

Batarya Şarj Durumu Kestirim Yöntemleri Üzerine İnceleme

Review on the SOC Estimation Methods

Mustafa Mert Serinbaş^{1,2}, Mehmet Onur Gülbahçe¹,

¹Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi
ogulbahce@itu.edu.tr

²TÜBİTAK, Bilişim ve Bilgi Güvenliği İleri Teknolojiler Araştırma Merkezi
mustafa.serinbas@tubitak.gov.tr

Özet

Elektrikli araçların günümüzde yaygınlaşmasından dolayı yüksek enerji ve yüksek güç yoğunluklu batarya paketlerinin kullanılması kaçınılmaz olmuştur. Fakat batarya paketlerinin kullanımında güvenilirlik ve doğru kullanım dikkat edilmesi gereken unsurlardandır. Aksi takdirde bataryaların çevrim ömrü, başarımı ve kapasitelerinde kayıplar yaşanabilir veya ısınmaya bağlı olarak güvenlik problemleri oluşabilir. Batarya paketlerinin doğru ve güvenilir bir şekilde çalışması ise batarya yönetim sistemleri ile sağlanır. Batarya yönetim sistemleri ile her bir batarya hücrelerinin gerilim, akım değeri ve batarya paketlerinin sıcaklığı gerçek zamanlı ölçülerek doğabilecek muhtemel hataların ortadan kaldırılması veya minimize edilmesi sağlanır. Ayrıca batarya yönetim sistemi ile bataryalar için oldukça önemli olan batarya şarj durumu kestirilerek bataryaların verebileceği enerji hesaplanabilir. Batarya şarj durumu kestirimini önemli bir parametre haline getiren durum ise bu parametrenin doğrudan ölçülememesi ile birlikte batarya gerilimi-akımı ve sıcaklığı ile doğrusal bir ilişkisi olmamasıdır. Bundan dolayı elde edilen veriler ile yüksek doğrulukla bir batarya şarj kestirimi yapabilecek bir yöntem seçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada literatürde en bilinen batarya şarj durumu kestirim (SoC) yöntemlerinin matematiksel modeli sunulmuş ve her bir yöntem ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir. Son olarak da her bir yöntemin üstün ve zayıf noktaları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Batarya Şarj Durumu Kestirimi, SOC, Batarya Yönetim Sistemi

Abstract

Due to the widespread use of electric vehicles today, the use of high energy and high power density battery packs has become inevitable. However, reliability and correct use of battery packs are the factors to be considered. Otherwise, the cycle life, performance and capacity of the batteries may be lost or safety problems may occur due to heating. Accurate and reliable operation of battery packs is ensured by battery management systems. With battery management systems, the voltage, current value of each battery cell and the temperature of the battery packs are measured in real time, thus eliminating or minimizing possible errors that may arise. In addition, with the battery management system, the battery charge state, which is very important for the batteries, can be estimated and the energy that the batteries can give can be calculated. The situation that makes the estimation of the battery state of charge (SoC) an important

parameter is that this parameter cannot be measured directly and has no linear relationship with the battery voltage-current and temperature. Therefore, it is necessary to choose a method that can make a battery charge estimation with high accuracy with the obtained data. In this study, the mathematical model of the most known battery charge estimation methods in the literature is presented and each method is examined in detail. Finally, the strengths and weaknesses of each method are given comparatively.

Keywords: State of Charge, SoC, Battery Management System

1. Giriş

Fosil yakıtların tüketimine bağlı olarak sera gazları salınımı dünyayı tehdit etmektedir. İçten yanmalı motora sahip araçların yaygın kullanılması bu salınımların başlıca sebeplerindedir. Çevreye verilen bu zararların azaltılması adına elektrikli araç kullanımı bir çözüm olarak düşünülmektedir [1]. Bu çözümün uygulanabilir olması açısından içten yanmalı motor kullanan araçlarla elektrikli araçların fiyat ve bakımından rekabet edebilmesi gerekmektedir. Bu noktada araştırmacılar elektrikli araçlarda bulunan bileşenleri optimize etmeye yönelik çalışmalar yapmaktadırlar. Optimizasyon çalışmaları temel olarak batarya paketi üzerinde yoğunlaşmaktadır [2]. Bununla beraber bataryalar sektörel olarak pek çok farklı alana hizmet verdiği için son yıllarda birçok araştırma ve geliştirme faaliyetleri bu alanda sürdürülmektedir. Batarya çeşitleri de bu sektörlerin ihtiyaçlarını gidermek amacıyla farklı tiplerde üretilmeye başlamıştır. Lityum iyon batarya icat edilinceye kadar yıllarca nikel kadmiyum ve kurşun asitli bataryalar, taşınabilir elektronik cihazlar için uygun bir güç kaynağı olmuştur [3]. Son yıllarda ise lityum iyon piller, elektrikli taşıtlar, mobil elektronik cihazlar ve şebeke kararlılığı için enerji depolama teknolojisi olarak önemli bir yer kapsamaktadır [4].

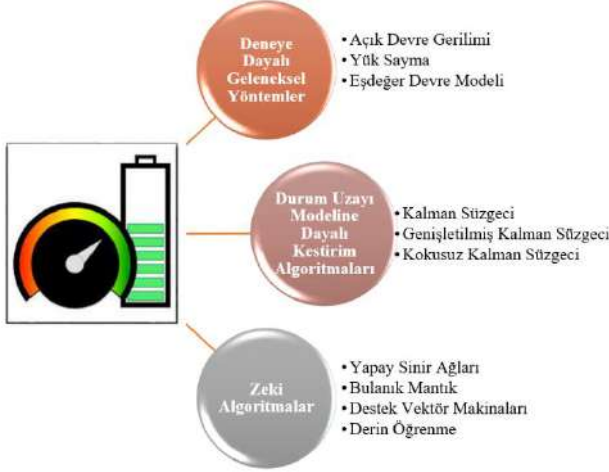
Lityum iyon bataryaların birçok alanda tercih edilme sebepleri sağlamış olduğu yüksek enerji yoğunluğu, yüksek verimlilik, yavaş malzeme bozulması, hafıza etkisinin olmaması, kendi kendine deşarjın düşük olması ve minimum bakım gereksinimlerine sahip olması olarak sıralanabilir [5]. Fakat bu avantajların yanında lityum iyon bataryaların emniyetli bir şekilde çalıştırılması da kimyasal yapısının getirmiş olduğu bir zorluktur [6]. Bundan dolayı lityum iyon bataryaların güvenilir şekilde çalıştırılabilmesi için batarya yönetim sistemleri (BYS) tarafından izlenmesi ve yönetilmesi gerekir [7]. Verimli ve etkili batarya yönetim sisteminin başarımını, alt parametrelerinden biri olan pil şarj durumunun (SoC) doğru hesaplanması ile ilişkilidir. Pil doluluk oranının doğru bir şekilde hesaplanması önemli bir

problem olup akademik olarak çalışma konusu haline gelmiştir [8]. Bataryaların kimyası zamana bağlı olarak ve çevresel etkilerle değiştiği için doğru SoC ölçümü karmaşık bir iştir. Günümüzde SoC'ü daha doğru tespit etmek için birden fazla yöntem kullanılmaktadır [9].

Literatürde yapılan çalışmalarda şarj durumu kestiriminde en çok bilinen yöntemlerin; deneye dayalı geleneksel yöntemler, durum uzayı modeline dayalı yöntemler ve akıllı algoritmalar tabanlı yenilikçi yöntemler olmak üzere üç ana başlık altında toplandığı görülmüştür. Deneye dayalı geleneksel yöntemler açık devre gerilimi (OCV), yük sayma ve eşdeğer devre modeli yöntemlerini içinde barındırmaktadır. Durum uzayı modeline dayalı yöntemlerde ise daha çok Kalman süzgecine dayalı yöntemler literatürde göze çarpmaktadır. Bu çalışmada şarj durumu kestirimi ile ilgili üç ana yöntemin içinde barındırdığı tüm yöntemlerin ana çıkış noktasından ve matematiksel altyapısından bahsedilmiştir. Ardından her yöntemin üstün ve zayıf yönleri detaylıca irdelenmiş ve literatürdeki çalışmalarla kullanım yerlerine dair örnekler sunulmuştur.

2. Şarj Durumu Kestirim (SoC) Yöntemleri

Şarj durumu kestiriminde en çok bilinen yöntemler; deneye dayalı geleneksel yöntemler, uyarlanabilir süzgeç algoritmaları ve yapay zekâ tabanlı yenilikçi yöntemler olmak üzere üç ana kısma ayrılır. Şekil 1'de bu yöntemler ve bu yöntemlerin barındırdığı algoritmalar verilmiştir.



Şekil 1. Şarj durumu kestiriminde en çok bilinen yöntemler

Bataryaların veri sayfalarında amper-saat (Ah) veya mili amper saat (mAh) cinsinden anma kapasite değerleri belirtilir. Anma kapasite değerleri ise bataryaların depolayabileceği enerji miktarını vermektedir. Genel olarak bataryaların verimli bir şekilde azami çevrim ömrü sayısında kullanılabilmesi için en önemli parametrelerden olan şarj durumlarının doğru bir şekilde kestirilmesi gerekmektedir. Bataryaların şarj durumunun hesaplanması için birçok farklı yöntem geliştirilmiştir. Bir bataryanın şarj durumu hesabı ise sahip olduğu anlık kapasite değerinin anma kapasitesine oranla elde edilir. (1) nolu eşitlikte şarj durumunu SoC, anlık kapasite değerinin Q(t), anma kapasite değeri ise C(n) olarak tanımlanmaktadır.

$$SoC(t) = \frac{Q(t)}{C(n)} \quad (1)$$

2.1. Geleneksel Yöntemler

Geleneksel yöntemlerle SoC kestiriminin temeli, laboratuvar ortamında bataryanın veri sayfasında belirtilen nominal akımla şarj ve deşarj edilerek SoC-OCV karakteristiğinin elde edilmesine dayanmaktadır. Bu yöntemlerin SoC kestirimi için tek başına kullanılması endüstriyel uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Bunun yanında ölçüm esnasında oluşan gürültülerden veya ölçüm hatalarından dolayı kestirim doğruluğunun düşük olması da uygulanabilirliği açısından dezavantajlarındandır

2.1.1. Açık Devre Gerilimi Yöntemi

Açık devre gerilimi yöntemi, batarya paketinde bulunan hücrelerin gerilimlerinin sürekli ölçülmesi ile gerçekleştirilir. Bataryaların SoC ve açık devre gerilimleri arasında doğrusala yakın bir ilişki olmasından dolayı kapasite belirlenmesi için kullanılan yöntemlerdendir. Fakat lityum iyon bataryaların terminal gerilimlerinden açık devre gerilimlerine doğrudan ulaşılabilir değildir. Açık devre geriliminin, terminal geriliminden elde edilebilmesi için şarj ve deşarj sonrasında bataryanın yüksüz bir şekilde saatler mertebesinde dinlendirilmesi gerekmektedir [10]. Bundan dolayı dinamik sistemlerde bu yöntemin kullanılması uygun değildir. Fakat diğer yöntemlere yardımcı bir yöntem olarak laboratuvar ortamında veri elde edilmesi için yardımcı bir yöntem olarak kullanılabilir. Açık devre gerilimi yöntemi doğrudan ölçüm yöntemi olmasından dolayı ölçümde kullanılan akım, gerilim sensörlerinin neden olduğu gürültülerden etkilenmektedir. Ayrıca seçilen eşdeğer elektrik devre modeline göre farklı SoC değerleri elde edilmektedir. Bundan dolayı basit bir yöntem olmasına rağmen kestirim doğruluğu düşük olduğu için dinamik sistemlerde tercih edilmemektedir.

2.1.2. Yük Sayma Yöntemi

Yük sayma yöntemi basit ve kolay bir yöntem olmasından dolayı uzun yıllardır kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem şarj ve deşarj akımlarının kümülatif olarak toplanarak başlangıç şarj durumuna göre kapasitenin elde edilmesini sağlamaktadır [11]. Bu yöntemde anlık olarak kestirilen şarj durumu, SoC(t) ve (t-1) anında kestirilmiş şarj durumu SoC(t-1) olarak gösterilirse (2) numaralı eşitlik elde edilir. Yöntemin doğruluğu başlangıç SOC değerine bağlıdır [12]. Bu değer doğru tespit edilmediği takdirde şarj durumu kestiriminde hatalar meydana gelebilir. Bataryanın geriliminin dinamik davranışından dolayı başlangıç şarj durumunu tahmin etmek zordur. Bundan dolayı başlangıç değer tespitinde bataryanın uzun süre dinlendirildiği varsayılarak SoC-OCV eğrisinden şarj durumu tespit edilebilir.

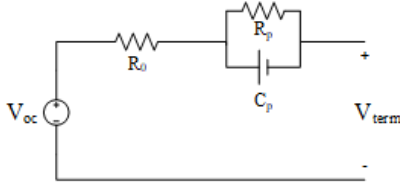
$$SoC(t) = SoC(t-1) + \frac{1}{Q_0} \int I(t) dt \quad (2)$$

Bataryanın başlangıç değerinin tespitinin zorluğu ve şarj-deşarj akımı ölçümü için kullanılan algılayıcı kaynaklı gürültülerin neden olacağı hatalar nedeniyle şarj durumu kestiriminde yalnızca bu yöntem kullanılmamaktadır.

2.1.3. Eşdeğer Devre Modeli

Bataryaların kimyasal yapısının zorluğundan dolayı daha anlaşılır hale getirmek için eşdeğer devre olarak modellemek oldukça başarılı sonuçlar verir. Böylelikle model üzerinden matematiksel hesaplamalar yapma imkânı bulunur. Bu nedenle şarj-deşarj veya empedans eğrileri için eşdeğer devreler modellenmiştir. Eşdeğer

devre modelleri bataryaların dinamik olarak değişen parametrelerinin kestirimini yapmak için kullanılmaktadır. Böylelikle, Bataryadan beslenen bir güç sisteminde devre modelleri kullanılarak batarya çalışma süresi, şarj durumu tahmini ve optimizasyonu rahatlıkla çözülebilir [13].



Şekil 2. Thevenin eşdeğer devre modeli

Şekil 2 'de verilen Thevenin eşdeğer modelinde iç dirence seri olarak bataryanın dinamik davranışlarını kestirmemizi sağlayan paralel RC devresi görülmektedir. Temel olarak thevenin eşdeğer devresi üç temel kısımdan oluşmaktadır; gerilim kaynağı V_{oc} , iç direnç R_o , şarj ve deşarj anında geçici cevapları oluşturan R_p , C_p 'den oluşmaktadır. Thevenin eşdeğer devresinin sürekli zaman analizi (3) ve (4) numaralı eşitliklerdeki gibidir [14].

$$\dot{v}_p = \frac{-1}{R_p \times C_p} v_p + \frac{1}{C_p} i_b \quad (3)$$

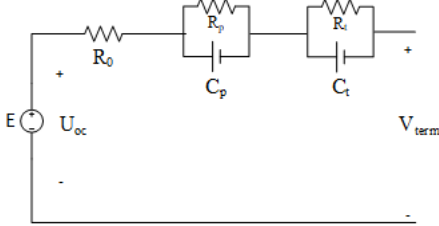
$$v_{term} = v_{oc} - v_p - R_o i_b \quad (4)$$

Eşitliklerdeki i_b ölçüm ile elde edilen batarya akımını, V_{term} ise yine ölçüm ile elde edilen batarya terminal geriliminin göstermektedir. Thevenin eşdeğer devresinin ayrık zamanlı analizi ise (5) ve (6) numaralı eşitliklerdeki gibidir.

$$\dot{v}_{p,k+1} = v_{p,k} e^{-\frac{T_s}{\tau_p}} + R_p \left(1 - e^{-\frac{T_s}{\tau_p}} \right) i_{b,k} \quad (5)$$

$$v_{term,k} = v_{oc} (SoC) - v_{p,k} - R_o i_{b,k} \quad (6)$$

Eşitliklerdeki T_s örnekleme periyodu, τ_p ise zaman sabitidir.



Şekil 3. İkinci dereceden eşdeğer devre modeli

Şekil 3 'te verilen ikinci dereceden eşdeğer devre modelinde Thevenin eşdeğer devre modelinin esnekliğini artırmak için paralel RC devresi eklenmiştir. İkinci dereceden eşdeğer devre modelinin sürekli zaman analizi (7) , (8) ve (9) numaralı eşitliklerdeki gibidir [14].

$$\dot{v}_p = \frac{-1}{R_p \times C_p} v_p + \frac{1}{C_p} i_b \quad (7)$$

$$\dot{v}_t = \frac{-1}{R_t \times C_t} v_t + \frac{1}{C_t} i_b \quad (8)$$

$$v_{term} = v_{oc} - v_p - v_t - R_o i_b \quad (9)$$

İkinci dereceden eşdeğer devre modelinin ayrık zamanlı analizi ise (10), (11) ve (12) numaralı eşitliklerdeki gibidir.

$$\dot{v}_{p,k+1} = v_{p,k} e^{-\frac{T_s}{\tau_p}} + R_p \left(1 - e^{-\frac{T_s}{\tau_p}} \right) i_{b,k} \quad (10)$$

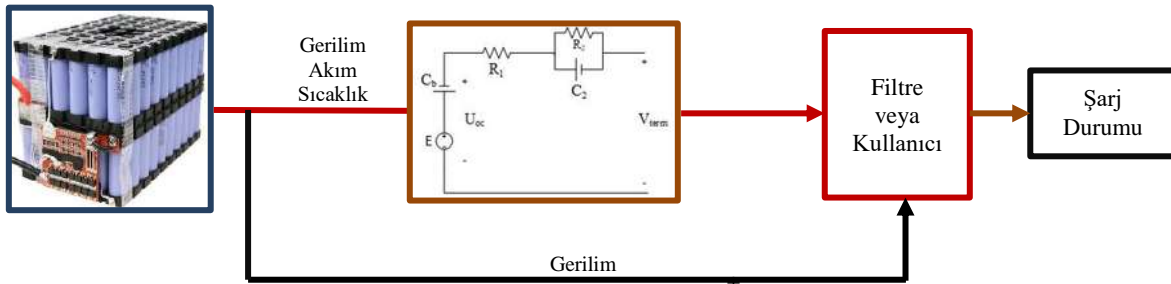
$$\dot{v}_{t,k+1} = v_{t,k} e^{-\frac{T_s}{\tau_t}} + R_t \left(1 - e^{-\frac{T_s}{\tau_t}} \right) i_{b,k} \quad (11)$$

$$v_{term,k} = v_{oc} (SoC) - v_{p,k} - v_{t,k} - R_o i_{b,k} \quad (12)$$

2.2. Durum-Uzayı Modeline Dayalı Kestirim Algoritmaları

Filtreleme algoritmaları ile batarya şarj durumu kestirilirken sistemin durum-uzayı modeli kullanılır. Sistemin durum-uzayı modeli bataryanın modeline dayanır ve batarya şarj durumu sistemin durum uzayı modelinde bir durum değişkeni olarak yer alır. Batarya şarj durumu uygun filtreleme veya gözleyici (observer) algoritmaları ile tahmin edilir [15]. Bataryanın ölçülen akımı, gerilimi, sıcaklık ve diğer değişkenleri bataryanın yük durumu ile ilişkilendirilir. Bu ölçülebilir değerler modelin girdisi olarak kullanılırken, model çıkışındaki tahmin edilen terminal gerilimi ile terminal geriliminin gerçek değeri arasındaki hata hesaplanır. Ardından, durum değişkeninin gerçek değerini elde etmek için kestirilen değerlerin geri besleme kazancı ile hata çarpılır. Son olarak, mevcut bataryanın şarj durumu, Şekil 4' te gösterildiği gibi filtre veya gözlemci aracılığıyla elde edilir.

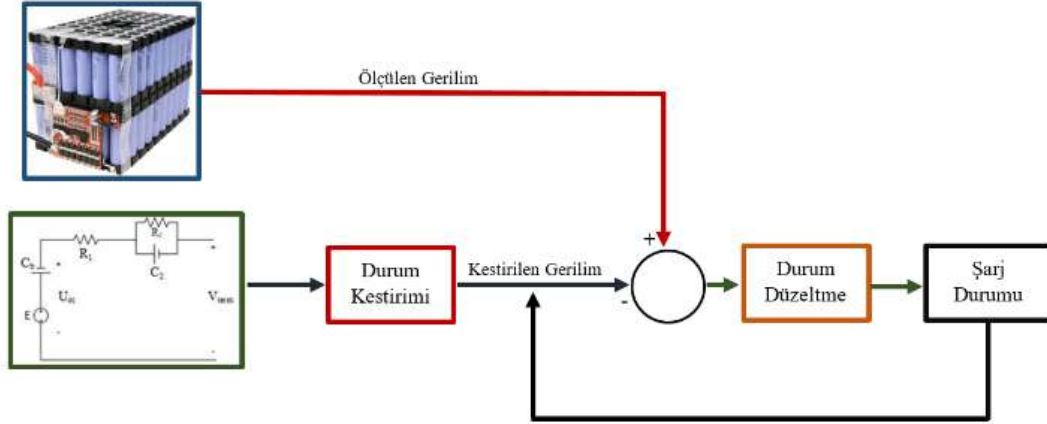
Durum uzay tabanlı batarya yük durumu tahmin yöntemine ilişkin algoritmalar batarya modeline, kullanılan gözleyici veya filtreleme algoritmalarına ve batarya modelindeki belirsizliklere duyarlıdır. Durum uzayı modeli genellikle bataryanın eşdeğer devre modeli ile elde edilir. Eşdeğer devre modelinin doğruluğu durum uzayı modelini doğrudan etkileyeceği için yük durumu tahmininin doğruluğunu doğrudan etkiler. Bu nedenle yapısı basit lakin yüksek doğruluklu bir eşdeğer devre modeli geliştirme araştırmacıların ilgi odağı olmuştur.



Şekil 4. Durum Uzayı Modeli Şarj Durumu Kestirimi Diyagramı

Araç hareketli iken akımın değişimi ve batarya gerilimindeki değişimlerden dolayı çalışma koşulları daha karmaşıktır. Batarya yük durumu tahmini yapan gözlemcilerin, doğrusal olmayan bu değişimlerden etkilenmeden yüksek doğrulukla çalışabilmesi için gürbüz bir yapı olması beklenmektedir. Çoğu yerli ve yabancı

uzman ve bilim adamı batarya yük durumu tahmini yaparken Kalman süzgeci (KF) dayalı çeşitli filtreleme yöntemleri kullanmış ve hala bu konuda hesaplama yükünü azaltacak araştırmalar yapmaktadırlar.



Şekil 5. Kalman süzgeci algoritması

2.2.1. Kalman Süzgeci

Kalman süzgecinin batarya sistemlerinde kullanılmasının temelinde tasarlanan sistemin en uygun tasarımın en küçük değişim ile sağlanmasıdır. Batarya modeli için temel matematiksel eşitlikleri (13) ve (14) numaralı eşitliklerde gösterilmiştir.

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (13)$$

$$y_{k+1} = g(x_k, u_k) + v_k \quad (14)$$

(13) ve (14) numaralı eşitliklerinde u_k sistemin girişleri olan akım, sıcaklık ve iç direnç gibi değişkenleri, y_{k+1} ise sistemin çıkışı olan açık devre gerilimini içerir. x_k durum değişkeni ise kestirilmiş SoC değerini tanımlar. f ve g fonksiyonları batarya modelindeki lineer olmayan denklemleri ifade eder. Hesaplama sürecinde bu değerlerin doğrusallaştırılması gerekir. Kestirim yönteminin temel prensibi Şekil 5'de gösterilmiştir. Kalman süzgeci algoritması elektriksel bir eşdeğer modeli ile ifade edilmelidir. Batarya durum denklemleri çıkartılmak için PNGV modeli (Şekil 6) ve kalman süzgeci algoritması kullanılmıştır. (15) ve (16) numaralı eşitliklerde bataryanın durum denklemleri verilmiştir. Eşitliklerdeki u_b , c_b kapasitesi gerilimi; u_2 , RC tankı üzerindeki gerilimi; R_1 iç direnç, u_{oc} ise açık devre gerilimidir.

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2 C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_b \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ C_b \\ C_2 \end{bmatrix} I \quad (15)$$

$$u_{oc} = [-1 \quad -1] \begin{bmatrix} u_b \\ u_2 \end{bmatrix} + (-R_1 I) + u_{oc} \quad (16)$$

Kalman süzgeci, doğrusal sistemlerde kullanılan bir hesaplama yöntemidir. Ancak Lityum iyon batarya eşdeğer devre modelinde bulunan polarizasyon direnci ve polarizasyon kapasitesinin zamanla değişen bir karakteristik göstermesinden dolayı SoC-OCV eğrisi doğrusal bir eğriye sahip değildir [16]. Kalman süzgecinin batarya sistemlerinde uygulanabilmesi için çalışma noktasında türev alabilen genişletilmiş kalman süzgeci kullanılmaktadır.

2.2.2. Genişletilmiş Kalman Süzgeci

Lityum iyon bataryaların OCV-SoC eğrisi lineer olmayan dinamik bir karakteristiğe sahiptir. Kalman filtresi ise lineer sistemlerin kestirimi için kullanılmaktadır. Bundan dolayı lineer olmayan sistemlerin doğrusallaştırılması gerekir. Sistem doğrusallaştırıldıktan sonra Kalman süzgeci kullanılır. Lineer olmayan sistemin doğrusallaştırılarak, kalman süzgecinin uygulanmasına genişletilmiş kalman süzgeci metodu denir.

Durum ve ölçüm fonksiyonları Taylor serisi ile açılarak ikinci ve daha yüksek mertebeden terimler elde edilir. Seri açılımı ile doğrusallaştırma sonrası elde edilen durum denklemleri (17) ve (18) numaralı eşitliklerdeki gibi elde edilir.

$$x_{k+1} \approx \hat{A}_k x_k + f(x_k, u_k) - \hat{A}_k x_k + w_k \quad (17)$$

$$y_k \approx \hat{C}_k x_k + g(x_k, u_k) - \hat{H}_k x_k + v_k \quad (18)$$

Thevenin eşdeğer modeli ile yük sayma yönteminin birleştirilmesi ile (19) ve (20) numaralı durum eşitlikleri elde edilmiştir. Thevenin eşdeğer devresinin ayrıntılı analizinde; Kalan şarj durumu $s(k)$ ve RC devresi gerilim düşümü $U_c(k)$ sistem değişkenlerini, $I(k)$ ölçüm ile elde edilen akım değişkenini, U_{oc} açık devre gerilimini, batarya terminal gerilimi $U_t(k)$ ise çıkış değişkenini temsil eder [17].

$$\begin{bmatrix} s(k) \\ U_c(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{T_s}{\tau_p}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s(k-1) \\ U_c(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_s}{Q_0} \\ R_p(1 - e^{-\frac{T_s}{\tau_p}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(k-1) \\ w_1(k-1) \\ w_2(k-1) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$U_i(k) = \left[\frac{\partial U_{oc}}{\partial s} - 1 \right] \begin{bmatrix} s(k-1) \\ U_c(k-1) \end{bmatrix} + [-R_0] [I(k-1)] + [v(k)] \quad (20)$$

Burada T_s örnekleme periyodunu, τ_p zaman sabitini Q_0 ise bataryanın anma kapasite durumunu temsil etmektedir.

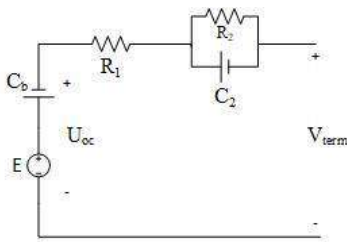
2.2.3. Kokusuz Kalman Süzgeci

Genişletilmiş Kalman süzgecinin bazı eksiklikleri ve uygulanabilirliğinin zor olmasından dolayı kokusuz dönüşüm yöntemini kullanarak durum dağılımlarını hesaplamaya çalışan Kokusuz Kalman süzgeci doğrusal olmayan sistemlerde kullanılmaktadır. Kokusuz Kalman süzgeci yönteminde doğrusallaştırma işlemi gerçekleştirilmediği için Genişletilmiş Kalman Süzgecinde karşılaşılan hatalara düşülmeden kestirim yapılabilmektedir. İstatistiksel bir yöntem olan kokusuz dönüşümde sigma noktaları olarak adlandırılan noktalar kümesinin seçimi büyük rol oynamaktadır. Sigma noktaları doğrusal olmayan dönüşüm altında Gaussian dağılımının ortalama ve kovaryans değerleri elde edilir. Bu yöntem temel olarak üç adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar; sigma noktalarının hesaplanması, durum tahmini ve ölçüm güncellemesidir. Bu yöntemde sigma noktaları parçacık süzgeci yöntemindeki gibi rastgele seçilmez. Kokusuz Kalman filtresi algoritması için PNGV eşdeğer devre modeli kullanılarak aşağıdaki eşitlikler elde edilir [18]. Şekil 6'da belirtilen PNGV modelinin denklemleri (21), (22) ve (23) numaralı eşitliklerde gösterilmiştir.

$$v_{term} = v_{oc} - v_2 - v_b - R_1 i_b \quad (21)$$

$$v_2 = \frac{-1}{R_2 \times C_2} v_2 + \frac{1}{C_2} i_b \quad (22)$$

$$\dot{v}_b = \frac{1}{C_b} i_b \quad (23)$$



Şekil 6. PNGV eşdeğer devre modeli

Batarya sisteminin durum uzay ve ölçüm denklemleri (24) ve (25) numaralı eşitliklerdeki gibidir.

$$\begin{bmatrix} SoC_k \\ u_{2,k} \\ u_{b,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{T_s}{\tau_p}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SoC_{k-1} \\ u_{2,k-1} \\ u_{b,k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_s}{Q_0} \\ R_2(1 - e^{-\frac{T_s}{\tau_p}}) \\ \frac{T_s}{C_b} \end{bmatrix} i_k \quad (24)$$

$$z_k = g(SoC_k) - v_{2,k} - v_{b,k} - R_1 i_k \quad (25)$$

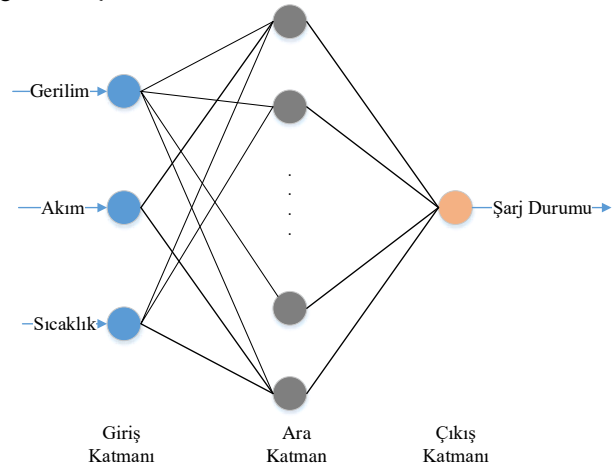
Yukarıdaki eşitliklerdeki; batarya şarj durumu (SoC_k), batarya kapasitesi C_b , RC gerilimi V_2 , durum değişkenleri, akım değeri i_k giriş, terminal gerilimi ise çıkıştır. $g(SoC)$ ise şarj durumu ile açık devre gerilimi arasındaki ilişkiyi sağlayan fonksiyondur.

2.3. Zeki Algoritmalar

Son zamanlarda yapay zekâ uygulamalarının gelişmesiyle birlikte batarya şarj durumu kestirimi ile alakalı olarak yenilikçi yöntemler geliştirilmeye başlanmıştır. Yeni gelişen yöntemler arasında Sinir Ağı, Bulanık Mantık, Destek Vektör Makinaları ve Derin Öğrenme gibi yöntemler bulunmaktadır. Bu tür uygulamalarda batarya modelleri kullanılmadan batarya şarj durumu hakkında başarılı sonuçlar elde edilebilir. Fakat bahsedilen algoritmaların doğru bir şekilde çalışabilmesi için bataryaların çalıştırılmış olduğu tüm koşullar altındaki parametreleri sisteme öğretilmelidir.

2.3.1. Sinir Ağı Yöntemi

Sinir ağları, paralel veya karmaşık işlemlerin çözümü için matematiksel algoritmalar kullanılmaktadır. Bu algoritmalar ile bilgi anlamlandırması ve birçok karmaşık parametreler arasındaki ilişkinin çözümü gerçekleştirilebilmektedir. Sinir ağı metodu doğrusal olmayan sistemlerin çözümü için kullanılan metotlardan birisidir. Sinir ağı üç katmandan oluşmaktadır. Birinci katman giriş katmanıdır ve bu katmanda batarya gerilimi, akım, direnç ve sıcaklık değerlerinin içermektedir. Ara katman sayısı ise sisteme bağlıdır. Çıkış katmanı ise kestirilen değerin elde edilmesini sağlamaktadır. Bu metot ile minimum hata değeri elde edilmesi beklenmektedir. Fakat minimum hata değeri elde edilebilmesi için çok sayıda deneyler ile elde edilmiş şarj ve deşarj verileri ile desteklemek gerekmektedir. Bundan dolayı bu metot ile düşük hatalı bir sonuca ulaşabilmek çok sayıda batarya şarj deşarj verisine ihtiyaç duyulmaktadır [19,20]. Ayrıca aynı etikete sahip olmasına göre bataryalar muhafaza edilmesine veya yaşlanmasına göre kimyasal yapısında oluşacak değişikliklerden dolayı farklı karakteristik gösterebilmektedir. Harici parametrelerde göz önünde bulundurulduğu takdirde minimum kestirim hatası için sistemi birçok veri ile öğretilmelidir. Şekil 7'de şarj durumu hesabı için sinir ağı yönteminin temel akışı gösterilmiştir.



Şekil 7. Yapay sinir ağı temel prensibi

2.3.2. Bulanık Mantık Yöntemi

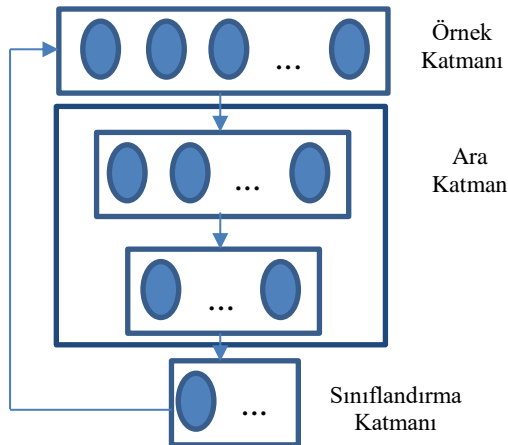
Bulanık mantık yöntemi bilinmeyen parametrelerin kestirilmesi gereken birçok uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu yöntem öğrenme mekanizmasının optimize edilmiş katsayıları hesaplayarak doğrusal olmayan sistemlerin tanımlanmasında oldukça başarılıdır [21]. Günümüzde bulanık algoritmalar genellikle daha yüksek başarımlar elde etmek için diğer akıllı algoritmalarla birleştirilmektedir. Yapılan bir çalışma sinir ağı yöntemi ile bulanık mantık yönteminin birleştirilmesidir. Her iki yöntemde paralel bir işleme yapısını benimseyen, girdi ve çıktı örneklerinden girdi ve çıktı ilişkisini elde etmeyi sağlamaktadır. Bu nedenle, doğrusal olmayan karakteristiğe sahip bataryalar için iki yöntemin öğrenme yeteneğinin birleştirilmesi ile daha yüksek doğruluk oranı ile şarj durumu kestirimi gerçekleştirilebilmektedir.

2.3.3. Destek Vektör Makinaları

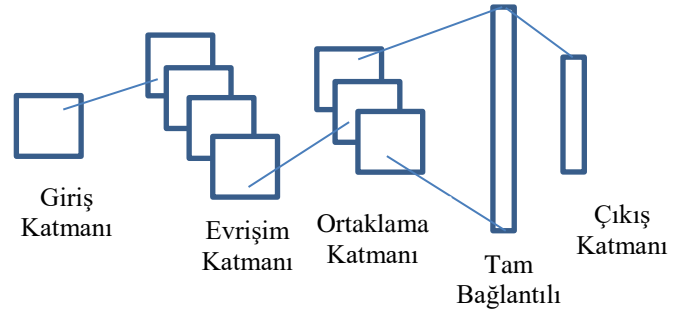
Destek vektör makinesi yaygın olarak kullanılan bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. Bu yöntemde örnek sayısı fazla olsa dahi hızlı bir şekilde başarılı sonuç elde edilmektedir. Bu yöntem ile doğrusal karakteristiğe sahip olmayan ve yüksek mertebeli batarya modellerinde şarj durumunun doğru bir şekilde kestirimini gerçekleştirilebilmek için çekirdek fonksiyonlarını kullanmak gerekir.

2.3.4. Derin Öğrenme

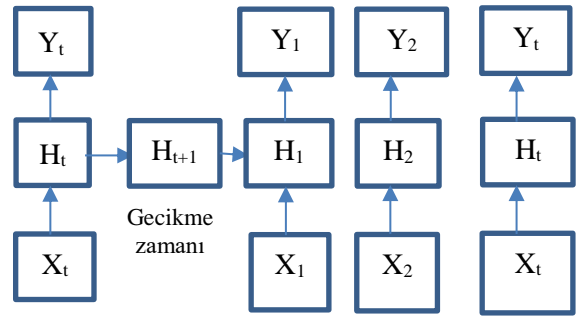
Derin öğrenme temel olarak daha fazla katman sahip bir sinir ağıdır. Bu yöntem doğrusal olmayan sistemlerde girdi ve çıktı verilerden daha anlamlı özellikler çıkararak karmaşık işlemleri gerçekleştirebilmektedir. Bataryadan elde edilen gerilim, akım, sıcaklık gibi bilgiler giriş katmanına girildikten sonra ara katmanda hesaplamalar yapılır, çıkış katmanında ise şarj durumu elde edilir [22]. Bu yöntemin öğrenme modeli daha karmaşık olduğu için daha yüksek çözünürlük ve doğrulukla hesaplamalar yapılmaktadır. Bunun yanında karmaşık modeller kullanılmasından dolayı hesaplama ve öğrenme süresi daha uzundur. Derin öğrenme yöntemini uygulayan algoritmalar, derin inanç ağı, evrişimli sinir ağı ve tekrarlayan sinir ağıdır. Bu yöntemlerin akışı Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10 da gösterilmiştir.



Şekil 8. Derin inanç ağı akışı



Şekil 9. Evrişimli sinir ağı akışı



Şekil 10. Tekrarlayan sinir ağı akışı

3. Sarj Durumu Kestirimi Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Batarya şarj durumu kestiriminin yapılması batarya yönetim sistemlerinin önemli bir parçasıdır. Şarj durumunun doğru bir şekilde kestirilmesi elektrikli araçların kontrol sisteminin yönetimi için gerekli bir parametredir. Günümüzde şarj durumunu tespit etmek için birden fazla yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemlerin seçimi ise bataryanın tipine ve kullanım yerine göre değişiklik göstermektedir. Ayrıca şarj durumunun daha doğru bir şekilde kestirmek için bazı yöntemler kombine edilmektedir. Bu nedenle şarj durumu tespit yöntemlerini keskin çizgiler ile ayırmak kolay değildir. Tablo 1 'de üç ana başlık altında toplanan yöntemlerin üstün ve zayıf yönlerinden bahsedilmiştir.

4. Sonuç

Batarya sistemlerinin şarj durumlarının doğru bir şekilde tahmin edilmesi bataryayı korur, aşırı deşarjı önler ve batarya ömrünün uzaması sağlanır. Fakat şarj durumları doğrudan ölçülemeyen bir nicelik olması ve herhangi bir gerilim, akım, sıcaklık gibi parametre ile doğrusal bağlantısı olmadığı için bataryaların güvenli sınırlar içerisinde çalışması zordur. Birçok uygulamada bataryaların kullanılmasından dolayı verimlilik açısından şarj durumu kestirimi batarya yönetim sistemlerinin kaçınılmaz bir parametresi haline gelmiştir.

Tablo 1. Şarj durumu kestirim yöntemlerinin karşılaştırılması [22]

Yöntem Tipi	Kestirim Yöntemleri	Avantaj	Dezavantaj
Geleneksel Yöntemler	Açık Devre Yöntemi	Basit ve geleneksel bir yöntemdir. Yüksek doğruluk ile şarj durumu kestirimi yapılabilmektedir.	Ölçüm ve bekleme süresi oldukça uzundur. Dinamik sistemler için uygun değildir.
	Yük Sayma Yöntemi	Donanımsal olarak basit yapıya sahiptir. Ölçüm gereksinimleri azdır. Oldukça hızlı bir yöntemdir.	Doğru bir kestirim için sensör verilerinin ve başlangıç şarj durumunun tespitinin doğruluğu çok önemlidir.
	Eşdeğer Devre Yöntemi	Bataryaları eşdeğer devreler olarak modelleyerek matematiksel hesaplamalar gerçekleştirilir.	Eşdeğer devre üzerinde modellenen parametrelerin dinamik olarak değişmektedir.
Durum Uzayı Modeline Dayalı Algoritmalar	Kalman Süzgeci	Kestirim doğruluğu gürültülü sinyallerde dahi oldukça yüksektir. Kestirim için başlangıç şarj durumu önemli değildir.	Kestirim doğruluğu seçilen elektriksel modele göre değişmektedir. Doğrusal olmayan sistemler için uygun değildir.
	Genişletilmiş Kalman Süzgeci	Doğrusal olmayan sistemler için uygundur. Dinamik değişiklikler altında uygulanabilmektedir.	Doğrusallaştırma işlemlerinde bazı terimlerin göz ardı edilmesinden dolayı kestirim hataları oluşabilmektedir.
	Kokusuz Kalman Süzgeci	Doğrusal olmayan sistemler için uygundur. Ayrıca kullandığı istatistiksel yöntemden dolayı doğrusallaştırma kaynaklı hatalara neden olmamaktadır.	Elde edilen anormal dağılımlar ve başlangıç değerinin belirsizliği yöntemin yanlış kestirim yapmasına neden olur.
Zeki Algoritmalar	Sinir Ağı Yöntemi	Batarya modeli kullanmadan veri işleme ve kendi kendine öğrenme yeteneği ile gerçek zamanlı şarj durumu kestirimi yapılabilmektedir.	Kestirim doğruluğu için çok sayıda örneğe ihtiyaç vardır.
	Bulanık Mantık Yöntemi	İnsan zihnine çok yakın çalışma şekli olduğu için çok sayıda kontrol mekanizmasına göre daha anlaşılır ölçüdedir. Arka tarafta çalışmaya devam eden mekanizmayı ve matematiği ortaya çıkarmak güç değildir.	Denetlenen sistemin kararlılık analizi yapılamaz ve sistemin nasıl cevap vereceği önceden tahmin edilemez.
	Derin Öğrenme	Bu yöntemle birden çok süreç paralel bir şekilde işlenebilir. Kestirim sonuçları yüksek doğrulukta ve kararlıdır.	Modele öğretimi oldukça karmaşıktır. Yöntemin hesabı için yoğun matematik kullanılmaktadır.
	Destek Vektör Makinaları	Batarya eşdeğer modeline bakılmaksızın yüksek kestirim doğruluğuna sahiptir. Doğrusal olmayan sistemlere uygulanabilir.	Tahmin doğruluğu örnek sayısına ve parametrelerin ağırlıklarına bağlıdır.

Bu çalışmada şarj durumu kestirimi ile ilgili popüler olan geleneksel yöntemler, durum-uzay modeline dayalı algoritmalar ve zeki algoritmalar detaylıca incelenmiştir. Yöntemlerin gerçekleştirilebilmesi ve daha kolay anlaşılması için kullanılan batarya modellerinden de bahsedilmiştir.

Geleneksel şarj durumu kestirimi yöntemleri diğer yöntemlere kıyasla oldukça basit ve yüksek doğruluklu şarj durumu kestirimi yapabilmektedir. Ölçüm gereksinimleri az olduğu için donanımsal olarak da karmaşık yapılara ihtiyaç yoktur. Bu yöntemle bataryalar eşdeğer devreler olarak modellenilebilir ve her türlü matematiksel hesaplamalar bu modeller üzerinde gerçekleştirilir. Bu yöntemler ölçüm süresi oldukça uzun olduğu için dinamik sistemlerde uygun değildir. Ek olarak model belirsizlikleri kestirimin doğruluğunu etkiler.

Durum uzayı tabanlı kestirim yöntemlerinde kestirim doğruluğu gürültülü sinyallerde dahi oldukça yüksektir. Bu nedenle algılayıcı kaynaklı gürültülere karşı oldukça dayanıklıdır. Kestirim için başlangıç şarj durumu önemli değildir. Doğrusal olmayan ve dinamik değişiklikler altında en başarılı kestirim yöntemleridir. Fakat kestirim doğruluğu seçilen elektriksel devre modele göre değişmektedir.

Zeki algoritmalar ile kestirim yöntemleri batarya modeli kullanmadan veri işleme ve kendi kendine öğrenme yeteneği ile gerçek zamanlı şarj durumu kestirimi yapılabilirdiğinden dolayı diğer yöntemlere göre hayli üstündür. Çok sayıda kontrol mekanizmasına göre daha anlaşılardır. Arka planda çalışan algoritmayı ve matematiği ortaya çıkarmak güç değildir. Batarya eşdeğer modelinden bağımsız olarak yüksek kestirim doğruluğuna sahiptir. Bu yöntemlerin en kötü tarafı kestirim doğruluğu için çok sayıda örneğe ihtiyaç olmasıdır. Ek olarak sistemin kararlılık analizini yapmak mümkün olmaz ve sistemin nasıl cevap vereceği önceden tahmin edilemez.

Teşekkür

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (Proje No: MYL-2022-43660) lisansüstü tez projeleri kapsamında hazırlanmıştır. Ancak, çalışmanın tüm sorumluluğu çalışma sahibine aittir. Üniversitenin Bilimsel Araştırma Projeleri biriminden alınan mali destek, yayın içeriğinin bilimsel anlamda Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından onaylandığı anlamına gelmez.

5. Kaynaklar

- [1] Aktaş, M.ve Baygüneş, B. ve Kıvrak, S. ve Çavuş, B. ve Sözen, F. , " Elektrikli Araç İçin Düşük Maliyetli Bir Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi" Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (Special Issue), 227-238,2020
- [2] Özcan, Ö. F. ve Karadağ,T., "Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması" Gazi University Journal of Science, 276–298,2021
- [3] Sinkaram C. ve Asirvadam V. S. ve Nor N. B. M., "Capacity Study of lithium ion Battery for Hybrid Electrical Vehicle (HEV) A Simulation Approach", IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA), 2013
- [4] Rzepka, B. ve Bischof, S., " Blank, T. Implementing an Extended Kalman Filter for SoC Estimation of a Li-Ion Battery with Hysteresis: A Step-by-Step Guide", Energies , 14, 3733,2021
- [5] He, Y., " Research on State Estimation Strategy and Management System Technology of Power Lithium Battery Pack", University of Science and Technology Anhui, China, 2012

- [6] N. Watrin ve B. Blunier, ve A. Miraoui, "Review of adaptive systems for lithium batteries state-of-charge and state-of-health estimation," in Proceedings of IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, pp. 1–6, Dearborn, Mich, USA, 2012
- [7] Zheng Y.J. ve Ouyang M.G. ve Han X.B. ve Lu L.G. ve Li J.Q, " Investigating the error sources of the online state of charge estimation methods for lithium-ion batteries in electric vehicles", J Power Sources, 377 ,161-88, 2018
- [8] A. Khaligh ve Z. Li, "Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art", IEEE Transactions on Vehicular Technology, 59:6 2806–2814,2010
- [9] A. A. A. Elgammal ve A. M. Sharaf, "Self-regulating particle swarm optimised controller for (photovoltaic-fuel cell) battery charging of hybrid electric vehicles," IET Electrical Systems in Transportation, Cilt: 2, No: 2, s: 77–89, 2012
- [10] Ng, K.-S. ve Moo, C.-S. ve Chen, Y.-P. ve Hsieh, Y.-C, "State-of-charge estimation for lead-acid batteries based on dynamic open-circuit voltage". 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference, IEEE, 972-976. Chiasson J., Vairamohan B., "Estimating the state of charge of a battery," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 13, no. 3, pp. 465–470, 2005
- [11] Shahab N., " Adaptive Techniques for Estimation and Online Monitoring of Battery Energy Storage "Devices. Electronic and Electrical Engineering. The University of Sheffield.,2017
- [12] C. Mi ve B. Li ve D. Buck, ve N. Ota, "Advanced electrothermal modeling of lithium-ion battery system for hybrid electric vehicle applications," in Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE, pp. 107-111,2007
- [13] Ceylan, M. ve Sarıkurt, T. ve Balıkcı, A. "Elektrikli Araçlarda Kullanılan Lityum-İyon Bataryalar İçin Model Geliştirilmesi", EMO V. Verimliliği ve Kalite Sempozyumu,2013
- [14] Hongwen H. ve Rui X. ve Jinxin F., "Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach," J. Energies, vol. 4, pp 582-598, ISSN 1996-1073, 2011
- [15] Zhu, R. "Research on High-Precision Modeling and Multi-State Estimation Methods for Lithium-ion Power Batteries" Master's Thesis, Shandong University, Qingdao, Shandong, 2021
- [16] Zhang, M.ve Fan, X., " Review on the State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicle Battery", World Electr. Veh. J. 2020, 11, 23.
- [17] Zhi, L. ve Peng, Z.ve Zhifu, W. ve Qiang, S. ve Yinan, R. "State of charge estimation for Li-ion battery based on extended Kalman filter" Energy Procedia, 105, 3515–3520, 2017
- [18] W. Wang ve X. Wang ve C. Xiang ve C. Wei ve Y. Zhao, "Unscented Kalman Filter-Based Battery SOC Estimation and Peak Power Prediction Method for Power Distribution of Hybrid Electric Vehicles," in IEEE Access, vol. 6, pp. 35957-35965,2018
- [19] Chen, Z. ve Qiu, S. ve Masrur, M. ve Murphey, Y.L. "Battery state of charge estimation based on a combined model of Extended Kalman Filter and neural network". In Proceedings of the 2011 International Joint Conference on Neural Networks, San Jose, CA, USA, 2011.
- [20] Rui-Hao, L. ve Yu-Kun, S. ve Xiao-Fu, J, " Battery state of charge estimation for electric vehicle based on neural network" In Proceedings of the 2011 IEEE 3rd

International Conference on Communication Software and Networks, Xi'an, China, 2011

- [21] Danko, M. ve Adamec, J.ve Taraba, M.ve Drgona, P. " Overview of batteries state of charge estimation methods" Transportation Research Procedia, 40, 186–192,2019
- [22] Zhou, W. ve Zheng, Y. ve Pan, Z. ve Lu, Q., "Review on the Battery Model and SOC Estimation Method",Processes 2021, 9, 1685,2021