

# Yenilenebilir Enerji Desteği için Kullanılan Farklı Tip Bataryaların Modellenmesi ve Karşılaştırmalı Analizi

Yağmur KIRÇIÇEK, Ahmet AKTAŞ, Şule ÖZDEMİR\*

Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü  
(Geliş/Received : 07.03.2016 ; Kabul/Accepted : 21.04.2016 )

## ÖZ

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından (YEK) üretilen enerjinin elektrik güç sistemlerine eklenmesindeki en önemli sorun, bu kaynaklardan üretilen enerjinin iklim koşullarına bağlı olarak genellikle kararsız ve değişken olmasıdır. Güneş enerjisinden, güneş çok iyi parladığında ve bulutsuz bir günde yüksek miktarda elektrik üretilebilmekte ve en önemlisi enerji üretim değerleri iklim koşullarına (güneş parlaklığı) göre sürekli değişmektedir. Enerji depolama uygulamaları, iklim şartlarına göre değişen ve yalnız gündüz çalışabilen güneş enerji sistemleri gibi yenilenebilir enerji sistemlerinden kaynaklanan güç değerlerindeki değişimle başa çıkabilir. Enerji depolama uygulamalarının kullanımı, yükler kaliteli güç sağlanması için mikro şebekelerin kullanılmasıyla zorunlu hale gelmektedir. Bu çalışmada, enerji depolama birimi olan bataryaların modelleme çalışmaları yapılmıştır. Laboratuvar ortamında batarya şarj/deşarj deneyleri yapılarak modelleme çalışmaları için gerekli parametreler elde edilmiştir. Deneysel veriler ile MATLAB/M-File programı kullanılarak gerekli grafikler ve sonuçlar alınmıştır. Bu makalede, deneysel ve modelleme sonuçları karşılaştırılarak modelleme denklemlerinin doğruluk oranlarına yer verilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Kurşun-Asit Batarya, Lifepo<sub>4</sub> Batarya, Batarya Modelleme.

## Modelling and Comparative Analysis of Different Type of Batteries Used for Renewable Energy Support

### ABSTRACT

The most important problem for providing energy from Renewable Energy Sources (RES) to the electric power system is unstable and variable of the energy generated from these sources by depending on the climatic conditions. When sun is shining and a day without cloud, the more electric power can be produced with solar energy, but the amount of produced electrical energy is fluctuating continuously by depending on the climatic condition and solar irradiation. Energy storage applications can cope with the change in value resulting from the power of renewable energy systems according to climatic conditions and only day that can work as solar energy systems. The use of energy storage application is become compulsory solutions for providing more power quality to the loads by using micro grids. In this study, modelling of batteries that are component of energy storage system has been performed. In the laboratory, battery charge/discharge tests were implemented to obtain the necessary parameters for modelling studies. Graphics and results were obtained with MATLAB/M-File program by using experimental results. Experimental and modelling results compared and the accuracy of the modelling equations is given in this paper.

**Keywords:** Lead-Acid Battery, LiFePO<sub>4</sub> Battery, Battery Modelling.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji depolama çözümü olarak birçok depolama alternatifini bulunmaktadır. Özellikle bataryalar, teknolojinin de gelişmesiyle birlikte enerji depolama birimi olarak vazgeçilmezler arasında yerini almaktadır. Çeşitli kimyasal yapıya sahip birçok batarya çeşidi geliştirilmektedir. Günümüzde çok yaygın olarak kullanılan kurşun-asit bataryalar ve yeni teknolojiye sahip olan lityum-iyon bataryaların kullanımı oldukça yaygındır. Lityum-iyon bataryalar, kurşun-asit bataryalara göre daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler. Ayrıca kurşun asit bataryalar ile karşılaştırıldığında lityum-iyon bataryalar, daha az hacim ve ağırlıkta daha fazla enerji depolamaktadırlar [1-9]. Bu çalışmada kurşun-asit ve lityum demir fosfat batarya tipleri incelenmiştir.

Batarya modelleme üç temel grupta sınıflandırılabilir.

Bunlar; fiziksel veya kimyasal, matematiksel ve elektriksel modelleme yöntemleridir. Herhangi bir elektriksel değer olmadan elde edilen matematiksel batarya modelleri; enerji verimliliği ve kapasitesi gibi performans belirteçlerini tahminde sınırlıdır. Bataryalar için elektriksel modeller, kaynaklar ve direnç ve kapasitör gibi pasif elemanlardan oluşur [10]. Literatürde batarya modelleme ile ilgili bir çok çalışma bulunmaktadır. Chen ve arkadaşları [11] lityum iyon bataryalar için Thevenin modelin geçici kapasitesini ve empedans tabanlı modelin özelliklerini birleştiren bir model üzerinde çalışmışlardır. Rakhmatov ve arkadaşları [12], bir cep bilgisayarındaki uygulamalar için batarya ömrü analizi için bir model önermektedirler.

Bu çalışmada, gerilim kaynağı ve dirençten meydana gelen basit elektriksel batarya modeli kullanılmaktadır. Bataryanın doğru şekilde modellenmesi ve parametrelerinin düşük hata oranları ile belirlenerek

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: sozaslan@kocaeli.edu.tr

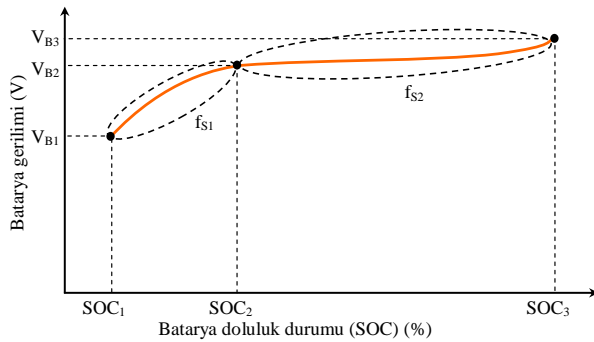
Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 83-90

kontrolünün yapılması, hem bataryanın ömrünü uzatır hem de güvenli olarak çalışmalarını sağlanmış olur. Bu çalışmanın amacı, farklı tipteki bataryaları modelleyerek en düşük hata oranlarıyla batarya parametrelerini belirlemektir.

## 2. BATARYA MODELLEME ÇALIŞMALARI (BATTERY MODELLING STUDIES)

### 2.1. Bataryanın Şarj Durumunda Modellenmesi (Modelling of Battery in Charging Mode)

Batarya şarj modelleme çalışmalarında Şekil 1’de verilen örnek batarya şarj eğrisi kullanılmıştır. Bu eğride örnek bir bataryanın şarj durumunda terminal uçlarındaki gerilimin batarya doluluk durumuna göre değişimi verilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan bütün bataryaların şarj eğrileri temel yapı itibarıyla bu eğri tipindedir. Bu nedenle böyle bir eğrinin model denkleminin çıkarılması, bu çalışmadaki şarj modelleme çalışmalarının temelini oluşturmaktadır. Örnek şarj grafiğinde verildiği gibi eğri modellenirken  $f_{S1}$  ve  $f_{S2}$  fonksiyonu olarak iki parçaya ayrılmaktadır.



Şekil 1. Örnek bir batarya şarj gerilimi doluluk durumu grafiği (Charge voltage-SOC graph for sample battery)

Şekil 1’de verilen örnek bir batarya şarj eğrisinde modelleme denklemini oluştururken daha basite indirgeyerek doğruluğunu arttırmak için iki ayrı fonksiyon olarak tanımlanmaktadır. Bu fonksiyonlar  $f_{S1}$  ve  $f_{S2}$  olarak temsil edilmektedir. Denklem (1)’deki  $m_1$ ,  $f_{S1}$  fonksiyonunun eğimini, Denklem (2)’deki  $m_2$ ,  $f_{S2}$  fonksiyonunun eğimini belirlemektedir.

$$m_1 = \frac{V_{B2} - V_{B1}}{SOC_2 - SOC_1} \quad (1)$$

$$m_2 = \frac{V_{B3} - V_{B2}}{SOC_3 - SOC_2} \quad (2)$$

Batarya şarj deneylerinde aynı batarya tipleri farklı akım değerlerinde testlere tabi tutulmaktadır. Farklı akım değerlerinde bataryanın terminal uçlarındaki gerilim değeri bataryanın doluluk durumuna (SOC) göre farklılık göstermektedir. Bu grafiklerdeki farklılık aslında Denklem (1) ve Denklem (2)’te verilen  $m_1$  ve  $m_2$  değerlerindeki değişikliktir. Böylece bataryanın şarj akımı değişmesi durumunda deneysel sonuçlardan alınan veriler doğrultusunda aynı denklem yapısı ile farklı akımlardaki batarya

doluluk durum değişimi tahmini yapılabilir.

Denklem (3) ve Denklem (4)’te  $f_{S1}$  ve  $f_{S2}$  denklemleri verilmektedir. Batarya şarj modellemesinde bulunan  $f_{S1}$  ve  $f_{S2}$  denklemleri bir bütün olarak ifade edilerek toplam şarj grafiği oluşturulmaktadır. Bu toplam şarj grafiğinin formülü  $f_{S1}$  ve  $f_{S2}$  denklemleri kullanılarak Denklem (5)’teki gibi ifade edilmektedir. Böylelikle batarya şarj eğrisinin grafiği tek bir temel matematiksel formül ile ifade edilecektir.

$$f_{S1} = V_{B0} + \left[ \frac{V_{B2} - V_{B1}}{SOC_2 - SOC_1} \right] \cdot SOC \quad (3)$$

$$f_{S2} = V_{B02} + \left[ \frac{V_{B3} - V_{B2}}{SOC_3 - SOC_2} \right] \cdot SOC \quad (4)$$

Denklem (3) ve Denklem (4)’de verilen  $V_{B0}$   $f_{S1}$  fonksiyonundaki başlangıç anındaki batarya terminal gerilimi,  $V_{B02}$   $f_{S2}$  fonksiyonundaki başlangıç anındaki batarya terminal gerilimi,  $V_{B1}$ ,  $V_{B2}$  ve  $V_{B3}$  fonksiyonları tanımlarken alınan batarya gerilim ara değerleri, SOC % cinsinden batarya doluluk durum oranı,  $SOC_1$ ,  $SOC_2$  ve  $SOC_3$  % cinsinden fonksiyonları tanımlarken alınan batarya doluluk durum oranının ara değerleridir.

$$V_{MBS} = (f_{S1} - f_{S2}) \cdot e^{-5 \left[ \frac{SOC}{SOC_3} \right]} + f_{S2} \quad (5)$$

Denklem (5)’teki  $V_{MBS}$  batarya şarj eğrisinin fonksiyonu,  $f_{S1}$  ilk eğri  $f_{S2}$  ikinci durumdaki eğri fonksiyonlarıdır. Bu denklemde ilk bölümde bulunan  $f_{S1}$  ve  $f_{S2}$  fonksiyonlarının farkı eksponansiyel bir katsayı ile çarpılmaktadır. Buradaki  $e^{-5}$  değeri sıfıra yakın bir değer olduğu için bu katsayı seçilmektedir.  $f_{S1}$  ve  $f_{S2}$  fonksiyonlarının büküm noktasına en yakın değeri  $e^{-5}$  katsayısı verdiği için bu değer  $-5$  seçilmiştir. Denklemde ilk olarak  $SOC_1$  başlangıç değerleri için  $f_{S1}$  fonksiyonun çizdirilmesi sağlanacak daha sonra  $SOC_3$  değerine gelindiğinde  $e^{-5}$  değeri sıfıra yaklaşacaktır. Böylece denklemde sadece  $f_{S2}$  fonksiyonu kalacak eğri çizimi tamamlanacaktır.

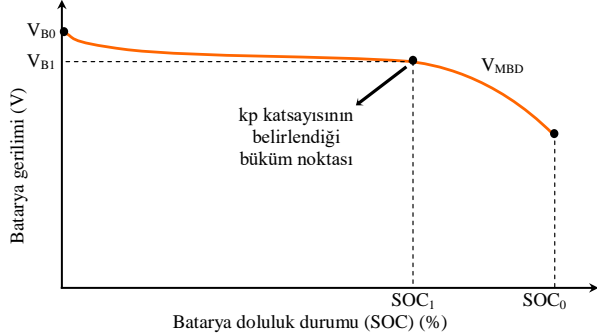
Bataryanın şarj gerilim değeri ve batarya doluluk durumuna göre değişimi Denklem (6) formülü ile elde edilmektedir. Batarya şarj modelleme çalışmalarında hesaplanan bataryanın gerilimi  $V_{MBS}$  ile temsil edilmektedir. Batarya şarj modelleme çalışmalarında elde edilen  $V_{MBS}$  gerilim matris ile deneysel sonuçlardan alınan değerler aynı grafik üzerinde çizdirilerek karşılaştırılması yapılmaktadır.

$$V_{MBS} = \left[ V_{B0} + \left[ \frac{V_{B2} - V_{B1}}{SOC_2 - SOC_1} \right] \cdot SOC - V_{B02} + \left[ \frac{V_{B3} - V_{B2}}{SOC_3 - SOC_2} \right] \right] \cdot e^{-5 \left[ \frac{SOC}{SOC_3} \right]} + V_{B02} + \left[ \frac{V_{B3} - V_{B2}}{SOC_3 - SOC_2} \right] \cdot SOC \quad (6)$$

### 2.2. Bataryanın Deşarj Durumunda Modellenmesi (Modelling of Battery in Discharge Mode)

Batarya deşarj modelleme çalışmalarında Şekil 2’de verilen örnek bir bataryanın deşarj durumunda terminal uçlarındaki gerilimin batarya doluluk durumuna göre değişimi verilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan bütün bataryaların deşarj eğrileri temel yapı itibarıyla bu

eğri tipinde çıkmaktadır. Bu yüzden böyle bir eğrinin model denkleminin çıkartılması şarj modelleme çalışmalarında olduğu gibi bütün deşarj modelleme çalışmalarının temelini oluşturacaktır. Deşarj gerilimi değişimi Şekil 2'deki grafikte verildiği gibi tek bir fonksiyon ile tanımlanabilmektedir.



Şekil 2. Örnek bir batarya deşarj gerilimi - doluluk durumu grafiği (Discharge voltage-SOC graph for sample battery)

Batarya deşarj modelleme için kullanılan  $f_D$  fonksiyonu Denklem (7)'de verilmektedir.

$$V_{MBD} = V_{B0} - V_{B0} \cdot e^{kp \left( \frac{SOC}{SOC_0} - 1 \right)} + V_{B0} \cdot e^{-kp} \quad (7)$$

Denklem (7)'deki  $V_{B0}$ , deşarj eğrisinin batarya terminal uçlarındaki gerilimin başlangıç noktasıdır, SOC % cinsinden batarya doluluk durum oranı,  $SOC_0$  % cinsinden fonksiyonu tanımlarken alınan son değeri,  $kp$  değeri batarya deşarj eğrisinin  $SOC_1$  ve  $V_{B1}$  noktalarının kesişimi olan eğrinin bükülme açısını belirleyen parametredir. Batarya deşarj modelleme çalışmalarında hesaplanan bataryanın gerilimi  $V_{MBD}$  ile temsil edilmektedir. Batarya deşarj modelleme çalışmalarında elde edilen  $V_{MBD}$  gerilim denklemleri ile deneysel sonuçlardan alınan değerler aynı grafik üzerinde çizdirilerek karşılaştırılması yapılmaktadır.

Denklem (7)'de, SOC değeri maksimum olduğunda, yani SOC değerinin  $SOC_0$ 'a eşit olduğu durumda eksponansiyelin üzeri sıfıra eşit olur. Bu durumda, fonksiyonda sadece  $V_{B0}$  eksponansiyel katsayılı  $-kp$  değeri kalır. Bu değer de eğrinin başlangıç konumu olan  $V_{B0}$  noktasını işaret etmektedir. Daha sonra SOC'nin zamanla değişen değerlerine bağlı olarak batarya deşarj eğrisi aşağıya doğru inerek  $SOC_0$  değerine gelmektedir.

Batarya şarj deneylerinde olduğu gibi deşarj deneylerinde de aynı batarya tipleri farklı akım değerlerinde testlere tabi tutulmaktadır. Farklı deşarj akım değerlerinde bataryanın terminal uçlarındaki gerilim değeri bataryanın doluluk durumuna göre farklılık göstermektedir. Yani batarya deşarj eğrisinin  $SOC_0$  değeri küçülmektedir. Bu grafiklerdeki farklılık aslında Denklem (7)'de verilen  $SOC_0$  değerinin ve  $kp$  katsayısının değişimidir. Farklı deşarj değerlerinden elde edilen sonuçlar ile bu  $SOC_0$  ve  $kp$  katsayıları belirlenmektedir. Böylece bataryanın deşarj akımı değişmesi durumunda deneysel sonuçlardan alınan veriler doğrultusunda aynı denklem yapısı ile farklı

akımlardaki batarya doluluk durum değişimi tahmini yapılabilmektedir. Batarya deşarj modelleme çalışma sonuçları deneysel çalışmalar ile karşılaştırılarak modellenen denklemlerin % hata oran sonuçları verilmektedir.

Batarya şarj ve deşarj deneylerinde alınan veriler ile modellemede hesaplanarak çizdirilen grafiklerin hata oran miktarları Denklem (8)'te verilen formül ile belirlenmektedir.

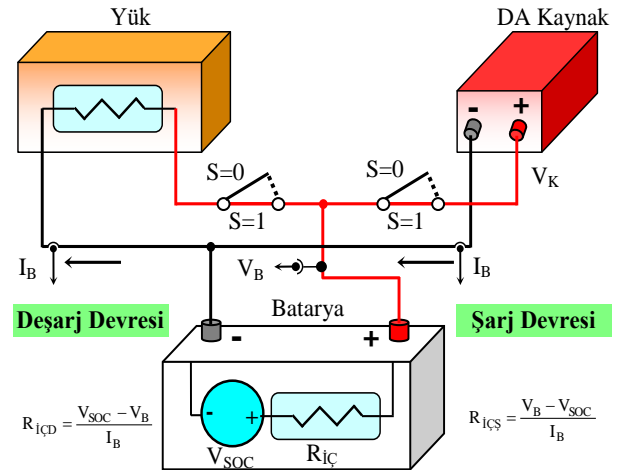
$$h_B = \left( \frac{V_B - V_{MB}}{V_B} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

Denklem (8)'teki  $h_B$  modelleme sonucundaki karşılaştırma hata oranı,  $V_B$  batarya terminal gerilimi,  $V_{MB}$  modelleme sonucunda hesaplanan batarya terminal gerilim değeridir. Bu gerilim değeri şarj modelleme değeri için  $V_{MBS}$  deşarj modelleme değeri için  $V_{MBD}$  alınmaktadır [13].

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Batarya, kimyasal iç yapısından dolayı şarj ve deşarj olurken batarya terminal uçlarındaki gerilim bağlı olduğu duruma göre değişkenlik gösterir. Örneğin batarya şarj olurken bağlı olduğu kaynak gerilim değeri terminal uçlarındaki gerilime eşittir. Fakat bataryaya bağlanan kaynak uçlarındaki terminal uçları çıkarılırsa, bataryanın geriliminde belli bir süre sonra küçük de olsa bir düşüş meydana gelir. Aynı şekilde batarya deşarj esnasında okunan gerilim değeri yük bağlı olmadığı durumdakine göre daha küçüktür. Bu durum batarya difüzyon modeli ile açıklanır [14].

Şekil 3'te batarya şarj ve deşarj deneylerinin, deney sırasında alınan ölçüm noktaları ve devre şeması verilmektedir.



Şekil 3. Batarya şarj/deşarj deneyi devre şekli ve ölçüm noktaları (Battery charge/discharge test circuit diagram and measurement points)

Batarya difüzyon model davranışını da dikkate alarak batarya modelleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu modelleme çalışmaları esnasında bataryalar şarj ve deşarj

edildi. Batarya şarj olurken kaynak gerilimi ve akımı ölçüldü. Bu akım ve gerilim değerleriyle bataryanın dinamik iç direnci hesaplandı. Daha sonra kaynak bağlantısı kesilerek bataryanın hücrelerinin dinlenmesi yani toparlanması (recovery) beklendikten sonra bataryanın uçlarındaki gerilim ölçüldü. Ölçülen bu batarya gerilimi bataryanın doluluk durumu hakkında bilgi vermektedir ve bu gerilim seviyesi doluluk oranı ile orantılıdır. Batarya deşarj sırasında ise yük bağlı iken akım ve gerilim değerleri ölçüldü. Bu akım ve gerilim değerleri bataryanın dinamik iç direnci hakkında bilgi vermektedir. Daha sonra şarj esnasında olduğu gibi deşarj sırasında yük batarya uçlarından ayrılmaktadır. Bataryanın tekrar toparlanma süreci beklenmektedir. Bu süre 15-30 saniye arasında olmaktadır. Çünkü bu sürelerden sonra batarya gerilim seviyesi sabit kalmaktadır. Batarya terminal uçları boşta iken bataryanın gerilim seviyesi ölçülerek kayıt edilmektedir. Bu gerilim seviyesi bataryanın doluluk durumunun hesaplanmasını sağlamaktadır. Şekil 4'te deneysel çalışmalarda kullanılan bataryaların fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 3. Deneysel çalışmalarda kullanılan bataryaların fotoğrafı (Photograph of the batteries used in experimental studies)

Bu çalışma kapsamında bataryaların şarj sonuçlarını aldıktan sonra batarya dinamik iç direncini hesaplamak için Denklem (9) kullanılmaktadır. Batarya gerilimi şarj

durumunda iken batarya tamamen dolu duruma gelene kadar kaynak geriliminden düşüktür.

$$R_{i\text{ÇŞ}} = \frac{V_B - V_{\text{SOC}}}{I_B} \quad (9)$$

Batarya deşarj durumunda iken yüke bağlı olduğu durumda terminal uçlarındaki gerilim değeri bir önceki değere göre bir miktar düşecektir. Deşarj durumunda iken bataryanın dinamik iç direnci Denklem (10)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$R_{i\text{ÇD}} = \frac{V_{\text{SOC}} - V_B}{I_B} \quad (10)$$

Denklem (9) ve Denklem (10)'daki  $V_B$  bataryanın terminal uçlarındaki gerilim,  $V_{\text{SOC}}$  batarya ile seri bağlı olarak temsil edilen bataryanın doluluk durumu ile bağlantılı olan bataryanın iç kaynak gerilimi,  $I_B$  şarj ve deşarj sırasındaki batarya akımı,  $R_{i\text{ÇŞ}}$  bataryanın şarj durumunda dinamik iç direncini,  $R_{i\text{ÇD}}$  bataryanın deşarj durumunda dinamik iç direncini temsil etmektedir.

### 3.1. Batarya Deneysel Çalışmaların Özeti (Summary of Battery Experimental Studies)

Bu çalışmada yapılan üç farklı batarya şarj ve deşarj deneysel çalışma sonuçlarının özeti bu bölümde verilmektedir. Her bir bataryanın gerilimi, Ah cinsinden toplam kapasitesi, şarj ve deşarj akımları, şarj ve deşarj C oranları, bataryaya verilen ve bataryadan alınan Ah cinsinden kapasite miktarları, şarj ve deşarj deney süreleri ve ölçüm periyot aralıkları Çizelge 1'de ayrıntılı olarak verilmektedir.

Bu Çizelge ile bataryalara verilen ve bataryalardan çekilen akım değerleri, kapasite miktarları incelenebilmektedir. Bu çalışmada batarya şarj ve deşarj deney sonuçlarında, batarya katalog bilgilerinde verilen standart şarj ve deşarj akımlarında üzerinde yazılan toplam kapasite miktarını tam olarak verebildiği gözlenmiştir.

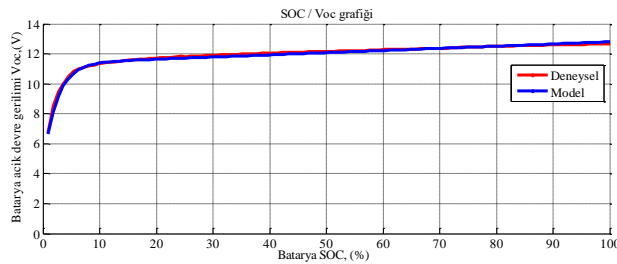
Çizelge 1. Batarya şarj ve deşarj deney sonuçlarının Çizelgesi (Table of battery charge and discharge experimental test results)

Batarya tipi	Deney akımı (A)	Toplam kapasite (Ah)	Deney süresi (dk)	Ölçüm periyodu (dk)	C oranı (C)	Verilen/Alınan kapasite (Ah)	Yük ( $\Omega$ )
<b>Hyundai Marka (Kurşun Asit)</b>							
Şarj	1	7,2	330	3	0,13	5,5	
Deşarj	1	7,2	294	3	0,13	4,9	12
	3	7,2	86	2	0,41	4,29	4
<b>Vision Marka (Kurşun Asit)</b>							
Şarj	Sabit 4,4	80	1050	15	0,055	77	
Deşarj	Sabit 4,4	80	1040	20	0,055	76,12	<2,72
	Sabit 10	80	225	12,5	0,125	37,5	<1,2
<b>Hipower Marka (LiFePO<sub>4</sub>)</b>							
Deşarj	15,6	100	27	3	0,156	7,02	0,205
	32,5	100	21	3	0,325	11,375	0,098
	40,1	100	12	2	0,401	0,82	0,065

Fakat batarya deşarj akım miktarı arttığında, batarya üzerinde yazan toplam kapasiteden daha az miktarda bir kapasitede enerji vermektedir. Bir batarya aynı akımda şarj ve deşarj edildiğinde toplam şarj süresinin toplam deşarj süresinden uzun olduğu gözlenmiştir.

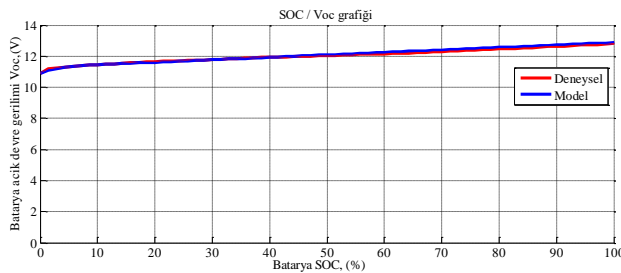
#### 4. BATARYA ŞARJI DENEYSSEL VE MODELLEME KARŞILAŞTIRMALARI (EXPERIMENTAL AND MODELLING COMPARISON OF BATTERY CHARGING)

Şekil 5'te deneysel çalışmalarda kullanılan Hyundai marka 12V 7,2Ah kurşun-asit bataryanın 1A şarj deneysel ve modelleme çalışmalarının karşılaştırılması verilmektedir. Batarya 1A şarj modelleme çalışmasında batarya doluluk durumuna bağlı olarak batarya terminal uçlarındaki gerilim değişimi Denklem (6)'da verilen formül ile çizdirilmektedir. Modelleme ve deneysel çalışmalar sonucundaki veriler kullanılarak Matlab/M-file arayüzü ile çizdirilen grafikler karşılaştırılmaktadır. Batarya 1A şarj modelleme çalışmaları deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında çok yakın tahmin değerleri elde edildiği görülmektedir. Hyundai marka 12V batarya 1A şarj modelleme çalışmaları sonucunda Denklem (8) kullanılarak hata oranı maksimum %4,3 olarak hesaplanmaktadır. Bu hata oran sonucu modelleme çalışmalarının deneysel sonuçlara çok yakın ve kararlı olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Hyundai 12V 1A şarj deneysel ve modelleme karşılaştırması (Hyundai 12V 1A battery charging experimental and modelling comparison)

Şekil 6'da deneysel çalışmalarda kullanılan Vision marka 12V 80Ah kurşun-asit bataryanın şarj deneysel ve modelleme çalışmalarının karşılaştırılması verilmektedir. Batarya sabit 4,4A şarj modelleme çalışmasında batarya doluluk durumuna bağlı olarak batarya terminal uçlarındaki gerilim değişimi Denklem (6)'da verilen formül ile çizdirilmektedir.



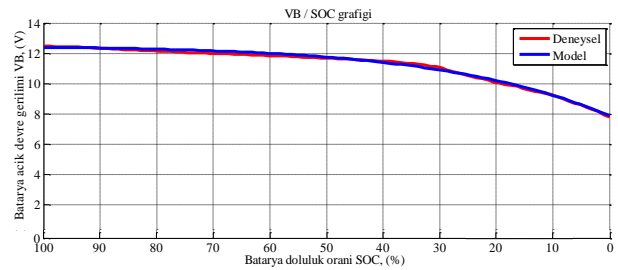
Şekil 5. Vision 12V sabit 4,4A şarj deneysel ve modelleme karşılaştırması (Vision 12V constant 4,4A battery charging experimental and modelling comparison)

Vision marka 12V batarya sabit 4,4A şarj modelleme çalışmaları sonucunda 1A şarj modelleme çalışmasında kullanılan Denklem (8) ile hata oranı maksimum %0,9 olarak hesaplanmaktadır. Bu hata oranları, modelleme çalışmalarının deneysel sonuçlara çok yakın ve kararlı olduğunu göstermektedir.

Batarya şarj modelleme çalışmalarında elde edilen denklemin her iki batarya için düşük hata oranıyla sonuç verdiği anlaşılmaktadır.

#### 5. BATARYA DEŞARJI DENEYSSEL VE MODELLEME KARŞILAŞTIRMALARI (MODELLING AND EXPERIMENTAL COMPARISON OF BATTERY DISCHARGE)

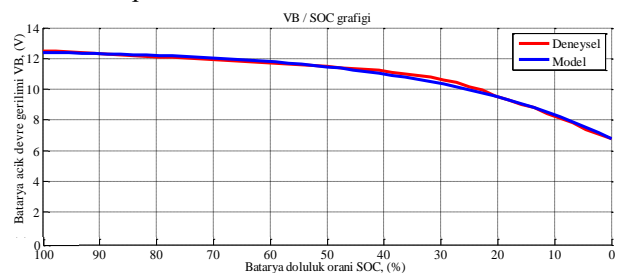
Şekil 7 ve Şekil 8'de deneysel çalışmalarda kullanılan Hyundai marka 12V 7,2Ah kurşun-asit bataryanın sırasıyla sabit yük 1A ve 3A deşarj deneysel ve modelleme çalışmalarının karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 6. Hyundai 12V 1A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması (Hyundai 12V 1A battery discharging experimental and modelling comparison)

Batarya 1A ve 3A deşarj modelleme çalışmasında batarya doluluk durumuna bağlı olarak batarya terminal uçlarındaki gerilim değişimi Denklem (7)'de verilen formül ile çizdirilmektedir.

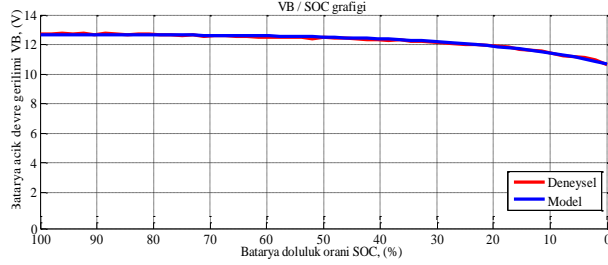
Hyundai marka 12V batarya 1A şarj modelleme çalışmaları sonucunda Denklem (8) kullanılarak hata oranı maksimum %4,1 olarak hesaplanmaktadır. Şekil 8'de Hyundai marka kurşun-asit bataryanın 3A deşarj deneysel ve modelleme çalışmalarının karşılaştırılması verilmektedir. Batarya 3A deşarj modelleme çalışmasında batarya doluluk durumuna bağlı olarak batarya terminal uçlarındaki gerilim değişimi Denklem (7)'de verilen formül ile çizdirilmektedir. Hyundai marka 12V batarya 1A şarj modelleme çalışmaları sonucunda Denklem (8) kullanılarak hata oranı maksimum %8,6 olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 7. Hyundai 12V 3A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması (Hyundai 12V 3A battery discharger experimental and modelling comparison)

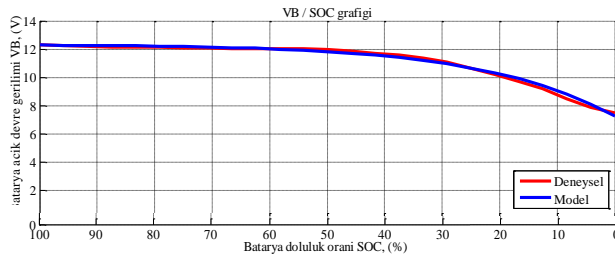


Şekil 9'da Vision 12V bataryanın terminal gerilim değerine bağlı olarak doluluk bilgisinin verildiği sabit 4.4A deşarj deneysel ve modelleme çalışmaları görülmektedir. Şekil 9'da verilen deneysel ve model karşılaştırmaları çok düşük hata ile tespit edilmekte ve maksimum hata oranı %1,18 olarak hesaplanmaktadır.



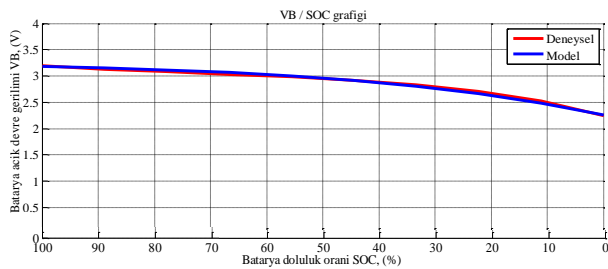
Şekil 8. Vision 12V sabit 4,4A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması (Vision 12V constant 4,4A discharger experimental and modelling comparison)

Şekil 10'da aynı Vision 12V batarya tipinin sabit 10A deşarj deneysel ve modelleme çalışmaları verilmektedir. Şekil 10'da verilen deneysel ve modelleme karşılaştırma sonucunda maksimum %3,6'lık hata oranı ile başarılı bir modelleme çalışması yapıldığı görülmektedir.



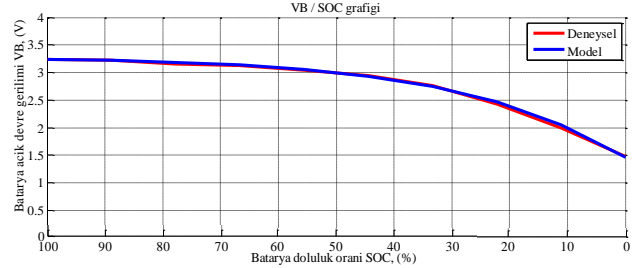
Şekil 9. Vision 12V sabit 10A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması (Vision 12V constant 10A discharger experimental and modelling comparison)

Şekil 11'de Hipower marka 3,2V 100Ah kapasiteye sahip LiFePO<sub>4</sub> bataryanın terminal gerilim değerine bağlı olarak doluluk bilgisinin verildiği sabit yük 15,6A deşarj deneysel ve modelleme çalışmaları görülmektedir. Bir önceki deşarj modelleme çalışmalarında olduğu gibi Denklem (7)'de verilen formül kullanılmaktadır. Şekil 11'de verilen deneysel ve model karşılaştırmaları çok düşük hata oranı ile tespit edilmekte ve maksimum hata oranı %1,17 olarak hesaplanmaktadır.



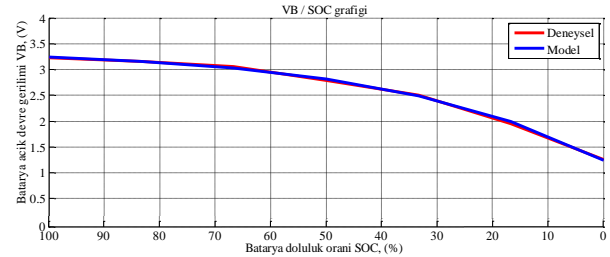
Şekil 10. Hipower 3,2V 15,6A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması (Hipower 3,2V 15,6A discharger experimental and modelling comparison)

Şekil 12'de Hipower marka LiFePO<sub>4</sub> bataryanın terminal gerilim değerine bağlı olarak doluluk bilgisinin verildiği sabit yük 32,5A deşarj deneysel ve modelleme çalışmaları görülmektedir. Şekil 12'de verilen deneysel ve model karşılaştırmaları çok düşük hata oranı ile tespit edilmekte ve maksimum hata oranı %1,39 olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 12. Hipower 3,2V 32,5A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması (Hipower 3,2V 32,5A discharger experimental and modelling comparison)

Şekil 13'te aynı Hipower marka batarya için son deney çalışması olan terminal gerilim değerine bağlı olarak doluluk bilgisinin verildiği sabit yük 49,1A deşarj deneysel ve modelleme çalışmaları görülmektedir. Şekil 13'te verilen deneysel ve model karşılaştırmaları çok düşük hata oranı ile tespit edilmekte ve maksimum hata oranı %1,93 olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 13. Hipower 3,2V 49,1A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması (Hipower 3,2V 49,1A discharger experimental and modelling comparison)

Bu çalışmada batarya şarj/deşarj deneyleri sonuçları alınarak, elde edilen modelleme çalışmaları ile batarya doluluk durum tahmini yapılmaktadır. Çizelge 2'de deneysel ölçümler ile modelleme denklem sonuçlarının karşılaştırma sonucunda hata oran miktarları verilmektedir. Önerilen modelleme denklemleri batarya için farklı şarj/deşarj deneyleriyle kıyaslama imkânı sağlamaktadır. Farklı akım değerlerindeki batarya şarj/deşarj modelleme çalışmaları yapılarak denklemlerin doğruluğu kıyaslanmıştır ve kabul edilebilir hata oranlarına sahip bir matematiksel denklem oluşturulmuştur.

Batarya şarj işlemlerinde bataryanın boş olduğu durumda dinamik iç direncinin çok yüksek olduğu şarj oldukça batarya dinamik iç direncinin düştüğü gözlenmektedir. Hyundai marka batarya için bu dinamik iç direnç değeri 0,29Ω-8,23Ω arasında bir değerdedir. Aynı batarya deşarj işlemleri sırasında dinamik iç direncinin 0,29Ω-8,23Ω arasında olduğu gözlenmiştir. Vision marka

bataryada dinamik iç direnç değeri şarj deneylerinde  $0,152\Omega-0,065\Omega$ , deşarj işlemlerinde  $0,025\Omega-0,536\Omega$  olarak hesaplanmıştır.  $\text{LiFePO}_4$  batarya deşarj deneyinde batarya dinamik iç direnci  $0,0016\Omega-0,1143\Omega$  olarak bulunmuştur. Özellikle batarya deşarj deneylerinde katalog bilgilerinde yer alan 20Hr ifadesi yani bataryanın 0,05C oranında ve 0,036A ile deşarj edildiğinde 20 saat enerji verebildiği, bu akım değerinin üzerine çıktığında Peukart eğrisinin de açıkladığı gibi batarya toplam

yöntemi ile elde edilmektedir. Şarj modelleme çalışmalarında elde edilen model denklemi ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hyundai marka batarya 1A şarj modelleme çalışmasında maksimum %4,3 ve Vision marka batarya sabit 4,4A şarj modelleme çalışmasında maksimum %0,9 hata oranları ile sonuçlandırılmıştır. Aynı şekilde deşarj modelleme çalışmalarında deşarj denklemi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu deşarj modeli ile deneysel sonuç

**Çizelge 2.** Modelleme çalışma sonucundaki hata oranları (Error rates in the modelling study results)

Şarj Modelleme Çalışmaları Hata Oranları							
Batarya	Hyundai 1A			Vision basit 4,4A			
Hata (%)	4,3			0,9			
Deşarj Modelleme Çalışmaları Hata Oranları							
Batarya	Hyundai 1A	Hyundai 3A	Vision Sabit 4,4A	Vision Sabit 10A	Hipower 15,6A	Hipower 32,5A	Hipower 49,1A
Hata (%)	4,1	8,6	1,18	3,6	1,17	1,39	1,93

kapasitesinin çok altında bir verdiği gözlenmiştir. Batarya sabit deşarj akımında yapılan deneylerde, aynı başlangıç akımındaki sabit yük deşarj deneylerine göre bataryanın doluluk durumunun daha çabuk bittiği gözlenmektedir. Hyundai marka kurşun-asit bataryada 3A deşarj için sabit yük altında 86dk iken, sabit deşarj akım deneyinde bu süre 38dk olarak hesaplanmıştır. Bunun da sebebi batarya hücrelerinin sabit akım değerinde daha çok zorlanmasıdır. Bu yüzden toplam kapasite miktarı düşmektedir. Bir bataryanın terminal uçlarına yük bağlandığında deşarj sırasında terminal uçlarındaki gerilimi düşmektedir. Yük miktarı arttıkça bataryanın gerilim düşüşündeki miktar daha da artmaktadır. Bu nedenle oluşturulan batarya modelindeki  $V_{MB}$  değerinin deneysel sonuç değerlerinden bir miktar daha küçük olduğu gözlenmiştir. Bu farktan dolayı deşarj akımı arttıkça batarya deşarj modelleme çalışmalarındaki hata oranı çok küçük bir miktar artmaktadır.

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada bataryalar ile farklı akım ve gerilim değerlerinde şarj ve deşarj deneyleri yapılmıştır. Bataryayı şarj ve deşarj ederken sabit gerilim ile şarj, sabit akım ile şarj, sabit yük ile deşarj ve sabit akım ile deşarj deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda yapılan şarj deneylerinde bataryayı şarj ederken özellikle bataryaya uygulanan gerilim değerinin batarya sağlığı açısından önemli olduğu gözlenmiştir. Eğer batarya katalog bilgilerinde verilen şarj etme gerilim değerini aşarsa, bataryanın hücre aralarındaki uzaklığın fiziksel olarak arttığı gözlenmiştir. Bu deneyler doğrultusunda batarya şarj ve deşarj modelleme çalışmalarında toplam kapasite değişimi belirlenerek parametreler elde edilmiştir. Belirlenen parametreler doğrultusunda bataryanın şarj ve deşarj modelleri çıkartılmaktadır. Bu modelleme çalışmaları eğri uydurma “curve fitting”

karşılaştırılmıştır ve bu modellemelerde Hyundai marka 1A deşarj deneyinde maksimum %4,1’lik hata oranı çıktığı gözlenmiştir. İleriki çalışmalarda özellikle  $\text{LiFePO}_4$  batarya şarj deneyleri sırasında yüksek akım değerlerinde kontrollü akım kaynağı kullanılarak daha fazla sayıda deneysel sonuçlar alınabilir. Aynı şarj modelleme denklemlerinin bu deney sonuçlarına uygulanmasıyla düşük hata oranları ile yaklaşım gerçekleştirileceği öngörülmektedir.

## SEMBOLLER (NOTATIONS)

$f_{S1}$	:1. şarj model fonksiyonu
$f_{S2}$	:2. şarj model fonksiyonu
$h_B$	:hata oranı
$k_p$	:deşarj eğri katsayısı
$m_1$	: $f_{S1}$ fonksiyonun eğimi
$m_2$	: $f_{S2}$ fonksiyonun eğimi
$R_{iCD}$	:batarya deşarj dinamik iç direnci, [ $\Omega$ ]
$R_{iÇŞ}$	:batarya şarj dinamik iç direnci, [ $\Omega$ ]
SOC	:batarya doluluk durumu, [%]
$V_B$	:batarya terminal gerilimi, [V]
$V_{B0}$	: $f_{S1}$ başlangıç anındaki batarya gerilimi, [V]
$V_{B02}$	: $f_{S2}$ başlangıç anındaki batarya gerilimi, [V]
$V_{B1}$	:1. batarya gerilim ara değerleri, [V]
$V_{B2}$	:2. batarya gerilim ara değerleri, [V]
$V_{B3}$	:3. batarya gerilim ara değerleri, [V]
$V_{MBD}$	:batarya deşarj model gerilimi, [V]
$V_{MBS}$	:batarya şarj model gerilimi, [V]

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, TÜBİTAK 113E143 nolu “Fotovoltaik kaynaktan beslenen 3-fazlı 4-telli akıllı mikro şebeke yapısının batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji

depolama sistemi ile geliştirilmesi” adlı 1001 projesi tarafından desteklenmiştir.

Bu çalışma, TÜBİTAK 2211 “Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı” tarafından desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Linden D., Reddy T. B., “Handbook of Batteries”, David Linden, *McGraw-Hill Press*, 3d ed., New York, (2001).
2. Scrosati B., Garche J., “Lithium batteries: Status, prospects and future”, *Elsevier Journal of Power Sources*, 195: 2419-2430, (2010).
3. Rydh C. J., Sanden B. A., “Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part I: Performance and energy requirements”, *Elsevier Energy Conversion and Management*, 46: 1957-1979, (2005).
4. Divya K. C., Jacob Q., “Battery energy storage technology for power systems-An overview *Elsevier Electric Power Systems Research*, 79: 511-520, (2009).
5. Whittingham M. S., “History, Evolution, and Future Status of Energy Storage”, *Proceedings of the IEEE Issue Special Centennial*, 100: 1518-1534, (2012).
6. Chih A., Hua C., Zong B., and Syue W., “Charge and Discharge Characteristics of Lead-Acid Battery and LiFePO<sub>4</sub> Battery”, *International Power Electronics Conference*, Sapporo, Japan, 1478-1483, (2010).
7. Swierczynski M., Store I. D., and Stan I. A., Teodorescu R., Vikelgaard H., “Selection and impedance based model of a lithium ion battery technology for integration with Virtual Power Plant”, *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Lille, Germany, 1-10, (2013).
8. Gao J., Zhang Y., and He H., “A Real-Time Joint Estimator for Model Parameters and State of Charge of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles”, *Energies*, 8: 8594-8612, (2015).
9. Bae K., Choi S., and Kim J., “Won C., Jung Y., LiFePO<sub>4</sub> Dynamic Battery Modeling for Battery Simulator”, *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Busan, Korea, 354-358, (2014).
10. Hamidi S.A., Ionel M.D., and Nasiri A., “Modelling and Management of Batteries and Ultracapacitors for Renewable Energy Support”, *Electric Power Components and Systems*, 43: 1434-1452, (2015).
11. Chen M., Rincon-Mora G.A., “Accurate Electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance” *IEEE Transactions Energy Conversion*, 21: 504-51, (2006).
12. Rakhmatov D., Vruthula S., and Wallach D.A., “A model for battery lifetime analysis for organizing applications on a pocket computer”, *IEEE Transactions VLSI Systems*, 11: 1019-1030, (2003).
13. Kırçıçek Y., “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Destek için Kullanılan Batarya ve Ultrakapasitör Depolama Birimlerinin Modellenmesi ve Analizi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, (2016).
14. Jongerden M.R., Haverkort R., “Which battery model to use?”, *IEEE IET Software*, 3: 445-457, (2009).