

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FOTOVOLTAİK ENERJİ ÜRETİM TESİSLERİ İÇİN
BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seçkin AÇICI

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet KÜÇÜKER

Haziran 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FOTOVOLTAİK ENERJİ ÜRETİM TESİSLERİ İÇİN
BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seçkin AÇICI

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK

Bu tez 11.06.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.
Ertan YANIKOĞLU
Jüri Başkanı



Prof. Dr.
Ali Fuat BOZ
Üye



Dr. Öğr. Üyesi
Ahmet KÜÇÜKER
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Seçkin AÇICI

11.06.2019

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerinden Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Küçüker yönetiminde hazırlanarak, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne yüksek lisans tezi olarak sunulmuştur.

Gerek yüksek lisans derslerimde ve gerekse tez çalışmam sırasında yardımlarından dolayı değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Küçüker'e ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET	xi
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2	
BATARYALAR.....	9
2.1. Batarya Tipleri.....	9
2.1.1. Nikel-metal bataryalar.....	10
2.1.2. Nikel-kadmiyum bataryalar.....	10
2.1.3. Nikel-çinko bataryalar.....	10
2.1.4. Kurşun-asit bataryalar.....	10
2.1.5. Lityum-iyon bataryalar.....	13
2.1.6. Çinko-hava bataryaları.....	18
2.1.7. Redox bataryalar.....	18
2.1.8. Yakıt hücreleri.....	19
2.2. Bataryaların Elektriksel Modellenmesi.....	19
2.3. Batarya Parametreleri.....	21
2.3.1. Şarj ve deşarj direnci.....	21
2.3.2. Şarj ve deşarj hızı.....	21

2.3.3. Kapasite.....	24
2.3.4. Batarya verimliliği.....	24
2.3.5. Şarj durumu.....	24
2.3.6. Açık devre ve terminal gerilimi.....	25
2.3.7. Deşarj derinliği.....	26
2.3.8. Çevrim sayısı.....	26
2.3.9. Polarizasyon gerilimi.....	27
2.3.10.Sıcaklık.....	28
 BÖLÜM 3	
FOTOVOLTAİK PANELLER.....	31
3.1. Fotovoltaik Hücrelerin Karakteristiği.....	31
3.2. P-V Eğrileri.....	34
3.3. I-V Eğrileri.....	35
3.4. Fotovoltaik Panellerin Tek Diyotlu Eşdeğer Devresi.....	36
3.5. Fotovoltaik Panellerin İki Diyotlu Eşdeğer Devresi.....	37
 BÖLÜM 4	
BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ.....	41
4.1. Güneş Paneli ve Batarya Yönetim Sisteminin Modellenmesi.....	41
4.2. Bataryanın Açık Devre Gerilimlerinin Elde Edilmesi.....	43
4.3. Doğrusal En Küçük Kareler Yöntemi.....	48
4.4. Batarya Şarj Yüzdesinin Belirlenmesi.....	54
 BÖLÜM 5	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR.....	64
EKLER.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	68

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Ekspansiyel faktör
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
A_i	: PV panelde idealite faktörü
A_p	: Elektrolit sabiti
A_{pv}	: Güneş paneli yapımında kullanılan malzemeye ait katsayı
A_{SOC}	: SOC-E eğrisi için eğim değeri
B	: Ekspansiyel faktör
BCI	: Battery Council International
BIO	: Bio Intelligence Service
C	: Deşarj hızı
C_t	: Termal kapasitans
$C_{voltage}$	: Ekspansiyel gerilim
DOD	: Deşarj derinliği
E	: Açık devre gerilimi
E_a	: Aktivasyon enerjisi
E_{bat}	: Batarya Enerji kapasitesi
$E_{deşarj}$	: Bataryadan alınan enerji
E_G	: Band enerjisi
E_s	: Batarya sabit gerilimi
$E_{şarj}$	: Bataryanın sahip olduğu enerji
G	: Güneş yoğunluğu

G_{p0}	: Parazitik akım sabiti
I	: Batarya akımı
I_d	: Diyot akımı
I_m	: Anakol akımı
I_{mpp}	: Maksimum güç noktasında akım değeri
I_n	: Nominal akım
I_p	: Parazitik akım
I_{ph}	: Fotovoltaik panel akımı
I_{RS}	: Ters doyma akımı
I_s	: Doyma akımı
I_{SC}	: Kısa devre akımı
K	: Batarya kapasitesi
k	: Boltzmann sabiti
K_c	: Kapasite sabiti
K_E	: Voltaj ve sıcaklığa bağlı sabit
K_I	: Kısa devre akımı için sıcaklık katsayısı
K_{pol}	: Polarizasyon sabiti
K_t	: Sıcaklığa bağlı sabit
K_v	: Sabit
n	: Peukert sabiti (Üstel)
$n_ç$	: Çevrim sayısı
n_g	: Gürültü vektörü
N_s	: Seri bağlı hücre sayısı
OCV	: Açık devre gerilimi
P_s	: $I^2 \times R$ kayıpları

PV	: Fotovoltaik
PWM	: Darbe genişliği modülasyonu (Pulse width modulation)
q	: Elektron yükü
Q _e	: Başlangıçtaki yük miktarı
R	: Batarya iç direnci
R _a	: Artık kareler toplam değeri
R _K	: Polarizasyon direnci
R _s	: Seri direnç
R _t	: Termal direnç
SOC	: Şarj durumu (yüzdesi)
T	: Elektrolit (batarya) sıcaklığı
T _a	: Ortam sıcaklığı
T _b	: Başlangıç sıcaklığı
T _C	: Fotovoltaik hücrenin sıcaklığı
T _e	: Elektromanyetik moment
T _f	: Elektrolit donma sıcaklığı
T _L	: Uygulanan moment
t _n	: Nominal süre
T _{Ref}	: Referans sıcaklık
V	: Terminal gerilimi
V _{bat}	: Batarya gerilimi
V _{exp}	: Eksponansiyel bölge Gerilimi
V _f	: Fotovoltaik hücrenin çıkış gerilimi
V _{full}	: Bataryanın %100 şarj durumunda gerilimi
V _{mpp}	: Maksimum güç noktasında gerilim değeri

V_p	: Polarizasyon gerilimi
V_{pr}	: Parazitik gerilim
VRLA	: Kuru tip kurşun-asit batarya
V_T	: Termal gerilim
V_{tr}	: Denge halinde bataryanın açık devre gerilimi
Z	: Gözlemci matrisi
η_Ω	: Omik aşırı gerilim
η	: Batarya verimliliği
η_d	: Difüzyondan kaynaklı aşırı gerilim
η_k	: Kinetik reaksiyonlardan kaynaklı aşırı gerilim
ε	: Üstel sabit
τ	: Zaman sabiti
λ	: Güneşlenme katsayısı
μ_{ocv}	: Açık devre gerilimi için sıcaklık katsayısı
\$	: Dolar (ABD para birimi)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Kurşun-asit bataryaya ait dinamik model.....	11
Şekil 2.2. Üç tip bataryanın insana olan toksik etkisi.....	14
Şekil 2.3. Üç tip bataryanın çevreye olan etkisi.....	15
Şekil 2.4. Sabit deşarj hızında iç direnç ve kapasite-çevrim sayısı grafiği.....	17
Şekil 2.5. Sabit sıcaklıkta kapasite ve iç direnç-çevrim sayısı grafiği.....	17
Şekil 2.6. Vanadyum ve Lityum-iyon bataryalara ait verimlilik grafiği.....	19
Şekil 2.7. Bataryalara ait genel deşarj karakteristiği.....	20
Şekil 2.8. Peukert sabiti.....	23
Şekil 2.9. Kurşun-asit bataryada Peukert sabitinin değişimi.....	23
Şekil 2.10. Batarya eşdeğer devresi.....	25
Şekil 2.11. Lityum-iyon ve kurşun asit bataryalar çevrim sayısı-kapasite ilişkisi...	26
Şekil 2.12. Lityum-iyon ve kurşun-asit bataryaların kapasite-sıcaklık eğrisi.....	28
Şekil 2.13. Günümüzde sık kullanılan bataryaların kapasite sıcaklık eğrisi.....	29
Şekil 2.14. Lityum-iyon bataryalarda açık devre gerilimi-sıcaklık ilişkisi.....	30
Şekil 3.1. P-V eğrileri.....	35
Şekil 3.2. I-V eğrileri.....	36
Şekil 3.3. Doluluk oranı-güneşlenme grafiği.....	36
Şekil 3.4. PV panelin tek diyotlu eşdeğer devresi.....	37
Şekil 3.5. PV panelin çift diyotlu eşdeğer devresi.....	37
Şekil 3.6. Tek diyotlu modele ait verimlilik ve çıkış gerilimi.....	38
Şekil 3.7. Çift Diyotlu modele ait verimlilik ve çıkış gerilimi.....	38
Şekil 3.8. Tek diyotlu modele ait verimlilik ve çıkış gerilimi (Sıcaklığa bağlı).....	39
Şekil 3.9. Çift diyotlu modele ait verimlilik ve çıkış gerilimi (Sıcaklığa bağlı).....	39

Şekil 4.1. Ni- Mh batarya için batarya yönetim sisteminin modellenmesi.....	41
Şekil 4.2. Çalışmada kullanılan kurşun-asit batarya modeli.....	42
Şekil 4.3. Fotovoltaik sistem için Simulink modeli.....	43
Şekil 4.4. Açık devre gerilimi değerlerinin grafik üzerinde gösterimi.....	44
Şekil 4.5. Bataryanın açık devre yapılması (Ideal Switch 2'=0).....	46
Şekil 4.6. Yükün açık devre yapılması ("Ideal Switch 1'=0).....	47
Şekil 4.7. E=18,69 Volt için yaklaşık değer (SOC).....	51
Şekil 4.8. E= 24,19 Volt için yaklaşık değer (SOC).....	51
Şekil 4.9. E= 23.46 Volt için yaklaşık değer (SOC).....	52
Şekil 4.10. E= 24,58 Volt için yaklaşık değer (SOC).....	52
Şekil 4.11. Deşarj hızı ve kapasite ilişkisi.....	56

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Deşarj hızı ve deşarj olma süreleri.....	21
Tablo 2.2. Kurşun- asit bataryalarda açık devre gerilimi- sıcaklık ilişkisi.....	30
Tablo 3.1. İdealite faktörü, maksimum güç (Pm) ve verim değerleri.....	40
Tablo 4.1. Birinci eğri için şarj yüzdesi ve bağıl hata değerleri.....	53
Tablo 4.2. İkinci eğri için şarj yüzdesi ve bağıl hata değerleri.....	53

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Batarya, fotovoltaik sistemler, batarya yönetimi

Fotovoltaik enerji sistemleri güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Güneş enerjisinin yenilenebilir olması ve çevreye zararlı olmaması fosil yakıtlardan elde edilen enerjiye alternatif olarak gösterilmesinin nedenleri arasında yer almaktadır.

Fotovoltaik enerjiden daha iyi faydalanmak için enerji depolama sistemleri kullanılabilir. Günümüzde elektrik enerjisinin depolanması için genelde bataryalar kullanılmaktadır. Batarya yönetim sistemleri bataryalar için şarj durumu, gerilim, sıcaklık vb. değerlerin izlenmesini sağlar.

Bu çalışmada fotovoltaik bir sistem ve bir kurşun asit batarya modellenmiştir. Oluşturulan sistem için bir batarya yönetim sistemi tasarlanmıştır. Batarya yönetim sisteminin tasarımı için açık devre gerilimi yöntemiyle birlikte en küçük kareler yöntemi de kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar bir tabloda gösterilmiştir ve bağıl hata değeri hesaplanarak sistemin güvenilirliği test edilmiştir.

DESIGNING BATTERY MANAGEMENT SYSTEM FOR PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION PLANTS

SUMMARY

Keywords: Battery, photovoltaic systems, battery management

Photovoltaic energy systems are systems that convert solar energy to electrical energy. Being renewable and less harmful to the environment is the reason solar energy is an alternative for fossil fuel energy.

Energy storage systems can be used for better use of photovoltaic energy. Batteries are usually utilized for storing energy. Battery management systems provide monitoring parameters like state of charge, voltage and temperature etc.

In this study, a photovoltaic system and a lead acid battery is modelled. A battery management system is designed for the system modelled in Simulink. Open circuit voltage and least squares method are combined together for designing the battery management systems and relative error is also calculated to test the reliability of the system.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Güneş enerjisi karbondioksit emisyonunun olmaması sebebiyle temiz enerji kaynağı olarak bilinmektedir. Fosil yakıtların çevreyi ve insan sağlığını olumsuz etkileyebileceği düşünüldüğünde güneş enerjisine olan talebin artması beklenmektedir.

Günümüzde güneş enerjisi santrallerinin arttığı bir gerçektir. Modern dünyada insanları endişelendiren küresel ısınmanın dünyanın her yerinde yaygın hale gelmesiyle akla ilk gelen alternatif enerji kaynağı güneş enerjisidir. Güneş enerjisiyle beraber solar termal enerji de yaygın hale gelmiştir [1].

Güneş enerjisinden en iyi şekilde faydalanmak için birtakım çalışmalar yapılmıştır. Güneş ışığından maksimum seviyede yararlanılması için yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir. Güneş enerjisinin yoğunluğu coğrafyaya ve koşullara göre değişmektedir. Bu yüzden güneş panellerinin maksimum performansı güneş ışınlarının geliş açısından faydalanılarak belirlenebilmektedir. Güneş paneli değişen açıya bağlı olarak yönlendirildiğinde güneş enerjisinden istenilen seviyede yararlanılabilir. Güneş ışınlarının geliş açısıyla birlikte sıcaklık değeri de güneş panellerinin performansını etkilemektedir [1].

Güneş enerjisinin depolanması yönünde de çalışmalar yapılmaktadır. Enerjinin depolanmasını gerektiren uygulamalarda (Ör. Elektrikli araçlar, mikro şebekeler) bataryalar öne çıkmaktadır. Bataryaların bu tip uygulamalarda sık kullanılmasının sebebi birçok değişik sisteme kolayca adapte olabilmeleridir [2].

Güneş enerjisinden faydalanmak mümkün olmadığında enerjinin bataryalardan sağlanması fotovoltaiik (PV) sistemler için üretimden artan enerjinin kullanılması açısından önemlidir [3].

Günümüzde kurşun-asit bataryalar düşük maliyetli olmalarından dolayı enerji depolama sistemi olarak sıklıkla tercih edilmektedirler. Fakat lityum-iyon pillerin performans açısından daha iyi oldukları bilinmektedir. Son birkaç yıldır üretilmeye başlanan Redox bataryaların da kurşun-asit bataryalara alternatif olabileceği öngörülmektedir [2].

Batarya yönetim sistemleri bataryanın verimli bir şekilde kullanılması ve batarya şarj durumunun bilinmesi açısından önem taşımaktadır. Şarj durumu (yüzdesi) tahmini batarya yönetim sistemlerinin önemli fonksiyonlarından biridir [4]. Şarj yüzdesinin tespiti deşarj derinliğinin tespit edilmesinde kullanılabilmektedir. Deşarj derinliği batarya ömrünü etkileyen önemli etkenlerden biridir. Ayrıca bataryanın %100 şarj seviyesine ulaştıktan sonra şarja devam edilmesi gereksiz enerji kullanımına ve sıcaklık artışından dolayı batarya ömrünün kısılmasına sebep olmaktadır [4,5].

Batarya yönetim sistemlerinin, mikro şebekelerde net maliyetin düşürülmesini sağlayabileceği de ifade edilmektedir. Hittinger ve ark. bataryalarla oluşturulan mikro şebekelerde net maliyetin yaklaşık 1000 \$ civarında azalabileceğini ifade etmişlerdir [6]. Lityum-iyon bataryaların yerine kurşun-asit bataryaların kullanılması halinde maliyet neredeyse yarıya inmektedir [7]. Ömrü uzun ve maliyeti düşük olan bataryaların fotovoltaiik mikro şebekelerin maliyetini önemli ölçüde düşürdüğü kanıtlanmıştır [6]. Ayrıca kurşun-asit bataryalarda deşarj derinliği (DOD) değerinin %50' yi geçmesinin mikro şebekelerin çalışmasını olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir [8].

Duryea ve ark. tarafından batarya yönetim sistemlerine dair yapılan bir çalışmada kurşun-asit bataryanın uzun ömürlü olmasının, fotovoltaiik sistemlerin maliyetini azalttığı ve derin deşarj, aşırı şarj gibi durumlardan kaçınılmasının gerekliliği vurgulanmıştır [9].

Batarya şarj yüzdesi (SOC) ayrıca batarya performansının da bir yansıması olarak kabul edilir. Şarj yüzdesi tahmini bir bataryanın gerilim, akım veya sıcaklık gibi parametrelerinin kontrol edilmesi konusunda mantıklı çözümler bulunmasını sağlayabilmektedir [10].

Özellikle mikro şebekelerde maliyetin düşürülmesi ve verimin artırılabilmesi amacıyla yapılan birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda da batarya performansının yükseltilmesi ve enerjinin güvenli bir şekilde depolanması gerektiği vurgulanmıştır. Batarya yönetim sistemleri için birçok farklı yöntem denenmiştir. Bu yöntemlerin içinde matematiksel bir yöntem olan amper-saat sayma metodu en sık kullanılan yöntemlerden biri olmuştur [10].

Son yıllarda adaptif sistemler de şarj yüzdesi tahmininde kullanılmaya başlanmıştır. Adaptif yöntemler içinde en çok bilinenler yapay sinir ağları, bulanık sinir ağları ve Kalman filtreleridir [4]. Özellikle genişletilmiş kalman filtreleri bataryalardaki kimyasal değişimin şarj yüzdesi, terminal akımı ve terminal geriliminden elde edilebileceğini de göstermiştir [10].

Batarya yönetim sistemleri batarya sıcaklığını ölçmek amacıyla da tasarlanabilir. Üretici kuruluşlar genelde bataryalar için tasarım limitleri belirler. Bu limitlerden birisi de sıcaklık limitleridir. Sıcaklığın artışı batarya kapasitesinin değişmesine veya güvenlik sorunlarına sebep olabilir [11]. Batarya sıcaklığının batarya kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Düşük sıcaklıklarda batarya kapasitesi düşmektedir. Lityum-iyon bataryaların $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki kapasitesinin $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki kapasitesine göre %95 azaldığı araştırmalarla kanıtlanmıştır. Batarya ömrünün de sıcaklık artışından olumsuz etkilendiği bilinmektedir. Sıcaklığı $30\text{-}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ olan lityum bataryalarda $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık artışının bile batarya ömrünün 2 ay azalmasına yol açabileceği düşünülmektedir [12].

Bataryaların deşarj hızı da batarya kapasitesini etkilemektedir. Deşarj hızı yüksek bataryaların kapasitelerinin azaldığı bilinmektedir. Bataryaların deşarj hızı genelde “C” ile gösterilmektedir. Deşarj hızının 1C olması bataryanın 1 saatte deşarj

olduğunu gösterir. Bataryanın deşarj hızının 0,05C olması ise 20 saatte deşarj olduğunu gösterir. Deşarj hızı arttıkça kapasite azalır [13]. Batarya yönetim sistemleri sayesinde batarya deşarj hızının takip edilebilmesi mümkündür.

Deşarj hızı 0,125C olan bir bataryanın 0,05C hız ile deşarj edilen kurşun-asit bataryaya göre kapasitesinde %10'luk bir düşüş olduğunu ispatlayan çalışmalar mevcuttur. Şarj hızının yüksek olmasının bataryaların ömrü üzerinde etkisi daha azdır. Genelde bataryaların düşük hızda şarjı tavsiye edilmektedir. Ayrıca sabit akımla şarjın kurşun- asit bataryalar için daha güvenli olduğu bilinmektedir [14].

Günümüzde çevrimiçi şarj tahmin sistemlerinin tasarımında en çok kullanılan yöntem amper saat sayma metodudur. Bu yöntem batarya şarj durumunu tespit etmek için kullanılır. Ancak bu yöntem batarya akımının hassas ölçümüne ve batarya kapasitesine bağlıdır. Bataryaların kapasiteleri sıcaklığa duyarlıdır ve bataryanın gerçek kapasitesinin bilinmemesi bu yöntemin uygulanmasını güçleştirebilir [15].

Batarya iç direncinin de şarj esnasında yükseldiği ve akım değerinin sürekli değişimine yol açtığı bilinmektedir [16].

Batarya iç direncinin belirlenebilmesi için de bazı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden en sık kullanılanı elektrokimyasal empedans spektroskopisi yöntemidir. Bu yöntemde bataryaya alternatif akım sinyali verilir ve sistemin verdiği cevap analiz edilir. Bu yöntem bataryalardaki kinetik reaksiyonların da analiz edilmesini sağlar. Hata oranı genelde %5 olmaktadır [17].

Kalman fitresi kullanılarak yapılan batarya yönetim sistemi çalışmaları da dikkat çekmektedir. Kalman filtreleri işlem yoğunluğu gerektirdiğinden şarj durumu tahmininde hata oranı yüksek çıkabilmektedir. Fakat kalman filtreleri çevrimiçi şarj durumuna olanak sağladığından en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Kalman filtresi algoritması ile yapılan çalışmalar genelde elektrikli araç uygulamalarına yöneliktir [18]. Lityum-iyon pillerin eşdeğer devresinden faydalanılarak yapılan çalışmalar kalman filtresi yönteminin başarılı bir şekilde uygulanmasını sağlamıştır. Genişletilmiş kalman filtrelerinin doğrusal olmayan sistemlere uygulanabilmesi de önemli bir avantaj olarak göze çarpmaktadır [17].

Gerçek zamanlı şarj yüzdesi tahmininde amper-saat sayma metodunun tek başına tercih edilmesinin isabetli sonuç vermesi beklenmemektedir. Kendiliğindendeşarj oluşumu,deşarj hızı ve kapasitenin anlık değişmesi her batarya için geçerlidir. Bu yüzden batarya içindeki yük miktarını ve batarya kapasitesini tam olarak bilebilmek mümkün değildir.

Adaptif sistem (genişletilmiş kalman filtreleri, yapay sinir ağları vb) algoritmalarıyla oluşturulan batarya yönetim sistemlerinin gerçek zamanlı uygulamalarda iyi sonuçlar verdiği ancak maliyetli olduğu düşünülmektedir. Amper-saat sayma metodu ve kalman filtrelerinin birlikte kullanılmasıyla ilgili çalışmalar mevcuttur. Bu sayede amper-saat sayma metodu için gereken başlangıç şarj değerinin tespit edilmesi sağlanmıştır. Bu çalışmalar sonucunda %2,5 hata oranı ile şarj yüzdesi tahmini yapılabilmektedir. Amper-saat sayma metodu tek başına kullanıldığında bu oran %11,4 çıkmıştır [10].

Yapay sinir ağları da şarj yüzdesi tahmininde kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntem bataryaya ait büyüklüklerin eğitim verisi olarak kullanılmasıyla uygulanmaktadır. Bu büyüklükler bataryaya ait gerilim, akım, direnç gibi değerler olabilir. Bu verilerle yapay sinir ağı eğitilir. Şarj durumu tahmininde hatanın az olması istenirse birkaç tane bataryadan çok sayıda verinin elde edilmesi gerekebilir. Çünkü her bataryaya aitdeşarj karakteristiği farklıdır [10]. Eğitim verileri benzetimlerden veya deneylerden elde edilebilir. Yapılan tahminlerde hatanın az

çıkması eğitim verilerinin sayısına bağlıdır [17]. Yapay sinir ağları kullanılarak yapılan çalışmalarda lityum ve nikel kadmiyum bataryalar için şarj yüzdesi tahmininin oldukça zor olduğu vurgulanmaktadır [18].

Batarya şarj yüzdesi tahmini için tercih edilen yöntemlerden biri de açık devre yöntemidir. Açık devre gerilimi batarya kapasitesine veya deşarj hızına bağlı değildir. Açık devre gerilimi sıcaklığa veya çevrim sayısına bağlı değişebilir. Fakat sıcaklık değişimi ve çevrim sayısı yüksek olmadığında bataryanın açık devre gerilimindeki değişiklikler ihmal edilebilir [19,20]. Kurşun-asit bataryalarda açık devre gerilimi ve bataryanın şarj yüzdesi arasında yaklaşık olarak doğrusal bir değişim olduğu bilinmektedir [10,21]. Açık devre gerilimi yöntemi de kaynaklarda çevrimiçi yöntem olarak geçmektedir [17].

Bataryalarda şarj yüzdesi terminal geriliminden de ölçülebilir. Fakat deşarj tamamlandığında bataryanın terminal geriliminde ani bir düşüş olur ve hata oranının çok yüksek çıkmasına sebep olur. Bu yüzden terminal gerilimi yöntemi genelde tercih edilmez. Lityum-iyon bataryalara ait açık devre gerilimi (E) ve şarj yüzdesi eğrisinin düzgün olarak değişmediği bilinmektedir. Fakat açık devre yönteminin kurşun-asit bataryalarda çok iyi sonuç verdiği ispatlanmıştır [10].

Genişletilmiş kalman filtresinin yinelemeli özelliğinden dolayı gerçek zamanlı uygulamalarda hata oranının %5'i geçmediği saptanmıştır. Bu nedenle kalman filtrelerinin batarya yönetim sistemleri uygulamalarında önemli bir rol oynaması beklenmektedir [22].

Lityum-iyon bataryalarda aşırı gerilim oluşması bataryanın tahrip olmasına yol açabilmektedir [4,23]. Hajizadeh ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada açık devre geriliminin şarj yüzdesinin bir fonksiyonu olması özelliğinden faydalanılmış ve lityum bataryanın voltaj değişimlerine duyarlı olması sebebiyle aşırı şarj gibi durumlarda deforme olabileceği vurgulanmıştır [24].

Günümüzdeki yazılımlar ile güneş panellerinin elektriksel sistemlerle tam olarak ifade edilebilmesi oldukça zordur. Güneş panelleri genelde kontrollü akım kaynağı olarak modellenir ve eşdeğer devre modeli oluşturulurken panel akımı ve diyot ayrı modellenmektedir [25]. Güneşlenme ve sıcaklık gibi parametreler güneş panelinden elde edilen enerji değerini değiştirebilmektedir [26].

Batarya yönetim sistemleri tasarımı ve şarj yüzdesi tahminine yönelik dikkat çeken çalışmalar bulunmaktadır.

Renuka ve Patil Anupama tarafından mikro şebeke uygulamaları için geliştirilen bir çalışmada mikrokontrolörlü batarya yönetim sistemleri tasarlanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda güneş panellerinin ürettiği enerjinin %20 arttırılması sağlanmıştır [27].

Miao ve ark. tarafından mikro şebeke uygulamaları için gerçekleştirilen bir diğer çalışmada kapalı çevrim PWM (darbe genişliği modülasyonu) kontrol kullanılarak batarya şarj yüzdesi takibi yapılmıştır [28].

Mbuthia ve Kiruki tarafından Kalman filtresi yöntemiyle yapılan bir çalışmada elde edilen sonuçlara göre %5 hata oranı ile kurşun-asit bataryanın şarj yüzdesinin takibi sağlanmıştır [8].

Hajizadeh ve ark. tarafından fotovoltaiik panellerin gerilimini kontrol etme amaçlı tasarlanan bir batarya sisteminde adaptif kontrol kullanılarak gerilim kontrolü sağlanmıştır [24].

Park ve ark. tarafından mikro şebekeler için tasarlanan bir başka çalışmada enerjinin maliyetinin düşürülmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen algoritma sayesinde batarya şarj durumu tahmini yapılarak maliyetin %28 oranında düşürülmesi sağlanmıştır [29].

Asghar ve ark. tarafından yapılan benzer çalışmada lityum batarya Simulink yazılımı ile modellenmiştir. Bataryanın açık devre gerilimi ve kalman filtresi yardımıyla matematiksel olarak SOC tahmini yapılmıştır [30].

Christensen ve Adebussyi tarafından elektrokimyasal empedans spektroskopisi yöntemiyle modellenen bir batarya yönetim sisteminde lityum bataryaya ait şarj yüzdesi ve çevrim sayısı gibi parametreler belirlenmiştir [31].

Puente ve ark. tarafından yapılan çalışmalarda batarya yönetim sistemi algoritması oluşturularak mikro şebekeler için batarya ömrünü uzatan ve maliyeti düşüren bir sistem tasarlanmıştır [32].

Bu çalışmada fotovoltaiik enerji üretim sistemleri için batarya yönetim sistemi modellenmiştir. Çalışmaya ait sonuçlar benzetim (simülasyon) verileriyle karşılaştırılmıştır. Veriler karşılaştırıldıktan sonra elde edilen sonuçlar için bağıl hata oranları da verilmiştir.

Bu çalışmanın 2. bölümünde bataryalara ait bilgiler verilmiştir. Bataryalara ait karakteristik özelliklere de bu bölümde yer verilmiştir. Fotovoltaiik panellerin çalışmasına ait bilgiler 3. bölümde verilmiştir ve parametrelere değinilmiştir. Çalışmanın 4. bölümünde bataryaya ait açık devre gerilimlerinin elde edilmesi, batarya yönetim sisteminin oluşturulması ve çalışma prensibi ele alınmıştır. Çalışmanın 5. bölümünde sonuç ve öneriler yer almaktadır.

BÖLÜM 2. BATARYALAR

Bataryalar, kimyasal enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesini sağlayan enerji depolama sistemleridir. Çeşitli kimyasal yapıda birçok batarya üretilmektedir. Büyük güçlü sistemler için üretimi en yaygın olan batarya tipleri lityum, nikel metal, kurşun-asit bataryalardır. Bataryaların kapasiteleri ve nominal gerilimleri genelde standarttır. Üretici kuruluşlar bataryaların tasarım limitlerini kataloglarında belirtirler. Bu limitlerin aşılması bataryadan istenilen verimin alınmasını engelleyebilir [19].

2.1. Batarya Tipleri

Bataryalar çeşitli kimyasal yapılarda üretilmektedirler ve genelde isimlerini kimyasal yapılarından alırlar. Günümüzde büyük güçlü uygulamalar için üretilen bataryalar lityum-iyon, nikel- metal ve kurşun-asit bataryalardır. Çinko-hava ve Redox bataryalar da geliştirilme aşamasındadır. Çinko-hava pilleri bazı uygulamalarda kullanılmaktadır. Fakat kısa ömürlü olmaları ve korozyona uğramaları gibi problemler yüzünden verimleri düşüktür ve yaygın olarak kullanılmamaktadırlar [33]. Bu bölümde günümüzde sık kullanılan ve geliştirilme aşamasında olan bataryalar hakkında bilgi verilecektir.

2.1.1. Nikel-metal bataryalar

Elektrikli araç uygulamalarında kullanılan 70 Wh/kg enerji yoğunluğuna sahip bir bataryadır. Metal-hidrür karışımı bir negatif elektroda ve nikel hidroksit karışımı bir pozitif elektroda sahiptir [34].

2.1.2. Nikel-kadmiyum bataryalar

Son yıllarda hibrit elektrikli araçlarda kullanılmaya başlanan nikel-kadmiyum bataryalar pozitif nikel elektrot, negatif kadmiyum elektrot ve potasyum hidroksitten oluşmaktadır. Enerji yoğunlukları 50 Wh/kg'dır. Çevrim sayısı ortalama 2000'dir [34].

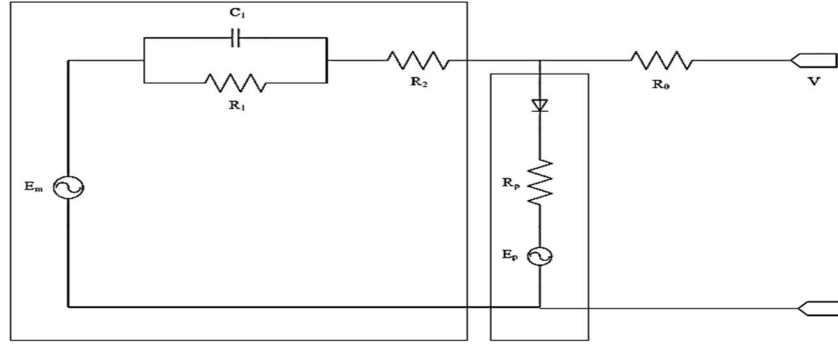
2.1.3. Nikel-çinko bataryalar

Yüksek enerji yoğunluğuna sahip nikel-çinko bataryalar ilk kez 1899'da geliştirilmiştir. Enerji yoğunlukları 70 Wh/kg'dır. -39 °C ile 81 °C sıcaklık değerleri arasında kullanılabilirler [34].

2.1.4. Kurşun-asit bataryalar

Enerji yoğunluğu 25-35 Wh/kg olan ve maliyeti en düşük bataryalardandır. DOD (deşarj derinliği) değerinin %50 olması durumunda çevrim sayısı 1200 kadardır. Enerji yoğunlukları 40 Wh/kg civarındadır [34,35,36].

Şekil 2.1.'de kurşun asit bataryanın eşdeğer devresi verilmiştir. Kurşun-asit bataryalarda şarj durumu, iç direnç, gerilim gibi parametrelerin kolayca belirlenmesi mümkündür. Ayrıca düşük ve yüksek sıcaklıklarda iyi performans verebilmektedirler. Kurşun-asit bataryalar otomobil, motosiklet gibi birçok taşıt için güç kaynağı olarak kullanılmaktadır [3]. Sabit sistemler için (Örnek: fotovoltaik sistemler) %69 oranında en çok tercih edilen bataryalardır [15]. Kurşun-asit bataryanın her seferinde %100deşarj edilmesi batarya kapasitesinin önemli ölçüde azalmasına sebep verir. Fakat son yıllarda geliştirilen kurşun-asit bataryaların büyük DOD (%80-100) ve yüksekdeşarj hızı değerlerine rağmen daha uzun ömürlü oldukları bilinmektedir [14,36].



Şekil 2.1. Kurşun-asit bataryaya ait dinamik model [37]

Parazitik akım (Eddy akımı) R_p direnci üzerinden geçmektedir. Parazitik akım i_p ile gösterilirse (Eşitlik 2.1) [37]:

$$i_p = V_{pr} G_{p0} \exp(V_{pr} \tau_p^{s+1} + 1) / V_{p0} + A_p (1 - T / T_f) \quad (2.1)$$

G_{p0} : Parazitik akım sabiti

V_{pr} : Parazitik gerilim

τ_p^{s+1} : Zaman sabiti

A_p : Elektrolit sabiti

T : Elektrolit sıcaklığı (°C)

T_f : Elektrolit donma sıcaklığı (°C)

Batarya kapasitesinin sıcaklığa bağlı değişimi Eşitlik 2.2’de verilmiştir. K_t değeri sıcaklığa bağlı değişiklik göstermektedir [37].

$$K(I, T) = (K_c \times K_0 \times K_t) / (1 + (K_c - 1)) ((I / I^*)^\varepsilon) \quad (2.2)$$

K_c : Kapasite sabiti

K_0^* : 0° C sıcaklıkta batarya kapasitesi (ah)

K_t : Sıcaklığa bağlı sabit

I^* : Nominal batarya akımı

ε : Üstel Sabit

Batarya içindeki yük miktarını veren Eşitlik 2.3’teki gibidir:

$$Q_e(t) = Q_e + \int_0^t -I(\tau) d\tau \quad (2.3)$$

I_m : Anakol akımı

Q_e : Başlangıçtaki yük miktarı

K_t değeri sıcaklığa bağlı bir değerdir. Kurşun-asit bataryalarda elektrolit genelde kapalıdır. Bu yüzden sıcaklığın sensörlerle direk ölçümü mümkün olmayabilir. Eşitlik 2.4'te başlangıç sıcaklığının ortam sıcaklığına eşit olduğu düşünülerek batarya sıcaklığına ait karakteristik denklem verilmiştir [37].

$$T(t) = T_b + \int (P_s - (T - T_a) / R_t) / C_t dt \quad (2.4)$$

T_b : Başlangıç sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)

T : Batarya sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)

T_a : Ortam sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)

P_s : $I^2 \times R$ kayıpları (birimi Watt)

R_t : Termal direnç ($^{\circ}\text{C} / \text{Watt}$)

C_t : Termal kapasitans ($\text{Joule}/^{\circ}\text{C}$)

Kurşun-asit bataryalar için şarj yüzdesi eğrisinin eğimi ve şarj yüzdesi “0” olduğunda açık devre gerilimi bilinirse (Eşitlik 2.5) [38]:

$$E = (\text{SOC}) \times A_{\text{soc}} + E_{\text{min}} \quad (2.5)$$

A_{soc} bataryaya ait SOC- açık devre gerilimi eğrisinin eğimidir. Bu değer üretici kuruluşun kataloglarından elde edilebilir [21,38]. E_{min} şarj yüzdesinin “0” olduğu anda açık devre gerilimi değeridir. Kurşun-asit bataryalarda açık devre geriliminin denge anında ölçülmesi ölçümün hassas yapılabilmesi açısından önem taşımaktadır. Eşitlik 2.6'da denge anındaki açık devre geriliminin büyüklüğüne ait ifade yer almaktadır [39].

$$E = V_{\text{tr}} + K_v \quad (2.6)$$

V_{tr} : Denge halinde bataryanın açık devre gerilimi
 K_v : Sabit

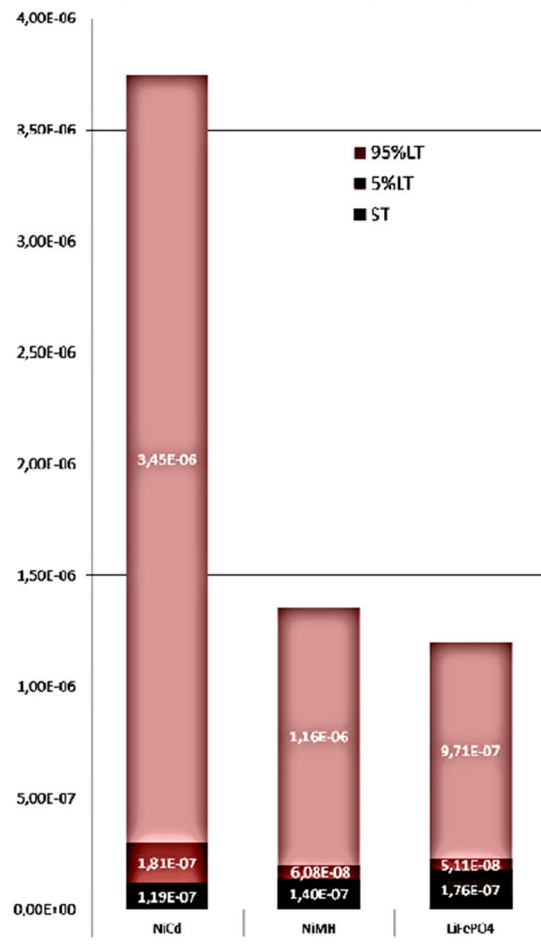
Açık devre geriliminin isabetli bir biçimde ölçümü bekleme süresine de bağlıdır. Mariani ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada ancak 240 dakika sonra açık devre geriliminin sabit kalabildiği anlaşılmıştır. Batarya açık devre geriliminin 30 dakikalık ve 240 dakikalık süreler arasında 6,45 mV değiştiği gözlenmiştir [39].

2.1.5. Lityum-iyon bataryalar

Uzun ömürlü olan ve hızlı şarj olabilen lityum-iyon bataryalar 120 Wh / kg enerji yoğunluğuna sahiptirler. Enerji yoğunluğundan dolayı gerilim ve sıcaklık artışlarından kolayca etkilenebilirler. Lityum-iyon bataryaların ortalama çevrim sayısı 1000'dir. Diğer bataryalara göre kapasitesi sıcaklıktan daha az etkilenir. Fakat maliyetleri yüksektir. Lityum-iyon bataryaların önümüzdeki 15-20 sene içerisinde elektrikli araçlarda kullanılabileceği öngörülmektedir [34]. Lityum-iyon bataryalarda genelde pozitif elektrot olarak kobalt-oksit kullanılır. Negatif elektrot için LiC_6 (Lityum- grafit) kullanılmaktadır. Lityum-iyon bataryaların ortalama gerilimleri 3,6 V civarındadır [3].

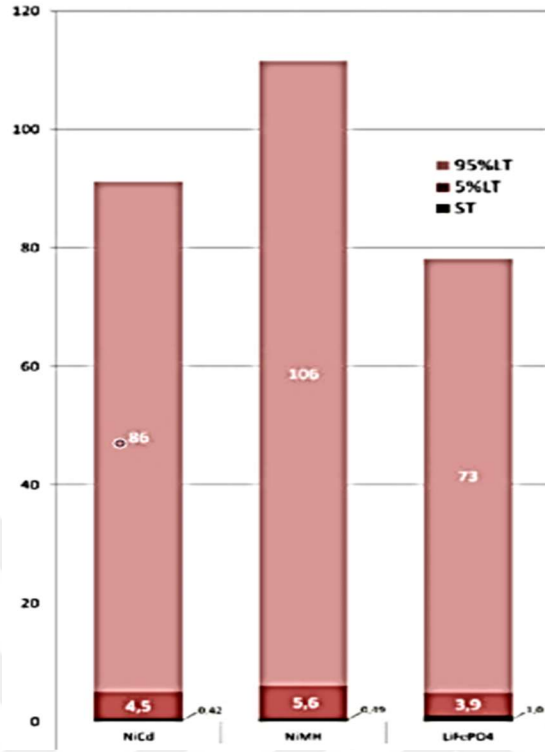
Lityum-iyon bataryalarda kendiliğinden deşarj oranı azdır (%10'dan az). gravimetrik enerji yoğunlukları yüksektir. Sıcaklık aralığı genelde 0-40 °C olmaktadır [3].

Lityum-iyon bataryalarda aşırı şarj durumunda sıcaklık artışı, korozyon ve güvenlik problemleriyle karşılaşılabilir [3,4,26]. Bu yüzden elektronik koruma devrelerinin lityum-iyon bataryalarla birlikte kullanılması gerekmektedir [3,26]. Güvenlik sorunlarına rağmen lityum-iyon bataryaların, nikel-metal ve nikel kadmiyum pillere göre çevreye ve insana daha az toksik etkisi olduğu BIO (Bio Intelligence Service) tarafından yapılan araştırmalar sonucunda gözlenmiştir. Şekil 2.2. ve 2.3.'te bu çalışmalara ait grafikler yer almaktadır [40].



Şekil 2.2. Üç tip bataryanın insana olan toksik etkisi [40]

Şekil 2.3.'te lityum-iyon bataryanın su ekosistemi açısından da toksik etkisinin en az seviyede olduğu görülmektedir. Sonuçlar 1 kWh enerjiye sahip bataryalar için elde edilmiştir.



Şekil 2.3. Üç tip bataryanın çevreye olan etkisi [40]

Hafıza etkisi nedeniyle diğer bataryalarda görülen kapasite kaybı lityum iyon bataryalarda görülmemektedir [4]. Fakat şarj veya deşarj esnasında meydana gelen elektrokimyasal olaylar lityum –iyon bataryaların zamanla kapasitelerinin azalmasına sebep olmaktadır [40].

Sıcaklık lityum-iyon bataryaların ömrü üzerinde etkilidir. 25 °C altındaki sıcaklıklarda lityum iyonlarının anot çevresini kaplamasından dolayı ve yüksek sıcaklıklarda Arrhenius reaksiyonları sebebiyle bataryaların ömrü kısalmaktadır [41].

Yapılan çalışmalar lityum-iyon bataryaların ömrünün deşarj hızı ile eksponansiyel olarak değiştiğini göstermiştir. Eşitlik 2.7. batarya kapasitesinin deşarj hızına (C) bağlı değişimini vermektedir [41].

$$K_k(T, C, n_c) = A(C) \exp(-E_a(C) / 8,314 \times T) \times n_c \times 0,740 \quad (2.7)$$

$$A(C) = \exp(4,33C^2 - 3,37C + 5,03) \quad (2.8)$$

$$E_a(C)=2,330 \times 10^3 \times \exp(1,337C + 1,353 \times 10^4) \quad (2.9)$$

Silindirik grafit lityum-iyon bataryalar üzerine yapılan çalışmalarda deşarj hızı eksponansiyeli B olarak tanımlanmıştır (Eşitlik 2.10) [41].

$$Q_k=B \times \exp ((-31700 + 37,3C) / R \times T) \times Ah^{0,55} \quad (2.10)$$

n_c : Çevrim sayısı

C : Deşarj hızı

T : Sıcaklık (Birim Kelvin)

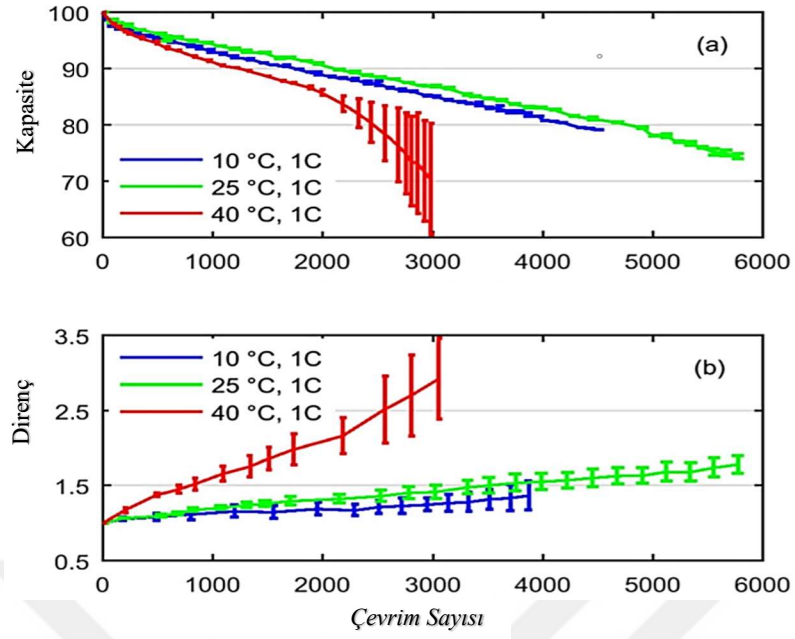
E_a : Aktivasyon enerjisi

A ve B değerleri eksponansiyel faktörlerdir [41].

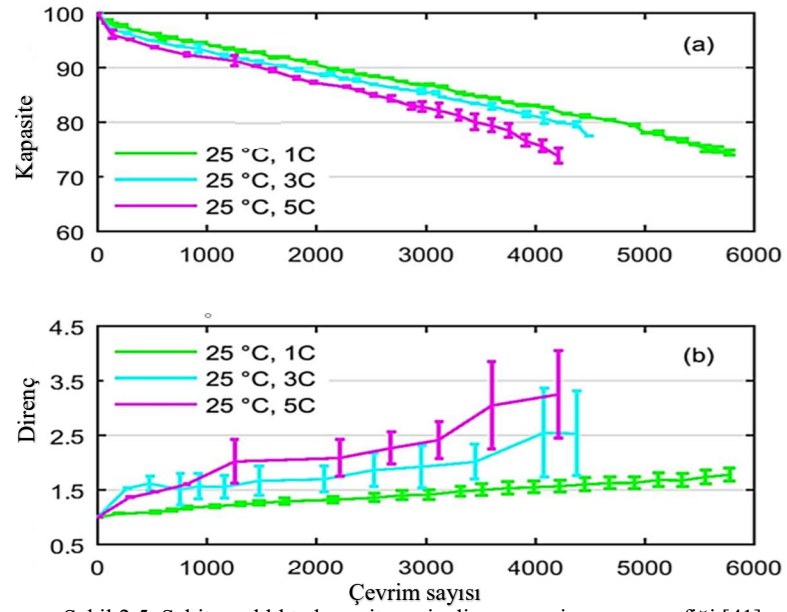
Şekil 2.4.'te lityum-iyon bataryanın 10 °C'de kapasitesinin azaldığı görülmektedir. Sıcaklık arttıkça kapasitesi artmaktadır. Fakat omik direncin artması sebebiyle belirli bir sıcaklık değerinden sonra kapasitesi 10 °C'deki kapasitesinin de altına düşmektedir ve çevrim sayısı da azalmaktadır [41].

40 °C'de lityum-iyon bataryanın çevrim sayısı 3000'e kadar düşmektedir. Bu değişim sıcaklık artışının batarya içindeki kimyasal reaksiyonları arttırmasından ve buna bağlı olarak batarya direncinin artmasından kaynaklanmaktadır [41]. Şekil 2.5.'te deşarj hızına bağlı kapasite değişimi ve omik direnç değişimi verilmiştir. Bataryanın deşarj hızı arttıkça omik direncin yükseldiği; kapasitenin ve çevrim sayısının da azaldığı grafikten gözlemlenmektedir.

Wu ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada lityum-iyon bataryalar için optimum sıcaklığın 35° C olduğu belirtilmiştir. Optimum sıcaklığın üstüne çıkılması katı elektrolit fazını hızlandırmaktadır. Bu sebepten dolayı iç direnç yükselmekte ve lityum-iyon bataryanın kapasitesi düşmektedir [41].



Şekil 2.4. Sabit deşarj hızında iç direnç ve kapasite-çevrim sayısı grafiği [41]



Şekil 2.5. Sabit sıcaklıkta kapasite ve iç direnç-çevrim sayısı grafiği [41]

2.1.6. Çinko-hava Bataryaları

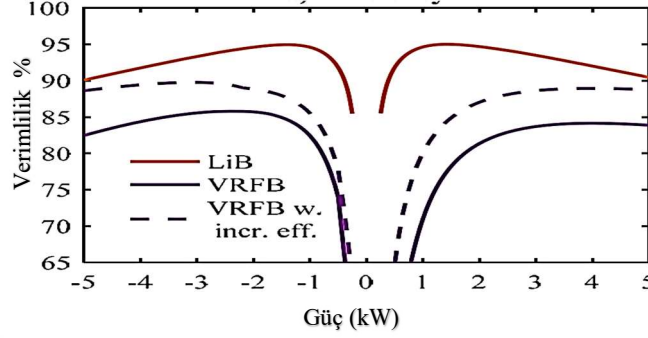
Üretim maliyetinin az olması ve yüksek enerji yoğunluğu sebebiyle son zamanlarda çinko-hava bataryalarının yeniden şarj edilebilen modelleri geliştirilmiştir. Verimlerinin yüksek olması sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarıyla beraber kullanılması beklenmektedir. Şu anda bazı aydınlatma sistemleri için enerji depolama sistemleri olarak kullanılmaktadır. Çinko-hava bataryalarında görülen bazı teknik problemler yaygınlaşmalarını engellemektedir. Özellikle deşarj esnasında görülen korozyonlar ve düşük çevrim performansı çinko-hava bataryalarının en büyük dezavantajlarıdır [33].

2.1.7. Redox bataryalar

Redox bataryaların geliştirilmesine dair araştırmalar 70'li yıllardan beri sürmektedir. Redox bataryaların içinde bulunan elektrolit genelde vanadyum iyonlarından oluşmaktadır. Vanadyum bataryalar Redox tepkimelerindeki elektron alışverişinden faydalanılarak tasarlanmıştır. Enerji yoğunlukları 25 Wh / kg 'dır. En önemli özellikleri kendiliğinden deşarj oranlarının düşük olmasıdır ($<10\%$). Redox bataryaların raylı sistemler, elektrikli araçlar, off-grid enerji sistemleri için kullanışlı olabileceği düşünülmektedir [42].

Büyük kapasiteli Redox bataryaların lityum-iyon bataryalara göre daha ucuza üretilebileceği düşünülmektedir. Çevrim sayılarının 10000'e ulaştığı düşünüldüğünde yüksek deşarj derinliğine lityum-iyon pillerden daha dayanıklı olduğu öngörülmektedir. Şekil 2.6.'da vanadyum ve lityum-iyon bataryaların verimlerine ait grafik verilmiştir. Kesikli eğri kapasitesi yüksek olan vanadyum bataryaya aittir. Büyük kapasiteli Redox bataryaların lityum-iyon bataryalara göre daha ekonomik ve verimli olabileceği düşünülmektedir. Fakat lityum-iyon piller şu anda verimliliği en yüksek olan bataryalar olarak düşünülmektedir. Vanadyum bataryaların verimleri lityum-iyon bataryalara göre düşük olsa bile çevrim sayılarının yüksek olması sebebiyle önümüzdeki yıllarda güneş enerjisiyle beraber kullanılabileceği ve ucuza üretilabileceği öngörülmektedir [43].

Büyük kapasiteli redox bataryalarda aşırı sıcaklık artışları görülebilmektedir. Fakat sıcaklık yükselmesinin batarya hücresi içinde oluşan elektrokimyasal olayı hızlandırdığı ve şarj süresinin bu sayede kısaldığı da gözlemlenmiştir [42].



Şekil 2.6. Vanadyum ve lityum-iyon bataryalara ait verimlilik grafiği [43]

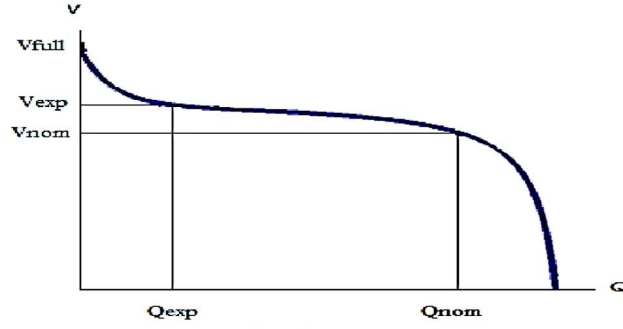
2.1.8. Yakıt hücreleri

Yakıt hücreleri, yakıt ile oksijenin elektrokimyasal reaksiyona girmesiyle enerji üreten bataryalardır. 150-200 kW enerji üretebilirler. Yakıt olarak metan, etanol ve hidrojen gibi yakıtlar kullanabilirler. Çevreyle olan etkileşimleri azdır. Çıkış gerilimleri 1 volttan azdır. Kojenerasyon teknolojisi ile beraber kullanıldığında verimleri çok yüksektir. Düşük sıcaklık veya basınçta da kullanılmaları mümkündür [44].

2.2. Bataryaların Elektriksel Modellenmesi

Bataryaların karakteristikleri kimyasal yapılarına göre farklılık göstermektedir. Fakat bataryaların bazı ortak karakteristiklerinin de olduğu bilinmektedir. Düşük sıcaklıklarda performansın da düşmesi bunlardan biridir. Ayrıca tüm bataryalarda sıcaklık azaldıkça kapasite azalmaktadır. Bataryalar elektrokimyasal veya deneysel olarak modellenenebilir. Fakat şarj ve deşarj tahminlerinde en etkili yöntem elektriksel modellemedir. Elektriksel modellemede bataryanın şarj yüzdesi de göz önüne alınmaktadır [45]. Üretici kuruluşların kataloglarından her bataryaya ait parametre çıkarımları yapılabilmektedir [21,45]. Farklı tipte bataryaların şarj ve deşarj karakteristikleri arasında küçük farklılıklar bulunmaktadır. Şekil 2.7.'de deşarj

eğrisine ait bir örnek verilmiştir [45]. Deşarj eğrisi bilinen bataryanın karakteristik denkleminin direk olarak bulunabilmesi mümkündür. Sıcaklığın gerilim üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir.



Şekil 2.7. Bataryalara ait genel deşarj karakteristiği [45]

Bataryalar için genel deşarj eşitliği, Eşitlik 2.11’de verilmiştir [45]:

$$V = E_s - R_K \left(\frac{K}{K - it} \right) it - R_K \times \frac{K}{K - it} \times i - R \times i \times C_{\text{voltage}} \quad (2.11)$$

- E_s : Batarya sabit gerilimi
- R_K : Polarizasyon direnci
- K : Batarya kapasitesi (ah)
- i : Batarya akımı
- $i \times t$: Batarya içindeki yük miktarı (ah)
- R : Batarya iç direnci (ohm)
- C_{voltage} : Ekspansiyonel gerilim
- V : Bataryanın terminal gerilimi

Eşitlik 2.12 ve 2.13’te gösterilen A, B ve (2.11)’deki R_K değerleri bataryaya özgü deşarj eğrisinden elde edilmelidir [45].

- A : Ekspansiyonel bölge genliği (Volt)
- B : Ekspansiyonel bölge zaman sabiti (ah^{-1})
- V_{full} : Bataryanın %100 şarj durumunda gerilimi

V_{exp} : Ekspansiyel bölge gerilimi

$$A = V_{full} \times V_{exp} \quad (2.12)$$

$$B = 3 / Q_{exp} \quad (2.13)$$

$$E_s = V_{full} + K + R \times i - A \quad (2.14)$$

2.3. Batarya Parametreleri

Bataryaların modellenmesinde kullanılan bazı parametreler bu bölümde tanıtılmıştır.

2.3.1. Şarj vedeşarj direnci

Bataryalarda şarj veyadeşarj esnasında değişebilen elektrolit direncidir. Şarj veyadeşarj esnasında kimyasal reaksiyonlardan dolayı da iç direnç oluşabilir. Bu iç direnç sıcaklıkla ters orantılı olarak değişir [46].

2.3.2. Şarj vedeşarj hızı

Şarj veyadeşarj hızı batarya içinden geçen akıma bağlı olarak değişen bir büyüklüktür. Bir bataryanındeşarj akımı arttıkçadeşarj hızı yükselir. Deşarj hızı “C” ile gösterilir. Tablo 2.1. bataryalarındeşarj hızı vedeşarj olma sürelerini göstermektedir. Deşarj hızı arttıkça batarya kapasitesinin azaldığı bilinmektedir [14]. Bir bataryanın yüksek hızda şarj veyadeşarj olması batarya ömrünü de kısalttığından bataryalar için kataloglarda belirtilen akım limitlerinin aşılması gerekmektedir [4].

Tablo 2.1. Deşarj hızı vedeşarj olma süreleri

Deşarj Hızı	Süre
0,2C	5 saat
0,5C	2 saat
1C	1 saat
2C	30 dakika

Bataryaların deşarj hızı Wilhelm Peukert tarafından keşfedilen Peukert etkisi ile de değişebilmektedir. Peukert etkisini ifade eden Eşitlik 2.15'te verilmiştir [36].

$$I_n \times t = K_n \quad (2.15)$$

n : Peukert sabiti (Her bataryaya göre farklılık gösterir)

I : Batarya akımı

K : Bataryanın nominal kapasitesi

Bataryanın nominal deşarj hızı (Eşitlik 2.16) [47]:

$$1 / t_n = C_n \quad (2.16)$$

C : Deşarj hızı

Deşarj hızı üretici kuruluş tarafından bataryanın nominal kapasitesine göre belirlenir. Bataryanın gerçek kapasitesinin bulunması için geçen süre (Eşitlik 2.17) [47]:

$$t = t_n \times (I_n / I)^k \quad (2.17)$$

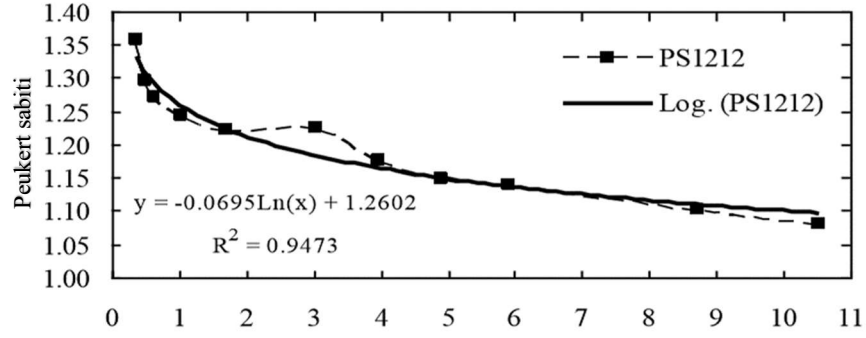
t_n : Nominal süre

I_n : Nominal akım

Kurşun-asit bataryalar için test aşamasında deşarj hızı genelde 20 saattir [36]. Bir bataryanın şarj veya deşarj süresi uzadığında batarya kapasitesinde de artış olur. 100 saatte şarj olan bir bataryanın 20 saatte şarj olan bir bataryaya göre kapasitesinin %10 arttığı bilinmektedir [37].

Peukert sabiti 4-20 saat arasında değişen deşarj sürelerinde sabit kalabilir. Fakat 20 saati geçen deşarj süreleri için Peukert sabiti zamanla değişmektedir. Peukert sabitinin zamana göre değişimi Şekil 2.8.'de ve Şekil 2.9.'da verilmiştir. Grafiğe göre Peukert sabiti Eşitlik 2.18' deki gibi değişmektedir [36].

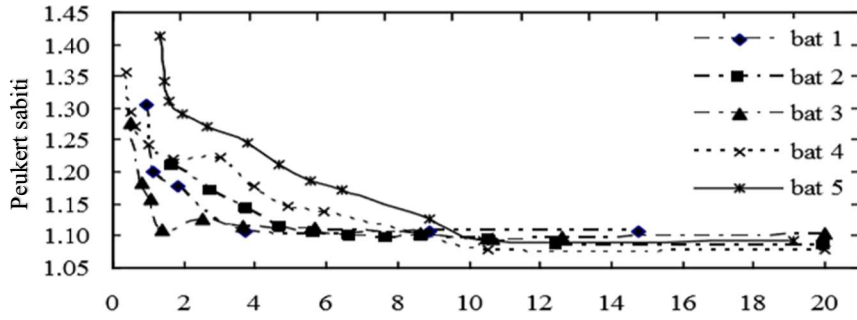
$$p = a - b \times \ln(K / I) \quad (2.18)$$



Şekil 2.8. Peukert sabiti [36]

a ve b her batarya için değişiklik gösterebilen sabitlerdir. I bataryanın deşarj akımıdır. Eşitlik 2.19'a göre deşarj zamanı aşağıdaki gibidir [36]:

$$t = t_{\text{ref}} (K/t_{\text{ref}})^{a-b\ln \frac{K}{I}} / I^{a-b\ln(C/I)} = t_{\text{ref}} ((C/t_{\text{ref}}) / I)^{a-b\ln(C/I)} \quad (2.19)$$



Şekil 2.9. Kurşun-asit bataryada Peukert sabitinin değişimi [36]

Yapılan çalışmalar kurşun-asit bataryalarda Peukert sabitinin batarya kapasitesi ve deşarj akımının bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir. Lityum-iyon bataryalarda ise Peukert sabitinin değişmediği gözlemlenmiştir. Grafik üzerinde 2 nokta seçilerek p sabiti aşağıdaki şekilde de hesaplanabilir (Eşitlik 2.20) [36]:

$$p = (\log(t_2) - \log(t_1)) / (\log(I_1) - \log(I_2)) \quad (2.20)$$

2.3.3. Kapasite

Bir bataryanın kapasitesi o bataryanın nominal gerilim altında taşıyabileceği yük demektir. Bir bataryanın kapasitesi o batarya içindeki elektrot madde miktarıyla orantılıdır. Batarya kapasitesi arttıkça bataryanın boyutları da büyür. Bir bataryanın kapasitesi Amper-saat (ah) ile ölçülür. 1 ah 3600 Coulomb değerindedir. Bir bataryanın enerji kapasitesi Eşitlik 2.21’de verilmiştir [13].

$$E_{bat}=K \times V_{bat} \quad (2.21)$$

V_{bat} : Bataryanın nominal gerilimi

K : Batarya kapasitesi

2.3.4. Batarya verimliliği

Batarya verimliliğine ait Eşitlik 2.22’de verilmiştir. Batarya verimliliğine ait ifade gerilim veya yük cinsinden iki şekilde yazılabilir (Eşitlik 2.23 ve 2.24). Eşitlik 2.23 ve 2.24’teki ifadeler çarpılırsa η değeri elde edilir (Eşitlik 2.25) [13]:

$$\eta = E_{deşarj} / E_{şarj} \quad (2.22)$$

$$V_{deşarj} / V_{şarj} = \eta_v \quad (2.23)$$

$$Q_{deşarj} / Q_{şarj} = \eta_q \quad (2.24)$$

$$\eta = (V_{deşarj} / V_{şarj}) \times (Q_{deşarj}/Q_{şarj}) \quad (2.25)$$

$E_{şarj}$: Bataryanın sahip olduğu enerji kapasitesi

$E_{deşarj}$: Bataryadan alınan enerji

2.3.5. Şarj durumu

Bir bataryanın şarj durumu batarya içindeki yük miktarının, bataryanın kapasitesine oranıdır. Eşitlik 2.26’da şarj durumuna ait ifade yer almaktadır [13].

$$SOC = E_{bat} / K \times V_{bat} \quad (2.26)$$

Batarya şarj durumu, açık devre gerilimi, sıcaklık ve çevrim sayısının bir fonksiyonu olarak düşünülebilir. Fakat sıcaklık değeri oda sıcaklığı civarındaysa ve çevrim sayısı az ise (ör. 22 günde 15 çevrim) sıcaklık ve çevrim sayısının etkisi ihmal edilebilir. Bu durumda SOC Eşitlik 2.27'deki gibi yazılabilir [20]. Amper-saat sayma metoduna göre şarj durumu Eşitlik 2.28'deki gibi hesaplanır. SOC_0 başlangıç şarj yüzdesi ve δ kayıp akım katsayısıdır [38]:

$$F(SOC) = E \quad (2.27)$$

$$SOC = SOC_0 - (1 / K) \int_0^t \delta \times i \, dt \quad (2.28)$$

2.3.6. Açık devre ve terminal gerilimi

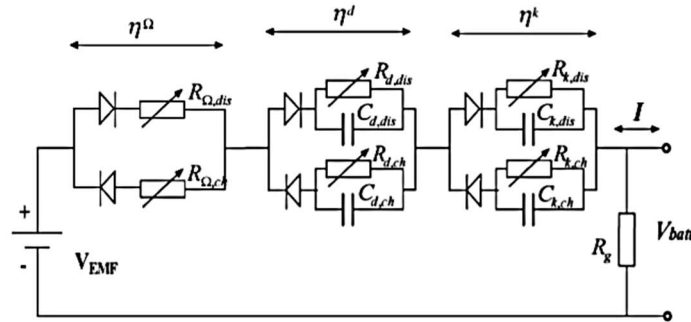
Bataryalara ait eşdeğer devre Şekil 2.10.'da verilmiştir. V_{bat} bataryanın terminal gerilimidir. E ise açık devre gerilimidir. Sıcaklığın ve akımın sabit kaldığı varsayılmıştır. Bataryada oluşan aşırı gerilimler η_k , η_d , η_Ω olarak verilmiştir (Eşitlik 2.29) [38].

$$E = V_{bat} + \eta_\Omega + \eta_k + \eta_d \quad (2.29)$$

η_Ω : Omik aşırı gerilim

η_d : Difüzyondan kaynaklı aşırı gerilim

η_k : Kinetik reaksiyonlardan kaynaklı aşırı gerilim



Şekil 2.10. Batarya eşdeğer devresi [8]

2.3.7. Deşarj derinliği

Bataryadan deşarj edilen yükün batarya kapasitesine oranı deşarj derinliği olarak tanımlanır (Eşitlik 2.30). Deşarj derinliği aynı zamanda Eşitlik 2.31'deki gibi yazılabilir [13].

$$DOD = (K \times V_{bat} - E_{bat}) / K \times V_{bat} \quad (2.30)$$

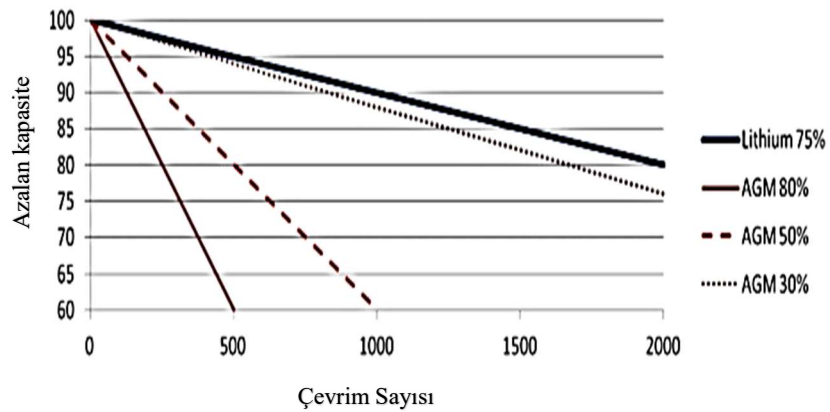
$$DOD = 1 - SOC \quad (2.31)$$

DOD : Deşarj derinliği

SOC : Bataryanın şarj yüzdesi

2.3.8. Çevrim sayısı

Çevrim sayısı bir bataryanın belirli DOD değerine ulaştığında tamamladığı döngü sayısıdır. Çevrim sayısı arttıkça batarya ömrü kısalmır. DOD değerinin yüksek olması da batarya ömrünü kısaltan bir etkidir. Şekil 2.11.'de lityum-iyon ve kurşun –asit bataryalara ait kapasite-çevrim sayısı eğrisi verilmiştir. Grafik 77 °F sıcaklıktaki bataryalara aittir. Grafikten çevrim sayısı arttıkça batarya kapasitesinin azaldığı da anlaşılmaktadır. Grafiğin sağındaki değerler DOD değerleridir [35].



Şekil 2.11. Lityum-iyon ve kurşun asit bataryalar çevrim sayısı-kapasite ilişkisi [35]

Kırmızı renkli eğri kurşun-asit bataryaya; mavi renkli eğri ise lityum-iyon bataryaya aittir. Grafikteki değerler normal iklim koşullarına göre elde edilmiştir. Bataryanın içinde bulunduğu koşullara göre kapasite değerindeki azalma oranı değişebilmektedir [48].

DOD değeri arttığında bataryanın çevrim sayısı da azalmaktadır. Örneğin Şekil 2.11’de kurşun asit bataryanın %80 DOD için çevrim sayısının %50 DOD değerine göre yaklaşık olarak yarısına kadar indiği Şekil 2.11.’de görülmektedir. Kurşun-asit bataryalar için genelde maksimum %70 DOD tavsiye edilmektedir [32].

2.3.9. Polarizasyon gerilimi

Polarizasyon gerilimi batarya şarjı veya deşarjı esnasında elektrot materyalin reaksiyona girmesi sonucu oluşan gerilim değeridir. Eşitlik 2.32’de polarizasyon gerilimine ait ifade verilmiştir [45]. Lityum-iyon pillerde iyonların yer değiştirmesi sonucu oluşan gerilim polarizasyon gerilimine örnek verilebilir [49]. Polarizasyon direncine bağlı devre denklemi Eşitlik 2.33’te verilmiştir [2]:

$$V_p = R_K \times (K / (K - i \times t)) \times i \times t \quad (2.32)$$

- V_p : Polarizasyon gerilimi
 K : Batarya kapasitesi
 I : Batarya akımı
 R_K : Polarizasyon direnci
 $i \times t$: Batarya içindeki yük miktarı (ah)

$$V = E - (R_K + K_{pol} / SOC) \times i \quad (2.33)$$

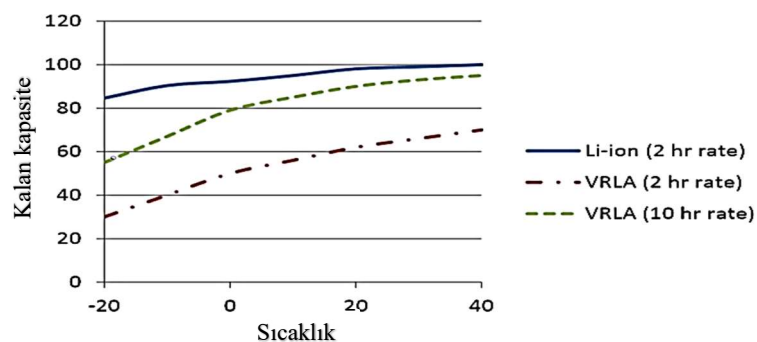
- V : Terminal gerilimi
 K_{pol} : Polarizasyon sabiti

2.3.10. Sıcaklık

Düşük sıcaklıklarda batarya kapasitesi azalmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda ise batarya kapasitesi artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda bataryalar nominal kapasitesinin üzerinde bile şarj edilebilmektedir [13]. Kurşun – asit bataryalarda oda sıcaklığının (25°C) 8 derece üstünde sıcaklık artışı olması durumunda batarya ömrünün %50 kısaldığı ispatlanmıştır [14].

Bataryalar için optimum çalışma sıcaklığı genelde $15-35^{\circ}\text{C}$ olarak kabul edilmektedir. Bataryanın kimyasal yapısı da sıcaklık limitlerini etkiler. Bataryaların sıcaklık limitleri genelde üretici kuruluşların kataloglarında belirlenmektedir [11].

Kurşun-asit bataryaların kapasitesinin sıcaklığa çok duyarlı olduğu bilinmektedir. Lityum-iyon bataryaların kapasitesi sıcaklığa daha az duyarlıdır. Fakat enerji yoğunluğunun yüksek olması lityum-iyon bataryalarda sıcaklığın çok yükselmesi güvenilirliğin az olmasına sebep olmaktadır [35]. Bataryaların sıcaklık değişimlerinin maksimum 5°C civarında tutulması batarya ömrünün maksimum değerde olmasını sağlayabilir. ABD’de yapılan deneyler sonucunda da -6°C civarında elektrikli araçların gidebileceği mesafenin yarı yarıya azaldığı ortaya çıkmıştır [12]. Lityum-iyon ve kurşun-asit bataryalara ait sıcaklık ve kapasite değişimi Şekil 2.12.’de verilmiştir [35].

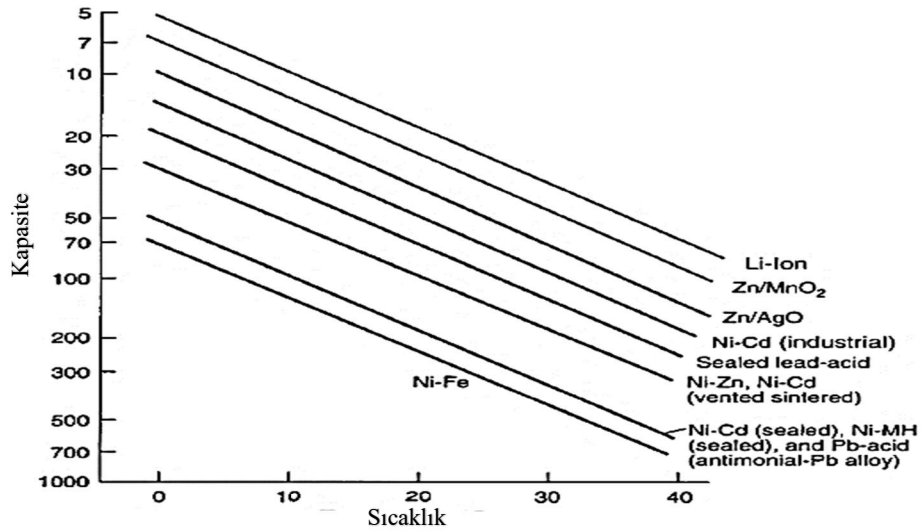


Şekil 2.12. Lityum-iyon ve kurşun-asit bataryaların kapasite-sıcaklık eğrisi [35]

Batarya sıcaklığı bataryaların ömrü, kapasitesi, maliyeti ve güvenliği açısından önemli bir parametredir. İdeal bir bataryada büyük sıcaklık değişimlerinin olması beklenmemektedir [11].

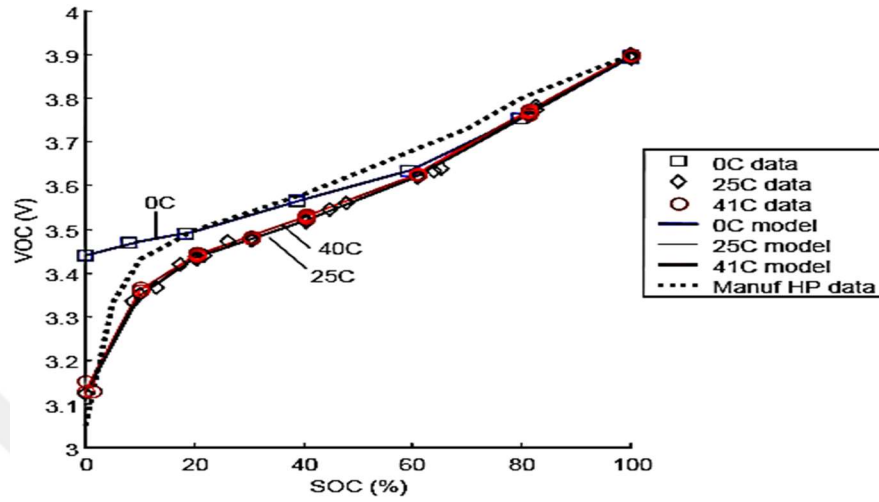
Lityum-iyon ve kurşun-asit bataryalarda sıcaklık değişimi bilgisi şarj yüzdesinden elde edilebilmektedir [41,50].

Mavi renkli eğri lityum-iyon bataryaya; kırmızı ve yeşil eğriler kurşun-asit bataryaya aittir. Koyu kırmızı renkli eğride bataryanın deşarj süresi 2 saattir. Yeşil renkli eğriyle gösterilen eğride ise deşarj süresi 10 saattir. Yeşil renkli eğride kurşun-asit bataryanın kapasitesinin daha yüksek olduğu göze çarpmaktadır. Bunun sebebi deşarj hızının düşük olmasıdır. Diğer bataryaların kapasitelerinin sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 2.13.'te gösterilmiştir [50]. Lityum-iyon bataryalar için batarya sıcaklığının -10°C ile 50°C olması tavsiye edilmektedir. Kurşun-asit bataryalar için benzer şekilde -20°C ile 50°C olması tavsiye edilir [12]. Kurşun-asit bataryalar düşük sıcaklıklardan fazla etkilenmemektedir [3].



Şekil 2.13. Günümüzde sık kullanılan bataryaların kapasite sıcaklık eğrisi [50]

Yüksek sıcaklıklarda bataryaların kapasitelerinin üzerinde şarj edilebilme imkânına sahip olduğu grafikten anlaşılmaktadır. Şekil 2.14.'te dikey eksenle yıllık azalan kapasite değerleri yüzde olarak verilmiştir.



Şekil 2.14. Lityum-iyon bataryalarda açık devre gerilimi-sıcaklık ilişkisi [51]

Bataryalarda açık devre geriliminin de sıcaklığa bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Şekil 2.14.'te ve Tablo 2.2.'de lityum-iyon ve kurşun-asit bataryalar için bu değişim volt cinsinden verilmiştir [51,52]. Tablo 2.2.'deki değerler BCI (Battery Council International) tarafından elde edilmiş değerlerdir [52].

Tablo 2.2. Kurşun- asit bataryalarda açık devre gerilimi- sıcaklık ilişkisi [52]

Sıcaklık	Gerilim Artışı (2V batarya)	Gerilim Artışı (12 V batarya)
43,3 ° C	+0,072 Volt	+0,012 Volt
37,8 ° C	+0,048 Volt	+0,012 Volt
32,2 ° C	+0,048 Volt	+0,012 Volt
26,7 ° C	0	0
21,1 ° C	-0,024 Volt	-0,004 Volt
15,6 ° C	-0,048 Volt	-0,008 Volt
10,0 ° C	-0,072 Volt	-0,012 Volt

BÖLÜM 3. FOTOVOLTAİK PANELLER

Fotovoltaik paneller güneş ışığını elektrik enerjisine çevirme amaçlı kullanılan ve birçok hücreden meydana gelen elemanlardır. Fotovoltaik panellerin kaynağı güneş enerjisidir.

Fotovoltaik sistemler hareketli parça içermemesi, bakımlarının kolay olması ve yakıt maliyetinin olmaması gibi avantajlara sahiptir. Fakat ilk yatırım maliyeti yüksek sistemlerdir [53].

Güneş ışığından gelen fotonlar yarıiletken elemanın atomları tarafından absorbe edilir ve negatif katmandaki elektronlar serbest kalır. Bu elektronlar elektrik devresi üzerinden pozitif katmana ulaşır ve akım geçmeye başlar [54].

Genelde bir fotovoltaik (PV) hücre 0,5 veya 0,8 Volt elektrik üretir. Tek bir hücreden elde edilen enerji çok düşük olacağından bu hücrelerden birçoğu bir araya gelir ve paneller oluşur. PV hücrelerde monokristal ve polikristal teknolojileri kullanılmaktadır. Monokristal hücrelerin en yüksek verime sahip oldukları bilinmektedir [54].

Batarya teknolojilerinin maliyeti PV sistemlerin ilk kurulum maliyetinin %8'ini oluşturmaktadır. PV sistemlerin toplam maliyetinin ise %23'üne denk gelmektedir [50].

3.1. Fotovoltaik Hücrelerin Karakteristiği

Fotovoltaik hücreler genelde doğrusal olmayan I-V ve P-V karakteristiğine sahiptir. Fotovoltaik panel için maksimum güç noktası olarak bilinen değer MPP olarak

gösterilir. OCV olarak gösterilen değer panelin açık devre gerilimi değeridir. Fotovoltaik hücrelere ait doyma akımı ve güneş ışığından kaynaklanan akıma ait ifadeler Eşitlik 3.1 ve 3.2’de verilmiştir [54]. Doyma akımı da (I_s) sıcaklığa bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Eşitlik 3.2) [52].

$$I_{ph} = [I_{SC} + K_I (T_C - T_{ref})] \lambda \quad (3.1)$$

I_{sc} : Kısa devre akımı
 K_I : Kısa devre akımı için sıcaklık katsayısı
 T_C : Fotovoltaik hücrenin çalışma sıcaklığı
 T_{Ref} : Fotovoltaik hücrenin referans sıcaklığı
 λ : Güneşlenme katsayısı (birimi kW/m^2)

$$I_s = I_{RS} (T_C / T_{ref})^3 \exp[q E_G (1 / T_{ref} - 1 / T_C) / k A_{PV}] \quad (3.2)$$

I_{RS} : Ters doyma akımı
 E_G : Band enerjisi
 k : Boltzmann sabiti ($1,38 \times 10^{-23} J/K$)
 q : Elektron yükü ($1,6 \times 10^{-19} C$)

A_{PV} katsayısı PV teknolojisinde kullanılan malzemeye bağlıdır [54].

Kısa devre akımı fotovoltaik hücrenin üretebileceği en büyük akım değeridir. Maksimum Güç Noktası, yük tarafından çekilen gücün maksimum olduğu noktadır. Doluluk Faktörü (DF), maksimum gücün teorik güce oranıdır. Maksimum güç açık devre gerilimi ile kısa devre akımının çarpımından elde edilmektedir (Eşitlik 3.3). Doluluk faktörü 0,7’nin üzerinde olan fotovoltaik hücrelerin kalitesinin yüksek olduğu kabul edilir [54].

$$DF = (V_m \times I_m) / (OCV \times I_{SC}) \quad (3.3)$$

I_m : Maksimum akım

V_m : Maksimum gerilim

Açık devre gerilimi ile güneşlenme arasında logaritmik bir değişim vardır. Güneşlenme ile kısa devre akımı arasında ise doğrusal bir değişim olduğu söylenebilir [54].

Bir fotovoltaik hücreden yaklaşık 2 W ve 0,5 Volt elektrik enerjisi alınabilmektedir. Bu hücreler seri veya paralel bağlandığında fotovoltaik paneller elde edilir [54]. Diyot akımı hesaplanırken seri veya paralel bağlı hücrelerin sayısının da bilinmesi gerekir. Eşitlik 3.4 fotovoltaik bir hücredeki diyot akımına aittir. Band enerjisi ve termal gerilime ait ifade Eşitlik 3.5 ve 3.6'da verilmiştir [55].

$$I_d = I_{RS} (\exp((V + IR_s) / N_s A V_t) - 1) \quad (3.4)$$

$$E_G = 1,16 - 7,02 \times 10^{-4} (T_c^2 / (T_c + 1108)) \quad (3.5)$$

$$V_t = k T_c / q \quad (3.6)$$

V_f : Fotovoltaik hücrenin çıkış gerilimi

R_s : Seri direnç

V_t : Termal Gerilim

N_s : Seri bağlı hücre sayısı

Güneşlenme katsayısı (λ) değerinin tahmini için yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Li Vigni ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada güneşlenme katsayısının kısa devre akımı ve açık devre gerilimine bağlı değişimi tanımlanmıştır [55].

$$\lambda_{ocv} = \lambda_{stc} e^{(OCV - OCV_{stc} - \mu_{ocv}(T_c - T_{cstc})) / (N_s A k_c / q)} \quad (3.7)$$

$$\lambda_{isc} = \lambda_{stc} / I_{sc} (I_{sc} - K_I (T_c - T_{cstc})) \quad (3.8)$$

λ_{STC} Standart güneşlenme katsayısı ve μ_{ocv} değeri açık devre gerilimi için sıcaklık katsayısıdır.

3.2. P-V Eğrileri

Fotovoltaik hücrelerin performansının takip edilebilmesi amacıyla farklı koşullar altında (güneş ışığı yoğunluğu, sıcaklık vb...) P-V eğrilerinin oluşturulması büyük önem taşımaktadır. P-V eğrileri fotovoltaik hücrelerin performans optimizasyonunda ve güneş enerjisi için önemli bir parametre olan maksimum güç noktasının belirlenmesinde kullanılabilmektedir.

Bonkougou ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada Newton-Raphson metodu kullanılarak parametre çıkarımları yapılmış ve P-V eğrileri elde edilmiştir [56].

Sıcaklık değerinin P-V eğrileri üzerinde etkisi olduğu bilinmektedir. Normal koşullarda P-V ve I-V eğrileri doğrusal olmayan eğrilerdir ve sıcaklık değişimine göre farklılıklar gösterir. Çıkış akımı Eşitlik 3.9'da verilmiştir [56].

$$I = I_{ph} - I_d \quad (3.9)$$

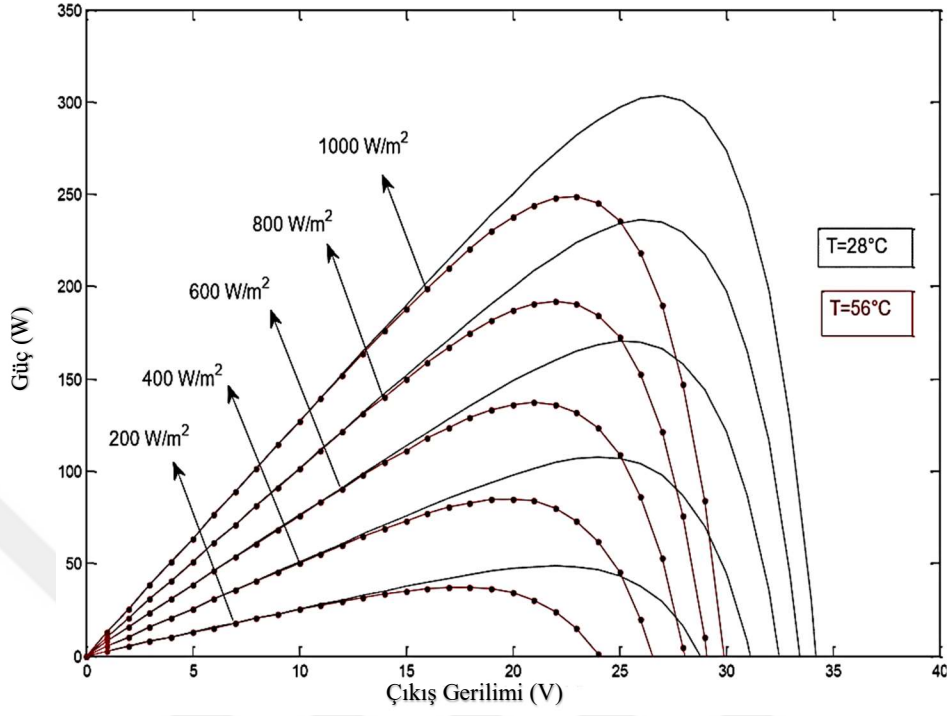
I_{ph} ve I_d değerleri Eşitlik 3.1 ve 3.4'ten elde edilebilir. Çıkış gücüne ait Eşitlik 3.10'da verilmiştir [56].

$$P = V [I_{sc} - I_{RS} \times (\exp(V / A_i \times V_t) - 1)] \quad (3.10)$$

Kısa devre akımı, açık devre gerilimi ve idealite faktörü (A_i) fotovoltaik hücrenin karakterizasyonunda önemli bir yer tutmaktadır. Eşitlik 3.11 fotovoltaik hücrenin açık devre gerilimine aittir ($I=0$) [56].

$$V = V_{ocv} = A_i \times V_t \ln [(1 + I_{sc}) / I_{RS}] \quad (3.11)$$

Şekil 3.1'de P-V eğrilerinin farklı sıcaklık ve güneşlenme altında değişimi verilmiştir. Işık yoğunluğu kısa devre akımı üzerinde etkilidir. Sıcaklık ise açık devre gerilimi üzerinde etkili olmaktadır. Işık yoğunluğunun açık devre gerilimi üzerindeki etkisi zayıftır [56].



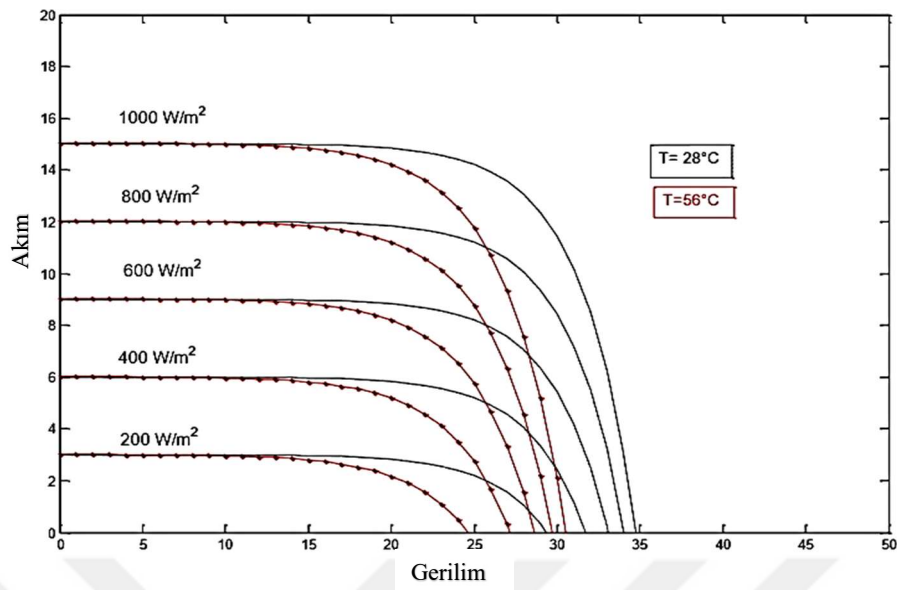
Şekil 3.1. P-V eğrileri [56]

3.3. I-V Eğrileri

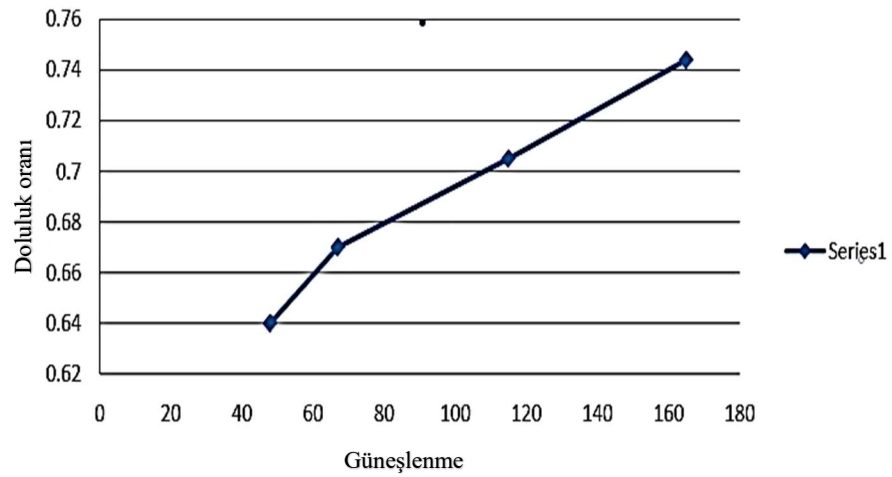
Şekil 3.1.'de verilen P-V eğrilerinin yanı sıra aynı koşullarda I-V eğrileri de Şekil 3.2.'de verilmiştir. İki eğriye ait sıcaklık değerleri 28 °C ve 56 °C'dir [56].

Dikey ekseninde akım (A) ve yatay ekseninde çıkış gerilimi (V) vardır (Şekil 3.2.). Eğriler 5 farklı ışık yoğunluğuna göre oluşturulmuştur.

Güneşlenme ve doluluk faktörüne ait ilişki Şekil 3.3.'te yer almaktadır [57].



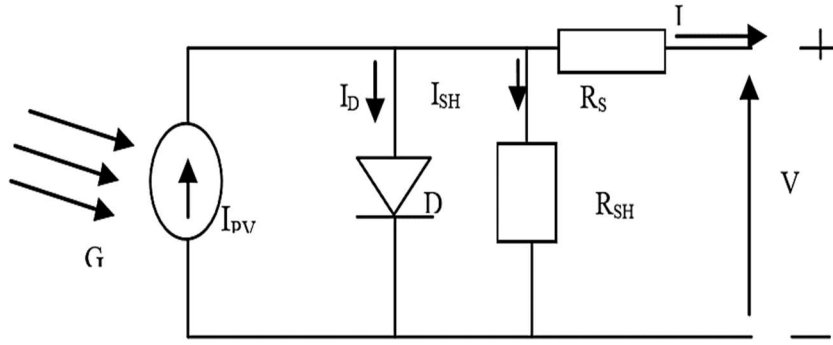
Şekil 3.2. I-V eğrileri [56]



Şekil 3.3. Doluluk oranı-güneşlenme grafiği [57]

3.4. Fotovoltaik Panellerin Tek Diyotlu Modeli

Şekil 3.4.'te fotovoltaik panellere ait tek diyotlu eşdeğer devre verilmiştir. Eşitlik 3.12.'de eşdeğer devreye ait denklem yer almaktadır. Şekilde görülen “G” değeri güneş ışığı yoğunluğunu temsil etmektedir. Güneş ışığı yoğunluğundan elde edilen akım I_{PV} ile gösterilmiştir. Panel akımı “I” ile gösterilmektedir [58].

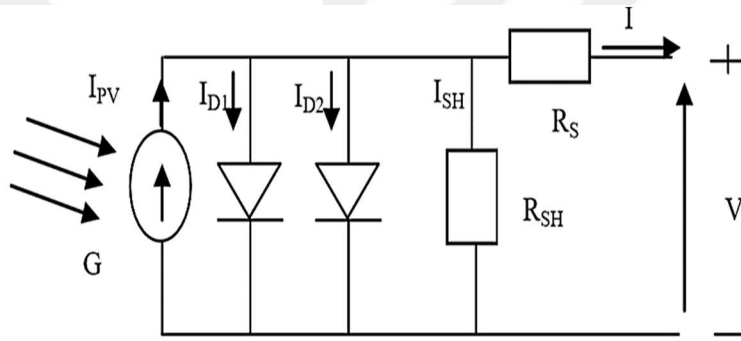


Şekil 3.4. PV panelin tek diyotlu eşdeğer devresi [56]

$$I = I_{ph} - I_{RS} [\exp((V + I \times R_s) / (A_i \times V_t)) - 1] - ((V + I \times V_t) / R_{sh}) \quad (3.12)$$

3.5. Fotovoltaik Panellerin İki Diyotlu Modeli

Şekil 3.5.'te fotovoltaik panellere ait çift diyotlu devre modeli verilmiştir [56].



Şekil 3.5. PV panelin çift diyotlu eşdeğer devresi [56]

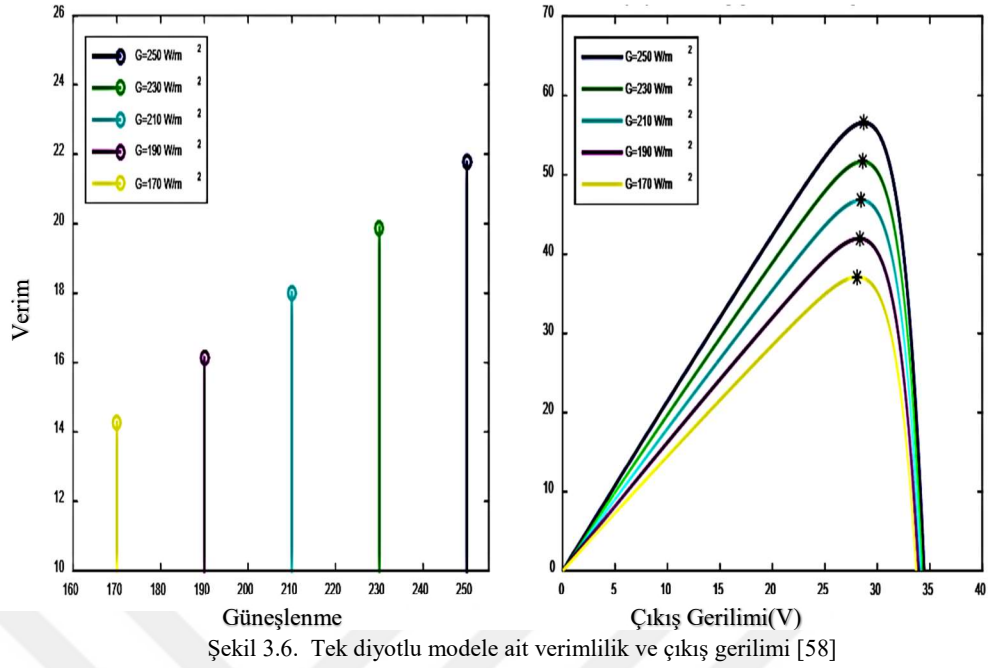
Devreye ait eşitlik (Eşitlik 3.13, 3.14 ve 3.15):

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} \quad (3.13)$$

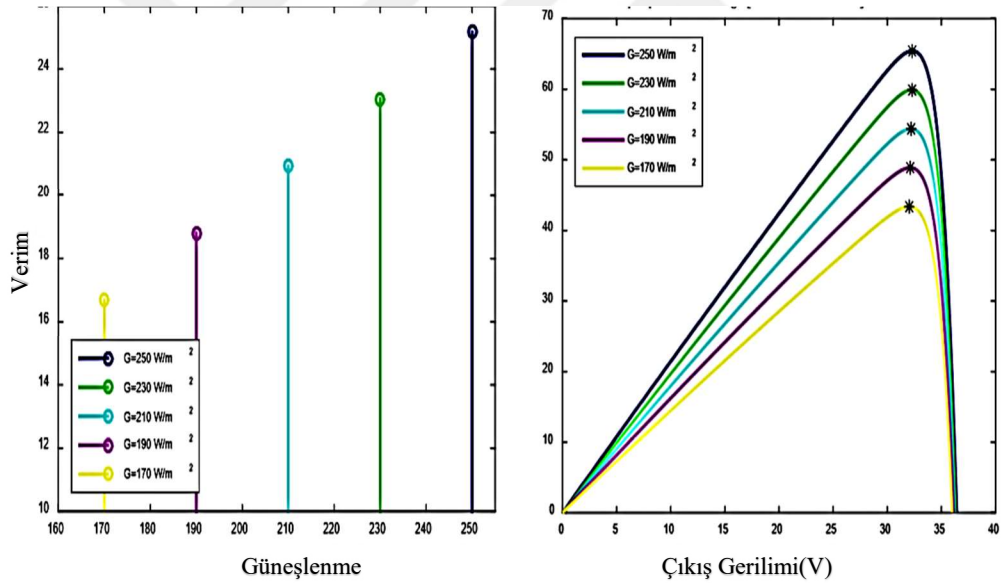
$$I_{D1} = I_{RS1} \times [\exp (V / (A_{i1} \times V_t)) - 1] \quad (3.14)$$

$$I_{D2} = I_{RS2} \times [\exp (V / (A_{i2} \times V_t)) - 1] \quad (3.15)$$

Şekil 3.6. ve 3.7.'de tek diyotlu ve çift diyotlu modellere ait verimlilik ve çıkış gerilimi grafikleri verilmiştir. Eşitlik 3.16. idealite faktörünü vermektedir [58].



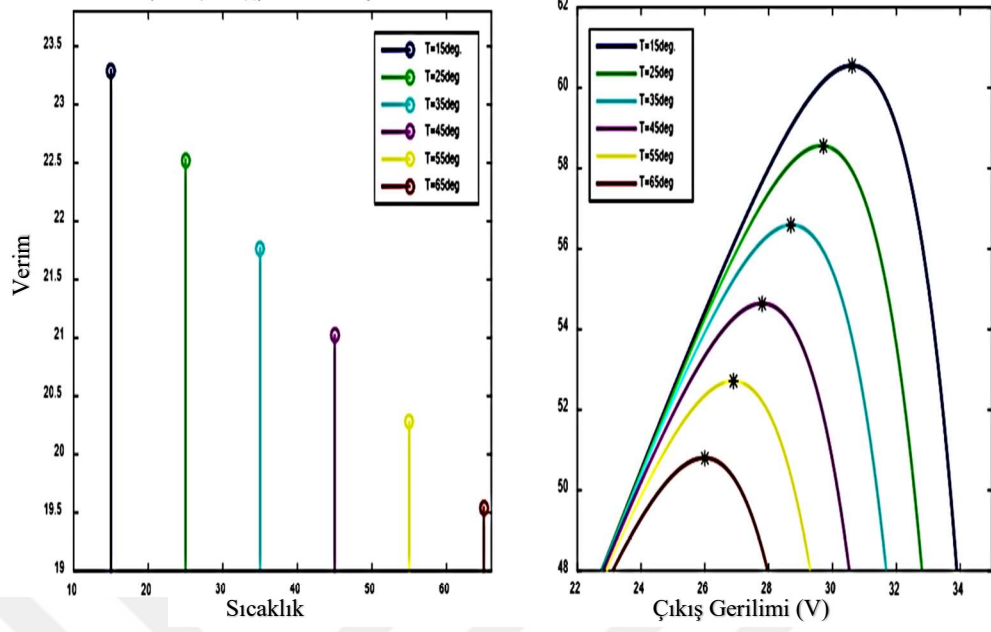
Şekil 3.6. Tek diyotlu modele ait verimlilik ve çıkış gerilimi [58]



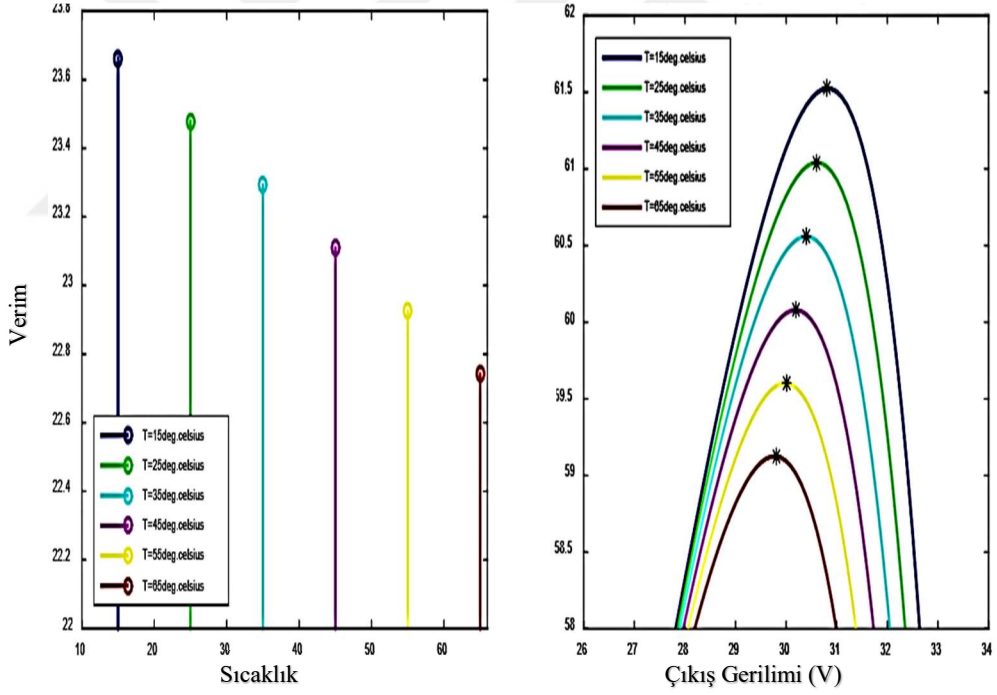
Şekil 3.7. Çift Diyotlu modele ait verimlilik ve çıkış gerilimi [58]

Işık yoğunluğunun artması verimliliği ve çıkış gerilimini arttırmaktadır. Sıcaklığın artması halinde ise verim düşmektedir. İdealite faktörünün artması tek diyotlu modellerde verimi düşürürken çift diyotlu fotovoltaik panellerde idealite faktörü arttıkça panelin verimliliği artmaktadır [58].

Sıcaklığa bağlı verimlilik ve gerilime bağlı güç değeri Şekil 3.8. ve 3.9.'da verilmiştir [58].



Şekil 3.8. Tek diyotlu modele ait verimlilik ve çıkış gerilimi değeri (Sıcaklığa bağlı) [58]



Şekil 3.9. Çift diyotlu modele ait verimlilik ve çıkış gerilimi (Sıcaklığa bağlı) [58]

A_i : PV panelde idealite faktörü

V_T : Termal gerilim

V_{mpp} : Maksimum güç noktasında gerilim değeri

I_{mpp} : Maksimum güç noktasında akım değeri

$$A_i = \frac{V_{mpp} + I_{mpp} \times (R_{so}) - V_{ocv}}{V_t \times \left[\ln \left(I_{sc} - \frac{V_{mpp}}{R_{sho}} - I_{mpp} \right) - \ln \left(I_{sc} - \frac{V_{ocv}}{R_{sh}} \right) + \frac{I_{mpp}}{I_{sc} - \frac{V_{ocv}}{R_{so}}} \right]} \quad (3.16)$$

R_{so} : dv/dI ($V=V_{ocv}$)

R_{sho} : dv/dI ($I=I_{sc}$)

İdealite faktörü çift diyotlu modellerde verimi ve çıkış gücünü arttırırken, tek diyotlu modellerde verimi düşürebilmektedir. Tablo 3.1.'de idealite faktörünün verim üzerine etkisini inceleyen bir çalışmadan elde edilen sonuçlar verilmiştir [58].

Tablo 3.1. İdealite faktörü, maksimum güç (P_m) ve verim değerleri [58]

İdealite	İki diyotlu model		Tek diyotlu model	
	$P_{m(Watt)}$	Verim	$P_{m(Watt)}$	Verim
1	58,55	%22,52	59,15	%22,753
1,2	60,55	%23,292	56,59	%21,766
1,4	60,66	%23,333	54,16	%20,834
1,6	60,67	%23,337	51,86	%19,949
1,8	60,67	%23,337	49,68	%19,108
2	60,67	%23,338	47,59	%18,306

Şekil 4.1. Ni-Mh batarya için batarya yönetim sisteminin modellenmesi [59]

Bu çalışmada DC motor kurşun-asit batarya ve bir fotovoltaiik panele bağlanmış ve batarya yönetim sistemi oluşturulmuştur. Fotovoltaiik panele ait eşdeğer devre, bir diyot ve bir kontrollü akım kaynağından oluşmaktadır.

Batarya anahtar yardımıyla açık devre yapıldığında açık devre geriliminin de okunması sağlanmıştır. Batarya üzerinden geçen akım değeri de okunabilmektedir.

Motora ait moment (N.m) ve hız (rad /s) değerleri de ekranda görülebilmektedir. Çalışmada kullanılan batarya modeline ait parametreler Şekil 4.2.'de yer almaktadır.

Parameters

Battery type: Lead-Acid

Nominal Voltage (V): 24

Rated Capacity (Ah): 250

Initial State-Of-Charge (%): 40

☒ Show detailed parameters

Full charge voltage (%): 108

Nominal Discharge Current (% of Rated Capacity): 5

Internal Resistance (Ohms): 0.0024

Capacity (% of Rated Capacity) @ Nominal Voltage: 50

Exponential zone [Voltage (%), Capacity (% of Rated Capacity)]: [102.5 0.08]

☐ Plot Discharge Characteristics

Discharge current [i1, i2, i3,...] (amps): 9

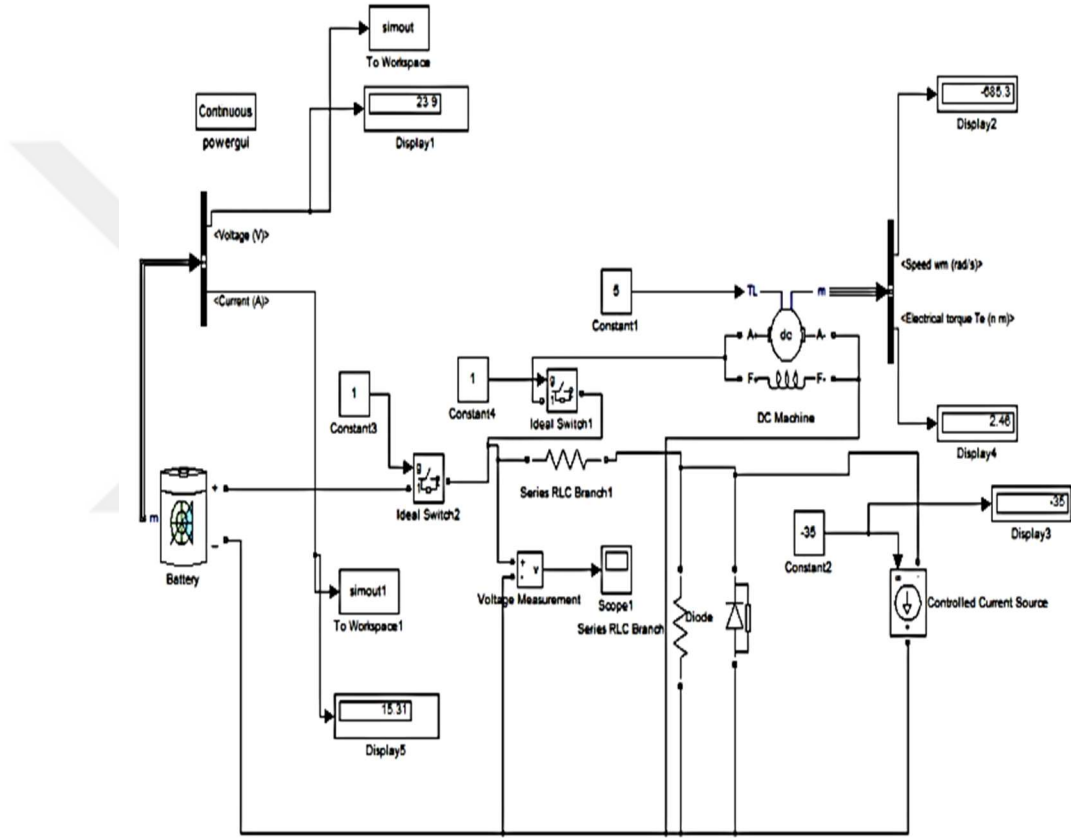
Units: Time

OK Cancel Help Apply

Şekil 4.2. Çalışmada kullanılan kurşun-asit batarya modeli

4.2. Bataryanın Açık Devre Gerilimlerinin Elde Edilmesi

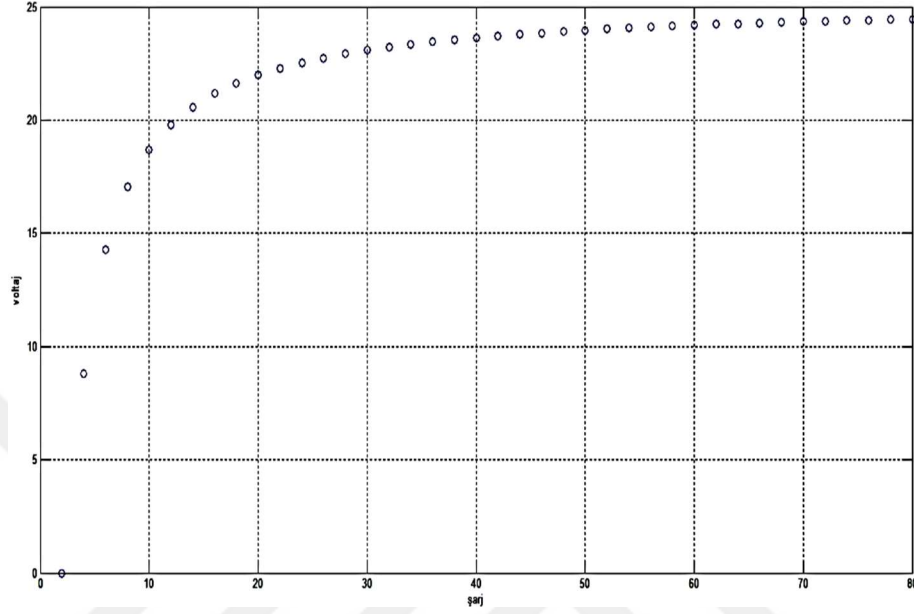
Şekil 4.3.'te Simulink modelinde yer alan kurşun-asit bataryadan 49 adet veri elde edilmiştir. Bataryanın kapasitesi ise 250 Ah (6 kWh) ve nominal gerilimi 24 Volt olarak belirlenmiştir. Önce batarya şarj yüzdesine karşılık gelen açık devre gerilimi verileri toplanmıştır. Daha sonra verilerin oluşturduğu noktalara yakınsayan eğrinin bulunması sağlanmıştır.



Şekil 4.3. Fotovoltaik sistem için Simulink modeli

Güneş enerjili sulama, santrifüj vb. sistemleriyle ilgili yapılan çalışmalarda Şekil 4.3.'teki sisteme benzer modellemeler yer almaktadır. Bu çalışmalarda maksimum güç noktası algoritmasının oluşturulması amacıyla DC-DC dönüştürücüler de modellenmiştir [61].

Toplanan veriler Matlab ekranına matris olarak yazılmıştır. İki adet matris oluşturulmuştur ve bu matrislere ait noktalar Matlab ekranına grafik olarak çizdirilmiştir. Şekil 4.4'te bu noktalar görülmektedir.



Şekil 4.4. Açık devre gerilimi değerlerinin grafik üzerinde gösterimi

x ve y eksenleri sırasıyla şarj ve gerilim olarak belirlenmiştir. Grafikte görülen yuvarlak işaretler bataryaya ait belirli şarj yüzdelerine karşılık gelen açık devre gerilimlerinin değerleridir. Bu çalışmanın daha önceki bölümlerinde bataryalarda açık devre geriliminin şarj yüzdesinin bir fonksiyonu olduğu belirtilmişti. Çevrim sayısının yüksek olmaması ve batarya sıcaklığının 15-35 °C olması halinde açık devre gerilimine etki eden çevrim sayısı ve sıcaklık faktörü ihmal edilebilir düzeydedir.

Simulink modelinde yer alan anahtar ("Ideal switch 2") açıldığında batarya akımı "0" olmaktadır ve okunan gerilim değeri açık devre gerilimidir.

Matlab programında "Cursor mode" özelliği kullanılarak Şekil 4.4.'te grafik üzerindeki değerler okunabilmektedir. Eğriye ait artık kareler toplamı değeri bilindiğinde grafik üzerinde iyileştirmeler yapmak mümkündür.

Bazı üretici kuruluşların kataloglarında da benzer şekilde her bataryaya özgü açık devre gerilimi-şarj yüzdesi karakteristiği yer almaktadır [21].

Fotovoltaik panelin modeli oluşturulurken diyot, kontrollü akım kaynağı, seri ve paralel dirençler kullanılmıştır. Batarya açık devre yapıldığında DC motor çalışmaya devam etmektedir.

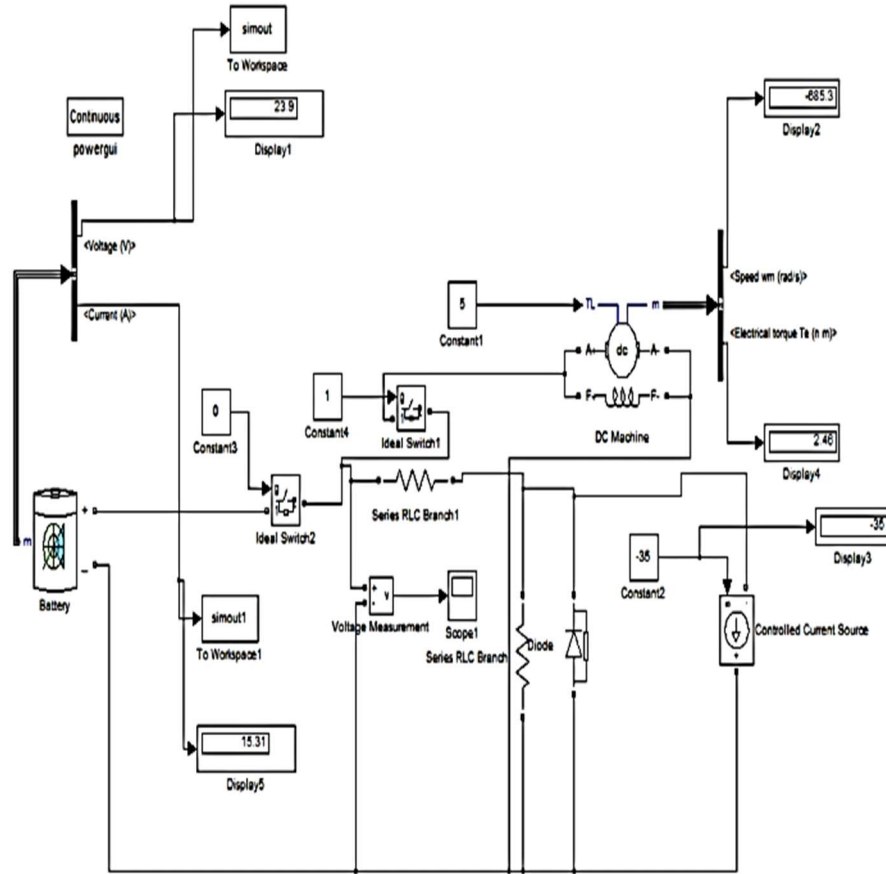
Batarya uçları açık devre yapıldığında ve batarya akımı “0” olduğunda, batarya denge konumuna gelir ve şarj yüzdesi bataryanın sabit bir açık devre gerilimiyle eşleştirilir. Bu özelliği sayesinde açık devre gerilimi yöntemi en etkili şarj yüzdesi tahmin yöntemlerinden biri kabul edilmektedir. Bataryanın tamamen denge konumuna gelmesi saatler sürebilir [62]. Bu çalışmada bataryanın denge konumuna gelmesi esnasında açık devre voltajındaki değişimler ihmal edilmiştir.

Bataryanın uzun süre kullanılmış olması, sıcaklık artışı gibi sebeplerden dolayı açık devre voltajında değişiklikler olabilmektedir. Kurşun-asit bataryalar için bu değişim oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda maksimum 0,072 Volt civarındadır [52].

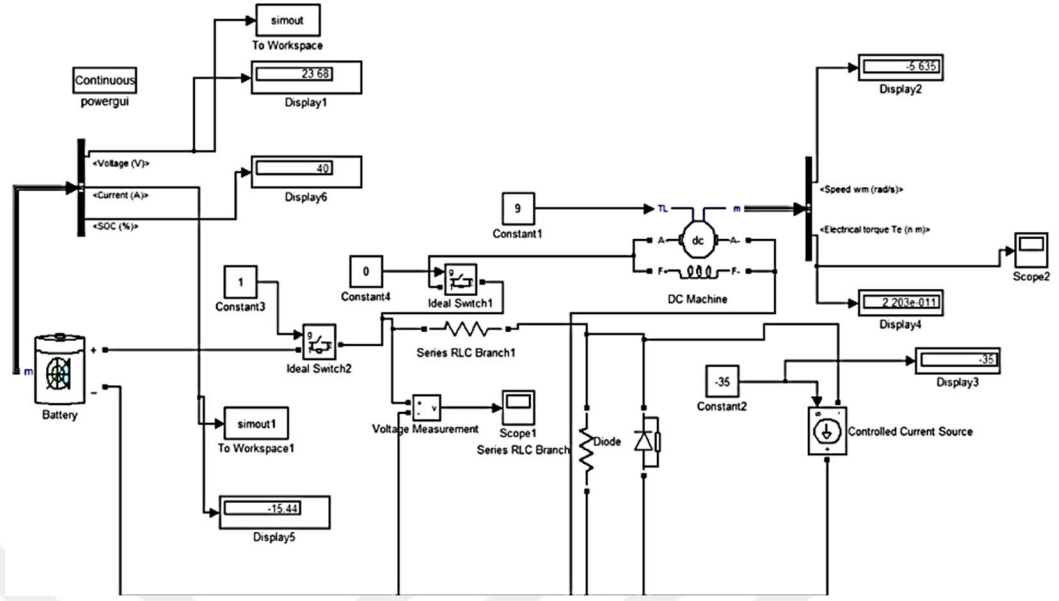
Şekil 4.5. ve 4.6.’daki Simulink modeli bir kurşun-asit batarya, tek diyotlu güneş paneline ait eşdeğer devre ve bir adet yükten oluşmaktadır. Yük olarak 2 kW gücünde bir DC motor seçilmiştir. Yükün sisteme bağlandığı ve bataryanın sistemden ayrıldığı durumlar da gösterilmiştir. Yükün sistemden ayrılması “Ideal switch 1” adlı blok ile gerçekleştirilmektedir.

Devre gerilimlerinin ölçülmesi için de anahtar kullanılmıştır. Açık devre gerilimi bilindiğinde grafik üzerinden şarj değeri tahmini yapılabilir.

Toplamda 49 adet veri elde edilmiştir. Bu veriler belirlenirken batarya uçları açık devre yapılmıştır ve bir matris oluşturulmuştur. Şekil 4.3.'te güneş paneli hem bataryaya hem de yüke bağlanmaktadır. Bu durumdayken batarya deşarj olmaktadır. Şekil 4.5.'te batarya açık devredir. Şekil 4.6.'da yük sistemden ayrılmıştır ve güneş paneli sadece bataryayı şarj etmektedir. Bu durumda bataryanın şarj yüzdesi yükselmektedir.



Şekil 4.5. Bataryanın açık devre yapılması ("Ideal Switch 2"=0)



Şekil 4.6. Yükün açık devre yapılıması (“Ideal Switch 1”=0)

Güneş paneline ait I_{ph} akımı kontrollü akım kaynağı olarak modellenmiştir. Güneş panelinin modeli oluşturulurken tek diyotlu eşdeğer devre modeli seçilmiştir.

“ To workspace” blokları anlık değerlerin okunmasını sağlamaktadır. Böylece açık devre gerilimine ait değerlerin hassas bir biçimde ölçülmesi sağlanacaktır.

2 kW’lık DC motora uygulanan moment değeri (T_L) “Constant” sayesinde ayarlanabilmektedir. T_L değeri ayarlandığında değişen elektromanyetik moment değeri (T_e) gösterge ekranından (“Display 4”) okunabilmektedir. Deşarj derinliği (DOD) yüksek bir düzeye ulaştığında anahtar (“Ideal switch 1”) açılarak DC motor devreden ayrılabilir. Deşarj derinliğinin belirlenebilmesi için bataryanın başlangıç şarj yüzdesinin de bilinmesi gerekmektedir.

Eşdeğer devresi oluşturulan fotovoltaiik panelin gerilimi 24 Volttur ve panel 840 W güce sahiptir.

4.3. Doğrusal En Küçük Kareler Yöntemi

En sık kullanılan regresyon tekniklerinden biri olan doğrusal en küçük kareler yöntemi sayesinde belirli noktalar üzerinden geçen yaklaşık polinom eğrisi bulunabilir. Bu çalışmada kullanılmasının amacı az sayıda veri kullanılarak şarj durumuna ait ara değerlerin belirlenmesini sağlamaktır.

Polinom eğrisi üzerinde bulunan bir noktanın (tahmin) gerçek verilerden elde edilen noktaya olan uzaklığının farkının karesinin minimum olması önemlidir [63,64,65]. Doğrusal en küçük kareler fonksiyonu, lineer olmak zorunda değildir. Fakat başlangıçta tüm noktaların bir doğru üzerinde olduğu varsayılır [66].

Doğrusal en küçük kareler yönteminde istenilen sonuca yaklaşıldığını anlamak amacıyla artık kareler toplamı değeri hesaplanmaktadır. Artık kareler toplamı değeri, istatistikte polinom eğrisi üzerindeki yaklaşık veri noktaları ile gerçek veri noktaları arasındaki farkın karelerinin toplamıdır [63,64,65,66]. Artık kareler toplamı en küçük değerine ulaştığında polinom eğrisi son şeklini alır.

Doğrusal en küçük kareler fonksiyonu $J(x)$ olarak gösterilirse (Eşitlik 4.1) [64]:

$$J(x) = \sum_{i=0}^m (y_i - z_i T_x)^2 = (y - Zx)^T (y - Zx) \quad (4.1)$$

$$y = Zx + n_g \quad (4.2)$$

$Z \in m^{r \times p}$ şeklinde tanımlanır ve gözlemci matrisidir.

Y : Ölçüm verisi

X : Tahmin edilmesi gereken parametre

n_g : Gürültü vektörü

Denklem sistemi m bilinmeyenli ise bu denklemin çözülebilmesi için m adet eşitlik gereklidir. Bu tip denklemlerin çözümünde kolaylık sağlanması amacıyla matris oluşturularak çözüm sağlanabilir. Örneğin birinci dereceden bir polinom üzerinde 3 adet bilinmeyen nokta olsun. Bu noktalar $[x1;y1]$, $[x2;y2]$, $[x3;y3]$ şeklinde yazıldığında Eşitlik 4.3'teki gibi olur:

$$[y1; y2; y3] = [x1 \ 1; x2 \ 1; x3 \ 1] [Z; n_g] \quad (4.3)$$

Eşitlik 4.3 $Y=H \times T$ şeklinde yazılabilir. T matrisi bu eşitlikten bulunabilir. Fakat H matrisinin tersinin alınması gerekmektedir. H matrisi 3×2 matris olduğundan tersinin direk bulunması mümkün değildir. Eşitlik 4.4'te olduğu gibi her iki taraf H^T (H matrisinin transpozesi) ile çarpılır ve işleme devam edilir.

$$Y \times H^T = H^T \times H \times T \quad (4.4)$$

Son olarak T matrisi bulunur:

$$T=(H^T \times H)^{-1} \times H^T \times Y \quad (4.5)$$

İlk eğri oluşturulurken polinom derecesi (H matrisinin kuvveti) 10; 2. Eğri oluşturulurken polinom derecesi 3 seçilmiştir. Bu değerler seçilirken artık kareler toplamı değerinin en küçük değerde olması hedeflenmiştir. İlk eğri için R değeri 0,076; ikinci eğri için ise $1,65 \times 10^{-6}$ bulunmuştur. Algoritmanın en alt satırında artık kareler toplamı değerini bulduran kod (sum) yer almaktadır. Oluşturulan algoritma EK C'de verilmiştir.

R_a (artık kareler toplamı) değerinin “0” değerine yakın olması oluşturulan eğrinin yaklaşık değerlerle örtüştüğünü gösterir. R_a değeri değeri bağıl hata yüzdesinden farklı bir değerdir. Bu çalışmada bağıl hata yüzdesi de bazı değerler için ayrıca hesaplanmıştır. İkinci eğrinin oluşturulması R_a ve bağıl hata değerlerini en aza indirme amaçlıdır.

Polinom dereceleri sırasıyla “10” ve “3” olarak seçildikten sonra eğriler çizdirilebilir. Eğri çizdirildiğinde Matlab ekranında R_a değeri çıkmaktadır. Matlab yazılımında bu değerler “R” harfiyle gösterilir.

Bataryanın açık devre geriliminin şarj yüzdesi bir fonksiyonu olduğu 2. bölümde belirtilmiştir. Sıcaklık değeri açık devre geriliminin değişimi üzerinde etkilidir. Fakat sıcaklık 15-35 °C civarında olduğu sürece sıcaklık değişiminin etkisi de ihmal edilebilir. Tablo 2.2.’de kurşun-asit bataryalar için açık devre geriliminin sıcaklığa bağlı değişimi verilmiştir.

Polinom eğrisi oluşturulmadan önce açık devre gerilimi değerlerinden oluşan noktaların görüntüsü Şekil 4.4.’te yer almaktadır. Bu çalışmada Şekil 4.4’teki noktalara en yakın polinom eğrisi ve bazı açık devre gerilimlerine karşılık gelen şarj yüzdeleri belirlenmiştir. Matlab yazılımındaki “Cursor mode” özelliği sayesinde eğri üzerinde interpolasyon (ara değer bulma) yapılabilir.

Eğri üzerinde değerler bulunduktan sonra bazı noktalar için bağıl hata değeri de hesaplanmıştır. Bağıl hata değerini veren formül Eşitlik 4.6’da yer almaktadır [67].

Tablo 4.1. ve 4.2. açık devre gerilimlerine karşılık gelen şarj yüzdesi değerlerini göstermektedir.

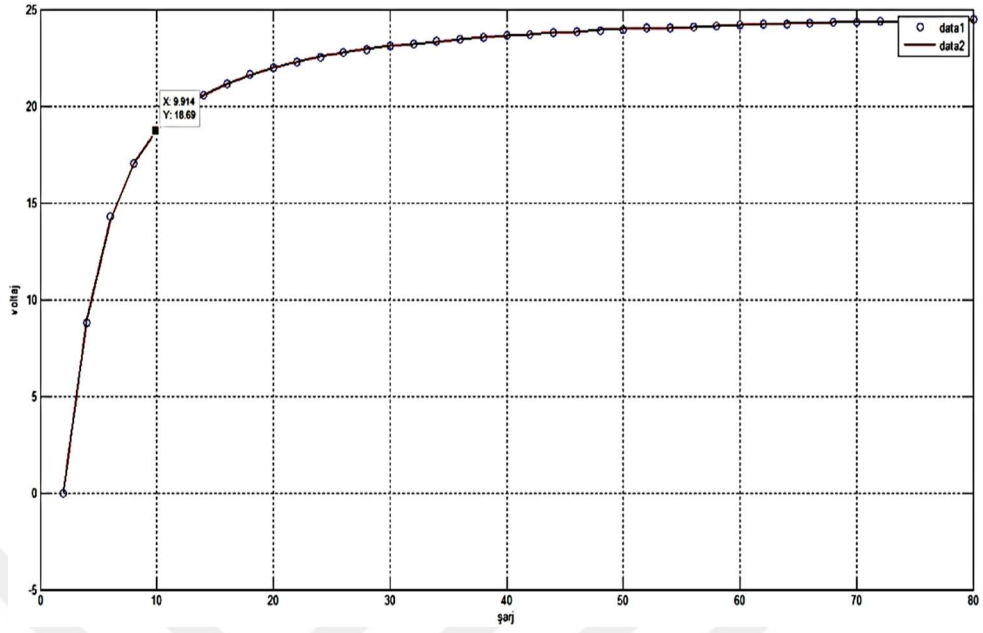
$$\text{Bağıl Hata} = \epsilon = ((\tilde{\alpha} - \alpha))/\alpha \quad (4.6)$$

$$\alpha \neq 0$$

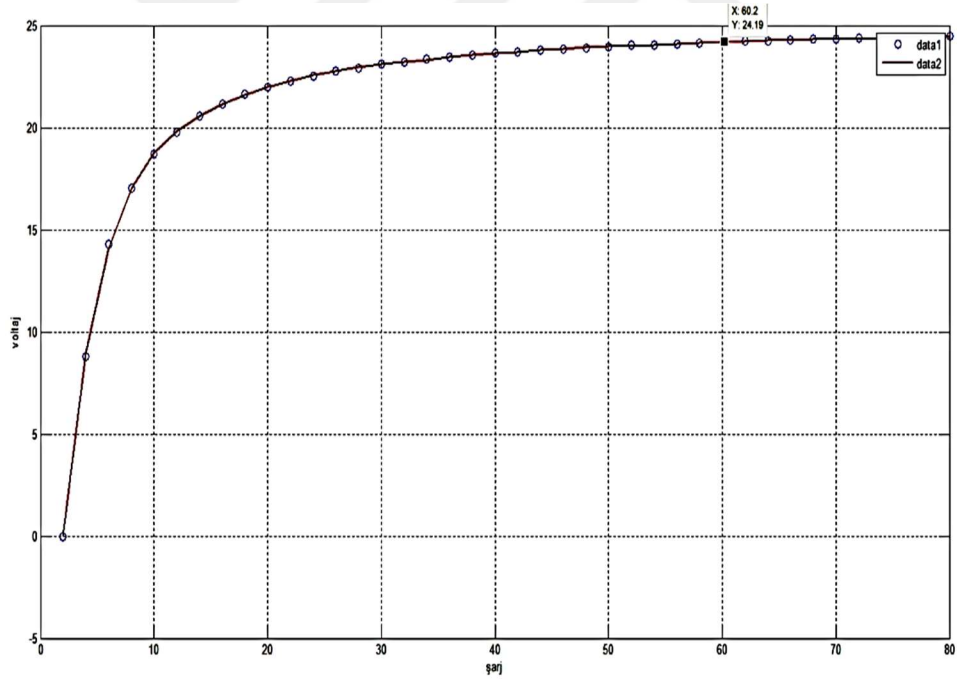
$\tilde{\alpha}$: Yaklaşık değer

α : Gerçek değer

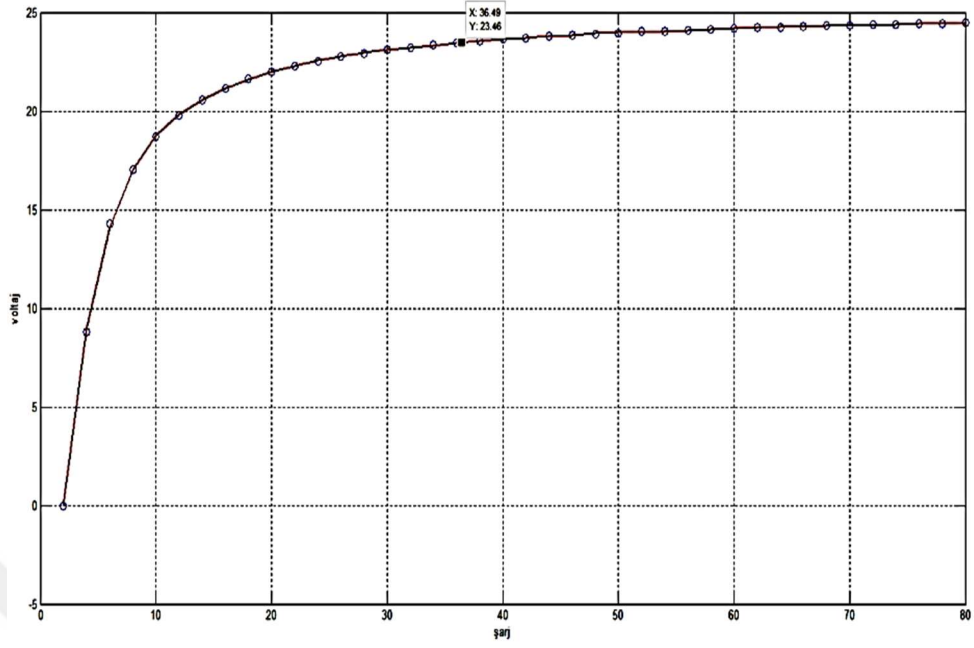
E= 24,19 Volt için bir örnek bulunabilir. 24,19 Volt için grafikten okunan değer 60,19’ dur. Bağıl Hata (ϵ) $(60,19 - 60)/60 = + \% 0,3$ olarak bulunur.



Şekil 4.7. E=18,69 Volt için yaklaşık değer (SOC)

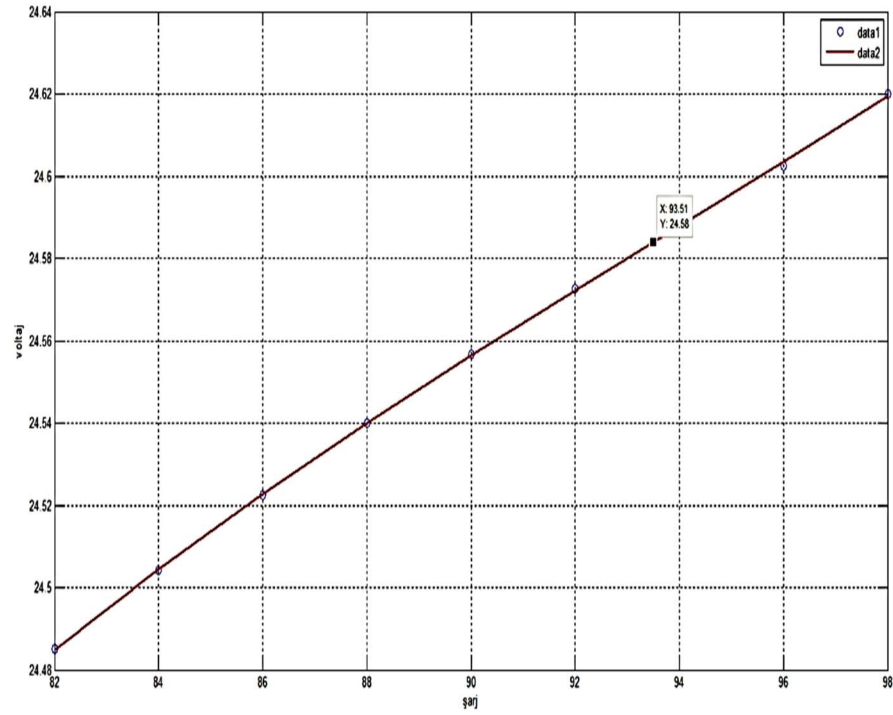


Şekil 4.8. E= 24,19 Volt için yaklaşık değer (SOC)



Şekil 4.9. E= 23.46 Volt için yaklaşık değer (SOC)

İkinci eğrideki noktalardan E=24,58 Volt için bağıl hata $(93,51 - 94) / 94 = - \% 0,52$ olarak bulunur.



Şekil 4.10. E= 24,58 Volt için yaklaşık değer (SOC)

Tablo 4.1. ve 4.2.'de 14 adet açık devre voltajı (OCV) değerine ait şarj yüzdesi değerleri görülmektedir. İki tabloda grafikten okunan değerle bataryaya ait gerçek SOC değeri karşılaştırılmıştır. Tablonun 3. Sütununda bağıl hata değeri görülmektedir.

Tablo 4.1. Birinci eğri için şarj yüzdesi ve bağıl hata değerleri

E (Volt)	SOC (%)	SOC _{yaklaşık} (%)	Bağıl Hata (%)
24,46	80	79,5	- 0,6
24,35	70	70,49	+ 0,7
24,19	60	60,19	+ 0,3
23,97	50	49,78	- 0,4
23,64	40	40,22	+ 0,5
23,09	30	29,89	- 0,3
21,99	20	20,09	+ 0,4
18,69	10	9,91	- 0,9

Tablo 4.2. İkinci eğri için şarj yüzdesi ve bağıl hata değerleri

E (Volt)	SOC (%)	SOC _{yaklaşık} (%)	Bağıl Hata (%)
24,485	82	82,11	+ 0,13
24,514	85	85,05	+ 0,06
24,548	89	88,60	- 0,44
24,573	92	91,92	- 0,08
24,588	94	93,51	- 0,52
24,617	98	97,37	- 0,64

1. ve 2. eğrilerden elde edilen toplam 10 noktaya karşılık gelen yaklaşık verilerle Simulink verileri karşılaştırıldığında bağıl hatanın % 0,06 ile %1 arasında kaldığı anlaşılmaktadır. Kurşun-asit bataryalar için açık devre gerilimi-şarj yüzdesi eğrisinin yaklaşık olarak doğrusal olduğu 1. bölümde belirtilmişti. Lityum-iyon bataryalar için hata değerinin daha yüksek çıkması beklenebilir.

4.4. Batarya Şarj Yüzdesinin Belirlenmesi

Batarya şarj yüzdesinin takibi amacıyla Şekil 4.5. ve 4.6.'daki sistemin simülasyonu yapılarak şarj yüzdesi ölçülebilmektedir. Bu şekilde 49 adet gerçek veri elde edilmiştir. Daha sonra bu veriler grafikten bulunan yaklaşık verilerle karşılaştırılmıştır. EK A ve EK B'de gösterge ekranında (Display 6) bataryaya ait gerçek şarj yüzdesi değerleri yer almaktadır.

Şekilde görülen 2 kW gücündeki motorun sisteme bağlı olmaması durumunda batarya şarj olmaktadır. EK A'da bataryanın şarjına ait simülasyon verilmiştir. Gösterge ekranında (Display 5) akım değerinin işaretinin eksi olması bataryanın şarj olduğunu gösterir.

Bataryanın deşarjına ait görüntü EK B'de yer almaktadır. Motor hızı ve momenti de görülebilmektedir. Batarya şarj olurken motor açık devre yapıldığından momenti "0" olmaktadır. Simulink yazılımında yer alan batarya modeline ait gerçek veriler Eşitlik 4.7 kullanılarak elde edilen verilerdir [68].

$$E = E_0 - K_e \times (273 + T) \times (1 - SOC) \quad (4.7)$$

T : Elektrolit sıcaklığı

K_e : Voltaj ve sıcaklığa bağlı sabit

Polinom eğrisi üzerindeki yaklaşık değerler ile Simulink değerleri Tablo 4.1. ve 4.2.'de karşılaştırılmıştır. Bağlı hata değerinin % 0,06 ile 1 arasında kaldığı bu tablolarda görülmektedir.

Simulink yazılımında batarya sıcaklığının simülasyon boyunca sabit kaldığı kabul edilmektedir. Bu yüzden sıcaklık değişimleri dikkate alınmamıştır. Fakat batarya sıcaklığındaki değişimin 5-10 °C civarında olmasının açık devre gerilimi üzerinde ciddi bir etkisi olmadığı bilindiğinden bu durumun batarya yönetim sisteminin çalışması üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir [52].

Herhangi bir bataryanın denge konumuna gelmesi için belirli bir süre beklenmesi gerekmektedir. Batarya uçları açık devre yapıldıktan sonra 30 dakikalık süre içerisinde voltaj değişimi 0,017 Volt civarında olmaktadır. Bu voltaj değişiminin bağlı hata değeri üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir [39].

Deşarj hızı yükseldikçe kurşun-asit bataryaların kapasitesinin azaldığı bilinmektedir. Kapasitesi yüksek bir bataryanın seçilmesi deşarj hızını düşürebilir. Üretici kuruluşların kataloglarında deşarj hızına bağlı kapasite değişimleri yer almaktadır. Buna rağmen batarya kapasitesinin tam olarak ne kadar azaldığının bilinmesi mümkün değildir. Şekil 4.11.'de batarya kapasitesinin deşarj hızına bağlı değişimi yer almaktadır. Kurşun-asit bataryaların kapasitesi deşarj hızının artmasından lityum bataryalara göre daha çok etkilenmektedir. Kapasitesi yüksek olan bataryalarda deşarj hızının etkisi daha az olabilir. Bataryanın daha verimli kullanılabilmesi açısından deşarj hızının küçük değerde olması önemlidir.

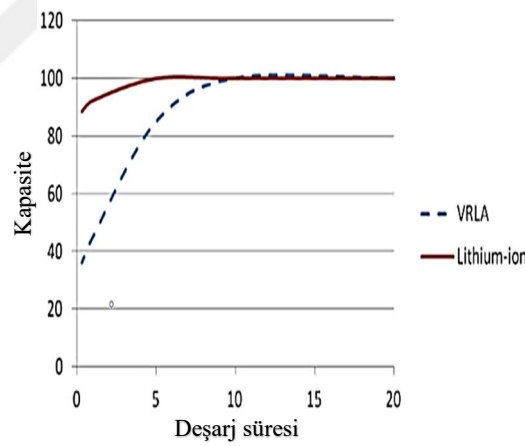
Batarya kapasitesindeki azalma olması daha az enerjinin depolanması anlamına gelmektedir. Fotovoltaik sistemlerin de günümüzde pahalı olduğu düşünüldüğünde batarya kapasitesinin azalması maliyetin önemli ölçüde artmasına sebep olacaktır.

Batarya sabit akımla deşarj edilirse batarya deşarj hızı belirlenebilir. Örneğin Şekil 4.3.'teki sistem için deşarj hızı:

$$15,31 \text{ A} / 250 \text{ Ah} = 0,06 \text{ C (16,67 saat) bulunur.}$$

Şekil 4.11.'de görüldüğü gibi özellikle kurşun-asit bataryalarda (VRLA) deşarj hızı kapasiteyi önemli ölçüde etkilemektedir. Kurşun-asit bataryalar test aşamasındayken genelde 20 saatte deşarj edilirler. 20 saatten kısa sürede deşarj olan batarya kapasitesinde % 40 oranında azalmalar olabilir [69]. 20 saatten uzun deşarj süresi batarya kapasitesini arttırabilir. Fakat bu artış 100 saat deşarj süresi için sadece %10 civarındır [14].

Açık devre gerilimi yöntemiyle yapılan şarj yüzdesi tahminlerinde batarya kapasitesi, iç direnci, yük miktarı, başlangıç şarj yüzdesi veya akımı sonucu etkilememektedir.



Şekil 4.11. Deşarj hızı ve kapasite ilişkisi [35]

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Fotovoltaik enerji sistemleri günümüzde hızla yaygınlaşmasına karşın ilk maliyetinin yüksek olması nedeniyle batarya sistemleriyle beraber kullanılması önem taşımaktadır. Batarya sistemlerinde üretim fazlası elektrik enerjisinin verimli bir şekilde kullanılması sağlanabilmektedir.

Batarya yönetim sistemleri bataryanın deşarj derinliği, şarj hızı, deşarj hızı, kapasite ve sıcaklık gibi parametreleri hakkında ipuçları verebilmektedir. Bataryalarda şarj yüzdesinin tahmini de batarya yönetim sistemleri sayesinde gerçekleştirilmektedir. Şarj yüzdesi tahmini batarya performansının takibi açısından önemlidir. Deşarj derinliği değeri de doğrudan batarya şarj yüzdesiyle ilişkili olduğundan batarya yönetim sistemleri sayesinde batarya ömrünün uzatılabilmesi mümkündür. Batarya yönetim sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar güneş enerjisinin güvenli ve verimli bir şekilde depolanmasını sağlamaktadır.

Açık devre gerilimi yöntemiyle tasarlanan batarya yönetim sistemleri bataryanın başlangıç şarj durumu, batarya kapasitesi veya batarya içindeki yük miktarına bağlı olmaması sebebiyle isabetli sonuçlar verebilmektedir.

Açık devre gerilimi ve doğrusal en küçük kareler yönteminin birlikte uygulanması bataryanın şarj durumu tahmininde hata oranını azaltma ve ara değerleri de tahmin etme amaçlıdır. Daha sonra yine MATLAB yazılımı kullanılarak yapılan interpolasyon sayesinde grafik üzerinden bütün ara değerlerin okunması sağlanmıştır. Bu çalışmada uygulanan yöntemle şarj yüzdesi tahmininde bağıl hata değerinin %0,06 ile %1 arasında olduğu tespit edilmiştir. Gerçek değerler kurşun-asit bataryanın Simulink modelinden elde edilen açık devre gerilimi değerleridir.

Açık devre gerilimi yönteminin özellikle kurşun-asit bataryaların şarj yüzdesi tahmininde çok iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir. Diğer batarya tipleri için bağlı hata değeri %2'nin üstünde çıkabilir. Benzer çalışmaların sonuçlarından hata değerlerinin genelde %2-5 arası olduğu tespit edilmiştir [8,10,17]. Açık devre gerilimi yönteminin daha kolay uygulanması açısından bu çalışmada olduğu gibi ek yöntemler kullanıldığında maliyeti az ve daha pratik sistemler geliştirilebilir.

Deşarj hızının yüksek olması bataryalarda kapasitenin düşmesine sebep olmaktadır. Özellikle lityum-iyon bataryaların yüksek performanslarına rağmen günümüzde pahalı olduğu bilinmektedir. Bu yüzden lityum-iyon bataryalarda kapasite azalmaları maliyetin büyük oranda artmasına sebep olabilir. Batarya şarj yüzdesinin bilinmesi bu noktada büyük önem kazanmaktadır.

Lityum-iyon bataryaların kapasitesini büyük ölçüde azaltan bir başka etken iç direnç değeridir. Bu yüzden batarya iç direncinin takip edilmesi için yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir. Yapay sinir ağları yöntemiyle yapılan çalışmalar ile bataryaya ait iç direnç değerlerine ulaşılabilir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi yöntemi de hem şarj yüzdesi hem de iç direnci tahmin etmeye elverişli yöntemlerden biridir.

Fotovoltaik sistemlerin ve bataryaların devre modelleri oluşturularak yapılan çalışmalardan daha iyi sonuç elde edilmesi gerçek zamanlı uygulamaların artmasıyla sağlanabilir. Açık devre geriliminin gerçek zamanlı olarak elde edilmesi için hassas cihazlara ihtiyaç vardır. Hassas cihazlar kullanılmaması halinde ölçüm hataları ve şarj yüzdesi tahmininde de hatalar oluşabilir. Deşarj hızını kontrol etmek amacıyla gerçek zamanlı batarya yönetim sistemlerinin tasarımı yapılırken genişletilmiş kalman filtrelerinden ve akım sınırlayıcı devrelerden de yararlanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Cubas, J., Manuel, C. D. , Pindado, S., Explicit expressions for solar panel equivalent circuit parameters based on analytical formulation and the Lambert W-function. *Energies*, 7(7): 4098-4115 , 2014.
- [2] Vika, H. B., Modelling of photovoltaic modules with battery energy storage in Simulink/Matlab.Norwegian University of Science and Technology, Energy and Environmental Engineering Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [3] Atabay,M.,Lityum-iyon bataryaların fotovoltaiik sistemlerde uygulanabilirliğin diğ er batarya tipleriyle uygulamalı olarak karşılaştırılması. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [4] Sarıkurt, T., [https:// challenge. tubitak. gov.tr/ assets/ batarya-yonetim-sistemleri.pdf](https://challenge.tubitak.gov.tr/assets/batarya-yonetim-sistemleri.pdf) Erişim Tarihi: 10.02.2019.
- [5] Hussein, A. A., Kalman filters versus neural networks in battery state of charge estimation: a comparative study, *International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application*, 3(5): 199- 209, 2014.
- [6] Hittinger, E., Wiley, T., Kluza, J. ,Whitacre, J., Evaluating the value of batteries in microgrid electricity systems using an improved energy systems model. *Energy Conversion and Management*, 89(2015): 458-472, 2015.
- [7] Anuphappharadorn, S., Sukchai, S., Sirisamphanwong, C. , Ketjoy, N., Comparison the economic analysis of the battery between lithium-ion and lead-acid in PV stand-alone application. *Energy Procedia*, 56(2014): 352-358, 2014.
- [8] Mbuthia, J. M. , Kiruki, C., Estimation of state of charge of lead-acid gel batteries for micro grid /PV applications. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 5(10): 470-475, 2016.
- [9] Duryea, S., Islam, S. , Lawrence, W., A battery management system for Stand-alone photovoltaic energy systems. *IEEE Industry Applications Magazine*, 7(3): 67-72, 2001.
- [10] Chang, W. Y., The state of charge estimating methods for battery: A review. *ISRN Applied Mathematics*, 2013: 1-7, 2013.
- [11] Rezwan, K. M., Swierczynski, M. J. ,Kær, S. K., Towards an ultimate battery thermal management. *Batteries*, 3(1): 1-18, 2017.

- [12] Shabani, B.,Biju, M., Theoretical modelling methods for thermal management. *Energies*, 8(9): 10153-10177, 2015.
- [13] Smets, A., Components of PV Systems. *Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems*. İçinde: 1. Baskı, UIT Cambridge Ltd, Cambridge , 311-314, 2016.
- [14] Hutchinson, R., [https:// prod- ng . sandia.gov/techlib-noauth/ access-control.cgi/ 2004/043149.pdf](https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2004/043149.pdf) Erişim Tarihi: 10.12.2019.
- [15] Dragicevic, T., Sucic, S., Guerrero, J.M., Battery State-of-Charge and Parameter Estimation Algorithm Based on Kalman Filter. *IEEE Eurocon 2013.*, Zagreb , 1519-1524, 2013.
- [16] Baghzouz, Y., Boehm, R., A Method to Determine Battery Charge/Discharge Resistance in Stand -Alone PV Power Systems. *SAE 2002 World Congress & Exhibition*. Nevada , 2002.
- [17] Jeon, S., Yun, J.-J. , Bae, S., Comparative study on the battery state-of-charge estimation method. *Indian Journal of Science and Technology*, 8(26): 1-6, 2015.
- [18] Ausswamaykin, A. ,Plangklang, B., Design of real time battery management unit for PV-hybrid system by application of coulomb counting method. *Energy and Power Engineering*, 6(6): 186-193, 2014.
- [19] Muratoğlu, Y. Elektrikli araçlarda kullanılan lityum- iyon pillerin şarj durumlarının kokusuz Kalman filtresiyle kestirilmesi. *Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi*.
- [20] Zhang, M., Battery Identification Based on a Real World Data. *Power symposium (NAPS) 2017 North American*. West Virginia , 1-724, 2017.
- [21] Panasonic Corporation., [https://eu.industrial. panasonic.com/sites/default/ pidseu/ files/ downloads /files / panasonic- batteries- vrla- for-professionals_ interactive. pdf.](https://eu.industrial.panasonic.com/sites/default/pidseu/files/downloads/files/panasonic-batteries-vrla-for-professionals_interactive.pdf), Erişim Tarihi: 11.11. 2018.
- [22] Benila, B., Vasantharathna, S., Geetha, S., Estimation of state of charge in lead acid batteries using extended Kalman filter. *International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering*, 2(6): 1-5, 2014.
- [23] Haddad, R., Shahat, A. E. , Kalaani, Y., Lead-acid battery modeling for photovoltaic applications. *Journal of Electrical Engineering*, 15(2): 1-8, 2015.
- [24] Hajizadeh, A., Shahirinia, A. H., Arabameri, S., Yu, D. C., Control of Solar System's Battery Voltage Based on State of Charge Estimation (SOC). *ICRERA*. Milwaukee , 162-167, 2014.

- [25] Seifi, M., Soh, A. B. C., Wahab, N. I. A. , Hassan, M. K. B., A comparative study of PV models in Matlab/Simulink. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 7(2): 122-127, 2013.
- [26] Garg, P. ,Garg, V. K., To perform matlab simulation of battery charging using solar power with maximum power point tracking (mppt). International Journal of Electronic and Electrical Engineering, 7(5): 511-516, 2014.
- [27] Renuka, V. S. , Anupama, S. P., Development of battery management system for PV generation. International Journal of Advanced Research in Electrical Electronics and Instrumentation Engineering, 4(6): 5229-5233, 2015.
- [28] Miao, Z., Xu, L., Fan, L. ,Disfani, V. R., An SOC-based battery management system for microgrids. IEEE Transactions on Smart Grid, 5(2) : 966-973, 2014.
- [29] Park, S., ve diğerleri, Battery Management for Grid-Connected PV Systems with a Battery. Proceedings of the International Symposium on Low Power Electronics and Design ,California , 115-120, 2012.
- [30] Asghar, F., Talha, M. ,Sung Ho Kim., I. H., Simulation study on battery state of charge estimation using Kalman filter, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 20(6): 861-866, 2016.
- [31] Christensen, A. ,Adebusuyi, A., Using on-board electrochemical impedance spectroscopy in battery management systems. World Electric Vehicle Journal, 6(3): 793-799, 2013.
- [32] Salas-Puente, R. ve diğerleri., Practical analysis and design of a battery management system for a grid-connected DC microgrid for the reduction of the tariff cost and battery life maximization. Energies, 11(7): 1-31, 2018.
- [33] Liu, S., ve diğerleri, Rechargeable zinc air batteries and highly improved performance through potassium hydroxide addition to the molten carbonate eutectic electrolyte. Journal of The Electrochemical Society, 165(2):149-154, 2018.
- [34] Aras, U. T., Hibrit elektrikli araçların batarya sistemlerinin bilgisayar destekli performans analizi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [35] Albright, G., Edie J., Al-Hallaj S., [https:// www.allcelltech.com/ testing/ images/ stories/ACT/ ESS/ Lead_acid_white_paper. pdf](https://www.allcelltech.com/testing/images/stories/ACT/ESS/Lead_acid_white_paper.pdf) ., Erişim Tarihi: 10.02.2019.

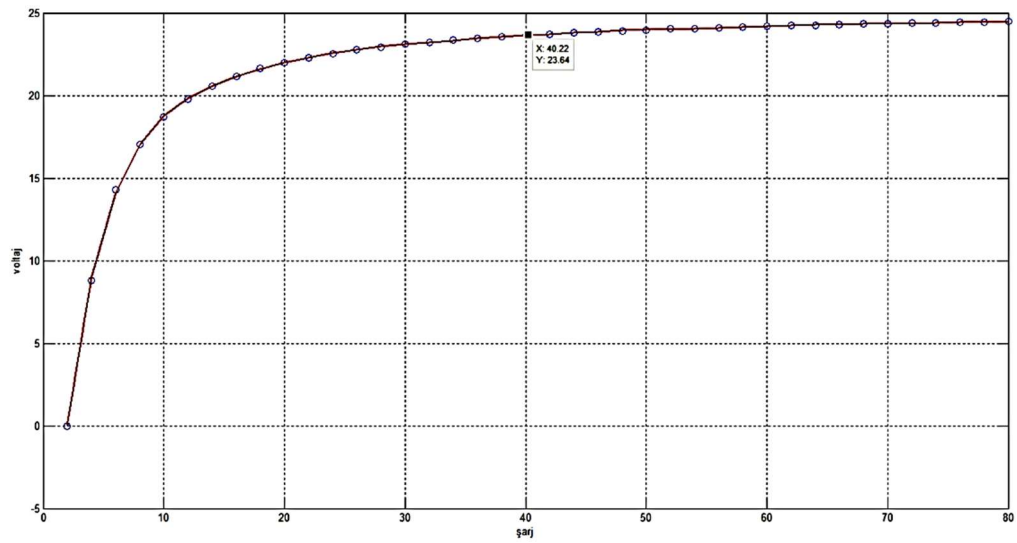
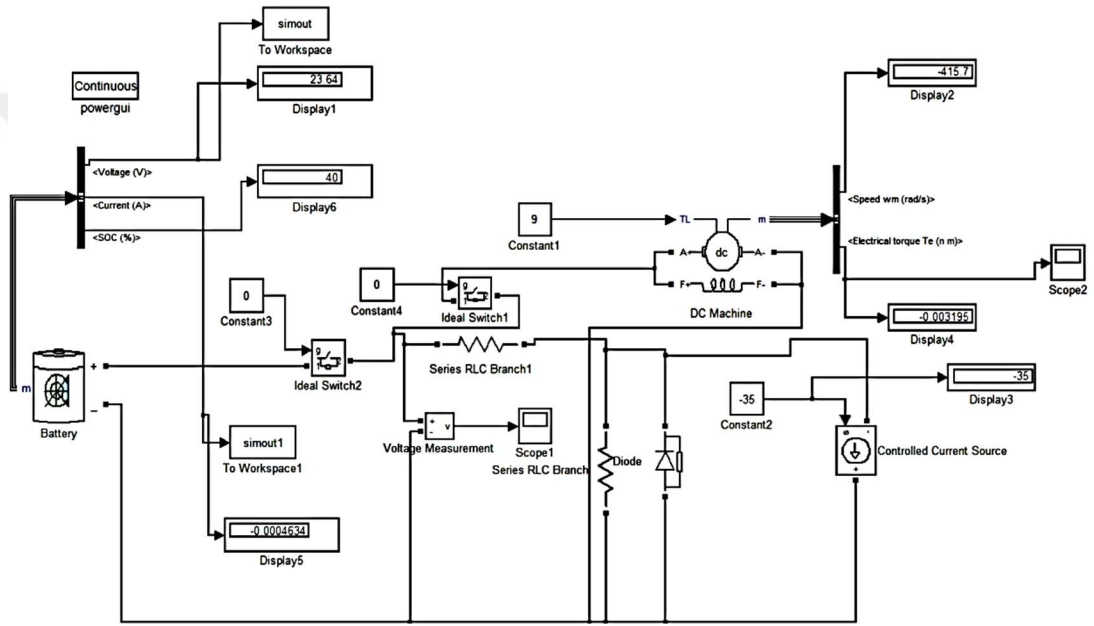
- [36] Ioannou, S., ve diğerleri., Battery Capacity and Discharge Current Relationship for Lead Acid and Lithium Batteries. 24th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, Athens ,46-53, 2016.
- [37] Plangklang, B., Pornharuthai, P., Mathematical model and experiment of temperature effect on discharge of lead-acid battery for PV systems in tropical area. Energy and Power Engineering, 5(1): 43-49, 2013.
- [38] Coleman, M., Lee, C. K., Hurley, W. G., Zhu, C., State-of-charge determination from emf voltage estimation using impedance, terminal voltage and current for lead-acid and lithium-ion batteries. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 54(5): 2550-2557, 2007.
- [39] Mariani, A., ve diğerleri, Simple and Effective OCV Prediction Mechanism for VRLA. Proceedings of the 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Mechatronics, Prag , 1-10, 2014.
- [40] Mudgal, S., ve diğerleri, [http:// ec.europa.eu/environment/ waste/batteries/pdf/ report_12.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/batteries/pdf/report_12.pdf)., Erişim Tarihi : 10.02.2019.
- [41] Wu, Y., Keil, P., Schuster, S. F. , Jossen, A., Impact of temperature and discharge rate on the aging of a $\text{LiCoO}_2/\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ lithium-ion pouch cell. Journal of The Electrochemical Society, 164(7): 1438-1445, 2017.
- [42] Rychcik, M., Kazacos, M. S., Characteristics of a new all- vanadium Redox flow battery. Journal of Power Sources, 22(1988): 59-67, 1987.
- [43] Uhrig, M., Koenig, S., Suriyah, R.M., Leibfried, T., Lithium-based vs. vanadium redox flow batteries – a comparison for home storage systems, Energy Procedia, 99(2016): 35-43, 2016.
- [44] Ankaralı, A., Hidrojen enerjisi ve hidrojen pilleri. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2004.
- [45] Melentjev, S. , Lebedev, D., Overview of Simplified Mathematical Models of Batteries. 13th International Symposium Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering, Parnu , 231-235, 2013.
- [46] Vairamohan, B., State of charge estimation for batteries. University of Tennessee, Electrical Engineering Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2002.
- [47] Nebl, C., Steger, F. , Schweiger, H.G., Discharge capacity of energy storages as a function of the discharge current- expanding Peukert's equation. International Journal of Electrochemical Science, 12(5): 4940-4957, 2017.

- [48] Williard, N. ve diğerleri., <https://www.phmsociety.org/sites/phmsociety.org/files/PHM%20position%20statement%20Williard%20.pdf>., Erişim Tarihi: 13.02.2019.
- [49] Jiang, Y. ve diğerleri., Modeling charge polarization voltage for large lithium-ion batteries in electric vehicles. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 6(2): 686-697, 2013.
- [50] Al-Qasem, O. S. W., Modeling and simulation of lead-acid storage batteries within photovoltaic power systems. An-Najah National University, Clean Energy and Energy Conservation Strategy Engineering Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2012.
- [51] Johnson, V. H., Pesaran, A. A., Sack, T., Temperature-Dependent Battery Models for High-Power Lithium-Ion Batteries. 17th Annual Electric Vehicle Symposium, Montreal , 1-14, 2001.
- [52] Samolyk, M. M., Sobczak, J., Development of an algorithm for estimating lead-acid battery state of charge and state of health. Blekinge Institute of Technology, Electrical Engineering Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2013.
- [53] Kircioğlu, O., Yıldız, A. B., http://www.emo.org.tr/ekler/4a7cb508ff0809f_ek.pdf., Erişim Tarihi: 13.02.2019.
- [54] Singla, V., Garg, V. K., Modelling of solar photovoltaic module & affect of insolation variation using Matlab/Simulink. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 4(3): 5-9, 2013.
- [55] Vigni, V. L., ve diğerleri, Proof of concept of an irradiance estimation system for reconfigurable photovoltaic arrays. *Energies*, 8(7): 6641-6657, 2015.
- [56] Bonkougou, D., Koalaga, Z., Njomo, D., Modelling and simulation of photovoltaic module considering single-diode equivalent circuit model in MATLAB. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(3): 493-502, 2013.
- [57] Arjyadharal, P. , Ali S. M., Chitralekha J., Analysis of solar PV cell performance with changing irradiance and temperature. *International Journal of Engineering and Computer Science*, 2(1): 214-220, 2013.
- [58] Ahmad, T., Sobhan, S. , Nayan, M. F., Comparative analysis between single diode and double diode model of PV cell: Concentrate different parameters effect on its efficiency. *Journal of Power and Energy Engineering*, 4(3): 31-46, 2016.
- [59] Sumathi, S., Kumar, L. A., Surekha, P., Solar PV and Wind Energy Conversion Systems, 1. baskı. Springer International Publishing, Cham , 1-790, 2015.

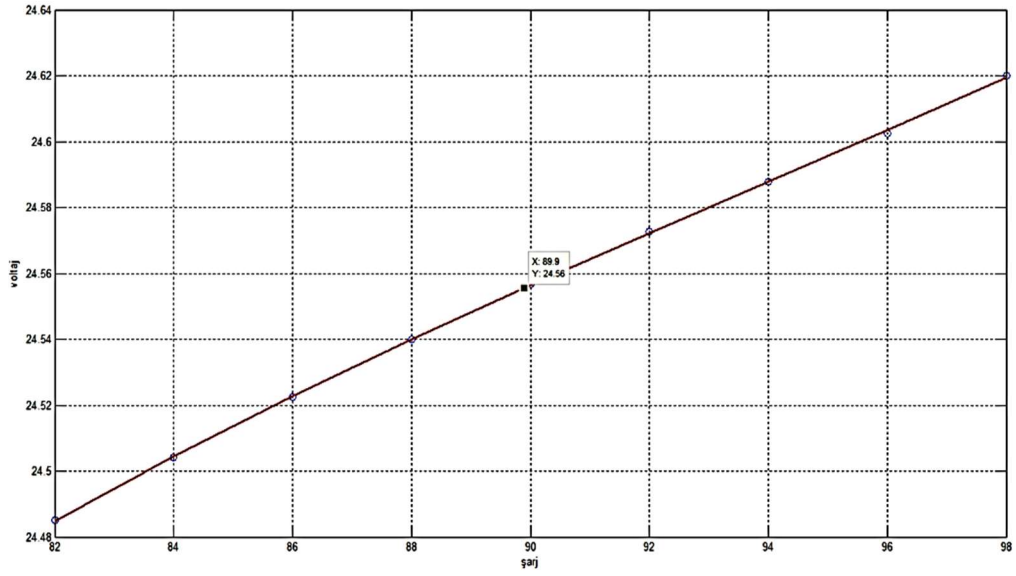
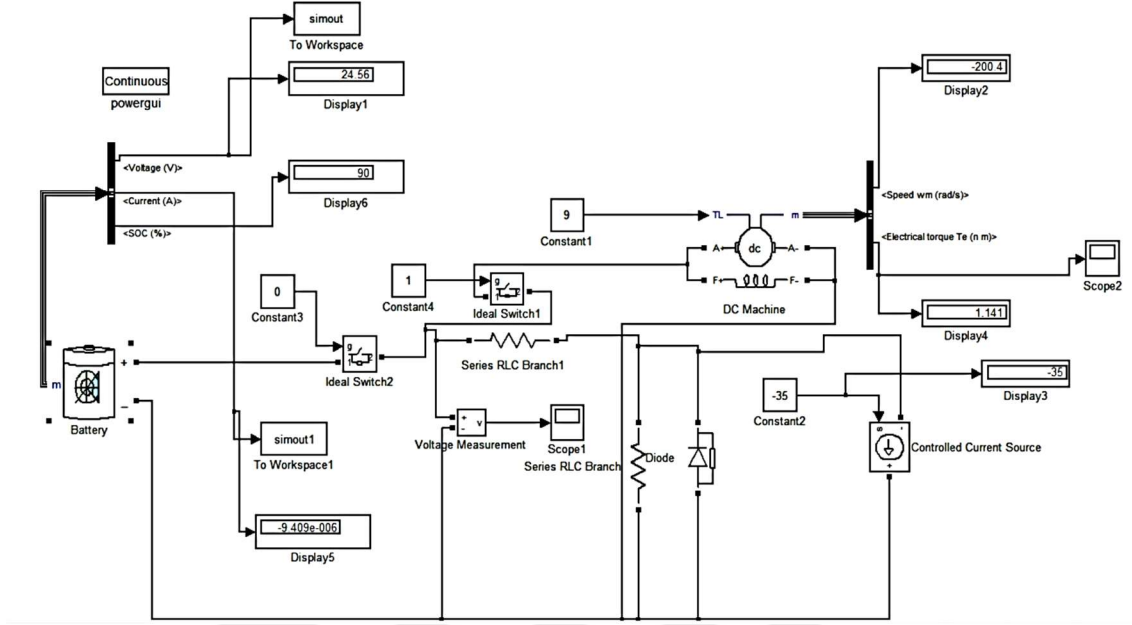
- [60] Ovalı, Ş. B., Design and simulation of a residential PV-battery system. Michigan Technological University, Electrical Engineering Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2016.
- [61] Narayana, P. B., Motepalli, P., Reddy, B. R. S., Dubey, S., Design & Simulation of Solar DC Pump in Simulink. 2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, Nagercoil , 429-431, 2013.
- [62] Shen, J., Time efficient state of charge estimation using open circuit voltage and the logarithmic modelling for battery management systems. The University of British Columbia, Electrical and Computer Engineering Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2016.
- [63] Taştan, H., <http://www.yildiz.edu.tr/~tastan/teaching/ch2.pdf> Erişim Tarihi: 14.11.2018.
- [64] Unterrieder, C., ve diğerleri, Battery state-of-charge estimation using approximate least squares. Journal of Power Sources, 278(2015): 274-286, 2015.
- [65] Stoer, J., Bulirsch, R., Einführung in die Numerische Mathematik, 2. baskı. Springer- Verlag, Heidelberg ,1-660, 1991.
- [66] Mathworks Inc., https://www.mathworks.com/help/curve_fit/least-squares-fitting.html, Erişim Tarihi: 20.02.2019.
- [67] Weisstein, E.W., <http://mathworld.wolfram.com/RelativeError.html>, Erişim Tarihi 14.04. 2019.
- [68] Jackey, R., https://www.mathworks.com/tagteam/40542_SAE-2007-01-0778-Battery-Modeling-Process.pdf Erişim Tarihi 19.04.2019.
- [69] Husnayain, F., Profile of 12-V voltage regulated lead- acid battery. The University of Manchester, Electrical and Electronical Engineering Bölümü, Doktora Tezi, 2017.

EKLER

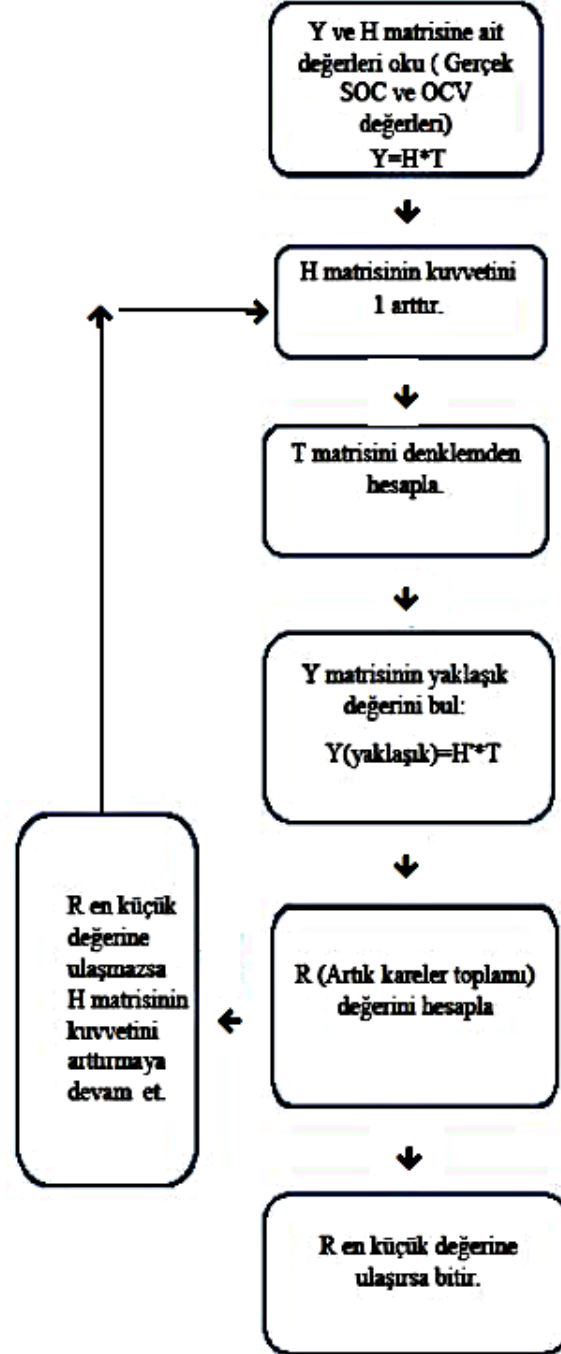
EK A: Bataryaya Ait SOC-OCV Grafiğinden Şarj Yüzdesinin Bulunması



EK B: Bataryaya Ait SOC-OCV Grafiğinden Şarj Yüzdesinin Bulunması (2. Eğri)



EK C: Lineer En Küçük Kareler Yöntemine Ait Akış Diyagramı



ÖZGEÇMİŞ

Seçkin Açıcı 09.05.1988 yılında Trabzon’da doğdu. Lise öğretimini Samsun Onur Ateş Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2013 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir.

