπωση του μοντέλου.

5.3 Μοντέλο γήρανσης σταθερό ανά μονάδα ενέργειας

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή του μοντέλου, καθώς και οι αντίστοιχες πηγές:

	Προφίλ λειτουργίας	Βιβλιογραφία
	CpD _{av}	Τύπος μπαταρίας
Προφίλ Α	1.020	Li – ion
Προφίλ Β	0.802	

Πίνακας 5.19 Δεδομένα

Η εξίσωση που διέπει το μοντέλο επαναλαμβάνεται για λόγους ευκολίας:

$$D_{\text{fixed}} = \frac{b_t}{CL_{\text{nom}} * \left(\frac{DoD_{\text{nom}}\%}{100} \right) * 2 * B} \quad (\text{Σχέση 3.7})$$

D_{fixed} : Κλάσμα της ζωής της μπαταρίας που χάνεται όταν b_t ενέργεια προσθαιρείται από αυτήν κατά τη φόρτιση/εκφόρτιση. Αν $D_{\text{fixed}} = 1$, η μπαταρία χρήζει αντικατάστασης.

b_t : CpD_{av} x 2 x B

CL_{nom}: 5200

DoD_{nom}: 100%

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5.20:

	Κύκλοι (N)	Έτη (r)
Προφίλ Α	5098	13.6
Προφίλ Β	6484	22.13

Πίνακας 5.20 Αποτελέσματα

Συμπεράσματα: Είναι φανερή η επίδραση του μέσου αριθμού κύκλων ανά ημέρα, κάτι που αναμενόταν από τη μαθηματική διατύπωση του μοντέλου.

5.4 Μοντέλο γήρανσης πρακτικό

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή του μοντέλου, καθώς και οι αντίστοιχες πηγές:

	Προφίλ λειτουργίας	Βιβλιογραφία
	DoD _{av}	Τύπος μπαταρίας
Προφίλ Α	0.934	Li – ion
Προφίλ Β	0.788	α, β, γ

Πίνακας 5.21 Δεδομένα

Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη του τη θερμοκρασία λειτουργίας και το βάθος εκφόρτισης. Οι εξισώσεις που διέπουν το μοντέλο επαναλαμβάνονται για λόγους ευκολίας:

$$h_Y(d) = \alpha \log(d) + \beta \quad (\text{Σχέση 3.8α})$$

Όπου:

$h_Y(d)$: Διάρκεια ζωής σε κύκλους εξαρτημένη από το DoD (d)

d: Βάθος εκφόρτισης (DoD)

α, β: Συντελεστές προσδιοριστέοι

$$h_Y(T) = \begin{cases} \alpha_1 e^{-\beta_1 T} + \gamma_1 & -40^\circ \text{ C} \leq T < 0^\circ \text{ C} \\ \alpha_2 T + \beta_2 & 0^\circ \text{ C} \leq T < 18^\circ \text{ C} \\ \alpha_3 T + \beta_3 & -18^\circ \text{ C} \leq T < 50^\circ \text{ C} \\ \alpha_4 e^{-\beta_4(T-50)} + \gamma_4 & 50^\circ \text{ C} \leq T \leq 80^\circ \text{ C} \end{cases} \quad (\text{Σχέση 3.8β})$$

Όπου:

$h_Y(T)$: Διάρκεια ζωής σε κύκλους εξαρτημένη από τη θερμοκρασία λειτουργίας (T)

T: Θερμοκρασία λειτουργίας

α, β, γ : Συντελεστές προσδιοριστέοι

a. Υπολογισμός βάσει DoD:

Όπως αναλύθηκε στην §4.2, ως μπαταρία – βάση σύγκρισης θεωρήθηκε μπαταρία, με σχέση κύκλων – DoD όπως στον πίνακα 4.3, οποίος επαναλαμβάνεται για ευκολία:

DoD	0.400	0.600	0.800	1.000
Cycles	14800	9800	6350	5200

Πίνακας 4.3 Σημεία καμπύλης κύκλων – DoD

Προκειμένου να έχουμε κοινή βάση στα δεδομένα που χρησιμοποιούμε στα μοντέλα και τα αποτελέσματα να μπορούν να υπόκεινται σε σύγκριση, προσδιορίζουμε stress model παραμετροποιημένο για την περίπτωση μας. Με χρήση της συνάρτησης fitnlm (MATLAB) πραγματοποιούμε fitting των σημείων σε λογαριθμική καμπύλη (σχέση 3.8α) και προσδιορίζουμε τους συντελεστές. Οι τιμές των συντελεστών καθώς και η εξίσωση για την περίπτωση μας, δίνονται στις σχέσεις 5.3 και 5.4, ενώ τα αποτελέσματα από τη χρήση του μοντέλου στον πίνακα 5.22.

$$\alpha = -10799 \text{ και } \beta = 4582 \quad (\text{σχέση 5.3})$$

$$h_y(d) = -10799 \log(d) + 4582 \quad (\text{σχέση 5.4})$$

	Κύκλοι (N)	Έτη (r)
Προφίλ Α	5319	14.27
Προφίλ Β	7155	24.42

Πίνακας 5.22 Αποτελέσματα

Συμπεράσματα: Παρατηρούμε μία αναμενόμενη διαφοροποίηση στη διάρκεια ζωής, λόγω του λογαριθμικής stress model.

b. Υπολογισμός βάσει T:

Δεν διαθέτουμε δεδομένα θερμοκρασίας λειτουργίας που να σχετίζονται με τα προφίλ λειτουργίας A και B, επομένως δεν είναι δυνατός ο σχετικός υπολογισμός. Επιπρόσθετα, στην παρούσα ανάλυση δεν λαμβάνεται υπόψη η θερμοκρασία, διότι σε BESS είναι σχετικά σταθερή και ελεγχόμενη, ώστε να κινείται εντός ενός στενού εύρους τιμών. Ωστόσο για λόγους πληρότητας, θέτουμε στη σχέση 3.8β ένα υποθετικό εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας από $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ με βήμα 5 και λαμβάνουμε τα αποτελέσματα του πίνακα 5.23:

T ($^{\circ}\text{C}$)														
	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
h _Υ (T)	3973	4390	4768	4842	4917	4992	5029	4994	4959	4924	4889	4855	4820	4898

Πίνακας 5.23 Αποτελέσματα σε υποθετικό εύρος θερμοκρασιών

Συμπεράσματα: Επιβεβαιώνεται ότι το βέλτιστο εύρος λειτουργίας είναι μεταξύ $10 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, όπου η μπαταρία λαμβάνει τις μέγιστες τιμές εκτιμώμενων κύκλων και δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τη διάρκεια ζωής της.

5.5 Μοντέλο γήρανσης πολυπαραγοντικό

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή του μοντέλου, καθώς και οι αντίστοιχες πηγές:

	Προφίλ λειτουργίας		Βιβλιογραφία	
	DoD _{av}	SoC _{av}	Τύπος μπαταρίας	Συντελεστές μοντέλου
Προφίλ A	0.934	0.4972	Li-ion	q=1471
				s=214.3
Προφίλ B	0.788	0.4583	Li-ion	t=0.6111
				u=0.3369
				v=-2.295

Πίνακας 5.24

Η εξίσωση που διέπει το μοντέλο επαναλαμβάνεται για λόγους ευκολίας:

$$CL(DOD, SOC_{av}) = q + \left(\frac{u}{2 * v} * (s + 100 * u) - 200 * t \right) * DOD + s * SOC_{av} + t * DOD^2 + u * DOD * SOC_{av} + v * SOC_{av}^2 \quad (\text{Σχέση 3.9})$$

Όπου:

CL: Διάρκεια ζωής σε κύκλους

q, s, t, u, v: Συντελεστές προσδιοριστέοι που προκύπτουν από πειραματικά σειτ δεδομένων, με προσαρμογή στη συνάρτηση. Από τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει ότι η διάρκεια ζωής των μπαταριών μειώνεται για κύκλους τόσο σε περιοχές υψηλού, όσο και χαμηλού SoC, ενώ η υποβάθμιση είναι μικρότερη για κύκλους σε περιοχές μεσαίου SOC. Έτσι προκύπτει ότι απαιτείται πολυωνυμική συνάρτηση δεύτερης τάξης για το SoC_{av}. Επίσης ίδια εξάρτηση θεωρούν πως υπάρχει και από το DoD_{av}. Επιπρόσθετα θέτουν και όρους που περιλαμβάνουν και τις 2 μεταβλητές, διότι υπάρχει αλληλεξάρτηση μεταξύ τους. Αντικαθιστούμε στη σχέση 3.9 τις τιμές των δεδομένων και λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

	Κύκλοι (N)	Έτη (r)
Προφίλ A	1446	3.88
Προφίλ B	1458	4.97

Πίνακας 5.25 Αποτελέσματα

Συμπεράσματα: Τα αποτελέσματα είναι σημαντικά διαφορετικά από τα λοιπά υπό εξέταση μοντέλα. Σημειώνεται ότι η μπαταρία που εξετάζεται στο [34] είναι Panasonic NCA103450 (<https://industrial.panasonic.com/sa/products/pt/lithium-ion/models/NCA103450>), για την οποία αναφέρεται «**nominal cycle life 649**» και χρησιμοποιείται σε smartphones. Άρα είναι **πολύ κάτω από τις 5200** που εμείς παίρνουμε σαν ονομαστικό πλήθος κύκλων και εκεί αποδίδουμε τη μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τα αποτελέσματα των λοιπών μοντέλων. Σε περίπτωση που διαθέταμε δεδομένα γήρανσης, θα μπορούσαμε να προσδιορίσουμε τους συντελεστές του μοντέλου για την περίπτωσή μας, με χρήση curve fitter. Εκτιμάται ότι σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα θα συνέκλιναν με τα υπόλοιπα.

5.6 Μοντέλο γήρασης κυρτό

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή του μοντέλου, καθώς και οι αντίστοιχες πηγές:

Προφίλ λειτουργίας		Βιβλιογραφία
DoD	CpDav	Τύπος μπαταρίας
Προφίλ Α	(ανά κύκλο) 1.020	LMO
Προφίλ Β	(ανά κύκλο) 0.802	

Πίνακας 5.26

Οι εξισώσεις που διέπουν το μοντέλο επαναλαμβάνονται για λόγους ευκολίας:

$$\Phi(u) = k_1 u e^{k_2 u} \quad (\text{Σχέση 3.10})$$

$$\Phi(u) = k_3 u^{k_4} \quad (\text{Σχέση 3.11})$$

$$\Delta L(x) = \sum_{i=1}^N \frac{\Phi(u_i)}{2}, \text{ για μισό κύκλο} \quad (\text{Σχέση 3.12})$$

$$\Delta L(x) = \sum_{i=1}^N \Phi(u_i), \text{ για ολόκληρο κύκλο} \quad (\text{Σχέση 3.13})$$

Όπου:

Φ : Απώλεια ζωής ανά κύκλο κανονικοποιημένη (stress model)

k : Συντελεστές stress model

u : DoD κάθε κύκλου

ΔL : Αθροιστική απώλεια ζωής (όλων των κύκλων)

Εφόσον το $1/\Phi$ μας δίνει τους κύκλους μέχρι το EOL, τότε το EOL συμβαίνει όταν το άθροισμα των Φ γίνει 1:

$$RC = 1 - c\Sigma\Phi \quad (\text{σχέση 5.5})$$

$$\text{Για } \Sigma\Phi = 1 \text{ θα έχουμε } RC=0.80 \quad (\text{σχέση 5.6})$$

Από σχέσεις 5.5 και 5.6 συμπεραίνουμε ότι $c = 0.2$ και επομένως:

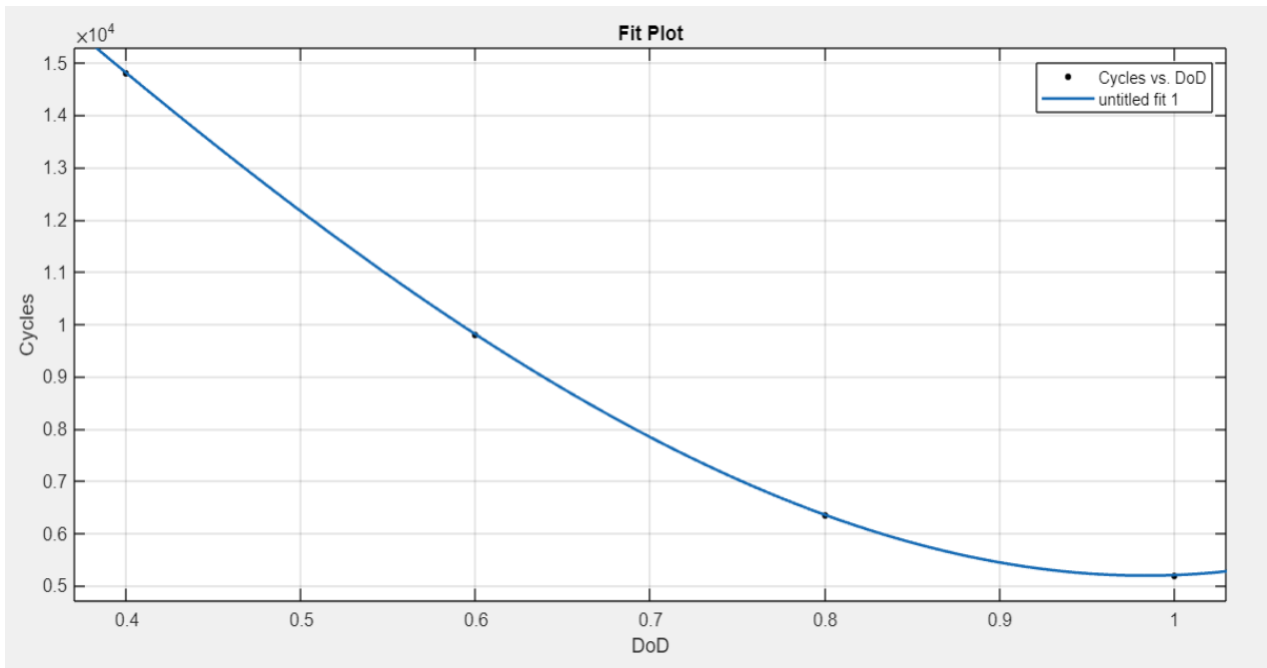
$$RC = 1 - 0.2 * \sum_{n=1}^N \left(\frac{\Phi(u_i)}{2} + \Phi(u_i) \right) \quad (\text{σχέση 5.7})$$

Το stress model Φ είναι ίσο με το αντίστροφο της συνάρτησης κύκλων – DoD. Όπως αναλύθηκε στην §4.2, ως μπαταρία – βάση σύγκρισης θεωρήθηκε μπαταρία, με σχέση κύκλων – DoD όπως στον πίνακα 4.3. Προκειμένου να έχουμε κοινή βάση στα δεδομένα που χρησιμοποιούμε στα μοντέλα και τα αποτελέσματα να μπορούν να υπόκεινται σε σύγκριση, προσδιορίζουμε stress model παραμετροποιημένο για την περίπτωση μας. Με χρήση του curve fitter (MATLAB), πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για την επιλογή της βέλτιστης καμπύλης, που να εκφράζει τα παραπάνω δεδομένα. Οι καμπύλες που δοκιμάστηκαν και η στατιστική τους αξιολόγηση παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 5.27.

Καμπύλη	R-square	SSE
$f(x) = p1 * x + p2$	0.933	3.734e+06
$f(x) = p1 * x^2 + p2 * x + p3$	0.9995	2.813e+04
$f(x) = p1 * x^3 + p2 * x^2 + p3 * x + p4$	1	1.754e-22
$f(x) = a * \exp(b * x)$	0.9896	5.795e+05
$f(x) = a * \exp(b * x) + c * \exp(d * x)$	0.9999	6718

Πίνακας 5.27 Καμπύλες κύκλων-DoD προτεινόμενες από curve fitter

Από τον πίνακα 5.27 γίνεται σαφές ότι η βέλτιστη καμπύλη είναι η πολυωνυμική 3^{ης} τάξης, η οποία διέρχεται ακριβώς από τα ζεύγη τιμών που έχουμε ως δεδομένα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 5.8 Επιλεγθείσα καμπύλη κύκλων-DoD

Συνεπώς επιλέγεται ως συνάρτηση κύκλων – DoD, η πολυωνυμική 3ης τάξης της σχέση 5.8, με συντελεστές όπως στη σχέση 5.9. Το stress model δίνεται στη σχέση 5.10.

$$f(x) = p1 * x^3 + p2 * x^2 + p3 * x + p4 \quad (\text{σχέση 5.8})$$

$$p1 = 1.563e+04, p2 = -8750, p3 = -2.812e+04, p4 = 2.645e+04 \quad (\text{σχέση 5.9})$$

$$\Phi = 1 / f = [p1 * x^3 + p2 * x^2 + p3 * x + p4]^{-1} \quad (\text{σχέση 5.10})$$

Με χρήση των σχέσεων 5.7 – 5.10 και των δεδομένων του πίνακα 5.26, λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

	Κύκλοι (N)	Έτη (r)
Προφίλ Α	5780	15.51
Προφίλ Β	6490	22.15

Πίνακας 5.28 Αποτελέσματα

Συμπεράσματα: Το μικρότερο DoD του προφίλ Β δίνει αποτέλεσμα με περισσότερους εκτιμώμενους κύκλους, αναμενόμενο από τη μαθηματική διατύπωση του μοντέλου.

5.7 Μοντέλο γήρανσης ενεργειακής διεκπεραιωτικής ικανότητας (energy throughput)

Το μοντέλο γήρανσης ενεργειακής διεκπεραιωτικής ικανότητας διέπεται από την παρακάτω εξίσωση (επαναλαμβάνεται για ευκολία):

$$\Delta C = a \sum_t^n (p_t + q_t) \quad (\text{Σχέση 3.14})$$

Η εξέταση του μοντέλου υπό τα προφίλ λειτουργίας A και B δεν πραγματοποιήθηκε, για τους παρακάτω λόγους:

- Έλλειψη δεδομένων αναφορικά με το συντελεστή a του μοντέλου.
- Έλλειψη δεδομένων για τη συνολική ενέργεια φόρτισης και αποφόρτισης p_i και q_i .

Επιπρόσθετα, εκτιμάται ότι η εξέταση της περίπτωσης καλύπτεται από την εξέταση του μοντέλου σταθερού ανά μονάδα ενέργειας (§5.3) και του μοντέλου βάσει κύκλων (§5.2), δεδομένου ότι μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμο με αυτά, όπως αναφέρθηκε στην §3.2.7.

5.8 Μοντέλο γήρανσης λόγω ισχύος (power degradation model)

Το μοντέλο γήρανσης λόγω ισχύος διέπεται από την παρακάτω εξίσωση (επαναλαμβάνεται για ευκολία):

$$\Delta C = a \sum_t^n (f(d_t) + f(c_t)) \quad (\text{Σχέση 3.15})$$

Η εξέταση του μοντέλου υπό τα προφίλ λειτουργίας A και B δεν πραγματοποιήθηκε, για τους παρακάτω λόγους:

- Έλλειψη δεδομένων αναφορικά με το συντελεστή a του μοντέλου.
- Έλλειψη ακριβούς μαθηματικής διατύπωσης της συνάρτησης f .
- Έλλειψη δεδομένων για την ισχύ φόρτισης και αποφόρτισης c_i και d_i .

Επιπρόσθετα, εκτιμάται ότι η εξέταση της περίπτωσης δεν παρουσιάζει χρηστικό ενδιαφέρον, δεδομένου ότι ο ρυθμός φόρτισης στα σύγχρονα BESS είναι μικρότερος της μονάδας και επομένως η επίδρασή του αμελητέα.

5.9 Μοντέλο γήρανσης βάθους εκφόρτισης κύκλων (cycle depth model)

Το μοντέλο γήρανσης βάθους εκφόρτισης κύκλων διέπεται από την παρακάτω εξίσωση (επαναλαμβάνεται για ευκολία):

$$\Delta C = \sum_i^n f(m_i) \mid \{m_i\} = \text{Rainflow}(d_t - c_t) \quad (\text{Σχέση 3.16})$$

Η εξέταση του μοντέλου υπό τα προφίλ λειτουργίας A και B δεν πραγματοποιήθηκε, για τους παρακάτω λόγους:

- Έλλειψη ακριβούς μαθηματικής διατύπωσης της συνάρτησης f .
- Έλλειψη δεδομένων για την ισχύ φόρτισης και αποφόρτισης c_t και d_t .

Επιπρόσθετα, εκτιμάται ότι η εξέταση της περίπτωσης καλύπτεται από την εξέταση του κυρτού μοντέλου (§5.6), το οποίο χρησιμοποιεί το βάθος εκφόρτισης εκάστου κύκλου.

5.10 Μοντέλο γήρανσης ενεργειακού επιπέδου (state-of-energy model)

Το μοντέλο γήρανσης ενεργειακού επιπέδου διέπεται από την παρακάτω εξίσωση (επαναλαμβάνεται για ευκολία):

$$\Delta C = \sum_i^n f(e_t)(d_t + c_t) \quad (\text{Σχέση 3.17})$$

Η εξέταση του μοντέλου υπό τα προφίλ λειτουργίας A και B δεν πραγματοποιήθηκε, για τους παρακάτω λόγους:

- Έλλειψη ακριβούς μαθηματικής διατύπωσης της συνάρτησης f .
- Έλλειψη δεδομένων για την ισχύ φόρτισης και αποφόρτισης c_t και d_t .

Επιπρόσθετα, όπως αναφέρθηκε στην § 3.2.10, ο ρυθμός γήρανσης είναι χαμηλότερος όταν το επίπεδο ενέργειας βρίσκεται κοντά στο 50%, ενώ μεγαλώνει καθώς αυτό πλησιάζει το 0% ή το 100%, όπου και μεγιστοποιείται. Συνεπώς, κύκλοι που έχουν υψηλή (προς το μέγιστο) ή χαμηλή (προς το ελάχιστο) κεντρική τιμή ενεργειακού επιπέδου επιταχύνουν τη γήρανση της μπαταρίας, ενώ κύκλοι με κεντρική τιμή ενεργειακού επιπέδου περί το 50% δεν επηρεάζουν σημαντικά το ρυθμό γήρανσης. Επιπλέον, όπως έχει υπολογιστεί στην §4.2, η μέση τιμή επιπέδου φόρτισης (SoC_{av}) για τα προφίλ λειτουργίας A και B (πίνακας 4.2) είναι 0.4972 και 0.45838 αντίστοιχα. Συνεπώς το επίπεδο φόρτισης

είναι τέτοιο, ώστε να μην επηρεάζει σημαντικά το ρυθμό γήρανσης. Τέλος, επισημαίνεται ότι κατά την ανάλυση του πολυπαραγοντικού μοντέλου λαμβάνεται υπόψη και το μέσο SoC.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Διαδικασία

Προκειμένου να συγκρίνουμε τα μοντέλα που εξετάστηκαν στο κεφάλαιο 5, θα λάβουμε υπόψη μας τα παρακάτω κριτήρια:

Δυσκολία ανάπτυξης μοντέλου: Παρουσιάζουμε τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη κάθε μοντέλου.

Δυσκολία χρήσης μοντέλου: Παρουσιάζουμε τις μεταβλητές που είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη κάθε μοντέλου.

Αποτελέσματα που εξήχθησαν στο κεφάλαιο 5.

Τα κριτήρια αυτά θα συσχετιστούν και θα εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα. Τα μοντέλα που εξετάστηκαν, σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία, είναι τα παρακάτω:

- Μοντέλο γήρανσης ημιεμπειρικό (§3.2.1 και 5.1)
- Μοντέλο γήρανσης βάσει κύκλων (§3.2.2 και 5.2)
- Μοντέλο γήρανσης σταθερό ανά μονάδα ενέργειας (§3.2.3 και 5.3)
- Μοντέλο γήρανσης πρακτικό (§3.2.4 και 5.4)
- Μοντέλο γήρανσης πολυπαραγοντικό (§3.2.5 και 5.5)
- Μοντέλο γήρανσης κυρτό (§3.2.6 και 5.6)

Τα μοντέλα που δεν εξετάστηκαν, για λόγους που αναλυτικά έχουν εκτεθεί στις αντίστοιχες παραγράφους, είναι τα παρακάτω:

- Μοντέλο γήρανσης ενεργειακής διεκπεραιωτικής ικανότητας (§3.2.7 και 5.7)
- Μοντέλο γήρανσης γήρανσης λόγω ισχύος (§3.2.8 και 5.8)
- Μοντέλο γήρανσης βάθους εκφόρτισης κύκλων (§3.2.9 και 5.9)

- Μοντέλο γήρανσης ενεργειακού επιπέδου (§3.2.10 και 5.10)

6.1.1 Δυσκολία ανάπτυξης μοντέλου

Στον πίνακα 6.1 παρατίθεται το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση για την ανάπτυξη των μοντέλων και επισημαίνεται ποια αφορούν κάθε ένα από αυτά.

Μοντέλο	Δεδομένα γήρανσης	Καμπύλη κύκλων/DoD (stress model)	DoD κάθε κύκλου	SoC κάθε κύκλου
Ημιεμπειρικό	√	√		
Βάσει κύκλων				
Σταθερό ανά kWh				
Πρακτικό		√		
Πολυπαραγοντικό	√		√	√
Κυρτό		√		

Πίνακας 6.1 Δεδομένα απαραίτητα για την ανάπτυξη των μοντέλων

Από τα δεδομένα αυτά, θεωρείται δύσκολη η εύρεση λεπτομερών δεδομένων γήρανσης. Επιπρόσθετα, η γνώση στοιχείων DoD – SoC για κάθε κύκλο προϋποθέτει ακριβή πρόβλεψη του προφίλ λειτουργίας του BESS. Συμπεραίνουμε ότι τα πλέον απλά στην ανάπτυξη μοντέλα είναι το μοντέλο βάσει κύκλων και το σταθερό ανά kWh, διότι δεν απαιτούν κάποιο δεδομένο για την κατάστρωση των εξισώσεων που τα διέπουν. Ακολουθούν, με σειρά αυξανόμενης δυσκολίας ανάπτυξης, τα παρακάτω μοντέλα: πρακτικό, κυρτό, ημιεμπειρικό και πολυπαραγοντικό. Η ποιοτική αυτή αξιολόγηση παρατίθεται στον παρακάτω πίνακα, σε μία κλίμακα από 1 έως 5, με αυξανόμενη δυσκολία:

Μοντέλο	Δυσκολία ανάπτυξης
Ημιεμπειρικό	4
Βάσει κύκλων	1
Σταθερό ανά kWh	1
Πρακτικό	2
Πολυπαραγοντικό	5
Κυρτό	2

Πίνακας 6.2 Δυσκολία ανάπτυξης μοντέλων

6.1.2 Δυσκολία χρήσης μοντέλου

Στον πίνακα 6.3 παρατίθεται το σύνολο των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση για τη χρήση των μοντέλων και επισημαίνεται ποιες αφορούν κάθε ένα από αυτά.

Μοντέλο	DoD _{av}	DoD κάθε κύκλου	SoC _{av}	Προφίλ λειτουργίας	Κύκλοι ζωής (nominal)
Ημιεμπειρικό	√			√	
Βάσει κύκλων				√	√
Σταθερό ανά kWh				√	√
Πρακτικό	√				
Πολυπαραγοντικό	√		√		
Κυρτό		√			

Πίνακας 6.3 Μεταβλητές απαραίτητες για την ανάπτυξη των μοντέλων

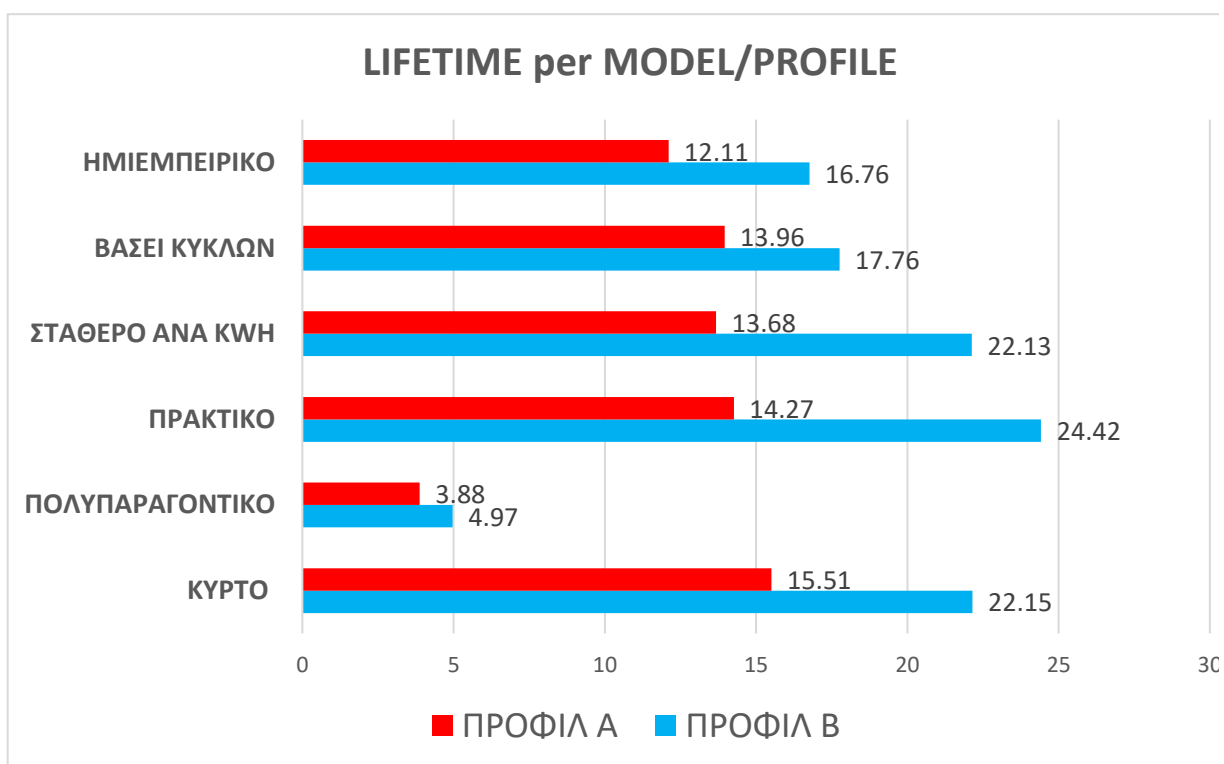
Από τις παραπάνω μεταβλητές, θεωρείται δύσκολη η πρόβλεψη του ακριβούς DoD κάθε κύκλου κατά τη χρήση της μπαταρίας, ενώ αντικειμενικά πιο εύκολη είναι η πληροφορία για τους ονομαστικούς κύκλους ζωής. Αξίζει να σημειωθεί ότι η δυσκολία χρήσης αξιολογείται ανεξάρτητα από τη δυσκολία ανάπτυξης του μοντέλου. Συμπεραίνουμε ότι τα απλούστερα στη χρήση μοντέλα είναι το πρακτικό, το μοντέλο βάσει κύκλων και το σταθερό ανά kWh. Ακολουθούν, με σειρά αυξανόμενης δυσκολίας χρήσης, τα παρακάτω μοντέλα: ημιεμπειρικό, πολυπαραγοντικό, κυρτό. Η ποιοτική αυτή αξιολόγηση παρατίθεται στον παρακάτω πίνακα, σε μία κλίμακα από 1 έως 5, με αυξανόμενη δυσκολία:

Μοντέλο	Δυσκολία χρήσης
Ημιεμπειρικό	2
Βάσει κύκλων	1
Σταθερό ανά kWh	1
Πρακτικό	1
Πολυπαραγοντικό	3
Κυρτό	5

Πίνακας 6.4 Δυσκολία χρήσης μοντέλων

6.1.3 Σύγκριση

Παραθέτουμε στο παρακάτω διάγραμμα το σύνολο των αποτελεσμάτων, ανά μοντέλο [σ.σ.: Για το ημιεμπειρικό μοντέλο παρατίθεται το βασικό σενάριο (§5.1.1)]:



Σχήμα 6.1

Στον πίνακα 6.5 φαίνονται οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων σε ποσοστά, καθώς και η δυσκολία ανάπτυξης και χρήσης κάθε μοντέλου:

Μοντέλο	Προφίλ Α		Προφίλ Β		Δυσκολία ανάπτυξης	Δυσκολία χρήσης
	r (έτη)	Δr	r (έτη)	Δr		
Ημιεμπειρικό	12.11	0%	16.76	+0%	4	2
Βάσει κύκλων	13.96	+15%	17.76	+6%	1	1
Σταθερό ανά kWh	13.68	+13%	22.13	+32%	1	1
Πρακτικό	14.27	+18%	24.42	+46%	2	1
Πολυπαραγοντικό	3.88	-68%	4.97	-70%	5	3
Κυρτό	15.51	+28%	22.15	+32%	3	5

Πίνακας 6.5

Από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι πιο κοντά στο βασικό σενάριο είναι η εκτίμηση του σταθερού ανά kWh μοντέλου (+13%) και του μοντέλου βάσει κύκλων (+6%), για τα προφίλ λειτουργίας A και B αντίστοιχα. Ακολουθούν το πρακτικό μοντέλο και το κυρτό μοντέλο, τα οποία παρουσιάζουν μεγαλύτερες σχετικά αποκλίσεις στην εκτίμηση που μας δίνουν (+18% , +46% και +28%, +32% για έκαστο προφίλ αντίστοιχα). Το πολυπαραγοντικό μοντέλο αποκλίνει σημαντικά (-68% και -70%), λόγω της χρησιμοποιούμενης μπαταρίας κι επομένως τα αποτελέσματά του δεν αποτελούν αντικείμενο σύγκρισης.

Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι για τα μοντέλα που εξετάστηκαν, τα δεδομένα και οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ως κοινή βάση τα εξαγόμενα από την ανάλυση των προφίλ λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας-βάσης. Συγκεκριμένα, το ημιεμπειρικό μοντέλο (§5.1) αποτελεί το βασικό σενάριο – benchmark, επομένως οι συντελεστές του μοντέλου αυτού λαμβάνονται ως έχουν από τη σχετική βιβλιογραφία, ενώ οι λοιπές μεταβλητές εξάγονται από την ανάλυση των προφίλ λειτουργίας. Παράλληλα, η μπαταρία του μοντέλου αυτού είναι η μπαταρία - βάση σύγκρισης, οπότε οι ονομαστικές τιμές κύκλων και DoD λαμβάνονται από τα χαρακτηριστικά αυτής. Το μοντέλο βάσει κύκλων και το σταθερό ανά kWh (§5.2 και 5.3) χρησιμοποιούν δεδομένα από τα προφίλ λειτουργίας, καθώς και χαρακτηριστικά της μπαταρίας. Το πρακτικό μοντέλο και το κυρτό μοντέλο (§5.4 και 5.6) χρησιμοποιούν χαρακτηριστικά των προφίλ λειτουργίας. Επίσης, τα μοντέλα αυτά παραμετροποιήθηκαν για την περίπτωση μας, προκειμένου να έχουμε κοινή βάση και τα αποτελέσματα να μπορούν να υπόκεινται σε σύγκριση. Κατόπιν των παραπάνω, εκτιμάται ότι η σύγκριση των 5 μοντέλων ότι είναι δυνατή, εφόσον πατούν σε κοινή βάση.

Εξάιρεση αποτελεί το πολυπαραγοντικό μοντέλο (§5.5), του οποίου οι συντελεστές αφορούν μπαταρία με χαρακτηριστικά σημαντικά διαφορετικά από αυτά του ημιεμπειρικού μοντέλου. Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα του πολυπαραγοντικού μοντέλου είναι σημαντικά μικρότερα (-68% και -70% για τα προφίλ A κα B αντίστοιχα). Συνεπώς η σύγκριση των αποτελεσμάτων των λοιπών μοντέλων με αυτά του πολυπαραγοντικού δεν είναι δυνατή.

6.2 Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, στα κεφάλαια 1 και 2 έγινε μία εισαγωγική παρουσίαση του ευρύτερου πλαισίου αναφορικά με τις διεθνείς και ευρωπαϊκές δράσεις και εξελίξεις στον τομέα της αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής, με έμφαση στο αυξανόμενο μερίδιο των ΑΠΕ στο μίγμα της ηλεκτροπαραγωγής. Έγινε αναφορά στις προκλήσεις που η αυξανόμενη διείσδυση ΑΠΕ αναδεικνύει, λόγω του στοχαστικού τους χαρακτήρα, όπως θέματα ευστάθειας λόγω υπερπροσφοράς και

ζητήματα απωλειών λόγω χρονικής υστέρησης παραγωγής – κατανάλωσης. Παράλληλα, παρουσιάστηκαν τρόποι με τους οποίους οι προκλήσεις αυτές μπορούν να αντιμετωπιστούν. Από τους προτεινόμενους τρόπους αντιμετώπισης, βαρύτητα δόθηκε στην παρουσίαση της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία προσφέρει σημαντικά οικονομικά και τεχνικά πλεονεκτήματα. Πέραν της αντιμετώπισης των προαναφερθέντων προκλήσεων και χάρις στην ευελιξία που την χαρακτηρίζει, είναι κατάλληλη για ένα εύρος υπηρεσιών, όπως αντιμετώπιση αιχμών (peak shaving), μετατόπιση ενέργειας (shifting), ρύθμιση συχνότητας, λειτουργία εφεδρείας, συμμετοχή στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας κ.ά. Στη συνέχεια έγινε παρουσίαση των βασικών τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, με έμφαση στους σταθμούς αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση μπαταριών (Battery Energy Storage Systems – BESS), και δη με χρήση μπαταριών τεχνολογίας ιόντων λιθίου. Παρουσιάστηκαν τα βασικά τους χαρακτηριστικά, καθώς και ζητήματα που αφορούν τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους, όπως η αναγνώριση και η εκτίμηση της γήρανσης των συστοιχιών μπαταριών και της απώλειας ζωής που αυτή επιφέρει, καθώς και ο σχεδιασμός του τεχνοοικονομικά βέλτιστου προφίλ λειτουργίας, μέσω μοντελοποίησης και πρόβλεψης. Στη συνέχεια περιγράφηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά των μπαταριών λιθίου, η θέση τους στην αγορά, το σχετικό τους κόστος και οι χρήσεις τους, καθώς και οι μηχανισμοί γήρανσης που οδηγούν στη σταδιακή υποβάθμιση της χωρητικότητάς τους.

Στο κεφάλαιο 3 έγινε η παρουσίαση και ανάλυση μοντέλων γήρανσης, τα οποία χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της απώλειας ζωής μπαταριών, συνεπεία των μηχανισμών γήρανσης. Τα μοντέλα αυτά εξετάστηκαν κεφάλαιο 5, λαμβάνοντας δεδομένα από δύο προφίλ λειτουργίας σταθμών BESS και με βάση συγκεκριμένες παραδοχές. Όπως έχει αναφερθεί, απουσία δεδομένων γήρανσης (μείωσης χωρητικότητας) ως προς κύκλους ή γήρανσης ως προς χρόνο ζωής, ως βασικό σενάριο – benchmark θεωρούμε τα αποτελέσματα που μας δίνει το ημιεμπειρικό μοντέλο (§5.1). Το σενάριο αυτό αποτελεί και τη βάση σύγκρισης των λοιπών αποτελεσμάτων.

Το ημιεμπειρικό μοντέλο (§5.1) απαιτεί για την ανάπτυξή του δεδομένα γήρανσης και παραμετροποιημένο stress model. Επομένως, για την ακριβή χρήση του, είναι απαραίτητα τα αντίστοιχα δεδομένα, με βάση τα οποία θα υπολογίζονται κατά περίπτωση οι συντελεστές του μοντέλου, με curve fitting στην εξίσωση του μοντέλου. Η χρήση του καθίσταται απλή, εφόσον απαιτεί ουσιαστικά μία μέση τιμή DoD για να μας δώσει μία εκτίμηση του χρόνου ζωής της μπαταρίας.

Το μοντέλου βάσει κύκλων (§5.2) αποτελείται από μία απλή εξίσωση, διαιρώντας τους ονομαστικούς κύκλους ζωής με τον αριθμό κύκλων ανά έτος που λαμβάνεται από το προβλεπόμενο προφίλ

λειτουργίας. Μας δίνει μια άμεση και γρήγορη εκτίμηση για το χρόνο ζωής της μπαταρίας. Δεν απαιτεί περαιτέρω δεδομένα για την ανάπτυξή του. Παρόμοια απλότητα παρουσιάζει και το σταθερό ανά μονάδα ενέργειας μοντέλο (§5.3), με τη διαφορά ότι αντί για όρους κύκλων, χρησιμοποιεί όρους ενέργειας.

Το πρακτικό μοντέλο (§5.4) αποτελεί ουσιαστικά ένα παραμετροποιημένο stress model. Απαιτείται η καμπύλη DoD/κύκλων, με βάση την οποία υπολογίζονται κατά περίπτωση οι συντελεστές του μοντέλου, με curve fitting στην εξίσωση της καμπύλης. Στη συνέχεια χρειάζεται μία μέση τιμή DoD για να μας δώσει μία εκτίμηση του χρόνου ζωής της μπαταρίας.

Αναφορικά με το πολυπαραγοντικό μοντέλο, η σύγκριση των αποτελεσμάτων του με αυτά των λοιπών μοντέλων δεν είναι δυνατή, για λόγους που έχουν αναφερθεί. Η πρόσβαση σε δεδομένα γήρανσης (μείωσης χωρητικότητας) ως προς κύκλους ή γήρανσης ως προς χρόνο ζωής θα καθιστούσε εφικτή την εξέταση και αυτού του μοντέλου, καθόσον θα επέτρεπε (με curve fitting) τον προσδιορισμό συντελεστών του μοντέλου, κατάλληλων για την περίπτωσή μας.

Το κυρτό μοντέλο (§5.6) απαιτεί για την ανάπτυξή του ένα παραμετροποιημένο stress model. Απαιτείται η καμπύλη DoD/κύκλων, με βάση την οποία υπολογίζονται κατά περίπτωση οι συντελεστές του μοντέλου, με curve fitting στην εξίσωση της καμπύλης. Στη συνέχεια απαιτεί δεδομένα DoD ανά κύκλο (όχι μέσο DoD) και υπολογίζει τη γήρανση σε κάθε κύκλο ξεχωριστά, αθροίζοντας στο τέλος τα επιμέρους αποτελέσματα.

Λαμβάνοντας υπόψη τον πίνακα αποτελεσμάτων 6.5, παρατηρούμε ότι μικρότερη απόκλιση από το βασικό σενάριο σύγκρισης παρουσιάζουν το μοντέλο σταθερό ανά kWh (+13%) για το προφίλ Α και το μοντέλο βάσει κύκλων (+6%), για το προφίλ Β αντίστοιχα. Τα υπόψη μοντέλα είναι τα απλούστερα από όσα εξετάστηκαν, χωρίς ιδιαίτερη απαίτηση σε δεδομένα για την ανάπτυξή τους, αλλά ούτε για τη χρήση τους. Με έναν απλό υπολογισμό, δίνουν μία εκτίμηση χρόνου ζωής πολύ κοντά στο βασικό σενάριο σύγκρισης.

Το πρακτικό μοντέλο και το κυρτό μοντέλο παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκλιση (+18% , +46% και +28%, +32% για έκαστο προφίλ αντίστοιχα), παρόλο που απαιτούν περισσότερη πληροφορία για την κατάστρωση των εξισώσεών τους. Το δε κυρτό παρουσιάζει και τη μεγαλύτερη δυσκολία στη χρήση του, καθόσον για τη χρήση του λαμβάνει υπόψη το DoD κάθε κύκλου ξεχωριστά. Από την άλλη το πρακτικό μοντέλο είναι απλό ως προς τη χρήση του.

Για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των παραπάνω μοντέλων, είναι απαραίτητη η πρόσβαση σε δεδομένα γήρανσης (μείωσης χωρητικότητας) ως προς κύκλους ή γήρανσης ως προς χρόνο ζωής. Με τον τρόπο αυτό οι συντελεστές των μοντέλων θα μπορούσαν να υπολογιστούν εξατομικευμένα, με βάση επιθυμητή μπαταρία και τα μοντέλα να παραμετροποιηθούν πλήρως κατά περίπτωση.

Σαν γενικό συμπέρασμα προκύπτει ότι, τουλάχιστον στο πλαίσιο και στην έκταση της παρούσας εργασίας, υπάρχει η δυνατότητα ικανοποιητικής προσέγγισης της διάρκειας ζωής μιας μπαταρίας με χρήση σχετικά πιο απλών μοντέλων, που δεν απαιτούν πλήθος δεδομένων για την ανάπτυξή τους και μεταβλητών για τη χρήση τους. Η απλότητα των εξισώσεων συνεπάγεται ότι η ενσωμάτωση των μοντέλων αυτών σε ευρύτερα μοντέλα βελτιστοποίησης οδηγεί σε λύσεις με μικρότερες υπολογιστικές και συνεπώς χρονικές απαιτήσεις. Σε κάθε περίπτωση η επιλογή μοντέλου/πολυπλοκότητας απαιτεί πλήθος από σταθμίσεις. Η απλότητα και ο χρόνος υπολογισμού αποτελούν μόνον δύο από αυτές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] [Online] <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/climate-change/climate-external-policy/>
- [2] ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ για τη θέσπιση πλαισίου με στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας και για την τροποποίηση του κανονισμού (ΕΕ) 2018/1999 (Ευρωπαϊκός Νόμος για το Κλίμα)
- [3] ΟΔΗΓΙΑ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ για την ενεργειακή απόδοση και την τροποποίηση του κανονισμού (ΕΕ) 2023/955 (αναδιατύπωση)
- [4] ΟΔΗΓΙΑ (ΕΕ) 2018/2001 ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 11ης Δεκεμβρίου 2018 για την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές
- [5] [Online] <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20230127-1>
- [6] Fares, Robert & Webber, Michael. (2018). What are the tradeoffs between battery energy storage cycle life and calendar life in the energy arbitrage application?. *Journal of Energy Storage*. 16. 37-45. 10.1016/j.est.2018.01.002.
- [7] ΑΔΜΗΕ Α.Ε., “Μηνιαίο Δελτίο Ενέργειας,” [Online] <https://www.admie.gr/>
- [8] What the duck curve tells us about managing a green grid/2016/California ISO
- [9] Handley, Malcolm & Slesinski, Daniel & Hsu, Scott. (2021). Potential Early Markets for Fusion Energy
- [10] Akbari-Dibavar, Alireza & Zare, Kazem & Nojavan, Sayyad. (2019). A hybrid stochastic-robust optimization approach for energy storage arbitrage in day-ahead and real-time markets. *Sustainable Cities and Society*. 49. 101600. 10.1016/j.scs.2019.101600.D
- [11] Alnaqbi, Shaima & Alasad, Shamma & Aljaghoub, Haya & Alami, Abdul Hai & Abdelkareem, Mohammad & Olabi, Abdul. (2022). Applicability of Hydropower Generation and Pumped Hydro Energy Storage in the Middle East and North Africa. *Energies*. 15. 2412. 10.3390/en15072412.D
- [12] A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe/8 July 2020/European CommissionD
- [13] Dunn, Bruce & Kamath, Haresh & Tarascon, Jean-Marie. (2011). Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices. *Science (New York, N.Y.)*. 334. 928-35. 10.1126/science.1212741.
- [14] Goebel, Christoph & Hesse, Holger & Schimpe, Michael & Jossen, Andreas & Jacobsen, Hans-arno. (2016). Model-Based Dispatch Strategies for Lithium-Ion Battery Energy Storage Applied to Pay-as-Bid Markets for Secondary Reserve. *IEEE Transactions on Power Systems*. PP. 1-1. 10.1109/TPWRS.2016.2626392.
- [15] Utility-Scale Battery Energy Storage Systems/February 24, 2021/Juan Corrado [Online] <https://darcypartners.com/research/utility-scale-battery-energy-storage-systems>

- [16] Goebel, Christoph & Hesse, Holger & Schimpe, Michael & Jossen, Andreas & Jacobsen, Hans-arno. (2016). Model-Based Dispatch Strategies for Lithium-Ion Battery Energy Storage Applied to Pay-as-Bid Markets for Secondary Reserve. *IEEE Transactions on Power Systems*. PP. 1-1. 10.1109/TPWRS.2016.2626392.
- [17] Xu, B. “The role of modeling battery degradation in bulk power system optimizations.” *MRS Energy & Sustainability* 9, 198–211 (2022)
- [18] D. Akinyele, J. Belikov and Y. Levron, " Battery Storage Technologies for Electrical Applications: Impact in Stand-Alone Photovoltaic Systems," Nov. 2017 MDPI, vol. 10(11), pages 1-39
- [19] [Online] <https://www.cei.washington.edu/research/energy-storage/lithium-ion-battery/>
- [20] The price of batteries has declined by 97% in the last three decades/June 04, 2021/Hannah Ritchie [Online] <https://ourworldindata.org/battery-price-decline>
- [21] [Online] <https://www.euronews.com/next/2023/02/20/sales-of-electric-cars-in-the-eu-broke-records-in-2022-which-country-in-europe-is-leading/>
- [22] [Online] <https://www.theearthawards.org/the-common-uses-of-lithium-ion-batteries/>
- [23] Zheng Chen , Zhenyu Li , Guozhu Chen, “Optimal configuration and operation for user-side energy storage considering lithium-ion battery degradation”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 145, 2023, 108621, ISSN 0142-0615
- [24] B. Xu, A. Oudalov, A. Ulbig, G. Andersson and D. S. Kirschen, "Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1131-1140, March 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2578950
- [25] Nunna HSVSK, Battula S, Doolla S, Srinivasan D. Energy Management in Smart Distribution Systems With Vehicle-to-Grid Integrated Microgrids. *IEEE Trans Smart Grid Sep.* 2018;9(5):4004–16
- [26] S. S. Choi and H. S. Lim, “Factors that affect cycle-life and possible degradation mechanisms of a li-ion cell based on LiCoO₂,” *Journal of Power Sources*, vol. 111, no. 1, pp. 130–136, 2002
- [27] P. Novak, F. Joho, M. Lanz, B. Rykart, J.-C. Panitz, D. Alliata, R. Koetz and O. Haas, “The complex electrochemistry of graphite electrodes in lithium-ion batteries,” *Journal of power sources*, vol. 97, pp. 39–46, 2001
- [28] J. Li, E. Murphy, J. Winnick, and P. A. Kohl, “The effects of pulse charging on cycling characteristics of commercial lithium-ion batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 102, no. 1, pp. 302–309, 2001.
- [29] Q. Zhang and R. E. White, “Capacity fade analysis of a lithium ion cell,” *Journal of Power Sources*, vol. 179, no. 2, pp. 793–798, 2008
- [30] V. Srinivasan and J. Newman, “Discharge model for the lithium ironphosphate electrode,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 151, no. 10, pp. A1517–A1529, 2004

- [31] M. Koller, T. Borsche, A. Ulbig, and G. Andersson, "Defining a degradation cost function for optimal control of a battery energy storage system," in 2013 IEEE Grenoble Conference, June 2013, pp. 1–6
- [32] P. Poonpun and W. T. Jewell, "Analysis of the Cost per Kilowatt Hour to Store Electricity," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 2, pp. 529-534, June 2008, doi: 10.1109/TEC.2007.914157
- [33] K. Abdulla et al., "Optimal Operation of Energy Storage Systems Considering Forecasts and Battery Degradation," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 3, pp. 2086-2096, May 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2606490
- [34] Muhammad Fahad Zia, Elhoussin Elbouchikhi, Mohamed Benbouzid, Optimal operational planning of scalable DC microgrid with demand response, islanding, and battery degradation cost considerations, Applied Energy, Volume 237, 2019, Pages 695-707, ISSN 0306-2619
- [35] Müenzel, Valentin, Julian de Hoog, Marcus Brazil, Arun Vishwanath and Shivkumar Kalyanaraman. "A Multi-Factor Battery Cycle Life Prediction Methodology for Optimal Battery Management." Proceedings of the 2015 ACM Sixth International Conference on Future Energy Systems (2015) MULTI
- [36] M. Ecker, N. Nieto, S. Kaebitz, J. Schmalstieg, H. Blanke, A. Warnecke, and D. U. Sauer. Calendar and cycle life study of Li(NiMnCo)O₂-based 18650 lithiumion batteries. Journal of Power Sources, 248:839-851, 2014.
- [37] Y. Shi, B. Xu, Y. Tan and B. Zhang, "A Convex Cycle-based Degradation Model for Battery Energy Storage Planning and Operation," 2018 Annual American Control Conference (ACC), Milwaukee, WI, USA, 2018, pp. 4590-4596, doi: 10.23919/ACC.2018.8431814
- [38] Lee, Y.-L., & Tjhung, T. (2012). Rainflow Cycle Counting Techniques. Metal Fatigue Analysis Handbook, 89–114. doi:10.1016/b978-0-12-385204-5.00003-3