

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİTYUM TABANLI BATARYALARIN
ÖMÜR TAHMİNİ İÇİN
BİR MODEL GELİŞTİRME

HASAN CELAL MALKOÇ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2017

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİTYUM TABANLI BATARYALARIN
ÖMÜR TAHMİNİ İÇİN
BİR MODEL GELİŞTİRME

HASAN CELAL MALKOÇ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

GEBZE
2017

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**DEVELOPMENT OF A MODEL FOR
STATE OF HEALTH ESTIMATION OF
LITHIUM BASED BATTERIES**

HASAN CELAL MALKOÇ
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE**
DEPARTMENT OF ELECTRONICS ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. ABDULKADİR BALIKÇI

GEBZE

2017

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 15/06/2017 tarih ve 2017/31 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 21/06/2017 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Hasan Celal MALKOÇ'un tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) :Doç. Dr. Abdulkadir BALIKÇI

ÜYE

:Prof. Dr. Serkan AKSOY

ÜYE

:Yrd. Doç. Dr. Uğur HASIRCI

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Doç. Dr. Arif Çağdaş AYDINOĞLU
Gebze Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmada Lityum tabanlı bataryaların ömür tahmini için bir model oluşturulması öngörülmüştür. Bu bağlamda tahmin için geliştirilen birçok yöntem hakkında yapılan literatür çalışmaları sonucu çok sık kullanılan ölçümlere bağlı tahmin yöntemi kullanılmıştır. Ölçümlere bağlı yöntem olarak bataryanın şarj-deşarj çevrimleri sonucu elde edilen ölçüm sonuçları kullanılmış, uygulanan akım, sıcaklık ve bazı sabit katsayı gibi değerlerin yöntemle olan etkileri saptanmıştır. Bu değerler bir formül içerisinde değerlendirilmiştir ve farklı türde lityum bataryalara uygulanmıştır. Her çevrim sonucu elde edilen kapasite kaybı değerleri, formül ile uyarlanan eğri ile karşılaştırılarak formülün doğrulanması sağlanmıştır. İkinci aşamada bataryanın anlık sağlık durumu için oluşturulan bir formül literatür çalışmaları sonucu bulunmuştur. Anlık sağlık durumu, yeni batarya %100 sağlıklı olarak düşünülüp, anlık hesaplanan sağlık kaybı değerinin saniye bazında devamlı olarak çıkarılmasıyla hesaplanmıştır. Bu anlık sağlık kaybı hesaplamasında daha önceki kapasite kaybı formülü kullanılmıştır. Hesaplanan bu değerlerin farklı bataryaların sağlık durumları tahmini için uygulanması sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ömür tahmini (ÖT), Kapasite kaybı (Qloss), Ölçümlere bağlı ömür tahmini, Anlık sağlık durumu.

SUMMARY

In this work, the model establishing is predicted about lithium based batteries state of health (SOH) estimation. At this point literature working is done about the development of prediction methods and well known the measurement based method is used for prediction. About the measurement method, the results of batteries charge-discharge cycles are used, and effects of applying current, temperature and some constants values are determined. These values are thought in a formula and applied different kind of lithium batteries. The result of cycles capacity loss values are compared with the adapted curve and it gives true result. At the second step A formula for the instant health status of the battery was found to be the result of literature studies. The instantaneous health status is calculated by considering the new battery as 100% healthy and continuously calculating the instantaneous calculated health loss value in seconds. In calculating this instantaneous health loss, the previous capacity loss formula was used. It is ensured that these calculated values are applied to estimate the health status of different batteries.

Key Words: State of Health (SOH) estimation, Capacity Loss (Qloss), Measurement based state of health estimation, Instant health status.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimde ve tez çalışmalarım boyunca bana yardımcı olan değerli hocam Doç. Dr. Abdulkadir BALIKÇI'ya, tez konusunda verdiği desteklerden dolayı saygıdeğer arkadaşlarım Dr. Kürşad GÖKCE, Dr. Türev SARIKURT, Arş. Gör. Murat CEYLAN ve Arş. Gör. Ceyhun SEZENOĞLU'na, gösterdiği sabır ve özveriden dolayı değerli eşim Cemile ÜNAL MALKOÇ'a ve tüm hayatım boyunca eğitimimde beni cesaretlendiren ve teşvik eden değerli aileme ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Lityum Bataryaların Çeşitleri Ve Çalışma Prensipleri	3
1.2. Lityum Bataryaların Avantajları ve Kullanım Alanları	6
1.3. Tezin Amacı, Kapsamı ve İçeriği	8
2. BATARYA SAĞLIK DURUMU	10
2.1. Bataryaların Yaşlandığını Gösteren Durumlar ve Yaşlanmayı Geciktirmek İçin Alınan Önlemler	11
2.2. Lityum-İyon Bataryaların Ömür Tahmini İçin Geliştirilen Modellerin Literatür Taraması	13
2.2.1. Deneylere Bağlı Yöntemler	16
2.2.1.1. İç Direnç Ölçümüne Bağlı Tahmin Yöntemi	16
2.2.1.2. İç Empedans Ölçümüne Bağlı Yöntemiyle Tahmin	18
2.2.2. Modelleme Yöntemiyle Tahmin	19
2.2.2.1. Coulomb Sayma Yöntemiyle Tahmin	19
2.2.2.2. Eşdeğer Devre Modeli Yöntemiyle Tahmin	20
2.2.3. Adaptif Yöntemlerle Tahmin	21
2.2.3.1. Kalman Filtresi Yöntemiyle Tahmin	21
2.2.3.2. Sinir Ağları Yöntemiyle Tahmin	23
2.2.3.3. Bulanık Mantık Yöntemiyle Tahmin	25
2.2.3.4. Diğer Adaptif Tahmin Yöntemleri	27
2.3. Önerilen Model	28

3. ÖNERİLEN MODELİN UYGULANMASI	31
3.1. ANR26650M1A (LiFePO ₄) Bataryaya Uygulanması	31
3.2. CX2 (LiCoO ₂) Bataryaya Uygulanması	35
3.3. U27-12XP (LiFePO ₄) Bataryaya Uygulanması	38
4. MODELİN SAĞLIK DURUMU ANALİZİ	43
5. SONUÇLAR VE YORUMLAR	49
 KAYNAKLAR	 51
ÖZGEÇMİŞ	55
EKLER	56

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Acıklamalar</u>
<u>Kisaltmalar</u>	
Ah	: Amper-Saat (Ampere-Hour)
B	: Pre-Eksponansiyel Faktör
C	: Kapasite (Capacity)
C – Rate	: Kapasite-Oranı (Capacity-Rate)
C _{nom}	: Nominal Kapasite
E _a	: Aktivasyon Enerjisi ($Jmol^{-1}$)
Q _{loss}	: Kapasite Kaybı (Capacity Loss)
R	: Gaz Sabiti
T	: Mutlak Sıcaklık
z	: Güç Yasası Faktörü
ΔSoH_{rate}	: Anlık Ömür Kaybı
SoH(t)	: Bataryanın Anlık Sağlık Durumu Bilgisi
SoH(0)	: Yeni Bataryanın Sağlık Durumu Bilgisi
BYS	: Batarya Yönetim Sistemleri
DEKF	: Çift Uzatılmış Kalman Filtresi (Dual Extended Kalman Filter)
DOD	: Deşarj Derinliği (Depth of Discharge)
DSMO	: Çift Kayan Mod Gözlemcisi (Dual Sliding Mode Observer)
EIS	: Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (Electrochemical Impedance Spectroscopy)
EKF	: Uzatılmış Kalman Filtresi (Extended Kalman Filter)
OR	: Omik Direnç (Ohmic Resistance)
PDF	: Olasılıksal Yoğunluk Fonksiyonu (Probability Density Function)
RNN	: Tekrarlayan Sinir Ağları (Recurrent Neural Network)
SEI	: Katı Elektrolit Arayüz (Solid Electrolyte Interface)
SOC	: Şarj Durumu (State of Charge)
SOH	: Sağlık Durumu (State of Health)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: Çeşitli bataryalar.	2
1.2: Değişik şekillerde lityum bataryalar.	4
1.3: Lityum iyonlarının şarjdeşarj sırasında hareketleri.	5
1.4: Lityum-iyon bataryaların kendi aralarında ve diğer bataryalarla enerji yoğunluğu karşılaştırılması (Ragone).	6
1.5: Lityum bataryaların kullanım alanlarına göre toplam olması gereken miktarı (a) Dünyada kullanım alanlarına göre istenilen paylaşımı (b).	8
2.1: IHR18650C by E-One Moli (3.6V, 2000mAh) 4,2V 2A şarj edilip ve 2A,10A,15A ve 20A olarakdeşarj edildiğinde çevrim olarak kapasite değişimi.	10
2.2: Batarya enerji depo kısımları.	11
2.3: Coulombic verimlilik (a) buna bağlı çevrim karşılaştırılması (b).	12
2.4: DeneySEL yöntemlerin doğruluk yüzdeleri (minimum (siyah), maksimum (gri), ortalama(kırmızı)).	15
2.5: Adaptif yöntemlerin doğruluk yüzdeleri (minimum (siyah), maksimum (gri), ortalama(kırmızı)).	16
2.6: Bataryanın anlıkdeşarj akımına gösterdiği tepki.	17
2.7: Lityum-iyon bataryanın basit bir modellemesi.	17
2.8: Batarya direnç değerlerinin çevrime bağlı değişimi.	18
2.9: Lityum-iyon batarya tipik empedans spektroskopisi.	18
2.10: Raf ömrü ve çevrim ömrüne bağlı eşdeğer devre modeli.	19
2.11: Yaşlandırılmış nanophospate-LiFePO4 bataryanın empedans spektroskopisi.	19
2.12: Eşdeğer Devre Modeli.	20
2.13 Lineer Kalman Filtresi Özeti.	21
2.14: Lineer ayrık zamanlı sistemin durum uzay formunda diyagramı.	22
2.15 Doğrusal olmayan Extended Kalman Filtresi Özeti.	23
2.16: Lityum-iyon bataryaların sağlık durumu tahmini için Tekrarlayan Sinir Ağları (Recurrent- RNN) blok diyagramı.	24
2.17: RNN blok diyagramı.	24

2.18:	SOH tahmin prosesi.	25
2.19:	Bulanık Mantık Sistemi.	26
2.20:	Örnek Kapasite kaybı-Çevrim grafiği.	28
3.1:	ANR26650M1A silindirik hücre özellikleri.	31
3.2:	ANR26650M1A hücre <i>Qloss</i> verileri.	32
3.3:	ANR26650M1A hücre için uydurulan <i>Qloss</i> eğrisi ve hata payları.	33
3.4:	CX2 prizmatik hücre özellikleri.	35
3.5:	CX2 hücre <i>Qloss</i> verileri.	36
3.6:	CX2 hücre için uydurulan <i>Qloss</i> eğrisi ve hata payları.	37
3.7:	U27-12XP batarya modülü.	38
3.8:	U27-12XP batarya modülü <i>Qloss</i> verileri.	40
3.9:	U27-12XP batarya modülü için uydurulan <i>Qloss</i> eğrisi ve hata payları.	41
4.1:	CX2 hücre 0.5C SOH Deneysel ve Benzetim grafiği.	44
4.2:	CX2 hücre 0.5C SOH Deneysel ve Benzetim arası hata grafiği.	44
4.3:	CX2 hücre 1C SOH Deneysel ve Benzetim grafiği.	45
4.4:	CX2 hücre 1C SOH Deneysel ve Benzetim arası hata grafiği.	46
4.5:	CX2 hücre 3C SOH Deneysel ve Benzetim grafiği.	47
4.6:	CX2 hücre 3C SOH Deneysel ve Benzetim arası hata grafiği.	47

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Tahmin Yöntemleri karşılaştırma.	15
2.2: Veritabanı Bulanık Mantık Kuralları.	26
3.1: ANR26650M1A hücreye uygulanan çevrim koşulları.	32
3.2: ANR26650M1A hücre için uydurulan Q_{loss} eğrisi belirlilik katsayıları.	34
3.3: ANR26650M1A hücre için bulunan ΔSoH_{rate} değerleri.	34
3.4: CX2 hücreye uygulanan çevrim koşulları.	35
3.5: CX2 hücre için uydurulan Q_{loss} eğrisi belirlilik katsayıları.	37
3.6: CX2 hücre için bulunan ΔSoH_{rate} değerleri.	38
3.7: U27-12XP batarya modülü özellikleri.	39
3.8: U27-12XP batarya modülüne uygulanan çevrim koşulları.	39
3.9: U27-12XP batarya modülü için uydurulan Q_{loss} eğrisi belirlilik katsayıları.	41
3.10: U27-12XP batarya modülü hücre için bulunan ΔSoH_{rate} değerleri.	42
4.1: CX2 hücre 0.5C SOH Deneysel ve Benzetim Verileri.	43
4.2: CX2 hücre 1C SOH Deneysel ve Benzetim Verileri.	45
4.3: CX2 hücre 3C SOH Deneysel ve Benzetim Verileri.	46

1. GİRİŞ

Bataryalar önceden en basit tanımıyla kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren araçlardı. Günümüzde bu tanım sadece elektrokimyasal bataryalar için geçerli bir hale gelmiştir, zira ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürenlere termopiller, güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirenlere güneş pilleri, nükleer enerjiyi elektrik enerjisine çevirenlere atom pilleri, ışık enerjisini elektrik enerjisine çevirenlere fotopiller denir.

Pilin tarihçesi milattan öncelere kadar dayanmaktadır, Günümüzden yaklaşık 2.000 yıl önce, eski Yunan bilgini Thales, bir kumaş parçasını fosil ağaç reçinesinden oluşmuş sarı bir kayaç türü olan kehribara sürterek, küçük elektrik kıvılcımları elde etmişti, fakat bu dönemde elde edilen enerji depolanamadığı için kullanılabilir bir pilin üretilmesi uzun bir süre sonra gerçekleşmiştir. Sürekli elektrik akımı oluşturmak için üretilen ilk pil Alessandro Volta tarafından 1800 yılında yapılmıştır. Volta bakır ve çinko madenlerinin arasına tuzlu suya batırılmış sünger yerleştirerek elektrik akımı oluşturmuş böylece ilk pili bulan kişi olmuştur. 1802 de Dr. William Cruickshank seri üretilecek pilin tasarımını yaptı. Cruickshank aynı boyutlarda kare şeklinde kesilip uçlarından lehimlenmiş bakır ve çinko plakaları etrafı çimento ile sıvanmış tahta kutulara koyarak içini tuzlu su ya da su ile seyreltilmiş asitle dolduruyordu. Plakaların aralarındaki mesafeyi sabit tutmak için tahta yüzeyin üzerine oluklar yapıyordu. 1859 da Fransız fizikçi Gaston Planté şarj olabilen pili icat etti. Bu pillerin çalışma prensipleri bugün hala kullandığımız akülerdeki kurşun/asit sistemi ile aynı idi. 1899 da İsveçli Waldmar Jungner nikel-kadmiyum pili icat etti. 1947 de Neumann pil hücrecini (gözesini) tam olarak sızdırmaz bir şekilde izole etmeyi başardı. 1990larda nikel-metal-hidrit piller piyasaya çıktı. İlk lityum piller ise 1970'lerde ortaya çıktı. 1980'lerde bu pillerin şarj edilmesi üzerinde çalışmalar başladı ise de ortaya çıkan güvenlik sorunlarından dolayı vazgeçildi. 1991 de Sony lityum-iyon pili piyasaya sürdü [1], [2].

Günlük olarak kullanılan bir elektrokimyasal pil basit olarak anot ,katot ve elektrolitten(sıvı yada kuru) oluşur. Elektrotlar ve elektrolit birbiriyle kimyasal olarak etkileşime girer bu etkileşim sonucu bir negatif birde pozitif uç oluşur. Bu uçlar pilin kutuplarını oluşturur. Pozitif uç olarak karni kömürü, negatif uç olarak çinko ve elektrolit olarak hareketsizleştirilmiş amonyum klorür kullanılır.

Kimyasal reaksiyon sonucu oluşan negatif uçtan pozitif uca doğru bir iletken üzerinden elektron akışı sağlayıp elektrik enerjisini kullanır hale getiririz, çeşitli bataryaların gösterimi, Şekil 1.1 [1].



Şekil 1.1: Çeşitli bataryalar.

Bataryalar (piller) şarj edilebilen ve edilemeyen olarak iki gruba ayrılabilir.

Şarj edilemeyen bataryalara örnek; çinko-klorid, çinko-karbon, alkalin-manganez, gümüş-oksit ve lityum pillerdir.

Şarj edilebilen bataryalara örnek; kurşun-asit, lityum-iyon, lityum-iyon polimer, nikel-demir, nikel-metal hidrit ve nikel-kadmiyum pillerdir.

Bataryalar insan hayatı açısından son derece faydalı bir araçtır. İnsanın günlük yaşamında kullandığı birçok şeyde bataryadan faydalanılır. Bilgisayarlar, cep telefonları, elektronik kontrol cihazları, taşınabilir lambalar, elektronik yazar kasalar, oyuncaklar, tıbbi cihazlar, hesap makineleri, kameralar, saatler bataryaların kullanım alanlarından sayabileceğimiz sadece birkaç örnektir. Bataryaların bu şekilde birçok faydasının olmasının yanında ömrünü tamamlamış bataryaların geri dönüşümle tekrar kazanılması önemli bir husustur. Geri dönüştürülmeyip doğaya bırakılan bataryaların içerdiği cıva, kurşun, nikel gibi ağır metaller insan sağlığı açısından son derece zararlıdır.

Bu kullanım alanlarına ek olarak günümüzde önemi gittikçe artmaya başlayan elektrikli araçlarda da enerji bataryalardan sağlanmaktadır. Dünya üzerinde gittikçe artan araç sayısı ile beraber oluşan hava kirliliği, insan sağlığını olumsuz yönde

etkilemeye devam etmektedir. Fosil yakıtların rezervlerinin azalması ve ülke ekonomilerine verdiği zararlar elektrikli araca dolayısıyla elektrikli araçlarda kullanılacak bataryalara verilen önemi arttırmaktadır. Bu bağlamda ülkeler arasında batarya teknolojisinin geliştirilmesi açısından bir rekabet ortamı başlamıştır. Bu rekabet ülke ekonomilerine oldukça fazla katma değer sağlamaktadır. Örnek vermek gerekirse, Tesla Motors ve Panasonic firmalarının ortaklığıyla kurulumuna başlanan ve 2020 yılında faaliyete geçmesi beklenen Gigafactory batarya fabrikasının 5 milyar dolara mal edilmesi beklenirken, yılda 500,000 araba bataryası üretecek olan firmanın bulunduğu eyalet olan Nevadaya 100 milyar dolar katkı sağlaması bekleniyor.

1.1. Lityum Bataryaların Çeşitleri ve Çalışma Prensibi

Lityum bataryalar ismini anotlarında lityum elementini bulundurmaktan almaktadır. Lityum bataryalar tek kullanımlık ve şarj edilebilir olarak ikiye ayrılmaktadır.

Tek kullanımlık lityum bataryalar yüksek enerji yoğunluğuna ve geniş voltaj kullanım hacmine sahiptirler. En yaygın olarak kullanılan model olarak genellikle saatlerde kullanılan ve katotlarında mangan dioksit bulunan düğme tipi pillerdir. 9 voltluk, AA ve AAA tipi olarak günlük kullanım içinde üretilen lityum bataryalarda mevcuttur. Bu tür bataryalara başka örnekler şunlardır; uzay sistemleri uygulamalarında kullanılan lityum-karbon monoflorit ($\text{Li}-(\text{CF})_x$), günlük kullanım için lityum-demir disülfid (Li-FeS_2), yüksek enerjili ve düşük sıcaklıkta çalışma imkânına sahip olan askeri uygulamalarda kullanılan lityum-tionil klorit (Li-SOCl_2). Bu tür bataryaların diğer alkalin bataryalara göre birçok üstün özelliği vardır. Enerji yoğunlukları diğer bataryalardan çok daha fazladır, fiyatları daha pahalı olmasına rağmen ömürleri çok daha uzundur, tıbbi cihazlarda kullanılan entegre bazı bataryaların ömürleri 15 yıl kadar sürebilmektedir [3].

Şarj edilebilir bataryalar lityum-iyon bataryalar ismi altında gruplandırılmış olan anotlarında şarj edilemeyen bataryalarda kullanılan saf lityum metali yerine belli bir bileşimi bulunduran bataryalardır. Lityum, metaller arasında en hafif olanı, en yüksek elektrokimyasal potansiyele sahip olan ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir metaldir. Bu bağlamda lityum-iyon piller ilk olarak 1979 yılında John Goodenough and Koichi Mizushima tarafından üretilmeye çalışılmıştır. Ned A.

Godshall, Rachid Yazami ve Akira Yoshino çeşitli deneyler ve farklı bileşik ve metaller kullanarak bu deneylerin geliştirilmesine yıllar içerisinde yardımcı olmuşlardır. Ürün olarak lityum bataryaların ilk üretimi Sony ve Asahi Kasei tarafından yapılmıştır.

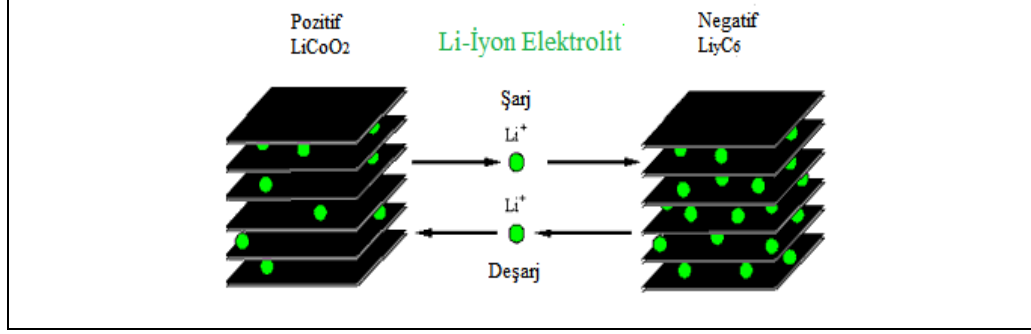
Lityum bataryalar yapısal olarak her batarya gibi 3 kısımdan oluşur: anot, katot ve elektrolit. Genel olarak anotta karbon, katotta metal oksit ve elektrolit olarak da organik çözelti içerisinde lityum tuzu bulunur. Diğer çok kullanılan anot grafit, katotlar ise lityum-kobalt oksit, lityum-demir fosfat ve lityum-mangan oksittir.

Lityum-iyon bataryalar kullanım alanlarına göre değişik şekillerde üretilmektedir. Küçük ve büyük silindir, torba ve prizmatik en yaygın olan çeşitleridir, Şekil 1.2 [4].



Şekil 1.2: Değişik şekillerde lityum bataryalar.

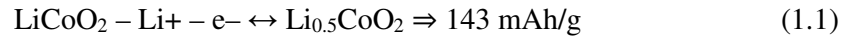
Şarj edilebilen lityum bataryalarının çalışma prensibi genel olarak lityum iyonlarının hareketine bağlanabilir. Anot ve katottaki açık kristal yapıları sayesinde lityum iyonları rahat bir şekilde hareket edebilirler. Lityum iyonları elektrolit içerisinde şarj sırasında katottan anota doğru deşarj sırasında ise anottan katota doğru hareket gerçekleştirir. Şarj formu genel olarak sabit akım-sabit voltaj şeklinde gerçekleştirilir. Hızlı şarj etme yöntemlerinde ise sadece sabit yüksek akımda şarj etme mantığı vardır ve bu şekilde bataryaların ancak %70 ler seviyesinde şarj olduğu düşünülmektedir.



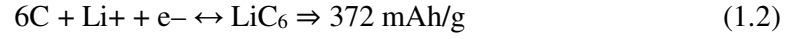
Şekil 1.3: Lityum iyonlarının şarj deşarj sırasında hareketleri.

Lityum bataryanın uçlarında gerçekleşen tepkimeler ve çıkan enerji şu şekildedir, Şekil 1.3 [5].

Katotta gerçekleşen tepkime



Anotta gerçekleşen tepkime

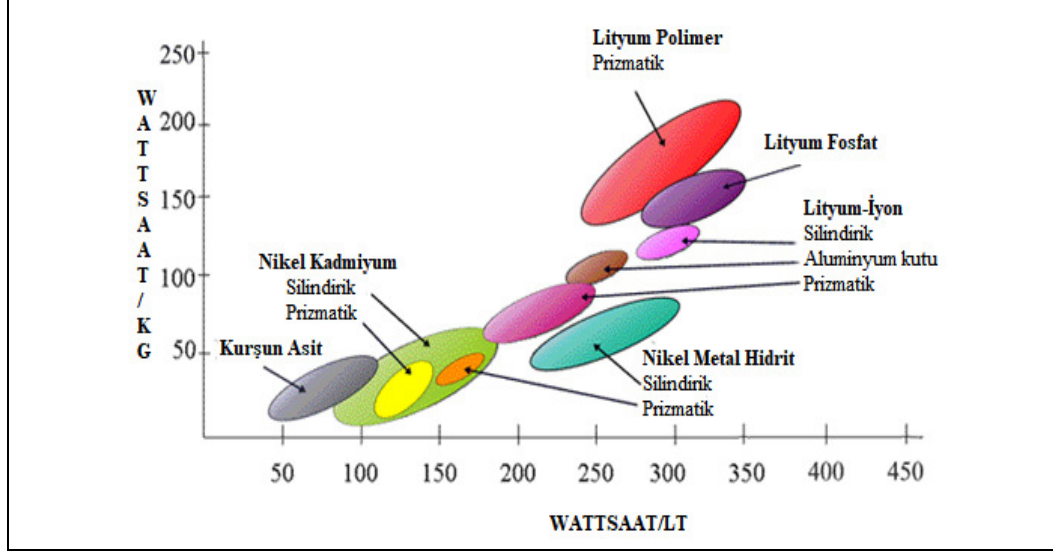


Tüm gerçekleşen tepkime



Dünya piyasasında birçok kimyasalda, çeşitli fiyat aralıklarında, farklı enerji yoğunluğunda ve güvenlik seviyesinde lityum-iyon bataryalar bulunmaktadır, Şekil 1.4 [6].

- Lityum-Kobalt Oksit (LiCoO_2) (LCO)
- Lityum-Mangan Oksit (LiMn_2O_4) (LMO)
- Lityum-Nikel Mangan Kobalt Oksit (LiNiMnCoO_2) (NMC)
- Lityum-Demir Fosfat (LiFePO_4) (LFP)
- Lityum-Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (LiNiCoAlO_2) (NCA)
- Lityum-Titan ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) (LTO)



Şekil 1.4. Lityum-iyon bataryaların kendi aralarında ve diğer bataryalarla enerji yoğunluğu karşılaştırılması (Ragone).

1.2. Lityum Bataryaların Avantajları ve Kullanım Alanları

Lityum-iyon bataryaların avantajları;

- En yüksek enerji yoğunluğuna sahip batarya tiplerindendir.
- Gerilim değerleri aynı standartlardaki nikel kadmiyum ve nikel-metal hidrit bataryalara göre 3 kat daha fazladır ve bu da daha fazla akım ve güç sağladıkları anlamına gelir.
- Hafıza etkisine sahip değildir, istenildiği zaman kalındığı yerden şarj edilebilir.
- Düşük raf deşarjına sahiptir bir ayda yaklaşık %1 kadar.
- Ağırlıkları diğer bataryalara göre daha düşüktür.
- 1000Ah'lık kapasitelere kadar çıkabilmektedir.
- 40C'ye kadar deşarj olabilenleri vardır. Elektrikli araç uygulamalarında son derece yararlı bir özelliktir.
- Çevrim süresi devreler kullanılarak artırılabilir.
- Verimlilikleri yüksektir, yaklaşık %95 verimliliğe sahiptir.
- Herhangi bir güce, gerilime ve akıma uygun şekilde üretilmeleri mümkündür.

Bu avantajların yanında bazı dezavantajlara da sahiptirler.

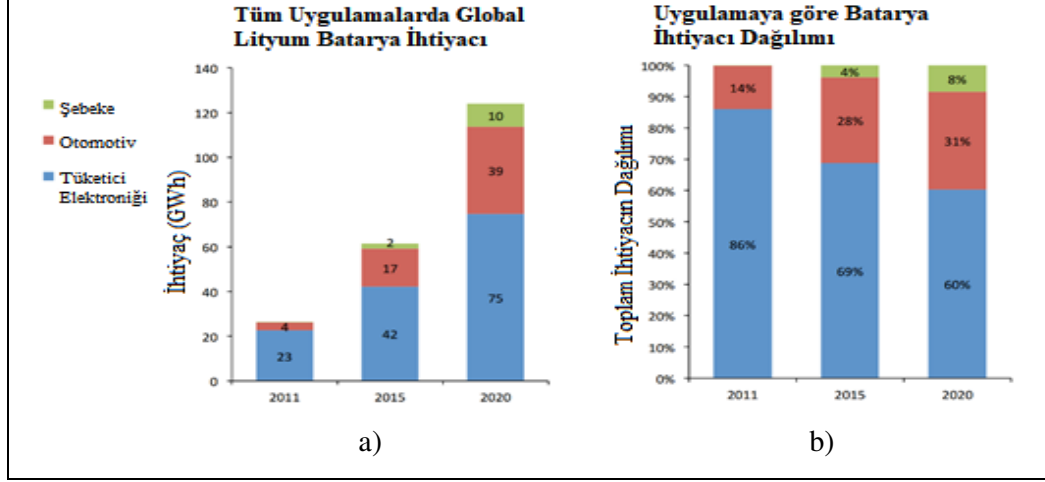
- İç dirençleri aynı formdaki nikel-kadmiyum bataryalara göre daha yüksektir.
- Uygulamalarda lityum-iyon bataryalar diğer bataryalara göre çok daha pahalıdırlar.
- Lityum-İyon bataryaların nakliyesi daha katı kurallarla sağlanmaktadır.
- Yüksek-düşük voltaj ve sıcaklıktan korumak için ayrıca bir devreye ihtiyaç duymaktadır
- Yüksek sıcaklıkta bozulma gerçekleşir.

Lityum-iyon bataryalar birçok alanda kullanılmaktadır.

- Günlük olarak akıllı telefonlarda, dizüstü bilgisayarlarda, kameralarda, kablosuz kullanılabilen elektrikli ev aletlerinde
- Endüstriyel olarak taşınabilir cihazların hemen hemen hepsinde, barkod okuyucularda, telekomünikasyon sistemlerinde,
- Askeri uygulamalarda, giyilebilir teknolojilerde,
- Uzay sistemlerinde,
- Elektrikli ve hibrit elektrikli araçlarda.

Lityum-iyon bataryaların bu çok çeşitli kullanım alanları bu bataryalara devletlerin verdiği önemi arttırmıştır. Çin, Kore ve Japonya Lityum-iyon batarya üretimi konusunda dünyada başı çeken ülkeler arasındadır. Çinde 2015 verilerine göre yılda 16704 MWhlik batarya üretimi gerçekleştirilmektedir. Bir kısmı üretimde olan 3576 MWhlik, yapım aşamasındaki fabrikalarda üretilmesi planlanan 18730 MWhlik ve ileride yapılması planlanan fabrikalarda planlanan 12847 MWhlik üretimle Çin bu konuda oldukça ileri durumdadır [7].

Lityum-iyon bataryaların kullanım alanlarına göre dünya üzerinde üretilmesine ait veriler aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Bu verilere göre yıllar geçtikçe 3 alanda da bataryalara olan ihtiyaç isterlere göre gittikçe artmaya devam edecektir. Aynı zamanda da yıllar içerisinde otomotiv ve yenilenebilir enerji sistemleri için batarya üretiminin payları artmaya devam edecektir, Şekil 1.5 [7].



Şekil 1.5: Lityum bataryaların kullanım alanlarına göre toplam olması gereken miktarı (a), dünyada kullanım alanlarına göre istenilen paylaşımı (b).

1.3. Tezin Amacı, Kapsamı ve İçeriği

Elektrikli araçlarda kullanılan lityum-iyon bataryaların fosil yakıtların yerini alması için gün geçtikçe performansı arttırmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir. Bu bağlamda daha hafif, daha yüksek kapasiteli ve ucuz bataryaların üretimine önem verilmektedir. Bir diğer önemli hususta üretilen bu bataryaların şarj-deşarj sırasında bir devre ile yüksek-düşük gerilimden, akımdan ve sıcaklıktan korunması gerekliliğidir. Bu amaçla geliştirilen “Batarya Yönetim Sistemleri (BYS)” pilin verimli bir şekilde kullanılması için gerekli tüm donanım tasarımının ve yazılım algoritmalarının toplandığı bir sistemdir.

BYS’lerin içinde bu koruma devrelerinin yanı sıra bataryaların verimliliğin arttırması için geliştirilmesi gereken 3 önemli nokta vardır. Bunlar hücre gerilimini dengeleme, Şarj Durumu (SOC) ve Sağlık Durumu (SOH) göstergeleridir.

Gerilim dengeleme lityum bataryaların şarj esnasında her birinin tamamıyla şarj edilmesini sağlamak amacıyla yapılan işlemidir. Pasif ve aktif dengeleme olarak 2 çeşit hücre dengelemesi vardır. Pasif dengelemede şarj sırasında farklı gerilime sahip olan bataryalardan fazla gerilime sahip olanın bir direnç üzerinden enerjisi ısıya dönüştürerek diğer bataryayla aynı gerilim seviyesine gelmesine dayalı bir mantığı vardır ve gereksiz yere enerji kaybı oluşur. Aktif dengelemede ise yüksek gerilimdeki bataryadaki fazla olan enerji kondansatörler yardımıyla diğer bataryalara

gönderilerek dengeye gelme işlemi vardır. Bu sistem verimliliği çok daha fazla olan bir sistemdir.

Şarj durumu (SOC) ise bataryanın anlık kullanmak için sahip olduğu kapasitenin, nominal kapasitesine olan oranının yüzde cinsinden ifadesi olarak gösterilmektedir. Şarj durumu göstergesinin, arabalardaki yakıt göstergesiyle aynı anlamı içerdiği söylenebilir. Şarj durumu tahmini için birçok ölçüm ve tahmin yöntemi mevcuttur. Bunlardan en çok bilinenleri Direkt Ölçme (Direct Measurement), Voltaj Tabanlı Tahmin (Voltage Based), Akım Tabanlı Tahmin (Current Based), İç Empedans Ölçümüne Dayalı Tahmin (Impedance Measurement), Bulanık Mantık (Fuzzy Logic), Kalman filtresi ve Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network) olarak bilinmektedir.

Sağlık Durumu (SOH) bataryanın yaşlanmaya bağlı olarak yaşadığı kapasite ve güç kaybının ölçümü olarak düşünülmektedir. Kullanılan bataryanın ne zaman değiştirilmesi gerektiğiyle ilgili bize yararlı bilgiler vermektedir. Eğer batarya performansı yeterli değilse sağlık durumu parametresi sayesinde bunu görebiliriz. Sağlık durumu parametresini bir çok etken etkilemektedir; ortam sıcaklığı, bataryanın çalışma akımı ve çevrim sayısı, sağlık durumu tahminlerinde kullanılan en önemli parametrelerdir.

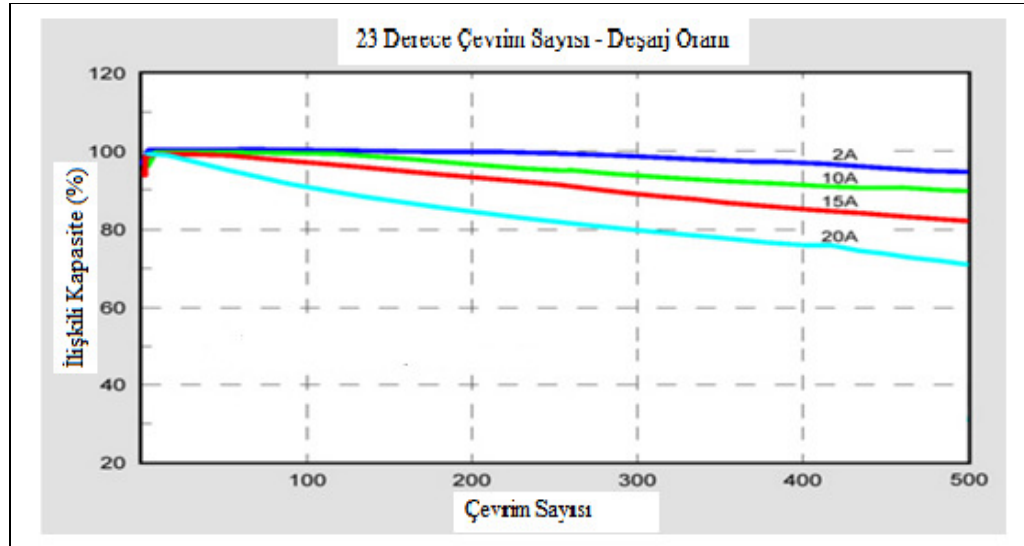
Sağlık durumu farklı tekniklere dayalı birçok metotla tahmin edilebilir. Bu metotların her birinin bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Bu metotlar şu üç ana başlık altında toplanabilir:

- Modellemeye bağlı yöntemler
- Dinamik yöntemler
- Deneylere bağlı yöntemler

Bu tez kapsamında sağlık durumu tahmini için, çevrim verilerine sahip olduğumuz çeşitli bataryaların, bu verilerini kullanarak benzetim ortamında formülizasyona bağlı hesaplamalarını yapıp sağlık durumu hakkında bilginin oluşturulmasına çalışılmıştır. Batarya çevrim verileri için Valence batarya firmasının ürün özellikleri verilerinden, Calce Battery Group internet sitesindeki verilerden ve ANR26650M1R-A123 batarya verilerinden, bataryalara ait farklı sıcaklıklarda, farklı akım formlarında ve farklı deşarj derinliklerindeki çevrimlere ait veriler kullanılmıştır [8], [9], [10].

2. BATARYA SAĞLIK DURUMU

Lityum-iyon bataryaların şarj-deşarj oldukça performanslarında düşmeler meydana gelir. Bu bataryanın kapasitesinin ve tuttuğu enerjinin değerinin düşmesiyle anlaşılabilir bir durumdur. Bataryanın bu durumunun sadece çevrime bağlanması da yeterli kanıt oluşturmaz, aynı zamanda raf ömrü de bu azalmada belirleyici bir etkiye sahiptir. Raf ömrü için sabit sıcaklık ve nominal oda koşullarında yapılan basit testler sayesinde bataryaların bu anlamdaki ömür tahminleri bulunabilir. Ancak bataryanın şarj-deşarj çevrimine bağlı yaş tahmini için çok farklı teknikler ve ölçümler gereklidir. Batarya sağlık durumu açısından bu tekniklerin gerçekleştirilebilmesi için öncelikli olarak batarya modelinin çıkarılması gerekir. Batarya modeli genel anlamda bataryanın iç dinamiklerinin bilinmesi için ortaya atılan ve birçok farklı yöntemle çıkartılan bir modeldir. Elektrokimyasal, istatistiksel, eşdeğer devre ve analitik olarak batarya modeli çıkarım yöntemleri düşünülebilir. Çıkarılan bu batarya modeline uygun bir şekilde sağlık durumu tahmini için yeni bir model geliştirilmesi gerekir. Değişik sıcaklık ve değişik akımlarda yapılan testler sonucunda elde edilen verilerin belli proseslerden geçirilerek bataryanın yaşlanma karakteristiğinin çıkarılması gerekmektedir. Örnek bir grafik aşağıda görülmektedir, Şekil 2.1 [8].

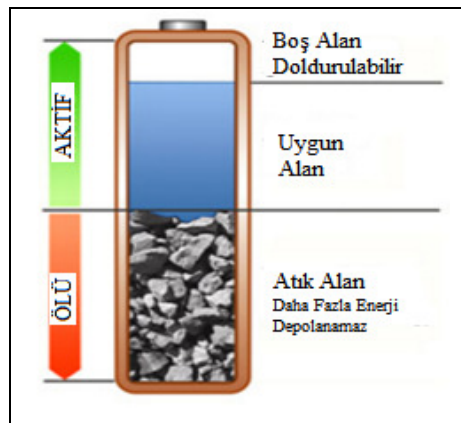


Şekil 2.1: IHR18650C by E-One Moli (3.6V, 2000mAh) 4,2V 2A şarj edilip ve 2A, 10A, 15A ve 20A olarakdeşarj edildiğinde çevrim olarak kapasite değişimi.

Genel anlamda bataryaların çevrimler sonucunda kapasitesi %80'in altına düştüğü zaman o bataryanın ömrünü tamamladığı ve değiştirilmesi gerektiği belirlenmiştir. Kapasitesindeki bu düşmenin sebebi ise çevrimler sonucunda bataryanın yaşlanması olarak kabul edilir. Bataryanın yaşlanması bataryanın iç yapısında bazı kayıpların olduğu ve bu kayıpların bataryanın yeni bir bataryanın verdiği enerjiyi verememesi anlamındadır. Bu kayıplar lityum ve elektrotlar arasındaki balansın azalması, elektrot alanının azalması ve elektrolit malzemenin iletkenliğini kaybetmesidir [12]. Sağlık durumu bahsedildiği gibi genel anlamda kapasite düşümüyle alakalı olsa da bazı uygulamalarda iç empedansın değişkenliği de sağlık durumunun göstergesi olarak kabul edilebilir. Sağlık durumu tahmini için birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemleri genel hatlarıyla bu bölümde incelenecektir. İlk olarak bahsettiğimiz bataryanın yaşlandığının anlaşılmasına etki eden faktörler genel hatlarıyla belirtilecektir.

2.1. Bataryaların Yaşlandığını Gösteren Durumlar ve Yaşlanmayı Geciktirmek İçin Alınan Önlemler

Bataryaların sağlık durumlarını bataryanın iç ve dış yapısıyla alakalı oluşan birçok göstergeyle anlaşılabilir. Bataryaların enerji depolaması 3 kısma bölünebilir. Bunlar enerji yüklü alan, depolanabilir alan ve kullanılmayan alan olarak düşünülebilir, Şekil 2.2 [13].



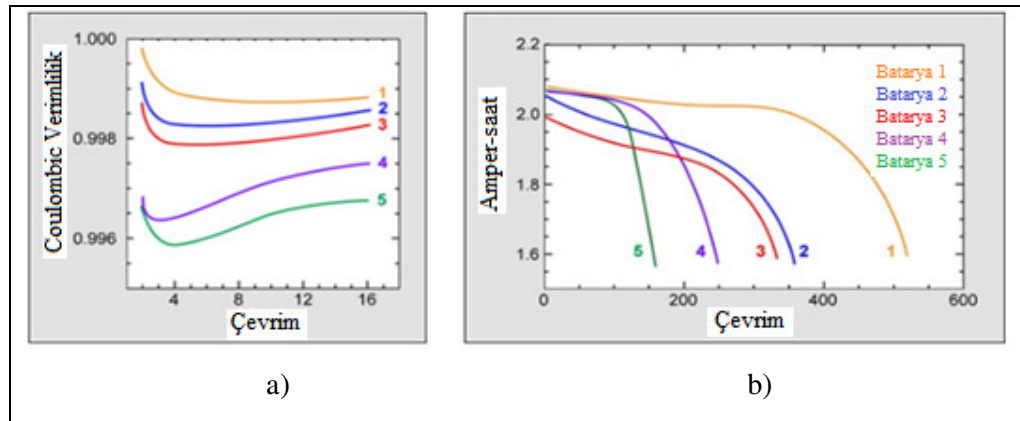
Şekil 2.2: Batarya enerji depo kısımları.

Bataryanın kullanılmayan kısmından dolayı şarj süresi yaşlanma arttıkça gittikçe kısalmaya başlar. Lityum-iyon bataryalarda yaşlanmaya bağlı olarak hücre oksidasyonu gözükür. Buda hücrenin self-deşarj denilen kendi kendine boşalma oranının yükselten bir etkidir. Oksidasyon katot ucunda oluşur, bu katman oluştuktan sonra yok etmenin çaresi yoktur. Hücreleri yüksek voltajda tutmak ve çok düşük veya yüksek sıcaklığa maruz bırakmak, bu etkinin yaşlanma etkisinden daha çabuk çıkmasına neden olur.

Yaşlanmanın bir diğer göstergesi elektrotların mekaniksel deformasyona uğraması ve batarya tasarımında batarya paketine yeterli basıncın uygulanmamasıdır.

Başka bir gösterge de anot ucunda SEI'nın (Katı Elektrolit Arayüz) zamanla gelişmesine bağlı olarak elektrolitler arasında bariyer olması ve kapasite kaybına yol açmasıdır. SEI bataryalar içerisinde anot kutbundaki bir katman olarak düşünülebilir. Normalde yalıtkan olan bu katman aynı zamanda bataryanın normal çalışması için yeterli iyonik iletkenliğe de sahiptir. Bataryada bu katmanın olması sistemi stabil hale getirir ve lityum-iyon bataryaya uzun ömür sağlar fakat zamanla kapasite kaybına yol açmaktadır. Bu gibi durumlarda bataryaların elektrotlarına vinil karbonat denilen bileşik karıştırılır böylece bataryanın yaşlanma çevrimi daha da geliştirilmiş olup, aynı zamanda batarya yüksek sıcaklığa dayanıklı iç direnci çok fazla değişmeyen bir yapıya sahip olur.

Bataryaların sahip olduğu Coulombic verimlilik denilen şarj-deşarj sırasında transfer edilen toplam elektronların miktarının durumunu belirten bir ölçüm vardır. Bu elektron iletiminin verimliliği olarak görülebilir. Bir pil ne kadar fazla verimliliğe sahipse ömrü de o kadar fazla olmaktadır, Şekil 2.3 [13].



Şekil 2.3: Coulombic verimlilik (a), buna bağlı çevrim karşılaştırılması (b).

Literatürde yaşlanmayla ilgili genel olarak birçok önlem alınabileceği belirtilmiştir. Bu önlemleri genel olarak izah etmek gerekirse şu şekilde sıralayabiliriz. Bataryayı devamlı olarak optimum operasyon koşullarında çalıştırmak, sıcaklığa dayanıklılık özelliği üzerinde geliştirme yapma, SEI katmanının kalınlığını azaltma, içerdiği gazı azaltma üretici tarafında geliştirilebilecek ve bataryanın ömrünü uzatıcı etkenler olarak düşünülebilir. Kullanıcı açısından da doğru şarj yöntemi, şarj deşarj arasında bekleme zamanı oluşturma, düzgün bir batarya yönetim sistemi, limitlerin kontrol edildiği batarya yönetimi, sıcaklık yönetimi, hücre bazında olmasa da batarya bazında dengeleme yapılması, sisteme herhangi bir hata durumunda otomatik olarak eklenebilen hücre takviyesinin olması, bataryayı uzun süre ful şarjda bırakmama veya uzun süre düşük voltajda bırakmama olarak tüm gerekli önlemleri sıralanabilir [14].

2.2. Lityum-İyon Bataryaların Ömür Tahmini İçin Geliştirilen Modellerin Literatür Taraması

Bataryaların sağlık durumları tahmini için model geliştirmek oldukça zor bir iştir. Bunun nedeni batarya sağlık durumunun doğrusal olmayan özellik göstermesine dayanır. Doğrusal olmayan özellik göstermesi hem bataryanın iç yapısından hem de bataryanın çalışma şartlarından dolayı gelir. Çalışma şartları bataryanın SOC, sıcaklık, şarj-deşarj akımı, şarj kesme voltajı ve deşarj kesme voltajı olarak değerlendirilebilir. Lineer özellikli tahminlere dayalı olan kestirimler sağlık durumu için tam olarak doğru sonucu vermezler [15].

Bataryaların bu problemlere dayalı ve bu problemleri öngörerek geliştirilen sağlık durumu tahmin yöntemleri vardır. Bu tahmin yöntemlerini birçok şekilde kategoriye ayırmak mümkün olabilir. Her bir modelinde avantajlarının yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. Bu yöntemlerde genel olarak amaçlanan bataryanın sağlık durumunun en az hata ile en doğru şekilde tahmin edilebilmesidir. Bu yöntemlerin sınıflandırmasında da çeşitli yöntemlere başvurulabilir. Çevrimiçi veya çevrimdışı tahmin yöntemleri, deneylere ve ölçümlere dayalı tahmin yöntemleri, modellemeye dayalı tahmin yöntemleri, verilere dayalı tahmin yöntemleri genel olarak sayılabilecek yöntemler olarak düşünülebilir.

Bu yöntemlerin en çok kullanılanlarını maddeler halinde saymak istersek şu şekilde sıralayabiliriz:

Modellemeye bağlı yöntemler şunlardır:

- Genetik algoritma metoduyla çevrimiçi tahmin yöntemi [16].
- Model bazlı tahmin yöntemleri [20].
- Eşdeğer devre modeli ile tahmin yöntemi [26].
- Coulomb sayma tahmin yöntemi [25].

Dinamik yöntemler şunlardır:

- Bulanık mantık metoduyla tahmin yöntemi [17].
- Sinir ağları metoduyla ömür tahmini yöntemleri [18].
- Kalman filtresiyle ömür tahmini yöntemleri [21].
- Dinamik adaptif izleyici yöntemiyle ömür tahmini geliştirme [22].
- Dinamik Bayesian ağları yöntemiyle tahmin geliştirme [23].
- Least Squares (Küçük Kare) yöntemiyle tahmin geliştirme.

Deneylere bağlı yöntemler şunlardır:

- Ölçümlere dayalı tahmin yöntemleri [24].
- İç Empedansa bağlı tahmin yöntemleri [19].
- Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisine (EIS) bağlı tahmin yöntemi.
- Akım çevrimi uygulanarak yapılan tahmin yöntemi

Bu yöntemlerin uygulanabilirliği, avantajları dezavantajları, kullanım alanları gibi bazı karşılaştırmaları da mevcuttur.

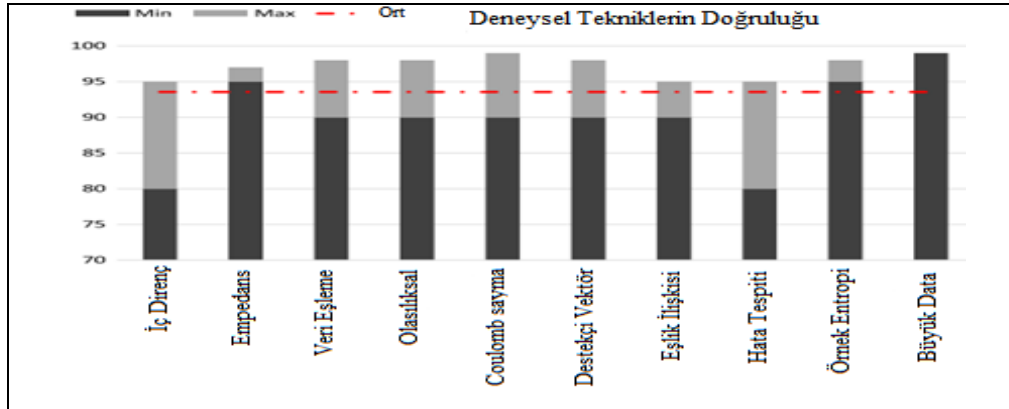
Aşağıdaki tabloda bu karşılaştırmalardan bir örneği gösterebiliriz, Tablo 2.1 [27]. Bu tabloya göre uygulanan tahmin yöntemlerinden bataryanın sağlık durumuyla ilgili kesin bir çıkarım yapılamayacağı sonucuna varabiliriz. Direkt ölçüm tekniğinin dezavantajları çevrimiçi uygulanamaması ve hata payının oldukça fazla olmasıdır. Eşdeğer devre modelinin sisteme uyarlanması ve hassasiyeti oldukça düşük, aynı zamanda tahmin değerinde hatası yüksektir. Elektrokimyasal modellemenin hassasiyeti yüksek olmasına rağmen, sisteme uyarlaması, verisiz, çevrimiçi uygulanması son derece zordur. Performans modellemede sisteme adapte edilmesi

çok zayıftır, veri olmadan ve çevrimiçi uygulanamaz. Analitik modellemede hassasiyet çok yüksek olmasına rağmen diğer özellikler zayıftır. İstatistiksel modellemede sisteme uyarlama ve verisiz uygulama oldukça düşüktür

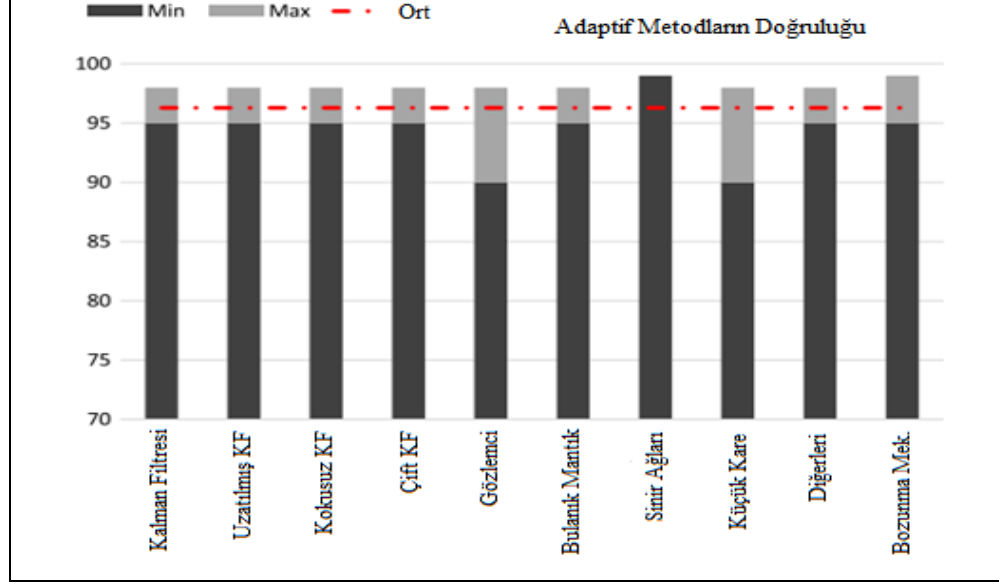
Tablo 2.1: Tahmin Yöntemleri karşılaştırma.

	Sisteme Uyarlama	Hassasiyeti	Veri Olmadan Uygulanabilirliği	Gerçek Zamanlı	Tahmin Yeteneği
Direk Ölçüm	Çok iyi	Çok iyi	Çok iyi	Çok Zayıf	Çok Zayıf
Eşdeğer Devre Modeli	Çok zayıf	Başarısız	İyi	İyi	Başarısız
Elektrokimyasal Model	Çok zayıf	Çok İyi	Başarısız	Başarısız	Başarısız
Performans Modeli	Çok zayıf	İyi	Zayıf	Başarısız	İyi
Analitik Model	Çok zayıf	İyi	Zayıf	Zayıf	Zayıf
İstatistiksel Model	Başarısız	İyi	Çok zayıf	İyi	İyi

Bataryanın sağlık durumu tahmini için geliştirilen yöntemlerin doğruluk şemalarını deneysel ve adaptif sistemler olarak iki ayrı şekilde gösterebiliriz, Şekil 2.4 ve 2.5 [28].



Şekil 2.4: Deneysel yöntemlerin doğruluk yüzdeleri (minimum (siyah), maksimum (gri), ortalama(kırmızı)).



Şekil 2.5: Adaptif yöntemlerin doğruluk yüzdeleri (minimum (siyah), maksimum (gri), ortalama(kırmızı)).

2.2.1. Deneylere Bağlı Yöntemler

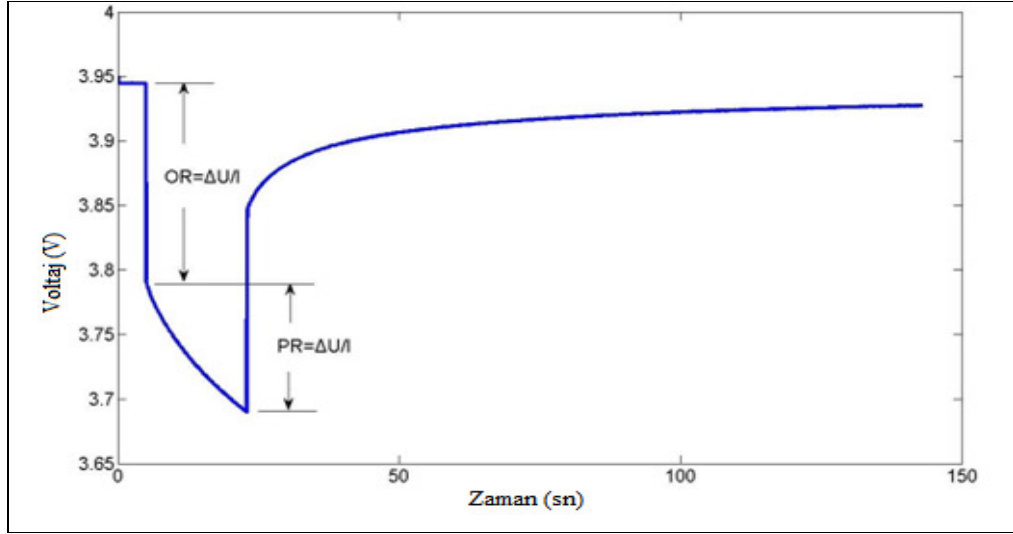
2.2.1.1. İç Direnç Ölçümüne Bağlı Tahmin Yöntemi

Bataryanın sağlık durumunu tahmin yöntemlerinden olan iç direnç ölçümü bataryanın yaşlandıkça teorik olarak iç direncinin yükselmesini esas alır. İç direncin ne kadar arttığına, elde edilen verilerin sonucunda yapılan ölçümlerle ulaşılır. Bu yapılan ölçüm sonucunda bataryanın hangi çevrimde olduğunu daha önce yapılan ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırma sonucunda varılabilir.

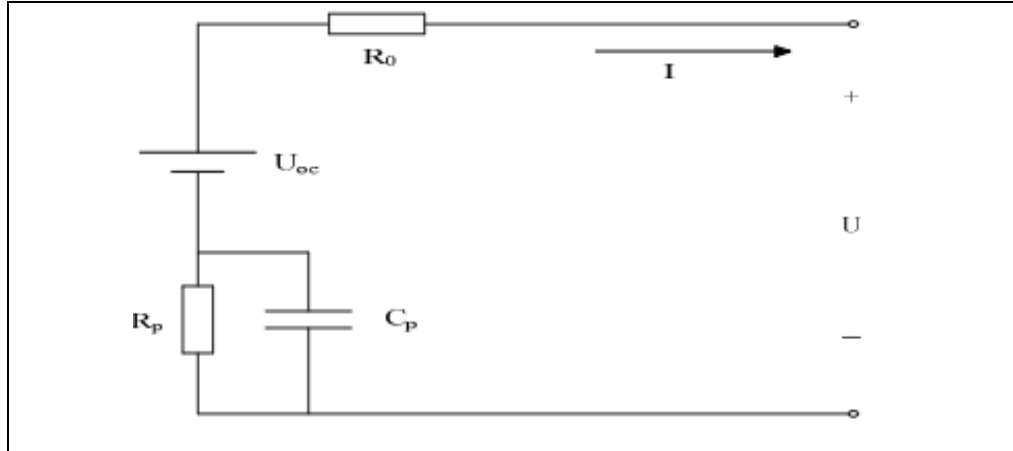
İç direnç ölçüm yöntemlerinde genel olarak bataryaya uygulanan anlık akım karakteristiğine bataryanın verdiği tepkinin ölçümü baz alınır [29]. Bataryanın anlık çekilen akıma verdiği tepki düşümünde ilk voltaj düşümündeki omik direnç (OR) ölçümü yapılır. Daha sonraki voltaj düşümünde polarizasyon direnci (PR) denilen direnç ölçümü yapılır. Bunlar kullanılan batarya modelinin parametreleri olarak düşünülebilir. Şekil 2.6, Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de bu yöntemin uygulanması ve sonuçları gösterilmektedir [29].

Bataryanın iç direnci çevrim sayısı arttıkça artmaktadır. Bu yapılan deneylerle de gözükmemektedir. Bataryaya uygulanan akım sonucunda bataryanın voltajındaki değişim çevrim sayısı arttıkça daha fazla olmaktadır. Bataryanın iç direnç ölçümünü

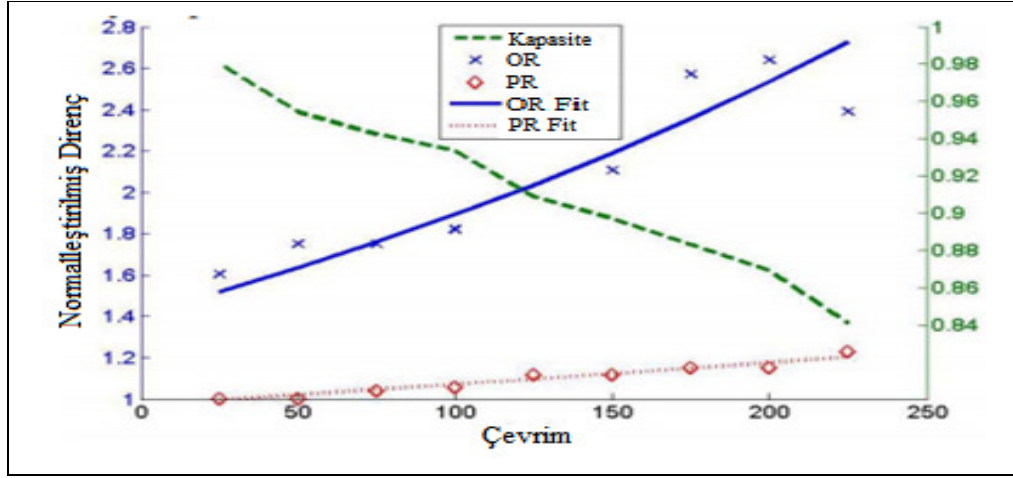
gerçekleştirerek bataryanın o an hangi çevrimde olduğunu ufak bir hata payıyla bulabiliriz.



Şekil 2.6: Bataryanın anlık deşarj akımına gösterdiği tepki.



Şekil 2.7: Lityum-iyon bataryanın basit bir modellemesi.



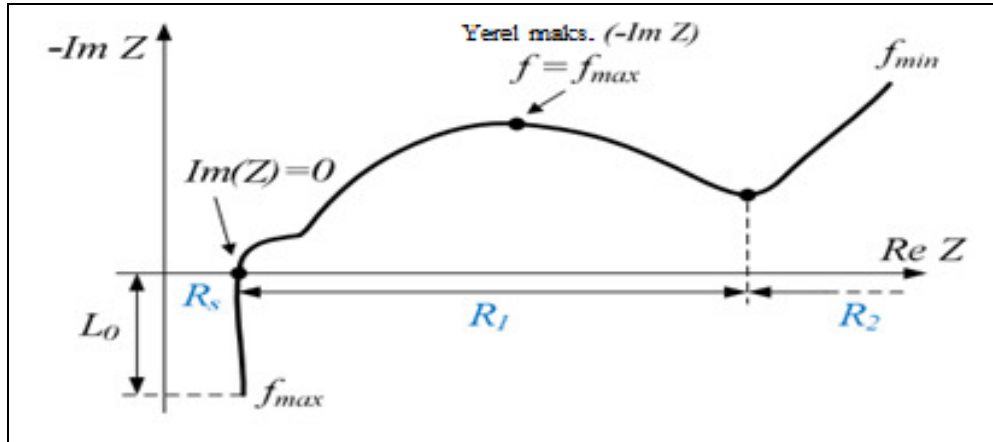
Şekil 2.8: Batarya direnç değerlerinin çevrime bağlı değişimi.

2.2.1.2 İç Empedans Ölçümüne Bağlı Yöntemiyle Tahmin

İç empedans ölçümü aktif ve pasif olarak iki yöntemle yapılabilir. Aktif ölçüm yönteminde batarya yönetim sisteminde uygulanan devreye ek bir özel devre tasarımı yapmak ve bunu uygulamak gerekir.

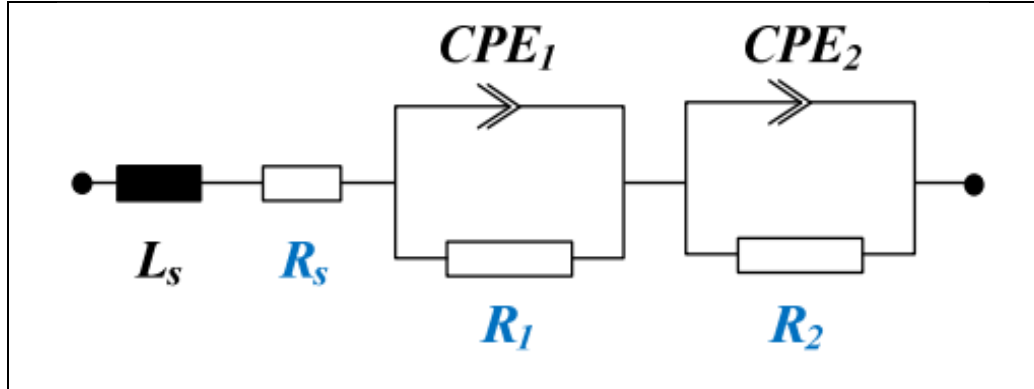
Genel olarak iç empedans ölçümü pasif olarak yapılır ve bunun için laboratuvar ortamında ölçmek gerekir. Bu yöntem, çalışan sistemler için pek uygun değildir. Belli aralıklarla yapılan ölçümler sonucunda tespit edilen değerlerin karşılaştırılmasına bağlı olarak yaş tahmini esasına dayanır.

Değişik frekanslardaki empedans değerinin artmasına bağlı olarak yaş tahminini yapabiliriz, Şekil 2.9, Şekil 2.10, Şekil 2.11 [30], [31].

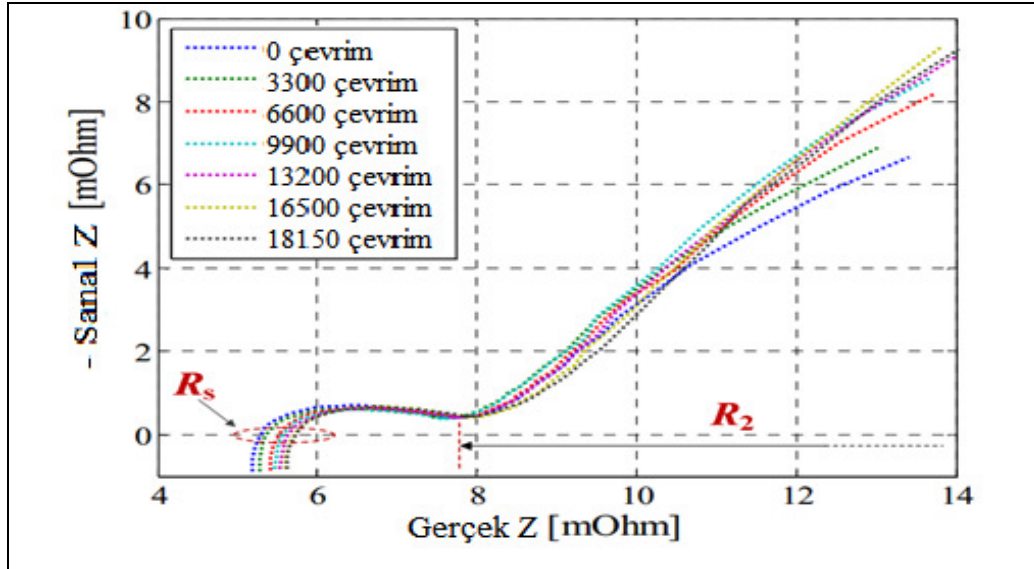


Şekil 2.9: Lityum-iyon batarya tipik empedans spektroskopisi.

R_s omik direnç, R_1 şarj transfer direnci, R_2 difüzyon direnci.



Şekil 2.10: Raf ömrü ve çevrim ömrüne bağlı eşdeğer devre modeli.



Şekil 2.11: Yaşlandırılmış nanophosphate-LiFePO₄ bataryanın empedans spektroskopisi.

2.2.2. Modelleme Yöntemiyle Tahmin

2.2.2.1. Coulomb Sayma Yöntemiyle Tahmin

Amper-saat sayma yöntemidir ve genel olarak sistemlerde tercih edilen en çok kullanılan yöntemdir. Denklem olarak gösterim aşağıdaki gibidir [32].

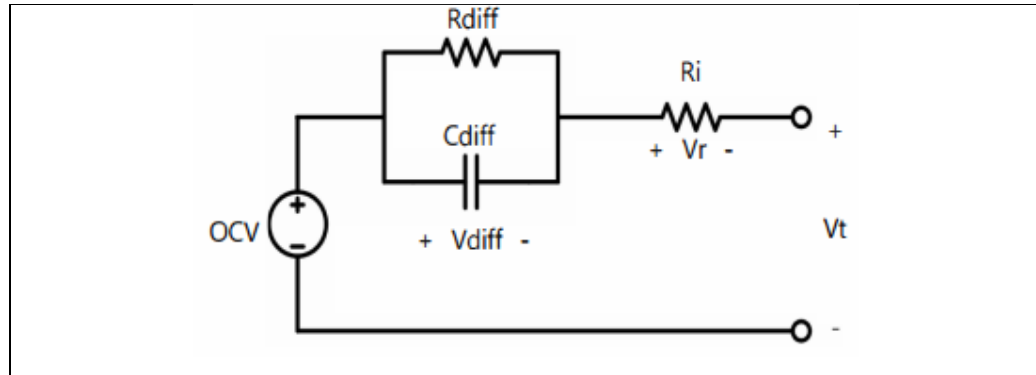
$$SOH = \frac{C_{act}}{C_{nom}} * \%100 \quad (2.1)$$

C_{act} , bataryanın o an sahip olduğu kapasite, C_{nom} , bataryanın nominal kapasitesi olacak şekilde bataryanın sağlık durumunu yüzde olarak görebiliriz.

Coulomb sayma metodunda hesaplama yapılırken sıcaklık, deşarj derinliği ve kapasite oranından etkilenmez.

2.2.2.2. Eşdeğer Devre Modeli Yöntemiyle Tahmin

Daha önce iç direnç ve empedans ölçüm yöntemleriyle sağlık durumu tahminini incelemiştik. Eşdeğer devre modelleme yönteminde bu ölçümlerin belli formülasyon yöntemiyle sağlık durumunu ortaya çıkarması mantığına dayanır. Bu modelleme için kullanılan devre aşağıdaki gibidir, Şekil 2.12 [23].



Şekil 2.12: Eşdeğer Devre Modeli.

$$SOH = Ax \left(\frac{C_{anlık} - C_{yaşlı}}{C_{yeni} - C_{yaşlı}} \right) + Bx \left(\frac{R_{i,anlık} - R_{i,yaşlı}}{R_{i,yeni} - R_{i,yaşlı}} \right) + Cx \left(\frac{R_{diff,anlık} - R_{diff,yaşlı}}{R_{diff,yeni} - R_{diff,yaşlı}} \right), < A + B + C < 1 \quad (2.2)$$

A,B,C sayıları ayarlanacak olan katsayılar. C: kapasite, Ri: iç direnç, Rdif: difüzyon direnci. Eğer akım profili fazla uzun sürüyorsa kapasite, Ri ve Rdif'i hesaplamada kullanmamız gerekir. Fakat eğer anlık akımlarla yapılan deney sonucu hesaplama yapmak istersek kapasite ve Ri değerini hesaba katmamız yeterli olacaktır.

2.2.3. Adaptif Yöntemlerle Tahmin

2.2.3.1. Kalman Filtresi Yöntemiyle Tahmin

Kalman filtresi ayarlanmış ölçümleri kullanarak gürültüleri ve yanlış ölçümleri engellemek için kurulan matematiksel eşitliklerle belirlenmiş yinelenerek hata oranını düşüren etkili bir sistemdir. Kalman filtresi sonuçları oldukça hassas bir şekilde vermektedir. Kalman filtresini kullanırken iki adım uygulanır. İlk adım tahmin durumudur, o anki çıkış verisinin tahminini gerçekleştirir. İkinci kısım, bir sonraki durumu güncelleyerek doğru ve güvenilir bir tahmin için yapılan işlemlerdir.

Doğrusal durum-uzay model ^a

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k$$

$$y_k = C_k x_k + D_k u_k + v_k$$

Başlatma

$k = 0$ için, aşağıdakileri ayarla

$$\hat{x}_0^+ = \mathbb{E}[x_0]$$

$$\Sigma_{\hat{x},0}^+ = \mathbb{E}[(x_0 - \hat{x}_0^+)(x_0 - \hat{x}_0^+)^T]$$

Hesaplama

$k = 1, 2, \dots$ için hesaplama

$$\text{Zaman güncellemeli durum tahmini: } \hat{x}_k^- = A_{k-1} \hat{x}_{k-1}^+ + B_{k-1} u_{k-1}$$

$$\text{Zaman güncellemeli hata kovaryansı: } \Sigma_{\hat{x},k}^- = A_{k-1} \Sigma_{\hat{x},k-1}^+ A_{k-1}^T + \Sigma_w$$

$$\text{Kalman kazanç matrisi: } L_k = \Sigma_{\hat{x},k}^- C_k^T [C_k \Sigma_{\hat{x},k}^- C_k^T + \Sigma_v]^{-1}$$

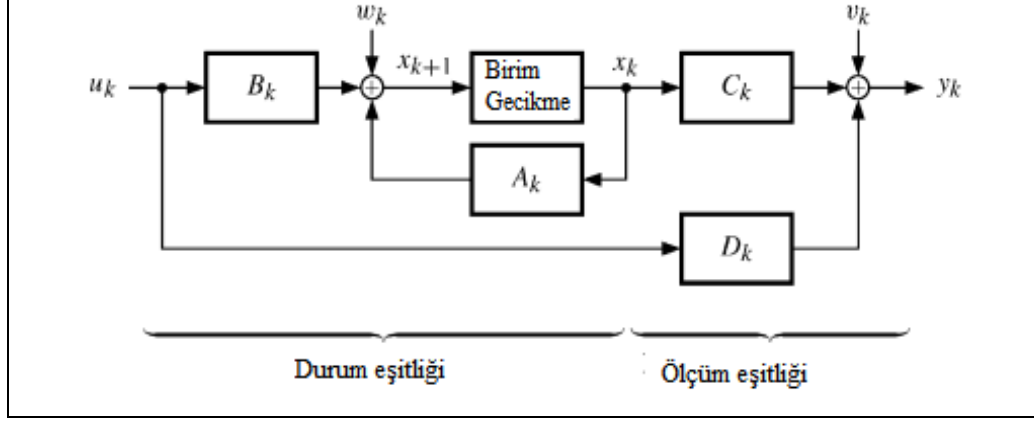
Durum tahmini ölçüm güncellemesi :

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + L_k [y_k - C_k \hat{x}_k^- - D_k u_k]$$

$$\text{Hata kovaryansı ölçüm güncellemesi: } \Sigma_{\hat{x},k}^+ = (I - L_k C_k) \Sigma_{\hat{x},k}^-$$

^a w_k ve v_k bağımsız, 0-ortalama kovaryans matrisi gaus gürültü süreçleridir Σ_w, Σ_v

Şekil 2.13: Lineer Kalman Filtresi Özeti.



Şekil 2.14: Lineer ayırık zamanlı sistemin durum uzay formunda diyagramı.

Şekil 2.13, Lineer durum uzayı modeli kalman filtresinin proses denklemlerini oluşturur. Başlangıç ve Hesaplama kısımları da kalman filtresinin tahmin ve hata düzeltme denklemleri olarak yer alır [33].

Kalman filtresi yöntemi lineer sistemler için kullanılan bir yöntemdir. SOH değeri daha çok doğrusal olmayan olarak değişmektedir. Bu yüzden Kalman Filtresi yerine Uzatılmış Kalman Filtresi (EKF) ve Çift Uzatılmış Kalman Filtresi (DEKF) yöntemleri kullanılır.

Uzatılmış Kalman Filtresi (EKF) ile kapasite ve iç direnç değerlerinin bu filtre yardımıyla hesaplanıp tahmin değerlerinin oluşturulması yöntemlerden biridir. EKF ile elektrokimyasal modelleri birleştirerek tahmin, empedans spektroskopisiyle EKF'nin birleştirilmesiyle oluşturulan tahmin yöntemleri kullanılmaktadır, Şekil 2.15 [33].

Çift Uzatılmış Kalman Filtresi (DEKF) da iki adet kalman filtresi kullanılarak yapılan karmaşık ve fazla veriye sahip sistemlerde kullanılır. Burada kullanılan 1. filtre parametrelerin tahmininde, diğer filtre durum tahmininde kullanılır.

Doğrusal olmayan durum-uzay model ^a

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k$$

$$y_k = g(x_k, u_k) + v_k$$

Tanımlamalar

$$\hat{A}_k = \left. \frac{\partial f(x_k, u_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k = \hat{x}_k^+}, \quad \hat{C}_k = \left. \frac{\partial g(x_k, u_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k = \hat{x}_k^-}$$

Başlatma

$k = 0$ için, aşağıdakileri ayarla

$$\hat{x}_0^+ = \mathbb{E}[x_0]$$

$$\Sigma_{\hat{x},0}^+ = \mathbb{E}[(x_0 - \hat{x}_0^+)(x_0 - \hat{x}_0^+)^T]$$

Hesaplama

$k = 1, 2, \dots$ için hesaplama

$$\text{Zaman güncellemeli durum tahmini: } \hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}^+, u_{k-1})$$

$$\text{Zaman güncellemeli hata kovaryansı: } \Sigma_{\hat{x},k}^- = \hat{A}_{k-1} \Sigma_{\hat{x},k-1}^+ \hat{A}_{k-1}^T + \Sigma_w$$

$$\text{Kalman kazanç matrisi: } L_k = \Sigma_{\hat{x},k}^- \hat{C}_k^T [\hat{C}_k \Sigma_{\hat{x},k}^- \hat{C}_k^T + \Sigma_v]^{-1}$$

$$\text{Durum tahmini ölçüm güncellemesi: } \hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + L_k [y_k - g(\hat{x}_k^-, u_k)]$$

$$\text{Hata kovaryansı ölçüm güncellemesi: } \Sigma_{\hat{x},k}^+ = (I - L_k \hat{C}_k) \Sigma_{\hat{x},k}^-$$

^a w_k ve v_k bağımsız, 0-ortalama kovaryans matrisi gauss gürültü süreçleridir Σ_w, Σ_v

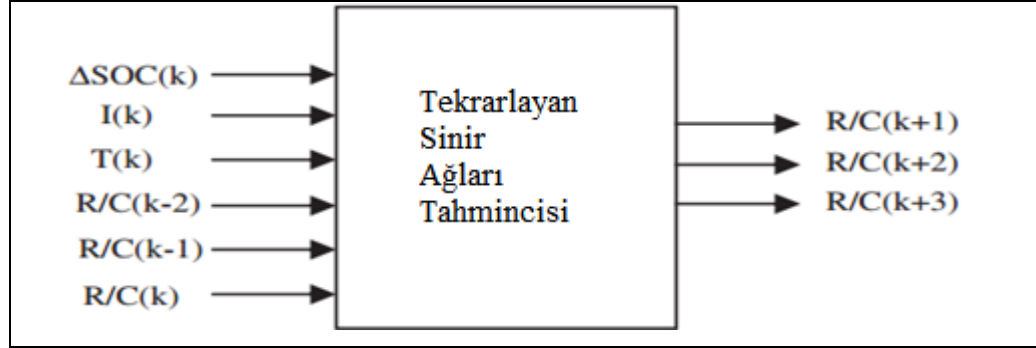
Şekil 2.15: Doğrusal olmayan Uzatılmış Kalman Filtresi (EKF) Özeti.

2.2.3.2. Sinir Ağları Yöntemiyle Tahmin

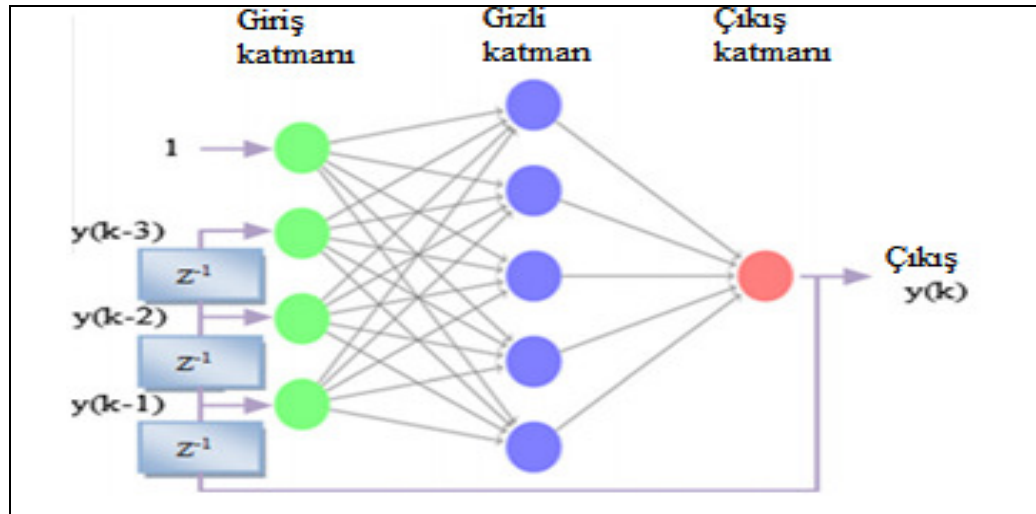
Sinir ağları sistemi, insandaki sinir hücrelerinin bir imitasyonu olarak düşünülüp geliştirilen giriş, analiz ve çıkış olarak ortaya çıkan bir tür analiz sistemidir. Ağa gösterilecek olan örnekler öncelikle bir vektör haline getirilir. Bu vektör ağa gösterilir ve ağ bu vektör için doğru çıkış vektörü üretir. Ağın parametre değerleri doğru çıkış vektörü değeri göstermesi için ayarlanır. Giriş parametreleri batarya sağlık durumu uygulamaları için oldukça kolay ulaşılabilen, voltaj, deşarj akımı, kapasite değeri ve sıcaklık olabilir. Öğrenme sisteminin uygulanması için çok sayıda veriye ihtiyaç duyması dezavantajdır.

Literatür taramalarında sağlık durumu tahmini için kullanılan farklı çeşit sinir ağları yöntemleri vardır. Yapay (Artificial) Sinir Ağları, [36] , Tekrarlayan (Recurrent) Sinir Ağları, [34], Olasılıklı (Probabilistic) Sinir Ağları, [37] ve Yapısal (Structured) Sinir Ağları, [35] yöntemleri bunlardan birkaçıdır.

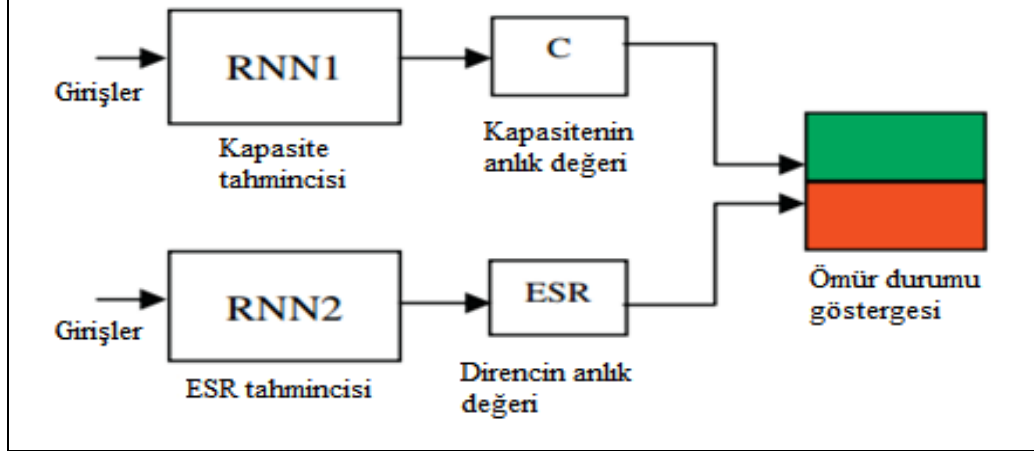
Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN) ile tahmin yöntemi ile ilgili blok diyagramlar aşağıdaki örnekte görülmektedir, Şekil 2.16, Şekil 2.17, Şekil 2.18 [34].



Şekil 2.16: Lityum İyon Bataryaların sağlık durumu tahmini için Tekrarlayan Sinir Ağları (Recurrent- RNN) blok diyagramı.



Şekil 2.17: RNN blok diyagramı.



Şekil 2.18: SOH tahmin prosesi.

2.2.3.3. Bulanık Mantık Yöntemiyle Tahmin

Bulanık mantıkla sağlık durumu tahmini genel olarak uygulanan yöntemlerdendir. Doğrusal olmayan ve kompleks yapılarda bulanık mantık yöntemi tercih edilen bir sistemdir. Kendi öğrenme yeteneğine sahip, çevrimiçi kullanılabilen ve doğru sonuçlar veren bir sistemdir. Dezavantaj olarak çok fazla veriye dayalı bir sistem olmasıdır.

Bulanık mantık doğru ve yanlış durumları arasını bütün olasılıksal yollarla kontrol edebilen bir sistemdir. Bulanık mantıkta veri dizileri iki şekilde ayrılır kırışık (crisp) ve bulanık (fuzzy). Kırışık dizi mantıksal olan ayrımın yapıldığı, bulanık dizi ise verilerin hangi mantığa derece olarak ait olduğunun yapıldığı dizidir.

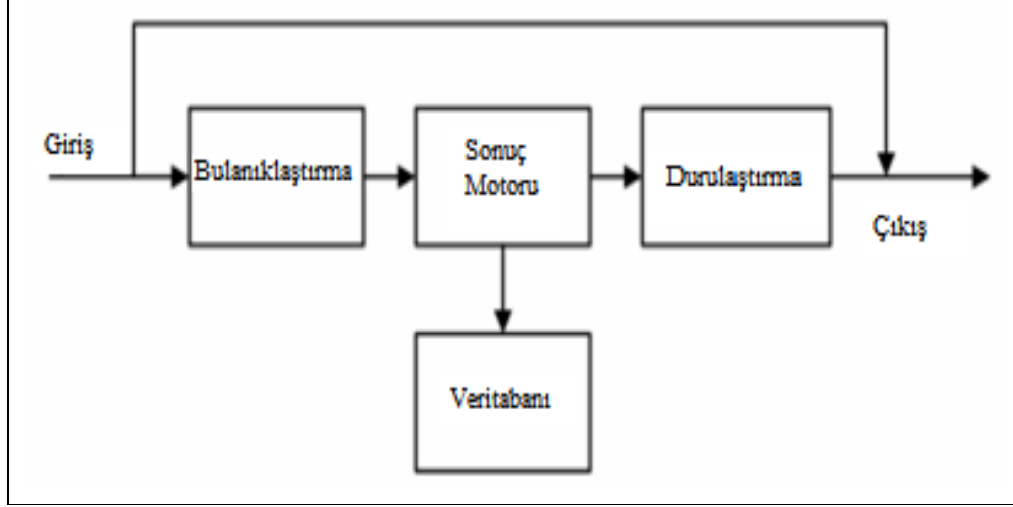
Bulanık mantığın 4 evresi vardır.

Bulanıklaştırma (Fuzzification): Sistemin ölçtüğü değerleri bulanık mantık diline çevirme ve üye gruplarına göre sınıflandırma

Bulanık kural tabanı (Fuzzy Rule Base): Profesyonel deneyimlerden ve sistem bazındaki metodlar kullanıldıktan sonra dizayn edilen evre.

Sonuç Motoru (Inference Engine): Bu evrede bütün bulanık mantık kuralları bulanık mantık çıkış diline döndürülüyor.

Durulaştırma (Defuzzification): Burada da bütün bulanık mantık dili analog çıkış değerine döndürülür, Şekil 2.19 [36].



Şekil 2.19: Bulanık Mantık Sistemi.

Kaynaklarda yer alan bulanık mantık sistemiyle sağlık durumu analizi hakkında bir çalışma gerçekleştirilen [38] numaralı makalede belirtilen bulanık mantık modeline göre sıcaklık ve akıma bağlı olarak üretilen katsayılar omik direncin ve kapasitenin katsayıları olurlar. Bu katsayılar neticesinde uygulanan formüllerle sağlık durumu tahmini yapılabilmektedir. Tabloda verilen değerlerden akım değeri için verilen sıcaklığa bağlı değişen katsayılardan üst tarafta olanlar omik direnci alt tarafta olanlar kapasitenin katsayılarıdır.

Tablo 2.2: Veritabanı Bulanık Mantık Kuralları.

Gerçek Akım	Çıkış Katsayıları	Sıcaklık (°C)		
		Soğuk	Ilık	Sıcak
	Düşük	N	B	B
		N	A	G
	Orta	N	G	G
		B	A	A
	Yüksek	B	A	G
		N	N	N

2.2.3.4. Diğer Adaptif Tahmin Yöntemleri

Batarya sağlık durumunu adaptif olarak tahmin edebilen birkaç yöntem daha vardır. Bunlardan bazıları şunlardır:

- Dual Sliding Mode Observer (Çift Kayan Mod Gözlemcisi) [39].
- Adaptive Observer (Adaptif Gözlemci) [40].
- Adaptive Discrete Time Sliding Mode Observer (Adaptif Ayrık Zaman Kayan Mod Gözlemcisi) [41].
- Probability Density Function (Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu) [42].

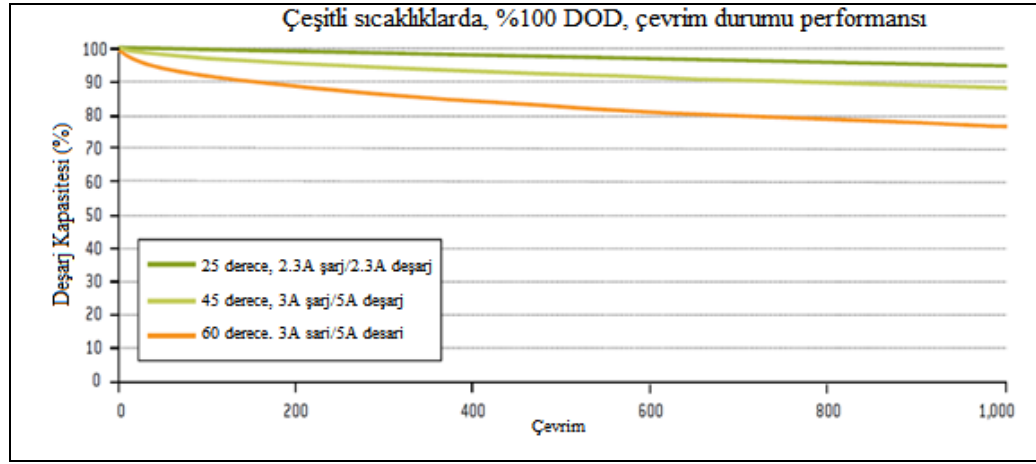
Çift Kayan Mod Gözlemcisi (DSMO) yöntemiyle yapılan sağlık durumu tahminleri kapasite azalması ve direncin değişimine bağlıdır. Çift Kayan Mod Gözlemcisi 2 kısımda düşünülebilir. Fast Paced Time Varying Observer (FPTVO- Hızlı tempolu zamanla değişen gözlemci) ve Slow Paced Time Varying Observer (SPTVO- Yavaş tempolu zamanla değişen gözlemci). FPTVO; şarj durumu, terminal gerilimi ve polarizasyon etkileri gibi parametreleri tahmin etmektedir. SPTVO; kapasite azalması ve direnç bozulmasına göre sağlık durumu (SOH) tahminini gerçekleştirir [39].

Adaptif Gözlemci yönteminde bataryanın eşdeğer devre modelindeki RC değerlerinin doğru tahmin edilerek yerleştirilmesi mantığı vardır. Bu yöntemde bataryanın sağlık durumu için elektriksel karakteristiğinin bilinmesi esas alınır, [40]. makalede Adaptif Gözlemci yöntemi gözlemlenemeyen RC durumu ile birleştirilip ilgili parametrelerin doğru tahmin edilmesi istenmiştir.

Olasılıksal Yoğunluk Fonksiyonu (PDF) yönteminde şarj/deşarj verisinin analizine göre sağlık durumu tahmini yapmaktadır [42]. Kaynaklarda yer alan olasılıksal yoğunluk fonksiyonu ile sağlık durumu tahmini hakkında bir çalışmanın yer aldığı [42] numaralı makalede, PDF yönteminin Çevrimsel Voltamogram (CV); Elektrokimyasal sistemin indirgenme ve yükseltgenme özellikleri, Artan Kapasite Analizi (ICA); sağlık durumunu voltaj ve kapasitenin türevsel değişimi olarak analizi ve Diferansiyel Voltaj Analizi (DVA); ICA'nın verilerinin terslerini kullanarak şarj/deşarj analizi ile karşılaştırılması sağlanmıştır. Bu dört yöntemin matematiksel olarak temelleri aynıdır. PDF ve CV yöntemlerinin eğrileri benzer özellik gösterirler.

2.3. Önerilen Model

Bu tez çalışmasında bataryanın sağlık durumunu tahmin etmek için ölçümlere dayalı tahmin yöntemi kullanılmıştır. Ölçümlere dayalı tahmin yöntemlerinde daha önce bahsettiğimiz gibi çevrim verilerine dayanarak elde edilen voltaj, akım, sıcaklık ve kapasite kaybı değerleri sistematik bir şekilde değerlendirilerek yaşlanmaya bağlı olarak değişen bu değerlerin yorumlanması esas alınmıştır.



Şekil 2.20: Örnek Kapasite kaybı-Çevrim grafiği.

Bataryanın şarj-deşarj çevrimleri sonucu meydana gelen kapasite kaybının çevrim sayısına bağlı olan grafiğinden elde edilen verileri formüle ederek bataryanın sağlık durumu hakkında bilgi elde edebileceğimiz bu yöntemde kullanılan ana formül şöyledir, [43]:

$$Q_{loss} = B * \exp\left(-\frac{Ea}{R * T}\right) * (Ah)^z \quad (2.3)$$

Burada Q_{loss} kapasite kaybı, B pre-eksponansiyel faktör, Ea aktivasyon enerjisi ($Jmol^{-1}$), R gaz sabiti, T mutlak sıcaklık, Ah amper-saat üretimi ($Ah = \text{Çevrim sayısı} \times DOD \times \text{dolu hücre kapasitesi}$) ve z güç yasası faktörüdür.

Kapasite kaybının bulunmasında yer alan B , Ea ve z değerleri bataryanın çevrimindeki C-rate (deşarj oranı) ve sıcaklık (T) değerlerine bağlı olarak değişim

göstermektedir. Aynı zamanda bu değerler farklı tür bataryalar içinde değişmektedir. Bu değişkenlerin hangi parametreye göre değiştiği ise şu şekilde açıklanabilir:

- B parametresi C-rate ile değişmektedir. C-rate değeri arttıkça azalmaktadır.
- Ea parametresi sıcaklık ile değişmektedir. Sıcaklık değeri arttıkça azalmaktadır.
- z güç yasası faktörü bataryaya göre değişmektedir fakat bu değişim çok düşük bir değerdir. Aynı bataryanın farklı sıcaklık ve C-rate değerleri için z değişkenlik göstermemektedir.

Değişkenleri ve sabit değerleri Q_{loss} formülünde yerine koyduğumuzda elde edilen eğri bataryaların kendi çevrimleri sonucunda oluşan Q_{loss} değerlerini formüle etmek için kullanılmıştır.

Bu aşamadan sonra Q_{loss} değeri kullanarak sağlık durumu hesaplama yoluna gidilecektir.

Sağlık durumunu anlık olarak hesaplamak için şu formül kullanılmaktadır [44].

$$SoH(t) = SoH(0) - \frac{\left(\int_0^t |I_b(\tau)| d\tau \right)}{3600 Q_{tp,max}} \quad (2.4)$$

$SoH(t)$ bataryanın anlık sağlık durumu bilgisi, $SoH(0)$ yeni bataryanın sağlık durumu bilgisi, I_b bataryanın anlık akımı, $Q_{tp,max}$ bataryanın ömrünün sonuna ulaşmadan önceki sahip olduğu maksimum şarj miktarı olarak denklemde yer almaktadır. 3600 değeri bulunan saniye cinsinden değeri saate çevirmek için kullanılmıştır.

$$\Delta SoH(t) = \frac{\left(\int_0^t |I_b(\tau)| d\tau \right)}{3600 Q_{tp,max}} \quad (2.5)$$

Bu modelde bataryanın şarj ve deşarj anındaki akımları aynı yaşlanma etkisi gösterdiği varsayılmıştır. Bu yüzden I_b değeri mutlak değer içinde gösterilmektedir. Aynı zamanda I_b değeri:

$$I_b = I_{br} * Q_b \quad (2.6)$$

olarak gösterilir. Burada I_{br} akım oranı, Q_b Ah cinsinden nominal kapasitedir. (2.5) formülünde iki tarafın türevini aldığımızda (2.7) formülüne ulaşırız.

$$\Delta SoH_{rate} = \frac{I_{br} * Q_b}{3600 Q_{tp,max}(I_{br})} \quad (2.7)$$

Farklı batarya akım oranlarında batarya maksimum şarj verisi $Q_{tp,max}$ farklıdır. Kesin akım oranlarında bataryanın kesin bir şarj değeri verdiği kabul edilmektedir. $Q_{tp,max}$ parametresini farklı akım oranlarında elde etmek için kapasite kaybı değeri ΔQ_{loss} 20'ye set edilmiştir. Bunun neticesinde $Q_{tp,max}$ değeri şu şekilde ifade edilebilir:

$$Q_{tp,max}(I_{br}) = \left(\frac{20}{B(I_{br}) * \exp\left(-\frac{Ea(I_{br})}{R*T}\right)} \right)^{1/z} \quad (2.8)$$

(2.8) formülünü (2.7) formülü içine yerleştirirsek,

$$\Delta SoH_{rate} = \frac{I_{br} * Q_b * (B(I_{br}) * \exp\left(-\frac{Ea(I_{br})}{R*T}\right))^{\frac{1}{z}}}{3600.20^{1/z}} \quad (2.9)$$

Buradan hareketle anlık sağlık durumunun tahminini gerçekleştirmek için, herhangi bir t anında,

$$SoH(t) = SoH(0) - \frac{I_{br} * Q_b * (B(I_{br}) * \exp\left(-\frac{Ea(I_{br})}{R*T}\right))^{\frac{1}{z}}}{3600.20^{1/z}} \quad (2.10)$$

Formülü sonucu istediğimiz değeri verecektir.

3. ÖNERİLEN MODELİN UYGULANMASI

Önerilen modelde bataryanın şarj-deşarj çevrim verileri esas alınarak buradaki akım değerleri dikkate alınmıştır. Bataryanın raf ömrü, çok yüksek ve düşük sıcaklık değişimleri bu çalışmada dikkate alınmamıştır. Bataryanın sağlık durumunun değişimi kapasite kaybıyla anlık akü akımının, akünün bozulması üzerindeki göreceli etkisini ortaya çıkarır.

Batarya sağlık durumu tahmini için yapılan çalışmada modelin uygulanması için 3 farklı batarya seçilmiştir. Bu bataryalardan elde edilen veriler modeldeki formüllerin parametrelerinin oluşturulmasına katkı sağlamış ve sonuçta sağlık durumu tahmini için gerçekçi değerler yakalanmaya çalışılmıştır.

3.1. ANR26650M1A (LiFePO₄) Bataryaya Uygulanması

ANR26650M1A marka Lityum-Demir Fosfat bataryanın özellikleri şu şekildedir, Şekil 3.1 [10]:



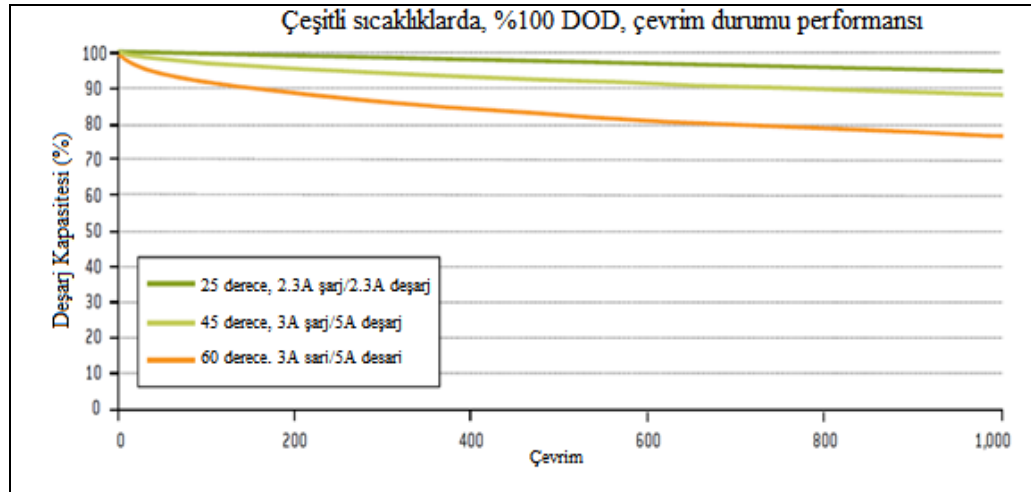
Şekil 3.1: ANR26650M1A silindirik hücre özellikleri.

Bu bataryaya uygulanan çevrimler şu tablodaki gibidir:

Tablo 3.1: ANR26650M1A hücreye uygulanan çevrim koşulları.

ANR26650M1A-A123	Nom Cap:2.3 Ah	Nom Vol:3.3V
Sıcaklık	Şarj	Deşarj
25 derece	2.3A şarj	2.3A deşarj
45 derece	3A şarj	5A deşarj
60 derece	3A şarj	5A deşarj

Bu bataryanın farklı şarj-deşarj çevrimleri sonucu verdiği kapasite kaybı Q_{loss} değerinin çevrime bağlı değişimini veren grafik şu şekildedir, Şekil 3.2 [10]:



Şekil 3.2: ANR26650M1A hücre Q_{loss} verileri.

Kapasite kaybının değerleri bu grafikten çıkartılan değerler için MATLAB programında şu şekilde işlemler yapılmıştır.

- Her bir çevrim değerine karşılık gelecek şekilde, 3 ayrı şart için 3 ayrı Q_{loss} dizileri oluşturulmuştur.
- Çevrim değeri (x-ekseni) ve Q_{loss} (y-ekseni) değerleri bir grafikte çizdirilmiştir.

- Bu grafikteki verilere bağılı olarak 3 ayrı eğri uydurma yapılmış ve B , Ea ve z değerleri bu eğriler neticesinde bulunmuştur.

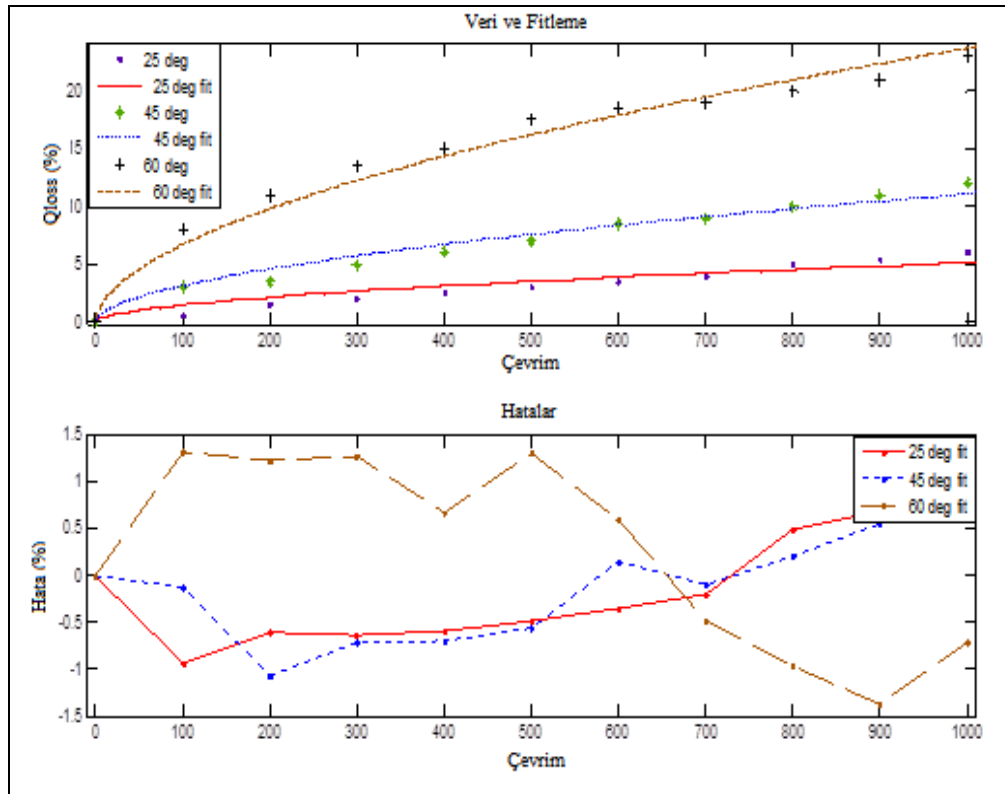
Bu eğrilerde bulunan parametreler şu şekildedir.

Eğri Parametreleri:

$$Q_{loss} = B * \exp\left(-\frac{Ea}{R * T}\right) * (Ah)^z \quad (2.3)$$

- $B = 10$, $Ea = 12221$, $z = 0.55$ (25 derece/1C için)
- $B = 9.173$, $Ea = 11952$, $z = 0.55$ (45 derece/2C için)
- $B = 9.173$, $Ea = 10335$, $z = 0.55$ (60 derece/2C için)

Parametrelerin yerine konulmasıyla elde edilen grafik ve hata payı şu şekilde gösterilebilir:



Şekil 3.3: ANR26650M1A hücre için uydurulan Q_{loss} eğrisi ve hata payları.

Oluşturulan eğrinin belirlilik katsayıları şu şekildedir:

Tablo 3.2: ANR26650M1A hücre için uydurulan Q_{loss} eğrisi belirlilik katsayıları.

	25 derece 1C	45 derece 2C	60 derece 2C
R-square (R²) değeri	0.9008	0.9733	0.9758

Bu verilerin sonucunda uyarlanan eğrilerin deneysel kapasite kaybı değerlerine (Q_{loss}) yakın sonuçlar verdiği gözlemlenebilir.

Uyarlanan eğrideki parametrelerin doğruluğu da pekiştirildikten sonra daha önce 2 kısımda bahsettiğimiz kapasite kaybından sağlık durumu değeri belirleme sürecini gerçekleştirebiliriz.

$$\Delta SoH_{rate} = \frac{I_{br} * Q_b * (B(I_{br}) * \exp\left(-\frac{Ea(I_{br})}{R*T}\right))^{\frac{1}{z}}}{3600.20^{1/z}} \quad (2.9)$$

Tablo 3.3: ANR26650M1A hücre için bulunan ΔSoH_{rate} değerleri.

	25 derece 1C	45 derece 2C	60 derece 2C
ΔSoH_{rate}	2.30e-08	8.34e-08	3.49e-07

3.2. CX2 (LiCoO₂) Bataryaya Uygulanması

CX2 marka Lityum-Kobalt Oksit bataryanın özellikleri şu şekildedir, Şekil 3.4 [9]:

CX2		
Batarya Örneği	Batarya Parametreleri	Özellikler (Değerler)
	Kapasite Oranı	1350mAh
	Hücre Kimyası	LiCoO ₂ katot, EDS sonuçları eser miktarda manganeez olduğunu göstermektedir
	Ağırlık	28g
	Ölçüler (mm)	6.6 x 33.8 x 50
	Özel Notlar	Jellyrol konfigürasyonu geniş eksen üzerine sarılmıştır.
CX2 Batarya		

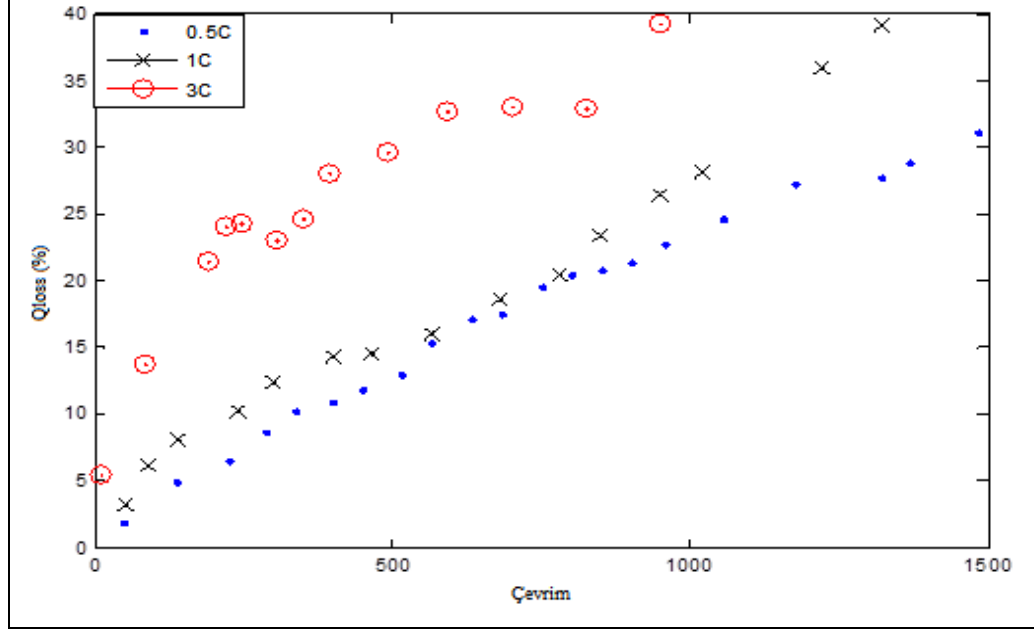
Şekil 3.4: CX2 prizmatik hücre özellikleri.

Bu bataryaya uygulanan çevrimler şu tablodaki gibidir:

Tablo 3.4: CX2 hücreye uygulanan çevrim koşulları.

CX2	Nom Kap:1.35 Ah	Nom Vol:3.7V
Sıcaklık	Şarj	Deşarj
23 derece	1.35A şarj	0.67A deşarj
23 derece	1.35A şarj	1.35A deşarj
23 derece	1.35A şarj	4.05A deşarj

Bu bataryanın farklı şarj-deşarj çevrimleri sonucu verdiği kapasite kaybı Q_{loss} değerinin çevrime bağlı değişimini veren grafik şu şekildedir:



Şekil 3.5: CX2 hücre Q_{loss} verileri.

Kapasite kaybının değerleri bu grafikten çıkartılan değerler için MATLAB programında şu şekilde işlemler yapılmıştır.

- Her bir çevrim değerine karşılık gelecek şekilde, 3 ayrı şart için 3 ayrı Q_{loss} dizileri oluşturulmuştur.
- Çevrim değeri (x-ekseni) ve Q_{loss} (y-ekseni) değerleri bir grafikte çizdirilmiştir.
- Bu grafikteki verilere bağlı olarak 3 ayrı eğri uydurma yapılmış ve B , Ea ve z değerleri bu eğriler neticesinde bulunmuştur.

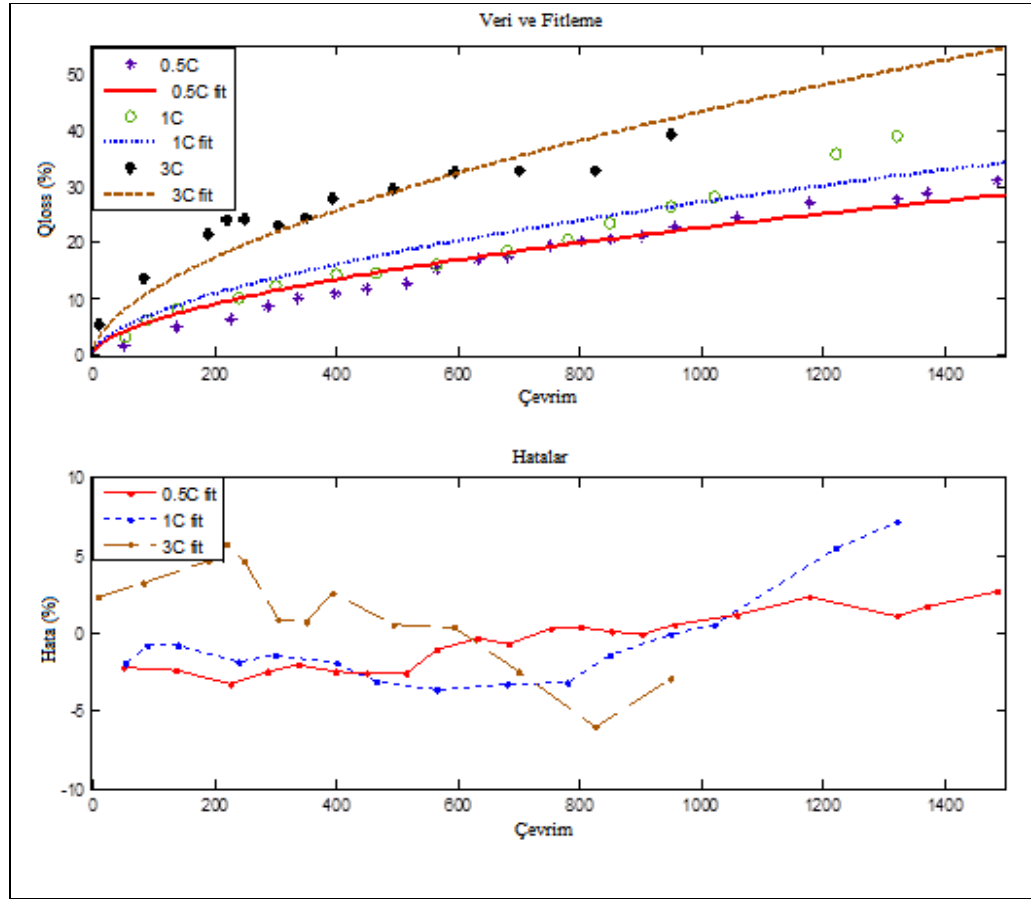
Bu eğrilerde bulunan parametreler şu şekildedir.

Eğri Parametreleri:

$$Q_{loss} = B * \exp\left(-\frac{Ea}{R * T}\right) * (Ah)^z \quad (2.3)$$

- $B= 1.283$, $Ea =2021$, $z=0.57$ (0.5C)
- $B= 1.02$, $Ea =2021$, $z=0.57$ (1C)
- $B= 0.869$, $Ea =2021$, $z=0.57$ (3C)

Parametrelerin yerine konulmasıyla elde edilen grafik ve hata payı şu şekilde gösterilebilir:



Şekil 3.6: CX2 hücre için uydurulan Q_{loss} eğrisi ve hata payları.

Oluşturulan eğrinin belirlilik katsayıları şu şekildedir:

Tablo 3.5: CX2 hücre için uydurulan Q_{loss} eğrisi belirlilik katsayıları.

	25 derece 0.5C	25 derece 1C	25 derece 3C
R-square (R^2) değeri	0.9471	0.9095	0.8408

Bu verilerin sonucunda uyarlanan eğrilerin deneysel kapasite kaybı (Q_{loss}) değerlerine yakın sonuçlar verdiği gözlemlenebilir.

Uyarlanan eğrideki parametrelerin doğruluğu da pekiştirildikten sonra daha önce 2 kısımda bahsettiğimiz kapasite kaybından sağlık durumu değeri belirleme sürecini gerçekleştirebiliriz.

$$\Delta SoH_{rate} = \frac{I_{br} * Q_b * (B(I_{br})) * \exp\left(-\frac{Ea(I_{br})}{R*T}\right)^{\frac{1}{z}}}{3600.20^{1/z}} \quad (2.9)$$

Tablo 3.6: CX2 hücre için bulunan ΔSoH_{rate} değerleri.

	25 derece 0.5C	25 derece 1C	25 derece 3C
ΔSoH_{rate}	3.58e-07	4.79e-07	1.08e-06

3.3. U27-12XP (LiFePO₄) Bataryaya Uygulanması

U27-12XP batarya modülü - Valence LiFePO₄ marka Lityum-Demir Fosfat bataryanın özellikleri şu şekildedir, Şekil 3.7 [8]:



Şekil 3.7: U27-12XP batarya modülü.

Tablo 3.7: U27-12XP batarya modülü özellikleri.

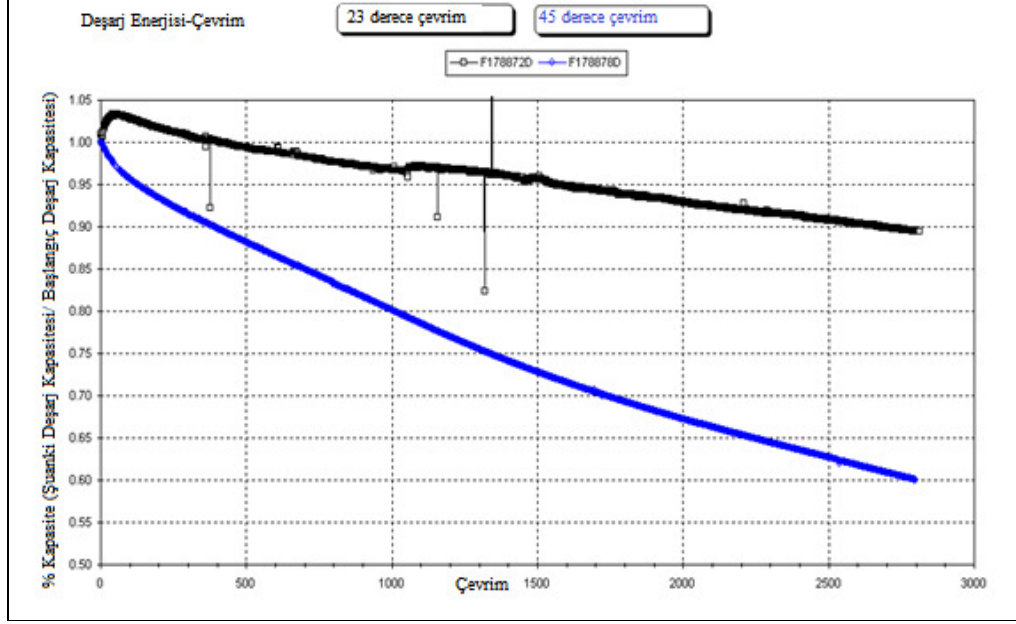
Özellikler		U27-12XP
Nominal Modül Voltajı		12.8 V
Nominal Kapasite (C/5, 23 °C)		138 Ah
Ağırlık (Yaklaşık)		19.5kg
Ölçüler UxGxY (mm)		306x172x225
BCI Grup Numarası		Group 27
Terminal Vida Ölçüleri		M8 x 1.25
Spesifik Enerji		91 Wh/kg
Enerji Yoğunluğu		148 Wh/l
Standart Deşarj (@25°C)	Maks. Sürek. Yük Akımı	150A
	En Yüksek Yük Akımı	300A
	Kesme Voltajı	10V
Standart Şarj	Maks. Şarj Voltajı	14.6V
	Şamandıra Voltajı	13.8V
	Şarj Süresi c/2	2.5 saat
DC İç Direnç (Maks)		5mΩ
Modül Başına Eşdeğer Lityum İçeriği (g)		160.38

Bu bataryaya uygulanan çevrimler şu tablodaki gibidir:

Tablo 3.8: U27-12XP batarya modülüne uygulanan çevrim koşulları.

U27XP-12- Valence	Nom Cap:138 Ah	Nom Vol:12.8V
Sıcaklık	Şarj	Deşarj
23 derece	138A şarj	138A deşarj
45 derece	138A şarj	138A deşarj

Bu bataryanın farklı şarj-deşarj çevrimleri sonucu verdiği kapasite kaybı Q_{loss} değerinin çevrime bağlı değişimini veren grafik şu şekildedir:



Şekil 3.8: U27-12XP batarya modülü Q_{loss} verileri.

Kapasite kaybının değerleri bu grafikten çıkartılan değerler için MATLAB programında şu şekilde işlemler yapılmıştır.

- Her bir çevrim değerine karşılık gelecek şekilde, 2 ayrı şart için 2 ayrı Q_{loss} dizileri oluşturulmuştur.
- Çevrim değeri (x-ekseni) ve Q_{loss} (y-ekseni) değerleri bir grafikte çizdirilmiştir.
- Bu grafikteki verilere bağlı olarak 2 ayrı eğri uydurma yapılmış ve B , Ea ve z değerleri bu eğriler neticesinde bulunmuştur.

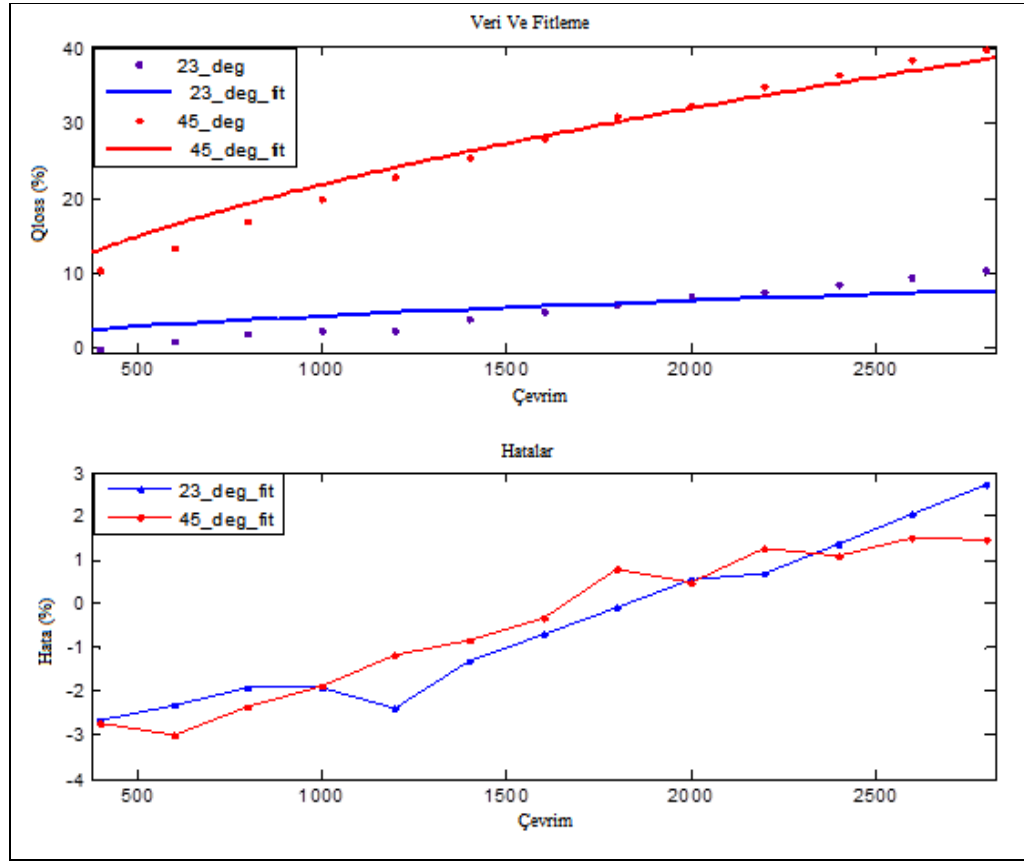
Bu eğrilerde bulunan parametreler şu şekildedir.

Eğri Parametreleri:

$$Q_{loss} = B * \exp\left(-\frac{Ea}{R * T}\right) * (Ah)^z \quad (2.3)$$

- $B = 15$, $Ea = 19028$, $z = 0.55$ (23 derece/1C için).
- $B = 15$, $Ea = 16212$, $z = 0.55$ (45 derece/1C için).

Parametrelerin yerine konulmasıyla elde edilen grafik ve hata payı şu şekilde gösterilebilir.



Şekil 3.9: U27-12XP batarya modülü için uydurulan Q_{loss} eğrisi ve hata payları.

Oluşturulan eğrinin belirlilik katsayıları şu şekildedir:

Tablo 3.9: U27-12XP batarya modülü için uydurulan Q_{loss} eğrisi belirlilik katsayıları.

	25 derece 1C	45 derece 1C
R-square (R^2) değeri	0.85	0.9683

Bu verilerin sonucunda uyarlanan eğrilerin deneysel kapasite kaybı (Q_{loss}) değerlerine yakın sonuçlar verdiği gözlemlenebilir.

Uyarlanan eğrideki parametrelerin doğruluğu da pekiştirildikten sonra daha önce 2 kısımda bahsettiğimiz kapasite kaybından sağlık durumu değeri belirleme sürecini gerçekleştirebiliriz.

$$\Delta SoH_{rate} = \frac{I_{br} * Q_b * (B(I_{br}) * \exp\left(-\frac{Ea(I_{br})}{R*T}\right))^{\frac{1}{z}}}{3600.20^{1/z}} \quad (2.9)$$

Tablo 3.10: U27-12XP batarya modülü hücre için bulunan ΔSoH_{rate} değerleri.

	25 derece 1C	45 derece 1C
ΔSoH_{rate}	1.78e-8	3.26e-7

4. MODELİN SAĞLIK DURUMU ANALİZİ

Bir önceki bölümde bataryanın sağlık durumu tahmini için önerilen modelin parametrelerinin oluşturulmasını göstermiştik. Her bataryanın farklı koşulları için uyarlanan eğrilerin belirlilik katsayıları bize elde edilen parametrelerin doğruluğu hakkında yeterli bilgi vermektedir. Bu doğruluğu test etmek için elimizde çevrim verileri bulunan CX2 bataryasını kullanacağız.

Bu bataryanın 0.5C, 1C ve 3C şarjdeşarj çevrimleri sonucu deneysel olarak kapasite kaybına bağlı sağlık durumu (SOH) hesaplaması sağlanmıştır. Bu sağlık durumu (SOH) hesabını daha önce bulduğumuz (2.10) formülüyle benzetim yaptığımız hesaplara karşılaştırıp sonuçları analiz edeceğiz. Burada amaç bataryanın saniyelik kayıp ΔSOH_{rate} değerini yüzde yüz sağlıklı bataryadan ($SOH(0)$) saniye bazında çıkartarak anlık sağlık durumu $SOH(t)$ tahmini yapmaktır.

$$SOH(t) = SOH(0) - \frac{I_{br} * Q_b * (B(I_{br})) * \exp\left(-\frac{Ea(I_{br})}{R*T}\right)^{\frac{1}{z}}}{3600.20^{1/z}} \quad (2.10)$$

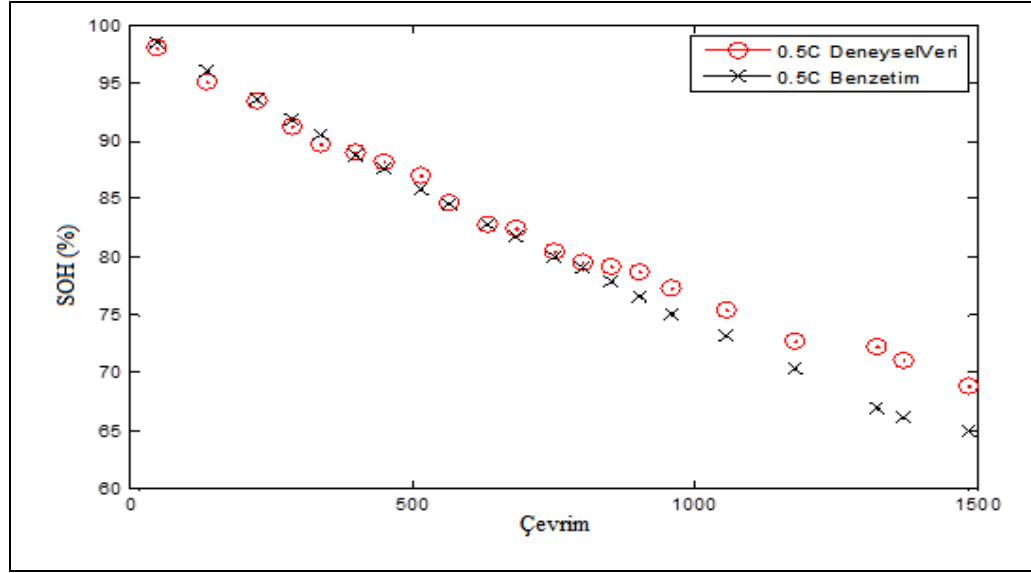
İlk önce 0.5C şarjdeşarj çevriminin verilerini ele alacağız.

Bu çevrimlerde çevrim sayısına bağlı olarak elimizdeki deneysel ve benzetim sonucu oluşan sağlık durumu verilerini şu şekilde tablolayabiliriz.

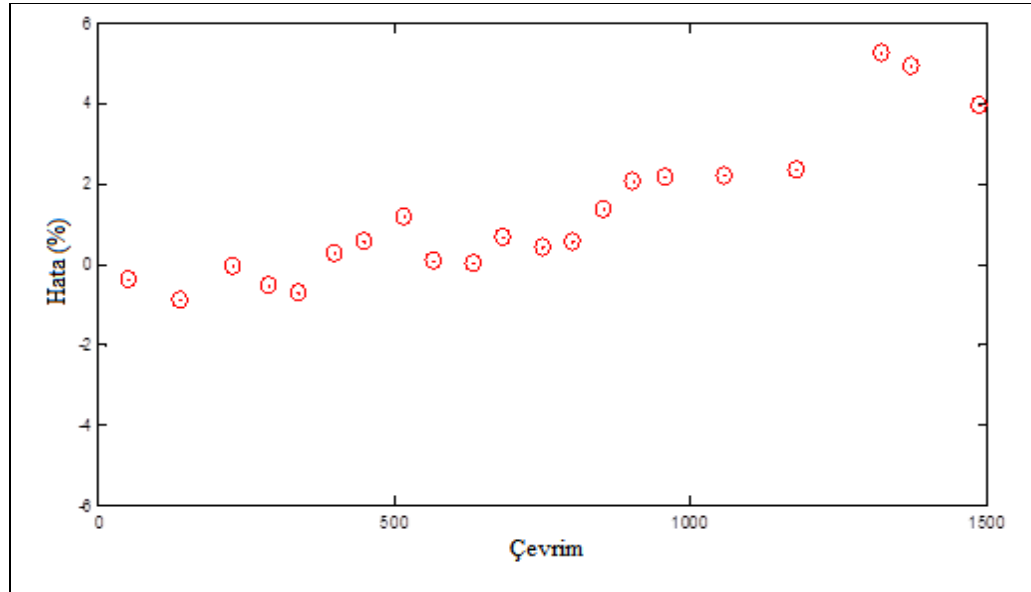
Tablo 4.1: CX2 hücre 0.5C SOH Deneysel ve Benzetim Verileri.

Çevrim	50	137	226	288	338	399	449
SOH-Deneysel (%)	98,12	95,12	93,51	91,29	89,78	89,04	88,18
SOH-Benzetim (%)	98,52	96,01	93,57	91,82	90,50	88,76	87,60
Hata(%)	-0,40	-0,89	-0,06	-0,53	-0,72	0,28	0,58
Çevrim	515	565	633	683	751	801	851
SOH-Deneysel (%)	87,04	84,67	82,82	82,45	80,46	79,58	79,19
SOH-Benzetim (%)	85,85	84,59	82,78	81,77	80,04	79,02	77,84
Hata(%)	1,19	0,08	0,04	0,68	0,42	0,56	1,35
Çevrim	901	957	1057	1178	1320	1370	1485
SOH-Deneysel (%)	78,66	77,26	75,41	72,75	72,29	71,12	68,89
SOH-Benzetim (%)	76,61	75,11	73,23	70,42	67,03	66,18	64,95
Hata(%)	2,05	2,15	2,18	2,33	5,26	4,94	3,94

Bu verilerin sonucunda oluşan 0.5C SOH-Çevrim grafiği şu şekildedir.



Şekil 4.1: CX2 hücre 0.5C SOH Deneysel ve Benzetim grafiği.



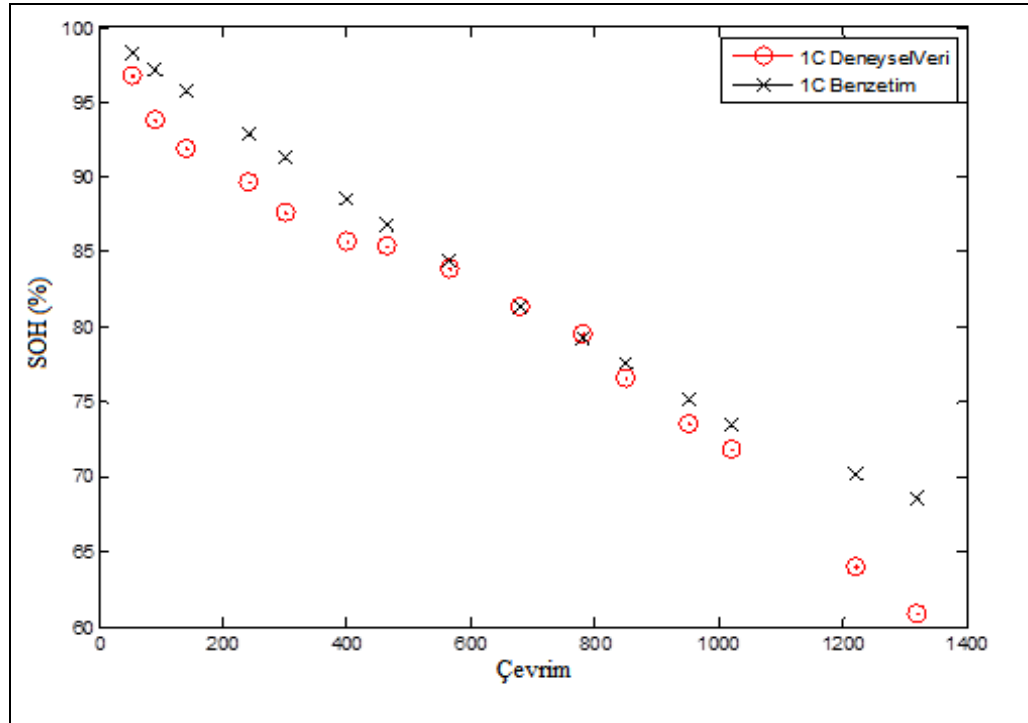
Şekil 4.2: CX2 hücre 0.5C SOH Deneysel ve Benzetim arası hata grafiği.

Aynı şekilde 1C içinde çevrim sayısına bağlı olarak elimizdeki deneysel ve benzetim sonucu oluşan sağlık durumu verilerini şu şekilde tablolarabiliriz.

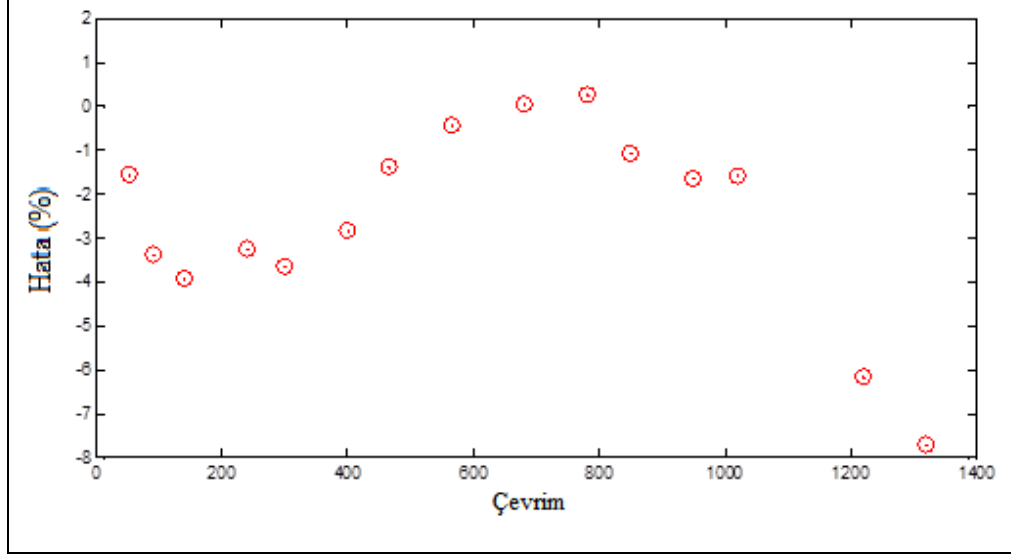
Tablo 4.2: CX2 hücre 1C SOH Deneysel ve Benzetim Verileri.

Çevrim	53	90	140	240	300	400	465	
SOH-Deneysel (%)	96,81	93,88	91,89	89,72	87,64	85,72	85,46	
SOH-Benzetim (%)	98,37	97,25	95,82	92,97	91,29	88,57	86,85	
Hata(%)	-1,56	-3,37	-3,93	-3,25	-3,65	-2,85	-1,39	
Çevrim	565	680	780	850	950	1020	1220	1320
SOH-Deneysel (%)	83,95	81,4	79,5	76,56	73,55	71,86	64	60,89
SOH-Benzetim (%)	84,40	81,35	79,24	77,63	75,20	73,46	70,17	68,61
Hata(%)	-0,45	0,05	0,26	-1,07	-1,65	-1,60	-6,17	-7,72

Bu verilerin sonucunda oluşan 1C SOH-Çevrim grafiği şu şekildedir.



Şekil 4.3: CX2 hücre 1C SOH Deneysel ve Benzetim grafiği.



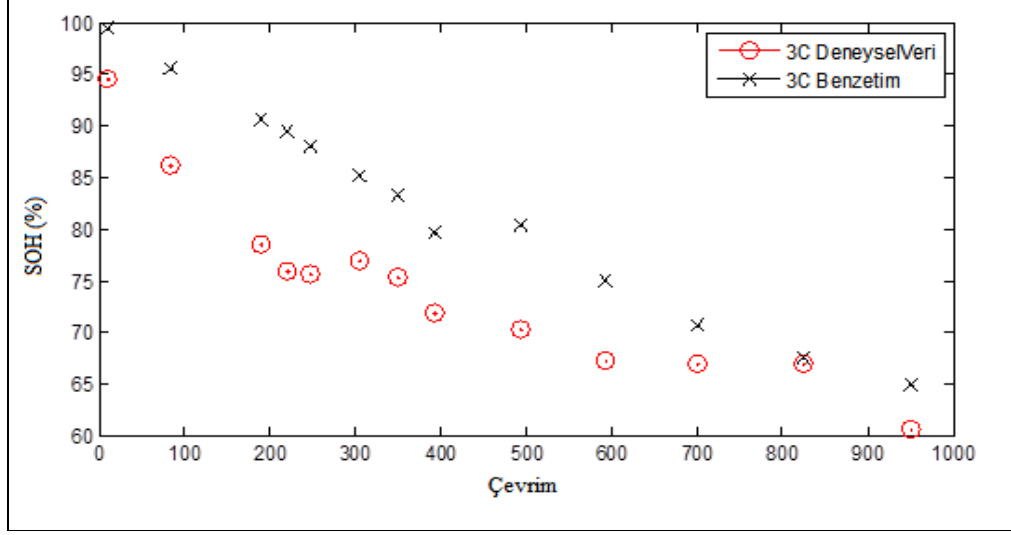
Şekil 4.4: CX2 hücre 1C SOH Deneysel ve Benzetim arası hata grafiği.

En son olarak 3C içinde çevrim sayısına bağlı olarak elimizdeki deneysel ve benzetim sonucu oluşan sağlık durumu verilerini şu şekilde tablolayabiliriz.

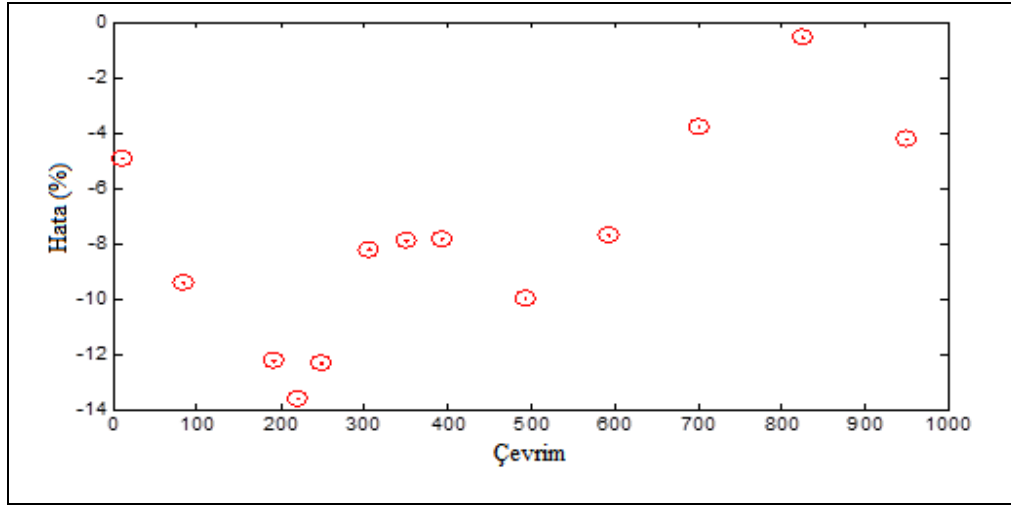
Tablo 4.3: CX2 hücre 3C SOH Deneysel ve Benzetim Verileri.

Çevrim	10	83	190	220	248	305	350
SOH-Deneysel (%)	94,53	86,26	78,52	75,93	75,71	76,97	75,41
SOH-Benzetim (%)	99,45	95,65	90,72	89,51	88,04	85,18	83,31
Hata(%)	-4,92	-9,39	-12,20	-13,58	-12,33	-8,21	-7,90
Çevrim	393	493	593	700	825	950	
SOH-Deneysel (%)	71,92	70,38	67,35	66,97	67,04	60,69	
SOH-Benzetim (%)	79,75	80,37	75,05	70,74	67,58	64,91	
Hata(%)	-7,83	-9,99	-7,70	-3,77	-0,54	-4,22	

Bu verilerin sonucunda oluşan 3C SOH-Cycle grafiği şu şekildedir.



Şekil 4.5: CX2 hücre 3C SOH Deneysel ve Benzetim grafiği.



Şekil 4.6: CX2 hücre 3C SOH Deneysel ve Benzetim arası hata grafiği.

Bu verileri ve grafikleri şu şekilde değerlendirebiliriz:

0.5C de yapılan şarj-deşarj çevrimleri sonucu bataryanın yaşlanmasının deneysel verilerine göre yaptığımız benzetim oldukça yüksek doğruluk göstermektedir. Bu verilerin sonucunda en yüksek hata oranı 1320. çevrimdeki %5.26 değeri, en düşük hata oranı 633. çevrimdeki %0.04 olarak tespit edilmiştir.

1C de yapılan şarj-deşarj çevrimleri sonucu bataryanın yaşlanmasının deneysel verilerine göre yaptığımız benzetim düşük hata oranıyla sonuçlanmıştır. Bu verilerin

sonucunda en yüksek hata oranı 1320. çevrimdeki %7.72 değeri, en düşük hata oranı 680. çevrimdeki %0.05 olarak tespit edilmiştir.

3C de yapılan şarj-deşarj çevrimleri sonucu bataryanın yaşlanmasının deneysel verilerine göre yaptığımız benzetim bazı kısımlarda yüksek hata oranıyla sonuçlanmıştır. Bu verilerin sonucunda en yüksek hata oranı 220. çevrimdeki %13.58 değeri, en düşük hata oranı 825. çevrimdeki %0.54 olarak tespit edilmiştir.

Modelin düşük C-rate oranlarında (0.5C ve 1C) şarj-deşarj çevrimleri sonucu oluşan yaşlanmayı tahmin etmedeki başarısı yapılan benzetim çalışmaları ile doğrulanmıştır. 3C de yapılan deneylerin hata oranının artmasının nedeni, şarj-deşarj esnasında bataryanın sıcaklığındaki değişmelerin düşük C-rate'lere göre daha fazla olmasından ve bunun da tam olarak modele yansıtılamamasından kaynaklıdır.

5. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Bataryalar günümüzde birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Çeşitli kullanım alanlarının olması bataryalar üzerinde yapılan çalışmaların önemini gün geçtikçe arttırmaktadır.

Bataryalar içerisinde de Lityum tabanlı bataryaların kullanımı diğer batarya çeşitlerine oranla yükseliş göstermektedir. Lityum tabanlı şarj edilebilen bataryaların enerji yoğunlukları diğer batarya çeşitlerine göre oldukça fazladır. Bu özellikte bu bataryaların daha fazla alanda kullanılmasını sağlamaktadır. Tabi bu alanların başında elektrikli araç teknolojisi gelmektedir.

Gerek elektrikli araçlar için gerek diğer uygulamalar için Lityum tabanlı bataryaların birçok özelliğinin gözlemlenebilir olması gerekmektedir. Bu özelliklerin başında bu tezinde konusunu oluşturan ömür tahmini yani sağlık durumu(SOH) gelmektedir.

Bu çalışmada Lityum tabanlı bataryaların sağlık durumu (SOH) tahmini için kapasite kaybı (Q_{loss}) parametresi kullanılmıştır. Bataryanın her bir şarj-deşarj çevrimi sonucu kaybettiği kapasite kaybı Q_{loss} değeri bir denkleme indirgenmiş, bu denklemde yer alan değişkenlerden; B (pre-eksponansiyel faktör), Ea (aktivasyon enerjisi ($Jmol^{-1}$)) ve z (güç yasası faktörü) bize deneysel Q_{loss} verilerinin bir eğri üzerine oturtulmasını sağlamıştır.

Q_{loss} eğrileri 3 ayrı bataryanın (ANR26650M1A, CX2, U27-12XP) farklı koşullarında elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında belirlilik katsayıları (R^2) değerleri oldukça iyi sonuçlar vermiş ve bulunan B, Ea ve z değerlerinin uygunluğu onaylanmıştır.

Bu parametrelerin yerine konmasıyla oluşan Q_{loss} , anlık sağlık durumunun ölçülmesi için oluşturulan formülde yerine konulmuş ΔSOH_{rate} değerinin bulunmasını sağlamıştır. ΔSOH_{rate} herhangi bir bataryada saniye bazında gerçekleşen kapasite kaybı olarak sıfır bataryanın sağlık durumundan ($SOH(0)$) devamlı çıkartılacak şekilde bataryanın anlık sağlık durumu hakkında bize bilgi vermektedir.

CX2 bataryanın 3 farklı koşulu için ΔSOH_{rate} hesabı sonucu anlık sağlık durumu (SOH) hesaplama benzetimi yapılmıştır. Burada bataryanın 0.5C, 1C ve 3C de yapılmış olan şarj-deşarj çevrimleri kullanılmış, bu çevrim verileri sonucu

deneysel olarak her bir örneklenen çevrim sayısı için SOH hesabı yapılmıştır. Daha sonra bu deneysel veriler elimizdeki formüllerle deneysel verileri bulduğumuz aynı örneklenen çevrimlerle hesaplanmış ve her bir C-rate için benzetim sonuçları bulunmuştur. 0.5C de yapılan testler sonucu hata oranımız maksimum %5.26, 1C de yapılan testler sonucu maksimum %7.72, 3C de yapılan testler sonucu maksimum %13.58 olarak tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, önerilen modelin düşük C-rate değerleri için SOH tahminine dayalı güvenilir sonuç verme olasılığının daha fazla olduğunu göstermiştir. Yüksek C-rate değerleri için yapılan çevrimlerde bataryanın iç dinamikleri ve sıcaklıktan kaynaklanan değişimlerin tahmin sonuçlarını olumsuz yönde etkilediği gözlenmiştir.

Yüksek C-rate değerleri için sıcaklık değişimlerine bağlı olarak uyarlanacak bir düzeltme katsayısı ileriki çalışmalarda problemi çözmeye yardımcı olabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Web 1, (2016), <https://tr.wikipedia.org/wiki/Pil>, (Eriřim tarihi: 20/10/2016).
- [2] Web 2, (2016), <http://www.tamsat.org.tr/tr/piller-1-pillerin-tarihcesi/>, (Eriřim tarihi: 20/10/2016).
- [3] Web 3, (2016), https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_battery, (Eriřim tarihi: 24/10/2016).
- [4] Web 4, (2016), http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press_Archive/200412/04-060E/, (Eriřim tarihi: 24/10/2016).
- [5] Web 5, (2016), <http://www.nexeon.co.uk/about-li-ion-batteries/>, (Eriřim tarihi: 24/10/2016).
- [6] Web 6, (2016), <http://www.mpoweruk.com/chemistries.htm>, (Eriřim tarihi: 25/10/2016).
- [7] Web 7, (2016), <http://evobsession.com/wp-content/uploads/2016/01/lithium-ion-market-report-1.png>, (Eriřim tarihi: 25/10/2016).
- [8] Web 8, (2017), <https://www.valence.com/>, (Eriřim tarihi:01/03/2017).
- [9] Web 9, (2017), <http://www.calce.umd.edu/batteries/veri.htm>, (Eriřim tarihi: 01/03/2017).
- [10] Web 10, (2017), http://e-motion.lt/wpcontent/uploads/2010/01/ANR26650M1A_Verisheet.pdf, (Eriřim tarihi: 01/03/2017).
- [11] Web 11, (2016), http://batteryuniversity.com/learn/article/batteryperformance_as_a_function_of_cycling, (Eriřim tarihi: 25/10/2016).
- [12] Groot J, (2012), ” State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries: Cycle LifeTest Methods”, Lisans Tezi, Chalmers University of Technology.
- [13] Web 12, (2016), http://batteryuniversity.com/learn/article/capacity_loss, (Eriřim tarihi: 25/10/2016).
- [14] Web 13, (2016), <http://www.mpoweruk.com/life.htm>, (Eriřim tarihi: 29 /10/2016).
- [15] Chen L., Xiong F.Q., Wan G.C.,Tong M.S.,(2015),” An Accurate Estimation for the State of Health of Lithium-ion Batteries by Using Fuzzy Logic System”, Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, 1068-1071, Prag, Czech Republic ,6-9 July.

- [16] Zheng C., Chunting Chris M., Fu Y., Xu J., Xianzhi G., (2013), “ Online battery state of health estimation based on Genetic Algorithm for electric and hybrid vehicle applications.” , J PowerSources, 240,184–192.
- [17] Zenati A, Desprez P, Razik H, Rael S., (2012), “A methodology to assess the state of health of lithium-ion batteries based on the battery’s parameters and a fuzzy logic system.” IEEE Int Electr Veh Conf, 1–6.
- [18] Ho-Ta L., Tsorng-Juu L., Shih-Ming C.,(2013), “ Estimation of Battery State of Health Using Probabilistic Neural Network” , IEEE Transactions on Industrial Informatics, 9 (2), 679-685.
- [19] Hung M-H, Lin C-H, Lee L-C, Wang C-M., (2014), “ State-of-charge and state-of-health estimation for lithium-ion batteries based on dynamic impedance technique. ” J Power Sources, 268, 861–873.
- [20] Chen K., Jiang J., Zheng F., Sun B., (2016) , “SOH estimation for lithium-ion batteries: A Cointegration and Error Correction Approach” , IEEE, 978-1-5090-0382-2/16.
- [21] Urbain M., Raël S., Davat B., Desprez P., (2007), “State Estimation of a Lithium-Ion Battery Through Kalman Filter” , IEEE, 2804-2810.
- [22] Yi-Hsien C., Wu-Yang S., (2009), “Dynamical Estimation of State-of-Health of Batteries by Using Adaptive Observer. ”, 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System ,110-115,Shenzen/China , 19 December.
- [23] He Z, Gao M, Ma G, Liu Y, Chen S., (2014), “Online state-of-health estimation of lithium-ion batteries using Dynamic Bayesian Networks”. J Power Sources, 267, 576–583.
- [24] Bremer I, Ruecker F, Sauer D. U., (2016), “Investigation of Li-Ion battery state of health detection in electric vehicles A comparison of simulation results and field measurement”, 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC), Busan/ Korea, 1-4 June.
- [25] Ng K. S., Moo C. S., Chen Y. P., Hsieh Y. C., (2009), “Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries”, Applied Energy, 86 (9), 1506–1511.
- [26] Hyun-jun L., Joung-hu P., Jonghoon K., (2016), “Comparative Analysis of the SOH Estimation based on Various Resistance Parameters for LiCoO₂ Cells” 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC), Busan, Korea, 1-4 June.
- [27] Anthony B, Benjamin D, Sébastien G, Mathias G, Frédéric S, Delphine R., (2013), “A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications”, Journal of Power Sources, 241, 680-689.

- [28] Berecibar M.,Gandiaga I., Villarreal I., Omar N., Van Mierlo J., Van Den Bossche, P., (2016), “Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56 (1), 572–587.
- [29] Xuezhe.W., Bing.Z., Wei.X., (2009), “Internal Resistance Identification in Vehicle Power Lithium-ion Battery and Application in Lifetime Evaluation”, *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 388-392, Zhangjiajie, Hunan, China, April.
- [30] Daniel-Ioan S., Maciej S., Ana-Irina S., Vaclav Knap., Remus Teodorescu., Søren J. Andreasen., (2015), “Evaluation of Different Methods for Measuring the Impedance of Lithium-Ion Batteries during Ageing”, *2015 Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*,1-6, Monte-Carlo, Monaco, 31 March-2 April.
- [31] Wang X., Wei X., Dai H., (2015), “State Estimation of Lithium ion Battery Based on Electrochemical Impedance Spectroscopy with Onboard Impedance Measurement System”, *IEEE*, 978-1-4673-7637-2/15.
- [32] Cuma M. U., Koroglu T., (2015), “A comprehensive review on estimation strategies used in hybrid and battery electric vehicles”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 517–531.
- [33] Plett G. L., (2004), “Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 1. Background”, *Journal of Power Sources*, 134, 252–261.
- [34] Eddahech A., Briat O. Bertrand N., Delétage J.Y., Vinassa J.M., (2012), ” Behavior and state-of-health monitoring of Li-ion batteries using impedance spectroscopy and recurrent neural networks”, *Electrical Power and Energy Systems*, 42, 487–494.
- [35] Andre D., Nuhic A., Soczka-Guth T., Sauer D.U., (2013), “Comparative study of a structured neural network and an extended Kalman filter for state of health determination of lithium-ion batteries in hybrid electric vehicles”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26, 951–961.
- [36] Khayat N., Karami N., (2016), “Adaptive Techniques Used for Lifetime Estimation of Lithium-Ion Batteries”, *IEEE*, 98-103.
- [37] Ho-Ta L., Tsorng-Juu L., Shih-Ming C, (2013), “Estimation of Battery State of Health Using Probabilistic Neural Network”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9 (2), 679-685.
- [38] Zenati A., Desprez P., Razık H., Rael S., (2011), “A Methodology to Assess the State Of Health of Lithium-ion Batteries Based on the Battery’s Parameters and a Fuzzy Logic System”, *Electrical Vehicle Conference*, 1-6, Greenville, South Carolina USA, March.

- [39] IL- Song K., (2010), "A Technique for Estimating the State of Health of Lithium Batteries Through a Dual-Sliding-Mode Observer", IEEE Transactions on Power Electronics, 25 (4), 1013-1022.
- [40] Chiang Y., Sean W.-Y., (2009), "Dynamical Estimation of State-of-Health of Batteries by Using Adaptive Observer", 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System, 110-115, Shenzhen, China, December.
- [41] Taesic K., Qiao W., Qu L., (2013), "Online SOC and SOH Estimation for Multicell Lithium-ion Batteries Based on an Adaptive Hybrid Battery Model and Sliding-Mode Observer, IEEE, 292-298.
- [42] Xuning F., Jianqiu L., Minggao O., Languang L., Jianjun L, Xiangming H., (2013), "Using probability density function to evaluate the state of health of lithium-ion batteries", Journal of Power Sources 232, 209-218.
- [43] John W., Ping L, Jocelyn H-G, Elena S., Souren S., Mark V., Harshad T., James M., Peter F., (2011), "Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells", Journal of Power Sources 196, 3942-3948.
- [44] Junyi S., Alireza K., (2016), "Design and Real-Time Controller Implementation for a Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System", IEEE Transactions on Industrial Informatics, 1-9.

ÖZGEÇMİŞ

Hasan Celal MALKOÇ 1988 yılında Kadıköy’de doğdu. 2006 yılında başladığı Anadolu Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümünü 2011 yılında başarıyla tamamlayarak askerlik görevini gerçekleştirmek üzere orduya katıldı. 2012 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. 2012 yılından beri çeşitli şirketlerde, donanım tasarımı, teknik servis mühendisi ve saha servis mühendisi olarak çalıştıktan sonra 2016 Nisan ayından bu yana TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsünde “Yerli Elektrikli Araç Geliştirme” projesinde Batarya Yönetim Sistemi (BMS) donanım mühendisi olarak çalışmaktadır.

EKLER

Ek A: Ea,B ve z Parametrelerinin Bulunması

CX2 bataryasının Ea, B ve z parametrelerinin bulunmasını sağlayan program

```
% CX2- Cells 35,37,8 -http://www.calce.umd.edu/batteries/veri.htm
DOD = 1; % percent
NomCap = 1.35; % Ah

% CX2 35 - 0.5C Çevrim sayıları
cycle_35 = [50 137 226 288 338 399 449 515 565 633 683 751 801 851
901 957 1057 1178 1320 1370 1485];

% CX2 37 - 1C Çevrim sayıları
cycle_37 = [53 90 140 240 300 400 465 565 680 780 850 950 1020 1220
1320];

% CX2 8 - 3C Çevrim sayıları
cycle_8 = [10 83 190 220 248 305 350 393 493 593 700 825 950];

%0.5C-1C-3C Amper Saat Değerlerinin Bulunması
AH_35 = cycle_35*DOD*NomCap;
AH_37 = cycle_37*DOD*NomCap;
AH_8 = cycle_8*DOD*NomCap;

%0.5C-1C-3C Çevrim sayılarına göre Kapasite Kaybı Değerleri
CapLoss_35 = [1.88 4.88 6.49 8.71 10.22 10.96 11.82 12.96 15.33
17.18 17.55 19.54 20.42 20.81 21.34 22.74 24.59 27.25 27.71 28.88
31.11];
CapLoss_37 = [3.19 6.12 8.11 10.28 12.36 14.28 14.54 16.05 18.60
20.5 23.44 26.45 28.14 36 39.11];
CapLoss_8 = [5.47 13.74 21.48 24.07 24.29 23.03 24.59 28.08 29.62
32.65 33.03 32.96 39.31];

% CX2 35 - 0.5C'nin B-Ea ve z değerlerinin bulunması için plot
edilmesi
for i=1:length(cycle_35)
    plot(cycle_35(i),CapLoss_35(i),'.b','MarkerSize',10);
    plot_1=plot(cycle_35(i),CapLoss_35(i),'.b','MarkerSize',10);
    hold on
end
% CX2 37 - 1C'nin B-Ea ve z değerlerinin bulunması için plot
edilmesi
for i=1:length(cycle_37)
    plot(cycle_37(i),CapLoss_37(i),'k-x','MarkerSize',10);
    plot_2=plot(cycle_37(i),CapLoss_37(i),'k-x','MarkerSize',10);
    hold on
end
% CX2 8 - 3C'nin B-Ea ve z değerlerinin bulunması için plot edilmesi
for i=1:length(cycle_8)
    plot(cycle_8(i),CapLoss_8(i),'r-o','MarkerSize',10);
    plot_3=plot(cycle_8(i),CapLoss_8(i),'r-o','MarkerSize',10);
    hold on
```

```

end
legend_g=[plot_1; plot_2;plot_3];
legend(legend_g, '0.5C', '1C', '3C');

% cftool curve fit özelliğinin kullanılması sonucu uyarlanan eğrinin
parametreleri
% curve fit parameters
%  $a \cdot \exp(-b) \cdot (x^{0.67})^c$   $a = 1.283$ ,  $b = 0.8214$ ,  $c = 0.57 \rightarrow B = 1.283$ ,
Ea =2021 ,z=0.57 (35 için)
%  $a \cdot \exp(-b) \cdot (x^{1.35})^c$   $a = 1.02$  ,  $b = 0.8214$ ,  $c = 0.57 \rightarrow B = 1.02$  ,
Ea =2021 ,z=0.57 (37 için)
%  $a \cdot \exp(-b) \cdot (x^{4.05})^c$   $a = 0.869$ ,  $b = 0.8214$ ,  $c = 0.57 \rightarrow B = 0.869$ ,
Ea =2021 ,z=0.57 (8 için)

```

Ek B: SOH Analizi Programı

CX2 batarya 0.5C şarj-deşarj çevrimine ait SOH bulma programı

```

DOD = 1; % percent
NomCap = 1.35; % Ah

%Örneklenen Çevrim Sayıları
cycle_35 = [50 137 226 288 338 399 449 515 565 633 683 751 801 851
901 957 1057 1178 1320 1370 1485];

%Çevrimlerin Süreleri
sure_35=[16556 16224 15876 15837 15674 15705 15395 15318 15214 15167
14883 14819 14610 14523 14480 14506 14126 14003 13929 13765 13162];

%Amper-Saat Hesabı
AH_35 = cycle_35*DOD*NomCap;

%Örneklenen Q loss Değerleri
CapLoss_35 = [1.88 4.88 6.49 8.71 10.22 10.96 11.82 12.96 15.33
17.18 17.55 16.54 20.42 20.81 21.34 22.74 24.59 27.25 27.71 28.88
31.11];

%Bulunan Qloss eğrisi Parametreleri
Ibr1 = 0.5;
B1 = 1.283;
Ea1 = 2021;
z = 0.57;
R = 8.314;
T1 = 296;

%Saniye başına Yaşlanmanın Bulunması
deltaSOH_rate_1 = ((Ibr1*NomCap)*(B1*exp(-
Ea1/(R*T1)))^(1/z))/(3600*20^(1/z));

%Deneysel SOH Verilerinin Bulunması
soh_1_qloss=100-CapLoss_35;
for i=1:length(cycle_35)
figure(1);
plot(cycle_35(i),soh_1_qloss(i), 'r-o', 'MarkerSize',10);

```

```

        plot_1=plot(cycle_35(i),soh_1_qloss(i),'r-o','MarkerSize',10);
        hold on
    end

    %Benzetim Olarak SOH Verilerinin Bulunması
    for i=1:length(cycle_35)
        soh_1(i)=deltaSOH_rate_1*cycle_35(i)*sure_35(i)*5;
        soh_2(i)=100-soh_1(i);
        plot(cycle_35(i), soh_2(i), 'k-x', 'MarkerSize',10);
        plot_2= plot(cycle_35(i), soh_2(i), 'k-x', 'MarkerSize',10);
        hold on
    end
    legend_g=[plot_1; plot_2];
    legend(legend_g, '0.5C DeneyiselVeri', '0.5C Benzetim');

    %Deneyisel SOH Verileriyle Benzetim Verileri Arasındaki Farkın
    Bulunması
    for i=1:length(cycle_35)
        figure(2);
        hata(i)=soh_1_qloss(i)- soh_2(i);
        plot(cycle_35(i),hata(i), 'r-o', 'MarkerSize',10);
        hold on
    end
end

```