

KMÜ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/kmujens>

5(1), 33-51, (20XX) © KMUJENS

e-ISSN: 2687-5071

<https://doi.org/10.55213/kmujens.1250621>



Lityum Bataryalarda Şarj Durumu (SoC) ve Sağlık Durumu (SoH) Kestirimi State of Charge (SoC) and State of Health (SoH) Estimation of Lithium Batteries

Gökhan SEVİM¹, Necmi ALTIN^{2,*}

^{1,2} Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi
Ankara, Türkiye

(Alındı: 15 Şubat 2023; Kabul edildi: 17 Mayıs 2023)

Özet. Bataryalar, elektrikli ev aletlerinin, elektrikli araçların ve yenilenebilir enerji kaynaklarının vazgeçilmez birer parçasıdır. Bataryalar kimyasal yapılarına göre çeşitlilik gösterse de genel kullanım amaçları enerjiyi depo etmektir. Kullanıcı konforu sağlamak ve bataryayı daha verimli kullanabilmek için batarya durumlarını tahmin etmek önemlidir. Bu çalışmada lityum bir bataryanın şarj durumu (SoC) ve sağlık durumu (SoH) Kalman filtresi yardımı ile kestirilmeye çalışılmıştır. MATLAB programında oluşturulan bir batarya modelinin SoC ve SoH değerleri kestirilmeye çalışılmıştır. MATLAB/Simulink'de var olan bataryanın SoC değeri önerilen yöntem ile kestirilmiş ve MATLAB/Simulink modelinin verdiği değer ile karşılaştırılmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarında önerilen yöntem ile elde edilen değer ile Simulink modelinin verdiği değer arasındaki hata değerinin maksimum ± 0.03 olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde SoH kestirimi ile elde edilen değer maksimum sapma miktarının ± 0.03 olması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Şarj durumu, Sağlık durumu, Kestirim, Kalman filtre.

Sorumlu Yazar Email: naltin@gazi.edu.tr, orcid.org/0000-0003-3294-9782.

Abstract. Batteries are an indispensable part of electrical appliances, electric vehicles and renewable energy sources. Although batteries vary according to their chemical structures, their general purpose of use is to store energy. It is important to estimate battery states for user comfort and to use the battery more efficiently. In this study, the state of charge (SoC) and state of health (SoH) of a lithium battery were tried to be estimated with the help of Kalman filter. SoC and SoH values of a battery model created in the MATLAB program were tried to be estimated. The SoC value of the existing battery in MATLAB/Simulink was estimated with the proposed method and compared with the value given by the MATLAB/Simulink model. In the simulation studies, it has been determined that the maximum error value between the value obtained by the proposed method and the value given by the Simulink model is ± 0.03 . Similarly, the maximum deviation of the value obtained by the SoH estimation is expected to be ± 0.03 .

Key words: State of charge, State of health, Estimation, Kalman filter.

1. Giriş

Elektrik enerjisini depolamak için kullanılan en yaygın ve en önemli teknik bataryalardır. Bataryalar, elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depo eden ve gerektiğinde tekrar elektrik enerjisi olarak geri verebilen elemanlardır. İlk üretilen bataryalar bu görevi yerine getirse de tekrar şarj edilip kullanılmıyordu [9]. Şarj edilebilen bataryaların üretimi ile beraber nikel-kadmiyum bataryalar ve kurşun-asit bataryalar en çok kullanılan batarya grupları oldular. Fakat lityum-iyon bataryalar, nikel-kadmiyum ve kurşun-asit bataryalar ile kıyaslandığında kütle ve hacimsel enerji yoğunluklarının daha yüksek olması, birim ağırlık ve hacim başına depolanabilen enerji miktarının daha fazla olması gibi avantajları sayesinde onları daha tercih edilebilir hale getirmektedir. Ayrıca lityum-iyon bataryaların öz boşalımı ayda %5' in altındadır [13].

Şarj edilebilen bataryaların kullanımı ile birlikte bataryada ne kadar enerji kaldığını yani bataryanın tekrar ne zaman şarj edilmesi gerektiğini hatta ne zaman değiştirilmesi gerektiğini bilmek önemli bir parametre haline gelmiştir. Özellikle lityum tabanlı

bataryalarda SoC değerini doğrudan ölçmenin herhangi bir yolu yoktur. Bu yüzden batarya modelleri üzerinden elde edilen bazı parametre değerlerine göre bu değerler kestirilir. Bu yüzden yapılan kestirimler gerçek değerleri vermemektedir. Kestirimler, uygulanan algoritmalar ile gerçek duruma en yakın değerleri tahmin etmeyi amaçlar [2].

SoC kestirimi için kullanılan yöntemlerden en basiti olan açık devre gerilimi (OCV) yöntemidir. Kurşun-asit bataryalarda OCV ile SoC değeri arasında lineer bir ilişki bulunmaktadır. Bu yöntemde batarya bağlantıları devreden ayrılır ve bir iki saat bataryanın dengeye gelmesi beklenir daha sonra yapılan ölçüm ile SoC değeri kestirilir. Kurşun-asit bataryalarda işleyen bu sistem lityum-iyon bataryalarda çok sağlıklı değildir. Çünkü lityum-iyon bataryalarda OCV ile SoC ilişkisi lineer değildir. Aynı zamanda SoC ölçümü için bataryanın devreden ayrılması ve uzun süre beklenmesi işleyen bir sistemde zaman kaybıdır [11].

SoC kestirimi için kullanılan bir diğer yöntem ise terminal gerilimi yöntemidir. Bu yöntem ile batarya devreden ayrılmadan direkt olarak terminallerinden ölçülen gerilim ile kestirim yapılabilmektedir. Bu yöntem basit uygulamalarda çok sık kullanılsa da lityum-iyon bataryalar için yeterli değildir. Lityum-iyon bataryalarda düşük SoC değerlerinde terminal gerilimi aniden düşer. Bu sebeple düşük SoC değerlerinde kestirim hatası çok yüksektir [14].

En çok kullanılan kestirim yöntemlerinden biri olan Coulomb sayma yöntemidir. Bu yöntemde ise bataryaya giren ve çıkan akımların hesaplanması ile SoC değeri kestirilir. Bu yöntem çok kullanılsa da bataryanın öz boşalımı, sıcaklık, raf ömrü gibi SoC değerine etki edebilecek faktörlerin eklenmesi olası değildir [12].

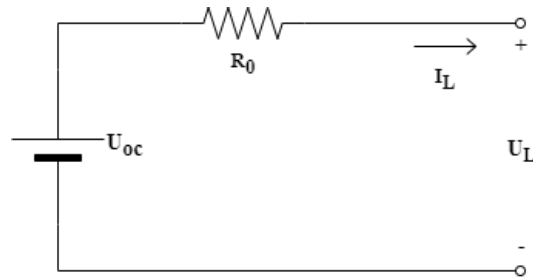
Yapay zekanın gelişmesiyle SoC kestirimi için de kendi kendini yenileyebilen algoritmalar uygulanmaya başlandı. Yapay sinir ağları, bulanık mantık, destek vektör makineleri ve kalman filtre bunlardan bazılarıdır. Uyarlanabilen sistemler olarak adlandırılan bu sistemlerde sıcaklık, öz boşalım, raf ömrü ve döngü sayısı gibi faktörlerin SoC değerine etkisi ayrı ayrı değerlendirilerek algoritmalara öğretilir. Çalışma esnasında ise bu değerler sentezlenerek en yakın SoC değeri kestirilir. Bu yöntemlerin en büyük dezavantajı ise batarya üzerinde yapılan uzun laboratuvar çalışmalarıdır.

Bu çalışmada seçilen batarya elektriksel eşdeğer modeli ile birlikte SoC kestirimi için bir kalman filtre tasarlanmış ve MATLAB programında oluşturulan bir batarya modelinin verileri kıyaslanarak değerlendirilmiştir. İkinci bir kalman filtresi ile SoC kestiriminden elde edilen sonuçlar kıyaslanarak doğruluğu teyit edilmiş aynı zamanda SoH kestirimi yapılmıştır.

1.1. Bataryanın elektriksel eşdeğer devre modeli

Bataryaların matematiksel işlemlerini yapabilmek için dinamik karakteristiklerine ve çalışma prensiplerine göre direnç, kondansatör ve gerilim kaynaklarından oluşan bir elektriksel eş değer devre modeli geliştirilir. Bu eş değer devreler bataryaların SoC ve SoH gibi parametrelerin kestirilmesinde kullanılmaktadır. Batarya üzerinde yapılan şarj-deşarj testleri ile elektriksel devre parametreleri oluşturulur. Batarya sıcaklığına, şarj durumuna, akıma, kapasiteye ve batarya ömrüne göre bu parametreler değişiklik gösterse de hesaplama kolaylığı bakımından bazı değerler sabit kabul edilir [17].

Bataryaların en temel elektriksel devre modeli Şekil 1’de gösterilen iç direnç modeli olarak adlandırılır. Bataryanın açık devre gerilimi U_{oc} olarak tanımlanmış iken iç direnci R_0 , batarya akımı I_L ve batarya terminal gerilimi ise U_L olarak tanımlanmıştır.



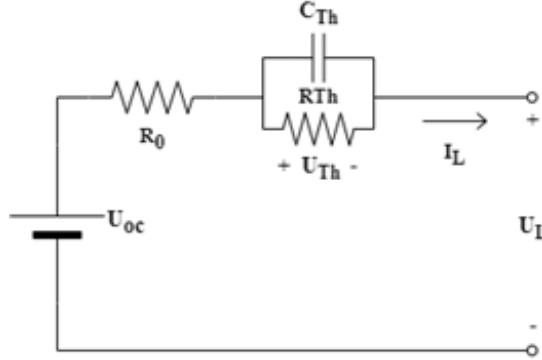
Şekil 1. İç direnç eşdeğer devre modeli

Bu modelin matematiksel denklemi ise;

$$U_L = U_{oc} - I_L R_0 \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir. Bu yöntem, bir bataryanın modellenmesi için yeterlidir. Fakat bu model kullanılarak elde edilen değerler gerçek değerlerden çok uzaktadır. Bunun sebebi ise bataryanın kimyasal bir yapısı olması ve dinamik olarak sürekli değerlerinin

değişmesidir. Bu değişim dikkate alınmış ve Thevenin eşdeğer devre modeli ortaya çıkmıştır.

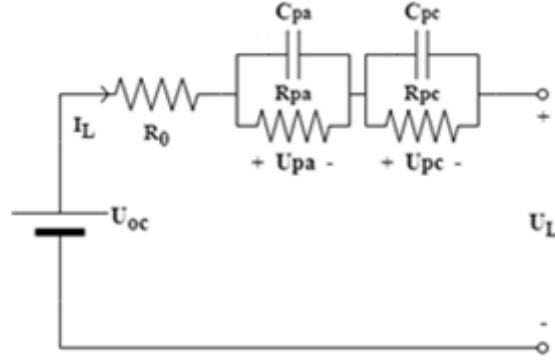


Şekil 2. Thevenin eşdeğer devre modeli

Thevenin modelinde U_{oc} bataryanın açık devre gerilim değeri, R_0 bataryanın iç direnci, R_{Th} polarizasyon direnci, C_{Th} şarj-deşarj sırasındaki geçici tepki, U_{Th} kapasitör direnç çifti üzerine düşen gerilimi, I_L batarya akımını ve U_L ise batarya terminal gerilimini ifade eder. Şekil 2'deki eşdeğer devre kullanılarak aşağıdaki matematiksel denklemler yazılabilir;

$$\begin{cases} \dot{U}_{Th} = -\frac{U_{Th}}{R_{Th}C_{Th}} + \frac{I_L}{C_{Th}} \\ U_L = U_{oc} - U_{Th} - I_L R_0 \end{cases} \quad (2)$$

Lityum-ion bataryaların test sonuçlarına dayanarak bataryalarda polarizasyon etkileri olduğu söylenebilir. Bu polarizasyon etkisi Thevenin modeli ile giderilebilir fakat şarj veyadeşarj durumlarının sonunda elektrokimyasal polarizasyon ve konsantrasyon polarizasyon arasındaki farkı veremez. Bu sebeple bir modele daha ihtiyaç duyulmuştur. Bataryanın hem elektrokimyasal polarizasyonunu hem de konsantrasyon polarizasyonunu ele aldığı için modele çift polarizasyon (DP) adı verilmiştir. Böylelikle bataryanın matematiksel olarak gerçeğe en yakın modeli hedeflenmiştir. Modelde bataryanın açık devre gerilimini U_{oc} , batarya akımını I_L ve bataryanın iç direncini temsil eden R_0 değeridir. Elektrokimyasal polarizasyon karakteristiğinin direnci R_{pa} ve bataryanın anlık güç durumunun tepkisi ise C_{pa} ile gösterilir. Konsantrasyon polarizasyon karakteristiğinin direnci R_{pc} ve bataryanın anlık güç durumunun tepkisi ise C_{pc} ile gösterilir. Elektrokimyasal polarizasyon gerilimi U_{pa} ile gösterilirken konsantrasyon polarizasyon gerilimi U_{pc} ile gösterilmiştir. [8].



Şekil 3. DP eşdeğer devre modeli

Modelin matematiksel denklemleri ise;

$$\begin{cases} \dot{U}_{pa} = -\frac{U_{pa}}{R_{pa}C_{pa}} + \frac{I_L}{C_{pa}} \\ \dot{U}_{pc} = -\frac{U_{pc}}{R_{pc}C_{pc}} + \frac{I_L}{C_{pc}} \\ U_L = U_{oc} - U_{pa} - U_{pc} - I_L R_0 \end{cases} \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir.

Daha dinamik modellerin olmasına rağmen Thevenin ve DP eşdeğer devreleri SoC kestiriminde en sık kullanılan ve doğruluğu kanıtlanmış modellerdir [6].

Bu çalışmada batarya durumlarının kestirimi için DP elektriksel eşdeğer devre modeli tercih edilmiştir.

1.2. Bataryalarda sarj durumu (SoC) kestirimi

Şarj durumu, bataryalar için en önemli parametrelerden biridir. SoC birçok farklı şekilde tanımlansa da genel olarak anlık kapasite değerinin ($Q_{(t)}$) nominal kapasite değerine ($Q_{(n)}$) oranı olarak tanımlanır. Nominal kapasite değeri üretici tarafından verilen ve bataryada depolanabilen maksimum şarj miktarını temsil etmektedir [3]. Şarj durumu şöyle tanımlanır:

$$SoC_{(t)} = \frac{Q_{(t)}}{Q_{(n)}} \quad (4)$$

Bataryalarda şarj durumu birçok yöntem ile tespit edilebilir. Bunlar üç farklı başlık altında incelenebilir.

i) Doğrudan ölçme

Bu yöntemde batarya bir süre nominal akım değerinde şarj veyadeşarj edilir. Daha sonra şarj devresinden ve yükten ayrılır. Bir süre beklenecek batarya uçlarındaki gerilim ölçülür [11]. Bu gerilime açık devre gerilimi denir. Eşitlik 5’de şarj durumu SoC , açık devre gerilimi V_{OC} , örnekleme zamanı ise t ile gösterilmiştir.

$$SoC = \alpha_4 V_{oc}^2 + \alpha_3 t^2 + \alpha_2 V_{oc} + \alpha_1 t + \alpha_0 \quad (5)$$

Bu yöntem laboratuvar testleri esnasında tercih edilse de uygulamada kendine yer bulamamaktadır. Bunun sebebi bataryayı şarj devresinden ve yükten ayırarak bir süre bekleme gereksinimidir.

ii) Coulomb sayma yöntemi

Bu yöntemde bataryanın enerjisini belirlemek için bataryaya giren ve çıkan akımlar ölçülür. Bu akımların toplanmasıyla SoC değeri tahmin edilebilir. Bu yöntem şöyle tanımlanır:

$$SoC_{(t)} = SoC_{(t-1)} - \frac{1}{C_n} \int_0^t \eta I_b dt \quad (6)$$

Burada t anındaki bataryanın şarj durumu $SoC_{(t)}$ ile tanımlanmıştır. $SoC_{(t-1)}$ ise başlangıçtaki şarj durumu iken C_n yeni bir bataryanın maksimum depolama alanı, I_b ise bataryaya giren veya çıkan akım değeri ve η ise coulomb katsayısı olarak belirlenmiştir [18].

Bu çalışmada coulomb katsayısı 98 olarak alınmıştır.

iii) Uyarlanabilir sistemler

Son zamanlarda yapay zeka algoritmalarının gelişmesiyle, SoC kestirimi için çeşitli uyarlanabilir sistemler tasarlanmıştır. Bunlardan bazıları destek vektör makinesi, bulanık mantık, yapay sinir ağları ve Kalman filtresidir. Uyarlanabilir sistemler, bataryaların birçok kimyasal faktörden dolayı doğrusal olmayan SoC değerlerini kestirebilmek için değişen şartlara göre kendi kendilerini tekrar tasarlayabilirler. Dolayısıyla bu yöntemler SoC kestirimi için iyi bir çözüm sunar [5].

Destek vektör makinesi yönteminde batarya üzerinde bazı deneyler yapılarak t anındaki SoC değeri ile akım ve gerilim değerleri kıyaslanır. Bu kıyaslama sonucu bazı parametreler elde edilir. Bu parametreler daha sonra bataryanın SoC değerini kestirmek

için kullanılır [7]. Bulanık mantık yönteminde de destek vektör makinesi yönteminde olduğu gibi birçok ön işleme parametresi toplanması gereklidir. Minimum ve maksimum gerilim değerlerine göre bazı kurallar belirlenerek SoC kestirimi yapılır [16]. Yapay sinir ağları yönteminde de diğer iki yöntemde olduğu gibi akım, gerilim, sıcaklık ve SoC değerleri test ortamında ölçülür ve aralarındaki ilişkiler belirlenir. Daha sonra bu parametreler kullanılarak bataryanın SoC değeri kestirilir [10].

Kalman filtresi, sistemin direkt olarak ölçülemeyen SoC gibi durumları kestirmek için sistemin matematiksel modeli üzerinden elde edilen bir önceki durum, giriş ve çıkış bilgileri gibi parametreleri kullanılır. Kalman filtresi tahmin ve güncelleme olarak iki adımda incelenebilir. Tahmin adımında çıktı sonuçları ve hatanın ortak değişim miktarını veren hata kovaryansı kestirilir. Güncelleme adımında ise kalman kazancı denen bir sabit sürekli optimum kat sayısını bulmak ve kestirimi doğru yapabilmek için güncellenir. Bunun yanında sonuçların ölçülen değerler ile kıyaslanarak yeni çıktıları ve hata kovaryansı kalman kazancına göre tekrar güncellenir. Kalman filtrenin en temel iki denklemi Eşitlik 7 ve Eşitlik 8’de verilmiştir.

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1} \quad (7)$$

$$y_k = Cx_k + Du_k + v_k \quad (8)$$

Denklemlerdeki x_k değeri, bir önceki durum değerinin (x_{k-1}), u_k kontrol sinyali ile w_{k-1} işlem gürültüsü eklenerek bulunur. y_k değeri ise ölçülebilen fakat doğruluğundan emin olunmayan bir değer olup x_k değeri ile v_k ölçüm gürültüsünün lineer bir kombinasyonu olarak denkleme eklenmektedir. Genellikle gürültü değerleri sabit bir değer alınır veya yok sayılırlar. Kalman filtresi aşağıdaki adımları takip eder.

Önceki durum tahmini:

$$x_k^- = Ax_{k-1}^- + Bu_k \quad (9)$$

Hata kovaryansının tahmini

$$P_k^- = AP_{k-1}^- + A^T + Q \quad (10)$$

Kalman kazancının hesaplanması

$$K_k = P_k^- C^T (CP_k^- C^T + R)^{-1} \quad (11)$$

Ölçülen değer ile kestirimin güncellenmesi

$$x_k = x_k^- + K_k(y_k - Cx_k^- - Du_k) \quad (12)$$

Hata kovaryansının güncellenmesi

$$P_k = (I - K_k C) P_k^- \quad (13)$$

Denklemlerdeki Q ve R değerleri gürültü değerleri olup bazı yöntemlerle elde edilirler [4].

Bu çalışmada kalman filtresinde kullanılan hata matrislerinden Q (hesaplama hatası) 0, R ölçüm hatası ise 0.00001 alınmıştır.

1.3. Bataryalarda sağlık durumu (SoH) kestirimi

Bataryalar sürekli kullanıldıkları için şarj edilip boşalma sayısı arttıkça nominal kapasitelerinde kademeleri olarak düşüş yaşanmaktadır. Kapasite değeri artık bataryanın kullanılmayacak seviyesine kadar düştüğünde batarya değiştirilmelidir. Aynı zamanda batarya iç direnç de kullanıma bağlı olarak kademe kademe artar. Bu değişkenler SoH değerine karşılık gelir [21]. SoH bataryanın ne kadar ömrünün kaldığını bildiren bir ölçüdür. SoC tahmini ile kıyaslandığında SoH kestirimi daha zordur. Çünkü SoH hesaplamasında depolama sıcaklığı, şarj-deşarj sıklığı, depolama süresi, aşırı şarj-deşarj gibi birçok etken vardır [20].

Genel olarak SoH kestirimi bataryanın iç direncinin hesaplanmasıyla yapılır. Batarya kullanıldıkça iç direnci artacaktır. Böylelikle yeni bir bataryanın iç direnci ile kıyaslandığında SoH değeri kestirilebilir. SoH değerinin batarya iç direnci ile ilişkisi Eşitlik 14' de verilmiştir.

$$SoH = \frac{R_{EOL} - R_{now}}{R_{EOL} - R_{new}} \times 100 \quad (14)$$

Yukarıdaki formülde R_{now} bataryanın anlık iç direnci, R_{new} bataryanın fabrika çıkışındaki iç direnci ve R_{EOL} bataryanın ömrünün tükendiğinde ölçülecek iç direnci temsil etmektedir. Yapılan deneyler ile R_{EOL} ile R_{new} arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi bulunmuştur [19].

$$R_{EOL} = 1,6 \times R_{new} \quad (15)$$

2. Kalman Filtresinin Batarya Modeline Uygulanması

Bataryanın DP modeli baz alınarak Eşitlik 3'ten aşağıdaki formüller türetilmiştir.

$$V_b = V_{oc}(SoC(t)) + I_b(t)R_0 + U_1(t) + U_2(t) \quad (16)$$

Açık devre gerilimi ise SoC'nin bir polinom fonksiyonu olup şöyle hesaplanmıştır.

$$V_{oc}(SoC(t)) = b_7SoC^7 + b_6SoC^6 + \dots + b_0 \quad (17)$$

SoC değeri ise Coulomb sayma yönteminin eşitliğinden türetilerek aşağıdaki formül elde edilmiştir. Q değeri Ah cinsinden yazılmalıdır.

$$SoC_{(t+1)} = SoC(t) - \frac{\Delta T}{Q} \eta I_b(t) \quad (18)$$

$U_1(t)$ ve $U_2(t)$ gerilimleri ise şu şekilde hesaplanır.

$$U_{1,(t+1)} = U_1(t)e^{-\frac{\Delta T}{R_1C_1}} + R_1(1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_1C_1}})I_b(t) \quad (19)$$

$$U_{2,(t+1)} = U_2(t)e^{-\frac{\Delta T}{R_2C_2}} + R_2(1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_2C_2}})I_b(t) \quad (20)$$

Durum denklemleri Eşitlik 9'daki formüle yerleştirilir.

$$\begin{bmatrix} SoC_{(t+1)} \\ U_{1,(t+1)} \\ U_{2,(t+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta T}{R_1C_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta T}{R_2C_2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SoC(t) \\ U_{1,(t)} \\ U_{2,(t)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\Delta T}{Q} \eta \\ R_1(1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_1C_1}}) \\ R_2(1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_2C_2}}) \end{bmatrix} I_b(t) \quad (21)$$

Böylelikle kalman filtresinin matrislerini elde etmiş olunur [15].

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta T}{R_1C_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta T}{R_2C_2}} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta T}{Q} \eta \\ R_1(1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_1C_1}}) \\ R_2(1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_2C_2}}) \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} V_{oc} \\ SoC \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}^T; D = [-R_0]. \quad (22)$$

SoH kestirimi için ayrı bir kalman filtresi daha kurulmuştur. Eşitlik 16 yeniden düzenlenerek aşağıdaki forma dönüştürülür.

$$V_b - V_{oc}(SoC(t)) = I_b(t)R_0 + U_1(t) + U_2(t) \quad (23)$$

Durum denklemleri de R_0 hesaplamasına göre tekrar düzenlenir ve aşağıdaki form oluşturulur.

$$\begin{bmatrix} R_{0,(t+1)} \\ U_{1,(t+1)} \\ U_{2,(t+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta T}{R_1C_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta T}{R_2C_2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{0,(t)} \\ U_{1,(t)} \\ U_{2,(t)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ R_1(1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_1C_1}}) \\ R_2(1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_2C_2}}) \end{bmatrix} I_b(t) \quad (24)$$

İkinci kalman filtresinin matrisleri de elde edilmiş olunur [1].

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta T}{R_1 C_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta T}{R_2 C_2}} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ R_1 \left(1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_1 C_1}}\right) \\ R_2 \left(1 - e^{-\frac{\Delta T}{R_2 C_2}}\right) \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} I_b(t) \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}^T; D = 0 \quad (25)$$

SoH kestirimi için kullanılan R0 değeri aynı zamanda SoC kestiriminde kullanılan bir girdi olduğundan sürekli güncellenerek SoC kestiriminin gerçeğe daha yakın olması amaçlanmıştır.

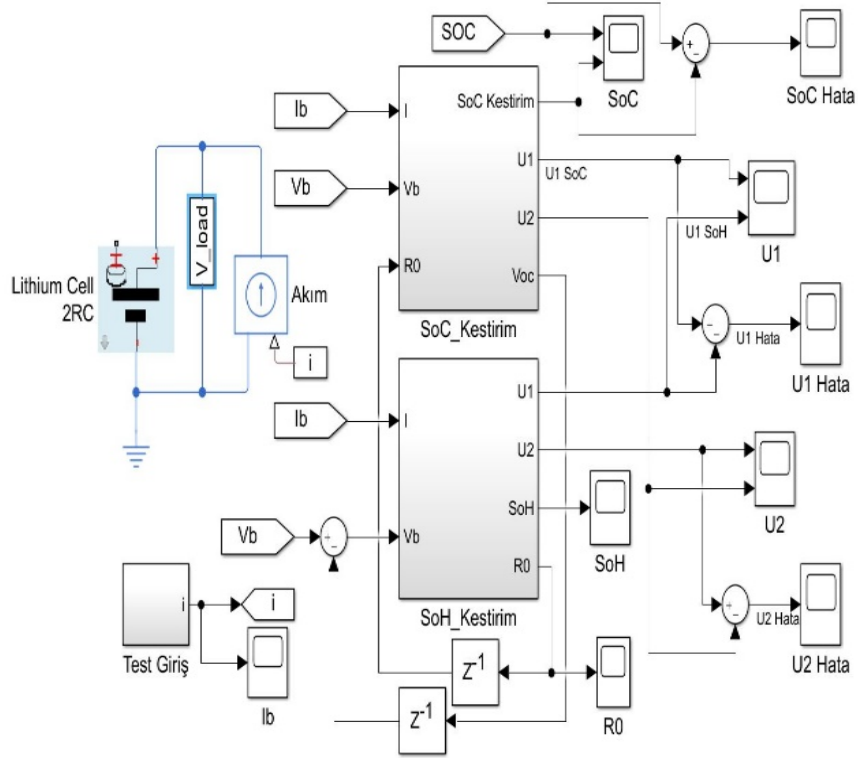
Tablo 1. Voc değerinin polinom katsayı değerleri

Katsayı	Değeri
b7	63.4921
b6	-231.969
b5	346.393
b4	-270.6861
b3	118.0540
b2	-28.7618
b1	3.9317
b0	3.0300

Bataryanın açık devre gerilim değerini hesaplamak için kullanılan polinom katsayıları regresyon analizi yöntemi ile bulunmuştur ve Tablo 1’de verilmiştir.

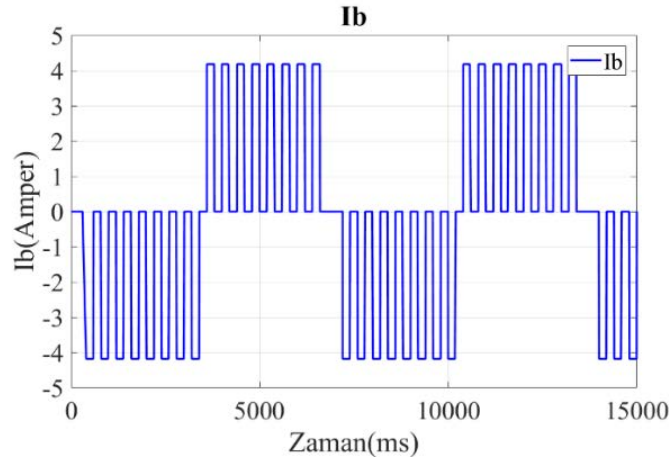
3. Algoritmanın MATLAB programında uygulanması

MATLAB programında modellenmiş olan “Lithium Cell 2RC” modeli bu çalışmada kullanılmıştır. Bu modelin 20°C’deki R1=0.03, R2=0.0061, C1=5088 ve C2=3876 değerleri hesaplamalarda kullanılmıştır.



Şekil 4. Matlab simulink modeli

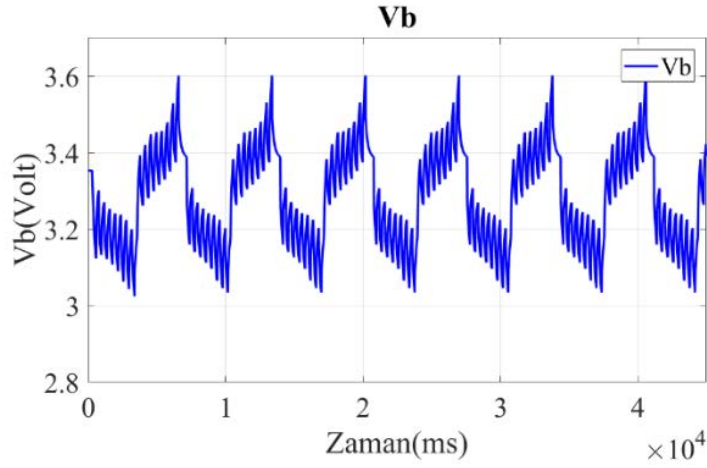
Şekil 4’de tasarlanan algoritmanın MATLAB Simulink modeli verilmiştir.



Şekil 5. Bataryaya uygulanan akım

Başlangıç SoC değeri %80 olan bir bataryaya periyodik halde uygulanan akım 5’te gösterilmektedir.

Şekil

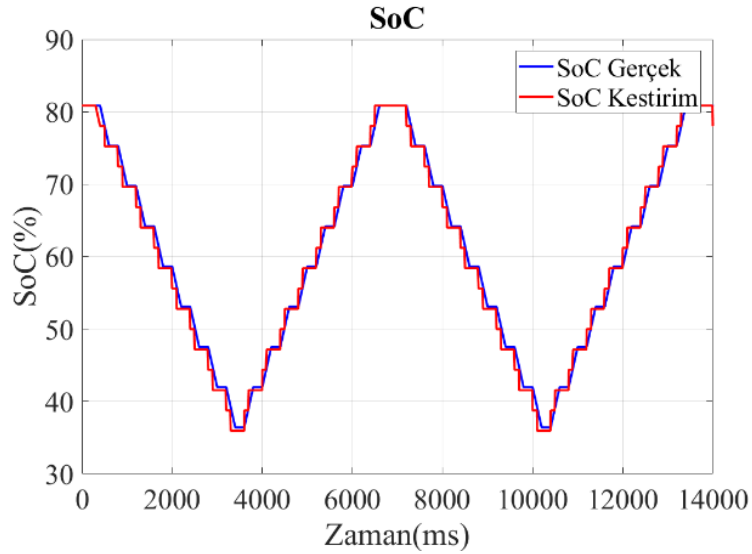


Şekil 6. Batarya terminal gerilimi

Şekil 6'de I_b akımı uygulanan bataryanın terminal uçlarından ölçülen V_b gerilimi gösterilmektedir.

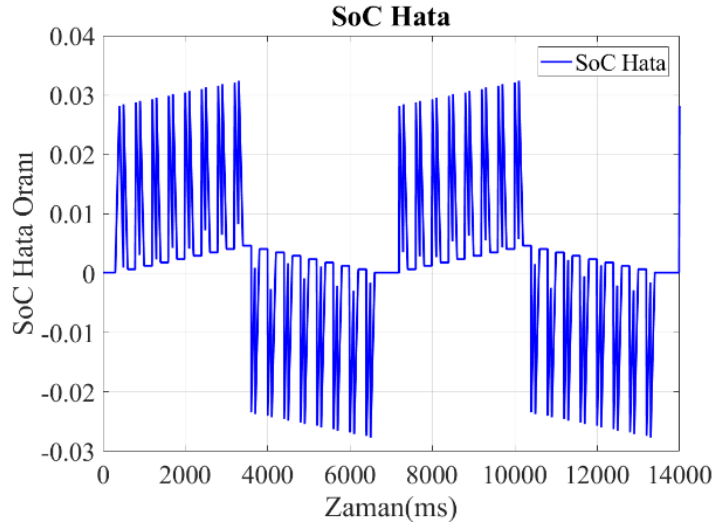
4. Bulgular

Algoritmanın çalışabilmesi için tüm veriler elde edildikten sonra ilk Kalman filtresi çalıştırılır ve sonuçları SoC , U_1 ve U_2 elde edilir.



Şekil 7. SoC değerleri

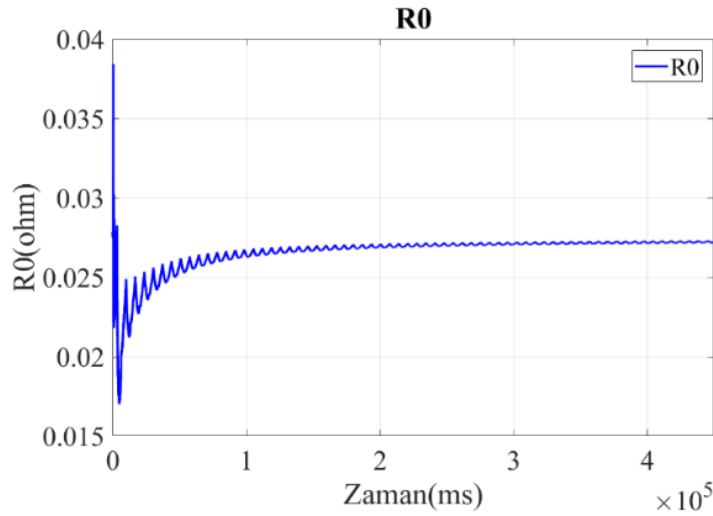
Şekil 7'da MATLAB programında modellenmiş olan bataryadan elde edilen SoC değeri gerçek değer olarak kabul edilmiştir. Kalman filtresi sonucu elde edilen SoC değeri ise kestirilen değer olarak belirtilmiştir.



Şekil 8. SoC hata oranı

İki değer arasındaki sapma Şekil 8’de hata oranı olarak gösterilmiştir.

İkinci kalman filtresi devreye alınır ve SoH değerinin kestirilmesi için gerekli olan R_0 değeri, U_1 ve U_2 değerleri çıktı olarak alınır.

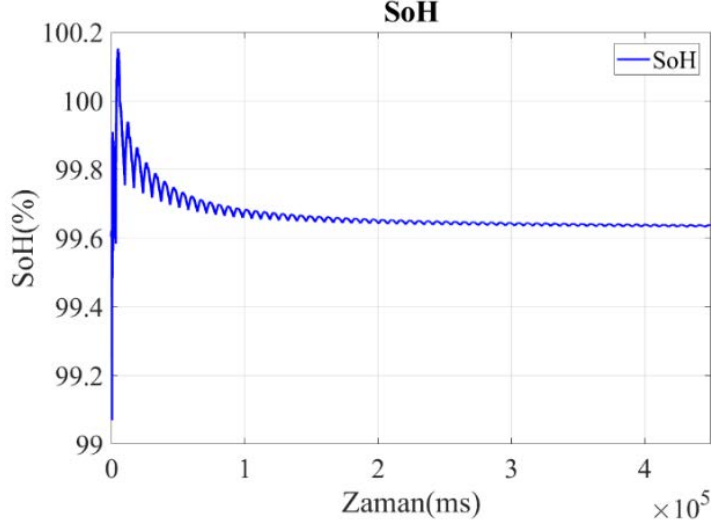


Şekil 9. Kestirilen R_0 değeri

Şekil 9’de ikinci kalman filtresinin sonucu olan R_0 değeri gösterilmektedir. Bu değer ilk filtrede ve Eşitlik 16’da kullanılan R_0 değerini sürekli güncellemektedir.

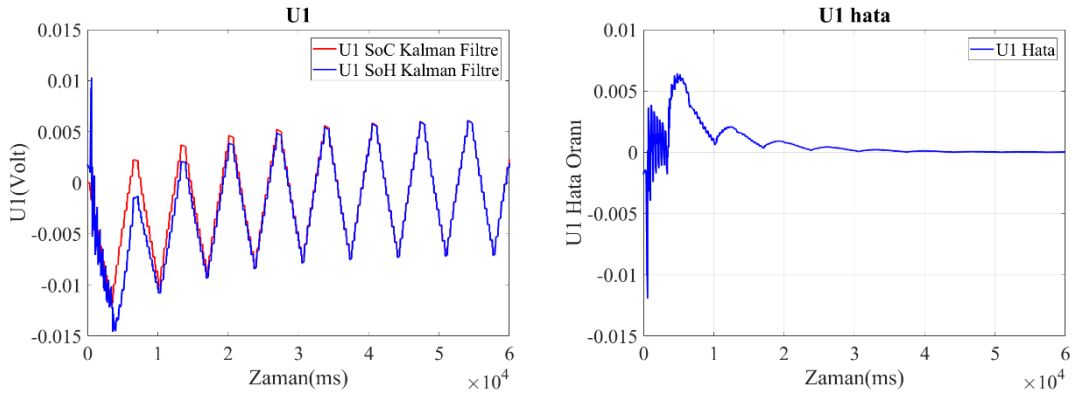
İlk kalman filtresinin çıktıları SoC , U_1 ve U_2 değerleridir. İkinci Kalman filtresinin çıktıları ise R_0 , U_1 ve U_2 değerleridir. Her iki kalman filtresinin çıktıları olan U_1 ve U_2 değerleri birbiriyle kıyaslanarak iki kalman filtresinin de birbirine paralel çalıştığı

görülür. SoC değeri model bataryadan elde edilen ve doğru kabul edilen sonuç ile kıyaslanarak elde edilen hatanın dolaylı olarak SoH değerinde de aynı olacağı çıkarımı yapılmıştır.



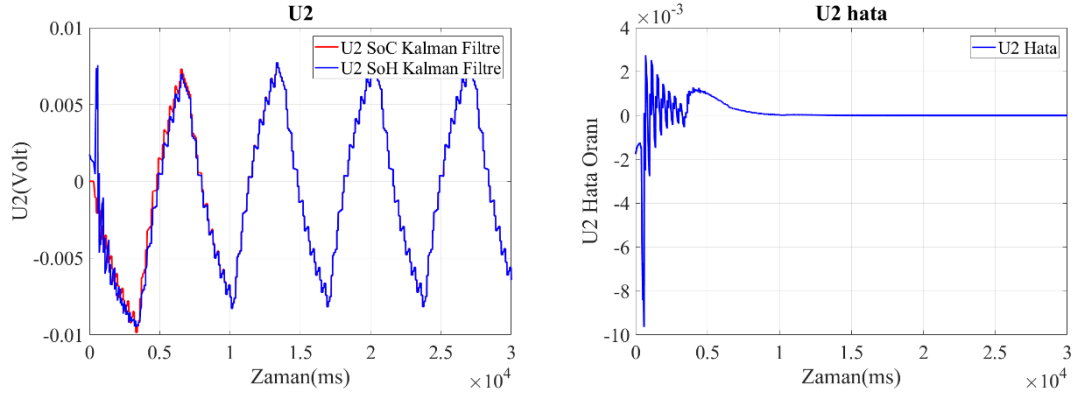
Şekil 10. Kestirilen SoH değeri

Şekil 11, U_I gerilimi ve hata oranı verilmiştir.



Şekil 11. U_I gerilimi ve hata oranı

Şekil 11'de iki kalman filtresinden de elde edilen U_I değeri ve hata oranı verilmiştir.



Şekil 12. U2 gerilimi ve hata oranı

Kalman filtrelerinin bir diğer çıkışı olan U_2 değeri ve hata oranı ise Şekil 12’de gösterilmiştir. Kalman katsayısı değeri zamanla oturduğunda iki değerinde aynı olduğu görülmektedir.

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada bataryaların SoC ve SoH değerlerinin kestirimi için en yaygın yöntem olan Kalman filtresi kullanılmıştır. Kalman filtresinin oluşturulabilmesi için gerekli olan durum denklemleri ve bataryaların matematiksel modelleri anlatılmıştır.

SoC ve SoH değişiminde en önemli faktörlerden biri olan sıcaklık değeri 20°C olarak sabit alınmıştır. SoH değerini belirlemede etkili olan depolama süresi, depolama sıcaklığı, şarj-deşarj sıklığı gibi değerler ihmal edilmiştir. Bu değerlerde algoritmaya eklenerek gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilir.

MATLAB programında modellenmiş bir bataryanın SoC değeri gerçek değeri olduğu varsayılmıştır. Oluşturulan algoritmanın sonuçları bu değer ile karşılaştırılmış ve hata değeri maksimum ± 0.03 olarak görülmüştür.

Elde edilen iki filtre sonuçlarından U_1 ve U_2 değerleri birbiri ile kıyaslanmış ve bir süre sonra iki değerinde aynı olduğu gözlemlenmiştir. Dolaylı olarak SoH kestiriminin gerçek değerinden maksimum hata değerinin ± 0.03 olduğu çıkarımı yapılmıştır.

Bu çalışma SoC ve SoH değerleri batarya üzerinde deneyler yapmadan, ölçüm için süre kaybı yaşamadan ve şarj cihazı veya yük devreden ayrılmadan küçük bir hata payı ile kestirilmiştir.

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri ve Koordinasyon Birimi tarafından FYL-2022-7597 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Andre D., Appel C., Soczka-Guth T., Sauer DU., Advanced mathematical methods of SOC and SOH estimation for lithium-ion batteries, *Journal of power sources*, 224, 20-27, (2013).
- [2] Andrea D., *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*, Artech house, (2010).
- [3] Chang WY., The state of charge estimating methods for battery: A review, *International Scholarly Research Notices*, 2013, (2013).
- [4] Çayiroğlu İ., Kalman filtresi ve programlama, *Fen ve Teknoloji Bilgi Paylaşımı*, 1, (2012).
- [5] Fu B., Wang W., Li Y., Peng Q., An improved neural network model for battery smarter state-of-charge estimation of energy-transportation system, *Green Energy and Intelligent Transportation*, 100067, (2023).
- [6] Fu Y., Fu H., A Self-calibration SOC Estimation Method for Lithium-ion Battery, *IEEE Access*, (2023).
- [7] Hansen, T., Wang CJ., Support vector based battery state of charge estimator, *Journal of Power Sources*, 141(2), 351-358, (2005).
- [8] He H., Xiong R., Fan, J., Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. *energies*, 4(4), 582-598, (2011).
- [9] Jafari H., Rahimpour MR., Pb acid batteries. *Rechargeable Batteries: History, Progress and Applications*, 17-39, (2020).
- [10] Linda O., William EJ., Huff M., Manic M., Gupta V., Nance J., Govar J., Intelligent neural network implementation for SOCI development of Li/CFx batteries, In 2009 2nd International Symposium on Resilient Control Systems (pp. 57-62), IEEE, (2009).

- [11] Ng KS., Moo CS., Chen YP., Hsieh YC., State-of-charge estimation for lead-acid batteries based on dynamic open-circuit voltage, In 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference (pp. 972-976), IEEE, (2008).
- [12] 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).
- [13] Özcan ÖF., Karadağ T., Altuğ M., Özgüven Ö., Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması, *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 8(2), 276-298, (2021).
- [14] Sato S., Kawamura A., A new estimation method of state of charge using terminal voltage and internal resistance for lead acid battery, In *Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka 2002 (Cat. No. 02TH8579) (Vol. 2, pp. 565-570)*, IEEE, (2002).
- [15] Shrivastava P., Soon TK., Idris MYIB., Mekhilef S., Overview of model-based online state-of-charge estimation using Kalman filter family for lithium-ion batteries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109233, (2019).
- [16] Singh P., Vinjamuri R., Wang X., Reisner D., Design and implementation of a fuzzy logic-based state-of-charge meter for Li-ion batteries used in portable defibrillators. *Journal of power sources*, 162(2), 829-836, (2006).
- [17] Tezde Eİ., Okumuş Hİ., Batarya modelleri ve şarj durumu (SoC) belirleme, *EMO Bilimsel Dergi*, 8(1), 21-25, (2018).
- [18] Topan PA., Ramadan MN., Fathoni G., Cahyadi AI., Wahyunggoro O., State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) estimation on lithium polymer battery via Kalman filter, In *2016 2nd International Conference on Science and Technology-Computer (ICST) (pp. 93-96)*, IEEE, (2016).
- [19] Wang N., Xia X., Zeng X., State of charge and state of health estimation strategies for lithium-ion batteries, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, ctad032, (2023).

- [20] Watrin N., Blunier B., Miraoui A., Review of adaptive systems for lithium batteries state-of-charge and state-of-health estimation, In 2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC) (pp. 1-6), IEEE, (2012).
- [21] Xing L., Luo W., Liu X., Xiang B., SOC Estimation for Lithium Batteries Based on Fractional Order Model and Robust Unscented Kalman Filter, (2023).