

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ AKILLI ŞEBEKELER KAPSAMINDA
DEPOLAMA ÜNİTESİ OLARAK YENİDEN DEĞERLENDİRİLMESİ**

SAİD MİRZA TERCAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. ERDİN GÖKALP**

İSTANBUL, 2015

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ AKILLI ŞEBEKELER KAPSAMINDA
DEPOLAMA ÜNİTESİ OLARAK YENİDEN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Said Mirza TERCAN tarafından hazırlanan tez çalışması 09.06.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Erdin GÖKALP
Yıldız Teknik Üniversitesi

Eş Danışman

Doç. Dr. Bülent VURAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Erdin GÖKALP
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Celal KOCATEPE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hakan ÜNDİL
İstanbul Üniversitesi

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün 2014-04-02-YL02 numaralı projesiyle ve TÜBİTAK 2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı'nın 1649B021311727 başvuru numarası ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Dünyamız hızla teknolojinin ilerlemesiyle değişmektedir. İnsanlığın sorunlarına bugüne kadar verilmiş cevaplar yeterli olmamaktadır. Artık eski sorulara yeni cevaplar verilmelidir. Bu bağlamda elektrik mühendisliği alanında edindiğim bilgi birikimimi yüksek lisans tez çalışmamda mevcut şebekelerin akıllı hale getirilmesinde bir adım olacak enerji depolama konusunu araştırdım. Temennim odur ki bu çalışmam başta ülkem olmaz üzere tüm insanlığa faydalı olur.

Bu tezin fikrini veren Prof. Dr. Mehmet Uzunoğlu'na, yaptığı motive edici yardımlarından ötürü tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Erdin GÖKALP'e, akademik bilgi birikimini yapıcı bir üslup ile benimle paylaşan ve sıkıştığım yerde destek olan Doç. Dr. Bülent VURAL'a ve aynı odayı paylaştığım değerli akademisyen Dr. Bünyamin YAĞCITEKİN'e ve aileme en samimi teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2015

Said Mirza TERCAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	3
BÖLÜM 2	
ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARI VE İKİNCİ KULLANIM.....	5
2.1 Bataryalar Hakkında Bilgiler	5
2.2 İkinci Kullanım Hakkında Bazı Bilgiler	7
2.3 EA Bataryaların İkinci Kullanıma Hazırlanması	8
2.4 Bataryalarının İkinci Kullanım Alanları	8
2.5 Bataryalarda Verim	10
2.5.1 Coulomb Verimi (Ah).....	11
2.5.2 Enerji Verimi (Wh).....	12
2.6 Bataryalarda Yaşlanma	14
2.6.1 Elektrokimyasal Yaşlanma.....	15
2.6.1.1 Anotta Yaşlanma	15
2.6.1.2 Katotta Yaşlanma	16
2.6.2 Yaşlanma Olayının Sonuçları	16
2.6.3 Yaşlanmanın Kökeni	16
2.6.4 Rafta Yaşlanma.....	17
2.6.5 Çevrimde Yaşlanma.....	17
2.7 EA Bataryalarının İkinci Kullanımında Önemli Parametreler	18
2.8 Sağlamlık Durumu (State of health, SoH) Hesabı ve Tahmini.....	18

2.8.1	Doğrudan Şarj Deşarj ile SoH Tahmini	20
2.8.2	Deşarj Gerilim Eğrilerinin Eğimleri Yaklaşımı	21
BÖLÜM 3		
BATARYA MODELİ VE İKİNCİ KULLANIM		23
3.1	Mevcut Lityum Batarya Modelleri ve Karşılaştırmaları	23
3.2	İkinci Kullanım İçin Tasarlanan Batarya Modeli	25
3.2.1	İkinci Kullanım İçin Modelin Oluşturulması	28
3.2.2	Modelin Gerçek Veriler ile Doğrulanması	28
3.3	Örnek Olaylar	29
3.3.1	Bataryaların Evde Pik Yükte Kullanımı	30
3.4	Batarya Paketinin Şarj/Deşarj Test Sonuçları	34
3.4.1	Deşarj Testleri Sonuçları	34
3.4.1.1	Sabit Akım (CC) Deşarj Testleri.....	34
3.4.1.2	Sabit Olmayan Akım ile Yapılan Deşarjlar	39
3.4.1.3	Sabit Güç (CP) Deşarj:.....	41
3.4.1.4	Sabit Direnç (CR) Deşarj:	42
3.4.2	Şarj Testleri Sonuçları.....	44
BÖLÜM 4		
SONUÇ VE ÖNERİLER		47
KAYNAKLAR		48
EK – A		
BATARYA MODELİNİN MATLAB KODLARI		51
EK – B		
BATARYA TEKNİK ÖZELLİKLERİ		53
ÖZGEÇMİŞ		55

SİMGE LİSTESİ

C	Kapasite [Ah]
W	Enerji [Wh, kWh]
E	olay sayısı
Ea	aktivasyon sabiti
I	akım [A]
i	olay sayısı
KK	Kapasite kaybı
ks	model sabitleri
N	Çevrim sayısı
P	Güç [kW]
t	zaman [s, h]
T	sıcaklık
TKK	Toplam kapasite kaybı
V	Gerilim [V]
ΔDoD	Batarya deşarj derinliği
ΔSoC	Deşarj/şarj esnasında

Alt indis

çevrim	çalışma esnasında yaşlanma
dş	deşarj
raf	rafta yaşlanması
ref	referans değeri
ş	şarj

KISALTMA LİSTESİ

AŞ	Akıllı Şebeke
BMS	Batarya Yönetim Sistemi
CC	Sabit Akım (Constant Current)
CES	Ortak Enerji Depolama Birimi (Community Energy Storage)
CP	Sabit Güç (Constant Power)
CR	Sabit Direnç (Constant Resistance)
CV	Sabit Gerilim (Constant Voltage)
DoD	Deşarj Derinliği
EA	Elektrikli Araç
EDS	Enerji Depolama Sistemleri
EOL	Ömür Sonu (End of Life)
HEA	Hibrit Elektrikli Araç
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LCO	Lityum Kobalt Oksit
LFP	Lityum Demir Fosfat
LMO	Lityum Mangan Oksit
OCV	Açık Devre Gerilimi (Open Circuit Voltage)
PV	Güneş Paneli (PhotoVoltaik)
SAE	Society of Automotive Engineers
SEI	Katı Elektrolit Arayüzü (Solid Electrolyte Interface)
SoC	Batarya Şarj Durumu
SoH	Batarya Sağlamlık Durumu
ŞHEA	Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araç
TEA	Tam Elektrikli Araç
TY	Toplam Yaşlanma
USABC	Birleşik Devletler Gelişmiş Batarya Konseyi
YEK	Yenilenebilir Enerji Kaynakları

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Deşarj esnasında lityum batarya modeli.....	5
Şekil 2. 2 YEK ile batarya bağlantı şeması	10
Şekil 2. 3 Paketin 4A CC deşarj gerilim eğrisi	13
Şekil 2. 4 LFP batarya modelinin sabit 10A deşarj gerilim eğrileri	21
Şekil 2. 5 LCO batarya modeli sabit 1,18 A akımla deşarj eğrileri	22
Şekil 3. 1 Lityum polimer batarya modeli deşarj gerilim eğrisi	23
Şekil 3. 2 Lityum polimer batarya eşdeğer devresi [36]	24
Şekil 3. 3 LFP kapasite kayıplı batarya modelinin deşarj gerilimi.....	24
Şekil 3. 4 Test düzeneğinin durumu	25
Şekil 3. 5 LFP için ampersaate bağlı yaşlanmayı içeren eşdeğer devre.....	26
Şekil 3. 6 Yük bankasıyla deşarj testi (Chroma 18A)	27
Şekil 3. 7 Yük bankasıyla Batarya şarj/deşarj test düzeneği (Prodigit 54A)	27
Şekil 3. 8 Batarya modelin Simulink ekran görüntüsü	28
Şekil 3. 9 LFP modelinde bataryanın gerçek SoH değerine göre deşarj eğrisi	29
Şekil 3. 10 Batarya şarj deşarj test sistemi şeması	30
Şekil 3. 11 Batarya yönetim sistemi (BMS) görüntüsü	31
Şekil 3. 12 Batarya paketinde kullanılan BMS	32
Şekil 3. 13 Şebekeden çekilen güç miktarı	32
Şekil 3. 14 Batarya paketindeki hücre başına düşen akım	33
Şekil 3. 15 Bir günlük çalışmada SoC değişimi	33
Şekil 3. 16 Batarya SoH grafiği.....	34
Şekil 3. 17 Deşarj test düzeneğinden veri toplamada kullanılan devre	35
Şekil 3. 18 Batarya paketinin 10A CC deşarj akım grafiği	35
Şekil 3. 19 10A CC deşarj eğrileri	36
Şekil 3. 20 10A CC deşarj eğrileri	36
Şekil 3. 21 2,5A CC deşarj eğrileri	37
Şekil 3. 22 4A CC deşarj eğrileri	37
Şekil 3. 23 5,5A CC deşarj eğrileri	38
Şekil 3. 24 Sabit 13 A deşarj eğrileri	38
Şekil 3. 25 Sabit 13A deşarj testi (kapasite için referans)	39
Şekil 3. 26 Akımdaki ani değişikliklerin gerilime etkisi	40
Şekil 3. 27 Akımdaki ani değişikliklerin gerilime etkisi	40
Şekil 3. 28 Açık devre geriliminin yük altında değişimi	41
Şekil 3. 29 Programlanabilir yük bankası.....	41

Şekil 3. 30	Sabit güç (CP:224W)deşarj eğrileri.....	42
Şekil 3. 31	Sabit güç eğrisi	42
Şekil 3. 32	Sabit direnç (CR)deşarj direnç eğrisi	43
Şekil 3. 33	Sabit direnç (CR)deşarj eğrileri.....	43
Şekil 3. 34	Sabit direnç (3 Ω)deşarj eğrileri	43
Şekil 3. 35	Şarj cihazıyla şarj eğrileri CC: 12A	44
Şekil 3. 36	Şarj cihazıyla şarj eğrileri CC: 12A	44
Şekil 3. 37	Güç kaynağı ile şarj CC:5A	45
Şekil 3. 38	Güç kaynağı ile şarj CC:4A	45
Şekil 3. 39	Güç kaynağı ile şarj CC:3,5A	46

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1. 1 Bataryaların EA’da ve evsel yüklerde kullanımının karşılaştırılması.....	4
Çizelge 2. 1 Ticari lityum şarj edilebilir batarya özellikleri.....	6
Çizelge 2. 2 Batarya teknolojileri ve EA’larda kullanımı	6
Çizelge 2. 3 EA şarj seviyeleri	7
Çizelge 2. 4 Bazı EA’ların satış miktarları ve batarya boyutları.....	8
Çizelge 2. 5 Rüzgârın batarya ile kullanılabilir hale gelen kısmı [6]	10
Çizelge 2. 6 Coulomb verimi hesaplaması için şarj ve deşarj deney sonuçları	11
Çizelge 2. 7 Bataryanın tam şarj ve deşarj deney sonuçları	13
Çizelge 2. 8 Bataryanın dinlendirilerek tam şarj ve deşarj sonuçları.....	14
Çizelge 3. 1 Tüketim miktarları ve enerji maliyeti	30
Çizelge 3. 2 Batarya paketi özellikleri	31
Çizelge 3. 3 Paketteki hücre bilgileri	31
Çizelge 3. 4 Bataryadan karşılanan enerji ve tasarruf miktarı	34
Çizelge 3. 5 Sabit akım (CC) deşarj değerleri karşılaştırması	39

**ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ AKILLI ŞEBEKELER KAPSAMINDA
DEPOLAMA ÜNİTESİ OLARAK YENİDEN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Said Mirza TERCAN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Erdin GÖKALP

Eş Danışman: Doç. Dr. Bülent VURAL

Gün geçtikçe artan enerji ihtiyacını daha temiz ve verimli bir şekilde karşılamak için ülkemizde ve dünyada yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu amaçla rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları, enerji üretiminde önemli yeni alternatifler olmuştur. Bunun yanında zararlı sera gazı salınımına sebep olan ulaşım sektöründe, sıfır salımlı ve yüksek verimli elektrikli araçların (EA) kullanılması bir çözüm olarak düşünülmektedir. Büyük boyutta bataryalara sahip olan EA'lar, rüzgâr ve güneş gibi sürekli olmayan enerji kaynaklarının kullanım olanağını arttırabileceği gibi bu kaynakların şebekeye bağlanmasında yaşanan problemlerinin de ortadan kaldırılmasına destek olabilecektir. Bununla birlikte batarya fiyatlarının yüksek oluşundan ötürü EA'lar gerektiği kadar yaygınlaşamamaktadırlar. EA bataryalarının ikincil kullanım ile değerlendirilmesi bu iki soruna aynı anda çözüm sunan bir uygulama olacaktır. Bu sayede batarya fiyatları azalacağı gibi YEK üretimini dengeleyebilecek ucuz enerji depolama üniteleri ortaya çıkacaktır. Batarya üreticileri, kullanıcılar ve Birleşik Devletler-ABD gelişmiş batarya birliği (USABC) bataryanın EA için yeterli menzil ve hızlanma sağlayamadığında araçtan söküleceği ve başlangıçtaki kapasitesinin yaklaşık %80 civarında enerji depolama kapasitesinin kalacağını öngörmüşlerdir. Şu anki EA satışlarına bakıldığında yüksek

miktarda bataryanın önümüzdeki yıllar içinde araçlardan çıkacağı ifade edilebilir. EA bataryalarının ikincil kullanımı son yıllarda önemli çalışma konularından biridir. İkinci kullanımda farklı alanlar için bataryaların yaşlanması, batarya performansı, enerji maliyetine etkileri gibi konularda araştırmalar devam etmektedir. Ancak bahsi geçen konular üzerine yeterince çalışma yapılmamıştır. Bu tez kapsamında kapasitesi yaklaşık %10 azalmış bir test bataryası temin edilmiş evsel yükler için ikinci kullanımda bataryanın yaşlanması, performansı, enerji maliyeti tez çalışmaları süresince izlenmiş ve sonuçlar değerlendirilerek analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji depolama, ikinci kullanım, elektrikli araçlar, lityum iyon, elektrikli araç bataryaları

**REUSING ELECTRIC VEHICLE BATTERIES IN STORAGE UNITS FOR SMART
GRID CONCEPT**

Said Mirza TERCAN

Department of Electrical Engineering
MSc. Thesis

Adviser: Asst. Prof. Erdin GÖKALP
Co-Adviser: Assoc. Prof. Bülent VURAL

Many studies have been conducted in our country and in the world to overcome gradually increasing energy demand. Cleaner energy production and lower emission has taken into account. Renewable energy resources (RER) like wind, sun which has no limit and no negative impact on environment has been good alternative in energy production. Moreover, electric vehicle (EV), which is higher efficient and less emission, is also good solution considering big contribution of emission caused by transportation. However, RER integration takes long time because its intermittent nature makes connection difficult. Additionally, EVs are not getting popularity as expected because of high battery price. Reusing discarded EV batteries is offered to solve two problems at the same time. Accordingly, reusing batteries of EVs have provided cheap energy storage units in order to stabilize RER production. Battery producers, users and USABC have agreed on the residual capacity of vehicle batteries is around 80% when discarded from the EVs because of insufficient capacity for range. In near future, there will be many second life EV batteries according to present EV sales. Second use of EV batteries has been important issue for more than years. Many studies are continued to test the second life of EV batteries for battery degradation, performance, impacts on energy costs. In this project, performance and degradation of approximately 10% degraded EV test battery and its impacts on energy costs are monitored during the project when feeding a house loads which is integrated with RER. Second life electric vehicle batteries (2LEVb), which are discarded from vehicle after their capacity decreases to 80%, are no longer to serve

mobility. However, they can still have much more energy capacity and 2LEVb can be an alternative energy storage solution. In this study, 2LEVb are used to support residential energy demands. Thus, 2LEVb are used specific time in a day for optimizing energy consumption considering power curve and cost of energy. Such as 2LEVb is charged during off-peak tariff, and discharged in peak time. The obtained result of this study shows that 35% daily energy consumption of residential house is supported by 2LEVb, which decrease 28% of the energy bill. Besides, degradation of 2LEVb for seven years is 1%. Proposed study realized with MatLab&Simulink environment.

Keywords: Electric vehicle battery, capacity fading, lithium-ion, electric vehicle, energy storage, second use.

1.1 Literatür Özeti

Enerjinin temiz üretilmesine uluslararası seviyede büyük önem verilmektedir. Yenilenebilir kaynaklar depolamaya ihtiyaç duymaktadır. Yaygınlaşan elektrikli araçlarda (EA'larda) büyük bataryalar kullanılmaktadır.

Yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip oldukları için lityum iyon bataryalar [1] EA'larda yaygın olarak kullanılmaktadır. Lityum bataryalar kapasite kayıplarından ötürü EA kullanıcılarının hızlanma ve menzil beklentilerini karşılamayacak duruma geldiklerinde araçtan sökülecektir. Başka bir deyişle aracın hızlanma süresi uzar ve tek şarj ile gidilebilen mesafe kullanıcının isteğini karşılamaz hale gelir. Amerika Birleşik devletleri gelişmiş batarya birliği (USABC) ve batarya üreticileri araç bataryalarının kapasitelerinin başlangıç değerinin %80'ine düştüğünde kullanıcının isteğine yeterli olmadığını belirtmektedirler [2], [3]. Bataryaların EA'da öngörülen ilk kullanım süresi 5-8 yıl olarak ifade edilmiştir [4]. EA'da kullanılamayan lityum bataryalar geri dönüşüme gitmeden daha düşük güç ve enerji talebine cevap verebilecek araç (golf arabası, tekerlekli sandalye, elektrikli motosiklet, vb.) veya uygulamalarda (yerel depolama üniteleri, vb.) değerlendirilebilir. Araçta kullanılamaz hale gelen bataryaların EA sonrası ikinci kullanım için uygun şekilde paketlenerek kullanılmasında birçok faydanın elde edilebileceğini yapılan çalışmalar göstermiştir. Başlıca kullanım alanları şunlardır: 1. Bölgesel üretim-tüketim dengeleme, 2. Güç kalitesi ve güvenilirliğini sağlama, 3. İletim ve dağıtım yenilemeleri erteleme.

Son yıllardan EA bataryalarının ömürlerinin uzatılması amacıyla ikinci kullanımları üzerine bazı çalışmalar yapılmaktadır. Şebekeden uzak, otoyolda güneş enerjisi kullanarak EA şarj istasyonu kurulmuş ve bu istasyonda EA'dan çıkan bataryalar kullanılmıştır. Sonuç olarak 5 yıllık çalışma göze alındığında yeni batarya kullanımına göre %50 daha az maliyetin yeterli olduğu görülmüştür [5]. Rüzgâr türbinleri enerji talebi olmadığında üretimleri değerlendirilememektedir. Temel üretimi rüzgâr tabanlı olan bir hibrit enerji santrali EA'dan çıkan bataryalar ile desteklenerek değerlendirilemeyen rüzgâr enerjisinin yıllık %26'sını kullanma imkânı doğurmuştur [6]. Burada yeni bataryalar ile çalışma şartları arasında bir fark görülmemiştir. Bir başka yeni araştırmanın ışığında EA'dan çıkan bataryaların ikinci kullanımı ile CO₂ salınımını azaltmak da mümkün görülmektedir. Bu bataryaların enerji talebinin az olduğu zaman diliminde şarj edilmesi ve sadece pik zamanlarda deşarj edilmesi suretiyle %56 CO₂ salınımını azaltmıştır [7]. Benzer olarak, yıllık tüketimleri GWh mertebesinde olan ticari binalarda EA'dan çıkan bataryaların ikinci kullanımı enerji masraflarının azaltılmasında yardımcı olduğu görülmüştür [8]. Bunlara ek olarak EA'dan çıkan bataryaların ikinci kullanımı ile EA fiyatlarının azalacağı da öngörülmüştür [4], [9]. Akıllı şebekelerde olduğu gibi günümüz şebekelerinde de enerji depolama ihtiyacı EA'dan çıkan bataryaların ikinci kullanımı ile daha ucuza karşılanabilecektir [10]. YEK enerji üretiminin hem verimini, hem de kazancını artırmak için EDS'ye ihtiyaç vardır [11]. EA'dan çıkan bataryaları, ikinci kullanımı alınmaları ile gelecek 10 yıl içerisinde ucuz depolama ihtiyacına cevap verecek en belirgin adaydır. Bununla ilgili SAE'nin (Society of Automotive Engineers) bir raporunda [12] PV panellerle elektrik üretiminin evsel tüketimden fazla olduğu zamanlarda depolayarak ve güneşin olmadığı akşam pik süresinde depolanan enerjiyi kullanarak kış aylarında toplam 50 \$/ay dolar tasarruf sağlanmıştır. Evsel tüketicilerde EA'dan çıkan bataryaların ikinci kullanımı ile sağlanacak faydalar incelenmeye devam etmektedir [13], [14], [15], [16], [17]. EA'dan çıkan bataryaların ikinci kullanımı ile ilgili farklı bir takım çalışmalar yapılmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Elektrik enerjisi insan hayatında vazgeçilmez olmuştur. Enerji ihtiyacını karşılamak için enerji üretiminin artırılmasının yanı sıra enerji tüketiminde verimin de artırılması

gerekmektedir. Bu amaçla geleneksel elektrik enerjisi şebekeleri akıllı şebekelere (AŞ) dönüştürülmektedir. AŞ'ler sayesinde enerji üreticileri ile tüketiciler birbirleriyle ortak hareket edebilecektir. Şebekede üretici ile tüketicinin haberleşmesinin yanı sıra enerji üretimine destek olacak sistemler de devreye girebilecektir. Yenilenebilir enerji kaynakları (YEK), enerji depolama sistemleri (EDS) ve elektrikli araçlar (EA) AŞ'lerin başlıca unsurlarıdır. YEK mevcut enerji üretimine destek olmanın yanında CO₂ salınımının azalmasına da büyük ölçüde yardımcı olmaktadır. EDS doğal kaynakların üretimini düzenleyerek yaygınlaşmasına yardımcı olmaktadır. Ulaşım araçlarının CO₂ salınımındaki büyük payının azaltılmasının yanında EA'lar enerjinin daha verimli kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bu üç aktörün sürdürülebilir bir şekilde çalışması için akıllı şebekelere ihtiyaç duyulmaktadır.

1.3 Hipotez

Mevcut elektrik şebekesinden akıllı şebekelere geçişte YEK, EA ve EDS'nin birlikte güvenilir ve kararlı bir şekilde çalışmaları gerekmektedir. YEK'in üretiminin kontrol edilmesinde ve EA'da EDS'ler depolanan enerji kaynağı olarak yer almaktadır. EDS teknolojilerinin gerek verimlerinin artırılması ve gerekse birim fiyatlarının düşürülmesi için yapılan araştırmalara EDS'lerin ikinci kullanımları da eklenmiştir. Bu tez EA bataryalarının ikinci kullanımları hakkında incelemeleri içermektedir. Bataryalar EA'da belirli bir süre çalıştıktan sonra yaşlanmaları sebebiyle enerji depolama kapasiteleri azalmaktadır. Bu sebeple EA kullanıcıları ve/veya üreticileri bu bataryaları yenileriyle değiştirmektedirler. Ancak sökülen bu bataryaların enerji depolama kapasiteleri ilk güne göre yaklaşık %20 azaldığı tespit edilmiştir [18]. Bu tezde enerji depolama kapasiteleri azalmış EA bataryalarının AŞ kapsamında depolama ünitesi olarak değerlendirilebilirliği incelenecektir. İkinci kullanıma girecek bu bataryalar ile AŞ kapsamında düşük maliyetli enerji depolama üniteleri ortaya çıkacaktır. Bu çalışma ile ülkemizde ve dünyada;

- Düşük maliyetli enerji depolama üniteleri oluşturmak,
- YEK depolama ünitelerini destekleyerek yaygınlaştırmak,
- Bataryaya ikinci kullanım ile değer katarak EA fiyatlarının azalması amaçlanmıştır.

Bu amaçlara ulaşıldığında beklenen olumlu sonuçlar şöyle sıralanabilir:

- CO₂ salınımının azalması
- Enerji verimliliğinin artırılması
- Kullanılabilir malzemelerin geri dönüşüme gitmeden değerlendirilmesi
- EDS'nin maliyetlerinin azalmasıyla yaygınlaşması
- EA kullanımının yaygınlaşması

Bugüne kadar EA bataryalarının ikinci kullanımında uygulamaya yönelik aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır.

1. PV panellerle birlikte bağımsız şarj istasyonu için kullanımı [5]
2. Rüzgâr enerjisinin kullanılmayan kısmının depolanması [6]
3. Şebekeden bağımsız EA şarj istasyonları [19]
4. Dağıtım şebekesinde yük ve frekans dengeleme [20]

Bu tezde ise AŞ kapsamında EA bataryalarının ikinci kullanımı evsel yüklerin gündüz ve gece pik yüklenme zamanlarında şebekeye destek olacak şekilde kullanımı incelenecektir. Bu çalışma şartlarında bataryaların yaşlanmaları dikkate alınarak verimli çalışma ömürleri hakkında veri elde edilecektir.

Bataryaların EA'da ve evsel yüklerde kullanıldığında farklı zorlanmalara maruz kaldıkları dikkate alınmalıdır. Evsel koşullar bataryaların yapılarına EA kullanımına kıyasla daha az bozucu etki yapacağı çizelge 1.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. 1 Bataryaların EA'da ve evsel yüklerde kullanımının karşılaştırılması

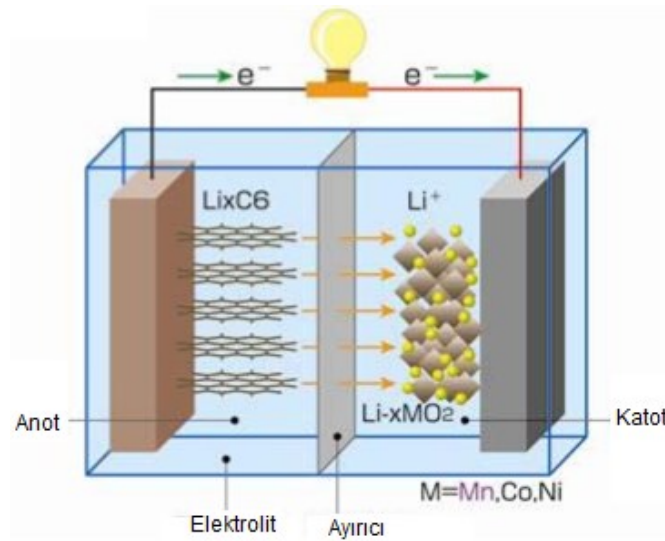
Batarya	Elektrikli araçta	Yerel depolamada
Talep süresi	Kısa	Uzun
Ani talep gücü	Yüksek	Düşük
Talebin zamanla değişimi	Çok	Az
Şarj süresi kısıtlaması	Var	Yok
Şarj/Deşarj derinliği kontrolü	Zor	Kolay
Ortam şartlarının kontrolü	Zor	Kolay

Buna göre EA bataryaları evsel yükleri beslerken hem daha verimli, hem de daha uzun süre hizmet verebileceği öngörülmüştür [21].

ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARI VE İKİNCİ KULLANIM

2.1 Bataryalar Hakkında Bilgiler

Bataryalar elektrolit içinde bulunan iki elektrot ve bu elektrotlar arasında elektron taşıyan bir aktif madde ve ayırıcıdan oluşur. Pozitif elektrot (katot) deşarj esnasında lityum iyonunun toplandığı yerdir ve lityum metal oksit yapıdadır. Negatif elektrot (anot), şarj esnasında lityum iyonunun toplandığı yerdir ve grafit (karbon) yapısındadır. Lityum tuzlarından ve organik çözücünden oluşan elektrolit ise lityum iyonunun anot ve katot arasında geçişi sağlayan bir yapıdır. İyonların elektrotlar arasında geçişi ayırıcının üzerindeki delikler üzerinden gerçekleşir. Ayırıcı elektrotların kısa devre olmasına engel olan bir görev yapmaktadır. Çizelge 2. 1’de lityum bataryalar ve genel özellikleri verilmiştir.



Şekil 2. 1 Deşarj esnasında lityum batarya modeli

Çizelge 2. 1 Ticari lityum şarj edilebilir batarya özellikleri

Batarya türü	Hücre gerilimi [V]		Enerji Yoğunluğu [Wh/kg]	Çevrim Ömrü [çevrim]	Üretici
	Max	Anma			
NCA (Nikel, Kobalt, Alüminyum)	4,20	3,60	160	500-1000	JCI/Saft, PEVE, AESC
LCO Lityum kobalt oksit	4,20	3,60	150-190	500-1000	Sony, Sanyo, GS Yuasa, LG Chem Samsung Hitachi, Toshiba
LMO (Lityum Mangan Oksit)	4,20	3,80	100-135	500-1000	Hitachi, Samsung, Sanyo, GS Yuasa, LG Chem, Toshiba, AESC
NMC (Nikel Mangan Kobalt)	4,20	3,6 / 3,7	140-180	1000-2000	Sony, Sanyo, LG Chem, GS Yuasa, Hitachi Samsung
LFP (Lityum demir fosfat)	3,60	3,30	90-120	1000-2000	A123, Valence, GS Yuasa, BYD, JCI/Saft, Lishen

Lityum bataryalar birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bunlardan başlında dizüstü bilgisayarlar ve cep telefonları gelmektedir. Ancak taşınabilir elektronik cihazlarda LCO ve lityum polimer bataryalar kullanılırken, EA'larda yaygın şekilde lityum demir fosfat (LFP) bataryalar kullanılmaktadır. Bunun başlıca sebebi batarya hücrelerinden çekilebilecek akımın diğer lityum hücrelere göre daha fazla olmasıdır. Günümüzde EA üretiminde kullanılan batarya teknolojileri çizelge 2. 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. 2 Batarya teknolojileri ve EA'larda kullanımı

	NiMH	NiZn	Zebra NaNiCl	LCO	LMO	LFP	Lityum Polimer
EA'larda Kullanımı	HEA	HEA	TEA, HEA, ŞEA	-	TEA, HEA, ŞEA	TEA, HEA, ŞEA	TEA, HEA, ŞEA
Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	60-120	60	90-120	150-190	100-135	90-120	130-225
Çevrim Ömrü	300-500	200-500	1000	300-500	300-600	>1000	>1000
Hızlı Şarj Süresi (Saat)	2-4	1	1	1,5-3	<1	<1	<1
Aşırı Şarj Dayanımı	Düşük	-	-	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük
Özboşalım/Ay	30%	20%	0%	<10%	<10%	<10%	5%
Hücre Gerilimi (V)	1,25	1,7	2,58	4,2	3,8	3,3	3,7
En İyi Yük Akımı (Tepe Değeri)	0.5C (5C)	-	-	<1C (<3C)	10C (>30C)	10C (>30C)	1C (10C)
Çalışma Sıcaklığı (°C)	-20-60	-20-60	270-350	-20-60	-20-60	-20-60	-20-60
Bakım Gereksinimi	60-90 gün	-	-	-	-	-	-
Fiyat (\$/kWh)	~600	~300	-	>1000	>1000	>1000	>1000

EA şarj çeşitleri batarya seçiminde dikkate alınacak bir parametredir. Günümüzde kullanılan EA şarj seviyeleri çizelge 2. 3'de verilmiştir.

Çizelge 2. 3 EA şarj seviyeleri

EA şarj seviyeleri	Gerilim	Akım	Güç	AC-DC çevirici verimi
Seviye 1	120 V	15 A	1,5 kW	%85
Seviye 2	240 V	32 A	6,5 kW	
Seviye 3	480 V	123 A	50 kW	

2.2 İkinci Kullanım Hakkında Bazı Bilgiler

EA'dan sökülen bataryaların ikinci kullanımı, ortalama 2000 çevrimlik ilk kullanımın ardından yaklaşık 1500 çevrimlik daha kullanılması olarak ifade edilebilir. Üreticilerin sağladığı bilgiler dikkate alınarak EA'dan bataryaların başlangıç kapasitesinin %80'ine kadar yaşlandığında, yani SoH < %80 olduğunda, sökülerek ikinci kullanıma gireceği ifade edilmektedir. Bataryanın SoH değeri %60 olduğunda ikinci kullanım ömrü de bitmiş olur. Yeteri kadar enerjisi depolayamamanın yanında yük altındaki gerilim düşümü artık bataryayı kullanılmaz hale getirmiştir.

Yerel depolama ünitesi olarak ikinci kullanımda, EA'da kullanımda bataryaların verim hesabında bataryanın kendi ağırlığı hesaba katılırken ikinci kullanımda yerel depolama ünitesi olduğunda bataryanın kendi ağırlığı verimi etkilememektedir.

Bataryaların kullanım dilimleri kapasite azalmasına bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [22]:

1. İlk kullanım (EA'da kullanım): SoH %100
2. İkinci kullanım (paket ayrılmadan kullanım): SOH %80
3. İkinci kullanım (hücre bazın yeniden paketleyerek): SOH %70
4. Geri dönüşüm (kullanılmış parçaların yeni ürünlere katılması): SOH %50

Görüldüğü gibi ikinci kullanım olarak yaklaşık SoH %80-%50 arasında bir kullanımı içermektedir. EA'dan sökülecek bataryaların ikinci kullanıma girmesi ile elde edilecek enerji depolama kapasitesi yaklaşık olarak hesaplanmış ve çizelge 2. 4'te verilmiştir. Burada tam elektrikli araç (TEA) olan Nissan Leaf en yüksek kapasite değerine sahipken şarj edilebilir hibrit elektrik araç (ŞHEA) olan Volt daha düşük kapasite değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu değerler dikkate alınarak 2012 yılında satılmış 3 farklı tür EA'nın 8 yıl sonunda SoH değerlerinin %80'e indikleri zaman toplam kullanılabilir EDS kapasitesi yaklaşık 1,7 GWh olduğu görülmektedir.

Çizelge 2. 4 Bazı EA'ların satış miktarları ve batarya boyutları

	Toyota Prius (HEA)	Chevrolet Volt (ŞHEA)	Nissan Leaf (TEA)
Batarya Kapasitesi [kWh]	5,2	16	24
Birincil kullanım sonunda kalan kapasite (%80) [kWh]	4,2	12,8	19,2
2012 satışı	147507	23461	46000
2012 oranı	%34	%0,05	%0,10
2019 ikinci kullanıma giren bataryaların toplam kapasitesi	620 MWh	300 MWh	800 MWh

2.3 EA Bataryaların İkinci Kullanıma Hazırlanması

EA bataryaları ikinci kullanım için araçtan söküldükten sonra gerek paket olarak ve gerekse hücreler tekrar paketlenerek ikinci kullanıma girmektedir.

İkinci kullanım için batarya EA'dan çıkarıldıktan sonra modüllerine ayrılmalıdır. Modüllerin SoH değerleri tespit edilmelidir. Buna göre modüller gruplandırılır. Bu şekilde kapasite değeri tespit edilmiş modüllerden yeni bir paket oluşturulur ve ikinci kullanıma girmek üzere fiyatlandırılır. Bu fiyata EA'dan sökülen batarya paketindeki hücrelerin çıkarılması, onarılması, modüllerine ayrılması, ölçümler ve tekrar paketleme dâhil edilir. Bu fiyatın ilgili kullanım alanı için yeni batarya fiyatından düşük olması beklenmektedir.

Birincil kullanıma şartlarına bağlı olarak bataryalar ikinci kullanımda gerekirse hücrelerine kadar ayrılabilirler. Sorunlu hücrelerin bulundukları modülün dengesini olumsuz etkileyeceğinden tüm hücreler test edilir ve gerekli ölçümler yapılarak kendi aralarında gruplara ayrılır. Bu ayrılan hücreler ikinci kullanım alanının gereksinimlerine uygun olarak tekrar paketlenir. Hücrelerin tamamının yeniden paketlenmesi ek bir maliyet oluşturacaktır. Ancak verimli ve sorunsuz bir ikinci kullanım için bu gereklidir.

2.4 Bataryalarının İkinci Kullanım Alanları

Kullanılmış EA bataryalarının ikinci kullanım alanı seçilirken enerji ve güç talebine göre seçim yapılmalıdır. Başka bir deyişle EA gereksiniminden daha az enerji ve güç ihtiyacı olan farklı uygulamalar seçilebilir.

İkinci kullanım öncesinde her bataryanın SoH değeri, hücrelerin iç direnç ve kapasite değerleri referans alınarak tespit edilmesi gereklidir.

İkinci kullanım için bataryalar seçilirken şunlara dikkat edilmelidir:

Eskimiş bataryanın artan direnci seçilen kullanım alanındaki çekilecek akım ile sıcaklığa bağlı yaşlandırması incelenmelidir. Örneğin yüksek dirençli batarya düşük akım isteyen bir uygulamada kullanılmalı. Eğer bataryanın kapasitesi yeterli değilse paralel bir batarya ilave ederek kullanım süresi uzatılabilir.

Düşük güç/enerji gereksinimli Taşıtlar:

Elektrikli kaldıraçlar (forkliftler)

Elektrikli kaldıraçlarda çalışma ortamı dikkate alınarak sıcaklık sabit kabul edilebilir. Bu yüzden kaldıraçlar için kullanılacak batarya modellerinde sıcaklık dikkate alınmayabilir. Bir elektrikli forklifte kullanılan batarya türü ve bataryanın şarj-deşarj eğrileri [23]'de verildiği gibidir. 3 adet 4EPzS model 240Ah kapasiteli hücre gerilimi 2V olan hücreler seri bağlanarak paket gerilimi 6V ve kapasitesi 240Ah olan kurşun asit batarya paketi oluşturularak forkliftlerde kullanılmaktadır.

Engelliler için elektrikli sandalye, skuter

Örnek bir skuter yapısı küçük güçlü (400W) sabit mıknatıslı (PM) DC motor ve 2 adet 12V batarya ve basit bir düşürücü dönüştürücünden oluşur. Kurşun asit batarya ana depolama için kullanılırken lityum bataryalar frenleme enerjisini depolamak için kullanılmaktadır.

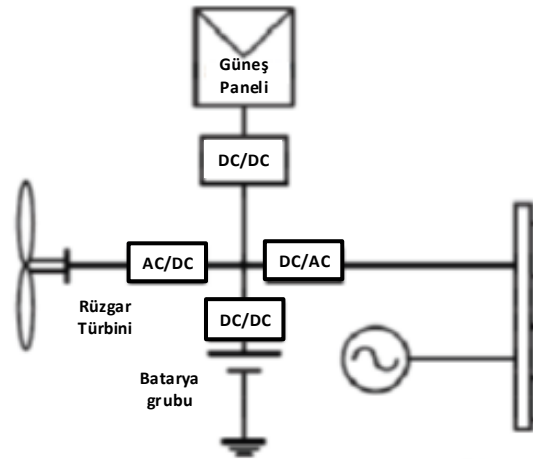
EA şarj istasyonları

Şebekeden uzak noktalara kadar karayolları uzanmaktadır. Buralara EA şarj istasyonu kurulması gerekmektedir. Bu istasyonlara şebekeden enerji hatları çekmek suretiyle enerji ulaştırmak oldukça maliyetli bir yöntem olacaktır. Bunun yerine şarj istasyonun kurulacağı bölgede YEK'in durumu dikkate alınarak rüzgâr veya güneş enerjisi kullanılmalıdır. Doğaları gereği üretimleri kontrol edilemeyen YEK'ler depolama sistemleri ile desteklenmelidir. Bu şekilde kontrol edilebilir bir enerji/güç kaynağı elde edilmektedir. Yaşlanmış EA bataryaları ile şebekeden uzak bir EA şarj istasyonu kurulumu yeni lityum bataryalara göre daha ucuz, kurşun asit bataryalara göre daha uzun ömürlü olacaktır [5].

CES (ortak enerji depolama birimi)

Amerika’da elektrik dağıtım sisteminde dağıtım transformatörleri küçük güçlü ve çok sayıda kullanılmaktadır. Ortak enerji depolama birimi olarak ifade edilen CES dağıtım transformatörlerinin yanına eklenerek o transformatörden beslenen tüketicilere hizmet vermektedir. EA’dan çıkan bataryaları ortak enerji depolama birimlerinde de kullanılabilecektir. Detroit Edison Enerji firmasının Michigan’da yaptığı bir projede CES olarak EA’dan çıkan bataryalar kullanılmıştır.

YEK üretimini düzenleme



Şekil 2. 2 YEK ile batarya bağlantı şeması

Yıllık rüzgâr rejimi dikkate alındığında yapılan çalışmada çizelge 2. 5’de belirtilen oranda enerjinin bataryalar sayesinde kullanılabileceği ifade edilmiştir. Burada 2020 yılı temel yıl olarak seçilmiştir. 2020 yılında yıllık rüzgâr santralinin üretimi 34,24 MWh ve kullanılmayan enerji ise 3,25 MWh (%9,5) olarak verilmiştir. Her yılda tüketimin %3 olarak artacağı hesaplanmıştır.

Çizelge 2. 5 Rüzgârın batarya ile kullanılabilir hale gelen kısmı [6]

Yıllar	2020	2021	2022	2023	2024
Geri kazanılan rüzgâr enerjisi oranı	%35,9	%33,4	%31,3	%28,2	%26,5

2.5 Bataryalarda Verim

Verim tanımı bir sistemin kullanılabilir çıkışın girişe oranı olarak ifade edilmektedir. Bataryaların verimi iki farklı şekilde ifade edilmektedir.

2.5.1 Coulomb Verimi (Ah)

Deşarj sırasında bataryadan çekilen amper saatin, deşarj öncesi SoC değerine tekrar ulaşması için gerekli şarj amper saatine oranı olarak ifade edilmektedir [18]. Başka bir deyişle coulomb verimi şarj ve deşarj amper saati arasındaki orandır ve 1'e eşit olarak kabul edilmektedir [24].

$$\eta_{coulomb} = \frac{\int_0^{t_{dş}} i_{dş}(t).dt}{\int_0^{t_s} i_s(t).dt} \quad (2.1)$$

Eşitlik 2. 1'de verilen $\eta_{coulomb}$ coulomb verimini, $i_{dş}(t)$ ani deşarj akımını, $i_s(t)$ ani şarj akımını; $t_{dş}$, t_s sırasıyla deşarj ve şarj süresini ifade etmektedir. Sabit akımla belirtilen gerilimler arasında 7'şer saat süren şarj ve deşarj testleri sonucunda elde edilen kapasite değerleri ile coulomb verimi hesaplanmıştır.

Çizelge 2. 6 Coulomb verimi hesaplaması için şarj ve deşarj deney sonuçları

Şarj	$V_1 = 26,36 V$	$V_2 = 26,86 V$	$I_{ort} = 3,94 A (CC)$
	$W_1 = 250 Wh$	$W_2 = 1002 Wh$	$P_{ort} = 105 W$
	$C_1 = 9,64 Ah$	$C_2 = 37,77 Ah$	$\Delta C_s = 28,06 Ah$
Deşarj	$V_1 = 26,46 V$	$V_2 = 25,97 V$	$I_{ort} = 4,01 A$
	$W_1 = 28,37 Wh$	$W_2 = 768,24 Wh$	$P_{ort} = 105 W$
	$C_1 = 1,06 Ah$	$C_2 = 29,30 Ah$	$\Delta C_{dş} = 28,24 Ah$

Burada E şarj/deşarj enerjisini, ΔC test süresi boyunca toplam kapasite değişimini ifade etmektedir. Hesaplamalarda SoC değeri için Ah referans alınmıştır. Alt indis şarj veya deşarjın başladığındaki gerilim, enerji ve kapasite değerlerini belirtmek için kullanılmıştır. Yaklaşık aynı gerilim seviyeleri arasında şarj deşarj yapılmak istenmiş. Ancak şarj esnasında gerilimin daha yüksek olduğu ve deşarj esnasında da gerilimin daha düşük olduğu durumuyla karşılaşılmıştır. Bunun sebebi bataryanın iç direncinin şarj esnasında uç gerilimini artırıcı, deşarj esnasında uç gerilimini azaltıcı etkisidir.

$$\eta_{coulomb} = \frac{\Delta C_{dş}}{\Delta C_s} = \frac{28,24}{28,06} = 1,006 \quad (2.2)$$

Coulomb veriminin 1'e eşit olduğu çizelge 2. 6'daki veriler ışığında yapılan hesaplamalar sonucunda eşitlik 2. 2'de görülmektedir.

2.5.2 Enerji Verimi (Wh)

Gidiş-dönüş verimi (round-trip efficiency, RTE) olarak ifade edilen enerji verimi deşarj sırasında bataryadan çekilen net DC enerjinin deşarj öncesi SoC değerine tekrar ulaşması için gereken toplam DC enerjiye oranı olarak ifade edilmektedir [18]. Başka bir deyişle kullanıcının enerji talebini karşılamak için ne kadarlık bir depolama ünitesi kullanılacağını ve depolama ünitesini doldurmak için birincil kaynaktan ne kadar güç ihtiyacı olacağını belirtir. Mekanik, manyetik ve elektrokimyasal depolama araçları için %80'den fazladır. Batarya şarj verimi gidiş-dönüş (round-trip) verim olarak kullanılmaktadır [25].

$$\eta_{RTE} = \frac{\int_0^{t_{dş}} i_{dş}(t) \cdot V_{dş}(t) \cdot dt}{\int_0^{t_{ş}} i_{ş}(t) \cdot V_{ş}(t) \cdot dt} \quad (2. 3)$$

Eşitlik 2. 3'te η_{RTE} bataryanın gidiş-dönüş verimini; $i_{dş}(t)$, $V_{dş}(t)$ sırasıyla deşarj yapılırken bataryanın ani akım ve gerilimini; $i_{ş}(t)$, $V_{ş}(t)$ sırasıyla şarj yapılırken bataryanın ani akım ve gerilimini; $t_{dş}$, $t_{ş}$ sırasıyla deşarj ve şarj süresini ifade etmektedir.

Başka bir verim tanımına göre bataryanın şarj olurken birim zamanda verilen güç için depolanan enerji yüzdesi olarak ifade edilmektedir [25]. Bataryaların ikinci kullanımının ekonomik getirilerini irdelendiği bir çalışmada gidiş-dönüş verimi (RTE) %85 olarak kabul edilmiştir [19].

Batarya tam dolup boşaltıldığında elde edilen veriler çizelge 2. 7'de verilmiştir. Verilen deşarj ölçümleri yapılırken şarj tamamlandıktan sonra batarya kimyasının dengeye gelmesi için minimum beklenmesi gereken 15 dakikalık süre beklenmemiştir. Bataryalar şarj edilmeden önce ve sonra üreticinin önerisi olmazsa 2 saat dengeye gelmesi için beklenmesi önerilmektedir [26]. Batarya tam şarj edildikten sonra dinlendirilirse uç gerilimi 27,6 V civarına kadar inmektedir.

Çizelge 2. 7 Bataryanın tam şarj ve deşarj deney sonuçları

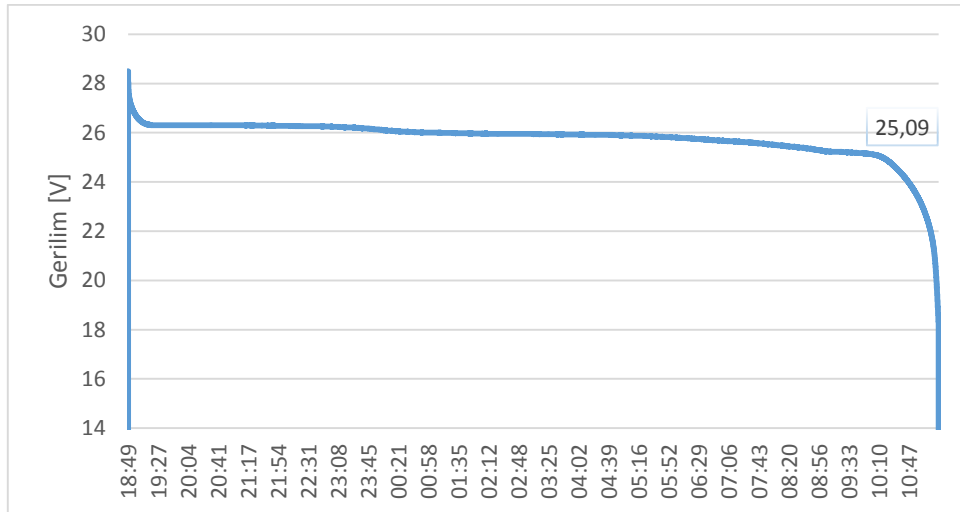
Şarj (CC-CV)	$V_1 = 24,19 V$	$V_2 = 28,76 V$
	$OCV = 27,6 V$	SoC=%100
	$I_s = 3,77 A$ (ortalama)	CC: 3,94 A, CV:28,76 V
	$W_{ds} = 1757,40 Wh$	
	$C_s = 65,61 Ah$	
	$t_s = 18,21 h$	
Deşarj (CC)	$V_1 = 28,2 V$	$V_2 = 18,34 V$
	$I_{ds} = 4,01 A$ (ortalama)	SoC=%0
	$W_{ds} = 1707,14 Wh$	
	$C_{ds} = 66,26 Ah$	
	$t_s = 16,55 h$	

Bataryanın şarj deşarj arasında dinlendirmeden yapılan testlerin sonuçlarına göre batarya paketinin coulomb ve enerji verimi eşitlik 2. 4 ve 2. 5'te hesaplanmıştır.

$$\eta_{coulomb} = \frac{C_{ds}}{C_s} = \frac{66,26}{65,61} = 1,009 \quad (2. 4)$$

$$\eta_{RTE} = \frac{E_{ds}}{E_s} = \frac{1707,14}{1757,40} = 0,9714 \quad (2. 5)$$

Bataryanın sabit akımla deşarj eğrisi üzerinde lineer çalıştığı bölge şekil 2. 3'de görülmektedir.



Şekil 2. 3 Paketin 4A CC deşarj gerilim eğrisi

Bataryanın tam dolup boşalmasının yanında sadece lineer bölgedeki çalışmaları dikkate alınmıştır. Şarj ve deşarj testleri için bataryanın çalıştığı lineer kabul edilen bölge için

hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan testlerin sonuçlarına göre batarya paketinin coulomb ve enerji verimi eşitlik 2. 4 ve 2. 5'te hesaplanmıştır.

Çizelge 2. 8 Bataryanın dinlendirilerek tam şarj ve deşarj sonuçları

Deşarj	
$V_1 = 28,2 V$	$V_1 = 28,2 V$
$V_2 = 24,2 V$	$V_2 = 25 V$ (lineer bölgenin sonu veya Pratik deşarj sınırı)
$W_{dş} = 1643,95 Wh$	$W_{dş} = 1599,47 Wh$
$C_{dş} = 63,48 Ah$	$C_{dş} = 61,67 Ah$

Lineer bölge dikkate alınmayarak yapılmış verim hesaplamaları eşitlik 2. 6 ve 2. 7'de verilmiştir.

$$\eta_{coulomb} = \frac{C_{dş}}{C_s} = \frac{63,48}{65,61} = 0,9675 \quad (2. 6)$$

$$\eta_{RTE} = \frac{W_{dş}}{W_s} = \frac{1643,95}{1757,40} = 0,9354 \quad (2. 7)$$

Bataryanın tam deşarjından alınan veriler ile sadece lineer bölgenin dikkate alındığı kesitler için hesaplanan verimler eşitlik 2. 8 ve 2. 9'de verilmiştir

$$\eta_{cuolomb} = \frac{C_{dş}}{C_s} = \frac{61,67}{65,61} = 0,9399 \quad (2. 8)$$

$$\eta_{RTE} = \frac{W_{dş}}{W_s} = \frac{1599,47}{1757,40} = 0,91 \quad (2. 9)$$

Bataryanın gidiş-dönüş verimi (round trip efficiency) hassaslık analizi farklı kapasite seviyelerinde yapılmış ve batarya kapasitesinin azalması enerji verimini azaltacak etkiye sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Yani batarya şarj olmak için daha çok enerjiye ihtiyaç duyarken deşarj olurken daha az enerji verebilmektedir [27].

2.6 Bataryalarda Yaşlanma

Bataryanın kullanım amacı enerji depolama ve istendiğinde bu enerjiyi geri vermektir. Bataryaların yaşlanması enerjiyi eskisi kadar çok depolayamamaları ve eskisi kadar gücü verememeleridir. Elektrokimyasal yapıda olan bataryalarda yaşlanmanın sebebi batarya yapısındaki maddelerin yapılarının zamanla ve kullanıldıkça bozulmaları olarak ifade

edilebilir. Lityum bataryaların enerji yoğunluklarının yüksek olması ve düşük birim ağırlığa sahip olmaları EA'larda kullanılmasına sebep olmuştur. Çevre dostu EA'ların yaygınlaşması için lityum batarya fiyatlarının ucuzlaması ve ömürlerinin uzatılması araştırmalara konu olmaktadır. Bataryaların belirli kullanımdan sonra kapasitelerinin azalması olayının anlaşılmasını zorunlu kılmıştır.

Bataryaların yaşlanma mekanizmaları karışık bir olaydır. Bataryalar kullanımdan ve çevresel faktörlerden birlikte etkilenmektedirler. Yaşlanma olayı bataryanın iç direncinin artması ve kapasitesinin azalması olarak ifade edilmektedir. Yaşlanmanın aynı değişkenlere bağlı olmadığı tespit edilmiştir.

2.6.1 Elektrokimyasal Yaşlanma

Bataryalar bir elektrolit içinde duran iki elektrot ve elektron taşıyan bir aktif elementten oluşur. Bataryalardaki elektrik akımı kimyasal olay kaynaklı bir akımdır. Yaşlanma bataryanın içerisindeki parçaların işlevselliğini zamanla ve kullanımla yitirmesidir.

2.6.1.1 Anotta Yaşlanma

Lityum bataryalarda negatif elektrot (anot) yaygın olarak grafit malzemesinden yapılır. Negatif elektrot ile elektrolit arasında, ilk şarj esnasında, katı elektrolit arayüzü (SEI) oluşarak anodu aşınmaya karşı korur. SEI bir engel gibi görev yapar. Bataryanın kullanımı esnasında SEI kararsız olduğundan elektrolitin çözünmesine ve aktif lityum iyonlarının azalmasına sebep olmaktadır. Bu olay birincil yaşlanma olarak ifade edilmektedir. SEI'nin kararlı halinde bu etki çok görülmemektedir. Anot ile elektrolitin yüzey tepkimesi ile lityumun azalması rafta batarya yaşlanmasının temel sebebi olarak raporlanmıştır. Bu olay da ikincil yaşlanma olarak ifade edilmiştir. Üçüncü etki ise aktif maddelerin üzerinde pasif yüzeylerin oluşması ve iletkenliğin azalması sonucu direncin artmasıdır.

SEI lityum iyonlarına karşı geçirgen olduğu gibi negatif elektrotta şarj edilen anyonlara, elektronlara, hatta çözücüye karşı da geçirgenlik gösterir. SEI'den geçip anotta grafit ile tepkimeye giren çözücü gaz oluşmasına sebep olur. Batarya yüksek potansiyelde yani tam dolu olarak depolandığında daha çok görülen gaz oluşumu SEI yüzeyinde kırılmalarla sebep olur. Kullanımda olsun ya da olmasın oluşacak bu kırılmalar sonucunda anodun empedansı artar.

SEI oluşumunu yüksek SoC'da depolamak, yüksek sıcaklık, aşırı deşarj ve kısa devreler hızlandırmaktadır. Örneğin yüksek sıcaklıkta çözünen SEI, az geçirgen olan lityum tuzu oluşturarak anodun empedansını artırır. Bunun yanı sıra düşük sıcaklık lityumun SEI ve grafit içinde difüzyonunu azaltarak elektrotun lityum ile kaplanmasına sebep olmaktadır. Ulaşım koşullarında kullanılırken çevrime girebilen lityumun azalmasından SEI oluşumu, gelişimi sorumludur.

2.6.1.2 Katotta Yaşlanma

Bataryaların yaşlanmasında baskın etki negatif elektrotta görülmekte, pozitif elektrotta (katotta) ise kullanılan maddeye bağlı olarak değişen, fark edilmesi zor ve uzun sürede etkiler oluşmaktadır. Anotta olduğu gibi bu etkiler SoC ve sıcaklığa bağlıdır.

2.6.2 Yaşlanma Olayının Sonuçları

Bataryalardaki yaşlanma iki sonucu vardır: kapasite azalması ve empedansın artması. Batarya performansının azalmasında elektrot yapısındaki maddeye bağlı farklı fiziksel olaylar etkilidir. Birincil lityum kaybı her iki elektrotta da oluşabilen ve elektrolitin çözünmesinden ötürü karbon anotta SEI büyümesiyle oluşan yüzey etkileşiminden kaynaklanmaktadır. İkincil kayıp elektrottaki aktif maddenin azalmasıdır. Üçüncü ise aktif maddelerin yüzeyinde pasif tabakaların oluşması ve gözenekli elektrot yapısının iletkenliğini yitirmesi sonucu hücrenin direncinin artmasıdır.

Otomotiv kullanımında bataryadaki aktif ve çevrime girebilen maddelerinin azalması aracın menzilini (özerkliği) kısıtlarken, direnç artışı da aracın maksimum kullanılabilen gücünü azaltmaktadır.

Negatif elektrotta (anotta) lityum kaybı zamana bağlı parabolik bir değişim gösterirken pozitif elektrotta (katotta) bataryanın empedansının artması sonucunu yaşlanma olayı lityum kaybına bağlı lineer bir değişim gösterdiği görülmüştür.

2.6.3 Yaşlanmanın Kökeni

Bataryaların yaşlanmasının ana sebebi şarj deşarj işlemidir. Buna rağmen yaşlanma iki kısma ayrılabilir: biri zamanla yaşlanma, diğeri kullanımda yaşlanma. Zamanla yaşlanma bataryanın depo süresi boyunca batarya içindeki malzemelerin ve çevrenin etkisiyle

oluşan olayların sonucudur. Kullanımda yaşlanma ise bataryanın şarj ve deşarj olayı sırasında ortaya çıkan etkilerle yaşlanmasıdır.

2.6.4 Rafta Yaşlanma

Batarya depo halindeyken geri dönüşümü olmayan kapasite azalmasıdır. Bataryanın kendi kendine boşalmasında da etkilidir. Rafta yaşlanmada etkili olabilecek parametreler şöyle sıralanabilir: Sıcaklık, SoC, şarj sonu gerilimi.

Yüksek sıcaklıkta depolama bataryadaki lityum iyonu kaybının normal sıcaklıktakine göre artmasına sebep olmakta ve kapasite azalmaktadır. Düşük sıcaklıklar ise difüzyon yapan maddenin azalmasına ve batarya kimyasının başkalaşmasına sebep olmaktadır.

SoC seviyesi farklı olduğunda sıcaklık aynı olsa da yaşlanma farklı olmaktadır. Yüksek SoC seviyesinde depolama eskimeyi artırmaktadır [28]. Araştırmaların birçoğunda SoC seviyesinin eskimeye etkisi sıcaklıkla birlikte ele alınmaktadır. Sonuçlar göstermiştir ki yüksek SoC seviyesinin yüksek sıcaklıktan daha kısıtlı yaşlandırıcı etkiye sahiptir. Henüz zamana bağlı non-lineer şekilde etkiyen bu iki etkinin bataryanın raftaki yaşlanmasına etkisi tam olarak ifade edilememiştir.

2.6.5 Çevrimde Yaşlanma

Raftayken yaşlanmaya sebep olan etkenler batarya çevrim yaparken de etkili olmaktadır. Bataryalar hem şarj edilirken, hem de deşarj edilirken üzerlerinden akım geçer. Bu olay ekzotermik bir olay olduğu için bataryanın sıcaklığı artar. Artan sıcaklık yaşlanmayı hızlandırır. Çok düşük sıcaklıklar az da olsa yaşlanmanın artmasında etkili olmaktadır. Burada yanlış anlaşılan bir nokta vardır. Çalışmalarda sıcaklık olarak ortamın sıcaklığı ele alınmaktadır. Bataryanın kendi sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasında bir ince ayırım vardır.

Çevrim süresindeki yaşlanma bataryanın kullanımına sıkı bir şekilde bağlıdır. Bataryanın üzerinden geçecek akımın zamana bağlı şekli önem arz etmektedir. Bu ΔSoC ile literatürde ifade edilmiştir. Bir çevrim boyunca şarj durumu değişimi ile ifade edilebilir. Başka bir deyişle şarj süresince ne kadar şarjın yapıldığı veya deşarj boyunca ne kadar deşarjın yapıldığı ifade edilmektedir. Aynı tür lityum bataryaları aynı SoC ile aynı

sıcaklıkta, fakat farklı ΔSoC ile test edildiğinde, ΔSoC yükseldikçe güç kaybının arttığı gözlenmiştir [29], [30].

2.7 EA Bataryalarının İkinci Kullanımında Önemli Parametreler

Sıcaklık iklime bağlı, ΔSoC yol profiline bağlı olarak bataryada yaşlanma etkisi oluşturmaktadır. Sıcaklığın etkisiyle agresif sürüşün bataryaya etkisi aynı şekilde olmamaktadır. Bu yüzden batarya eskimesi çok karmaşık bir yapı içerisindedir. Dışarıdan kaynaklı veya sürüşe bağlı faktörlerin çoklu etkileşiminden ötürü yaşlanmayı tahmin etmek zordur.

Rafta kapasite kaybı

Sıcaklık: yüksek ve düşük sıcaklıklar kapasitelerinin azalmasına sebep olmaktadır.

SoC: asit elektrolitli bataryaların tersine, lityum iyon bataryalar kullanılmayan zaman dilimi içerisinde dolu olarak tutulması kapasitelerinin azalmasına neden olmaktadır.

Çevrimde kapasite kaybı

Sıcaklık: yüksek sıcaklıklar yaşlanmayı hızlandırır. Etkisi üsteldir. 45°C de yaşlanma 35°C göre iki kat fazla olmuştur.

Deşarj derinliği (DoD): yaşlanmayı hızlandırır.

C-oranı: bataryanın yaşlanmasına doğrudan etkisi olmadığı kabul ediliyor. Ancak C-oranı sıcaklığı artırmasıyla yaşlanmayı dolaylı olarak etkilemektedir [31].

ΔSoC : bir çevrimdeki şarj durumu değişimi, artıkça enerji depolama kapasitesi kaybı artmaktadır. Başka bir deyişle ne kadar çok enerji şarj/deşarj olursa bataryanın iç yapısı depolama özelliğini yitirmektedir.

2.8 Sağlamlık Durumu (State of health, SoH) Hesabı ve Tahmini

Bataryaların ömür tahmininde birçok farklı belirteç kullanılmıştır. Ancak en sık kullanılan sağlamlık durumu (SoH) belirteci mevcut kapasitenin başlangıç kapasitesine oranı olarak ifade edilmektedir. Diğer SoH tanınmaları bataryanın ömrünün sonu (EOL) olarak ifade edilen değere göre yapılmaktadır. Genel olarak SoH tanımlamalarında direnç artışı dikkate alınmamakla birlikte dirence bağlı SoH tanımlaması da yapılmıştır [32].

Yaşlanma, bataryaların geri dönülmez enerji depolama kapasitelerinin kaybını ifade eder. Batarya ve EA üreticileri tarafından birinci kullanım için EOL sınırı başlangıç kapasite değerinin %80'ine inmesi olarak öngörülmüştür. Bu SoH seviyesinden sonra ikinci kullanım başlayacaktır. Bir bataryanın başlangıçta SoH değeri 1 kabul edilir. Genel olarak yaşlanma (kalan ömür), SoH eşitlik 2. 10'daki gibi ifade edilmektedir.

$$SoH = SoH_{baş} \cdot (1 - TKK) \quad (2. 10)$$

Burada 1 bataryanın kapasitesinin üretildiği değerde olduğu, yani yeni olduğunu ve TKK da toplam kapasite kaybını ifade etmektedir. Eşitlik 2.11'de TKK'nın ifadesi verilmiştir.

$$TKK = KK_{çevrim} + KK_{raf} \quad (2. 11)$$

Bataryalarda yaşlanma iki farklı bölümden oluşmaktadır. $KK_{çevrim}$ bataryanın çevrimdeki kapasite kaybını, KK_{raf} bataryanın kullanılmadığındaki kapasite kaybını ifade etmektedir.

Batarya SoH tanımlamaları 5 kategoride incelenebilir;

- a) Elektrokimyasal modeller: bataryada gerçekleşen olayın detaylarıyla modellenmesi
- b) Eşdeğer devre temelli modeller: sadeleştirilmiş bir eşdeğer ile bataryanın modellenmesi
- c) Performans temelli modeller: yaşlanmanın fiziksel eşitlikler ile modellenmesi
- d) Ampirik uydurmalı analitik modeller: yapılan ölçümlere dayalı yaşlanma parametrelerinin tahmini
- e) İstatistiki yaklaşım: temelde verilere dayanan, öngörülen bir bilgi içermeyen yaklaşım

Güç kaybı (direnc artması)

Başka bir deyişle oransal kayıp olarak da ifade edilebilir. Batarya ve EA üreticileri tarafından ikinci kullanım için EOL değeri başlangıç direncinin 2 katına çıkması olarak öngörülmüştür. Direncin artması bataryanın anlık verebileceği maksimum gücü sınırlamaktadır. Başka bir deyişle bataryanın, depoladığı enerjiyi daha uzun sürede tüketmek zorunda kalmasıdır.

Rafta güç kaybı

Yaşlanmanın bu kısmı EA'da önemli bir yere sahiptir. Çünkü aracın ömrünün en az %90 kadarlık kısmında araç kullanımda değildir. Bu süreçte batarya üzerinde gerçekleşen yaşlanma rafta yaşlanmadır [33].

2.8.1 Doğrudan Şarj Deşarj ile SoH Tahmini

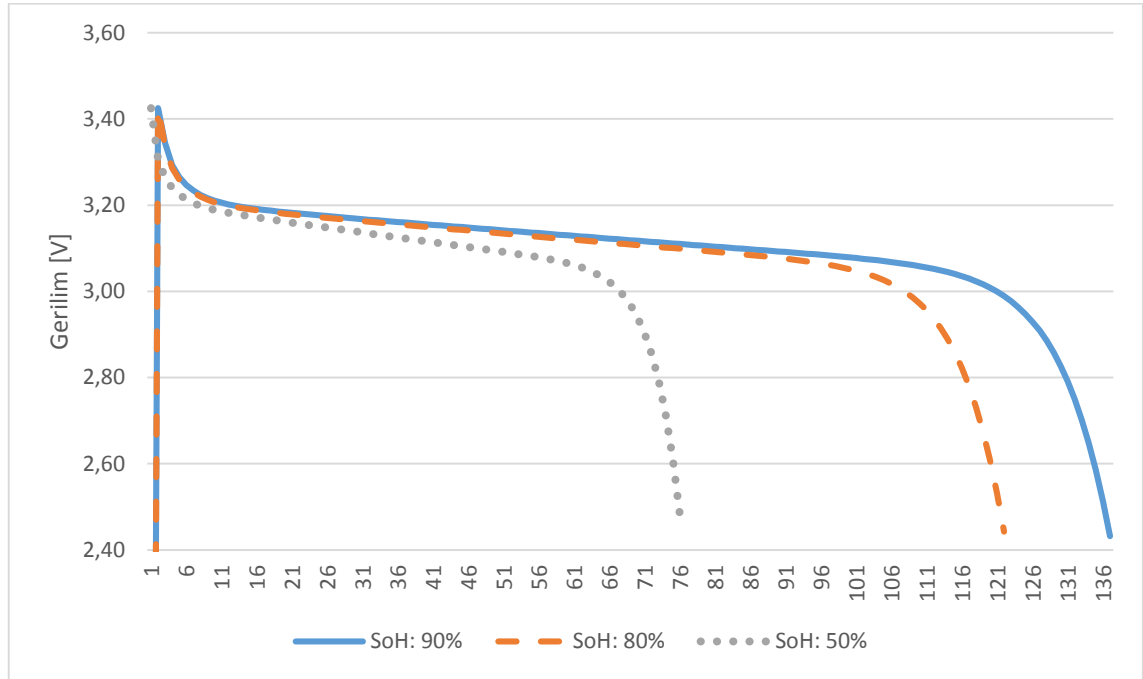
Bataryanın SoH değerini daha az süre, iş gücü ve enerji kaybı ile ölçmek için bir yöntem geliştirilmiş [34]. Bu modelde batarya paketinde bulunan hücrelerin hepsi aynı anda SoH ölçümüne maruz bırakılmadan yaşlanma tespit edilebilecektir. Bunun için batarya paketi içinden bir miktar hücre seçilip mikroişlemci ile kontrol edilebilecek şekilde batarya içinde ayrı bir paket oluşturulur. Yani ana batarya ve test bataryası olarak iki ayrı devre ortaya çıkmaktadır. Mikro işlemciler ana bataryadan ayrılmış paketin her bir hücresinde bulunan röleleri kontrol eder. Her seferde test edilecek hücre, test batarya paketinin içinden rastgele veya bir algoritmayla seçilmektedir. Yapılan deneysel çalışmada LiFePO₄ 3,2V 600mAh 0,6A 2,22Wh AA boyutlu bataryalardan 8 seri 4 paralel olmak üzere 32 hücreden oluşturulmuştur. Bu paketten 8 seri 2 paralel olmak üzere 16 hücre test için ayrılmıştır. Batarya paketinde bulunan her bir hücrede mikroişlemci ile kontrol edilen bir çift röle bulunmaktadır. İstendiğinde pakette bulunan herhangi bir hücre test için seçilebilmektedir.

Deneysel çalışmada 960 çevrim yapılarak bataryanın yaşlanması ölçülmüştür. Çevrimde 1 Ah şarj/deşarj yapılmış, gerilim sınırları 28-20 V olarak tutulmuştur. Batarya şarj/deşarj arasında 30 dakika bekletilmiştir. Her 30 çevrimde 16 adet ayrılmış hücreden 1 tanesi test edilmiş. İkinci 30 çevrimden sonra 16 hücreden kalan test edilmemiş herhangi 1 hücre test edilmiştir. Test sonunda 480 adet test çevrimi yapılmıştır. Bu esnada batarya paketinin test kısmı sistemden ayrılmakta ve sadece test edilecek hücre teste sokulmaktadır. Bu şekilde daha az hücre test edildiği için test süresi azalmaktadır. Paketin ana batarya kısmı ise az bir performans düşüklüğü ile çalışmasına devam etmektedir.

SoH, başlangıçtaki maksimum kapasitenin deşarj süresi kadar her test çevriminde sabit akımda deşarj yapılmak suretiyle elde edilen kapasitenin başlangıç kapasitesine oranlanarak hesaplanmaktadır.

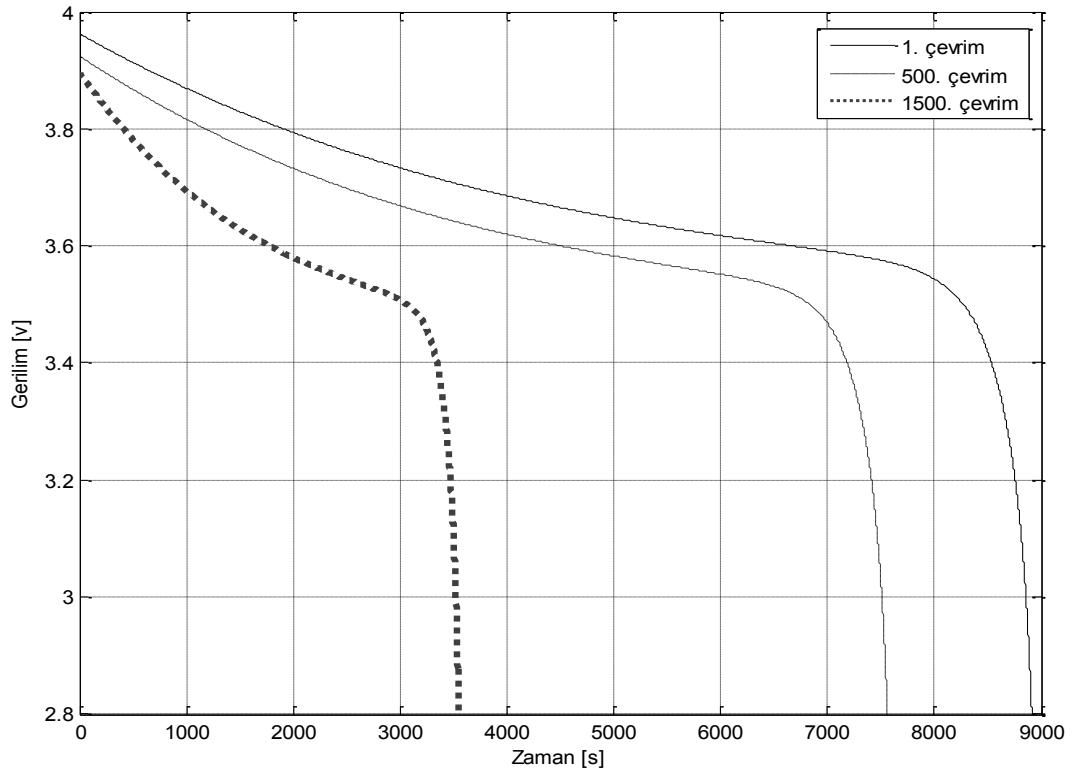
2.8.2 Deşarj Gerilim Eğrilerinin Eğimleri Yaklaşımı

Bataryaların kapasite kayıplarının tespiti EA'lar için büyük öneme sahiptir. Konuda yapılan çalışmaların başında statik kapasite testi gelmektedir. Bataryanın sabit akım ile deşarjı sonunda toplam kapasitesine bakılarak bataryanın kapasite kaybı tespit ediliyor. Ancak bu şekilde yapılacak test uzun süre gerektirmektedir. Buna alternatif olarak literatürde kapasite artımı (incremental capacity analysis, ICA) olarak yer alan yeni bir yöntem üzerine araştırmalar yapılmaktadır.



Şekil 2. 4 LFP batarya modelinin sabit 10A deşarj gerilim eğrileri

LFP batarya için kullanılan modelin farklı SoH'ler için çıkartılmış deşarj gerilim eğrileri şekil 2. 4'te görülmektedir. Deşarj eğrilerinde yaşlanma arttıkça bataryanın deşarj kapasitesinin azaldığı görülmektedir. Bunun yanında deşarj gerilim eğrilerinin eğimlerinin farklı olduğu ve yaşlandıkça eğimin arttığı söylenebilir. Buna benzer LCO için kullanılan modelin deşarj eğrilerinin eğimleri arasındaki fark şekil 2. 5'te görülmektedir. Bataryaların yaşlandıkça deşarj gerilimlerinin eğimlerinin farklılaştığı başka çalışmalarda da verilmiştir [24].



Şekil 2. 5 LCO batarya modeli sabit 1,18 A akımla deşarj eğrileri

Bataryanın kapasitesi tespit edilirken mümkün olan en hassas şekilde aktarılan şarj ölçülmelidir. Bataryanın kapasitesi tespit edilirken OCV-SoC ilişkisi kullanılırsa şu şekilde yapılır. Başlangıç açık devre geriliminden başlangıç SoC değeri tayin edilir. Daha sonra Ah sayıcı ile SoC farkı en az %60 olacak şekilde bataryadan akım geçirilir. İşlem sonunda açık devre gerilimi tekrar ölçülerek SoC tayin edilir. Eşitlik 2. 12 kullanılarak kapasite hesaplanır [24]. Burada ΔQ Ah cinsinden yük farkını ifade etmektedir.

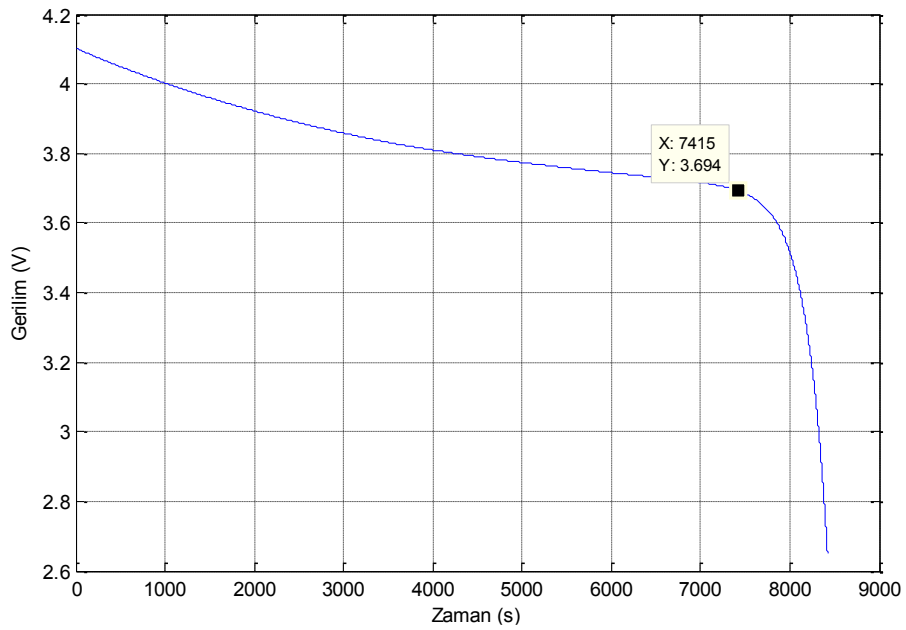
$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta SoC} \quad (2. 12)$$

Bu şekilde yapılacak OCV-SoC ilişkisi kullanılarak yapılacak kapasite tayini EA ve ŞHEA için uygundur. Çünkü araç günün büyük bölümünü durarak geçirmekte olduğunda batarya açık devre gerilimini sağlıklı bir şekilde ölçecek kadar kimyasal dengeye gelmek için zamanı olmaktadır. Eğer batarya yük altında iken OCV gerilimi elde edilmek isteniyorsa bataryanın eşdeğer devre modeli kullanılmaktadır. Bataryaların eşdeğer devre modeli gelecek bölümde verilecektir.

BATARYA MODELİ VE İKİNCİ KULLANIM

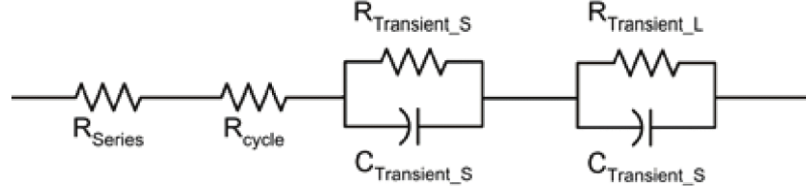
3.1 Mevcut Lityum Batarya Modelleri ve Karşılaştırmaları

Bataryaların elektrokimyasal modelleri üzerine bir takım çalışmalar yapılmıştır. Ancak bu çalışmalardan çıkan modeller bataryanın şarj deşarj esnasında akıma bağlı uç gerilimini ifade etmekten öteye geçememiştir. Lityum batarya teknolojisinin gelişmesinden önce kullanılan kurşun asit bataryalar, geri dönüşümlerinin kolay olduğundan ikinci kullanımları bir araştırma konusu değildi. Ancak lityum bataryanın üretimi ve geri dönüşümü kolay olmadığı için lityum bataryaların yaygınlaşmasını takiben kapasite kaybının modellenmesi araştırmalara konu olmaktadır. Literatürde sıklıkla kullanılan kapasite kayıplı modelin [35] şarj-deşarj gerilim eğrileri şekil 3. 1’de verilmiştir.



Şekil 3. 1 Lityum polimer batarya modeli deşarj gerilim eğrisi

Bu modelde test edilen batarya lityum polimer 850 mAh TCL PL383562 bir bataryadır. Burada kullanılan batarya modelinin eşdeğer devresi şekil 3. 2’de verilmiştir.



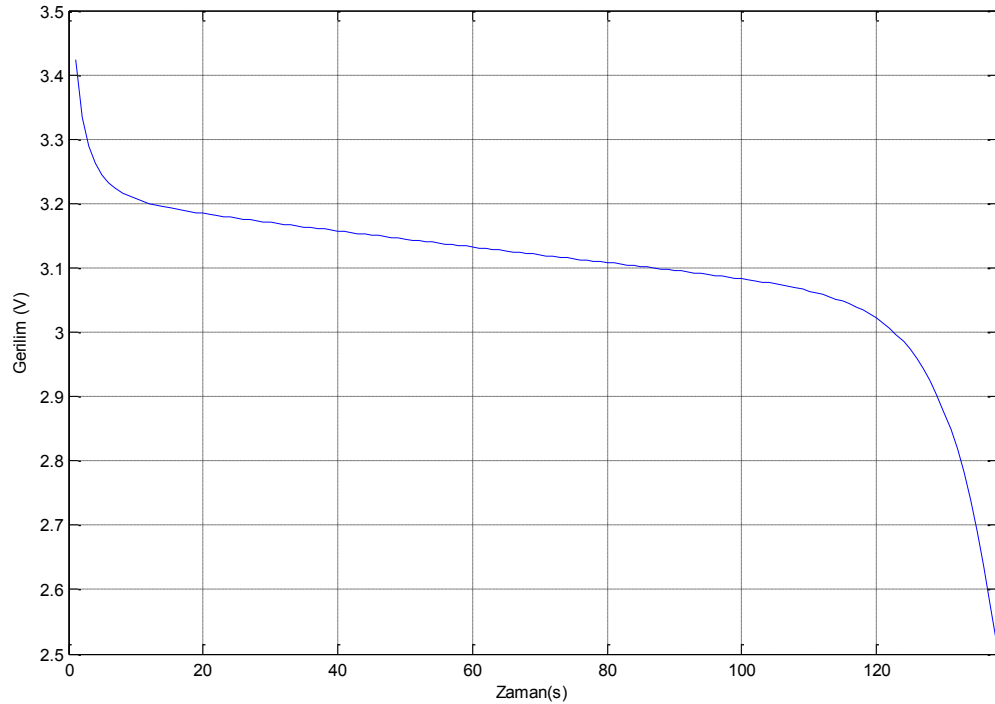
Şekil 3. 2 Lityum polimer batarya eşdeğer devresi [36]

Burada kapasite kaybı eşitlik 3. 1 ve 3. 2’de verildiği gibi modellenmiştir.

$$SoH = 1 - \left(1,544.10^7 \cdot e^{\left(\frac{40498}{8,3143.T}\right)} \cdot t + 8,5.10^{-8} \cdot \frac{N^2}{2} + 2,5.10^{-4} \cdot N \right) \quad (3. 1)$$

$$R_{\text{çevrim}} = 1,5.10^{-3} \cdot \sqrt{N} \quad (3. 2)$$

Burada T Kelvin cinsinden sıcaklık, t zaman, N çevrim sayısı ve $R_{\text{çevrim}}$ çevrime bağlı artan batarya iç direncini ifade etmektedir.



Şekil 3. 3 LFP kapasite kayıplı batarya modelinin deşarj gerilimi

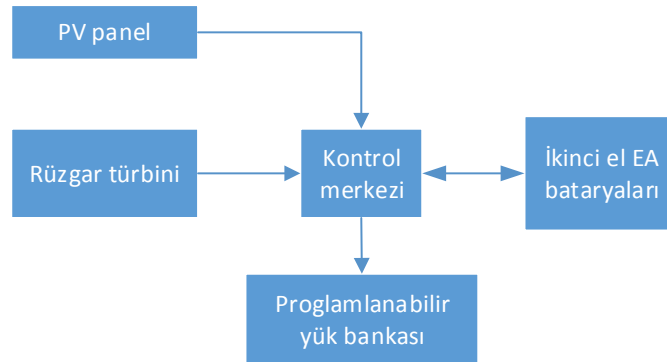
Tez kapsamında kullanılmış lityum bataryaların ikinci kullanımdaki yaşlanmalarını doğru ve yeterli bir şekilde ifade eden bir model kullanılmıştır. Model seçimi yapılırken lityum bataryalardaki kapasite kaybını içeren mevcut modeller [35], [37] kullanılarak,

bataryaların hem EA’da kullanımı, hem de yerel depolama ünitesi olarak kullanımı MATLAB®/Simulink® yazılımı içerisinde benzetim çalışması yapılarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlar değerlendirilmiş yerel depolama ünitesi olarak kullanımda batarya yaşlanmasının nasıl gerçekleştiği tespit edilmiştir. Modellerin üstünlükleri ve yetersizlikleri karşılaştırılarak kullanım alanına bağlı “ikinci ömür batarya modeli” ifade edilmiştir.

EA’dan sökülen bataryalarının ikinci kullanımının incelendiği benzetim çalışması aşağıda sıralanan parçalardan oluşmaktadır.

1. Birden çok farklı evsel güç tüketimin haftalık verileri
2. İkinci kullanımı ifade eden batarya modeli (kapasite kaybını içeren model)
3. Batarya yönetim ve kontrol sistemi

İkinci kullanımda EA’dan çıkan bataryalarının incelendiği bu proje YTU Elektrik Müh. Bölümünün Akıllı Ev Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Akıllı Ev Laboratuvarında 1,2 kW rüzgâr türbini, 1,2 kW güneş panelleri, 24V’luk bataryalar ve programlanabilir yük bankası mevcuttur. Bu sisteme kapasite kayıplı EA test bataryası bağlanacaktır.



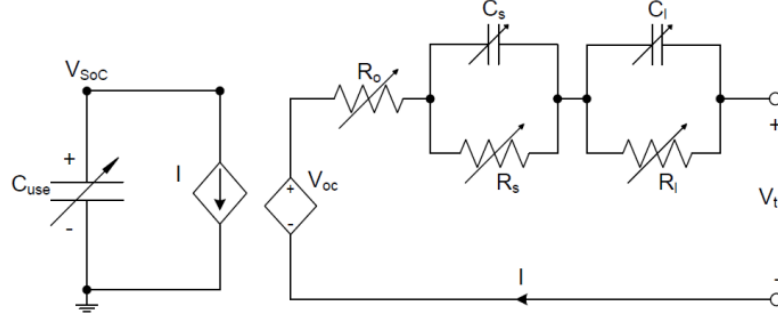
Şekil 3. 4 Test düzeneğinin durumu

3.2 İkinci Kullanım İçin Tasarlanan Batarya Modeli

Kapasite kaybını içeren batarya modeli

EA'larda en çok lityum bataryalar kullanıldığı için ikinci kullanım benzetim çalışmasında lityum tabanlı katodu bir metal oksit olan LiFePO₄ batarya modeli kullanılmıştır. Bataryalar için ömür değerlendirmesi önemli olduğu için seçilen modelde ömrü etkileyen parametrelerin varlığı aranmıştır. Bugüne kadar çevrime bağlı bir takım modeller

yapılmıştır [35]. Ancak EA kullanımı kısa süreli şarjları içerdiği için tam bir çevrim tamamlamamaktadır. Bir çevrim bataryanın 100% şarjından sonra belirli bir SoC değerine kadar deşarj ve tekrar 100%'e kadar şarj olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla çevrime bağlı yapılan modellemenin EA için kullanımı uygun değildir. Bu düşüncelerle ortam sıcaklığına yakın sıcaklıklar için doğru sonuçlar veren, çevrime bağlı olmayan, yapılan şarj/deşarja bağlı lityum batarya modeli çıkarılmıştır [31]



Şekil 3. 5 LFP için ampersaate bağlı yaşlanmayı içeren eşdeğer devre

Modelde kullanılan bazı eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$SoC = \int_0^t \frac{i(t)dt}{C} \quad (3.3)$$

Eşitlik 3. 3'de SoC, bataryanın doluluk oranını; C, bataryanın Ah biriminde enerji depolama kapasitesini ifade etmektedir. SoC başka bir deyişle zaman içindeki akım miktarıdır.

$$SoC_{avg} = \frac{1}{\Delta Ah_m} \int_{Ah_{m-1}}^{Ah_m} SoC(Ah) dAh \quad (3.4)$$

Çevrime bağlı modelleme yerine kullanılan yöntemde ortalama SoC (SoC_{avg}) değeri kullanılmaktadır ve eşitlik 3. 4'de tanımlandığı gibidir. Burada zamana bağlı SoC değeri yerine Ah, yani yapılan şarj veya deşarj miktarına bağlı SoC değeri kullanılmıştır. ΔAh değeri yaşlanmanın sabit kabul edildiği şarj miktarını ifade etmektedir.

$$SoC_{dev} = \sqrt{\frac{3}{\Delta Ah_m} \int_{Ah_{m-1}}^{Ah_m} (SoC(Ah) - SoC_{avg})^2 dAh} \quad (3.5)$$

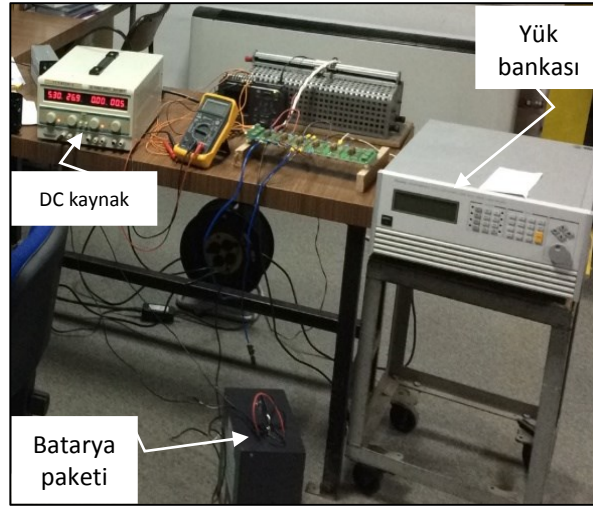
SoC_{avg} değeri kullanılarak hesaplanan bir diğer parametre ise SoC sapması (SoC_{dev}) eşitlik 3. 5'de ifade edilmiştir. Bataryanın test süresi boyunca toplam yaşlanma (TY) eşitlik

3.6'deki ifade ile hesaplanmaktadır. Burada E, toplam olay sayısını, i olay indisini ifade etmektedir. k_{s1} , k_{s2} , k_{s3} ve k_{s4} yaşlanma ile ilgili katsayıları ifade etmektedir [37].

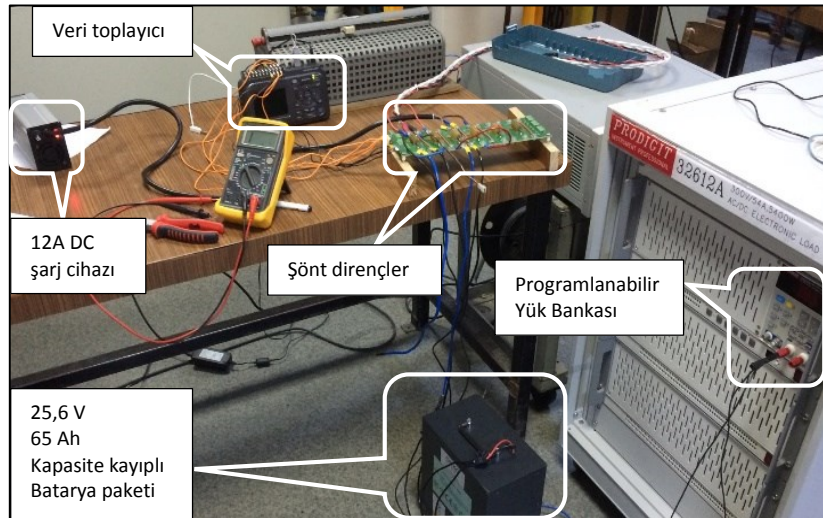
$$TY = \sum_i^E \left[\left(k_{s1} \cdot SoC_{dev,i} \cdot e^{(k_{s2} \cdot SoC_{avg,i})} + k_{s3} \cdot e^{k_{s4} \cdot SoC_{dev,i}} \right) \cdot e^{\left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right)} \right] Ah_i \quad (3.6)$$

Bataryanın yaşlanmasını ifade ederken başlangıç kapasitesi %100 alınarak SoH tanımlaması yapılmaktadır. Eşitlik 3. 7'de C, Ah cinsinden başlangıç kapasitesini ifade etmektedir.

$$SoH = \left(0.8 - \frac{TY}{0.2 \cdot C} \right) \quad (3.7)$$



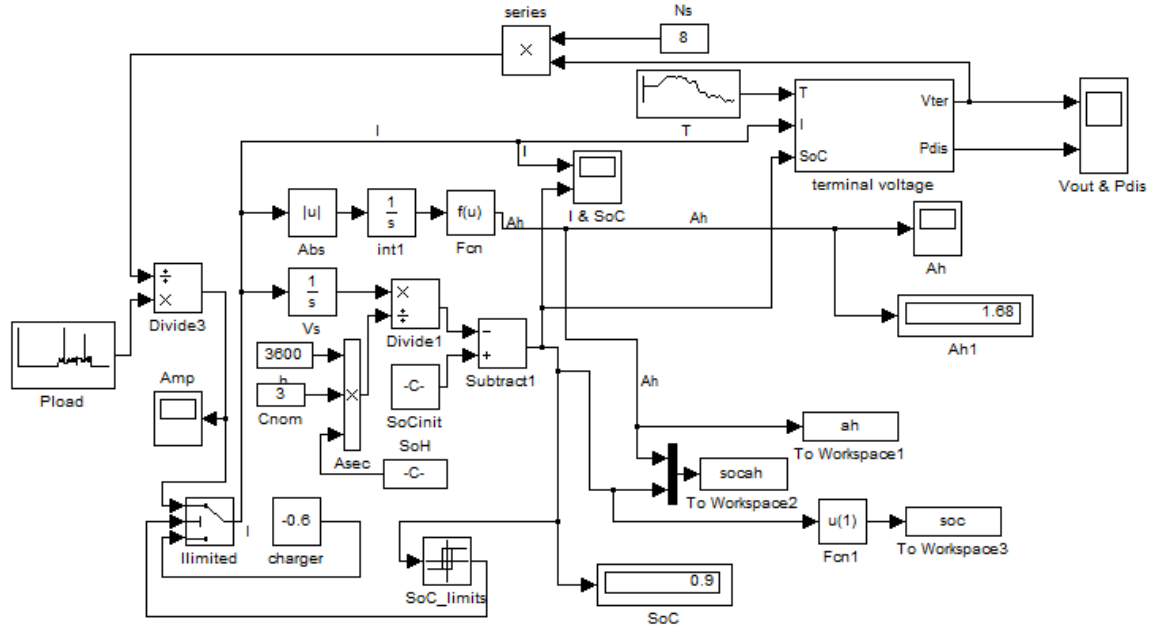
Şekil 3. 6 Yük bankasıyla deşarj testi (Chroma 18A)



Şekil 3. 7 Yük bankasıyla Batarya şarj/deşarj test düzeneği (Prodigit 54A)

3.2.1 İkinci Kullanım İçin Modelin Oluşturulması

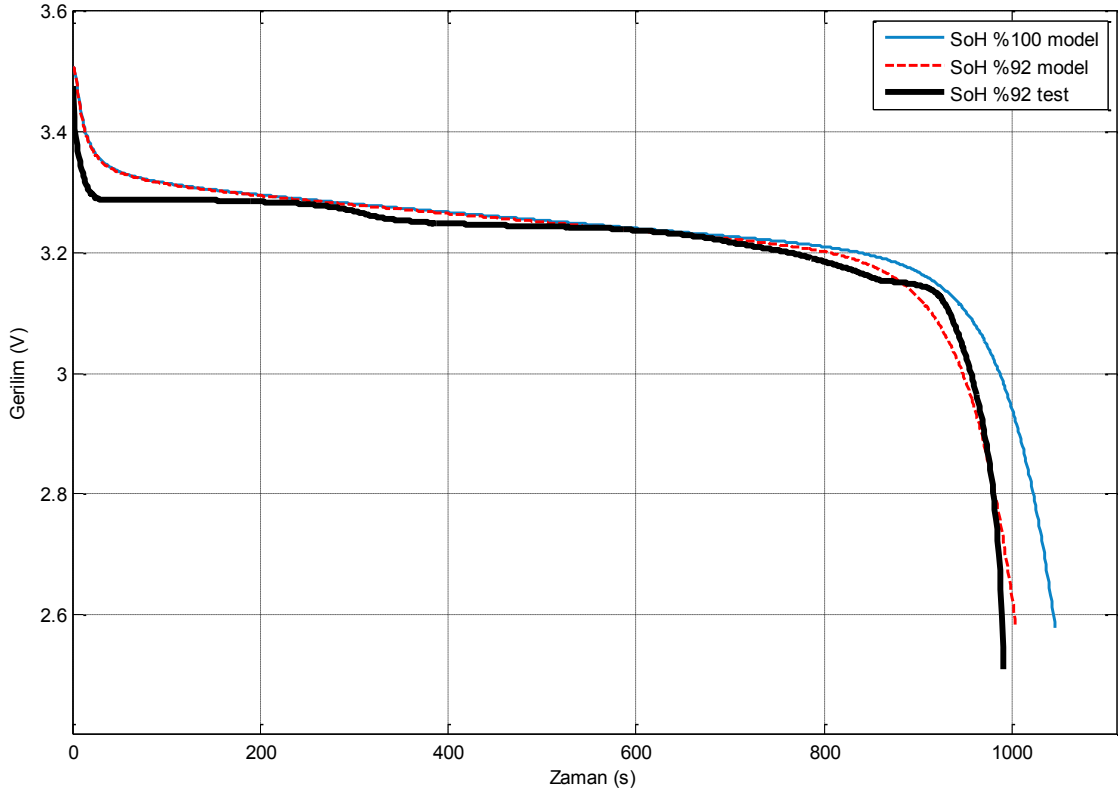
Model oluşturulurken A123 APR18650M1 LFP 1,1 Ah kapasiteli batarya üzerinde testler yapılarak yaşlanmanın etkisi gözlemlenmiş ve modellenmiştir. İkinci kullanım için batarya modeline raf yaşlanmasını eklemek üzere kapasite kayıplı 3,2 Ah başlangıç kapasiteli 26650 boyutlarında LFP 176 hücre alınmıştır.



Şekil 3. 8 Batarya modelin Simulink ekran görüntüsü

3.2.2 Modelin Gerçek Veriler ile Doğrulanması

Mevcut batarya modelini proje kapsamında alınan gerçek LFP batarya paketinin sabit akım deşarjiyla elde edilen gerilim eğrileri ile karşılaştırılması Şekil 3. 8'de görülmektedir.



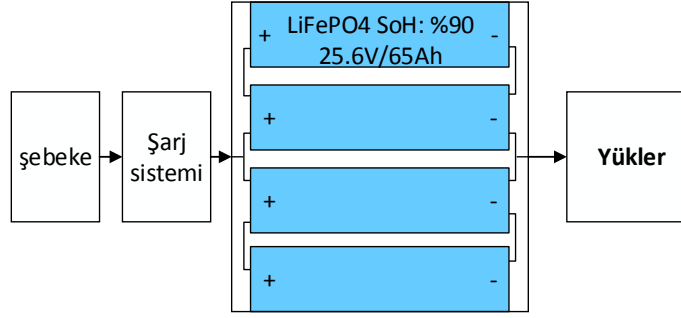
Şekil 3. 9 LFP modelinde bataryanın gerçek SoH değerine göre deşarj eğrisi

Batarya modeli ile bataryanın gerçek deşarjı arasında gerilim eğrileri birbirine uyduğu görülmüştür. Ancak bataryanın yük altına girdiği ilk anlarda hızlı bir düşüş olurken modelde bu düşüş daha yavaş, logaritmik bir şekilde azalmıştır. Bu fark modele aktivasyon enerjisi gibi bir parçanın eklenmesiyle ortadan kaldırılabilir. Proje sonunda yaklaşık SoH'i %92 değerine düşen batarya paketi ile modelin SoH %92 iken deşarj eğrisi uyum içindedir. Bataryanın yeni halini ifade eden SoH %100 için modelden alınan deşarj eğrisi daha yüksek kapasite değerinde kesim gerilimine (2,6 V) geldiği de görülmektedir.

3.3 Örnek Olaylar

EA Bataryaların ikinci kullanımı ile ilgili tez süresince yapılan çalışmalar ve sonuçları bu bölümde verilmiştir.

3.3.1 Bataryaların Evde Pik Yükte Kullanımı



Şekil 3. 10 Batarya şarj deşarj test sistemi şeması

Önceki çalışmalara göre evsel yükleri ikinci kullanım EA bataryaları ile beslemek basit olmanın yanı sıra karlı bir uygulamadır. Bu benzetim çalışmasında EA bataryası ikinci kullanıma %80 SoH ile girdiği kabul edilmiştir. Ayrıca raf yaşlanması, batarya kullanılmadığında SoC değerinin sabit kaldığı kabul edilerek dikkate alınmamıştır [31]. TEDAŞ elektrik fiyatları tarifesi dikkate alınarak günlük enerji maliyeti 3 farklı zamana göre hesaplanmıştır. Çizelge 3. 1’de tüketim miktarları ve tarifelere göre fiyatları verilmiştir.

Çizelge 3. 1 Tüketim miktarları ve enerji maliyeti

Saatler	Tüketim [kWh]	Fiyat [krş/kWh]	Fiyat [TL]
06.00-17.00	3,60	26,83	0,96588
17.00-22.00	2,30	42,22	0,97106
22.00-06.00	4,65	15,72	0,73098
Toplam	10,56		2,67

Benzetimi yapılacak batarya türü proje kapsamında alınan ile aynı seçilmiştir. Proje kapsamında satın alınan batarya paketinin özellikleri çizelge 3. 2’de verilmiştir. Bu paketi oluştururken üreticinin kullandığı batarya hücrelerine ait bilgi ise çizelge 3. 3’de verilmiştir. Pakette Heter Battery marka silindirik HTCF26650-3200 model hücrelerden kullanılmıştır. Burada hücre için verilen değerler üreticinin sağladığı başlangıç değerleridir.

Çizelge 3. 2 Batarya paketi özellikleri

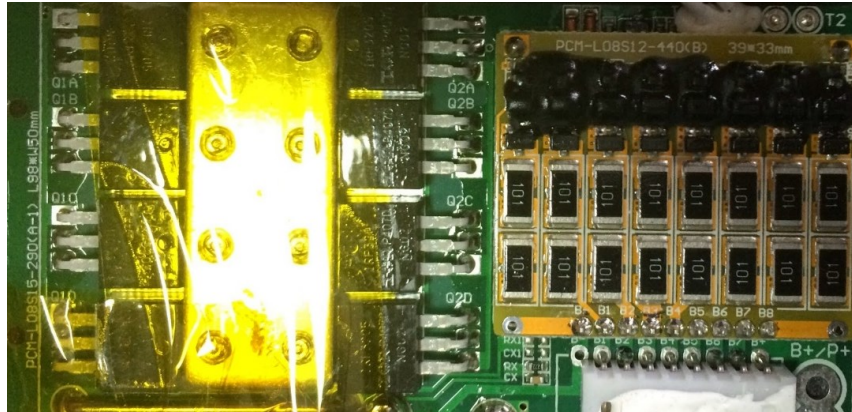
Gerilim	25,6	V
Kapasite	65	Ah
Maks. Devamlı deşarj akımı	30	A
Önerilen deşarj akımı	0,2	C
	13	A
Şarj gerilimi	28,8	V
Maks. Şarj akımı	≤18	A
Seri hücre sayısı	8	Adet
Paralel hücre sayısı	22	Adet
Toplam hücre sayısı	176	Adet
Batarya paketi – en	250	mm
Batarya paketi – boy	283	mm
Batarya paketi – derinlik	148	mm

Çizelge 3. 3 Paketteki hücre bilgileri

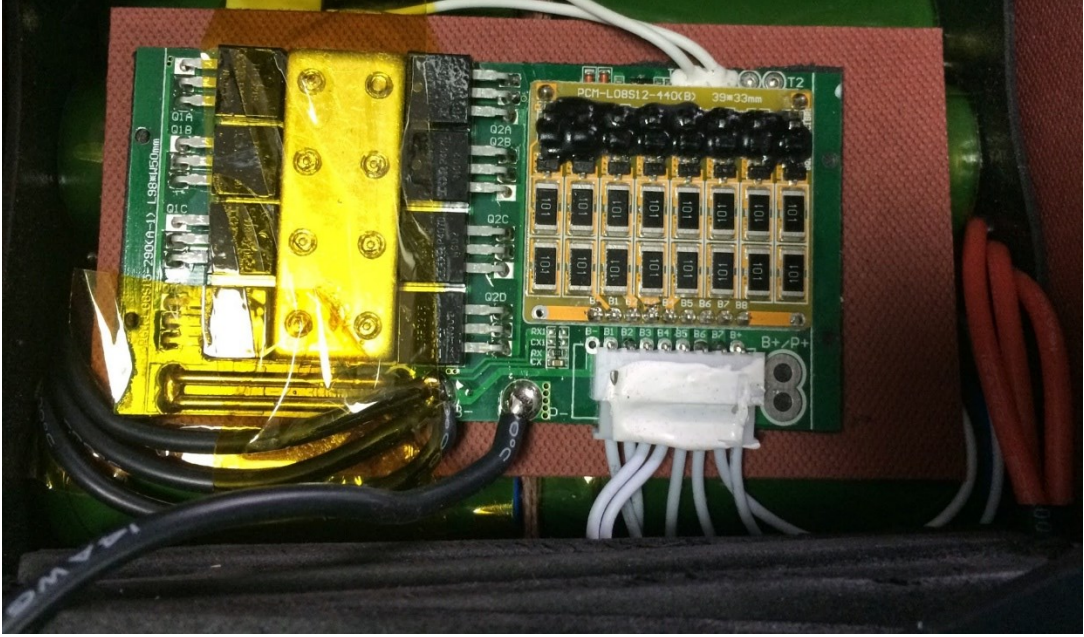
Gerilim	3,2	V
Kapasite (0,5C)	3200	mAh
Maks. Deşarj akımı	9,6	A
Minimum deşarj gerilimi	2,5	V
Şarj akımı	1,6	A
Önerilen deşarj akımı	1,6	A
Hücre çapı	26	mm
Hücre boyu	650	mm

Test edilecek batarya paketi 26650 boyutlarında lityum demir fosfat bataryalardan oluşmuştur. Herbir bataryanın kapasitesi 3200 mAh olarak tasarlanmıştır. Fabrikada testlerde kullanılan bu batarya paketinin temin edildiğindeki kapasitesi 65 Ah seviyesindedir. Batarya paketi hücrelerine ayrılmadan testleri yapılmış ve kullanılmıştır.

Bu paketin SoH değeri $\frac{65}{70,4} = 92,33$ şekilde SoH=%92,33 olarak hesaplanmaktadır.

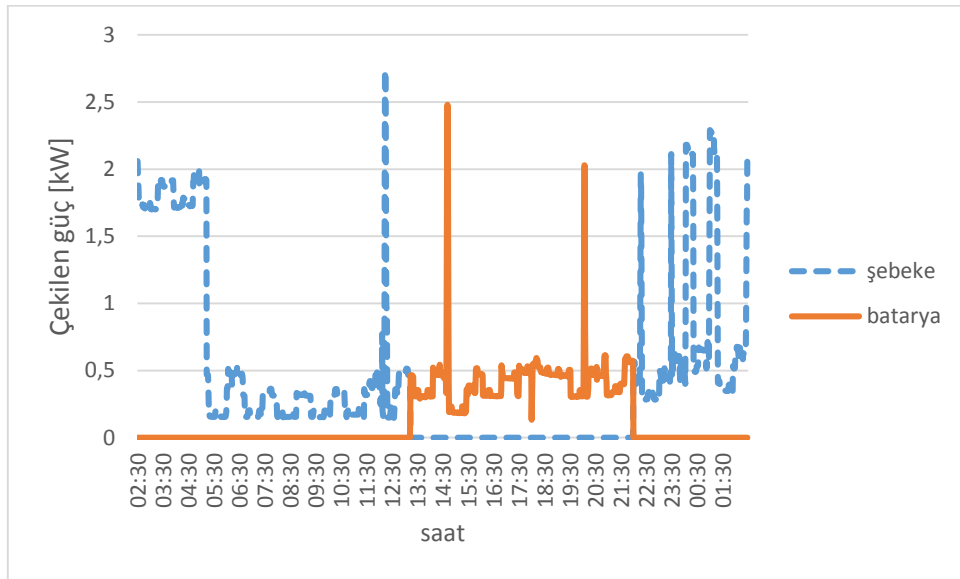


Şekil 3. 11 Batarya yönetim sistemi (BMS) görüntüsü



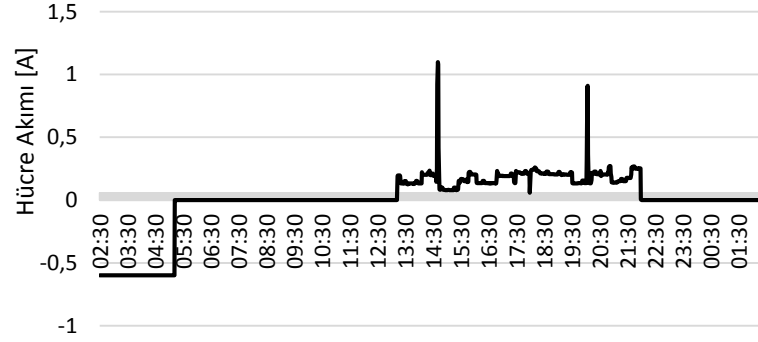
Şekil 3. 12 Batarya paketinde kullanılan BMS

Benzetim için ise %80 kapasiteli batarya kullanılmıştır. Gece şarj edilmek, gündüz en pahalı zamanı da kapsayacak şekilde saat 13.00 sularında deşarj edilmek suretiyle benzetim çalışması yapılmıştır. Şarj akımı sabit 0,6 A/hücre, deşarj akımı ise 4 kişilik evin tüketim verilerinin $\frac{1}{4}$ 'ü alınarak hesaplanmıştır. Burada gece boyunca bir tam şarj (%90 SoC) tamamlanması için proje için satın alınan paketten 4 adet kullanıldığı varsayılarak benzetim çalışması yapılmıştır. Simülasyonda kullanılan tüketimin 132W ila 2736W arasında değişmektedir. Bu evin günlük elektrik enerjisi tüketimi 10,56 kWh'tir.



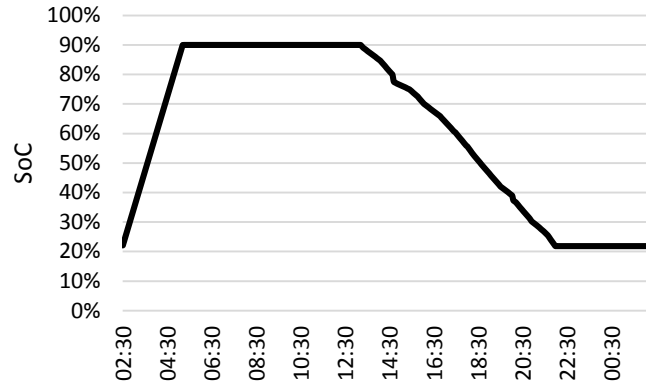
Şekil 3. 13 Şebekeden çekilen güç miktarı

Şekil 3. 12’de görüldüğü gibi batarya ile gündüz ve gece pik yükte besleme yapılmıştır. Geri kalan güç şebekeden çekilmiştir.



Şekil 3. 14 Batarya paketindeki hücre başına düşen akım

Benzetim çalışmasının planlanmasında bir güne bir çevrim yapılacak şekilde planlanmıştır. Benzetimdeki toplam gün sayısı başka bir çalışmada çevrim sayısı olarak kullanılabilir. Bu şekilde başka bir batarya modeli kullanılarak arasındaki fark görülebilecektir.



Şekil 3. 15 Bir günlük çalışmada SoC değişimi

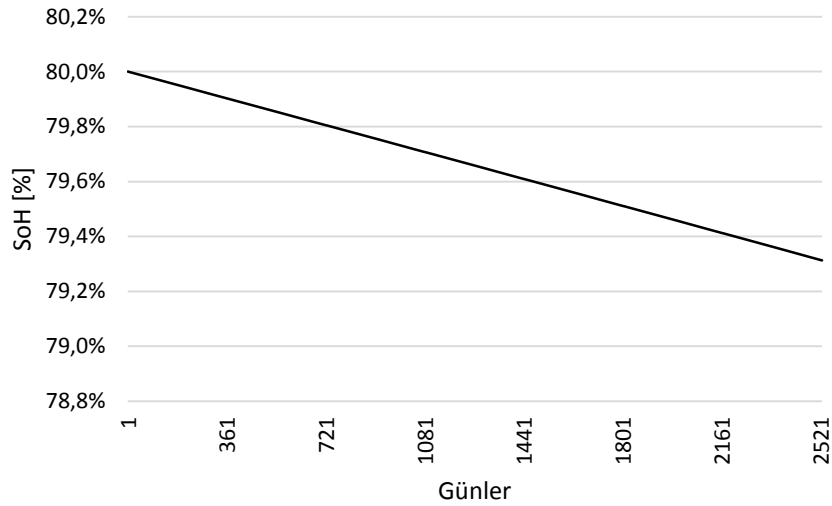
Benzetim çalışmasında her bir çevrimde %90 SoC’a kadar şarjı takip eden %20 SoC’a kadar deşarj yapılmıştır. SoC limitleri kapasite kaybına sebep olan ΔDoD değerini artırmamak için tespit edilmiştir [37]. Bataryanın bir gün içindeki SoC değişimi şekil 3.15’de verilmiştir. Batarya şarj kılavuzu dikkate alınarak batarya şarj edildikten sonra 1 saat dinlendirilmiştir. Kapasite kaybını dikkate alan batarya modeli kullanılarak her gün sonunda SoH hesaplaması yapılmıştır. Benzetim çalışması 6 yıla eşit süre boyunca hafta içi ve sonu tüketim farkı dikkate alınmadan yapılmıştır. Sıcaklık verisi Esenler, İstanbul bölgesine aittir. Modelin kısıtlamasından ötürü $8^{\circ}C$ ’nin altındaki sıcaklıklarda model çalışmamaktadır. Çalışmanın konusu olan evsel uygulamalarda batarya ev içerisinde

bulunacağından oda sıcaklığının çok altında bu gibi sıcaklıklara zaten inmeyecektir. Çizelge 3. 4’de görüldüğü gibi bataryanın benzetim sonucunda günlük enerjinin %35,7 si olan 3,77 kWh enerjiyi bataryadan sağlamak koşuluyla enerji masrafında günlük %28 kadar bir tasarruf sağlanmıştır.

Çizelge 3. 4 Bataryadan karşılanan enerji ve tasarruf miktarı

Günlük bataryadan karşılanan kısmı	3,77 kWh (%35,7)
Günlük enerji tasarrufu	%28

Bu 6 yıllık benzetim çalışması sonucunda elde edilen yaşlanma eğrisi şekil 3. 15’da verilmiştir.



Şekil 3. 16 Batarya SoH grafiği

Bundan sonraki çalışmalarda bataryaların raf yaşlanması modele eklenmeye çalışılacaktır.

3.4 Batarya Paketinin Şarj/Deşarj Test Sonuçları

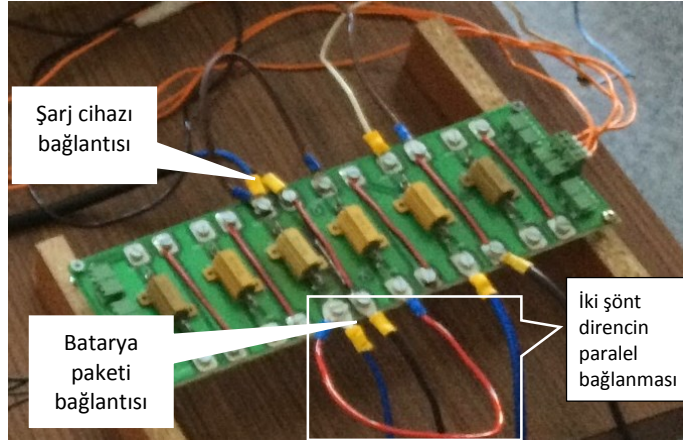
Proje kapsamında alınan batarya paketinde bazı testler yapılmıştır. Sonuçları bu bölümde verilmiştir.

3.4.1 Deşarj Testleri Sonuçları

3.4.1.1 Sabit Akım (CC) Deşarj Testleri

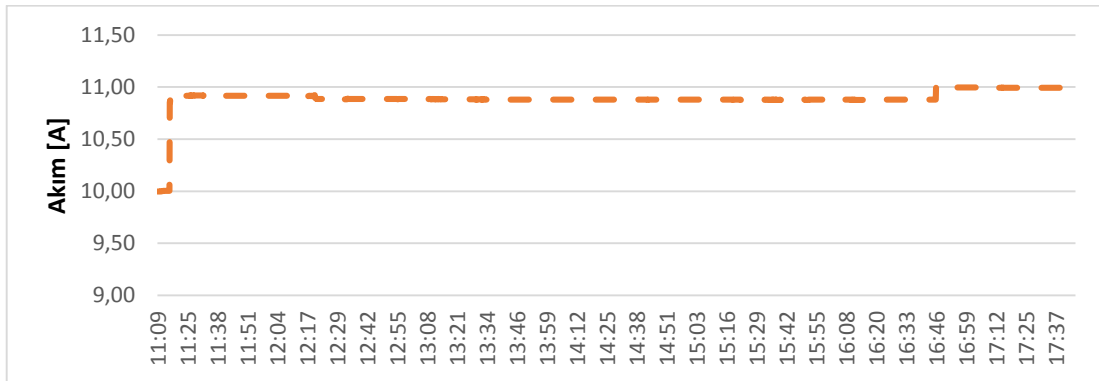
Bataryaların kapasitelerinin tespitinde sabit akım deşarj testi literatürde çokça kullanılan bir yöntemdir. Test edilecek batarya 65 Ah kapasiteye sahip olmasına rağmen 70 Ah’dan

fazla deşarj göstermesi ölçüm ile ilgili yapılan hatadan kaynaklanmaktadır. Şekil 3. 16’da görülen test düzeneğinde görülen ve akım ölçmek için kullanılan %1 kayıplı, 0,0215 ohm’luk dirençlerden iki tanesi paralel kullanılmış ve sadece birinden ölçüm alınmıştır.



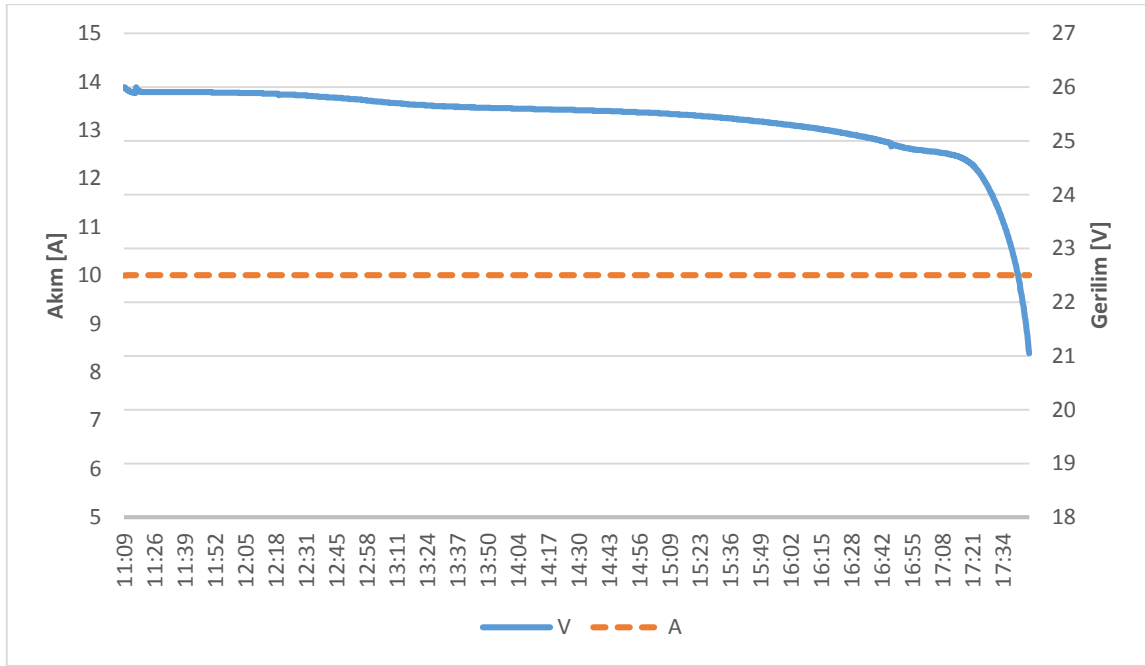
Şekil 3. 17 Deşarj test düzeneğinden veri toplamada kullanılan devre

Toplam akımı bulmak için bir direnç üzerindeki gerilim düşümü 2 ile çarpılmıştır. Ancak iki direnç üzerine akım eşit dağılmadığı sonradan fark edilmiştir. Bağlantı kablolarının dirençleri akımın eşit dağılmasına engel olmuştur. Tek direnç kullanarak tekrar yapılan ölçümler aşağıda verilmiştir. Şekil 3. 17’de batarya paketinin sabit 10A ile deşarjı görülmektedir. Yukarıda anlatılan durum sebebiyle grafikte 11A değeri baskın görülmektedir. Ancak yük bankasıyla çekilen güç sabit 10A’dır.



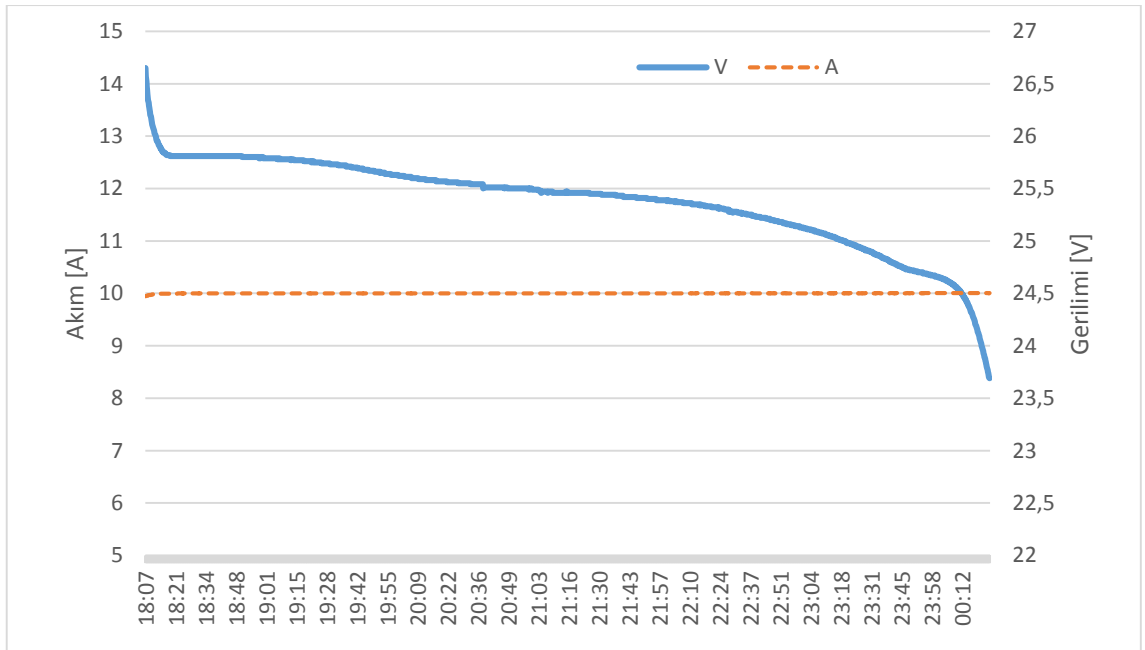
Şekil 3. 18 Batarya paketinin 10A CC deşarj akım grafiği

Şekil 3. 17’deki deşarja ait gerilim grafiği şekil 3. 18’de verilmiştir. Batarya paketi 26V gerilim ile deşarja başlamıştır. 24V gerilimden sonra gerilim hızla azalmaktadır. Aynı zamanda grafikte akım değeri de düzeltilip sabit 10A olarak gösterilmiştir.



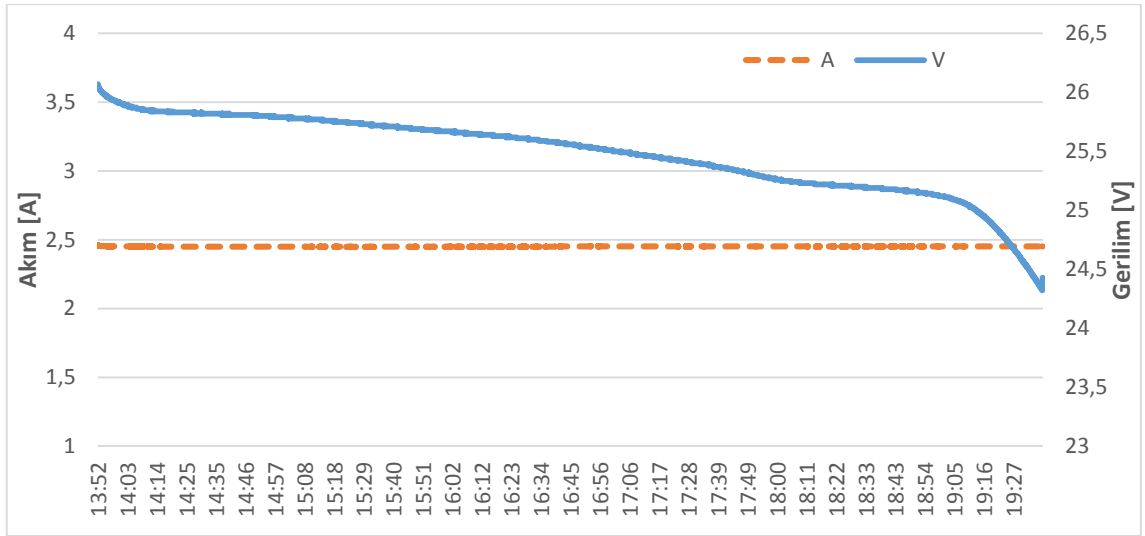
Şekil 3. 19 10A CC deşarj eğrileri

Bataryanın şekil 3. 18’de görülen sabit 10A ile deşarjı yaklaşık 6 saat sürmüştür.



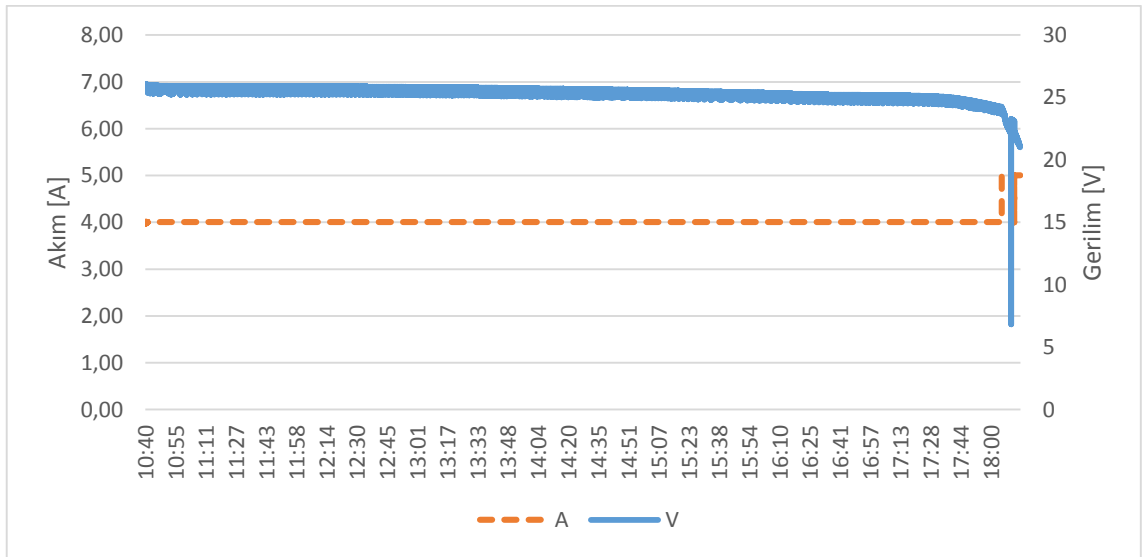
Şekil 3. 20 10A CC deşarj eğrileri

Batarya paketinin farklı yük akımlarında davranışını görebilmek için farklı sabit akımlarla deşarjlar yapılmıştır. Şekil 3. 20’de sabit 2,5A ile deşarjın hem akım, hem de gerilim eğrileri aynı grafikte verilmiştir.



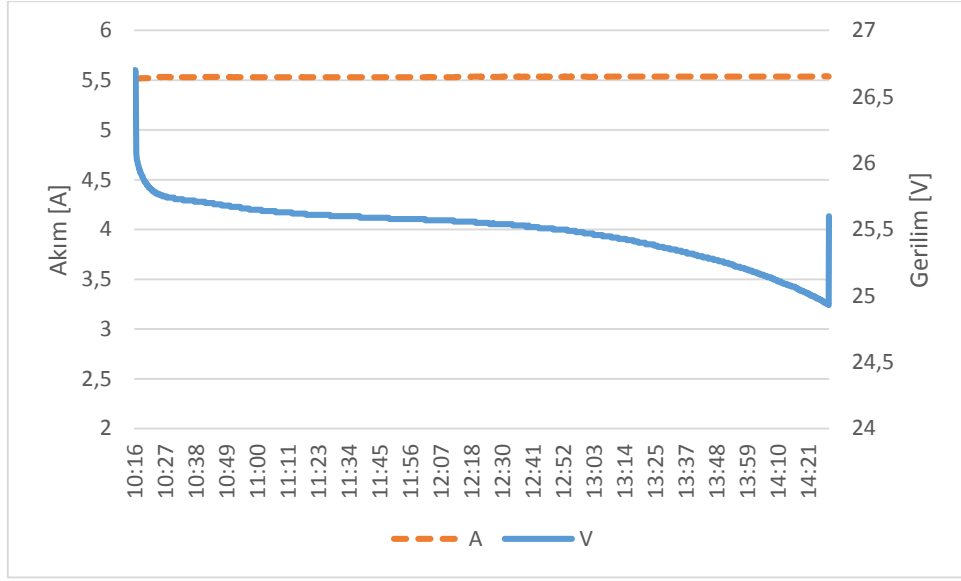
Şekil 3. 21 2,5A CC deşarj eğrileri

Şekil 3. 21’de sabit 4A ile deşarjın hem akım, hem de gerilim eğrileri aynı grafikte verilmiştir.



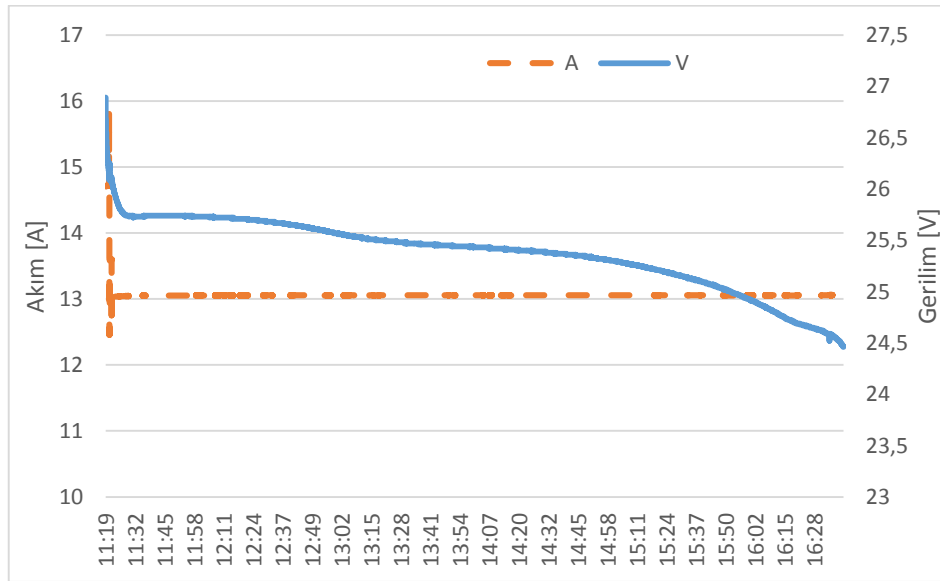
Şekil 3. 22 4A CC deşarj eğrileri

Şekil 3. 22’de sabit 5,5A ile deşarja ait eğriler verilmiştir.

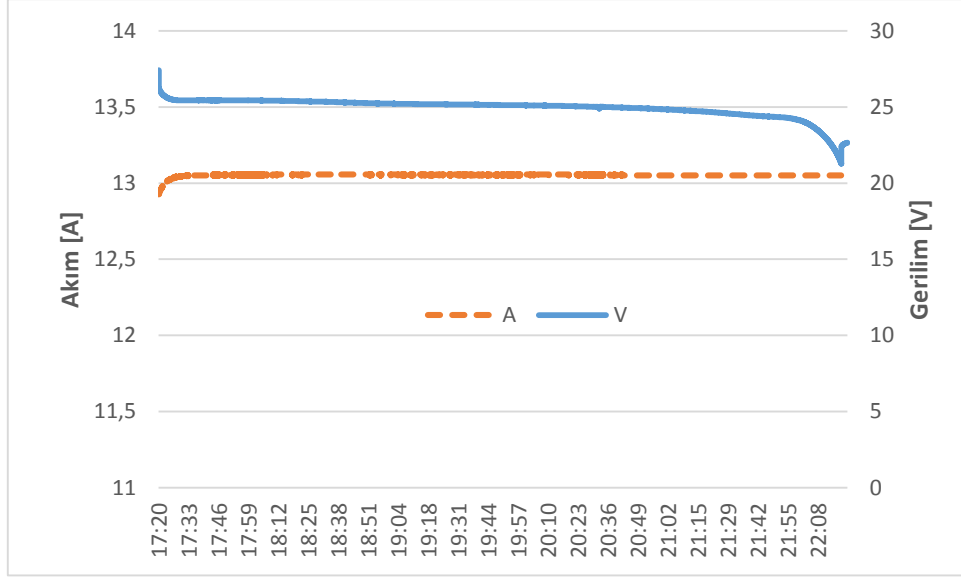


Şekil 3. 23 5,5A CC deşarj eğrileri

Şekil 3. 23'te batarya paketleyicisinin 65Ah'lık kapasiteyi alabilmek için önerdiği C oranı 0,2C (13A) ile sabit deşarja ait eğriler verilmiştir.



Şekil 3. 24 Sabit 13 A deşarj eğrileri



Şekil 3. 25 Sabit 13A deşarj testi (kapasite için referans)

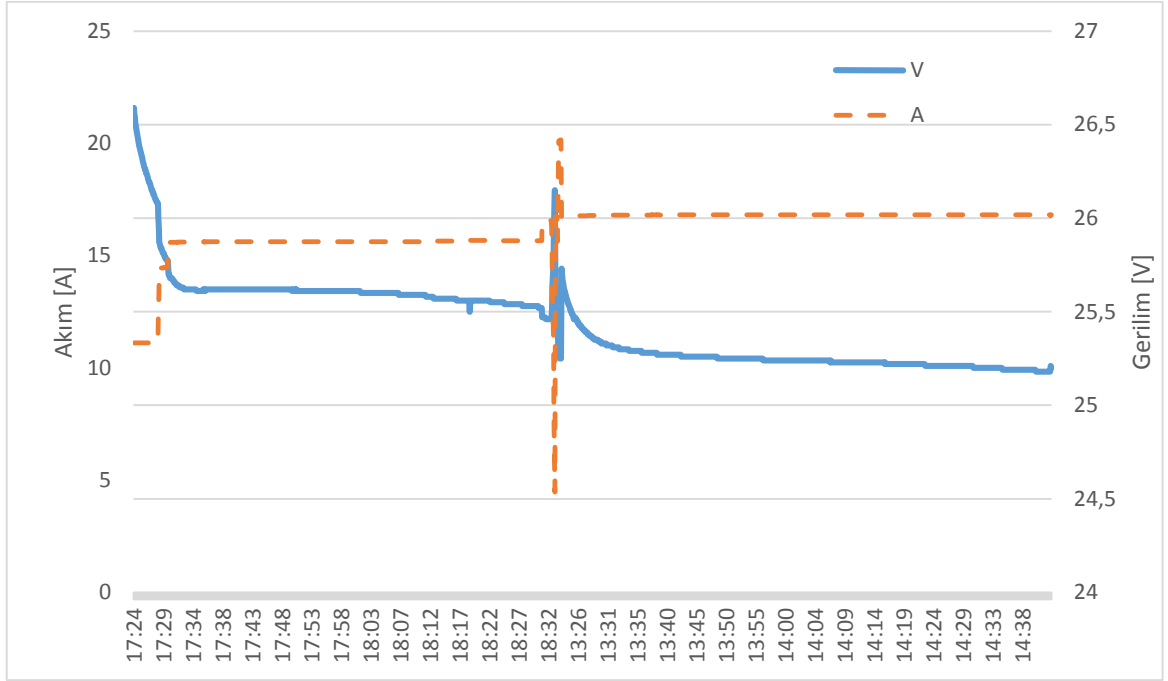
Tez çalışması boyunca yapılan deşarj testlerinin özeti çizelge 3. 5'te verilmiştir. Burada batarya paketini oluşturan hücrelerin yeni haldeki kapasitelerinden başlanıp satın alınan kapasite kayıplı batarya paketinin tez teslimine kadar ki kapasite ölçümü sonuçları SoH sütununda yüzde olarak verilmiştir.

Çizelge 3. 5 Sabit akım (CC) deşarj değerleri karşılaştırması

Deşarj değerleri	Gerilim [V]	Akım [A]	Kapasite [Ah]	Enerji [Wh]	SoH
Sıfır batarya için üretici verisi	28 → 20	35,2	70,40		100
İkinci kullanım başlangıcı	27 → 20	13	65		92,33
İkinci kullanım proje sonunda	27,4 → 21,28	13	64,92		92,22
İki şönt direnç kullanarak deşarj	26 → 21	11	70	1808	
Tek şönt direnç varsayarak deşarj	26 → 21	10	65,58	1664,4	
Tek şönt direnç kullanarak deşarj	26,65 → 23,5	10	62,81	1594	

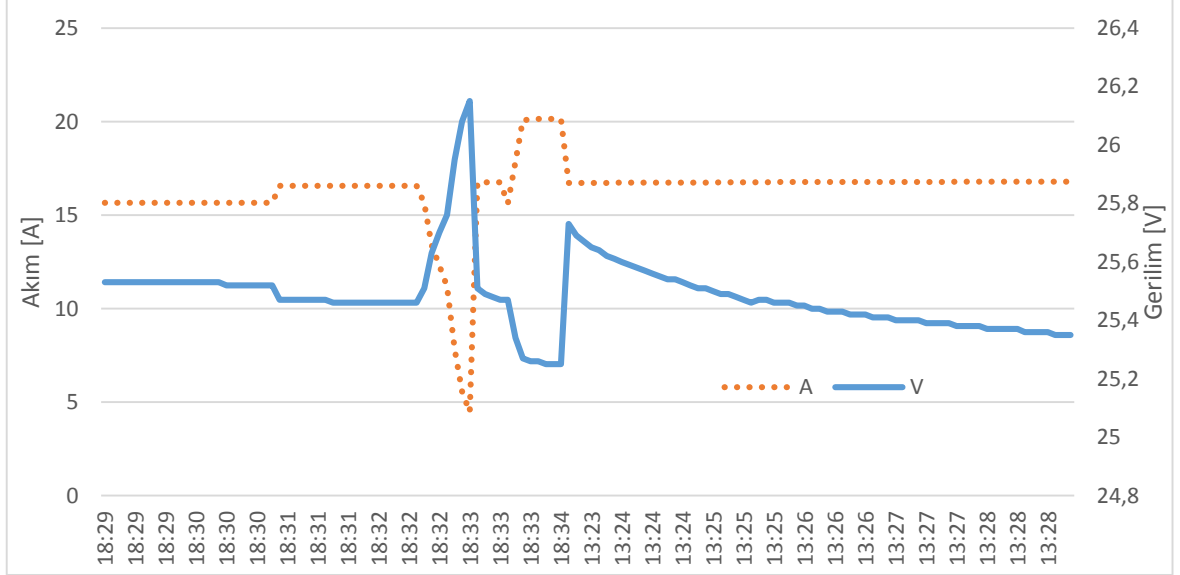
3.4.1.2 Sabit Olmayan Akım ile Yapılan Deşarjlar

Batarya paketinin sabit olmayan akımlarda uç geriliminin nasıl değiştiğini görebilmek için yapılan deşarj eğrileri şekil 3. 25'te ve 3. 26'da verilmiştir.



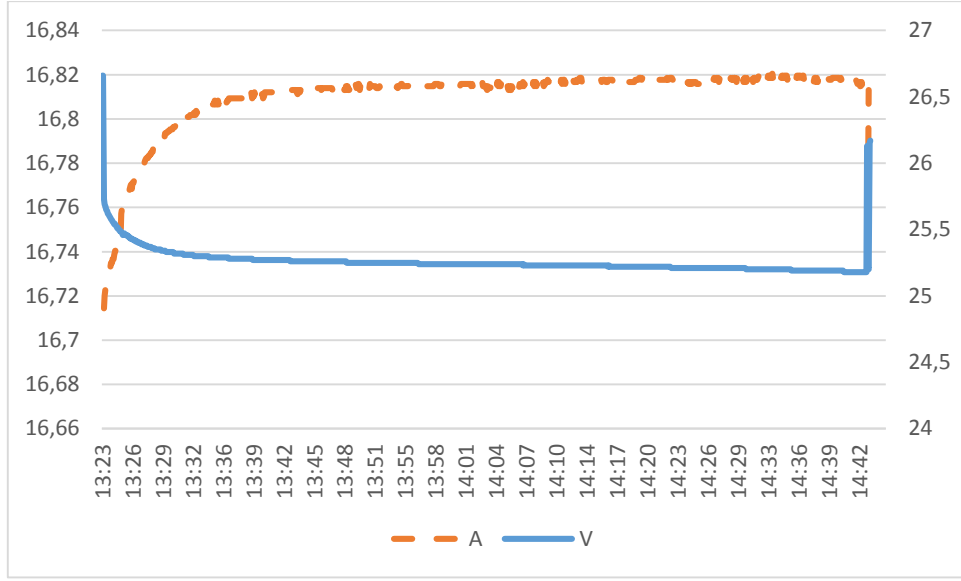
Şekil 3. 26 Akımdaki ani değişikliklerin gerilime etkisi

Batarya paketinden çekilen akıma göre batarya uç gerilimi beklenen şekilde değişmiştir.



Şekil 3. 27 Akımdaki ani değişikliklerin gerilime etkisi

Batarya paketi yük çekmeye başladığı anda sabit akıma ulaşmaya kadar uç gerilimindeki azalma şekil 2.28'de görülmektedir. Buna benzer bir durum bataryanın yük akımı kesilince uç geriliminin artması şeklinde görülmektedir.



Şekil 3. 28 Açık devre geriliminin yük altında değişimi

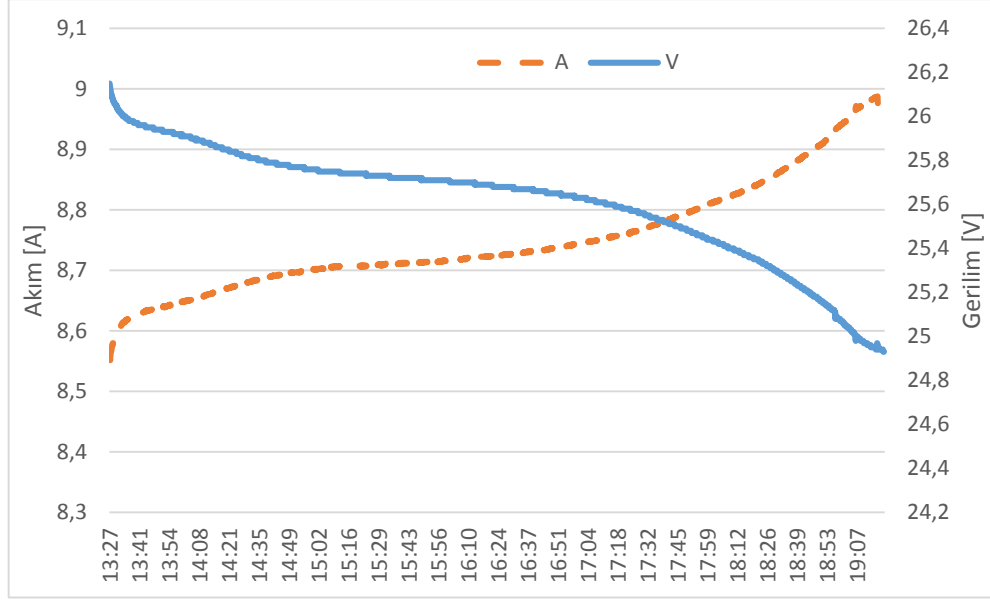
3.4.1.3 Sabit Güç (CP) Deşarj:

Batarya paketi tez çalışması süresince sabit akımla yapılan kapasite test deşarjlarının yanı sıra programlanabilir yük bankası yardımıyla farklı sabit koşullarda da deşarj edilmiştir. Şekil 3. 28’de Chroma 18A 350V programlanabilir yük bankası görülmektedir.

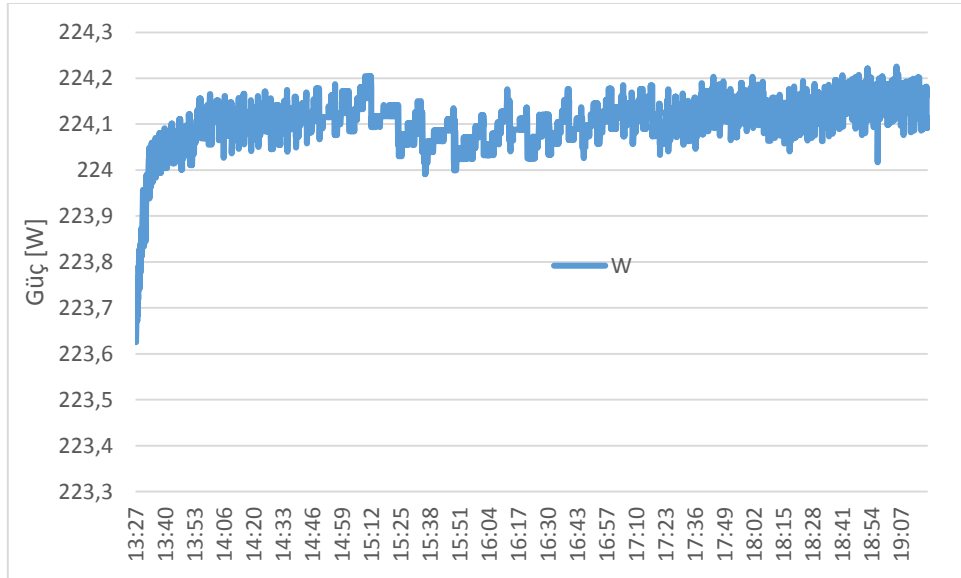


Şekil 3. 29 Programlanabilir yük bankası

Batarya paketinin $10A \times 24V = 240W$ ’lık gücü sabit akım ile deşarjı esnasında elde edilen eğriler bölüm 3.4.1.1’de verilmiştir. Burada batarya paketinin $224W$ ’lık sabit güç ile deşarj edildiğinde uç geriliminin ve akımının değişimi şekil 3.30 ve 3.31’de verilmiştir.



Şekil 3. 30 Sabit güç (CP:224W) deşarj eğrileri



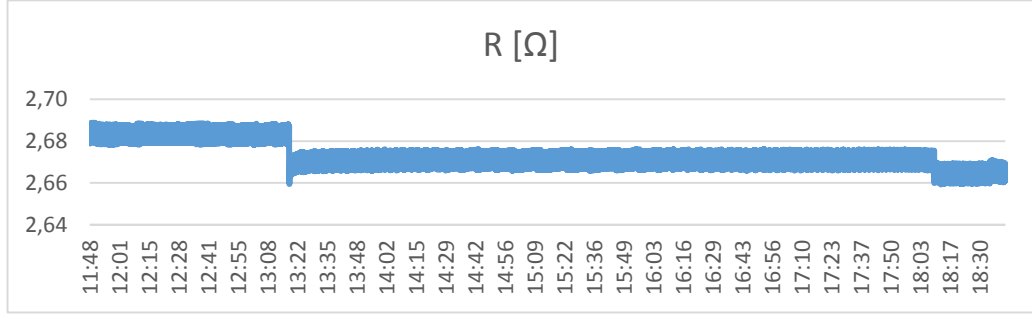
Şekil 3. 31 Sabit güç eğrisi

Batarya paketinin deşarjını gerçekleştiren programlanabilir yük bankasındaki akım sınır değeri 13A'e ayarlanmıştır. Bunun sebebi sabit gücü çekmek için azalan uç gerilimine karşılık çekilen akımın kontrolsüzce artması engellemektir.

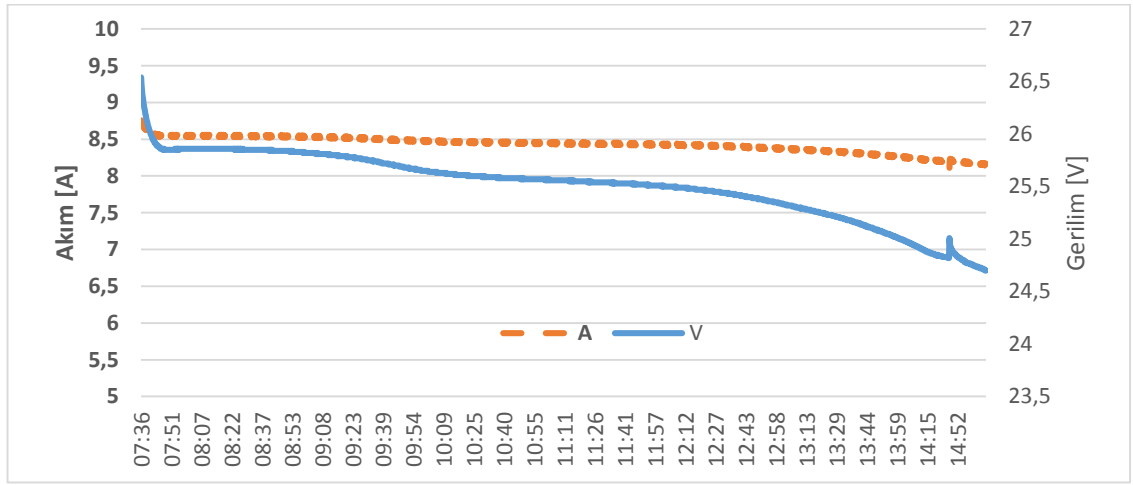
3.4.1.4 Sabit Direnç (CR) Deşarj:

Batarya paketi reostaların seri ve paralel bağlanması ile deşarj edilmiştir. Ancak reostaların dirençleri sıcaklık ile değişmesi sebebiyle sabit direnç için doğru deşarj testi

yapılamamıştır. Programlanabilir yük bankası ile sabit dirençte batarya paketi deşarj edilmiştir. İlgili deşarj eğrileri şekil 3.32 ve 3.33'te verilmiştir.

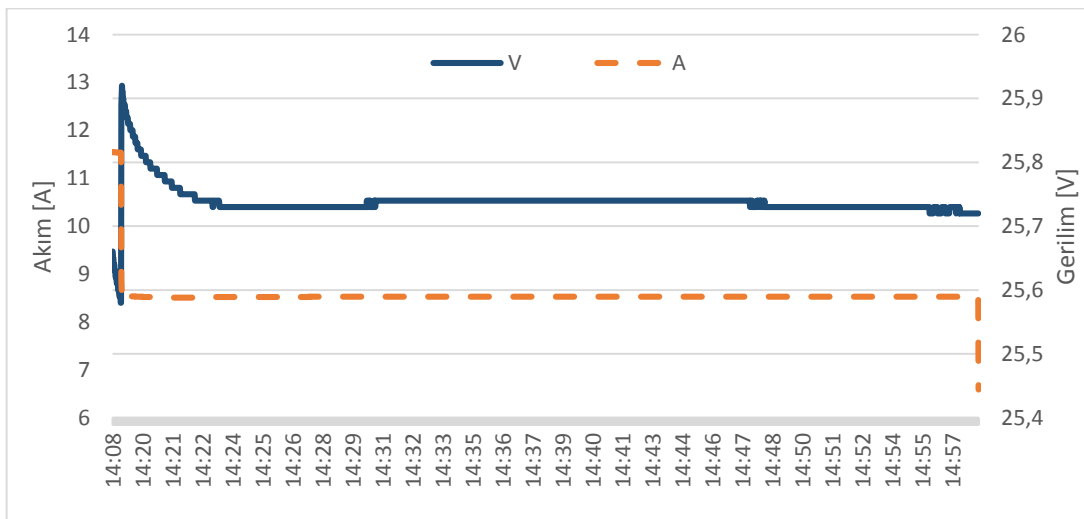


Şekil 3. 32 Sabit direnç (CR) deşarj direnç eğrisi



Şekil 3. 33 Sabit direnç (CR) deşarj eğrileri

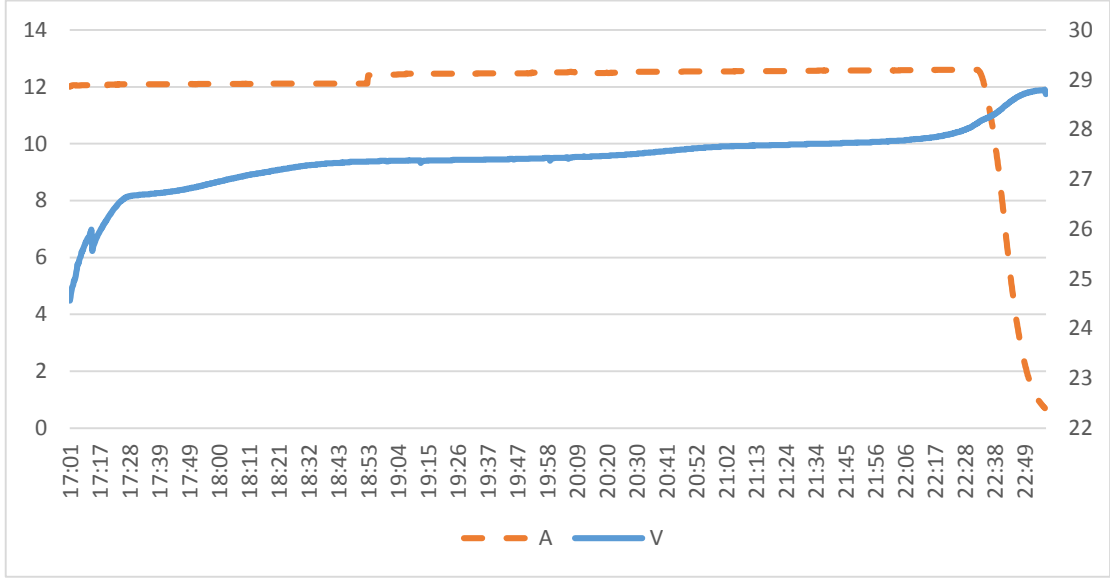
Farklı bir dirençte (3Ω) yapılan deşarja ait eğriler şekil 3.34'te verilmiştir.



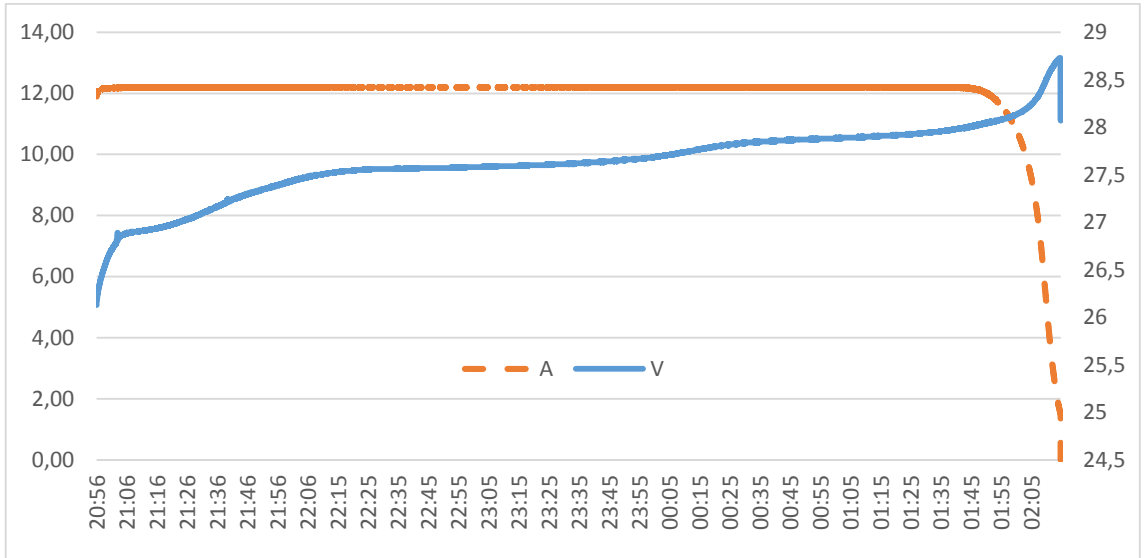
Şekil 3. 34 Sabit direnç (3Ω) deşarj eğrileri

3.4.2 Şarj Testleri Sonuçları

Üreticinin önerdiği batarya şarj akımı 12A'dır. Bu akım seviyesinde şarj cihazı temin edilmiştir. 12A CC-CV lityum batarya şarj cihazı ile yapılan 2 farklı şarja ait eğriler şekil 3.35 ve 3.36'da verilmiştir.



Şekil 3. 35 Şarj cihazıyla şarj eğrileri CC: 12A

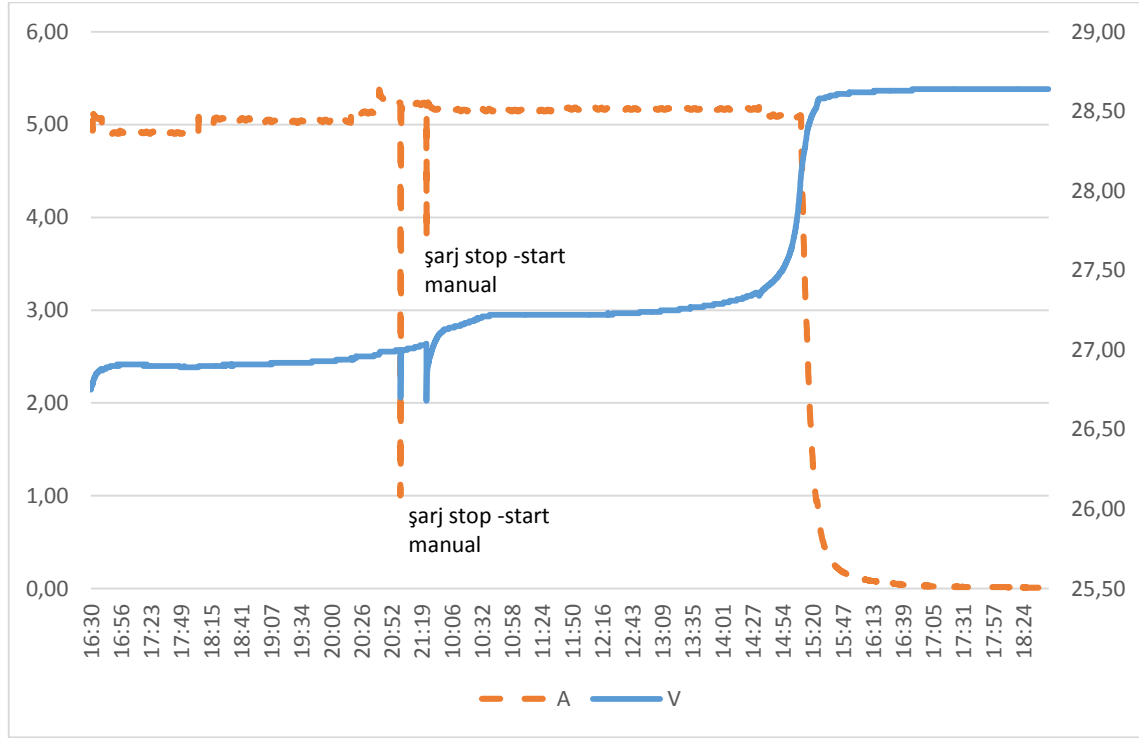


Şekil 3. 36 Şarj cihazıyla şarj eğrileri CC: 12A

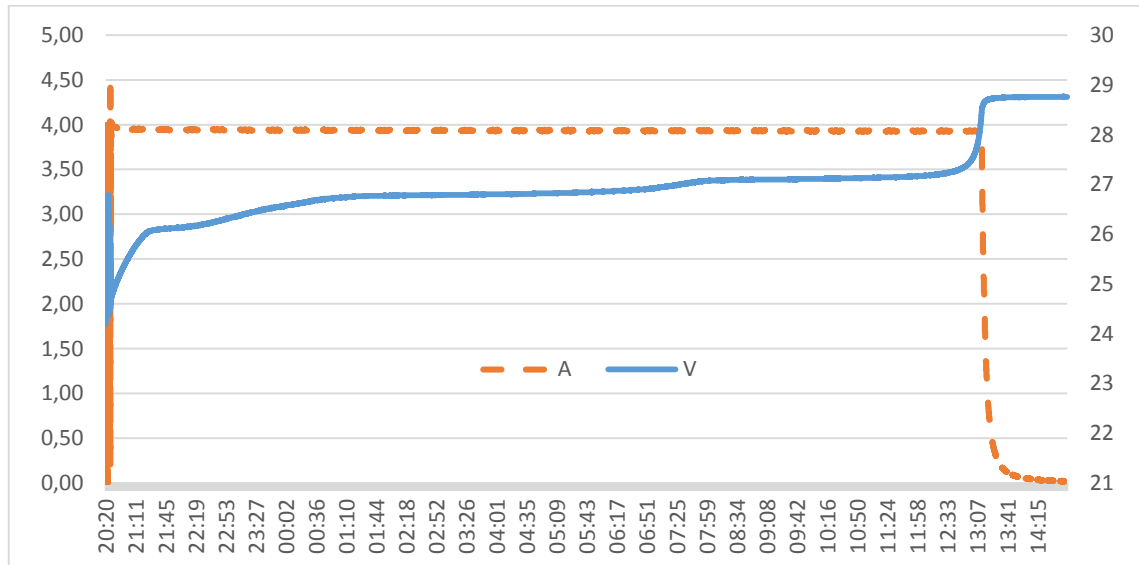
Lityum bataryalar sabit akım-sabit gerilim (CC-CV) yöntemiyle şarj edilmektedirler. Şekil 3.35 v 3.36'da şarj akımını sabit olduğu ve sonra azaldığı bölgeler görülmektedir.

Batarya paketinin verimi ve kapasitesi ölçülürken farklı akım seviyelerinde şarj ve deşarja ihtiyaç vardır. Bunun için ayarlanabilir DC güç kaynağı kullanılmıştır. Ayarlanabilir güç

kaynağı ile 5A, 4A ve 3,5A akım seviyelerinde yapılan şarjlar sırasıyla şekil 3.37, 3.38 ve 3.39’da verilmiştir.

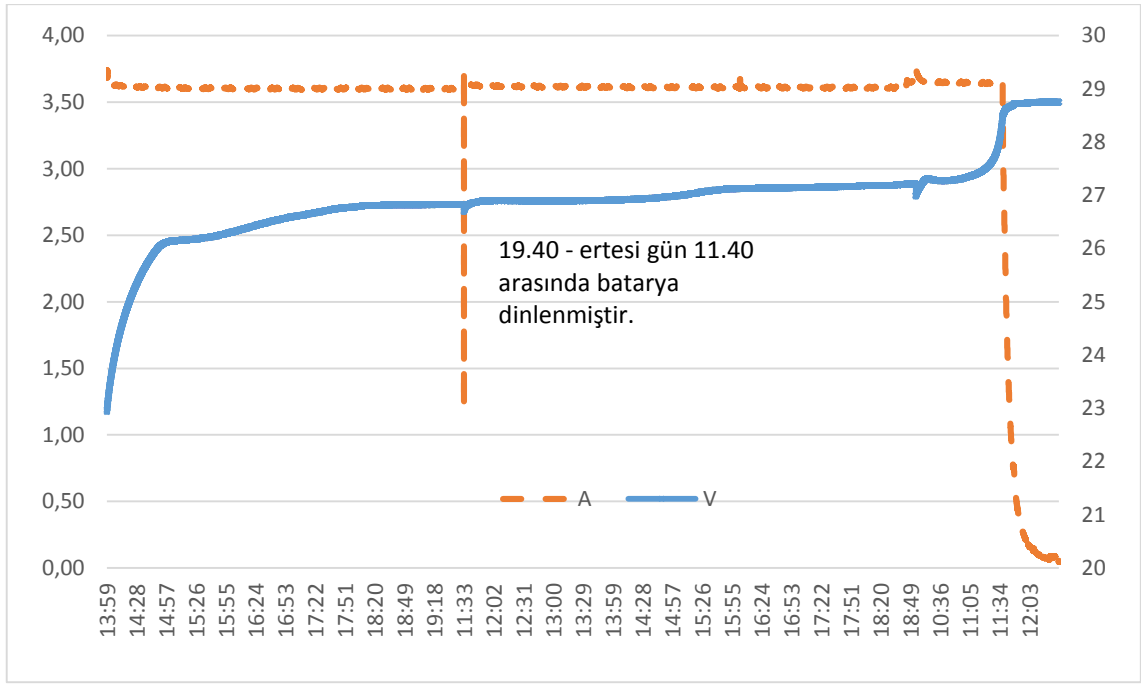


Şekil 3. 37 Güç kaynağı ile şarj CC:5A



Şekil 3. 38 Güç kaynağı ile şarj CC:4A

Buradaki eğrilerde şarj esnasında CC-CV bölgeleri daha belirgin olarak görülmektedir. Sabit akım (CC) bölgesinde akım sabitken gerilim artmış, sabit gerilim (CV) bölgesinde ise gerilim sabitken akım azalmıştır.



Şekil 3. 39 Güç kaynağı ile şarj CC:3,5A

Batarya paketinin 5A ve 3,5A ile yapılan şarj işlemleri durdurulmuş ve sonra tekrar başlatılmıştır. Bu esnalaradaki akım ve gerilimin değişimi şekil 3.37 ve 3.39'da görülmektedir. Şarj kesildiğinde gerilimin hızlıca azaldığı ve şarj tekrar başlatıldığında hızla arttığı görülmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde EA satışları giderek artmaktadır. EA'da 5-8 yıl kullanımdan sonra başlangıç kapasiteleri yaklaşık %20 oranında azalacağından araçtan sökülecek bu bataryalar ikinci kullanıma gireceklerdir. EA satışları dikkate alındığında gelecek 10 yıl içinde EA'dan sökülecek çok sayıda batarya olacaktır. Bu bataryalarla yapılacak yerel depolama üniteleri ile Türkiye'de uygulanan 3 zamanlı tarifeyle %28 enerji tasarrufu mümkün olduğu görülmüştür. Daha sonraki yıllarda anlık enerji fiyatlandırılmasına geçildiğinde bataryalara en ucuz anda şarj edilip enerjinin pahalı olduğu zaman diliminde kullanmak veya şebekeye satmak suretiyle günlük tasarruf daha da artırılabilir. Bunun yanında düşük güçlü araçlarda da EA'dan sökülen bataryalar kullanılabilir.

İkinci kullanım batarya modeline raf yaşlanmasının sonuçları daha detaylı irdelenmelidir. Farklı boyutlarda yapılacak paketlemeler (farklı gerilim, akım, güç) üzerine yeni çalışmalar yapılmalıdır. Yaşlanması farklı, kalan kapasite miktarları farklı hücrelerin birlikte nasıl çalışacağı araştırılacak konulardandır. TÜBİTAK 1003 öncelikli alanlar projesi kapsamında EA şarj istasyonları için şarj sisteminde EA'dan sökülen bataryaların kullanımında yaşlanma etkisi incelenecektir.

KAYNAKLAR

-
- [1] Divya, K.C. ve Østergaard, J., (2009). "Battery Energy Storage Technology for Power Systems—an Overview", *Electric Power Systems Research*, 79(4): 511-520.
 - [2] Wood, E., Alexander, M. ve Bradley, T.H., (2011). "Investigation of Battery End-of-Life Conditions for Plug-in Hybrid Electric Vehicles", *Journal of Power Sources*, 196(11): 5147-5154.
 - [3] Ramoni, M.O. ve Zhang, H.-C., (2013). "End-of-Life Issues and Options for Electric Vehicle Batteries", *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15(6): 881-891.
 - [4] Williams, B., (2012). "Second Life for Plug-in Vehicle Batteries Effect of Grid Energy Storage Value on Battery Lease Payments", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2287: 64-71.
 - [5] Tong, S.J., Same, A., Kootstra, M.A. ve Park, J.W., (2013). "Off-Grid Photovoltaic Vehicle Charge Using Second Life Lithium Batteries-an Experimental and Numerical Investigation", *Applied Energy*, 104: 740-750.
 - [6] Alimisis, V. ve Hatzigargyriou, N.D., (2013). "Evaluation of a Hybrid Power Plant Comprising Used Ev-Batteries to Complement Wind Power", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(2): 286-293.
 - [7] Ahmadi, L., Yip, A., Fowler, M., Young, S.B. ve Fraser, R.A., (2014). "Environmental Feasibility of Re-Use of Electric Vehicle Batteries", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 6: 64-74.
 - [8] Beer, S., Gómez, T., Dallinger, D., Momber, I., Marnay, C., Stadler, M. ve Lai, J., (2012). "An Economic Analysis of Used Electric Vehicle Batteries Integrated into Commercial Building Microgrids", *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1): 517-525.
 - [9] Neubauer, J. ve Pesaran, A., (2011). "The Ability of Battery Second Use Strategies to Impact Plug-in Electric Vehicle Prices and Serve Utility Energy Storage Applications", *Journal of Power Sources*, 196(23): 10351-10358.
 - [10] Chen, T.-H., Hsieh, T.-Y., Yang, N.-C., Yang, J.-S. ve Liao, C.-J., (2013). "Evaluation of Advantages of an Energy Storage System Using Recycled Ev Batteries", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 45(1): 264-270.
 - [11] Yağcitekin, B., Güler, Ö. ve Çali, Ü., (2012). "An Energy Management Strategy for a Wind Power Plant Based on Energy Storage and Wind Power Prediction", *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 7(2): 152-161.
 - [12] SAE International, (2014). *Second Life Battery Pack as Stationary Energy Storage for Smart Grid*, Yayın No: 2014-01-0342, California

- [13] Gladwin, D.T., Gould, C.R., Stone, D.A. ve Foster, M.P., (2013). "Viability of "Second-Life" Use of Electric and Hybridelectric Vehicle Battery Packs", Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, 10-13 Nov. 2013, Vienna
- [14] Hamidi, A., Weber, L. ve Nasiri, A., (2013). "Ev Charging Station Integrating Renewable Energy and Second-Life Battery", International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 20-23 October 2013, Madrid, Spain
- [15] Hart, P.J., Kollmeyer, P.J., Juang, L.W., Lasseter, R.H. ve Jahns, T.M., (2014). "Modeling of Second-Life Batteries for Use in a Certs Microgrid", Power and Energy Conference at Illinois (PECI), Feb. 28 2014-March 1 2014, Champaign, IL
- [16] Keeli, A. ve Sharma, R.K., (2012). "Optimal Use of Second Life Battery for Peak Load Management and Improving the Life of the Battery", IEEE International Electric Vehicle Conference, 4-8 March 2012, Greenville, SC
- [17] Lacey, G., Putrus, G. ve Salim, A., (2013). "The Use of Second Life Electric Vehicle Batteries for Grid Support", IEEE EuroCon 2013, 1-4 July 2013, Zagreb
- [18] United States Advanced Battery Consortium (USABC), (2015). Battery Test Manual for Electric Vehicles Rev. 3, Yayın No: INL/EXT-15-34184, Idaho
- [19] Peterson, S.B., Whitacre, J.F. ve Apt, J., (2010). "The Economics of Using Plug-in Hybrid Electric Vehicle Battery Packs for Grid Storage", Journal of Power Sources, 195(8): 2377-2384.
- [20] Sandia National Laboratories, (2003). Final Report: Technical and Economic Feasibility of Applying Used Ev Batteries in Stationary Applications, Yayın No: SAND2002-4084, California
- [21] Lih, W.-C., Yen, J.-H., Shieh, F.-H. ve Liao, Y.-M., (2012). "Second Use of Retired Lithium-Ion Battery Packs from Electric Vehicles: Technological Challenges, Cost Analysis and Optimal Business Model", International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), 4-6 June 2012, Taichung
- [22] Thein, S. ve Chang, Y.S., (2014). "Decision Making Model for Lifecycle Assessment of Lithium-Ion Battery for Electric Vehicle – a Case Study for Smart Electric Bus Project in Korea", Journal of Power Sources, 249: 142-147.
- [23] Samolyk, M.M., (2013). Development of an Algorithm for Estimating Lead-Acid Battery State of Charge and State of Health, Master of Science, Blekinge Institute of Technology, Blekinge
- [24] Farmann, A., Waag, W., Marongiu, A. ve Sauer, D.U., (2015). "Critical Review of on-Board Capacity Estimation Techniques for Lithium-Ion Batteries in Electric and Hybrid Electric Vehicles", Journal of Power Sources, 281: 114-130.
- [25] Krieger, E.M. ve Arnold, C.B., (2012). "Effects of Undercharge and Internal Loss on the Rate Dependence of Battery Charge Storage Efficiency", Journal of Power Sources, 210: 286-291.
- [26] The Idaho National Laboratory, (2010). U.S. Department of Energy Vehicle Technologies Program Battery Test Manual for Plug-in Hybrid Electric Vehicles, Yayın No: INL/EXT-07-12536, Idaho
- [27] Ahmadi, L., Fowler, M., Young, S.B., Fraser, R.A., Gaffney, B. ve Walker, S.B., (2014). "Energy Efficiency of Li-Ion Battery Packs Re-Used in Stationary Power Applications", Sustainable Energy Technologies and Assessments, 8: 9-17.

- [28] Kassem, M., Bernard, J., Revel, R., Péliissier, S., Duclaud, F. ve Delacourt, C., (2012). "Calendar Aging of a Graphite/Lifepo4 Cell", *Journal of Power Sources*, 208: 296-305.
- [29] Belt, J.R., Ho, C.D., Motloch, C.G., Miller, T.J. ve Duong, T.Q., (2003). "A Capacity and Power Fade Study of Li-Ion Cells During Life Cycle Testing", *Journal of Power Sources*, 123(2): 241-246.
- [30] Bloom, I., Cole, B.W., Sohn, J.J., Jones, S.A., Polzin, E.G., Battaglia, V.S., Henriksen, G.L., Motloch, C., Richardson, R., Unkelhaeuser, T., Ingersoll, D. ve Case, H.L., (2001). "An Accelerated Calendar and Cycle Life Study of Li-Ion Cells", *Journal of Power Sources*, 101(2): 238-247.
- [31] Lam, L., (2011). A Practical Circuit Based Model for State of Health Estimation of Li Ion Battery Cells in Electric Vehicles, Master of Science, University of Technology Delft, Delft
- [32] Barré, A., Deguilhem, B., Grolleau, S., Gérard, M., Suard, F. ve Riu, D., (2013). "A Review on Lithium-Ion Battery Ageing Mechanisms and Estimations for Automotive Applications", *Journal of Power Sources*, 241: 680-689.
- [33] Barré, A., Suard, F., Gérard, M., Montaru, M. ve Riu, D., (2014). "Statistical Analysis for Understanding and Predicting Battery Degradations in Real-Life Electric Vehicle Use", *Journal of Power Sources*, 245: 846-856.
- [34] Camci, F., Ozkurt, C., Toker, O. ve Atamuradov, V., (2015). "Sampling Based State of Health Estimation Methodology for Li-Ion Batteries", *Journal of Power Sources*, 278: 668-674.
- [35] Erdinc, O., Vural, B. ve Uzunoglu, M., (2009). "A Dynamic Lithium-Ion Battery Model Considering the Effects of Temperature and Capacity Fading", *International Conference on Clean Electrical Power*, 9-11 June 2009, Capri
- [36] Chen, M. ve Rincón-Mora, G.A., (2006). "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(2): 504-511.
- [37] Lam, L., Bauer, P. ve Member, S., (2013). "Practical Capacity Fading Model for Li-Ion Battery Cells in Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(12): 5910-5918.

BATARYA MODELİNİN MATLAB KODLARI

```

clear
load PeakLoad.mat;
load SoHL.mat;
load Temp30dklik.mat;
%load Temp1dkNisMay.mat;
a=1;
SOH=0; SOC=0;
set_param('aging_model_150109/SoH','Value','SoHL(1,1)');
set_param('aging_model_150109/SoCinit','Value','SoHL(1,4)');
p=1;
for p=1:1:360
sim('aging_model_150109', 36542);

delAh = 6;    Ah = 0;    Count = 0;    g = 1.00;
for i=1:length(ah)
    if ah(i) > Ah + delAh
        avg=trapz(ah(g:i),soc(g:i))/(ah(i)-ah(g));
        Ah = ah(i);
        Count = Count + 1;
        socavg(Count,1)=i;
        socavg(Count,2)=Ah;
        socavg(Count,3)=avg;
        soc(g:i,2)=(soc(g:i,1)-avg);
        g=i;
        socavg(Count,4)=g;
    else
        avg=trapz(ah(g:length(ah)),soc(g:length(ah)))/(ah(length(ah))-
ah(g));
        socavg(Count+1,1)=i;
        socavg(Count+1,2)=ah(i);
        socavg(Count+1,3)=avg;
        soc(g:i,2)=(soc(g:i,1)-avg);
        socavg(Count+1,4)=g;
    end
    soc(i,3)=(soc(i,2).^2);
end
for m=1:size(socavg,1)
dev=sqrt(3/(ah(socavg(m,1))-
ah(1))*trapz(ah(1:socavg(m,1)),soc(1:socavg(m,1),3)));
socavg(m,5)=dev;
end
for k=1:Count+1
    ks1=-4.092e-4; ks2=-2.167; ks3=1.408e-5; ks4=6.130;

```

```

socavg(k,6)=((ks1*socavg(k,5)*exp(ks2*socavg(k,3))+ks3*exp(ks4*socavg(k,5)))*exp(-78.06/8.3144621/10^3*(1/mean(Temp30dklik(:,p))+273.15-1/25+273.15)))*socavg(k,2);
end
totalaging=sum(socavg(1:k,6));
SoHL(a+1,2)=totalaging;

SOH=(SoHL(a,1)-(totalaging)/0.2/3);
SoHL(a+1,1)=SOH;
SoHL(a+1,3)=ah(length(ah));
SOC=soc(length(ah),1);
SoHL(a+1,4)=SOC;
ans=[SOH totalaging SOC p]

set_param('aging_model_150109/SoH','Value','SOH');
set_param('aging_model_150109/SoCinit','Value','SOC');
a=a+1;
k=0;
p=p+1;
clear soc
clear ah
clear socavg
end

```

BATARYA TEKNİK ÖZELLİKLERİ

Çizelge B.1 Yeni LFP batarya hücresi teknik bilgileri



Lithium-ion Battery Series

DOC NO: PS-LI015
REV : A
PAGE: 3 of 7

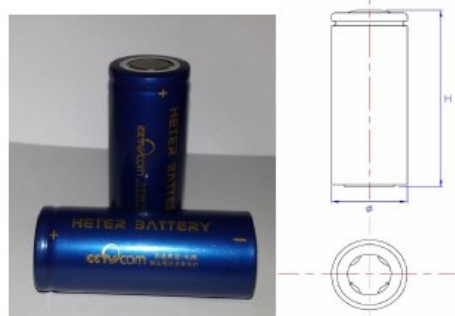
1. Application Scope

This product specification describes product performance indicators of Lithium-ion battery produced by Heter Electronics Group.

2. Model

HTCF26650-3200mAh-3.2V

3. Appearance and Dimension



Item	Dimension (mm)
Diameter (Φ)	26.2±0.1
Height (H)	65.6±0.4

4. Major Technical Parameters

No.	Item	Standard	Note
1	Standard Capacity	3200mAh	0.5C,(current value of 3200mA at 1C)
2	Capacity Range	3100~3300mAh	0.5C
3	Standard Voltage	3.2 V	
4	Alternating Internal Resistance	≤30mΩ	with PTC
5	Charge Conditions	Cut-off Voltage 3.65±0.05V	constant current charge to 3.65V at 0.5C, constant voltage charge to stop until 0.01C mA
		Cut-off Current 0.01C	
6	Discharge Cut-off Voltage	2.5V	
7	Cycle Characteristic	2000 times	100% DOD, the residual capacity is no less than 80% of rated capacity at 1C rate.
8	Max. Continuous Discharge Current	9.6A	
9	Pulse Discharge Current	15A, 5s	
10	Working Temperature	Charge: 0°C~55°C Discharge: -20°C~60°C	
11	Storage Temperature	-20°C ~ 45°C	
12	Battery Weight	86 g (Approx.)	

Çizelge B.2 Kapasite kayıplı EA batarya paketi özellikleri

Items	Standard	Comments
Nominal voltage	25.6V	
Typical capacity	65±3Ah	At 0.2C discharge rate
Max continuous discharge current	30A	
Max Instantaneous discharge current	130±10A	12±5ms
Discharge cut-off voltage	About 20V	
Charge voltage	28.8±0.1V	Charge mode: CC/CV , Use a constant current, constant voltage(CC/CV) please use special lithium charger.
Charge current	≤18A	
Inner resistance	≤40mΩ	Between positive and negative polar
Operation temperature range	Charge	0℃ ~ +45℃
	Discharge	-20℃ ~ +60℃
		When the environment temperature is higher than 45℃ , please pay attention to ventilation and heat rejection.
Storage temperature range	0℃ ~ 40℃ (Capacity 80%)	Recommended long-term storage temperature is 15~25℃
humidity	5%≤RH≤85%	
Shell material	Iron material	
Weight	19.0±0.1Kg	
Size (L*W*H)	(283±2) * (148±2) * (250±2) mm	
Protection function	Over charge protection、Over discharge protection、Over current protection、 Temperature protection、 Balanced function	

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Said Mirza TERCAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 05.01.1987/İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : stercan@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik Mühendisliği	İstanbul Teknik Üniversitesi	2012
Lise	Fen Bilimleri	Necip Fazıl Kısakürek Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012-~	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2011-2012	Dalkıranlar Yapı Taahhüt A.Ş.	Proje ekipleri şefi

YAYINLARI

Bildiri

1. Tercan, S.M., Vural, B., Gökalp, E., (2014). “Supplying Residential Loads Using Second-Life Electric Vehicle Batteries”, II. International Energy Technologies Conference (ENTECH '14), 22-24 December 2014, İstanbul.

Kitap

1. İnan, A., Tercan, S.M., Kara, H., (2012). Orta Gerilim Transformatör Merkezlerinin Projelendirilmesi, Birsan Yayınevi, İstanbul

Proje

1. Elektrikli Araç Bataryalarının Akıllı Şebekeler Kapsamında Depolama Ünitesi Olarak Yeniden Değerlendirilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAPK), Proje No: **2014-04-02-YL02**, Bütçe: 7.000 TL (Tez öğrencisi)

ÖDÜLLERİ

1. TÜBİTAK 2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurtiçi Yüksek Lisans Bursu, Kullanılmış Elektrikli Araç Bataryalarının Akıllı Şebekeler Kapsamında Depolama Ünitesi Olarak Yeniden Değerlendirilmesi, 2014