



Elektrikli araç uygulamalarında kullanılan lityum bataryalar için göreceli kapasite tahmin yöntemi

A relative capacity estimation method for lithium batteries used in electric vehicle applications

Türev SARIKURT^{1*}, Abdülkadir BALIKÇI²

¹TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü, Otomotiv Mükemmeliyet Merkezi, Kocaeli, Türkiye.
turev.sarikurt@tubitak.gov.tr

²Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
a.balikci@gtu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 02.06.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 18.02.2018

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.58224
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Günümüzde fosil yakıt kullanımının çevresel zararları hakkındaki bilincin artması ve bu yakıtların rezervlerindeki azalmadan dolayı temiz ulaşım konusu ilgi çekmektedir. Elektrikli Araçlar (EA) bu alandaki önemli alternatiflerdendir. Diğer batarya türlerine kıyasla kendiliğinden boşalma oranlarının düşük olması ve yüksek enerji yoğunluğuna, yüksek güç yoğunluğuna ve yüksek açık devre gerilimlerine sahip olmaları nedeniyle lityum tabanlı bataryalar EA uygulamalarında yoğunlukla tercih edilir. Bataryaların performansı zaman ve kullanım ile azalır. Bu nedenle EA uygulamalarında bataryanın sağlık ve ömür bilgisi önemlidir. Bu çalışmada batarya sağlığı Göreceli Kapasite (GK) cinsinden ifade edilmiş ve basit bir GK tahmin metodu önerilmiştir. GK bataryanın güncel ve nominal kapasite değerlerinin karşılaştırılmasıdır. Önerilen metotta GK bataryanın Referans Çevrim Sayısı (RÇS) kullanılarak elde edilmektedir. Bu amaçla bataryanın terminal geriliminin belirli sinyaller altında değişimine bağlı olarak bir RÇS modeli geliştirilmiştir. Daha önceki çalışmalarda önerilmiş bir batarya modeli yaşlanma etkilerini de içerecek şekilde geliştirilmiş, bataryanın farklı RÇS'deki davranışının benzetimi yapılmıştır. Farklı RÇS'deki bataryaların aynı test sinyaline verdikleri tepkiler terminal gerilimindeki değişimler üzerinden incelenmiştir. Bu değişimler sayısal büyüklüklere dönüştürülerek RÇS modeli oluşturulmuş, RÇS-GK ilişkisinden faydalanılarak GK elde edilmiştir. Metodun geçerliliği deneysel olarak da teyit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Lityum-İyon batarya, Elektrikli araçlar, Batarya sağlık durumu, Göreceli kapasite, Referans çevrim sayısı

Abstract

Depending on the consciousness about environmental harms of fossil fuel usage and depletion in their reserves, the interest on clean transportation is rising today. Electric vehicles (EV) are important alternatives on clean transportation. In EV applications, lithium based batteries are commonly preferred due to their relatively high energy and power densities, higher open circuit voltages and lower self-discharge rates, when compared to other secondary battery types. Performance of a battery decreases with age. Therefore battery health and life information is important for reliable operation in EV applications. In this study battery health is represented in terms of relative capacity (RC) which is the comparison between actual and nominal capacity values of a battery and a simple RC estimation method is proposed. In the method, RC is estimated by using relative cycle number by using reference cycle number (RCN). For this purpose a RCN model, which is based on the change of terminal voltage under a significant load signal, is developed. A battery model, which was proposed in an earlier study is improved in order to reflect aging effects. Behaviors of batteries in different reference cycles are simulated. Different responses of batteries to the same load signal, by means of differences in terminal voltages are investigated. These differences are transformed to numerical quantities to develop RCN model and thereafter RC is estimated by using the relationship between RCN and RC. The method is validated with experiments.

Keywords: Lithium-Ion batteries, Electric vehicles, Battery state of health, Relative capacity, Reference cycle number

1 Giriş

Günümüzde fosil yakıt kullanımının çevresel zararları üzerine artan bilinç düzeyi ve bu yakıt rezervlerindeki azalma, temiz ulaşım konusuna olan ilgiyi arttırmaktadır. Elektrikli Araçlar (EA) temiz ulaşım konusunda önemli alternatiflerdir ve yakın zamanda market paylarının artması beklenmektedir [1]. Lityum bataryalar diğer şarj edilebilir bataryalar ile karşılaştırıldığında göreceli olarak yüksek enerji ve güç yoğunluklarına sahiptir. Ayrıca bu bataryaların açık devre gerilimleri daha yüksek ve kendiliğinden boşalma oranları daha düşüktür [2]-[5]. Bu nedenle farklı kimyalara sahip lityum bataryalar EA uygulamalarında yoğunlukla tercih edilmektedirler.

Bir bataryanın performansı kullanım ile azalır. Bu azalmanın nedeni aynı zamanlarda meydana gelen ve birbiri ile iç içe

geçmiş birçok süreç ve işlemden kaynaklı olabilir. Bu nedenle bu performans azalmasının miktarını belirlemek zordur [6]. Kalan batarya ömrünün belirlenebilmesi EA uygulamalarında güvenilirlik için oldukça önemlidir. Bu nedenle bataryanın güncel sağlık durumunu gösteren Batarya Sağlık Durumu (BSD) adında bir parametre tanımlanmıştır. BSD kabaca bataryanın başlangıç koşulları ile güncel koşullarının karşılaştırılması olarak ifade edilebilir ve %100 BSD bir bataryanın hiç kullanılmadığı anlamına gelmektedir.

Literatürde BSD'nin tanımı konusunda değişik görüşler bulunmaktadır ve BSD farklı yaklaşımlar ile değişkenler kullanılarak tahmin edilebilmektedir [7]. BSD'nin belirlenmesine yönelik çalışmalar genel olarak uyarlamalı yaklaşımlar ve deneysel yaklaşımlar olmak üzere iki başlık altında toplanabilir [8]. Uyarlamalı yaklaşımlarda BSD veya doğrudan bataryanın içinde bulunduğu sağlık şartlarını

tanımlayan parametreler uyarlamalı algoritmalar veya metodlar yardımıyla belirlenir. Ayrıca bu yaklaşımın kullanıldığı yöntemlerin birçoğunda sürüş anında BSD tahmini mümkündür. Kalman filtresi çeşitleri [9]-[12], gözleyiciler [13] ve bulanık mantık uygulamaları [14],[15] bu kategoriye dâhil edilebilir. Deneysel yaklaşımlar da kendi içlerinde ölçümsel ve model tabanlı yöntemler olarak iki başlıkta sınıflandırılabilirler. Ölçümsel yaklaşımlar kullanım ve yaşlanmayla birlikte artan bataryanın iç direnci veya empedansının ölçülmesine dayanır. Bu artış değerlerinden faydalanılarak BSD tahmini yapılabilmektedir [16]-[23]. Model tabanlı yaklaşımlarda BSD veya yaşlanmayı temsil eden bir model geliştirmek için deneysel veriler kullanılır. Veri uydurma teknikleri [24],[25], olasılıksal metotlar [26] ve Coulomb sayımı [27] kullanılan çalışmalar bulunmaktadır. İç direnç veya batarya empedansının ölçülmesine dayanan yöntemler en isabetli olmakla birlikte sürüş anında ölçüme imkân tanımamaktadır. Hem deneysel hem de olasılıksal model oluşturma tekniklerinde ise uygulama sırasında ağır hesaplamalar gerekmektedir. Ayrıca deneysel veriler kullanılarak oluşturulmuş modellerde uygulama koşulları modellerin oluşturulduğu deneysel koşullardan farklılıkça başarı azalmaktadır.

Bu çalışmada BSD, bir bataryanın nominal ve güncel maksimum kapasitelerinin karşılaştırılması olarak tanımlanan Göreceli Kapasite (GK) kullanılarak temsil edilmiştir. Yaşlanan bir bataryada kapasite düşümü gözlemlenir ve kapasite düşümü tamamen dolu bir bataryanın sabit akım ile deşarj süresi kullanılarak tanımlanabilir [28]. Bu çalışmada GK, kapasite düşümünden yola çıkılarak hesaplanmıştır.

Bir bataryanın yaşı veya kullanılma miktarı Çevrim Sayısı (ÇS) ile ifade edilebilir. Bir bataryanın ÇS-GK ilişkisini inceleyebilmek için batarya servis dışı kalana kadar ($BSD < \%80$) gözlemlenmelidir. Bu deneyler tekrarlamaya dayalı, ortam şartlarında tutarlılık gerektiren ve uzun süre alan deneylerdir. ÇS-GK ilişkisi genellikle üreticiler tarafından sunulmaktadır ve bu çalışmada da hücrelerin üreticisi tarafından sunulan bilgi kullanılmıştır [29]. Üreticiler bataryanın yaşlanma süresince belirli şarj ve deşarj rutinleri takip ederler. Gerçek bir araçta kullanılan bataryanın belirtilen rutinelere bağlı olarak yaşlanması mümkün değildir. Dolayısıyla üreticinin yaşlandırma çevrimi gerçekçi değildir ve bu çalışmada üreticinin kullandığı çevrim, Referans Çevrim (RÇ) olarak, bu çevrim kullanılarak yaşlandırılmış bataryanın yaşı ise Referans Çevrim Sayısı (RÇS) cinsinden ifade edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada üretici tarafından sunulan bilgi ile GK-RÇS arasında bir ilişki kurulmuş, bu ilişkiden faydalanılarak RÇS'si elde edilmiş bir bataryanın GK'si tahmin edilmiştir.

Çalışmada RÇS yaşlanan bataryaların performanslarındaki düşümlerden yola çıkılarak belirlenmiştir. Bu performans düşümü bataryanın terminal gerilimi kullanılarak gözlemlenebilir. Bataryadan zamanla artan bir akım çekildiğinde belli bir gerilim düşümü gözlemlenecektir. RÇS'si daha yüksek olan bataryalarda bu düşüm de daha yüksek olmaktadır. BSD ise GK üzerinden tanımlanmıştır ve GK'yi elde etmek için RÇS'nin kullanıldığı bir yöntem önerilmiştir. Önceki çalışmalarda bir yük profili altında bir hücrenin terminal geriliminin değişmesi incelenmiş, yük profilinin belirli bölgelerindeki gerilim düşümünden yola çıkarak RÇS ve GK belirlenmiştir [30]-[32]. Belirtilen çalışmalarda RÇS'nin belirlenmesi sürüş çevrimine, yani belirli ve devam eden bir yük profiline bağlıdır. RÇS'nin başarılı bir şekilde

belirlenebilmesi için çevrimin gelecek noktalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada ise gerek kullanılan yaklaşımı sistemik bir hale getirmek gerek ise yük profiline bağımlılıktan kurtarmak için belirli sinyalleri kullanılmış, bu sinyaller altında hücrelerin terminal gerilimindeki değişimin farklılığından yola çıkılan bir RÇS modeli oluşturulmuştur. Çalışma için daha önceden tanımlanmış %4'ten daha düşük hata oranına sahip bir batarya modeli [33],[34] yaşlanma etkilerini de yansıtabilecek şekilde uyarlanmış, farklı yaşlardaki hücrelerin davranışlarının benzetimleri yapılmıştır. Farklı yaşlardaki bataryaların belirli yük sinyallerine maruz kaldıklarında terminal gerilimlerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. RÇS modeli oluşturabilmek için bu değişimler sayısal büyüklüklere dönüştürülmüş daha sonra GK-RÇS ilişkisi kullanılarak GK hesaplanmıştır.

Bu çalışmada önerilen yöntem uzun hesaplama süreleri gerektirmemektedir. Test sinyali belirlendikten sonra iki zamanda ölçülecek iki gerilim değeri ile ölçüm gerçekleştirilebilmektedir. Bu özellikleriyle sürüş anında ölçüm için de uygundur. Yöntem hem basit olması hem de sürüş anında uygulanabilmesi ile literatürdeki çalışmaların önüne geçmektedir.

Yöntem kontrollü ve kontrolsüz olmak üzere iki farklı deney ile doğrulanmıştır. RÇS modelinin hatası ortalama 26 çevrim, GK hesaplama yönteminin hatası ise en fazla %6'dır.

2 Batarya modeli

Başarılı bir batarya modelinin öncelikli özellikleri tutarlılık, basitlik ve modeli kurmak için gereken çabadır [35]. Önerilen modelde basitlik ve kurulum için gereken çabayı en aza indirmek açısından sıcaklık etkileri ihmal edilmiştir. Önerilen GK tahmin yöntemi elektrikli araçlarda kullanılmak amacı ile geliştirilmiştir. Paket sıcaklığının araçta bulunan termal yönetim sistemi yardımıyla belirli bir aralıkta tutulacağı öngörüldüğünden batarya modellemesi yapılırken sıcaklık sabit kabul edilebilir.

2.1 Literatür özeti

Batarya modelleri elektrokimyasal, istatistiksel, analitik ve elektriksel devre modelleri olmak üzere dört başlıkta toplanabilmektedir.

Elektrokimyasal modeller hücrelerin dâhili kimyasal reaksiyonlarına bağlıdır. Dolayısıyla bu modeller karmaşık olmakla birlikte tutarlılıkları oldukça yüksektir. Elektrokimyasal modeller birçok lineer olmayan eşitlik içerir, bu nedenle uzun hesaplama zamanlarına ihtiyaç duyulur. Elektrokimyasal modeller çok detaylıdır ancak bu detaylar bazı çalışmalarda gereksiz kalabilmektedir [35]-[39].

İstatistiksel modeller dâhili kimyasal karakteristikler yerine deneylerden anlamlı bilgiler çıkarmak üzerine kuruludur [40]. Fiziksel modeller kadar isabetli olmamakla birlikte daha az hesaplama zamanına ihtiyaç duyarlar. Bu modeller için gereken istatistiksel veriler farklı deneysel senaryolar aracılığıyla toplanır. Bu modellerin başarısı deneysel ortamlardan daha farklı ortamlarda kullanıldığında düşer. Stokastik [41], yarı deneysel yaklaşımlar [42], istatistiksel analiz [43] ve bulanık yapay sinir ağları [44] üzerine yapılan çalışmalar bu gruba örnektir.

Analitik batarya modellerinde batarya durumu ve karakteristikleri analitik ifadeler olarak gösterilir. Analitik yapılarından dolayı bu modeller daha az hesaplama zamanına ihtiyaç duyar. Analitik modellerin ilk örnekleri bataryanın

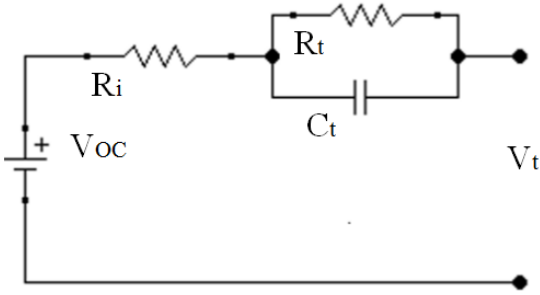
kalan şarjının belirlenmesi üzerinedir [45],[46]. Model parametrelerinin belirlenmesinde Genetik Algoritma da kullanılan yöntemlerden birisidir [47].

Bataryaları elektriksel devreler olarak modellemenin en önemli avantajı bu modellerden devre analiz teorileri kullanarak matematiksel çıkarımlar yapılabilmesidir. Dolayısıyla bu modeller başta elektrikli araçlar olmak üzere birçok alanda başarı ile kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda batarya parametreleri devre elemanları veya alt devreler olarak gösterilir. Modelin parametrelerinin değerleri EES (Elektrokimyasal empedans spektrometresi) [19] gibi ileri kimyasal tekniklerle veya deneysel verilerle [38],[48],[49] elde edilebilir. Modelin karmaşıklığı detay seviyesi ile birlikte artar. Bir eşdeğer devre batarya modeli tek [34],[50], çift [51],[52] veya daha fazla [53] paralel direnç-kapasitör alt devresi içerebilir.

Bu çalışmada kullanılan model basitliği korumak amacıyla bir adet R-C bloğu içermektedir. Modelin parametreleri bir grup deney sonrasında belirlenmiştir [33],[34].

2.2 Modelin tasarımı

Model genel olarak bir adet iç direnç ve bir adet R-C bloğundan oluşmaktadır. Modelin devre şeması Şekil 1'de gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere R_i iç direnç, R_t ve C_t paralel bloktaki direnç ve kapasitör, V_t terminal gerilimi, V_{OC} ise açık devre gerilimidir.



Şekil 1: Batarya modelinin devre şeması.

R_t ve C_t 'nin değerleri bataryanın toparlanma etkisinden faydalanılarak bulunur. Bu amaçla tamamen dolu bir batarya 1 C'lik (11 A) sabit akımla deşarj edilmiştir. Bataryanın terminal gerilimi, V_t minimum deşarj gerilim seviyesi olan 2.7 V'a düştüğünde deşarj işlemine son verilmiştir. Toparlanma sürecinden sonra R_t 'nin değeri Denklem (1) kullanılarak bulunabilir.

$$R_t = \frac{V_{t_{denge}} - V_{t_0}}{I} \quad (1)$$

Bu denklemde I çekilen akım, V_{t_0} toparlanma sürecinin başındaki terminal gerilimi değeri, $V_{t_{denge}}$ ise toparlanma sürecinin sonunda, dengeye oturmuş terminal gerilimi değeridir. C_t 'nin değeri ise R_t ve zaman sabiti τ kullanılarak Denklem (2) ile bulunabilir.

$$\tau = R_t C_t \quad (2)$$

İç direnç ise tamamen dolu olan bir bataryanın deşarj sürecinin başlangıcındaki ani gerilim düşümü kullanılarak bulunabilir. Batarya yük altına konulduğu anda üstel bir gerilim düşümü gözlemlenir. V_0 deşarj süreci başlamadan hemen önceki gerilim değeri, V_1 anlık gerilim düşümünün

tamamlandığı andaki gerilim değeri olmak üzere, iç direnç Denklem (3)'ten faydalanılarak bulunabilir.

$$R_i = \frac{V_0 - V_1}{I} \quad (3)$$

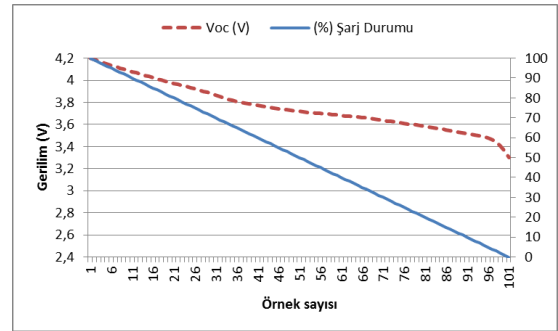
Bu modelde R_i , R_t ve C_t 'nin değerleri bu denklemler kullanılarak sırasıyla 0.0033 Ω , 0.015 Ω ve 555 F olarak belirlenmiştir.

Terminal geriliminin belli bir andaki değerinin bilinmesi için açık devre geriliminin bilinmesi gerekmektedir. Ancak, açık devre gerilimi sadece batarya boşken ölçülebilen bir büyüklüktür. Bu nedenle bu modelde batarya şarj durumundan (%D) faydalanılmıştır. %D bataryanın sahip olduğu şarjın maksimum şarjına oranıdır. Denklem (4)'te %D'nin elde edilebildiği eşitlik verilmiştir. Eşitlikte Q_{max} maksimum şarj, Q kalan şarj, Q_d ise tüketilen şarjdır.

$$\% \text{SD} = 100 \frac{Q}{Q_{max}} = 100 \frac{Q_{max} - Q_d}{Q_{max}} \quad (4)$$

Açık devre gerilimi ve %D arasındaki ilişki Coulomb sayma yöntemi ile kurulabilir. Teoride nominal kapasitesi 11 As olan tamamen dolu bir batarya (%D=%100) sabit 11 A akım çekmek suretiyle 3600 sn.'de tamamen boşalmalıdır. Coulomb sayma deneylerinde tamamen dolu bir batarya sabit 11 A ile boşaltılırken 36 sn.'lik aralarla açık devre gerilimi kaydedilmiştir. Her sekans %1'lik kapasite azalmasına denk gelmektedir. Dolayısıyla bu izleğin 100 defa tekrar edilmesi suretiyle her %SD değeri için V_{OC} kaydedilmiştir. Coulomb sayma deneylerinin sonuçları ve %D - V_{OC} ilişkisi Şekil 2'de verilmiştir. Bu ilişki kullanılarak V_{OC} , %D cinsinden Denklem (5)'teki gibi ifade edilebilir.

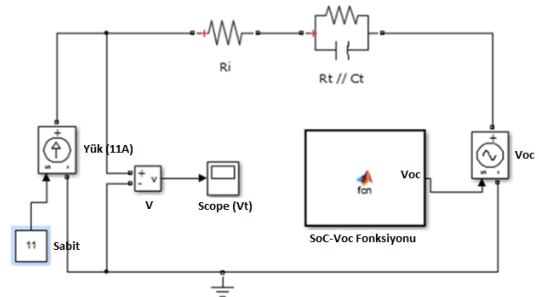
$$V_{OC} = -1.035e^{-2550C} + 0.325 \%D^2 - 0.495 \%D + 3.575 \quad (5)$$



Şekil 2: %D- V_{OC} ilişkisi.

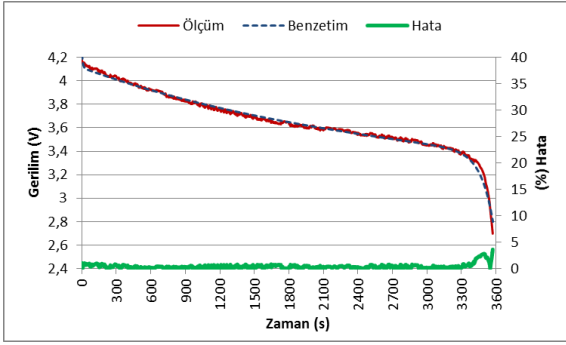
2.3 Modelin doğrulanması

Modelin doğrulanması için Simulink yazılımı kullanılmıştır. Şekil 3'te benzetim devresi görülmektedir.



Şekil 3: Benzetim devresi.

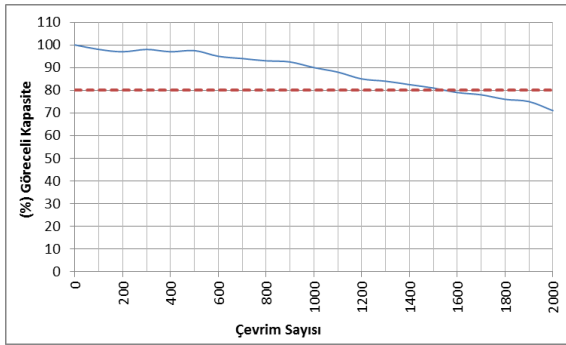
Devrede 11 A'lık sabit yük olarak kontrol edilebilir akım kaynağı bloğu, V_{OC} için kontrol edilebilir gerilim kaynağı bloğu kullanılmış, Denklem (5)'te verilmiş V_{OC} eşitliği ise bir MATLAB fonksiyonu bloğuna gömülmüştür. Aynı senaryo deneysel olarak birer adet kontrol edilebilir DC kaynak ve yük kullanılarak tekrarlanmıştır. Veri işleme yazılımı olarak ise LabView tercih edilmiştir. Benzetim çalışmaları ve deneysel çalışmalar Şekil 4'te karşılaştırılmıştır. Şekilden de görülebildiği üzere ortalama hata %0.422, maksimum hata ise %3.642'dir.



Şekil 4: Batarya modelinin doğrulanması.

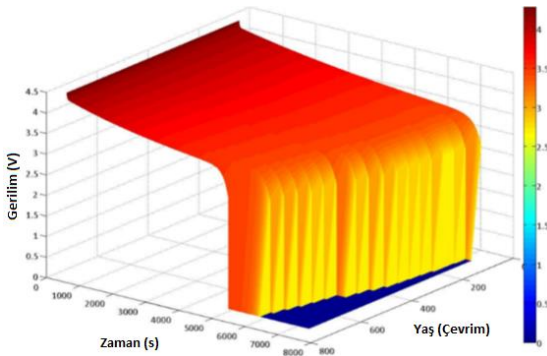
2.4 Yaşlanma

Bataryanın yaşlanma benzetimleri GK kullanılarak yapılmıştır. Model üretici tarafından verilmiş GK-ÇS ilişkisi kullanarak yaşlanma etkilerini de içerecek şekilde düzenlenmiştir [29]. Bu ilişkiyi gösteren grafik Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5: Göreceli kapasitenin yaşla çevrim sayısı ile değişimi.

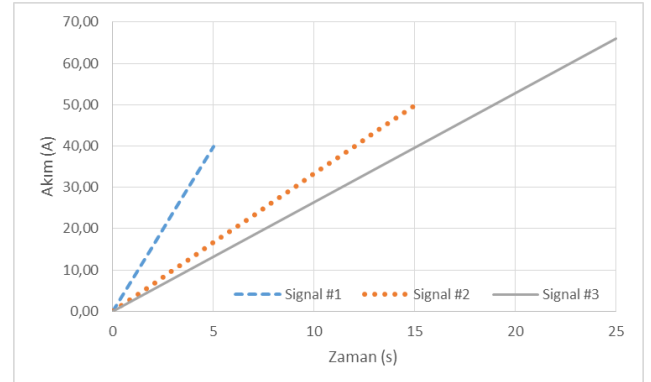
Bataryanın GK değişimi maksimum kapasitesine yansıtılabilir. Sonuç olarak ŞD modeldeki bu kapasite düşümünden etkilenir. Model sabit 11 A akım ile test edilmiş ve benzetim sonuçları 3 boyutlu bir yüzey grafiği olarak Şekil 6'da verilmiştir. Grafiğin eksenleri batarya gerilimi, deşarj süresi ve çevrim sayısıdır.



Şekil 6: Bataryanın yaşlanma benzetimlerinin sonuçları.

3 Göreceli kapasite kestirim yöntemi

Önerilen metot, bir hücrenin terminal geriliminin, aynı yük sinyali altında değişik çevrim sayıları veya yaşlardaki farklarının incelenmesine dayanmaktadır. Bu amaçla üç farklı test sinyali kullanılmıştır. Sinyaller farklı deneysel çalışmalarda kullanılmış bir sürüş çevriminden alınmıştır. Tüm üç sinyalin genlikleri zamanla artmaktadır ve her birinin farklı eğimleri bulunmaktadır. Tepe genlikleri sırasıyla 3.5 C (38.5 A), 4.5 C (49.5 A) ve 6 C (66 A) olan sinyallerin süreleri ise sırasıyla 5, 15 ve 25 sn.'dir. Sinyaller benzetimlerde kontrol edilebilir akım bloğu deneylerde ise programlanabilir DC yük ile üretilmiştir. Sinyaller Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7: Test sinyalleri.

Terminal geriliminin belirli bir zaman dilimindeki eğimi Denklem 6 ile hesaplanabilir. Denklemde v_1 ve v_2 , t_1 ve t_2 anlarında kaydedilmiş gerilim değerleridir.

$$m = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

Batarya modeli kullanılarak farklı çevrim sayılarındaki bataryaların tepkilerinin benzetimi yapılmıştır. Benzetimlerde bataryanın terminal geriliminin eğimi her üç sinyal için de her yüz çevrimde bir kaydedilmiştir. Bu kayıtlarda eğim değerlerinin değiştiği gözlenmiştir. Bu değişim örüntüsü, hareketli ortalama yöntemiyle düzeltilmiş ve üçüncü dereceden polinomlar şeklinde formüle edilerek RÇS eğime bağlı olarak modellenmiştir. Her üç farklı test sinyali için oluşturulmuş modeller aşağıdaki denklemlerde verilmiştir. Denklemlerde m_n n. test sinyaline ait eğimdir.

$$RÇS_1 = -6.243 \cdot 10^4 m_1^3 - 4.613 \cdot 10^4 m_1^2 - 1.783 \cdot 10^4 m_1 - 402.2 \quad (7)$$

$$RÇS_2 = -4.384 \cdot 10^5 m_2^3 - 1.78 \cdot 10^5 m_2^2 - 3.718 \cdot 10^4 m_2 - 540.3 \quad (8)$$

$$RÇS_3 = -2.836 \cdot 10^7 m_3^3 - 2.628 \cdot 10^6 m_3^2 - 4.444 \cdot 10^4 m_3 - 155.7 \quad (9)$$

Herhangi bir bataryanın terminal geriliminin eğimi o bataryaya test sinyali uyguladıktan sonra Denklem 6 kullanılarak bulunabilir. Daha sonra elde edilen eğim değeri uygun denklemde yerine yazılarak o bataryanın RÇS'i belirlenebilir.

Bir sonraki aşamada RÇS kullanılarak GK'nın tahmini yapılır. Bu amaçla Şekil 5'teki ilişki kullanılır. Şekildeki GK-RÇS ilişkisi hareketli ortalama metodu ile yumuşatılmış ve 6. dereceden bir polinom olarak RÇS'ye bağlı bir GK modeli geliştirilmiştir. Bu model Denklem 10'da verilmiştir.

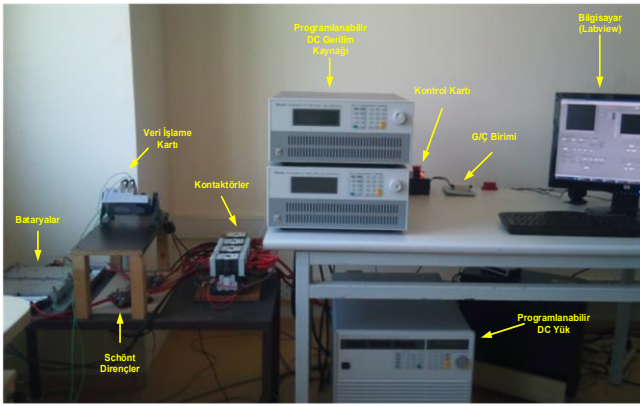
$$GK = 1.165 \cdot 10^{-17} R\dot{C}S^6 - 8.103 \cdot 10^{-14} R\dot{C}S^5 + 2.15 \cdot 10^{-10} R\dot{C}S^4 - 2.66 \cdot 10^{-7} R\dot{C}S^3 + 0.0001441 R\dot{C}S^2 - 0.03418 R\dot{C}S + 99.95 \quad (10)$$

4 Metodun doğrulanması

Metodun doğrulanması ve tutarlılığın belirlenmesi için iki farklı deney gerçekleştirilmiştir. Birinci deney grubunda üreticinin şarj-deşarj prosedürleri kullanılarak yaşlandırılmış, dolayısıyla RÇS'si bilinen bataryalar kullanılmıştır. Bataryalar kontrollü olarak yaşlandırıldığı için bu deneyler kontrollü deneyler olarak adlandırılmıştır. İkinci deney grubunda ise farklı çalışmalarda kullanılmış, belirli bir prosedüre bağlı kalmadan yaşlandırılmış bataryalar kullanılmıştır. Bu deneyler ise kontrolsüz deneyler olarak adlandırılmıştır.

Deney düzeneği Şekil 8'de görülmektedir. Düzenek bataryaların istenilen profillerde şarj veyadeşarj için programlanabilir DC yük, programlanabilir güç kaynakları, akım okumak için Schönt dirençler, batarya parametrelerinin görüntülenebilmesi için ise LabView yazılımı ve veri işleme kartları içermektedir. Kontrol kartı ve kontaktör sistemi güvenliği sağlamak için, özellikle kaynak ve yükün aynı anda devreye girmesini engelleyecek şekilde tasarlanmıştır.

Deneylerde bataryalara test sinyallerinin uygulanması ve sonucun kaydedilmesi eğim testi olarak adlandırılmıştır. GK'sı %100 olan tamamen dolu bir batarya eğer 1 C'lik akım iledeşarj ediliyorsa 1 sa.'te boşalması beklenir. Deneyde eğim testlerinin arında bataryalar tamamen doldurulup 1 C'lik akımladeşarj tamamen boşalana kadardeşarj edilipdeşarj süresi kaydedilmiş vedeşarj süresi 3600 sn. ile karşılaştırılmıştır. Bu test ise kapasite testi olarak adlandırılmıştır.



Şekil 8: Deney düzeneği.

4.1 Kontrollü deneyler

Kontrollü deneyler için bir hücre 500 çevrim boyunca üreticinin yaşlandırma profili ile yaşlandırılmıştır [29]. Her 100 çevrimde bir hücreler her bir test çevrimine tabii tutulmuş ve eğim değerleri kaydedilmiştir.

Eğim testleri sonucunda elde edilmiş eğim değerleri RÇS modeline uygulanmış ve modelin doğruluğu test edilmiştir. Test hücreleri kontrollü bir şekilde yaşlandırıldığından RÇS modeli ile elde edilen değerler ile hücrelerin çevrim sayılarının ötüşmesi beklenmektedir. Sonuçlar birinci, ikinci ve üçüncü sinyaller için sırası ile Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir. Tablolardan anlaşıldığı görülebileceği üzere ortalama hatalar 37.64, 24.19 ve 17.91 çevrim ve %14.89, %11.9 ve %8.39'dur.

Tablo 1: Kontrollü deneylerde 1. test sinyali için RÇS tahmin sonuçları.

ÇS	Eğim	Hesaplanan ÇS	Hata (ÇS)	Hata (%)
100	-0.0277	57.79	42.21	42.21
200	-0.0389	225.82	25.82	12.91
300	-0.0455	320.03	20.03	6.67
400	-0.0539	435.03	35.03	8.75
500	-0.0645	572.47	72.47	14.49

Tablo 2: Kontrollü deneylerde 2. test sinyali için RÇS tahmin sonuçları.

ÇS	Eğim	Hesaplanan ÇS	Hata (ÇS)	Hata (%)
100	-0.017	54.64	45.36	45.36
200	-0.022	182.05	17.95	8.97
300	-0.026	299.79	0.21	0.07
400	-0.03	431.8	31.8	7.95
500	-0.034	534.32	34.32	6.86

Tablo 3: Kontrollü deneylerde 3. test sinyali için RÇS tahmin sonuçları.

ÇS	Eğim	Hesaplanan ÇS	Hata (ÇS)	Hata (%)
100	-0.019	70.29	29.71	29.71
200	-0.023	188.83	11.17	5.59
300	-0.027	321.53	21.53	7.18
400	-0.029	403.3	3.3	0.83
500	-0.032	480.99	19.01	3.8

Bir sonraki aşamada eğimler kullanılarak elde edilmiş RÇS değerleri modele yerleştirilerek GK bulunmuştur. Hesaplanan GK değerleri kapasite testleri sonucunda elde edilen kapasite değerleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar birinci, ikinci ve üçüncü test sinyalleri için sırasıyla Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir. Tablodan görüleceği üzere, birinci, ikinci ve üçüncü test sinyalleri için sırasıyla maksimum hatalar %3.68, %3.62 ve %3.91 iken ortalama hatalar %1.74, %1.69 ve %1.68'dir.

Tablo 4: Kontrollü deneylerde 1. test sinyali için GK tahmin sonuçları.

ÇS	Hesaplanan ÇS	Tahmin edilen kapasite (%)	Ölçülen kapasite (%)	Hata (%)
100	57.79	98.407	102.167	3.68
200	225.82	97.03	100.667	3.613
300	320.03	97.047	98.167	1.141
400	435.03	96.969	97.694	0.743
500	572.47	96.223	97	0.802

Tablo 5: Kontrollü deneylerde 2. test sinyali için GK tahmin sonuçları.

ÇS	Hesaplanan ÇS	Tahmin edilen kapasite (%)	Ölçülen kapasite (%)	Hata (%)
100	54.64	98.471	102.167	3.617
200	182.05	97.119	100.667	3.524
300	299.79	97.036	98.167	1.152
400	431.8	96.977	97.694	0.735
500	534.32	96.516	97	0.499

Tablo 6: Kontrollü deneylerde 3. test sinyali için GK tahmin sonuçları.

ÇS	Hesaplanan ÇS	Tahmin edilen kapasite (%)	Ölçülen kapasite (%)	Hata (%)
100	70.29	98.172	102.167	3.91
200	188.83	97.097	100.667	3.546
300	321.53	97.048	98.167	1.14
400	403.3	97.028	97.694	0.682
500	480.99	96.813	97	0.192

4.2 Kontrolsüz deneyler

Bu deneylerde beş farklı hücre kullanılmıştır. Bu hücreler elektrikli araç veya robot yarışmaları gibi farklı amaçlarda daha önce kullanılmış olan hücrelerdir. Dolayısıyla bu hücreler üreticinin prosedürleriyle yaşlandırılmamışlardır ve haklarında çok fazla bilgi bulunmamaktadır. Örneğin çevrim sayıları bilinmemektedir. Öncelikle bu hücreler eğim testlerinde tabii tutulmuş ve eğimleri hesaplanmıştır. Ardından bu eğim değerler kullanılarak RÇS değerleri elde edilmiştir. Son olarak model yardımıyla, RÇS'ler kullanılarak hücrelerin GK'leri hesaplanmıştır. Diğer yandan kapasite testleri yardımıyla hesaplanan GK değerleri ile ölçülen kapasite değerleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma Tablo 7, Tablo 8 ve Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 7: Kontrolsüz deneylerde 1. test sinyali için GK tahmin sonuçları.

No	Eğim	RÇS	Hesaplanan Kap. (%)	Ölçülen Kap. (%)	Hata (%)
1	-0.03	91.182	97.844	99.722	1.883
2	-0.043	278.83	97.025	98.583	1.580
3	-0.224	1980.6	72.935	77.666	6.091
4	-0.031	106	97.655	101.33	3.630
5	-0.037	200.86	97.067	100.05	2.986

Üçüncü hücre üçüncü test sinyaline tabii tutulurken çıktığı için o hücre ile o test tamamlanamamıştır. Tablolardan görüldüğü üzere birinci, ikinci ve üçüncü test sinyalleri için sırasıyla maksimum hatalar %6.091, %4.105 ve %4.035, ortalama hatalar ise %3.234, % 2.794 ve % 2.691'dir.

Tablo 8: Kontrolsüz deneylerde 2. test sinyali için GK tahmin sonuçları

No	Eğim	RÇS	Hesaplanan Kap. (%)	Ölçülen Kap. (%)	Hata (%)
1	-0.018	76.834	98.061	99.722	1.665
2	-0.026	299.41	97.036	98.583	1.569
3	-0.104	1891.1	74.478	77.666	4.105
4	-0.019	108.4	97.628	101.33	3.656
5	-0.022	196.26	97.077	100.05	2.976

Tablo 9: Kontrolsüz deneylerde 3. test sinyali için GK tahmin sonuçları.

No	Eğim	RÇS	Hesaplanan Kap. (%)	Ölçülen Kap. (%)	Hata (%)
1	-0.021	111.08	97.598	99.722	2.129
2	-0.025	237.5	97.022	98.583	1.583
3	-	-	-	77.666	-
4	-0.022	154.47	97.244	101.33	4.035
5	-0.024	220.36	97.035	100.05	3.018

5 Sonuçlar

Bir bataryanın performansı yaşlanma ve kullanıma bağlı olarak azalır. Dolayısıyla bataryalar hakkında tutarlı bir sağlık bilgisi EA uygulamaları açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada GK o hücrenin sağlığı hakkında bilgi edinmek için kullanılmıştır. Bu amaçla bir GK tahmin yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemde GK bir RÇS modeli kullanılarak tahmin edilmektedir.

Çalışmada hücrenin kullanıma bağlı olarak yaşlanma etkilerinin benzetimlerini yapabilmek için maksimum hatası %3.642 olan bir batarya modeli genişletilmiştir. Hücrelerin farklı yaşlardaki halleri üç farklı sinyal kullanılarak test edilmiş ve cevapları karşılaştırılmıştır. Yaşlanan bataryalar aynı test sinyallerine farklı tepkiler vermektedirler. Bu farklılıklardan yola çıkarak bir RÇS modeli geliştirilmiştir.

Yöntemin doğrulanması için iki farklı tipte deney gerçekleştirilmiştir. İlk deney grubunda RÇS'si bilinen bataryalar kullanılmıştır. RÇS modeli için hatalar ortalama üç test sinyali için sırasıyla 37.6, 24.2 ve 17.9 çevrim çıkmıştır. RÇS modeli için maksimum hata ortalama 26.56 çevrimdir. GK tahmin yönteminin ortalama hatası %1.7 iken maksimum hatası %4'ün altındadır. İkinci grupta hakkında bilgi olmayan bataryalar kullanılmıştır. Bu deneyde maksimum hata %6'nın altında, ortalama hata ise %4 mertebesindedir.

Sonuç olarak bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılacak bir hücrenin sağlık durumunun saptanabilmesi için basit bir yöntem önerilmiştir. Ayrıca isabetli bir batarya modelinin tasarımı ve doğrulanması da aktarılmıştır. Önerilen GK tahmin yöntemi sürüş başlangıcından önce tamamen doldurulmuş bataryalara uygulanabilir. Dolayısıyla araçtaki bataryanın tamamen doldurulduğu her seferinde bir hazırlık işlemi ile bataryaların sağlığı hakkında tutarlı bilgi edinilebilir.

6 Kaynaklar

- [1] Ajanovic A. "The future of electric vehicles: prospects and impediments". *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 4(6), 521-536, 2015.
- [2] Deng D. "Li-Ion batteries: basics, progress, and challenges". *Energy Science & Engineering*, 3(5), 385-418, 2015.
- [3] Scrosati B, Garche, J. "Lithium batteries: Status, prospects and future". *Journal of Power Sources*, 195(9), 2419-2430, 2010.
- [4] Köhler U, Kümpers J, Ullrich M. "High performance nickel-metal hydride and lithium-ion batteries". *Journal of Power Sources*, 105(1), 139-144, 2002.
- [5] Nazri GA, Pistoia G. *Lithium Batteries, Science and Technology*. New York, USA, Springer Science & Business. 2008.
- [6] Vetter J, Novak P, Wagner MR, Veit C, Möller KC, Besenhard JO, Winter M, Wohlfahrt-Mehrens M, Vogler C, Hammouche A. "Ageing mechanisms in lithium-ion batteries". *Journal of Power Sources*, 147(1-2), 269-281, 2005.
- [7] Hatzell KB, Sharma A, Fathy HK. "A survey of long-term health modeling, estimation, and control of Lithium-ion batteries: Challenges and opportunities". *American Control Conference*, Montreal, Canada, 27-29 June 2012.
- [8] Berecibar M, Gandiaga I, Villareal I, Omar N, van Mierlo J, van den Bossche P. "Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 572-587, 2016
- [9] Fei Z, Guangjun L, Lijin F. "Battery state estimation using Unscented Kalman Filter". *International Conference on Robotics and Automation, ICRA '09*, Kobe, Japan, 12-17 May 2009.
- [10] Lee S, Kim J, Lee J, Cho BH. "State-of-charge and capacity estimation of lithium-ion battery using a new open-circuit voltage versus state-of-charge". *Journal of Power Sources*, 185(2), 1367-1373, 2008.
- [11] Plett, GL. "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 3. State and parameter estimation". *Journal of Power Sources*, 134(2), 277-292, 2004..
- [12] Remmlinger J, Bucholz M, Soczka-Guth T, Dietmayer K. "On-board state-of-health monitoring of lithium-ion batteries using linear parameter-varying models". *Journal of Power Sources*, 239, 689-695, 2013.
- [13] Kim IS. "A technique for estimating the state of health of lithium batteries through a dual-sliding-mode observer". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(4), 1013-1022, 2010.
- [14] Singh P, Reisner D. "Fuzzy logic-based state-of-health determination of lead acid batteries". *24th Annual International Telecommunications Energy Conference*, Montreal, Quebec, Canada, 29 September-2 October 2002
- [15] Zenati A, Desprez P, Razik H. "Estimation of the SOC and the SOH of Li-ion batteries, by combining impedance measurements with the fuzzy logic inference". *36th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, IECON 2010*, Glendale, Arizona, USA, 07-10 November 2010.
- [16] Schweiger HG, Obeidi O, Komesker A, Raschke A, Schiemann M, Zehner C, Gehner M, Keller M, Birke P. "Comparison of several methods for determining the internal resistance of lithium ion cells". *Sensors*, 10(6), 5604-5625, 2010.
- [17] Waag W, Fleischer C, Sauer DU. "Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles". *Journal of Power Sources*, 258, 321-339, 2014
- [18] Wei X, Zhu B, Xu W. "Internal resistance identification in vehicle power lithium-ion battery and application in lifetime evaluation". *International Conference on In Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA'09*, Hunan, China, 11-12 April 2009.
- [19] Andre D, Meiler M, Steiner K, Walz H, Soczka-Guth T, Sauer DU. "Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. II: Modelling". *Journal of Power Sources*, 196(12), 5349-5356, 2011.
- [20] Blanke H, Bohlen O, Buller S, de Doncker RW, Fricke B, Hammouche A, Linzen D, Thele M, Sauer DU. "Impedance measurements on lead-acid batteries for state-of-charge, state-of-health and cranking capability prognosis in electric and hybrid electric vehicles". *Journal of Power Sources*, 144(2), 418-425, 2005.
- [21] Galeotti M, Giammanco C, Cina L, Cordiner S, di Carlo A. "Synthetic methods for the evaluation of the State of Health (SOH) of nickel-metal hydride (NiMH) batteries". *Energy Conversion and Management*, 92, 1-9, 2015.
- [22] Kozłowski JD. "Electrochemical cell prognostics using online impedance measurements and model-based data fusion techniques". *IEEE Aerospace Conference*, Montana, USA, 8-15 March 2003.
- [23] Andre D, Meiler M, Steiner K, Walz H, Soczka-Guth T, Sauer DU. "Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I: Experimental Investigation". *Journal of Power Sources*, 196(12), 5334-5341, 2011.
- [24] Goebel K, Saha B, Saxena A, Celaya JR, Christophersen JP. "Prognostics in Battery Health Management". *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 11(4), 33-40, 2008.
- [25] Onori S, Spagnol P, Marano V, Guezennec Y, Rizzoni G. "A new life estimation method for lithium-ion batteries in plug-in hybrid electric vehicles applications". *International Journal of Power Electronics*, 4(3), 302-319, 2012.
- [26] Feng X, Li J, Ouyang M, Lu L, Li J, He X. "Using probability density function to evaluate the state of health of lithium-ion batteries". *Journal of Power Sources*, 232, 209-218, 2013.
- [27] Ng KS, Moo CS, Chen YP, Hsieh YC, "Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries". *Applied Energy*, 86(9), 1506-1511, 2009.
- [28] Spotnitz R. "Simulation of capacity fade in lithium-ion batteries". *Journal of Power Sources*, 113, 72-80, 2003.
- [29] Kokam, "SLPB (Superior Lithium Polymer Battery) Technical Specification". (12.5.2009).
- [30] Sarikurt T, Ceylan M, Balıkcı A. "A hybrid battery model and state of health estimation method for lithium-ion batteries". *IEEE International Energy Conference, ENERGYCON*, Dubrovnik, Croatia, 13-16 May 2014.

- [31] Sarikurt Y, Ceylan M, Balıkcı A. "An analytical battery state of health estimation method". *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE*, Istanbul, Turkey, 1-4 June 2014.
- [32] Sarikurt T, Ceylan M, Balıkcı A, "A parametric battery state of health estimation method for electric vehicle applications". *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25(4), 2860-2870, 2017.
- [33] Ceylan M, Sarikurt T, Balıkcı A. "Elektrikli araçlarda kullanılan lityum-iyon bataryalar için model geliştirilmesi". 5. *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 23-24 Mayıs 2013.
- [34] Ceylan M, Sarikurt T, Balıkcı A. "A novel lithium-ion-polymer battery model for hybrid/electric vehicles". *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE*, Istanbul, Turkey, 1-4 June 2014.
- [35] Rao R, Vrudhula S, Rakhmatov DN. "Battery modeling for energy aware system design". *Computer*, 36(12), 77-87, 2003.
- [36] Rakhmatov D. "Battery voltage modeling for portable systems". *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems*, 14(2), 1-36, 2009.
- [37] Newman J, Thomas KE, Hafezi H, Wheeler DR. "Modeling of lithium-ion batteries". *Journal of Power Sources*, 119, 838-843, 2003.
- [38] Fang W, Kwon OJ, Wang CY. "Electrochemical-thermal modeling of automotive Li-ion batteries and experimental validation using a three-electrode cell". *International Journal of Energy Research*, 34(2), 107-115, 2010.
- [39] Stetzel KD, Aldrich LL, Trimboli MS, Plett GL. "Electrochemical state and internal variables estimation using a reduced-order physics-based model of a lithium-ion cell and an extended Kalman filter". *Journal of Power Sources*, 278, 490-505, 2015.
- [40] Li Y, Liao C, Wang L, Wang L, Xu D. "Subspace-based modeling and parameter identification of lithium-ion batteries". *International Journal of Energy Research*, 38(8), 1024-1038, 2014.
- [41] Feinauer J, Brereton T, Spetl A, Weber M, Manke I, Schmidt V, "Stochastic 3D modeling of the microstructure of lithium-ion battery anodes via Gaussian random fields on the sphere". *Computer Material Science*, 109, 137-146, 2015.
- [42] Yang XG, Taenaka B, Miller T, Snyder K. "Modeling validation of key life test for hybrid electric vehicle batteries". *International Journal of Energy Research*, 34(2), 171-181, 2010.
- [43] Dubarry M, Vuillaume N, Liaw BY. "Origins and accommodation of cell variations in Li-ion battery pack modeling" *International Journal of Energy Research*, 34(2) 216-231, 2010.
- [44] Xu L, Wang J, Chen Q. "Kalman filtering state of charge estimation for battery management system based on a stochastic fuzzy neural network battery model". *Energy Conversion and Management*, 53(1), 33-39, 2012.
- [45] Jongerden M, Haverkort B. "Which battery model to use?". *IET Software*, 3(6), 445-457, 2009.
- [46] Xun J, Liu R, Jiao K. "Numerical and analytical modeling of lithium ion battery thermal behaviors with different cooling designs". *Journal of Power Sources*, 233, 47-61, 2013.
- [47] Thirugnanam K, Ezhil RJTP, Singh M, Kumar P. "Mathematical modeling of li-ion battery using genetic algorithm approach for V2G applications". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29(2), 332-343, 2014.
- [48] Chen M, Rincon-Mora GA. "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V Performance". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(2), 504-511, 2006.
- [49] Dubarry M, Liaw BY. "Development of a universal modeling tool for rechargeable lithium batteries". *Journal of Power Sources*, 174(2), 856-860, 2007.
- [50] Smith K, Kim GH, Darcy E, Pesaran A. "Thermal/electrical modeling for abuse-tolerant design of lithium ion modules". *International Journal of Energy Research*, 34(2), 204-215, 2010.
- [51] He, H, Zhang X, Xiong R, Xu Y, Guo H. "Online model-based estimation of state-of-charge and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles". *Energy*, 39(1), 310-318, 2012.
- [52] Samadani E, Mastali M, Farhad S, Fraser RA, Fowler M. "Li ion battery performance and degradation in electric vehicles under different usage scenarios". *International Journal of Energy Research*, 31, 135-147, 2015.
- [53] Gomez J, Nelson R, Kalu EE, Weatherspoon MH, Zheng JP, "Equivalent circuit model parameters of a high-power Li-ion battery: Thermal and state of charge effects". *Journal of Power Sources*, 196(10), 4826-4831, 2011.