



Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemleri Üzerine Bir Derleme Çalışması

A Review Study on Battery Management Systems in Electric Vehicles

Ramazan MENAK¹, Teoman KARADAĞ^{2*}, Mehmet ALTUĞ³, Nusret TAN²

¹Siirt University, Department of Electrical Electronics Engineering

²Inonu University, Department of Electrical Electronics Engineering

³Inonu University, Malatya OSB MYO, Department of Machine and Metal Technologies

Anahtar Kelimeler	Özet
Elektrikli Araçlar Batarya Yönetim Sistemi Batarya Termal Yönetimi Batarya Durum Kestirimi Batarya Yönetim Sistemleri Türleri	Küresel ısınma, fosil yakıtların çevreye verdiği zararlar ve sera gazı emisyonları ile ilgili endişeler nedeniyle elektrikli araçlar gün geçtikçe içten yanmalı motorlu araçların yerini almaktadır. Elektrikli araçlar için ana enerji kaynağı olan bataryaların, sürüş güvenliği için belirli bir çalışma sağlamak adına bazı sınırlamaları vardır. Batarya yönetim sistemleri (BYS'ler), bu sınırlamaların üstesinden gelmek, bataryayı korumak ve elektrikli araç için daha güvenilir sürüş sağlamak adına önemli bir rol oynamaktadır. Bu makalede BYB ve BYB'nin alt konuları olan bataryayı izleme, batarya güvenliği, araç iç-dış haberleşmesi, hücre dengelenmesi, durum kestirimleri, termal yönetimi ve topolojileri alanındaki çalışmalar derlenmiştir. Bu tür konularla ilgili yöntemlerin, avantaj-dezavantajları ve nitel faktörler açısından karşılaştırmaları yapılmıştır. Elektrikli araçlar geleceğin ulaşım aracı olacağı ve ülkemizde yerli üretime geçildiği için, elektrikli araçlar konusunda Türkçe literatürünün geliştirilmesi ve akademik çalışmaların yapılması gerektiği yazarlar tarafından düşünülmektedir. Yazarlar, bu çalışmanın Türkçe literatürüne katkı sağlayacağını ve batarya yönetim sistemi alanında çalışan tasarımcılara, araştırmacılara, üreticilere ve şirketlere bakış açısı kazandıracağını düşünmektedir.

Keywords	Abstract
Electric Vehicles Battery Management System Battery Thermal Management Battery State Estimation Topology of the Battery Management Systems	Due to concerns about global warming, environmental damages from fossil fuels, and greenhouse gas emissions, electric vehicles have been taken place of internal combustion motor vehicles day by day. Being the main energy source for electric vehicles, the batteries have some limitations to give certain operations for safe driving. The battery management systems (BMSs) play a vital role in order to overcome these limitations, protect the battery and ensure more reliable driving for electric vehicles. This paper reviews the papers about the battery management system and its sub-issues including battery monitoring, battery safety, vehicle internal-external communication, cell balancing, state estimations, thermal management, and topologies. The methods about such issues have been compared in terms of merits-demerits and qualitative factors. Since electric vehicles will be the transportation vehicles for the future and domestic production has been started in our country, the authors consider that it is necessary to improve the Turkish literature on electric vehicles and conduct academic studies. The authors consider that this study will contribute to the Turkish literature and gaining some perspective to the designers, researchers, producers, and companies that work in the field of the battery management systems.

Alıntı / Cite

Menak, R., Karadağ, T., Altuğ, M., & Tan, N. (2021). Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemleri Üzerine Bir Derleme Çalışması. *GU J Sci, Part A, 8(2)*, 234-275.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
R. Menak, 0000-0003-3223-4808	Başvuru Tarihi / Submission Date 25.02.2021
T. Karadağ, 0000-0002-7682-7771	Revizyon Tarihi / Revision Date 20.04.2021
M. Altuğ, 0000-0002-4745-9164	Kabul Tarihi / Accepted Date 28.04.2021
N. Tan, 0000-0002-1285-1991	Yayın Tarihi / Published Date 06.05.2021

1. GİRİŞ

Küreselleşen ve büyüyen dünyamızda enerjiye olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle sanayi devriminden sonra bu enerji ihtiyacını karşılamak için geleneksel fosil yakıt kaynaklı arayışları başlamış ve tüketimi günümüze kadar hızla artmıştır. Bununla beraber bu fosil yakıtlardan kaynaklanan olumsuz etkiler doğanın kirlenmesine ve canlıların sağlığına olumsuz etki yapmıştır. Buna sebep olan faktör ise enerji ihtiyacı için fosil yakıtların kullanımını sonucu çevreye yayılan sera gazlarıdır. Sera gazlarından kaynaklanan iklim değişiklikleri doğanın yapısını değiştirip küresel ısınmaya sebep olduğu gerçeği tüm insanlık tarafından ciddi bir konu haline gelmesi, sera gazlarını önlemek ve çevre dostu sistemlerin geliştirilmesi adına çalışmaları hızla artırmıştır. Bu çalışmalardan bir tanesi de ulaşımda kullanılan araçlardır. 2009 yılı içerisinde ulaşım sektöründe kullanılan araçların, sera gazı kaynaklı emisyonlara sebep olan faktörlerin dörtte birini oluşturduğu raporlanmıştır (Yong vd., 2015). Uluslararası enerji ajansı (IEA) 2015 yılı içerisinde ulaşım sektöründe kullanılan araçların, sera gazı kaynaklı emisyonlara sebep olan faktörlerin %24'ünü oluşturduğu ve bunun dörtte üçünün karayolu sektörü tarafından oluştuğu belirlenmiştir (Zhenhe Li vd., 2019). Geleneksel olarak kullanılan içten yanmalı motorlu (İYM) araçlar, motor hareketi için gerekli olan enerjiyi fosil yakıtları (benzin ya da dizel) kullanarak sağlar. Bunun sonucunda çevreye zarar veren karbon oksit, hidrokarbon ve nitrojen oksit gazlarını yayarlar. Bu durumun önüne geçmek adına hibrit elektrikli araçlar (HEA) kullanılmayı başlanmıştır. Böylelikle HEA'ların daha az emisyon yayılması sağlayacağı öngörülse de, yine de yukarıda bahsedilen olumsuz etkiler göz önüne alındığında tam bir katkı sağladığı söylenemez. Bundan dolayı çevre dostu, daha temiz, daha sessiz olan tamamen elektrikli araçlar (TEA) tasarlanmaya başlanmıştır. Aslında elektrikli araçların tarihi daha eski zamanlara dayanır. Petrol ile çalışan ilk içten yanmalı motorlu araç 1885 yılında yapılmasından yaklaşık 50 yıl önce, 1832-1836 yılları arasında ilk elektrikli araç Robert Anderson tarafından tekrar şarj edilemeyen batarya sistemiyle yapılmıştır (Chan, 2013). 1856-1881 yılında daha verimli doğru akım (DA) motorları ile şarj edilebilir batarya sistemleri ile ilgili gelişmeler yaşanmıştır. İlk şarj edilebilir batarya olan kurşun-asit batarya 1859'da Gaston Planté tarafından icat edilmiş ve Camille Alphonse Faure tarafından 1881 yılı civarında pazarlanabilir ürüne dönüştürülmüştür (Yong vd., 2015). Yaşanan gelişmeler ışığında elektrikli araçlar gün geçtikçe popülerlik kazanmış ve 1900 yılların başına kadar yaklaşık 70 yıl boyunca kesintisiz olarak kullanılmıştır. 1910 yılında Henry Ford tarafından, benzinle çalışan Ford Model T araçları piyasaya sürüldü. 1912'de de Charles Kettering tarafından elektrikli marş motorunun icat edilmesiyle beraber benzinle çalışan araçları çalıştırmak için el krank ihtiyacını ortadan kalkmıştır (Chan, 2013). Bu gelişmelerle beraber ucuz benzinin varlığı, benzinli araçların kullanım maliyetlerinin elektrikli araçlara kıyasla daha düşük olmasına neden olmuştur. Sonuç olarak elektrikli araçlar nispeten daha kısa mesafelere gidebiliyor ve sınırlı sayıda şarj istasyonu var olmasına karşın içten yanmalı motorlu araçlar daha uzun mesafe gidebildiği, karayollarının geliştiği ve petrol istasyonlarının artmasından dolayı elektrikli araçlara olan ilgi azalmıştır. Yıllar geçtikçe petrol fiyatlarının artması ve çevreye yayılan zararlı gaz salınımları konusu önem kazanarak yeniden elektrikli araçlara yönelme başlamıştır. Özellikle 1970'lerde Ford, GM ve Exxon Mobil gibi büyük Amerika Birleşik Devletleri (ABD) şirketlerinden bazılarının petrol krizinden dolayı Orta Doğu ülkelerinin petrolüne bağımlılığı azaltmak amacıyla elektrikli araçlar üzerine ciddi yatırımlar yapmışlardır. Ancak elektrikli araçlar ile ilgili teknolojik gelişmeler geleneksel araçlarla rekabet edecek boyuta ulaşamamıştır. Devam eden süreçte yeni kaynakların bulunması ve petrol fiyatlarının düşmesi ile beraber geleneksel ulaşım araçlarının kullanılmasına devam edilmiştir. 20 yy. sonlarına doğru çevre kirliliği ve küresel ısınma konusu ile alakalı uluslararası politikaların meydana çıkması ile beraber alternatif enerji kaynaklarına yönelim başlamış ve ulaşım sektöründe de temiz enerji kullanılması ilgili çalışmalarla beraber elektrikli araçlara olan ilgi yeniden canlılık kazanmıştır. Özellikle 2010 yılından itibaren, Nissan Leaf, Chevrolet Volt, Tesla Model S ve Mitsubishi i-MiEV gibi bataryalı elektrikli araçlar (BEA'lar) ve prize takılabilen hibrit elektrikli araçlar (PHEA'lar) otomotiv sektörüne girmeye başlamıştır (Yong vd., 2015). Geleneksel araçların kullanılmasıyla beraber yaşanacak olan (yukarıda bahsedilen) sorunların büyümemesi adına ülkeler çeşitli politikaları yürürlüğe geçirmiş ve elektrikli araçlar üzerine yatırımlar yapılmayı başlanmıştır. Çin, geleneksel İYM'lerin üretiminin ve satışının yakın gelecekte durdurulacağını açıklarken, Hollanda, Norveç, Almanya ve Hindistan'ın yanı sıra İngiltere ve Fransa gibi bazı ülkeler 2025-2040 yılları arasında geleneksel İYM'lerin satışını yasaklayacaklarını açıklamıştır (Li vd., 2019). Ülkemizde de Türkiye'nin otomobili Girişim Grubu (TOGG) tarafından tesisin inşası, üretim ve montaj hatlarının kurulmasının ardından 2022'nin son çeyreğinde ilk aracın çıkarılacağı bildirilmiştir. Bunun yanında 2030 yılına kadar fikri ve sınai mülkiyet haklarıyla tamamı TOGG'ye ait olacak olan 5 farklı modelden toplam 1 milyon adet üretileceği belirtilmiştir (TOGG Press Release, 2020).

Her ne kadar elektrikli araçlar daha sessiz, daha az bakım gerektiren, yolda iken egzoz salınımının olmaması ve dolayısıyla daha temiz olması gibi avantajlara sahip olsa da batarya teknolojisinin istendiği boyutlara ulaşmaması, şarj istasyonlarının kısıtlı olması ve teknik altyapısının gelişmemesi gibi dezavantajları yüzünden kullanımı ve pazarlanması açısından çeşitli zorluklar yaşanmaktadır. Bu zorluluklardan en önemlisi de motor tahrik sistemine enerji veren bataryaların arzu edilen performanslara henüz sahip olmamasıdır. Bataryalar aracın gidebileceği menzile belirlemede ve aracın maliyetine doğrudan etki etmektedir. Bu yüzden bataryaların elektrokimyasal yapılarını geliştirerek performanslarının artırılması gerekmektedir. Çalışmalar devam ederken mevcut batarya sisteminin en uygun güvenlik bölgesinde tutulmasıyla sürüş güvenliğini sağlamak ve araç performansını artırmak adına batarya yönetim sistemine (BYS) ihtiyaç duyulmuştur.

BYS ile ilgili çalışmalar önem kazanmış ve bu konuda literatürde çokça çalışma yapılmıştır. 1993 yılında John Goodenough elektrikli bir araç üzerinde batarya yönetim sistemi uygulamıştır. 1996 yılında 660 EV1 isimindeki elektrikli araçta batarya yönetim sistemi ile donatılmıştır. 1997 yılında ise General Motors tarafından üretilen Chevrolet S10 üzerinde yeni nesil bir batarya yönetim sistemi geliştirilmiştir (Ekici, 2019). 1999 yılında yapılan bir çalışmada, elektrikli ve hibrit elektrikli araçlarda kullanılan büyük akü paketlerinin uzun ömürlü olması istendiği belirtilmiştir. Bu amaçla batarya takımının ömrünü uzatacak akıllı bir BYB geliştirildiği ifade edilmiştir. BYB'nin işlevinin, büyük bir batarya dizisindeki tekli pillerin izlenmesi ve şarj edilmesi olduğu ifade edilmiştir (Maskey vd., 1999). 2002 yılında yapılan bir çalışmada, elektrikli araç (EA) uygulamalarında nikel metal hidrit (Ni-MH) pil için bir BYB geliştirilmiştir. Sistem, pillerin şarj ve deşarj kontrolünü optimize etmek ve pil durumunu gerçek zamanlı olarak izlemek için çeşitli işlevlere sahip olduğu belirtilmiştir. Sonuçlar pilin enerji verimliliğinin BYB ile iyileştirilebileceği ifade edilmiştir (Jung vd., 2002). BYB ile ilgili çalışmalar günümüze kadar geliştirilerek devam etmiştir. BYB alanındaki çalışmalar çeşitli yazarlar tarafından araştırılmış ve derlenmiştir. Xing vd. (2011), Rahimi-Eichi vd. (2013), Shen ve Gao (2019), Lu vd. (2013), Liu vd. (2019) batarya yönetim sisteminin genel yapısı, uygulanan yöntemler, batarya modelleme, batarya durum kestirimleri vb. konularda kapsamlı bilgiler sunmuşlardır. Bu çalışmalar sonucunda genel olarak BYB'nin kullanılması batarya ve araç güvenliği açısından oldukça önemli ve gerekli olduğu vurgulanmıştır. Aktaş vd. (2020), hücre dengelemede pasif yöntemin kullanıldığı, batarya şarj durumunun hesaplandığı, batarya genel sağlık durumunun kestiriminin yapıldığı ve bataryayı aşırı/düşük gerilim/sıcaklık değerlerine karşı koruyan bir BYB kartı tasarımı önermişlerdir. Önerdiklerin sistemin istenilen performansları karşıladığını deneysel sonuçlar ile desteklemişlerdir. Ayrıca, BYB tasarımında pasif dengeleme sistemi kullanılarak tasarım hızı, boyutu, maliyet ve kurulum kolaylığı açısından iyileştirmeler sağladığı belirtilmiştir. Aydın vd. (2013), yakıt pili ile çalışan bir elektrikli aracın Arduino tabanlı sıcaklık, nem, güç, hız göstergelerinin hesaplanması ve kullanıcıya sunulmasını sağlayan bir yönetim sistemi üzerinden çalışmışlardır. Bu yöntem ile aracın kontrolünün daha hassas olduğu ve anlık olarak okunan değerlerin hata oranının minimize edildiği vurgulanmıştır. Sarıkurt ve Balıkcı (2017), elektrikli araçlar için özgün bir enerji yönetim sistemi önermişlerdir. Önerdikleri sistemin pasif dengeleme yöntemi ile hücre dengelemesi yapabildiği, benzetim sonuçları doğrultusunda bataryaların çalışma süresinin iki kat uzattığı ve deneysel olarak enerji transferi bakımından sistemin verimliliğinin %95'in üzerinde olduğunu ifade etmişlerdir. Karabeyoğlu vd. (2019) Lityum iyon batarya gurubunun dengeleme işlemi için gerilim düşürücü-yükseltici dönüştürücü sistemini önermişlerdir. Bataryanın düşük ve yüksek yük altındaki çalışma durumlarını benzetim yoluyla irdelemişlerdir. Farklı şarj durumları altında olan ve benzetimi yapılan iki hücre arasındaki 25 mV'luk farkın dengeye ulaşma süresi düşük ve yüksek yük altında sırasıyla 147 ve 127 saniye olduğu sonucuna varmışlardır. Kıvrak vd. (2020), farklı amaçlar için kullanılacak Can bus ile STM32f103 mikroişlemci tabanlı bir BYB kartı önermişlerdir. Önerdiklerin BYB kartının 4 farklı pilin şarj kontrolünü yapabildiğini belirtmişlerdir. Deneysel analiz sonucunda, pillerden gelen veriler, STM32f103C8 mikroişlemci kullanılarak CAN bus veriyolu üzerinden verilerin kimlik numarasına göre doğru şekilde sınıflandırmasını başarıyla gerçekleştirdiği belirtilmiştir. Ekici ve Tan (2019) simülasyon ortamını kullanarak 4 farklı batarya türünün şarj/deşarj karakteristiklerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda ilk şarj anında en fazla akım çeken bataryanın LiFePO4 bataryasının olduğunu, en hızlı ve en yavaş şarj olan bataryaların sırasıyla Lithium Iron Phosphate ile Nickel Cadmium olduğunu, en verimli ve en verimsiz olan bataryaların sırasıyla Lithium Iron Phosphate ile Nickel Cadmium olduğunu, en yavaş ve en hızlı ısınan bataryaların sırasıyla Nickel Metal Hydride ile LiFePO4 olduğunu tespit etmişlerdir. Yukarıda bahsedilen çalışmalarda genel olarak BYB'nin alt yapısında olan durum kestirimleri, hücre dengeleme, hücre izleme, şarj/deşarj durumu vb. konulara değinilmiştir. Ancak BYB ile ilgili genel bilgiler içeren, alt yapısında olan özellikle batarya durum kestirimleri, hücre dengeleme, termal yönetim gibi konuları içeren detaylı derleme çalışmalarını okuyucuya sunan herhangi bir Türkçe

çalışma henüz yapılmamıştır. Yukarıda da bahsedildiği gibi EA'ların gün geçtikçe önem kazanması ve ülkemizde de TOGG girişiminin başlatılması gibi nedenlerden dolayı, bu mecrada yer almak isteyen yerli araştırmacıların ve üreticilerin EA'ların temel güç kaynaklarından bir tanesi olan bataryalar ve bataryaların yönetim sistemleri üzerindeki çalışmalar yapması ve çalışmalardan faydalanması gerekmektedir. Bu çalışma araştırmacılar, firmalar ve üreticiler için BYS ile ilgili uluslararası literatürde yapılan nitelikli çalışmalar derlenmiştir. Böylelikle okuyucuya doğru kaynağa ulaşmaya olanak sağlanacağı düşünülmektedir. Ayrıca BYS'de yer alan hücre dengeleme, batarya durum kestirimleri, termal yönetim gibi en önemli konular ile ilgili yayınlar derlenmiş ve yapılan çalışmalar ışığında yöntemlerin uygulanması, avantaj-dezavantajları, nitelik bakımından karşılaştırılması gibi sonuçlar sunulmuştur. Bunların yanından BYS türleri ile bilgiler sunulmuş, türlerin nitelik bakımından karşılaştırılması yapılmıştır. Bu çalışmanın BYS alanında kapsamlı bir derleme çalışması olarak Türkçe literatürüne katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

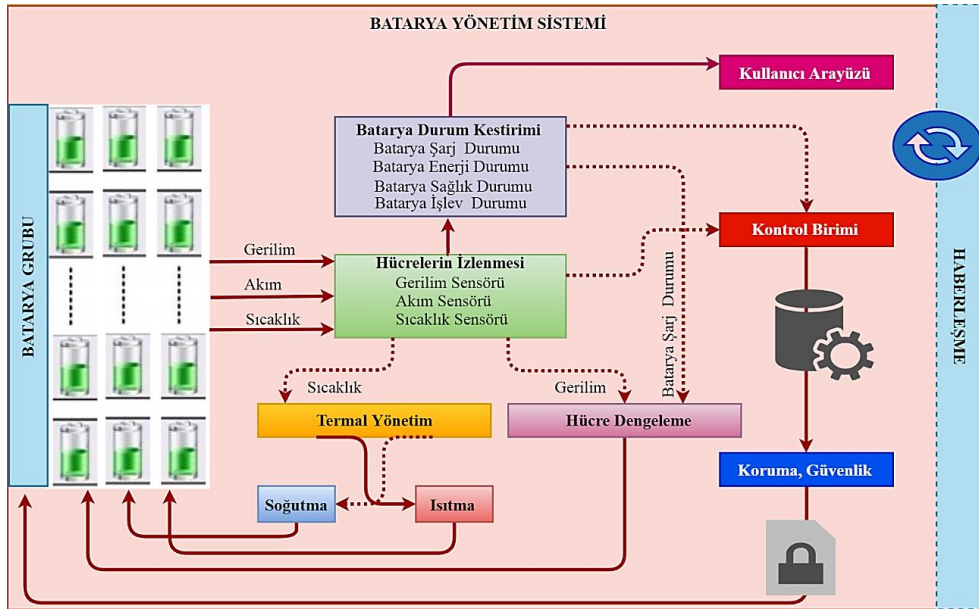
2. EA'LARDA BATARYA YÖNETİM SİSTEMLERİ

Bataryalar yapısındaki kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir enerji depolama aracıdır. Bataryalar birincil ve ikincil batarya türü adı altında kategorize edilir. Birincil batarya türü tümüyle deşarj olduktan sonra tekrar şarj edilemeyen batarya türleri iken ikincil batarya türleri ise deşarj olduktan sonra tekrar şarj edilebilen ve dolayısıyla tekrar tekrar kullanılabilen batarya türleridir. Batarya teknolojisine bağlı olarak ilk elektrikli araçlarda birincil batarya türleri kullanılmıştır. Daha sonra tekrar şarj edilebilen ikincil batarya türlerinin gelişimiyle birlikte elektrik araçlarda ikincil batarya türleri kullanılmıştır. İlk şarj edilebilen batarya sistemine sahip elektrikli araçlarda kurşun-asit bataryalar kullanılmaktaydı. Ancak bu bataryalar ağır, düşük enerji yoğunluğuna sahip ve çevre dostu değildi. Bundan dolayı kurşun-asit tabanlı bataryalarının yerini nikel tabanlı bataryalar almıştır. Özellikle nikel kadmiyum (Ni-Cd) ile Ni-MH bataryalar, kurşun-asit bataryalar ile karşılaştırıldığında daha fazla enerji yoğunluğuna sahip olduğu için tercih edilmekteydi. Ancak şarj olma süresi uzun ve deşarj olma süresi kısa olması, kendi kendine deşarj olma oranının yüksek olması ve hafıza etkisinin olması gibi dezavantajlara sahip olmasından dolayı elektrikli araçlarda uygun olmadığı anlaşılmıştır. ZEBRA veya diğer adıyla sodyum-nikel klorür (Na-NiCl₂) bataryalar, Ni-MH bataryalar ile aynı dönemde kullanılmıştır. Bu batarya türü yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip olsa da çalışma sıcaklığı aralığı (245-350°C) olması elektrikli araçta güvenlik açısından endişe oluşturduğu ve maliyeti artıracak bir termal yönetim sistemi gerektirdiğinden dolayı tercih edilmemektedir (Yong vd., 2015). 1970 yılında Lityum-iyon (Li-ion) tabanlı bataryaların gelişimi ile elektrikli araçlarda batarya sistemi açısından yeni bir çağ açılmıştır. Li-ion bataryaların yüksek enerji yoğunluğu sahip olması, az bakım gerektirdiği, daha ucuz olması, sülfatlaşmasının olmaması, yüksek şarj ve deşarj verimliliği oranına sahip olması, kendi kendine deşarj olma faaliyetinin düşük olması ve hafıza etkisinin olmaması gibi avantajları nedeniyle EA'lar da kullanıma elverişli olan ve en yaygın olarak kullanılan batarya türüdür. Li-ion batarya teknolojisinin gelişmesiyle EA'larda standart güç kaynağı olarak kullanılmasına neden olmuştur (Adany vd., 2013). EA'larda yüksek voltaj ve kapasite için batarya hücreleri birbirlerine seri ve paralel bağlanarak bir batarya grubu paketi oluşturulur. Seri bağlanan hücreler gerilimi yükseltirken, paralel bağlanan hücreler kapasiteyi ve akımı yükseltir. Yüzlerce seri ve paralel hücrelerden oluşmuş bir batarya paketi elektrikli araçta güvenlik zafiyeti oluşturmaktadır. Batarya paketinde bulunan tüm hücrelerin gerilim, akım ve sıcaklık değerlerinin en uygun çalışma bölgesinde tutulması adına batarya yönetim sisteminin kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Özellikle Li-ion bataryalar en uygun çalışma bölgesinde kullanılmazsa batarya yaşlanması hızlanır, ısınır ve araçta yanma/patlamalara neden olur. Elektrikli araçlarda BYS'nin temel görevleri bünyesindeki sensörler ve mikroişlemci vasıtasıyla hücrelerin tek tek gerilim, akım ve sıcaklıklarını izlemek; bataryayı aşırı/düşük gerilim/akım/sıcaklık değerleri sınırlarında korumak ve önlemine almak; şarj/deşarj esnasında hücrelerdeki dengesizliği gidermek; durum kestirimleri yaparak bataryanın şarj durumunu/state of charge (BŞD/SOC), bataryanın genel sağlık durumu/state of health (BGSD/SOH), bataryanın enerji durumunu/state of energy (BED/SOE), bataryanın işlev durumunu/state of function (BİD/SOF) tespit etmek ve bu sistemlerin bir haberleşme protokolü ile birbirleriyle etkileşim içinde bulunmasıyla kullanıcıya bilgiler sağlamaktır. Şekil 1'de BYS'nin genel gösterimi verilmiştir.

2.1. Batarya Grubunun ve Hücrelerin İzlenmesi

EA'larda batarya grubu yüzlerce seri-paralel hücrelerden oluştuğu için çok karmaşık bir yapıya sahiptir. Batarya grubundaki hücrelerin değişen ortam şartlarına bağlı olarak gerilim, akım ve sıcaklık değerleri değişir. EA'larda bu değişim özellikle sürüş esnasında bariz bir şekilde yaşanır. EA değişen bu ortam koşulları ve karmaşık yapıya kendisini uyarlamalıdır. Bu işlem batarya yönetim sistemindeki algılayıcılar ile hücrelerin ve

batarya grubunun gerilim, akım ve sıcaklık değişimlerinin ölçülmesi ve izlenmesiyle gerçekleştirilir. Bu ölçüm işlemleri çok hassas algılayıcılarla yapılmalıdır. Batarya grubundaki hücre gerilimlerinin tek tek ölçülmesi ve izlenmesi BYS'nin temel görevlerinden bir tanesidir. Gerilim genellikle ADC (analog dijital konvertörler) ya da çoklayıcı devreler (multiplexer) tabanlı geliştirilen kartlar ile ölçülür. Ölçülen gerilim verilerine göre bataryanın güvenli çalışma bölgesinde olup olmadığı tespit edilir. Buna göre şarj/deşarj işlemleri kontrollü bir şekilde yapılır. Bataryanın düşük/yüksek gerilimlerine karşı önlemini almak ve özellikle yüksek gerilimlerden dolayı yanmalara karşı önlem alınması sağlatılır. Bunun yanında batarya durum kestirimleri için (BŞD, BGSD vb.) hesaplanmasında ve batarya grubundaki hücrelerin dengelenmesinde hücre gerilimlerinden faydalanır. Gerilim değerleri gibi akım değerlerinin de ölçülmesi ve izlenmesi gerekir. Akım değeri istenilen hücrenin ya da batarya grubunun ana hat kablosuna bağlanan bir alan etkili (hall effect) akım sensörü ya da bir şönt direnci ile ölçülür. BYS ölçülen değerlere göre batarya akımının sınır koşullarının dışına çıkmamasını sağlar. Ayrıca akım değeri bataryanın BŞD'nin kestirim için önem arz etmektedir. Bataryalar değişen ortam, yol ve sürüş profiline göre sıcaklıkları yükselir veya düşer. Sıcaklığın değişimi bataryanın çalışma yapısını değiştirerek erken yaşlanmasına ve verimsizleşmesine neden olur. Bu yüzden bataryanın en uygun çalışma sıcaklığında olması istenir. BYS hücrelerin ve batarya grubunun belirli noktalarına yerleştirilen sıcaklık algılayıcıları (termistör, termokupl) vasıtasıyla belirli aralıklarla ölçümler alır ve değerlendirir. Böylelikle sıcaklık artığında soğutucunun, sıcaklığı azaldığında ısıtıcının devreye girmesini sağlar.



Şekil 1. BYS'nin Genel Gösterimi

2.2. Bataryanın Güvenliği, Koruma ve Haberleşme

BYS temel görevlerinden bir tanesi de pilin zarar göreceği etmenlere karşı pili korumak ve hem batarya için hem de araç kullanıcıları için güvenlik önlemleri almaktır. BYS algılayıcılardan gelen sinyal durumunu çevrimiçi arıza yöntemleri kullanarak arızanın nerede olduğu tespit edip hem güvenliği sağlar hem de kullanıcıya ikaz ve bilgiler verir. EA'larda batarya ile ilgili arızalar genellikle aşırı şarjdan kaynaklı yüksek gerilim, aşırıdeşarjdan kaynaklı düşük gerilim, yüksek akım, duman, sızıntı, yüksek veya düşük sıcaklık, kısa devreler, bağlantı yerlerindeki oluşan gevşeklikler, yalıtımı deforme olmuş yerler, sensör hataları, aktüatör ve kontrollör arızalarıdır (Xiong, 2020). Bataryalardaki tehlikeler genellikle bataryanın içyapısındaki kimyasal yapı ile ilgilidir. Örneğin bataryaların çalışma sıcaklığı hem bataryanın elektrokimyasal yapısına bağlı hem de çevre koşullarına bağlıdır. Bataryanın zarar görmemesi ve düzgün çalışma için en uygun çalışma sıcaklığı aralığında olması gerekir. BYS yukarıda bahsedilen arızaları tespit eder ve güvenliği sağlar.

Batarya güvenliği ve korumayı sağlarken çeşitli haberleşme protokolleri kullanır. Haberleşme protokolleri BYS sisteminin ve diğer tüm araç bileşenlerinin birbirleriyle etkili ve güvenli çalışması adına önemli rol üstlenmektedir. Haberleşme protokolünün seçimi batarya tarafından belirlenmez, batarya uygulaması ile belirlenmelidir. Basit BYS'ler de batarya grubunun durumunu dış dünyaya, kullanıcıya veya sisteme bildirmek

için genellikle dijital sinyaller kullanır. Bu sinyaller genel olarak açık-kapalı, arıza var-yok, şarj başladı-bitti vb. şeklindedir. Ancak elektrikli araçlarda kullanılan BY2, aracın düzgün çalışmasını sağlamak için aracın dış dünya ve motor kontrolörü ile etkili ve güvenli bir iletişim kurmalıdır. Bu yüzden EA'lar gibi gelişmiş batarya grupları için gelişmiş bazı standart ve özel haberleşme protokolleri kullanılır. En yaygın olarak kullanılan haberleşme protokolleri RS232, RS485, Controller area network (CAN) Bus, Local interconnect network (LIN), Ethernet, Universal Serial Bus (USB), Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) port, Serial Peripheral Interface (SPI) vb. protokollerdir (Väyrynen ve Salminen, 2012). Bunlar arasında EA'lar için en yaygın olarak kullanılan ve standart hale gelen CAN bus haberleşme protokolüdür (Rajalakshmi ve Razia Sultana, 2020). CAN Bus haberleşme protokolü, 1983 yılında Robert Bosch tarafından, otomotiv uygulamalarında seri haberleşme için geliştirilmiş bir protokoldür (Navet vd., 2005). Haberleşme protokolleri ile sistemler birbiriyle haberleşirken, bazı araç bilgilerinin daha sonra kullanılmak üzere depolanması ihtiyaç vardır. Bilgilerin depolama görevini EEPROM, SD kart, bulut sistemleri, flash hafıza vb. hafıza kaydedici araçlar yürütmektedir. Bu bilgiler araç testleri, bakımı, onarımı, servisi vb. işlemler için daha sonra ihtiyaç duyulması halinde kullanabilmeye olanak tanımaktadır. Araçlar için haberleşme protokolleri ile ilgili daha detaylı bilgilerden faydalanmak için literatürde bazı çalışmalar derlenmiştir. Navet vd. (2005), otomotiv uygulamalarında kullanılan haberleşme protokolleri üzerindeki trendleri incelemişlerdir. Sonuç olarak otomotiv sektöründen kullanılan mevcut haberleşme sistemlerinin optimize edilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Saraf (2012) ise otomotiv uygulamalarından kullanılan geleneksel ve gelecekte kullanılabilecek haberleşme protokollerini incelemişlerdir. Geleneksel yöntemler ile gelecek yöntemler kendi aralarında özellikleri çıkartılmış ve karşılaştırılmışlardır. Haberleşme protokollerinin kullanım amaçları doğrultusunda bazı avantaj ve dezavantajları olduğu ve kullanılan sisteme göre ağ güvenilirliği, yonga seti fiyatı, kurulum maliyeti vb. birçok faktörün dikkate alınması gerektiğini vurgulamıştır.

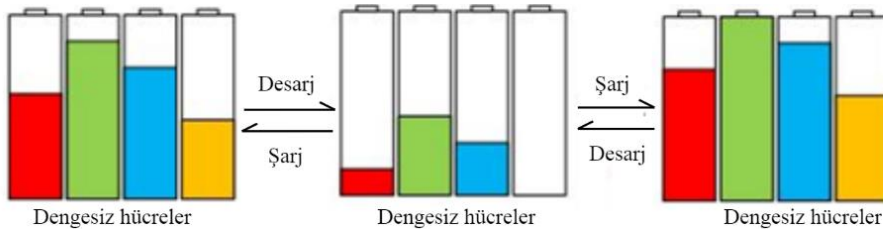
2.3. Hücre Dengeleme

BY2'nin temel görevlerinden bir tanesi de batarya grubu içerisinde bulunan pillerin dengede (aynı kapasitede) durmasını sağlamaktır. Batarya grubu içerisindeki hücrelerin dengesizliğine sebep olan iki etken vardır. Biri iç etken diğeri ise dış etken olarak kategorize edilebilir (Cao vd., 2008; Daowd vd., 2011; Drori ve Martinez, 2005; Omariba vd., 2019; Xiujuan Zhang vd., 2011). İç etkenler üretim farklılıklarından kaynaklanır. Bataryalar aynı fabrika ortamında ve şartlarında üretilmesine rağmen kimyasal yapı yüzünden farklı iç direnç ve kapasiteye sahiptirler. Farklı kapasite değerleri, aynı özellikte olması beklenen bataryaların kendi kendine deşarj olma oranlarının farklı olmasına sebep olmaktadır. Dış etkenler, bataryaların seri/paralel bağlanmasına, ortam sıcaklığının etkisine ve entegre devre kartlarının tasarım hassasiyetine göre dengesizliğe neden olmaktadır.

Dengelemenin temel amacı batarya grubunun kapasitesini en yüksek seviyesine çıkarmak ve tüm batarya grubu elemanı olan hücrelerin aynı kapasite değerinde olmasını sağlamaktır. Batarya grubu daha önceden de bahsedildiği gibi gerekli gerilim/akım/kapasite değerlerini sağlamak için yüzlerce hücrenin seri/paralel bağlanmasıyla oluşturulur. Pil dengeleme işlemi üç veya üçten fazla hücrenin birbiriyle seri bağlanması durumunda bataryanın güvenliği ve verimi için kaçınılmaz bir durumdur (Martinez vd., 2005). Paralel bağlı hücreler kendi kendine dengelenme eğiliminde olduğundan dolayı herhangi bir dengesizlik söz konusu değildir. Batarya grubundaki seri hücrelerden kapasitesi en düşük olan hücre batarya paketinin kapasitesini belirler. Bundan dolayı seri hücrede herhangi bir dengesizlik olması durumunda diğer hücreler dolu olsa bile batarya grubunun kapasitesi, kapasitesi düşük olan hücreden dolayı düşük olur. Şekil 2'de görüldüğü gibi dengeleme sistemi olmaz ise şarj esnasında kapasitesi az olan hücreler şarj olmaya devam ederken, dolu olan hücreler aşırı şarj akımına maruz kalacaktır. Bu durumda hücrelerin aşırı ısınması, patlayıp gaz açığa çıkarmasına neden olur. Deşarj esnasında ise diğerlerine göre dolu olan hücrelerin kapasitesi azalırken, zaten az olan kapasitesi biten hücreler aşırı deşarja maruz kalır. Bu durumda bataryanın kimyasal yapısının bozulmasına ve erken yaşlanmasına sebep olur. Yukarıda bahsedilen olumsuz sebeplerden ötürü batarya paketinin performansının artırılması, erken yaşlanmasının azaltılması ve aracın güvenliğinin sağlanması için hücrelerdeki dengesizliğin giderilmesi elzemdir. Konunun çok önemli ve gerekli olmasından dolayı araştırmacıları cezbetmiş birçok yazar araştırma ve derleme çalışmaları ile detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Cao vd. (2008), batarya dengeleme yöntemlerinin 3 gruba ayırarak açıklamışlardır ve karşılaştırma yapmışlardır. Karşılaştırma sonucunda yöntemlerin kullanıldığı uygulamaya göre farklı sonuçlar verdiği sonucuna varmışlardır. Hibrit elektrikli araç uygulamaları için anahtarlamalı sığaç yönteminin uygun olduğunu

önermişlerdir. Carter vd. (2020), pil dengeleme yöntemlerini detaylı bir şekilde anlatan derleme çalışması yapmışlardır. Çalışmalarında sığaç, indüktör ve transformatör bazlı yöntemleri açıklamak suretiyle karşılaştırmalarını yapmışlardır. Karşılaştırma sonucunda yük dengeleme devresi veya şemasının bu alandaki araştırmacılar arasında standart hale gelmesine olanak sağlanan bir çözüm sunmuşlardır. Daowd vd. (2011), MATLAB/Simulink ortamını kullanarak çeşitli batarya dengeleme yöntemlerini derlemiş, simüle edilmiş ve detaylı karşılaştırmalarını yapmışlardır. Hücre dengeleme yöntemlerinin, maliyet, boyut, kontrol karmaşıklığı vb. yönleriyle farklılık gösterdiğini ifade ederek her türün uygulandığı sisteme göre kendi içinde avantajı ve dezavantajı olduğunu ve buna göre seçim yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Hoque vd. (2017a), EA uygulamaları için farklı türdeki pil dengeleme yöntemlerini kapsamlı bir incelemesi yapmışlardır. İnceleme sonucunda pil dengeleme işleminin EA'ların güvenli ve verimli çalışması için gerekli olduğu, mevcut yöntemlerin verimli çalışması teknolojik olarak hala istenilen seviyede olmaması ile beraber en iyi yöntemin; dengeleme hızı yüksek, verimliliği yüksek, hacmi küçük, düşük maliyete sahip olması gerektiği sonucuna varmışlardır. Omariba vd. (2019), çeşitli pil dengeleme yöntemlerini gözden geçirecek bu yöntemlerin pil performansına olan etkilerini irdelemişlerdir. Deneysel olarak analiz yapılarak, pil hücrelerinin parametrelerinde birçok sapma olduğundan dolayı pil dengelemesinin batarya grubunun performansı açısından çok önemli olduğunu vurgulamışlardır. Bu nedenle, pil dengeleme işlemi BYS tarafından uygun şekilde izlenmesi ve dengeleme işleminin piller şarj edilirken veya deşarj olurken aynı anda gerçekleşmesi gerektiğini önermişlerdir. Qi ve Dah-Chuan Lu (2014), bazı popüler hücre dengeleme tekniklerini, pil hücrelerindeki fazla olan enerjiyi kullanma yöntemine göre tanımlanmış ve kategorize ederek detaylı bir şekilde açıklamışlardır. Çalışma sonucunda uygun maliyetli, yüksek dengeleme hızına sahip, yüksek güvenilirlik sahip vb. tüm avantajlara içeren tek bir türün olmadığını ve bu yüzden de pil dengeleme yönetimleri ile ilgili daha fazla araştırma yapılması gerektiğini önermişlerdir.

Hücre dengeleme, EA'larda sıkça kullanılan lityum pil uygulamalarında özellikle rejeneratif frenleme veya şarj ile deşarjın sık meydana geldiği uygulamalar için gereklidir. Rejeneratif frenleme, Lityum İyon piller için sorunlara neden olabilmektedir. Bunun sebebi anlık rejeneratif frenleme akımı, hücre voltajının aniden yükselerek eşik voltajının üzerine çıkmasıyla elektrolit bozulmaya sebep olmasıdır (Moore ve Schneider, 2001). Pil paketindeki hücrelerin dengeli kabul edilmesi için hücreler arasındaki voltaj farkının 50 mV altında olması gerekmektedir (Saw vd., 2016). Şekil 3'te görüldüğü gibi literatürde pasif ve aktif dengeleme olmak üzere iki tür yöntem mevcuttur (Gallardo-Lozano vd., 2014; Hauser ve Kuhn, 2015; Hoque vd., 2017; Moore ve Schneider, 2001; Qi ve Dah-Chuan Lu, 2014; Saw vd., 2016).



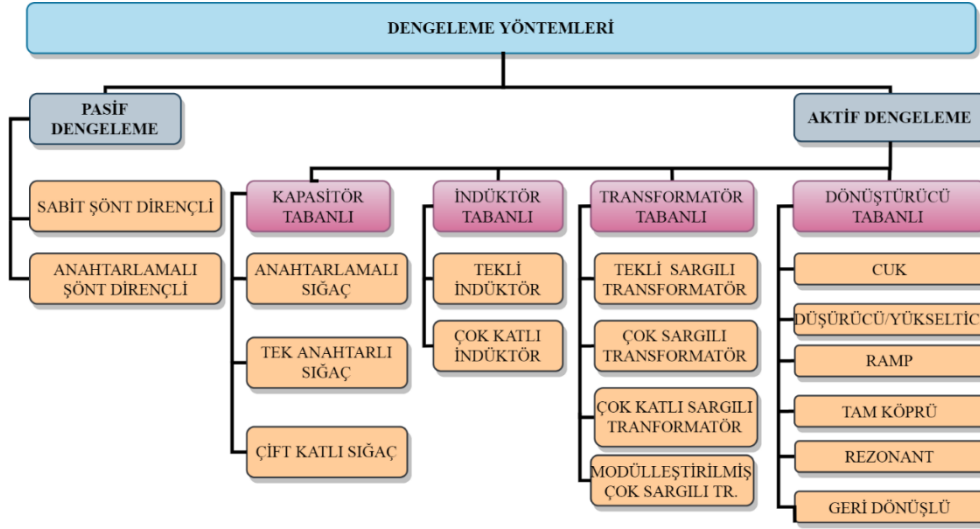
Şekil 2. Şarj ile Deşarj Durumunda Dengesiz Yüklerin Değişimi
(Qi ve Dah-Chuan Lu (2014) kaynağından revize edilmiştir.)

2.3.1. Pasif Dengeleme

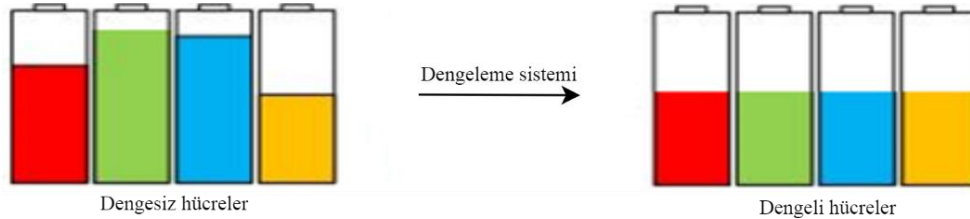
Hücre dengelemede en basit ve kolay uygulanabilen yöntem pasif dengeleme yöntemidir. Pasif dengeleme işleminde seri hücrelerden kapasitesi en düşük olan hücre belirlenir. Kapasitesi, en düşük hücreden fazla olan diğer hücreler, kendilerine paralel olarak bağlanan direnç üzerinden enerjisini harcayarak en küçük kapasitedeki hücrenin değerine ulaşmak suretiyle çalışır. Harcanan bu enerji paralel dirençler üzerinde ısı enerjisi olarak açığa çıkar. Buradaki dengeleme hızı paralel bağlanan direncin değerine göre belirlenir. Şekil 4'te dengesiz olan hücreler, kapasitesi en az olan hücrenin değerine kadar pasif dengeleme yöntemiyle dengelendiği görülmektedir.

Pasif dengeleme yöntemi iki alt kategoriden oluşur; sabit şönt direnci ve anahtarlamalı şönt direnci, Sabit şönt dirençli sistemde her hücreye paralel bir by-pass direnci vardır. Direncin paralel olduğu hücre gerilimi ne kadar fazla ise direnç üzerinde o kadar enerji harcanır. Böylelikle enerjisi yüksek olan hücreler, enerjisi en düşük olan hücrenin değerine ulaşana kadar deşarj olur ve dengesizlik giderilmiş olur. Sabit şönt dirençli sistem

kurşun-asit ve nikel bazlı bataryalar için uygundur. Ancak li-ion bazlı bataryalar için uygun değildir. Bunun sebebi de kurşun-asit ile nikel bazlı bataryalar aşırı şarj karşı dayanıklı iken, li-ion bazlı bataryalar dayanıklı olmamasıdır (Moore ve Schneider, 2001). Anahtarlamalı şönt dirençli sistemde, sabit şönt dirençli sistemdeki gibi paralel bağlı olan dirençlerin üzerinden akımın ne zaman geçeceğini kontrol etmek için transistör veya röle anahtarlamalı yöntemi kullanılarak gerçekleştirilir. Hücrelerde herhangi bir dengesizlik söz konusu olunca BYS bunu belirler ve enerjisi yüksek olan hücrenin anahtarı kapatılarak şönt direnci üzerinden enerjisini harcanmasını sağlar. Dengeleme gerçekleştikten sonra anahtar tekrar açılır. Bu yöntem sabit şönt dirençli sisteme göre daha verimli ve daha güvenlidir. Ayrıca EA'lar da sıkça kullanılan li-ion bataryalı sistemleri için de uygundur (Daowd vd., 2011). Şekil 5'te sabit dirençli ile anahtarlamalı sabit dirençli pasif dengeleme yönteminin devre çizimi görülmektedir.



Şekil 3. Hücre Dengeleme Yöntemleri

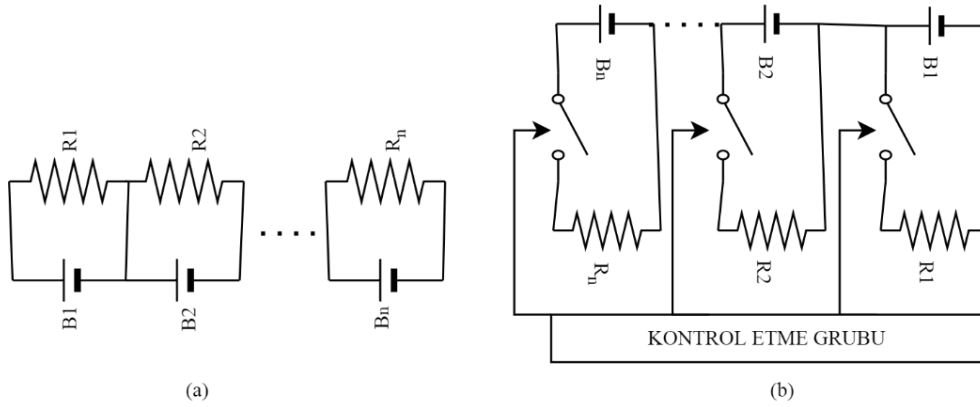


Şekil 4. Pasif Dengelemede Dengesiz Hücrelerin Dengelenmesi
(Qi ve Dah-Chuan Lu (2014) kaynağından revize edilmiştir.)

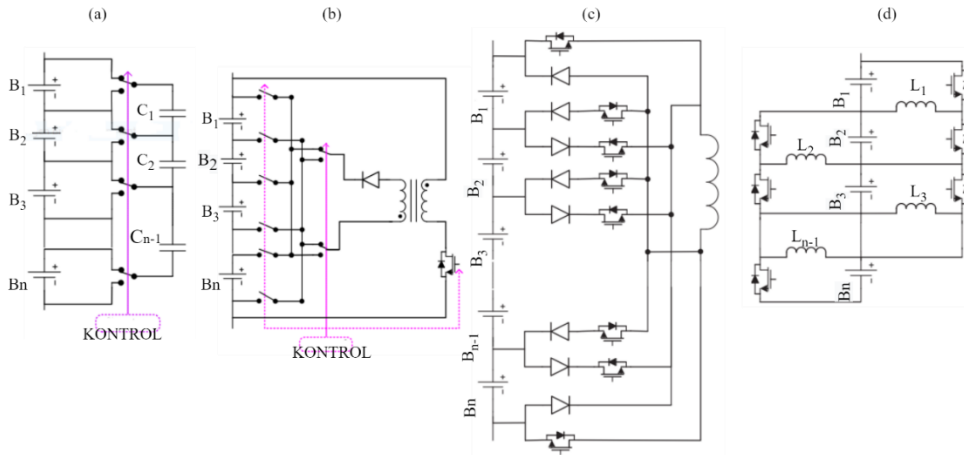
2.3.2. Aktif Dengeleme

Aktif dengeleme yönteminde kapasitesi yüksek olan hücre, enerjisini bir direnç üzerinden boşa harcamasının yerine, daha düşük kapasiteli hücrelere göndererek yapılır. Şarj esnasında en az bir tane hücrenin (kapasitesi en yüksek olan hücre) dolması beklenir. Dolma işlemi gerçekleştikten sonra BYS tarafından şarj işlemi durdurulur. Dolan hücrelerden kapasitesi az olan hücrelere enerji transferi yapılır. Deşarj esnasında ise kapasitesi en düşük olan hücre diğer hücrelerden daha önce biter. Aktif dengeleme sistemi, azalan kapasiteyi artırmak için kapasitesi yüksek olan diğer hücrelerden enerji transferi yapar. Bu işlemler tüm hücreler belli bir denge seviyesine ulaşana kadar devam eder. Li-ion bazlı bataryaların sıcaklığı en uygun çalışma koşullarında büyük bir hassasiyetle korunması gerektiğinden dolayı aktif dengeleme uygulanması pasif dengelemeye göre daha verimlidir. Aktif dengeleme yöntemi li-ion bataryaya paketine kullanan EA'lar için uygulanabilecek en iyi yöntemdir. Üç veya daha fazla seri bağlanan li-ion pillerin aktif dengeleme yöntemleriyle dengelenmesi daha uygundur (Cao vd., 2008). Şekil 6'da gösterildiği gibi aktif dengeleme yönteminde kapasitör, indüktör, transformatör ve güç dönüştürücüleri içeren harici devreler kullanılır (Hoque vd., 2017). Şekil 3'te gösterildiği gibi aktif dengeleme yönteminde birden çok farklı yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler bazı yazarlar tarafından detaylı bir şekilde derlenmiş ve araştırılmıştır (Cao vd., 2008; Carter vd., 2020; Daowd vd., 2011; Duraisamy ve Kaliyaperumal, 2020; Gallardo-Lozano vd., 2014; Hoque vd., 2017). Yöntemler ile ilgili detaylı

bilgiler için referans olarak verilen kaynaklarda faydalanılabilir. Bu çalışmada bu yöntemlerin açıklanması ve karşılaştırmaları Dengeleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması bölümünde (2.3.3.) verilmiştir.



Şekil 5. Pasif Dengelemede Dengesiz Hücrelerin Dengelemesi



Şekil 6. Aktif Dengeleme Yöntemleri **a)** Anahtarlamalı Sığaç, **b)** Tek Sargılı Transformator, **c)** Tekli İndüktör, **d)** Düşürücü-Yükseltici Dönüştürücü (Hoque vd., 2017)

2.3.3. Dengeleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Derlenen çalışmalardan batarya dengeleme sistemlerinin bataryanın ömrünü artırdığı ve aynı zamanda enerji sağladığı sistemin güvenliğini artırdığı tespit edilmiştir. Ancak yine de en uygun yöntemin hangisi olduğu kesinlikle tespit edilmemiştir. Bu çalışmada yöntemler, dengeleme hızı (DH), uygulanabilirlik (U), kontrol karmaşıklığı derecesi (KKD), boyut olarak kapladığı alan (H), verimlilik (V), ve maliyet (M) faktörleri bağlamında farklı etkilere göre değerlendirilmiştir. Her bir yöntemin kullanılacak sisteme göre kendi içerisinde avantaj ve dezavantajlar sahip olduğu ve bu şekilde değerlendirilmesi gerektiği kanaatine varılmıştır. Çalışmalardan derlenen yöntemler sırasıyla; #1 (Sabit şönt dirençli), #2 (Anahtarlamalı şönt dirençli), #3 (Anahtarlamalı sığaç), #4 (Tek anahtarlı sığaç), #5 (Çift katlı sığaç), #6 (Tekli indüktör), #7 (Çok katlı indüktör), #8 (Tekli sargılı transformator), #9 (Çok sargılı transformator), #10 (Çok katlı sargılı transformator), #11 (Mödüleştirilmiş çok sargılı transformator), #12 (Cuk dönüştürücü), #13 (Düşürücü-Yükseltici dönüştürücü), #14 (Ramp dönüştürücü), #15 (Tam köprü dönüştürücü), #16 (Rezonant dönüştürücü), #17 (Geri dönüşlü dönüştürücü) olarak adlandırılmıştır. Tablo 1'de DH (çok yüksek: %100, yüksek: %75, orta: %50, düşük: %25), U (kolay: %100, orta: %75, zor: %50, çok zor: %25), K (çok basit: %100, basit: %75, orta: %50, karmaşık: %25), H (çok küçük: %100, küçük: %75, orta: %50, büyük: %25), V (çok iyi: %100, iyi: %80, orta: %60, düşük: %40, çok düşük: %20), M (çok ucuz: %100, ucuz: %75, orta: %50, pahalı: %25) olarak derecelendirilmiştir. Her bir faktörün derecesi belirlenmiş ve toplamda 6 faktöre bölünerek bir ortalama alınmıştır. Böylelikle ilgili faktörler bağlamında, yöntemler arasında bir kıyas yapılmıştır. Ayrıca dengeleme yönteminde kullanılan devre elemanları R (direnç), L (indüktör), C (sığaç), A (Anahtar), D (Diyot), T

(Transformatör) sayıları da Tablo 1’de verilmiştir. Tablodaki k değeri seri bağlı hücre sayısı, m değeri ise modül sayısını ifade etmektedir.

Tablo 1. Hücre Dengeleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

	DH	U	KKD	H	V	M	R	L	C	A	D	T	ORT.
#1	%25	%100	%100	%100	%20	%100	k	0	0	0	0	0	%74
#2	%25	%100	%75	%100	%40	%100	k	0	0	k	0	0	%73
#3	%25	%75	%50	%50	%100	%50	0	0	k-1	2k	0	0	%58
#4	%50	%75	%25	%75	%100	%75	0	0	1	k+5	0	0	%67
#5	%50	%75	%50	%50	%100	%50	0	0	2k-3	2k	0	0	%63
#6	%75	%75	%25	%50	%80	%50	0	1	0	2k	2k	0	%59
#7	%75	%75	%25	%50	%80	%50	0	k-1	0	2k-1	0	0	%59
#8	%50	%50	%25	%50	%60	%25	0	2	0	k+6	1	1	%43
#9	%50	%50	%50	%25	%60	%25	0	k+1	0	1	k	1	%43
#10	%50	%75	%50	%25	%60	%25	0	2k	0	k	k	k	%48
#11	%50	%50	%25	%25	%80	%25	0	k+2m+1	0	m+1	m+k	m+1	%43
#12	%75	%75	%25	%50	%80	%50	0	2k-2	k-1	2k-2	0	0	%59
#13	%100	%50	%25	%50	%100	%50	0	k-1	0	2k-2	0	0	%63
#14	%50	%25	%25	%25	%60	%25	0	k/2	k	k	k	0	%35
#15	%100	%75	%25	%25	%100	%25	0	0	m	4m	0	0	%58
#16	%50	%25	%25	%25	%80	%25	0	4k-4	k-1	2k-2	0	0	%38
#17	%50	%75	%50	%25	%60	%25	0	2	1	2k+3	1	1	%48

Tablodan anlaşılacağı üzere en iyi dengeleme yöntemi tüm faktörlerden %100 derece alabilen yöntemdir. Ancak bazı limitlerden dolayı bu durum pratikte henüz pek mümkün görünmemektedir. En iyi dengeleme hızını özellikle düşük maliyet açısından karşılayabilecek olan yöntem EA’ların gelişimi açısından önemli bir katkı sunacaktır. Pasif dengeleme yöntemleri (#1, #2) maliyet, boyut, uygulanabilirlik ve kontrol yapısı bakımından iyi derece almasına rağmen, verimlilik ve dengeleme hızı bakımından zayıf kalmaktadır. Sığaç (#3, #4, #5) tabanlı sistemler verimlilik bakımından çok iyi, diğer faktörler bakımından da tatmin edici olmasına rağmen, dengeleme hızı açısından istenilen seviyeye yakalayamamaktadır. İndüktör tabanlı sistemler (#6, #7) dengeleme hızı ve verimlilik bakımından nispeten daha iyi olsa da kontrol yapıları karmaşıktır. Yüksek frekans anahtarlama ile yüksek akım durumunda filtre kapasitörler gerektirmektedir. Transformator tabanlı sistemlerde (#8, #9, #10, #11) yüksek güç uygulamalarında, yüksek akımı, güç kaybı az olarak verimlilikle taşıyabilmesine rağmen dengeleme hızları orta seviyelerde, maliyetleri fazla, kapladığı alanın büyüklüğü, manyetizma sorunu ve kontrol karmaşıklığı bakımından dezavantajlara sahiptir. Dönüştürücü tabanlı sistemlerin (#12, #13, #14, #15, #16, #17) dengeleme hızı ve verimlilikleri çok iyi olmasına rağmen, pahalı olması, kontrol edilmesi için akıllı yöntemler gerektirdiği, kapladığı alanın fazla olması gibi olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, derlenen çalışmalar ışığında EA’larda batarya dengeleme yönteminin gerekli olduğu ve bundan dolayı dengeleme yöntemlerinin daha çok araştırılıp geliştirilmesi ve en düşük maliyetle en iyi dengeleme hızı ve verimliliği yakalayabilen sistemlerin kurulması gerektiği yazarlar tarafından önerilmektedir.

2.4. Batarya Durum Kestirimleri

Bataryalar karmaşık, lineer olmayan ve zamanla değişen sistemler olduğu için anlık durumları farklılık göstermektedir. EA’larda bataryanın güvenli çalışma bölgesinde ve etkili bir şekilde çalışması için BYS tarafından anlık ve değişen zaman aralıklarında batarya durumlarının izlenmesi gerekmektedir. Bu işlemin yapılması adına, bataryanın ölçülebilen değişkenleri olan terminal gerilimi, çektiği akım ve yüzey sıcaklığı (bataryanın yüzey sıcaklığı, iç sıcaklığını temsil etmediği için hata payı mevcuttur.) değerleri ile batarya

durumlarının kestirimi yapılmaktadır. Çeşitli algoritmalar ve yöntemler geliştirilerek bataryanın şarj durumu (BŞD), bataryanın genel sağlık durumu (BGSD), bataryanın işlev durumu (BİD) ve bataryanın enerji durumu (BED) gibi batarya durumları kestirimleri yapılmaktadır. Buradaki 'kestirim' ibaresinin kullanılmasının sebebi, bahsedilen durumların doğrudan ölçülemediği dolayısıyla çeşitli değişkenlere ve algoritmalara bağlı olarak tahmin ve yaklaşımlara dayandırılmasıyla ilişkilidir. Batarya durum kestirimi yöntemleri ile ilgili literatürde bazı derleme ve araştırma çalışması yapılmıştır. Cuma ve Koroglu (2015), batarya yönetimi için durum kestirimiyle beraber, araç enerji yönetimi ve araç kontrol yönetimi ile ilgili durum kestirim yöntemlerini detaylı bir şekilde derlemişlerdir. Literatürde hibrit ve bataryalı elektrikli araçlarda kullanılan bütün kestirim yöntemlerinin detaylı bir şekilde açıklayan bir çalışmanın olmadığı ve yaptıkları çalışma ile literatürdeki bu boşluğun doldurulduğunu vurgulamışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunun, bu konudaki araştırmacılara genel bir bakış açısı kazandıracaklarını belirtmişlerdir. Hu vd. (2019), batarya durum kestirimlerinden olan batarya şarj durumu, batarya enerji durumu, batarya genel sağlık durumu, batarya güç durumu, batarya sıcaklık durumu ve batarya güvenlik durumu ile kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Bütün batarya durumlarının açıklanması ve literatürde var olan yöntemleri derleyerek okuyucuya öneriler sunmuşlardır. Çalışma sonucunun, yeni nesil batarya yönetim sistemlerinin geliştirilmesi adına çalışma yapacak araştırmacılara katkı sunacağını belirtmişlerdir. Wang vd. (2020), BYS için en yaygın olarak kullanılan pil modelleme ve batarya durum kestirimlerini sistematik bir şekilde incelemişlerdir. Bunun yanında gelecek nesil batarya durum kestirimi yapacak BYS'ler ile ilgili araştırmaları ve bakış açılarını açıklamışlardır. Gelecekte çok durumlu ortak kestirim, hata teşhisi ve sağlık yönetimini içeren teknolojilerin olacağı ve büyük veri, bulut bilişim platformuna dayalı durum kestirimleri yapacak BYS türlerinin olacağını belirtmişlerdir.

2.4.1. Batarya Şarj Durumu (BŞD)

EA'lar da BŞD, BYS tarafından belirlenmesi gereken önemli göstergelerden birisidir. Tanım olarak BŞD, bataryada anlık var olan kapasitenin ($K(t)$), bataryanın hali hazırda sağladığı maksimum kapasitesine (K_m) olan oranının yüzdelik olarak göstermesi olarak ifade dilmektedir. BŞD'nin matematiksel formülü Eşitlik 1'de verilmiştir. Batarya tam şarj iken, yarı şarj iken ve tam deşarj iken BŞD değerleri sırasıyla %100, %50, %0 değerlerine almaktadır.

$$BŞD(t) = \frac{K(t)}{K_m} \times \%100 \quad (1)$$

BŞD EA'lar da bataryanın kapasitesinin belirlenmesi için kullanılır. Böylelikle aracın ne kadar daha sürüş menzilinin olduğunu kullanıcıya göstermesini sağlar. Bu yönüyle bakıldığında klasik araçlardaki yakıt göstergesini ifade etmektedir. BŞD'nin bilinmesi bataryada ne kadar enerji kaldığının yanı sıra bataryanın aşırı şarj/deşarj akımına karşı da koruma sağlamaktadır. Doğru bir BŞD kestirimi bataryanın ömrünü artırmaya katkı sağlayarak hem ekonomik açıdan hem de güvenlik açısından EA'lardaki performansın artmasına doğrudan katkı sağlar. Bataryaların ve özellikle EA'larda sıkça kullanılan batarya türü olan Li-ion bataryaların karakteristiklerinin lineer olmaması, zamanla değişmesinden dolayı kestiriminin yapılması da zorlaşmaktadır. Özellikle EA'larda ani yüklenme durumu, rejeneratif frenleme, batarya gurubundaki hücrelerin arasındaki denge verimliliği, hücre yaşlanması, batarya sıcaklığı, bataryanın kendi kendine deşarj olma durumlarına bağlı olarak batarya karakteristiğinin sürekli değişmesinden dolayı doğru bir BŞD'nin ölçülmesi/kestirimi BYS tarafından yapılması elzemdir. BŞD, Elektrolit Ph, yoğunluk ölçümü, katotik dural akım (galvanostatik) darbeleri gibi pilin fiziksel ve kimyasal özelliklerden yola çıkarak direk olarak ölçülebilir. Ancak bu değişkenleri ölçmek için çok pahalı ve bazı limitlerden dolayı pratikte uygulanması zor olan ölçüm araçlarına ihtiyaç vardır (Rezvanizani vd., 2014). Bundan dolayı BŞD'nin doğrudan ölçülmesi henüz mümkün değildir. Ancak çeşitli sensörler vasıtasıyla bataryanın rahatlıkla ölçülebilen değişkenleri olan gerilim, akım ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak kestirim yapılması mümkündür. BŞD kestirim yöntemleri çeşitli yazarlardan tarafından farklı kategoriler altında gruplara ayrılmıştır (Messier vd., 2020; Ramadan vd., 2017; Rivera-Barrera vd., 2017; Wang vd., 2020; Xiong vd., 2013; Yang vd., 2020; Zou vd., 2015). Bu çalışmada, yöntemler kabaca 3 gruba ayrılmıştır. Bunlar geleneksel yöntemler, akıllı algoritmalar ile kestirim yöntemleri ve model tabanlı kestirim yöntemleridir.

Geleneksel yöntemlerden biri amper-sayma (AS) yöntemidir. AS yönteminde bataryanın deşarj/şarj akımı bir sensör vasıtasıyla ölçülür. Daha sonra zamana göre deşarj/şarj akımının integrali alınarak Eşitlik 2'deki gibi BŞD değeri hesaplanır (Zhe Li vd., 2017).

$$B\mathcal{S}D(t) = B\mathcal{S}D(t-1) - \int_{t-1}^t \frac{I_{pil}(t)\eta}{C_{pil}} dt, \quad t \geq 1 \quad (2)$$

Eşitlik 2’de BŞD(t) anlık BŞD değeri, BŞD(t-1) bir önceki hesaplanan BŞD değeri (t=1 için başlangıç değeri), C_{pil} pil kapasitesi, η coulomb verimliliği (Li-ion piller için 1 değerine çok yakındır ve genellikle ihmal edilir), I_{pil} şarj/deşarj akımını (şarj için negatif,deşarj için pozitif değerini alır) ifade eder. Bu yöntem basit ve kolay uygulanabilir bir yöntem olsa da çeşitli dezavantajlar sahiptir. Doğru bir kestirim için BŞD başlangıç değerinin bilinmesi gerekir. Ancak EA gibi gerçek zamanlı ve dinamik bir sistem için BŞD’nin başlangıç değerinin bulunması zordur. Ayrıca açık döngülü bir sistem olduğu için zamanla ölçüm ve gürültü hatalarının birikmesiyle kestirimin doğruluğu azalır. Bunların yanında bataryanın yaşlanması ve sıcaklık gibi etkenlerden dolayı batarya kapasitesi ve Coulomb verimliliğinin değişimiyle BŞD’nin hatalı olarak kestirilmesine sebep olmaktadır. Bazı kapsamlı kalibrasyonlarla kestirimin doğruluğu artırılabilir. Ancak her EA’ya kalibre edilmesi güç ve pratikte uygulanması çok zor bir yöntem olmaktadır (Messier vd., 2020). Sonuç olarak amper sayma yöntemi EA’larda gerçek zamanlı BŞD kestirimi yapmak için doğru ve uygun sonuçlar veremeyebilecektir. Ancak Li-ion bataryaya sahip EA’lar da düşük maliyetli ölçüm sensörleri varlığının olması, kestirim yapılırken gerekli olan gücün az harcanması ve diğer tekniklerle entegre edilmesi gibi avantajlara sahip olmasından dolayı kullanılabilir (Waag vd., 2014). Başlangıç BŞD değerinin hatasını azaltmak adına açık devre gerilimi yöntemi (ADG) olan diğer bir geleneksel yöntem kullanılmaktadır. ADG, bataryaya yük altında değil iken ve belli bir süre sonra kalıcı ve dengeli hal pozisyonuna geçtiğinde bataryanın terminal uçlarında ölçülen gerilim değeridir. Bu gerilim değeri ile BŞD arasında lineer olmayan bir ilişki vardır. ADG yönteminde, ADG ile BŞD arasında bire bir eşleşme yapılır ve bir veri tablosu oluşturulur. Dolayısıyla her bir ADG’ye karşılık bir BŞD değeri vardır. Burada BŞD’nin kestirimi, her bir ADG’ye karşılık gelen BŞD değeri, veri tablosundan alınarak yapılmaktadır. Bu yöntem basit ve kolay olsa da ADG’nin ölçülmesi için uzun süre beklemek gerektiğinden EA’lar gibi gerçek zamanlı sistemlerde uygulanması kullanışlı değildir. Yani bataryanın kalıcı hal durumuna gelip ADG’nin ölçülmesi için aracın en az 2 saatten fazla durması gerekmektedir (F. Yang vd., 2020). Bu durum sürüş esnasında ölçümün yapılması mümkün kılmamaktadır.

Akıllı algoritmalar ile kestirim yönteminde genellikle bulanık mantık (BM), destek vektör makineleri (DVM), sinir ağları (SA), genetik algoritmalar (GA) vb. yöntemler kullanılarak BŞD kestirimi yapılır. Bu yöntemler aynı zamanda makine öğrenmesi yöntemleri olarak da adlandırılır. Akıllı algoritmalar, pili bir kara kutu (black-box) gibi kabul eder ve çok sayıda örnekleme olarak giriş-çıkış arasındaki lineer olmayan bağıntıyla pilin iç dinamiklerini makine öğrenmesi ile modelleyip BŞD kestirimi yapmaktadır. Bu algoritmalar eğitilen veri setinin miktarına ve kalitesine bağlı olduğu için, sınırlı bir eğitim setinin olması BŞD kestirimin dayanıklılığını ve doğruluğunu olumsuz yönde etki edebilmektedir. Eğitim setinin, miktarının fazla ve kalitesinin yüksek olması için uzun bu zaman gerekmektedir. Aynı zamanda fazla ve kaliteli bir eğitim seti verisi için dijital sinyal işleme yonga sayısının fazla olması gerekmektedir. Bu durum maliyete doğrudan etki eder. Sonuç olarak EA’lar gibi gerçek zamanlı uygulamalar için maliyet ve uzun zaman problemi istenmeyen bir durum olduğu için akıllı algoritmaları kullanarak BŞD kestirimi yapmak zahmetli ve maliyetli bir yöntemdir.

Model tabanlı kestirim yöntemleri, bataryanın modellenip uyarlamalı yöntemler kullanılarak kapalı çevrim sistem ile kendi kendini regüle etmesiyle hata oranlarını düşürüp bir BŞD kestirimi yapılması ile gerçekleştirilir. Bataryanın dinamik karakteristiklerini modellemek için elektriksel eş değer devresi (EED) ile elektrokimyasal mekanizma (EKM) modelleri kullanılır. Model tabanlı yöntemle BŞD kestirimi yapmak için gözlemleyici ve düzenleyici yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar kalman filtreleri (KF), H sonsuzluk (H_∞), yinelenen en küçük kareler yöntemi (RLS), kayan kipli gözlemleyici (SMO), orantısal integral gözlemleyici (PIO), parçacık filtresi (PF) vb. yöntemleridir. RLS yöntemi bataryanın modelinden ölçülen değer ile gerçek ölçülen değerinin arasındaki ortalama kare hatasını azaltan bir filtreleme yöntemidir. RLS unutma faktörünü kullanarak, bataryanın dinamik modelindeki parametreleri ayarlayıp BŞD kestirimi yapmaktadır. H_∞ pilin zamanla değişen parametrelerini (sıcaklık, akım, gerilim, iç direnç) dikkate alır ve sistemin herhangi bir özelliğinin bilinmesine ihtiyaç duymaz. Bunun yanında ölçüm gürültülerinden de etkilenmez. Sade ve etkili bir yöntemdir ancak batarya yaşlanması, şarj/deşarj histerезisi, batarya sıcaklığı gibi etkenler SOC doğruluğunu etkileyebilmektedir. PF algoritması bir dizi parçacık ve Gaussian olmayan bir dağılım grubuna Monte Carlo simülasyon tekniğinin uygulanarak doğrusal olmayan batarya sisteminin olasılık yoğunluk fonksiyonuna yaklaşım işlemiyle BŞD kestirimi yapar (Hannan vd., 2017). SMO yönteminde batarya

parametrelerinin değişmesine karşın, sistemin dayanıklılık, kontrol ve kararlılığı korunmaktadır. BŞD kestirimi için batarya modelinin durum denklemleri elde edilir. Elde edilen durum denklemleri, gözlemci tasarlamak için kullanılır. Ancak bu yöntemde bataryanın en uygun parametrelerinin bulunması oldukça zordur (Xia vd., 2014). PIO yöntemi, bataryanın bilinmeyen giriş gürültülerine karşın sistemin durumunu kestirmek için kullanılan bir yöntemdir. Kalman filtresi tabanlı uygulamalarda batarya grubundaki her bir hücrenin dinamik bir sistem olarak kabul edilmesiyle işlem yapılır. Bu dinamik sistemin girişi akım ve sıcaklık, çıkışı ise gerilim olarak kabul edilerek bir BŞD kestirimi yapılmaktadır (Rivera-Barrera vd., 2017). Lineer Kalman filtresi (LKF) lineer sistemler için rahatlıkla uygulanabilir. Ancak EA'lardaki batarya sisteminin lineer olmaması ve zamanlı değişmesinden dolayı LKF uygulamak verimsiz olmaktadır. Bu yüzden Jacobian matrislerinin kullanılıp lineer olmayan parametreler birinci dereceden Taylor serileri açılmasıyla genişletilmiş kalman filtresi (GFK) olarak adlandırılan yöntemle sistemin lineerleştirilip BŞD kestirimi yapılması sağlatılır. Bir başka KF ailesinden, doğrusallaştırma işlemine gerek kalmadan kokusuz kalman filtresi (KKF) olarak adlandırılan yöntemle BŞD kestirimi yapılmaktadır. Tablo 2'de BŞD kestirim yöntemlerinin karşılaştırılması yapılmış ve ilgili alanda yapılan çalışmalar verilmiştir. Yöntemler ile ilgili detaylı bilgiler için Tablo 2'de verilen yapılan çalışmalardan faydalanılabilir.

2.4.2. Batarya Enerji Durumu (BED)

BED göstergesi, BŞD gibi bataryanın ömrü, performansı ve aracın gidebileceği yol hakkında temel bilgileri ifade etmektedir. BŞD bu durumu, kalan kapasite değerini amper-saat (Ah) cinsinden gösterirken, BED mevcut enerjiyi Watt-saat (Wh) cinsinden gösterir. Bataryanın temel görevi, enerji depolamak ve ihtiyaç durumunda kullanmaktır. EA'ların sürüş performansını gerçekleştirmesi, bataryasındaki enerji miktarına bağlıdır. Bundan dolayı BŞD kapasite kestirimi yerine, BED enerji kestirimi yapmak daha pratik ve doğru sonuçlar verecektir. Bu durum şöyle özetlenebilir; BŞD şarj/deşarj akımıyla doğrusal bir şekilde değişirken, BED gerilim değerini de hesaba kattığı için doğrusal olmayan bir şekilde değişir. Bataryadeşarj süresince enerji harcamaktadır. Bu enerji, bataryanın çıkışındaki yük üzerinde harcanmasıyla, bataryanın iç direnci üzerinde ısıya dönüşmesiyle ve elektrokimyasal işlemler için harcanan enerji miktarı gibi etkenlerle harcanır. İç direnç üzerindeki enerji kayıpları, bataryadaki elektrokimyasal değişimler, ADG'deki düşüşler BŞD kestiriminde hesaba katılmaz. Sadece yük üzerinden harcanan enerji değeri BŞD değerine etki etmektedir. Ancak diğer enerji kayıpları bataryanın kapasitesi değişiminden göz ardı edilmektedir. Oysaki tüm bu etkiler bataryanın enerjisine yani gerilimin ve zamana göre akım değerlerinin çarpılıp daha sonra toplanmasına bağlıdır. Bundan dolayı aracın gidebileceği yol aralığını tespit etmek için BED kestirimi yapmak daha anlamlı, daha güvenli ve daha doğru sonuçlar vermektedir (Zonghai Chen vd., 2019; Ye vd., 2018). Literatürde ilk BED tanımı ve kullanımı Mamadou vd. (2012) tarafından önerilmiştir. Çalışmalarında BED'yi bir enerji depolama aracının enerjik modellemesi için referans bir ölçü birimi olarak ele almışlardır. Bu tanıma göre mevcut enerjinin yani enerji durumunun, batarya en düşük voltaj değerine kadardeşarj olduğunda o andaki var olan enerjinin hali olarak tanımlamışlardır. Bu tanımın, bataryadan alınabilecek enerjiye doğrudan erişim sağlandığını belirtmişlerdir. Bir başka tanıma göre BED, bataryadaki mevcut enerjinin, bataryanın toplam enerjisine olan oranı yüzdelik bir şekilde göstererek bataryanın var olan kullanılabilir enerjisini ifade etmektedir. BED'nin matematiksel olarak gösterimi Eşitlik 3'te verilmiştir (Guenther vd., 2013).

$$BED(t) = BED(t-1) + \int_{t-1}^t \frac{P_{pil}(t)\eta_e}{E_{pil}} dt, \quad t \geq 1 \quad (3)$$

Burada BED(t) anlık BED değeri, BŞD(t-1) bir önceki ölçülen BED değeri (t=1 için başlangıç değeri), Epil pilin nominal enerji miktarı, η_epilin enerji verimliliği, Ppil pilin t anındaki güç değerini ifade etmektedir. BED değeri batarya tam şarj olduğunda %100, tamdeşarj olduğunda %0 değerini gösterir. BŞD'de olduğu gibi BED değeri de direkt olarak ölçülemez. Bu yüzden çeşitli kestirim yöntemleri geliştirilmiştir. Kestirim işleminde bataryanın gerçek zamanlı geriliminin, akımının, iç direncinin ve sıcaklığının bilinmesi gerekmektedir. EA'larda kullanılan özellikle Li-ion bataryalarda mevcut enerji, düşük sıcaklıklarda önemli ölçüde azalır. Yüksekdeşarj akımlarında batarya kesme voltajı altına geçince kapasitesi azalmasına karşın pilde enerji hala vardır. Ancak bu durumda, pil enerjisinin olmadığı sezilmekte ve pilin boş, tamamen işlevsiz hale geldiğini kabul edilmektedir. Bu özellik, BED'nin kestirimini zorlaştırmaktadır. Bu yüzden BED kestirimi BŞD'ye göre oldukça zor ve karmaşıktır. BED kestiriminde kullanılan yöntemler BŞD kestiriminde kullanılan yöntemlerle benzerlik gösterir. Direk ölçüm yöntemleri, model tabanlı-uyarlanabilir yöntemler (Zonghai Chen

vd., 2019; Guenther vd., 2013; He vd., 2015; Lin vd., 2017; Mamadou vd., 2012; Y. Wang vd., 2016), akıllı algoritmalar (Dong vd., 2015), makine öğrenimi (Liu vd., 2014) gibi yöntemler BŞD'deki yöntemler gibi kullanılır. Direk yöntemler kolay ve basit bir şekilde uygulanır. Ancak bataryanın yaşlanmasıyla değişen parametrelere karşı hassas, başlangıç için sistemin kalibrasyon gerektirdiği ve açık çevrim sistemler oldukları için bazı dezavantajlara sahiptir. Model tabanlı-uyarlanabilir yöntemler, kendi kendine hatayı minimize etmesi, uzun süreli güvenli çalışma, gürültülere karşı dayanıklı olması gibi avantajlara sahiptir. Ancak bu yöntemler de karmaşık matematiksel işlemler gerektirdiği için uygulanması oldukça zahmetlidir. Akıllı algoritma-makine öğrenmesi gibi yöntemler uygulama bakımından oldukça esnekler ve batarya gibi doğrusal olmayan sistemlerde BED kestirimi yapmak için oldukça kullanışlıdır. Bu yöntemlerin dezavantajı ise eğitilen veri seti sayısının çok fazla olması olarak gösterilebilir. Bu durum hafıza alanı gerektirdiği ve işlemci sayısını artırdığından dolayı maliyete doğrudan etki etmektedir. BŞD'den farklı olarak geleneksel yöntem olarak güç integrali yaklaşımı (Barai vd., 2016) ile karakteristik eşleşme yöntemleri (Mamadou vd., 2012) kullanılmaktadır. Güç integrali yaklaşımı açık döngülü bir sistem olduğu için, çevresel gürültülerden, sensör ölçüm gürültülerinden vb. etkenlere bağlı hassasiyeti zamanla bozulmaktadır ve uygun sonuçlar vermemektedir. İyileştirilmiş bir çözüm olarak, deşarj gücü, kalan enerji ve BED arasındaki ilişkiyi ele alan karakteristik eşleştirme yaklaşımı kullanılmaktadır. Ancak bu eşleşme yöntemi, güç integrali yöntemine göre daha verimli olmasına rağmen pahalı ve zaman alan kalibrasyon testlerine ihtiyaç duymaktadır (Hu vd., 2019).

2.4.3. Batarya Genel Sağlık Durumu (BGSD)

EA'larda batarya grubundaki hücreler zamanla ve kullanıma bağlı olarak elektrokimyasal yapıları bozulur. Bu durum batarya kapasitesinin ve bataryanın gücünün azalmasına doğrudan etki etmektedir. Bataryanın belli bir kullanım ömrü bulunmaktadır. Bataryanın artık kullanıma elverişsiz olduğu ve istenilen gücü sağlayamadığı zaman yaşam süresinin sona erdiği anlamına gelmektedir. Bataryanın artık kullanılmayacağı bilgisi sistem ve sürüş güvenliği açısından önemlidir. Bu yüzden bataryanın anlık genel sağlık durumu kullanıcıya bildirilmelidir. Böylelikle bataryanın değiştirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. EA sistemi için ömrünü tamamlayan batarya sistemi değiştirilmezse araç ve sürücü/yolcu açısından güvenlik problemleri ortaya çıkacaktır. Öyle ki, Nisan 2019 yılında Tesla S model EA'sı yer altı otoparkında aniden alevlenmiştir. Daha sonra yapılan incelemeler de sorunun batarya yaşlanması ile ilgili olduğu anlaşılmıştı (Tian vd., 2020). Böyle durumların yaşanmaması ve erken önlem almak için BGSD göstergesi kullanılmaktadır. BGSD bataryanın bozulma derecesini ve anlık performansı hakkında bilgileri sunmaktadır. BGSD batarya kullanımı açısından çok önemli bir parametre olsa da tanımı ve belirlenmesi hakkında kesin bir fikir birliği bulunmamaktadır. Genel olarak bataryanın anlık durumunun (halihazırda maksimum kapasitesi), bataryanın ilk servise çıktığı başlangıç koşullarına bağlı durumuna (nominal kapasite değeri) göre yüzdelik olarak ifade edilmesiyle tanımlanır. Bataryanın ilk fabrika çıkışı hali %100 BGSD oranı olarak verilmektedir. Zamanlı kapasitesinin azalması, iç direncinin artmasıyla tamamen işlevsiz hale geldiğinde BGSD %0 değerine yaklaşmaktadır. EA gibi batarya grubuna sahip olan sistemlerde var olan mevcut batarya enerjisi önemli olduğundan dolayı BSGD hesaplanmasında kullanılan parametre batarya kapasitesi değeridir. Batarya gücünün önemli olduğu HEA sistemleri için BGSD hesaplanmasından kullanılan parametre batarya iç direnç değeridir. Eşitlik 4 ile Eşitlik 5'te sırasıyla kapasite ve iç dirence bağlı BGSD'nin matematiksel formülleri verilmiştir (Park vd., 2020).

$$\left. \begin{aligned} Q_a &= \int_0^T I(t) dt \\ BGSD_K[\%] &= \frac{Q_a}{Q_n} \times \%100 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$BGSD_{ID} = \left| \frac{R_{ba_id} - R_{yb_id}}{R_{nb_id} - R_{yb_id}} \right| \times 100 \quad (5)$$

Eşitlik 4'te BGSDK kapasiteye bağlı hesaplanan BGSD yüzdelik değeridir. Q_a ile Q_n sırasıyla anlık ve nominal kapasite değerlerini ifade etmektedir. Eşitlik 5'te ise BGSD_{ID} iç dirence bağlı hesaplanan BGSD değeridir. R_{ba_id} , R_{nb_id} , R_{yb_id} değişkenleri sırasıyla batarya anlık iç direncini, batarya nominal iç direncini ve yaşlanmış bataryanın iç direncini temsil etmektedir.

Tablo 2. BŞD Yöntemlerinin Karşılaştırılması ve Bu Alanda Yapılan Çalışmalar

Metot	Tür	Avantaj	Dezavantaj	Yapılan Çalışmalar
Geleneksel Yöntem	AS	●Basit ●Kolay ●Ucuz	●Açık çevrim ●Başlangıç BŞD bilinmeli ●Akım sensör hassasiyeti önemli	(Ng vd., 2009; Qaisar, 2020; Zhang vd., 2020a, 2020b)
	ADG	●Basit ●Kolay ●Ucuz	●Açık çevrim ve çevrim dışı kestirim ●Bekleme süresi uzun ●Gerilim sensör hassasiyeti önemli	(He vd., 2012; Pan vd., 2017; Wang vd., 2018; Xing vd., 2014; Xiong, Yu, ve Wang, 2017; Zhang vd., 2020; Zheng vd., 2016)
Akıllı Algoritmalar	BM	●Lineer olmayan sistemlerde kullanışıdır. ●Sıcaklık, yaşlanma, akım değişmelerine karşı dayanıklı.	●Hesaplama karmaşık ●Pahalı veri işleme yongası gerekli ●Veri depolama maliyetli	(Chau vd., 2004; Hametner ve Jakubek, 2013; Hu vd., 2020; Salkind vd., 1999; Singh vd., 2004, 2006; Zenati vd., 2010)
	DVM	●Lineer olmayan ve yüksek boyutlardaki modeller için uygun. ●Doğru eğitilmiş veri seti ile hızlı bir BŞD kestirimi.	●Parametreler için uzun deneme yanılma süreci gereklidir. ●Hesaplama karmaşık	(Alvarez Anton vd., 2013; Álvarez Antón vd., 2013; Hansen ve Wang, 2005; Hu vd., 2014; Sheng ve Xiao, 2015)
	SA	●Bataryanın lineer olmayan durumlarına karşı dayanıklı	●Yüksek hafıza alanı gerektirir. ●Eğitilen veri seti fazla olmalıdır.	(Chemali vd., 2018; Eddahech vd., 2012; He vd., 2014; Jiménez-Bermejo vd., 2018; Zhou vd., 2013)
	GA	●Yüksek doğrulukla çalışır. ●Gürültülere karşı dayanıklıdır.	●Hesaplama karmaşık. ●Doğru sonuç için parametrelerin ayarlanması hassas.	(Chen vd., 2018; Lu vd., 2018; Shen, 2010, 2018a, 2018b; Ting vd., 2014)
Model Tabanlı	LKF	●Çevrim içi ve gerçek zamanlı çalışma. ●Gürültülere karşı dayanıklıdır. ●Başlangıç koşullara ihtiyaç duymaz.	●Lineer olmayan sistem için verimsizdir. ●Karmaşık matematiksel işlem gerektirir. ●Model ve ölçümün doğruluğu hassas olmalıdır.	(Campestrini vd., 2016; Choudhury vd., 2009; Dong vd., 2016; Yanwen Li vd., 2016; Mastali vd., 2013; Shrivastava vd., 2019; Urbain vd., 2007; Wei vd., 2017; Yatsui ve Bai, 2011; Yu vd., 2015)
	GKF	●Lineer olmayan parametreler karşın hassas bir şekilde kestirme işlemi yapar ●Başlangıç koşullara ihtiyaç duymaz.	●Doğrusallaştırma hatasının az olması gereklidir. ●Dayanıklılığı sınırlıdır. ●Jakobian matrisi gereklidir.	(Zheng Chen vd., 2013; Fang vd., 2018; Jiang vd., 2013; Plett, 2004; Ramadan vd., 2017; Shen, 2018c; Zhi vd., 2017)
	KKF	●Derecesi yüksek lineer olmayan sistemlere için uygun. ●Jakobian matrisine ihtiyaç duymaz.	●Modellin doğruluğuna ve bozucu etkilere karşı hassas.	(Zewang Chen vd., 2019; He vd., 2016; He vd., 2013; Sun vd., 2011; Tian vd., 2014; Zhu vd., 2020)
	H^∞	●Doğruluk, maliyet, zaman bakımından tatmin edicidir.	●Bataryanın sıcaklığı, yaşlanması ve histeresizi gibi değişen etkilere karşı hassastır.	(Lin vd., 2016; Xia vd., 2018; Xiong, Yu, Wang, vd., 2017; Zhao vd., 2018; Zhu vd., 2017)
	RLS	●Doğruluğu yüksektir ●Ölçülen gerilimdeki gürültüleri yok eder.	●Yüksek hesaplama işlemi gerektirir. ●Kararlı olması unutma faktörünün doğruluğuna ve bataryanın modeline bağlıdır.	(Duong vd., 2015; Hu Xiaosong vd., 2011; Yigang Li vd., 2020; Yue Li vd., 2016; Xia vd., 2017)
	SMO	●Çevrim içi ve kapalı çevrim ●Yüksek izleme kabiliyeti ve kararlı olması	●Kayma sistemini kontrol etmek için anahtarlar kazancını ayarlamak zordur.	(Chen vd., 2012; Xiaopeng Chen vd., 2014a, 2014b; Du vd., 2016; Kim, 2006; Ma vd., 2016)
	PIO	●Az hesaplama yükü ile doğru kestirim sağlar ●Sensör gürültülerine karşı dayanıklıdır	●Doğru kestirim için uygun kontrolör parametreleri seçilmesi zor ve gereklidir.	(Amir vd., 2018; Jun Xu vd., 2014; Meng vd., 2018; Wei vd., 2017; Yang vd., 2020)
	PF	●Az hesaplama yükü ile doğru kestirim sağlar.	●Karmaşık matematiksel işlemler gerektirir.	(Amir vd., 2018; Gao vd., 2011; Meng vd., 2018; Qiu vd., 2020; Yang vd., 2020)

EA'lardaki batarya kapasitesi/enerjisi %20 oranında azalınca (BGSD değeri %80 ve altına düşünce) ya da iç direnç değeri iki katına çıktığında (BGSD %100) bataryanın değiştirilmesi gerekmektedir (Yi Li vd., 2019). Ayrıca batarya BGSD'si %0 değerine yaklaşınca tamamen kullanılmayacağı anlamına gelmemelidir. Bu sadece kullanıldığı sistem için bir göstergedir. Öyleki EA'lar için yukarıda bahsedilen sınır değerlerinde bataryanın değiştirilmesi gerekliliği, EA'nın dinamik yol koşulları için artık yeterli gücü sağlamayacağından kaynaklanır. Oysaki sistemden çıkartılan bu bataryalar başka sistemler için hala kullanılabilir seviyede olabilir. Bu bataryalar küçük ölçekli rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi vb. sistemlerde enerji depolama kaynağı olarak kullanılabilir.

BGSD diğer batarya durumlarına göre varlığını en yavaş gösteren durumdur. İç direnç artması ve kapasite azalmasını etkileyen parametre değişimleri uzun süreçlere dayanır. Bunların yanında sıcaklık, şarj/deşarj oranı/çevrimi ve bataryanın yaşlanması BGSD'ye etki etmektedir. Bundan dolayı yaşlanmaya ve dolayısıyla kapasite azalmasına bağlı BGSD'yi belirlemek için uzun zaman gerekmektedir. Her ne kadar laboratuvar koşullarında hızlı bir şekilde testler yapıp doğru sonuçlar elde edilirse de EA'lar da zorlu ve dinamik yol koşullarında laboratuvardaki gibi donanımlı bir sistem olmadığından BGSD kestirimi yapmak oldukça zorlaşmaktadır (Xiong vd., 2018). Dahası diğer batarya durumları gibi BGSD de direkt olarak ölçülemez. Ancak batarya iç direnci ve kapasite gibi BGSD göstergelerini belirleyen çeşitli yöntemler ile kestirimi yapılmaktadır. Bu yüzden literatürde değişik kestirim yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler Tablo 3'te verildiği gibi çeşitli yazarlar tarafından farklı kategoriler altında ele alınmıştır. Tian vd. (2020), Yi Li vd. (2019), Xiong vd. (2018), Berecibar vd. (2016), Lipu vd. (2018) BGSD tanımı, matematiksel ifadesi, kategorileri, yöntemleri, analizleri, kestirim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları detaylı bir şekilde incelemişlerdir.

Tabloda verilen literatür çalışmalarında bu yöntemler detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Her bir ana kategorinin altında farklı yöntemler çeşitli dallara ayrıştırılmıştır. Her yöntem kullanıldığı sistemde ve amacına göre çeşitli avantajlar-dezavantajlara sahiptir. Derlenen çalışmalardan BGSD kestirim yöntemleri; direkt ölçüm yöntemleri, dolaylı ölçüm yöntemleri, uyarlamalı filtre tabanlı yöntemler ve veri-güdümlü yöntemler olarak 4 ana kategori altında değerlendirilebilir.

Direkt ölçüm yöntemleri, iç direnç, kapasite/enerji, empedans ölçümleri direkt olarak yapılmaktadır. En basit ve uygulanabilir yöntemdir. Hesaplama yükü azdır. Ancak doğru sonuçlar almak için ölçüm yapan cihazların çok hassas olması gereklidir. Öyle ki bazı parametrelerin ölçümü mevcut ölçüm cihazlarıyla ölçmek pek mümkün değildir. Bu yöntemlerin bazıları laboratuvar koşullarına ihtiyaç duyduğu için EA'lar için uygulanması uygun değildir. Ayrıca bu yöntemler de başlangıç koşullarına ihtiyaç duyulduğu için dezavantaja sahiptir.

Dolaylı ölçüm yönteminde ise kapasite ve iç direnç dolaylı yoldan ölçülmektedir. Bataryanın yaşlanmasıyla beraber bazı parametreler bataryanın kapasite ve iç direncine etki etmektedir. Bu etkilerin ölçülmesiyle dolaylı yoldan BGSD kestirimi yapılmaktadır. Bu etkiler katı elektrolit ara faz ince tabaka direnci, ADG-BŞD eşleşmesi, sabit gerilim altında şarj süresi, artan kapasite eğrisi (AKE), gerilim diferansiyeli eğrisi (GDE), ultrasonik dalga cevabı (UDC) vb. işlemlerle sonucu ortaya çıkmaktadır (Xiong, 2020). Dolaylı yöntemlerin uygulanması görece olarak kolaydır. Yüksek doğrulukla çalışmaktadır. Ancak bazı yöntemleri sıcaklık gibi değişen çevresel etkenlere karşı oldukça hassastır. Her ne kadar AKE, GDE ve UDC gibi yöntemlerle gerçek zamanlı sistemleri için uygun olsa da EA'lar gibi dinamik yol koşullarına sahip çevrim içi gerçek zamanlı sistemler için uygulanması zordur.

Uyarlamalı filtreleme yöntemleri, elektrokimyasal modeller ile elektrik eş değer devre modelleri ile rahatlıkla uygulanmaktadır. Uyarlamalı ve kapalı çevrim sistemler olduğu için doğruluk oranları yüksektir. Batarya iç parametrelerinin bulunması kolaydır. EA'lar gibi farklı kimyasal yapıya sahip bataryaların kullanıldığı çevrim içi sistemlere uygulamak için elverişlidir. Modellenen sistemin hassasiyeti, az ve doğruluğu iyi değilse yanıltıcı sonuçlar verecektir. Ayrıca ağır hesaplama yüküne sahip oldukları için yüksek performanslı denetleyicilere ihtiyaç duymaktadır. Bu durum maliyet açısından istenmeyen bir durumdur.

Veri-güdümlü yöntemler, makine öğrenmesine dayalı, optimizasyon algoritmalarına dayalı, gözleme dayalı vb. yöntemler içermektedir. Bu yöntemlerin avantajı bataryanın var olan ve değişen parametrelerin bilgisine

ihtiyaç duymamasıdır. Akıllı algoritmalara sahip oldukları için oldukça esnek ve kullanışlıdır. Yüksek doğrulukla kestirim yapmaktadır. Ancak doğru sonuçlar vermesi için eğitilen veri setinin yüksek miktar ve kalitede olması gereklidir. Genellikle diğer yöntemlerle beraber çalışma ihtiyacı duyar. Bu da işlem yükünü arttırmaktadır.

Tablo 3. Literatürde Yapılan Çalışmalardan Derlenen BGSD Kestirim Yöntemlerinin Kategorileri

Literatür çalışması	Kategori sayısı	BGSD kestirim yöntemleri
Wang vd. (2020)	4	Ölçüm&analiz yaklaşımı, Bayes tabanlı, gözleme tabanlı yaklaşım, Makine öğrenimi tabanlı
Park vd. (2020)	3	Deneyisel yöntemler, model tabanlı yöntemler, veri güdümlü yöntemler
Hu vd. (2019)	4	Fiziksel tabanlı modeller, deneyisel tabanlı modeller, veri güdümlü yöntemler, Artan kapasite analizi yöntemleri
Xiong vd. (2018)	2	Deneyisel yöntemler, model tabanlı yöntemler
Yang vd. (2018)	4	Direk ölçüm yöntemleri, uyarlamalı kestirim yöntemleri, model bozulması tabanlı, istatistiksel yöntemler.
Ungurean vd. (2017)	4	Coulomb sayma yöntemi, ADG yöntemi, empedans spektrumu yöntemi, Kalman filtreleri yöntemi.
Xu Zhang vd. (2018)	3	Batarya kapasitesi tabanlı, batarya empedansı tabanlı, batarya şarj/deşarj eğrileri tabanlı
Yang vd. (2017)	2	Olasılık tabanlı yöntemler, istatistik tabanlı yöntemler
Barré vd. (2013)	4	Elektrokimyasal model tabanlı, Eşdeğer devre modeli tabanlı, performans tabanlı yöntem, gözleme tabanlı., istatistiksel yöntemler
Berecibar vd. (2016)	2	Deneyisel tabanlı yöntemler, uyarlamalı kestirim tabanlı yöntemler
Lipu vd. (2018)	4	Direk ölçüm yöntemleri, uyarlamalı kestirim yöntemleri, veri güdümlü yöntemi, diğer yöntemler (hibrit)
Qian vd. (2019)	6	Kapasite tabanlı, DC direnç tab., özel alan empedansı tabanlı, AC empedans tabanlı, artan kapasite (dV/dQ) tabanlı, voltaj diferansiyeli tabanlı (dQ/dV)
Lu vd. (2013)	2	Dayanıklı model tabanlı açık çevrim yöntemleri, batarya modelleri tabanlı kapalı çevrim yöntemler

2.4.4. Batarya İşlev Durumu (BİD)

Yukarıda bahsedildiği üzere BŞD ve BED bataryanın doluluk oranını, BGSD bataryanın ilk servise çıktığı andaki durumuna göre sağlık durumunu ifade etmektedir. BİD değeri ise bataryanın BŞD, BED, BGSD, sıcaklık değeri ve şarj/deşarj oranına göre enerji verdiği sistemin ihtiyaç duyduğu anlık gücü, sağlayıp sağlamadığını gösteren bir batarya durum göstergesidir. Bunun yanında bataryanın en uygun çalışma aralığı zamanla değişebilir. BİD zamanla değişen bataryanın en uygun çalışma aralığında sistemin istediği gücü sağlayıp sağlamadığını kontrol etmek için de kullanılır. Bu bağlamda düşünüldüğünde mantıksal çerçevede aldığı ikili sayma (1/0) değerine göre çalışmaktadır. Eğer BİD=1 ise sistemin yapmak istediği görev için istenilen güç batarya tarafından sağlatılır; eğer BİD=0 ise yapılmak istenen görev için istenilen güç batarya tarafında sağlatılamayacağı anlamına gelmektedir. BİD ilk tanımı Meissner ve Richter (2003) tarafından açıklanmıştır. Çalışmalarında bataryanın belli görevi yerine getirebilme durumunu ifade etmek için BİD göstergesini BŞD ve BGSD'yi baz alarak kullanmışlardır. Aslında bataryanın güç kabiliyetini gösteren iki

gösterge vardır. BİD'in dışında, BGD (batarya güç durumu) göstergesi de kullanılmaktadır (Juang vd., 2012). Bazı yazarlar BİD durumunun ifade ederken ve bulurken BGD durumu cinsinden faydalanmıştır (Dong vd., 2016; Juang vd., 2012). BGD maksimum gücün, nominal güce olan oranın yüzdesel olarak ifade edilmesidir. BGD tanımı kullanılarak BİD'in matematiksel gösterimi Eşitlik 6'daki gibi gösterilebilir (Lu vd., 2013; Park vd., 2020).

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= P_{max} \\ BİD(t) &= \frac{P(t) - P(t)_{talep}}{P_{talep_{max}}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Eşitlik 6'da BİD(t) anlık BİD değerini ifade etmektedir. $P(t)$, $P(t)_{talep}$, P_{max} sırasıyla bataryanın anlık sağlayabildiği güç, sistem tarafından talep edilen güç, bataryanın maksimum sağlayabildiği güç (BŞD=%100, BGSD=%100, T nominal sabit sıcaklık değeri durumunda iken) değerleridir. Bu formül bataryadaki enerjinin yeterli gücü sağlayıp sağlamadığı sistemler için batarya işlevinin durum göstergesidir. EA sistemlerinde gidilebilecek yol için elektriksel enerjinin yeterli olup olmadığı önemlidir. Bu durumu ifade etmek için BİD değeri yukarıda da bahsedildiği ikili sayma sistemi mantığına göre formülize edilebilir (Hou vd., 2017). Bu durumu ifade etmek için Eşitlik 7-9 arasındaki formüller kullanılmaktadır.

$$Var\ olan\ güç = BŞD \times BGSD \times nominal\ kapasite \quad (7)$$

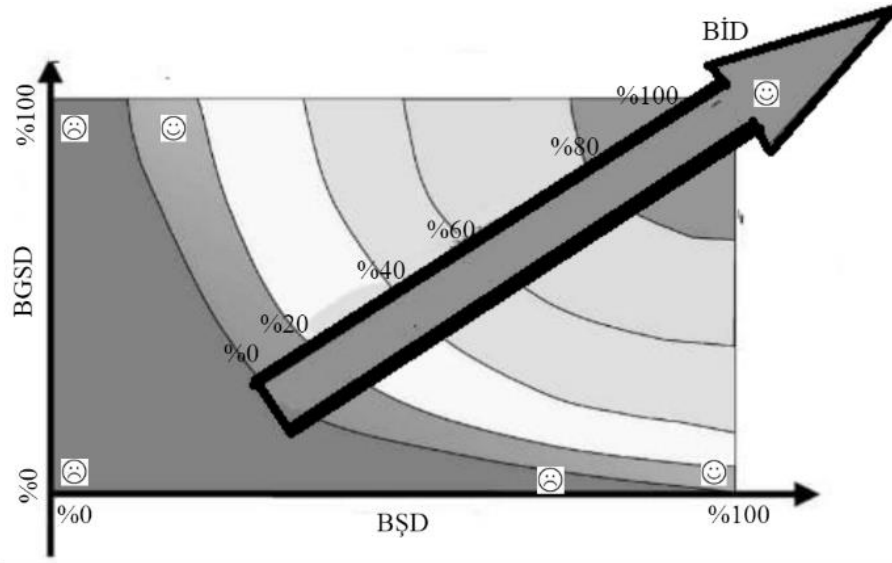
$$Harcanacak\ güç = ortalama\ güç\ tüketimi \times gidilecek\ mesafe \quad (8)$$

$$BİD = \begin{cases} 1, Eşitlik\ 7 \geq Eşitlik\ 8 \\ 0, Eşitlik\ 7 < Eşitlik\ 8 \end{cases} \quad (9)$$

Eşitlik 9'da da anlaşıldığı üzere batarya, sistem (motor gücü, klima, aydınlatma vb. elektriksel güç harcayan sistemler) tarafından istenilen gücü sağladığı takdirde, BİD=1 olmaktadır ve sistem aracın kontağını çalıştırabilmektedir. Eğer BİD=0 ise kontak çalıştırılmaz ve sürücüyü uyarı yapılır. Bir başka tanıma göre BİD, belirli bir kapasitedeki maksimum gücün şarj/deşarjı sırasında sağladığı maksimum anlık güç değerini ifade etmektedir. Dolayısıyla BİD kestirimi BGD kullanılarak bulunabileceği belirtilmiştir (Yi Li vd., 2019). Bunun için Eşitlik 6 yerine Eşitlik 10 kullanılabilir. $P_{maks_anlık}$ ve P_{maks} sırasıyla bataryanın maksimum anlık güç değerini ve belirli bir kapasiteye sahip bataryanın maksimum güç değerini ifade etmektedir.

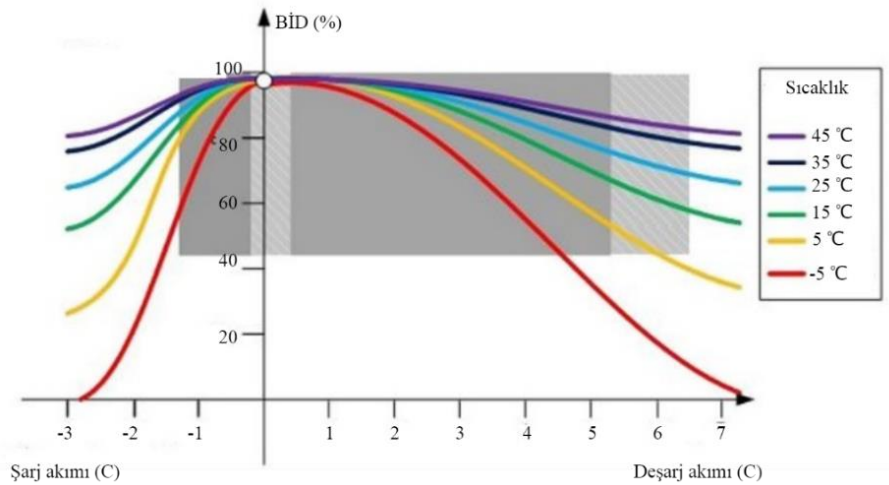
$$BİD = \frac{P_{maks_anlık}}{P_{maks}} \times 100 \quad (10)$$

Yukardaki eşitliklerden görüldüğü üzere BİD, bataryanın sıcaklık, BGSD, BŞD değerlerinde doğrudan etkilenir. BİD sürüş için yeterli gücün olup olmadığını tespit ettiği için etkilendiği parametrelerin doğru kestirilmesi gerekmektedir. Bu durum bataryanın durum kestirimlerinin birbirleriyle bağlantı içinde olduğu ve aynı zamanda önemli olduğunu işaret etmektedir. Şekil 7'de gösterildiği gibi farklı BGSD-BŞD değerleri BİD performansını istenilen seviyede karşılayabilmektedir. Örneğin sabit T sıcaklığında; yüksek BGSD ve düşük BŞD değerleri BİD performansını olumlu yönde etki etmektedir. Yine aynı şekilde düşük BGSD ve yüksek BŞD değerleri de BİD performansını olumlu yönde etki ettiği görülebilmektedir (Meissner ve Richter, 2003). Diğer taraftan yüksek sıcaklık değerinde, yüksek BGSD oranı ve düşük BŞD oranına sahip bataryanın işlevi, düşük sıcaklıktaki, düşük BGSD oranı ve yüksek BŞD oranına sahip batarya göre daha yüksektir (Lukic ve Emadi, 2008). Bu durumdan anlaşılacağı üzere sıcaklık etkisi BİD üzerinde çok büyük bir etkiye sahiptir. Öyle ki BGSD ve BŞD oranları tatmin edici seviyelerde olsa bile batarya sıcaklığı en uygun çalışma aralığında olmazsa BİD=0 olabilir.



Şekil 7. Sabit T sıcaklığında BİD'in BGSD ve BŞD değerlerine göre değişimi (Meissner ve Richter, 2003)

Batarya BİD değerine etki eden durumlar sadece sıcaklık, BGSD ve BŞD değerleri değildir. Şarj/deşarj oranı, iç direnç, gerilim düşümü gibi etkilerde BİD değerine etki etmektedir (Rezvanizani vd., 2014). Bir batarya sisteminde BŞD ve BGSD değerleri biliniyor ve oranları %100'e yakın olsa bile, sistem bataryada depolanan enerjinin tamamını kullanamayabilir. Bu duruma etki eden bazı sebepler vardır. Şekil 8'de EA'larda kullanılan bir Li-ion batarya için BİD, çevre sıcaklığı ve şarj/deşarj oranı arasındaki ilişkiler verilmiştir.



Şekil 8. Şarj/Deşarj Oranına ve Sıcaklık Değerine göre BİD Değerleri Grafiği (Rezvanizani vd., 2014)

Bu sistemde batarya düşük akımla deşarj olduğunda, iç direnç yüksek olsa bile, gerilim düşümü ihmal edilebilir seviyededir. Dolayısıyla böyle bir sistem için BİD oranı %100'e yakındır. Deşarj oranını yükseltince bataryadan kullanılacak enerji miktarı, iç direnç değeri ve gerilim düşümü de doğru orantılı olarak artacaktır. Düşük sıcaklıklarda bataryanın iç direnci daha yüksek olduğu için ortam sıcaklığına bağlı olarak bataryanın işlevi dolayısıyla BİD oranı da hızla azalacaktır. Grafikteki gri dikdörtgen, EA'larda sıkça kullanılan deşarj oranı aralığını göstermektedir. Bu batarya paketinden çok yüksek bir güç seviyesi talep etmek, BİD oranını azaltacaktır. Sonuç olarak BİD değeri önceden ayarlanan eşik değerine ulaştığında ya da altına düştüğünde lojik 0 değerini alacaktır. Ayrıca sabit sıcaklıkta şarj oranı yükseltirse, aynı sabit sıcaklıktaki deşarj oranına göre BİD oranı daha hızlı azalacaktır (Rezvanizani vd., 2014).

EA araçların gelişmesiyle çeşitli BİD kestirim yöntemleri yapılmıştır. Park vd. (2020), BİD kestirimi için yapılan birkaç yöntemden bahsetmiştir. Geleneksel olarak kullanılan bir yöntem olan elektrokimyasal tabanlı model ile BİD arasında analiz değişkenleri ile ilgili ilişkinin dikkate alındığı belirtilmiştir. Ancak, BİD ile

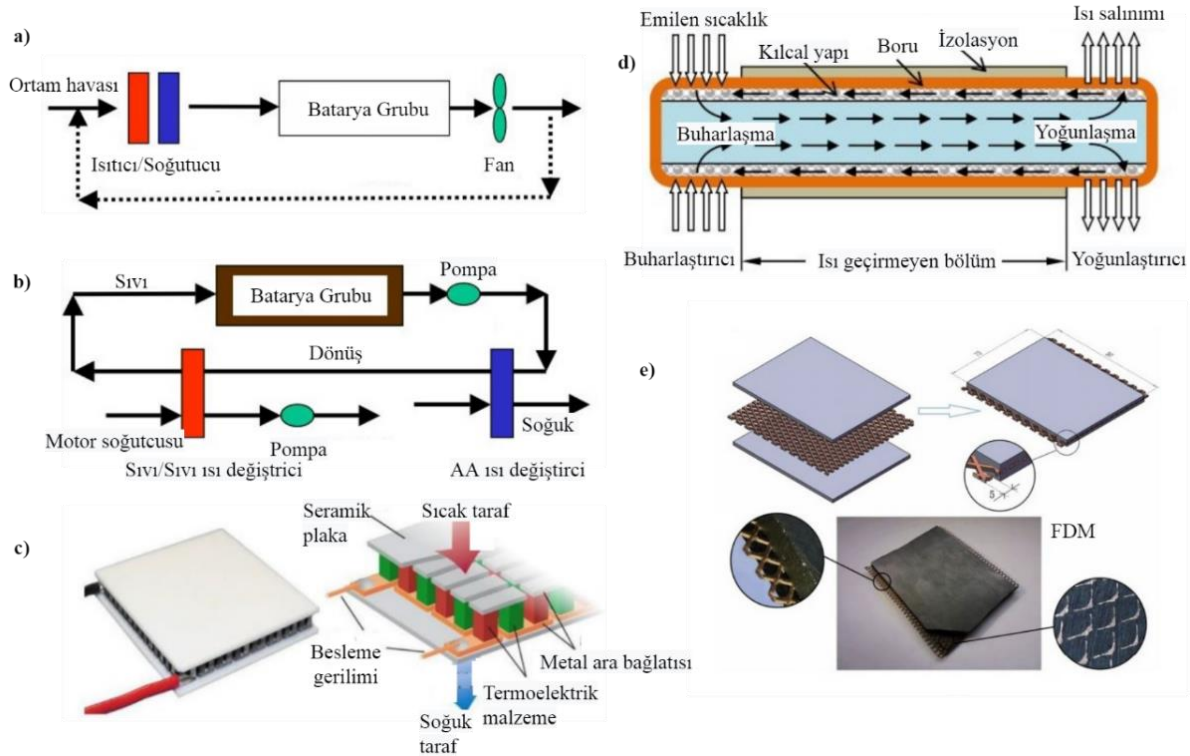
ilişkili analiz değişkenlerine dayalı yöntemlerin, önceden önemli bir hazırlık evresi çalışması gerektirdiği dile getirilmiştir. Araştırma trendlerinin; bataryayı aşırı şarjdan/deşarjdan korumak için gerçek zamanlı BİD tahminleri yapılması, değişen çevre koşulları altında dayanıklı BİD parametre kestirim yöntemlerinin kullanılması ve model tabanlı yöntemlere dayalı BŞD, BGSD ve BİD'nin birlikte kestirim yöntemlerinin olduğunu belirtmiştir. Balagopal ve Chow (2015), BİD kestirim tekniklerinden iki tanesinden bahsetmiştir. Bunlar güç talebine dayalı yöntemler ve bataryanın terminal gerilimine dayalı yöntemlerdir. Güç talebine dayalı yöntemde bataryanın BİD değerini belirlemek için sistemin güç talebi kullanılır. Bataryanın şarj durumuna bağlı olarak, pilin ADG-BŞD eğrisi elde edilir. Bataryanın o andaki gerilim ve kapasitesindeki maksimum değişiklik kullanılarak, sistem verilebilecek anlık güç hesaplanabilir. Bataryanın sağlayabileceği güç miktarına bağlı olarak, bataryanın BİD değerinin 1 mi yoksa 0 mı olduğunu belirlenmektedir. Bataryanın terminal gerilimine dayalı yöntemde ise bataryanın BİD değerini kestirmek için bataryanın terminal gerilimi kullanılır. Geçmiş bilgilere dayanarak, aynı uygulama için bataryanın önceki kullanımı sırasında gerilim düşümü belirlenmektedir. Bataryanın BGSD değerine, mevcut terminal gerilimine ve bataryanın kesme gerilimine bağlı olarak, bataryanın sisteme güç sağlayıp sağlayamadığını belirlenmektedir. Burada bataryanın BGSD'si bataryanın terminal voltajının bozulma oranını belirlediği için BİD kestirimi açısından çok önemli bir faktördür. Dong vd. (2016), istatistiksel verilere dayanarak BGD'den etkilenen faktörleri KF'ye dayalı olarak BŞD ve BİD'yi ortak kestirim yöntemi olarak önermiştir. Çalışmada BİD göstergesi, BGD ile ifade edilen bataryanın güç kapasitesini hesaplanarak elde edilmiştir. Shen vd. (2018), BİD, BŞD ve BGSD'yi birlikte kestirim yöntemiyle önermişlerdir. Model tabanlı BŞD kestirimi, GKF tarafından yapılmıştır. Daha sonra BGSD ve BİD ile ilgili batarya parametreleri, bir unutma faktörlü RLS algoritması kullanılarak çevrimiçi olarak tanımlanmıştır. Böylelikle kapasite ile BGSD, mevcut maksimum çıkış güç ile BİD değerleri tanımlanan parametrelere göre kestirilmiştir. Sonuç olarak birlikte kestirim yönteminin kullanılması doğruluğu artırdığı gibi hesaplama yükünü de azalttığını ifade etmişlerdir. Yukarıda bahsedildiği gibi EA araçların gelişmesiyle çeşitli BİD kestirim yöntemleri yapılmıştır. Ancak BİD hesaplamak için BŞD, BGSD, sıcaklık, şarj/deşarj oranı arasında herhangi bir matematiksel işlem henüz bulunmamaktadır.

3. BATARYA TERMAL YÖNETİMİ (BTY)

EA'larda batarya hücrelerinden daha yüksek enerji ve kapasite değerleri elde etmek için hücreler seri-paralel olarak bağlanır. Hücreler birleştirilerek modüler hale getirilir. Modüller de birleştirilerek batarya grubu paketleri oluşturulur. Böylelikle artan hücre, modüller ile batarya gruplarının enerji yoğunlukları yükseltilecek aracın gidebileceği mesafe artırılabilmektedir. Ancak iç ve dış etkenlerden kaynaklı sıcaklık artışı/azalışı yüzlerce binlerce sayıdan oluşan hücrelerde sürüş ve araç güvenliğini tehlikeye atacak durumlar ortaya çıkarmaktadır. Bataryalar elektrokimyasal yapıda olduğu için sıcaklık değişimlerine karşı oldukça hassastır. Örneğin EA'larda sıkça kullanılan Li-ion piller için en uygun çalışma sıcaklığının 15-35°C arasında olmasından dolayı sıcaklığın bu sınır koşulları dışına çıkması bataryada hızlı yaşlanma, kapasite bakımından dengesiz hücrelerin oluşumu, farklı şarj/deşarj davranışları vb. istenmeyen durumlara neden olmaktadır (Han vd., 2019; Saw vd., 2016). Özellikle şarj etme süresinin sonuna doğru vedeşarj sırasında bataryanın sıcaklığı yükselmektedir. Düşük sıcaklık ortamında ise bataryanın anot ucundaki lityum iyonlarının difüzyon hızı düşmesi, elektrolit iletkenliği azalması ve BŞD oranının düşmesine sebep olmaktadır. Bu durumlar bataryanın iç direncinin yükselmesi ve dolayısıyla kapasitesinin düşmesine neden olmaktadır (Choudhari vd., 2020). Bataryanın gücü, yaşam süresi, kararlılığı ve güvenliği yüksek sıcaklık değerlerinde olumsuz yönde ciddi bir şekilde etkilenmektedir (Thakur vd., 2020). Bu yüzden BYS'ler de Şekil 9'da gösterilen yöntemler kullanılarak batarya termal yönetimi (BTY) ile bataryanın yüksek sıcaklıklarda soğutulması, düşük sıcaklıklarda ise ısıtılması işlemi yapılmaktadır. BTY'nin aşağıda sıralanan koşulları sağlaması gerekmektedir (Pesaran, 2001; Thakur vd., 2020).

- Her hücre/modül için optimal çalışma sıcaklığının korunması
- Batarya sıcaklığı çok yüksek ise ortamın soğutulması, çok düşük ise ısıtılması
- Hücre/modül/batarya grubu arasındaki sıcaklık farklılıklarının az olması
- Ani sıcaklık değişimlerine karşı bataryanın yalıtımının yapılması
- Bataryada meydana gelebilecek zararlı gazların bir havalandırma yoluyla boşaltılması
- Bakımı kolay, güvenilir, maliyeti düşük, kolay paketlenir, hafif ve kompakt olmalı

BTY sistemi güç tüketimi, çalışma aracı, çalışma yapısı adı altında 3 ana kategoride toplanabilir (Arora, 2018). Güç tüketimi, aktif ve pasif güç tüketimi olarak ikiye ayrılmıştır. Çalışma aracı, ısıtma/soğutma için kullanılan araç temsil etmektedir. Bunlar hava ile ısıtma/soğutma, sıvı ile ısıtma/soğutma, FDM ile ısıtma/soğutma vb. yöntemleridir. Çalışma yapısı olarak iç-dış, direk-dolaylı ve seri-paralel olarak verilebilir.



Şekil 9. BTY sistemlerinin gösterimi; **a)** hava ile soğutma/ısıtma (Pesaran, 2001), **b)** sıvı ile soğutma/ısıtma (Pesaran, 2001), **c)** Termoelektrik yöntem (Arora, 2018), **d)** Isı borusu sistemi (Ariantara vd., 2018), **e)** Faz değiştiren malzeme (Wu vd., 2016)

3.1. BTY’de Aktif ve Pasif Güç Tüketimi

BTY ısıtma/soğutma işleme yaparken aktif ve pasif güç tüketimi yapmaktadır. Pasif yöntemde ortam sıcaklığı kullanılırken aktif yöntemde ise ısıtma/soğutma işlemi için bir enerji kaynağı kullanılmaktadır. Pasif yöntemde kullanılan araçlar hava ile soğutma/ısıtma, ısı dağıtıcı veya ısı emici, kanatçık kullanımı, ısı borusu ve FDM şeklindedir. Pasif yöntemlerin temel avantajları düşük maliyetli, enerji verimliliği, güvenilir ve uzun ömürlü çalışmasıdır. Aktif yöntemde bataryadaki ısı transferini sağlamak için harici bir enerji kaynağına ihtiyaç duymaktadır. Aktif sistem kullanılan ısıtma/soğutma araçları hava, sıvı ve termoelektriktir. Bu sistemlerde maliyeti artıran fan, üfleyici, pompa gibi bazı araçlar kullanılmaktadır. Aktif soğutma yöntemleri genellikle hafif, maliyetli ve kötü performans gösteren doğrudan hava soğutma ve daha iyi performans gösteren dolaylı sıvı soğutma sistemleriyle sınırlıdır (Lopez vd., 2016). Maliyetleri daha yüksek olsa da bataryada termal yönetim sağlamak adına oldukça etkili yöntemlerdir (Siddique vd., 2018). Aktif ve pasif yöntemler ile ilgili literatürde var olan bazı çalışmalar derlenmiştir. Lopez vd. (2016) çeşitli kombine aktif (sıvı ısı değiştirici) ve pasif (faz değiştirici malzeme) termal yönetim tekniklerinin hücre sıcaklıkları ve termal dengeleme üzerindeki etkisini incelemişlerdir. FDM’nin, kombine aktif ve pasif termal yönetim sistemleri ile soğutulan bir modülde maksimum ve sıcaklık gradyanı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Sabbah vd. (2008) pasif soğutma (FDM) ile aktif (basınçlı hava) soğutmanın etkinliği ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, aynı test koşullarında, basınçlı hava ile soğutmanın, fan gücü harcamadan hücrenin sıcaklığını istenen çalışma aralığında tutmak için uygun bir termal yönetim sistemi olmadığını göstermiştir. Buna karşılık, pasif soğutma sistemi, ek fan gücüne ihtiyaç duymadan aynı test koşullarında istenen çalışma aralığı sıcaklığı gereksinimlerini karşılayabildiğini tespit etmişlerdir. Bahiraei vd. (2016) yaptıkları çalışmalarında üç boyutlu birleştirilmiş termal-elektrokimyasal bir batarya modeli oluşturulmuştur. Daha sonra bu model ile aktif (su ve soğutma plakası) ve pasif (FDM) ısı yönetim sistemlerinin etkinliğini araştırmışlardır. Sonuçlar, aktif soğutma sisteminin sıcaklığı azaltmasına rağmen, batarya modülü üzerinde büyük bir sıcaklık farkına yol açtığını

göstermiştir. Öte yandan, FDM pasif soğutması, pil sıcaklığı artışını önemli ölçüde azalttığı ve modül boyunca istenen sıcaklık aralığının korunduğunu tespit etmişlerdir. Sonuç olarak aktif ve pasif yöntemler kullanıldığı sistemde ve batarya sayısına göre termal yönetim açısından kendi içerisinde avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Ancak genel olarak Chevrolet Volt, Tesla Model S ve Model 3, BMW i3 ve i8 gibi piyasada önde gelen Modern EA'larda aktif yöntemler kullanılmaktadır (Wu vd., 2019).

3.2. BTY Çalışma Yapısı

Çalışma yapısı olarak incelendiğinde, iç soğutma/ısıtma şekli bataryanın dış yüzeyinde değil de iç tarafından ısıtma/soğutma yapılmasını sağlayan bazı işlemlerdir. Dış soğutma/ısıtma bataryanın dış yüzeyinden ısıtma/soğutma işleminin yapılması şeklindedir. Her ne kadar bataryanın iç ile dış arasında sıcaklık farkı var ise de dış soğutma/ısıtma, iç soğutma/ısıtmaya göre uygulanması daha kolay olduğu için tercih edilmekte ve bu alanda çokça çalışmalar yapılmıştır. İç soğutma yöntemi uygulanması hala sınırlıdır. Özellikle EA'lar gibi büyük ölçekli batarya grubu paketlerindeki hücrelerin iç yapısını ulaşmak sıcaklık ölçümü yapmak ve soğutma/ısıtma tekniği uygulamak oldukça zahmetlidir. Bundan dolayı batarya termal yönetiminde daha çok dış soğutma/ısıtma teknikleri kullanılmaktadır. İç ve dış soğutma yöntemleri Wu vd. (2019) tarafından, yapılan çalışmalar incelenerek ele alınmıştır. Çalışmaları sonucunda iç termal yönetimin daha etkili olduğu ancak pratikte daha zor olduğu vurgulanmıştır. Dış termal yönteminde ise temel olarak hava, sıvı ve FDM araçlarının kullanıldığı belirtilmiştir. Hava bazlı termal yönetimin ekonomik ve güvenli olmasına karşın verimliliğinin az olduğu, FDM'nin ise batarya grubunu istenilen sıcaklık aralığından tutabildiğini ancak sızıntı problemi yaşattığı ve termal iletkenliğinin az olduğu vurgulanmıştır. Bunlara karşın sıvı bazlı termal yönetimin yüksek ısı transferi verimliliğine sahip ve kompakt olduğundan dolayı hali hazırda ticari uygulamalarda daha çok kullanıldığı belirtilmiştir.

Seri-paralel çalışma şekli soğutma/ısıtma için kullanılan aracın batarya paketlerine dağıtılma şeklindedir. Seri yöntemde, ısıtma/soğutma aracı batarya grubunun bir ucundan girip, sonundaki uca kadar gitmesidir. Burada seri yöntem denilmesi, aynı miktarda soğutma/ısıtma aracının batarya grubundaki birkaç modül serisine etki etmesidir. Paralel yöntemde ise toplam ısıtma/soğutma aracının modül sayısına göre eşit bölünmesiyle her modülle eşit bölünmüş soğutma/ısıtma aracının etki etmesi yöntemidir. Ayrıca modüllerin boyutuna ve şekline göre çeşitli seri-paralel hibrit kombinasyonlar yapılabilmektedir (Pesaran, 2001). Direk ve dolaylı yöntem de ise soğutma/ısıtma aracının bataryaya direk ya da dolaylı olarak temas etmesi işleminde ifade edilmektedir (Teng ve Yeow, 2012).

3.3. Batarya Soğutma Yöntemleri

Batarya soğutma yöntemleri, ısıtma yöntemlerinden daha çok araştırma konusu olmuştur (Bahiraeci vd., 2016; Sabbah vd., 2008). Bunu sebebi batarya ısıtma yöntemlerinin düşük sıcaklık ortamında bulunan araçların çalışması için önceden bataryanın bazı tekniklerle ısınmasını sağlamak olduğundan kaynaklanmaktadır. Sonuçta soğuk iklimlerde oluşan bir durum olduğu için karşılaşılması sınırlıdır. Ancak batarya ısınması zaten sıcak ortamlarda etkilendiği gibi soğuk ortamlarda da etkilenmektedir. Bu durum ısıl sürüklenmesi kavramı ile açıklanmaktadır. Isıl sürüklenmesi bataryada aşırı şarj/deşarj, kısa devreler, ezilme veya aşırı ısınma nedeniyle oluşmaktadır. Özellikle aşırı ısınma sonucu yangın, duman, gaz emisyonları, elektrolit ve elektrot malzemesinin ayrışması gibi durumlarla sonuçlanmaktadır (Choudhari vd., 2020). Bu tür durumların önüne geçilmesi için BYD tarafından ayarlanan BTY ile hava, sıvı, FDM, Termoelektrik (TE) ve ısı borusu (IB) araçları ile batarya soğutulması termal yönetimi uygulanmaktadır.

Hava ile soğutma, düşük ısı kapasitesi ve ısıl iletkenlik gibi dezavantajlara sahip olsa da basitliği, düşük maliyeti ve diğer sistemlere göre elektriksel güvenliği daha yüksektir. Öyle ki Çinli ve Japon EV üreticileri tarafından BYD E6, Toyota Prius, Nissan Leaf vb. EA modellerinde hala kullanılmaktadır (Xia vd., 2017). Hava ile ısı transferi, havayı batarya modülleri boyunca yönlendirerek ya da üfleyerek gerçekleştirilir. Yüksek hızda hava soğutma, batarya hücrelerinin sabit bir duruma ulaşması için gereken süreyi azaltıp, aşırı ısınma etkisini en aza indirmektedir. Hava ile soğutma, fanın kullanılmadığı doğal ısı taşınımı (pasif) ve fanın kullandığı basınçlı ısı taşınımı (aktif) sistemleri ile yapılmaktadır. Düşük bir C-oranı (şarj veyadeşarj hızı) için sıcaklık doğal ısı taşınımıyla yapılabilmektedir. Bu durumda, basınçlı ısı iletimine ihtiyaç duyulmamaktadır. Ancak C oranındaki artışla birlikte, akım da hızla artar ve buna bağlı olarak batarya hücresi

içinde ısı artışı 50°C'nin üstünde gibi yüksek bir değere çıkabilmektedir. Bu durumda basınçlı ısı iletimini ihtiyaç duyulmaktadır (Choudhari vd., 2020).

Hava ile soğutmaya kıyasla, sıvı bazlı soğutucu sistemleri suyun veya diğer tipik olarak kullanılan akışkanların ısı transfer katsayısından dolayı daha verimli çalışmaktadır. Sıvı soğutma, hava soğutmadan 3500 kat daha verimli olabilir ve %40'a kadar enerji tasarrufu sağlayabilir. Ayrıca sıvı soğutma, gürültü seviyesini azaltabildiği gibi batarya grubu için soğutma verimliliği açısından daha kompakt olabilmektedir (Xia vd., 2017). Sıvıyla ısı transferi, her bir batarya modülünün etrafındaki ayrı borular aracılığıyla, batarya modülün etrafında bir ceket ile doğrudan temas için batarya modüllerinin bir dielektrik sıvıya batırmayla ve batarya modüllerini sıvı ısıtıcı/soğutucu bir plakaya (ısı emici) yerleştirilerek yapılmaktadır (Pesaran, 2001). Sıvı ile soğutma iki kategoriye ayrılabilir. Bunlar; batarya modülünün, bir dielektrik soğutucuya (örneğin yağ) daldırma işlemi olan direkt yöntem ile batarya modülünün etrafındaki boru/ceket yapılardan veya batarya modüllerinin üzerine yerleştirilen soğuk plaka boyunca akan akışkan tarafından gerçekleştirilen yöntemler olan dolaylı soğutma yöntemidir. Dolaylı yöntemde kullanılan sıvılar su/glikol iken direkt yöntemde silikon bazlı veya mineral yağlar içeren dielektrik malzemeler kullanılmaktadır. Mineral yağ, su, glikol, hidrojel gibi çeşitli sıvı soğutucuların etkisi hemen hemen aynıdır ancak mineral yağın viskozitesi ve hidrojel maliyeti yüksektir. Bu nedenle sıvı ile batarya soğutması işleminde genellikle soğutucu olarak su veya glikol kullanılır. Soğuk bölgelerde, suyun donma olasılığına karşı su ve glikol karışımları da kullanılabilir (Choudhari vd., 2020). Sıvı soğutma sisteminde kontrol yöntemine göre aktif soğutma ve pasif soğutma uygulamaları mevcuttur. Pasif soğutma uygulamaları, düşük soğutma verimliliğine ve yetersiz sıcaklık kontrolüne sahiptirler. Bu yüzden EA'lar gibi büyük batarya gruplarının soğutmak için yetersizdirler. Bu yüzden genel olarak aktif sıvı soğutma yöntemleri üzerine araştırma-geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Pratikte de Tesla, General Motors ve diğer otomotiv şirketleri gibi birçok otomotiv şirketi aktif sıvı soğutma sistemleri kullanmaktadır (Lu vd., 2020).

İdeal bir termal yönetim sistemi düşük hacim, hafif ve ucuz olarak batarya grubunu optimum bir sıcaklıkta tutabilmelidir. Hava soğutma ve sıvı soğutma gibi termal yönetim sistemleri, etkin olarak çalışabilmesi için genel olarak aktif yöntemlerde kullanılan fan, pompa, üfleyici, boru vb. yapılar kullanılmaktadır. Dolayısıyla böyle sistemler çok fazla alan kaplayan, karmaşık ve pahalı sistemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Böyle durumların etkilerini azaltmak için termal yönetimde pasif ve yarı-pasif olarak kullanılacak FDM kullanılmaktadır. Batarya termal enerjisi; gizli ısı, reaksiyonlarda kimyasal enerji ve hissedilebilir ısı şeklinde depolanabilmektedir. Bu üç formdan gizli ısı en büyük miktarda enerjiyi depolayabilmektedir. FDM termal enerjiyi duyulur ve gizli ısı olarak depolayabilen ve bu enerjiyi tersine çevrilebilir bir işlemle serbest bırakabilen malzemelerdir. FDM'ler, sıcaklık artışları sırasında çevredeki ısıyı emerek kendisinin erimesine neden olup enerjiyi depolamaktadır. Daha sonra sıcaklık, faz değişim sıcaklığının altına düştüğünde, ısı enerjisini serbest bırakarak ilk katı faz haline geri döner (Siddique vd., 2018). Bu doğal olay ile EA'larda batarya soğutma işlemi yapılmaktadır. Batarya soğutma işlemi için ilk FDM çalışması Hallaj ve Selman (2000) tarafından yapılmıştır. Aynı yazarlar FDM kullanarak li-ion bataryalar için bir termal yönetim çalışması yapmışlardır (Hallaj ve Selman, 2002). Çalışmaları sonucunda FDM soğutma sistemlerinin yüksek kompaktlık, düşük maliyet, dolaşım ağına ihtiyaç duyulmaması, istenen soğutma etkisini sağlaması, termal sürüklenme durumunda daha iyi performans ve daha homojen sıcaklık dağılımı gibi birçok avantajının olduğunu göstermişlerdir.

Bir başka batarya soğutma yöntemi olarak ısı borusu yöntemleri uygulanmıştır. Isı borusu BTY sistemleri, FDM'lerin düşük iletkenlik, hacim genişlemesi ve tepki süresinin uzun olması gibi sorunlarının üstesinden gelmenin bir yolu olarak görülmektedir. Isı borusu, bir çalışma sıvısının buharlaştırıcı, ısı geçirmeyen ve soğutucu ünitelerine bölünmüş kapalı bir boru sistemi içine yerleştirilmiş pasif bir batarya soğutma yöntemidir. Buharlaştırıcı bölümü ısı ile temas ettiğinde doymuş bir sıvı olan çalışma sıvısı kaynamaya başlar ve buhar, ısı geçirmeyen alan boyunca yoğunlaştırıcı bölümüne geçer. Bu bölgedeki buhar, ısıyı çevreleyen ortama kendisini bırakır ve sıvının yoğunlaşmasına neden olur. Sıvının yoğunlaşmasına yardımcı olmak için genellikle ek bir soğutma ortamı (hava veya sıvı) gerekmektedir. Daha sonra, bir kılcal işlem yoluyla, ani yoğunlaşma sıvısı buharlaştırıcıya geri akarak soğutma işlemi yapılmaktadır (Joris Jaguemont ve Van Mierlo, 2020). EA'larda bu işlem, bataryanın, şarj/deşarj sırasında oluşan ısıyı serbest bırakıp ve ardından bunu bataryanın alt veya yan tarafıyla doğrudan temas halinde olan ısı borusuna iletimi yapılmasıyla gerçekleştirilir. Daha sonra, ısı borusunun soğuk ucundaki ısı dağıtma sistemi tarafından ısının uzaklaştırılması yapılır. FDM'lerle

karşılaştırıldığında daha az bakım gerektiren, yaşam süresi daha uzun, daha kompakt, daha hafif ve daha esnek bir yapıya sahiptir.

Bir başka batarya soğutma yöntemi termoelektrik soğutucu sistemidir. TE, 1834 yılında keşfedilen ve Peltier etkisinin çalışma prensibine dayanan bir katıhal aracıdır. TE genellikle bakır olmak üzere iki iletken arasına sıkıştırılmış bir yarı iletken oluşmaktadır. Bir dizi p-tipi ve n-tipi içeren katkılı yarı iletken elemanlar kullanılır. Bir TE'ye gerilim uygulandığında, elektronlar, modülün bir tarafından termal enerjiyi emerek, aslında onu soğutarak, p-tipi termo-elemanın daha düşük bir enerji seviyesinden n tipi termo-elemanda daha yüksek bir enerji durumuna atlar. Elektronlar, TE modülünün diğer tarafındaki bu ısıyı reddederek kararlı bir enerji seviyesine düşer ve böylelikle üzerinde bulunan batarya sisteminde soğutma işlemi yapar. Eğer ters gerilim uygulanırsa TE bir soğutucu yerine bir ısıtıcı olarak kullanılabilir (Bahiraei vd., 2016; Bandhauer ve Garimella, 2013; Wu vd., 2019). Her ne kadar TE'ler, EA'lardaki BTY sisteminde kullanımı, uygulamanın yeniliğinden dolayı yetersiz olsa da ilk olarak Alaoui (2003) tarafından EA'lar için TE tabanlı bir BTY önerilmiştir (Joris Jaguemont ve Van Mierlo, 2020). Önerilen BTY'nin iyi bir performans gösterdiği ve batarya sisteminin sıcaklığını başarıyla düşürdüğü belirtilmiştir. Siddique vd. (2018), 2003-2018 yılları arasında TE alanından yapılan çalışmalar hakkında kapsamlı bir çalışma sunmuştur. Derlenen çalışmaları sonucunda TE ile gerçekleştirilen BTY'ler pilin maksimum sıcaklığını 40°C'nin altında tutabildiği belirlenmiştir. Sonuç olarak TE'ler diğer soğutma sistemlerine göre; hareketli parçası olmayan, içinde kimyasal reaksiyonu olmayan, gürültüsüz, güvenilir çalışan, daha uzun çalışma ömrü, tehlikeli gaz emisyonu olmaması ve minimum bakım maliyeti gerektiren bir sistem olarak karşımıza çıkmaktadır. Buna karşın, dezavantajı olarak, düşük verimlilikleri ve ticari uygulamalarda kullanımlarını sınırlayan ek güç gereksinimlerine sahiptirler.

3.3.1. Batarya Soğutma Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Batarya soğutma yöntemleri birçok yazar tarafından detaylı bir şekilde açıklanmış avantajları ve dezavantajları karşılaştırılmıştır. Çalışmalarda genel olarak her yöntemin kendi içerisinde ve kullanıldığı sisteme göre bazı avantaj ve dezavantaja sahip olduğu belirtilmiştir. Bu bağlamda incelenen yöntemler, avantaj ve dezavantajları bakımından karşılaştırılması yapıp Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'teki sonuçlara göre sistemlerin nitelik bakımından karşılaştırmaları Tablo 5'te verilmiştir (Arora, 2018; Choudhari vd., 2020; Ianniciello vd., 2018; Joris Jaguemont ve Van Mierlo, 2020; Liu vd., 2017; Lu vd., 2020; Pesaran, 2001; Pesaran vd., 1999; Rao ve Wang, 2011; Siddique vd., 2018; Wu vd., 2019; Xia vd., 2017; Yang vd., 2019). Pesaran vd. (1999), hava soğutma ile sıvı soğutma yöntemlerini karşılaştırmıştır. Hava soğutmanın, sıvı soğutmaya karşı verimi daha düşük olsa da daha az karmaşık yapıda olduğunu göstermişlerdir. Genel olarak, paralel HEA'lar için hava ile soğutmanın uygun olduğu ancak EA'lar ve seri HEA'lar için optimum termal performans adına sıvı bazlı sistemlerin kullanılması gerektiğini önermişlerdir. Wu vd. (2019) sıvı bazlı soğutma yönteminin, yüksek ısı transfer verimliliği ve kompaktlığı nedeniyle ticari EA ve HEA'larda uygulandığını vurgulamışlardır. Liu vd. (2017) batarya soğutma yöntemlerinden hava ve sıvı soğutmanın, ticari elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan geleneksel yöntemler olduğunu belirtmişlerdir. Önde gelen ticari elektrikli araçlarından Nissan Leaf, Toyota Prius, BYD E6 hava ile soğutma, Tesla model S, NIO es8, BMW 530Le sıvı soğutma yöntemleri kullanılmaktadır (Yang vd., 2019).

Bu çalışmada, Tablo 4'te verilen avantaj ve dezavantajlar ele alınarak, batarya soğutma yöntemlerinin nitelik bakımından karşılaştırmaları yapılmış ve Tablo 5'te verilmiştir. Yapılan karşılaştırma, kullanım kolaylığı (KK), Uygulanabilirlik (U), Enerji verimliliği (EV), Soğutma düzeyi (SD), Bakım (B), başlangıç maliyeti (BM), yıllık maliyeti (YM) ve teknik risk (TR) bakımından değerlendirilmiştir. Her bir nitelik kendi içerisinde minimum 1 puan, orta düzey 2, maksimum 3 puan verilerek bir ortalama alınmıştır. Daha sonra ortalamanın yüzdelik olarak hesabı yapılmış ve yöntemler kendi aralarında derecelendirilmiştir. Hesaplama sonucunda en yüksek oranı faz değiştirici malzemeler almıştır. Bu yüzden FDM ile ilgili çalışmalar, gelecekte kullanılacak olan EA'ların BTY sistemleri için umut verici olacağı düşünülmektedir. Ama yine de BTY için en uygun yöntemin düşük maliyetli, hafif, hacimsel olarak az alan kaplayan, gürültüsüz, az enerji harcayan vb. gereksinimleri karşılayabilen bir yöntem olmalıdır.

Tablo 4. BTY Soğutma Yöntemlerinin Avantaj ve Dezavantajlarının Karşılaştırılması

Soğutma Yöntemi	Avantaj	Dezavantaj
Doğal Hava (pasif)	<ul style="list-style-type: none"> ● Hafif ● Basit sistem ● Kolay bakım ● Pasif soğutma ● Başlangıç maliyeti düşük ● Kolay uygulanabilirlik 	<ul style="list-style-type: none"> ● Verimlilik düşük ● Isı transfer katsayısı düşük ● Soğutma düzeyi düşük ● Sıcaklık dağılımı homojen değil ● Yüksek enerji yoğunluğuna sahip bataryalar için uygun değil ● Sadece ortamda bulunan sıcaklığı kullanır
Basınçlı Hava (aktif)	<ul style="list-style-type: none"> ● Bataryaya doğrudan temas ● Hafif ● Bakımı kolay ● Uzun ömürlü soğutma ● Başlangıç maliyeti düşük ● Farklı batarya tipleri için uygun ● Ticari anlamda yaygın 	<ul style="list-style-type: none"> ● Düşük ısı transfer katsayısı ● Ortam hava sıcaklığına bağlıdır ● Fan kullandığı için elektrik tüketimi vardır ● Sıcaklık dağılımı homojen değil ● Verimlilik düşük ● Gürültülü ● Alan kaplar
Pasif Sıvı	<ul style="list-style-type: none"> ● Bakımı kolay ● Pasif soğutma ● Başlangıç maliyeti düşük ● İşletme maliyeti düşük 	<ul style="list-style-type: none"> ● Sıvı sızıntısı riski vardır ● Aşırı sıcaklık ortamında sınırlı soğutma ● Gaz kaybı riski vardır
Aktif Sıvı	<ul style="list-style-type: none"> ● Yüksek ısı kapasitesi ● Bataryaya doğrudan temas ● Verim yüksek ● Sıcaklık dağılımı homojen 	<ul style="list-style-type: none"> ● Karmaşık ● Sızıntı riski vardır ● Başlangıç maliyeti yüksek ● İşletme maliyeti yüksek ● Pompa kullanıldığı için elektrik tüketimi vardır ● Aşırı sıcaklık ortamında sınırlı soğutma
Faz değiştiren malzeme	<ul style="list-style-type: none"> ● Pasif soğutma ● Maliyeti düşük ● Verimlilik yüksek ● Bakım az ● Kullanım ömrü uzun ● Sıcaklık dağılımı göreceli olarak homojen ● Daha kompakt ● Gizli ısıyı emer ● Yüksek sıcaklık koşullarında soğutma performans yüksek 	<ul style="list-style-type: none"> ● Termal iletkenliği düşük ● Faz değişim esnasın hacim genişlemesi ● Malzeme eridikten sonra sızıntı riskinin olması ● Ağır olabilmektedir. ● Ticari anlamda yaygın değil
Isı borusu	<ul style="list-style-type: none"> ● Isı iletkenliği yüksek ● Verim yüksek ● Esnek ● Kompakt ● Kullanım ömrü yüksek 	<ul style="list-style-type: none"> ● Başlangıç maliyeti yüksek ● Karmaşık ● Temas alanı sınırlı ● Sızıntı riski vardır ● Elektrik tüketimi vardır ● Verimliliği batarya yapısına göre değişir ● Ticari anlamda yaygın değil
Termoelektrik	<ul style="list-style-type: none"> ● Bakım maliyeti düşük ● Sabit sistem ● Gürültüsüz çalışır ● Enerji tüketimi düşük ● Yapısında kimyasal reaksiyon yok ● Çalışma ömrü uzun ● Güvenilir ● Zararlı gaz salınımı yoktur 	<ul style="list-style-type: none"> ● Ek güç gereksinimi vardır ● Verimi çok düşük

Tablo 5. Batarya Soğutma Yöntemlerinin Nitelik Bakımından Karşılaştırılması

Soğutma Yöntemi	KK	U	EV	SD	B	BM	YM	TR	Ort.	Yüzde
Hava ile	Kolay 3	Basit 3	Düşük 1	Düşük 1	Kolay 3	Düşük 3	Düşük 3	Düşük 3	2,5	%83
Sıvı ile	Zor1	Zor 1	Yüksek 3	Yüksek 3	Zor 1	Yüksek 1	Yüksek 1	Yüksek 1	1,5	%50
FDM	Kolay 3	Basit 3	Yüksek 3	Yüksek 3	Kolay 3	Orta 2	Düşük 3	Düşük 3	2,875	%96
IB	Orta 2	Orta 2	Yüksek 3	Yüksek 3	Orta 2	Yüksek 1	Orta 2	Orta 2	2,125	%71
TE	Orta 2	Orta 2	Düşük 1	Orta 2	Zor 1	Yüksek 1	Yüksek 1	Orta 2	1,5	%50

3.4. Batarya Isıtma Yöntemleri

Yüksek sıcaklıkta olduğu gibi düşük sıcaklık değerlerinde de EA bataryası ciddi bir şekilde etkilenmektedir. Düşük sıcaklıklarda özellikle sıfırın altındaki sıcaklıklarda EA'larda sıkça kullanılan Li-ion bataryaların elektrolit iletkenliği, yük aktarım kinetiği ve lityum iyonlarının anodundaki katı hal difüzyonu yavaşlar. Bu tip istenmeyen durumlar bataryanın iç direncini artmasına, pillerde dengesizlik oluşmasına ve kapasitesinin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca aşırı düşük sıcaklık koşullarında, elektrolitlerin donmasıyla deşarj ve şarj arızaları da olabilmektedir. Tüm dünyada yayılması beklenen EA'ların özellikle soğuk iklime sahip ABD, Kanada Rusya, Kuzey Avrupa vb. ülkelerde soğuk iklim özellikleri dikkate alınıp bataryanın güvenliği açısından BTY'de ısıtma yöntemleri kullanılmalıdır. Özellikle şarjdan önce, araç çalıştırılmadan önce, bazen deşarj esnasında ön ısıtma sistemi kullanılmalıdır. Böylelikle düşük sıcaklıklarda bataryanın minimum çalışma sıcaklığının üstünde bir sıcaklığı kadar BTY ile ısıtma yapıp araç kullanılmaya başlamadan önce bataryanın güvenliği sağlanmış olur. Batarya ısıtma yöntemleri iç ve dış ısıtma adı altında 2 ana kategoriye ayrılabilir. Dış ısıtma yöntemleri de kendi içerisinde 2 gruba ayrılabilir. Bunlar soğutma sistemiyle entegre olan ısıtma yöntemleri ile termoelektrik eleman kullanılan ısıtma yöntemleridir. Aynı şekilde iç ısıtma yöntemleri de kendi içerisinde 2 gruba ayrılabilir. Birinci grup kendi kendine ısıtma yöntemi, ikinci grup ise doğru akım, alternatif akım ve darbe akımlarının kullanıldığı akım uyarması ile ısıtma yapan sistemlerdir (Wu vd., 2020).

Dış ısıtma sistemlerinden hava ile ısıtma yöntemi düşük maliyetli, basit ve tüm batarya tipleri için kullanılabilen yöntemdir. Çalışması soğutma sistemindeki gibidir ancak burada soğuk hava yerine ısıtılan hava bir fan yardımıyla bataryaya dağıtılır. Diğer bir dış ısıtma yöntemi olan sıvı ile ısıtma Chevrolet Volt ve Tesla gibi EA'larda yaygın olarak kullanılan ve bir ısıtıcı, bir ısı değiştirici, bir pompa ve sirkülasyon borularından oluşmaktadır (Jaguemont vd., 2016; Wu vd., 2020). Isı değiştiricisi, batarya ile doğrudan temas halindedir. Burada sıvı, ısı değiştiricisinden geçtiğinde, sıvıdan bataryaya ısı aktararak batarya ısıtma işlemi yapılır. Hava ve sıvı gibi yöntemlerde fan, pompa ve borular vb. elemanlar kullanıldığı için sistemler çok karmaşık ve ağır olmaktadır. Bundan dolayı doğal yapısı gereği erimesi ve katılaşmasının bir sonucu olarak belirli bir sıcaklıkta büyük miktarlarda enerji (ısı) depolayabilen ve salabilen bir madde olan FDM ile ısıtma işlemi yapılabilir. Eğer batarya sıcaklığı FDM'nin erime noktasının altına düşerse, FDM tarafından depolanan ısı batarya grubuna dağıtılarak ısıtma işlemi yapılmaktadır (Jaguemont vd., 2016). Termoelektrik kullanılan yöntemler de elektrotermal elemanlar, ön ısıtma için doğrudan pil yüzeyine takılmaktadır. Konfigürasyonlara bağlı olarak, Peltier efekt elemanları, elektrotermal plakalar, elektrotermal ceketler ve elektrotermal filmler olarak 4 yöntem mevcuttur (Wu vd., 2020). Bu tür sistemler bataryanın yüzeylerine konularak sistem gereksinimleri karşılandığı takdirde ısıtma işlemi yaparlar.

İç ısıtma yönteminden biri olan kendi kendine ısıtma yönteminde, bataryalar yalnızca ohmik ve polarisasyon iç dirençleri ile ısı üretmektedir. Üretilen bu ısı ile batarya kendi kendini ısıtmaktadır. Bataryaları düşük sıcaklıklarda şarj etmek lityum kaplamaya neden olacağından, deşarj yoluyla kendi kendilerini ısıtmak için depolanan enerjilerinin bir kısmını kullanmaktadır (Ji ve Wang, 2013). Uyarım akımları ısıtma yönteminde, doğrusal akım yöntemi; pilde depolanan enerjiden boşaltılan sabit bir akım ile bataryayı ısıtmayı ifade etmektedir. Akım genliği ve ön ısıtma süresinin, lityum kaplamayı ve bataryanın eskimesini üzerine etkisi olduğu için doğru akım uyarımı belli bir süre zarfı ile sınırlandırılmalıdır (Wu vd., 2020). Diğer bir yöntem

olan alternatif akım (AC) ön ısıtma, bataryanın iç empedansı yoluyla ısı üretmek için bataryanın pozitif ve negatif elektrotlarına frekansı ve genliği olan bir alternatif akımın uygulanması yöntemidir. Çeşitli AC sinyallerinin arasında, sinüzoidal alternatif akım (SAC) en yaygın kullanılan AC ısıtma sistemidir. SAC akım genliği ve frekansı, hücre içinde daha fazla ısı üretimi için ayarlanabilir (Hu vd., 2020). Sinyal ayarlanabildiği ve osilasyon yapabildiği için doğru akımdaki şarjın ve deşarjın neden olduğu lityum çökmesi ve kapasite kaybının önüne geçilebilmektedir. DC ile karşılaştırıldığında daha verimli ve daha hızlı bir ısıtma sağlar (Wu vd., 2020). Benzer amaçlı darbeli akım yönteminde ise bataryanın iç direnci üzerinden ısı üretmek için bataryaya belirli aralıklarla sabit darbe akımları uygulanmaktadır.

Isıtma yöntemleri özetçe açıklanacak olursa; Dış ısıtma yöntemi olan hava ile ısıtma yöntemi düşük maliyetli, karmaşıklığı az, güvenlik düzeyi yüksek vb. avantajlara sahip olmasından dolayı geleneksel olarak kullanılan yöntemlerin başından gelmektedir. Ancak ısıtılan havanın dağıtılması için kullanılan fan düzeneğinin ek enerji tüketimine neden olması ve havanın ısı transfer katsayısının düşük olmasına bağlı olarak ısıtma süresini uzun olması gibi dezavantajlara sahip olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır. Sıvı ısıtma yönteminde, hava ile karşılaştırıldığında, sıvının daha yüksek ısı transfer katsayısına sahip olması ısıtma süresini kısalttığı söylenebilir. Ancak bu sistem daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu yüzden hacimsel olarak daha fazla alan kaplamaktadır. FDM ile ısıtma yönteminde, çalışması için ek bir güç gereksinimine ihtiyaç duymadığından dolayı enerji tüketiminin olmaması, uzun süreli kullanılabilme, batarya yaşlanmasına olan etkisinin az olması gibi avantajlara sahiptir. Ancak termal iletkenlikleri düşük olduğundan dolayı ısıtma süresi yüksek, büyük batarya grupları için ağır ve hacimsel olarak alan kaplayan, eridiğinden sızıntılar meydana getirip bataryanın güvenliğini tehlikeye atabilecek dezavantajlara sahiptir. Ayrıca maliyeti yüksek ve EA'lar için kullanılabilirliği ile ilgili çalışmalar laboratuvar deneyleri ile sınırlıdır. Termoelektrik kullanılan yöntemlerde enerji tüketiminin az olması, güvenli ve uzun süreli olması gibi avantajlara sahiptir. Ancak hacimsel olarak fazla alan kaplamakta ve maliyetleri yüksektir. Diğer bir grup olan iç ısıtma yöntemlerinin genel olarak ısıtma süreleri çok hızlıdır ve hacimsel olarak az alan kaplamaktadır. Isıtma işlemi için genel olarak bataryanın kendi enerjisini kullandıkları için enerji tüketimleri fazladır. Sadece AC sisteminde dışarıdan bir kaynak kullanılmaktadır. Bataryanın kendi enerjisini kullanılmasından dolayı batarya yaşlanmasına olan etkileri de yüksektir. Bundan dolayı DC ya da darbe akımı yerine, AC dalga tipleri kullanmak daha yararlı olacaktır. Tüm bu sistemler kendi aralarında kullandıkları sisteme göre bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. En uygun sistemin hangisi olduğu tespit edilmesi adına, sistemlerin nitelik bakımından karşılaştırmaları Tablo 6'da verilmiştir (Hu vd., 2020; Jaguemont vd., 2016; Ji ve Wang, 2013; Wu vd., 2020). Burada her bir nitelik özelliğine göre 1'den 4'e kadar derecelendirilmiştir. Daha sonra her niteliğin aldığı dereceler toplanıp nitelik sayısına bölünmek suretiyle ortalaması alınmıştır. Alınan ortalama sonucunda, yöntemin toplam derecesi yüzdelik olarak verilmiştir. Nitelik olarak, enerji tüketimi (ET) azdan 1 – fazlaya 4, maliyet (M) ucuzdan 4 – pahalıya 1, ısıtma süresi (IS) kısıdan 4 – uzuna 1, batarya yaşlanmasına olan etki (BYE) azdan 4 – fazlaya 1, Hacim (H) küçükten 4 – büyüğe 1, güvenilirlik (G) yüksekte 4 – düşüğe 1 olarak niteliğin etkisine göre puanlar verilmiştir. Ortalama etkinin ne kadar olumlu (4 derecesine yakın) ise yüzdelik olarak da oranı daha fazla olacaktır. Tabloda aynı zamanda yöntemlerin hali hazırda kullanıldığı EA'ların durumu da verilmiştir (Wu vd., 2020). En yüksek yüzdelik oranı alan AC ile ısıtma ile ilgili henüz gerçek bir uygulama mevcut değildir. AC ile diğer yüksek oranda olan iç ısıtma yöntemlerinin daha çok araştırılması gerektiği ve ileride EA'larda kullanılması daha uygun olacağı düşünülmektedir. Mevcut EA'larda kullanılan yöntemler arasında en yüksek oran sıvı ile ısıtma daha sonra hava ile ısıtma olmuştur. Bu yöntemlerin karmaşık yapısı, hacim, batarya yaşlanmasına olan etkileri ve maliyet gibi sorunlarının çözülmesi halinde EA'lar için kullanılması açısından daha da uygun olması beklenebilir.

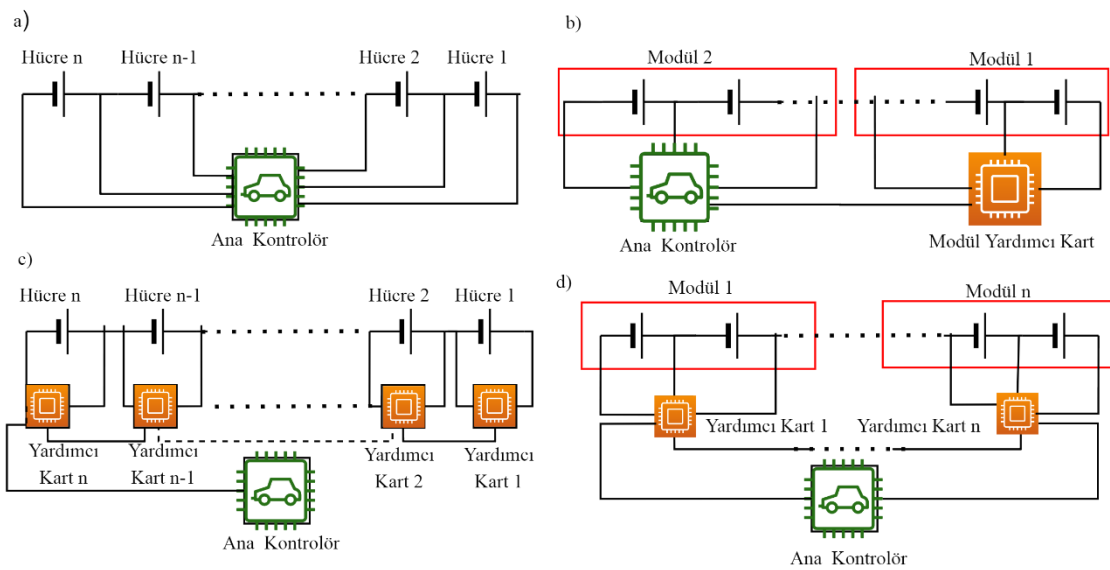
4. BYS TÜRLERİ

BYS sistemleri batarya gurubunun ve hücrelerin etkili, güvenli ve verimli çalışması için kullanılan sistemlerdir. Bu yüzden BYS sistemi kullanılırken türünün doğru seçilmesi oldukça önemlidir. BYS kurulduğu sisteme göre türlere ayrılmaktadır. Her bir hücreye doğrudan ya da dolaylı olarak, toplu olarak tek bir batarya grubuna ya da batarya modüllerine vb. göre şekillenebilir. Ancak temel mantalitesi ucuz, kompakt, güvenli, kurulum ve bakımı kolay olmalıdır (Andrea, 2010). Dahası, bir BYS'nin yapısı, araç performansının gerekliliklerini sağlamalıdır. Her BYS türü kendi içerisinde bazı avantaj ve dezavantajlar sahiptir. Aslında BYS türünün seçimi batarya göre değil, bataryanın kullanıldığı sisteme göre seçilmelidir. Buna göre literatürde

BYS türleri 4 ana kategoriye ayrılabilir (Andrea, 2010). Bunlar Şekil 10'da gösterildiği gibi merkezi BYS, ana-yardımcı Kart BYS, parçalı BYS ve dağıtılmış BYS türleridir.

Tablo 6. Batarya Isıtma Yöntemlerinin Nitelik Bakımından Karşılaştırılması

Isıtma Yöntemi	ET	M	IS	BYE	H	G	Ortalama	Yüzdellik	EA'larda kullanımı
Hava ile ısıtma	2	4	1	2	3	3	2,50	%63	Honda Insight/ Toyota Highlander
Sıvı ile ısıtma	1	4	2	4	1	4	2,67	%67	Tesla/Chevrolet Volt
Faz değ. malzeme	1	2	2	4	2	3	2,33	%58	×
Peltier efekt	2	2	1	4	2	3	2,33	%58	SAM EVII EA
Elektrotermal plakalar	1	2	1	2	2	4	2,00	%50	Mitsubishi i-MiEV/ Nissan LEAF
Elektrotermal ceketler	1	2	2	3	2	3	2,17	%54	Chery
Elektrotermal filmler	1	2	2	3	2	3	2,17	%54	×
Kendi kendine ısıtma	1	4	4	3	4	4	3,33	%83	×
DC ile ısıtma	4	4	2	3	4	3	3,33	%83	×
AC ile ısıtma	4	4	3	4	4	4	3,83	%96	×
Darbe akımı ile	4	3	4	2	4	2	3,17	%79	×



Şekil 10. BYS Türleri a) Merkezi BYS, b) Parçalı BYS, c) Dağıtılmış BYS, d) Ana-Yardımcı Kart BYS

Merkezi BYS'de batarya grubundaki hücrelerin her biri doğrudan ana kontrolöre bağlanır. N sayıda hücre için bir N+1 sayıda bağlantı kablosu kullanılır. Batarya gurubu hücrelerinin bilgilerini almaya sağlayan kablolar, ana kontrolör merkezine doğrudan geldiği için ana kontrolör merkezi bir yere konumlandırılmalıdır. Bu türü kullanmak yalnızca tek bir kurulum noktası gerektirdiği gibi karmaşıklığa da sebep olmaktadır. Hücrelerdeki gerilim, akım ve sıcaklık ölçümleri gibi veriler tek bir işlemci tarafından değerlendirilir. Ana kontrolör tek olduğu için haberleşmeden kaynaklı zaman gecikmeleri azdır. Dolayısıyla bu BYS türünün uygulanması kompakt, kolay ve ucuzdur (Andrea, 2010). Ancak tek bir ana kontrolör olmasından dolayı işlemcisinin çıkış-giriş sayısı sınırlıdır. Bu yüzden batarya grubundaki hücrelerin artması merkezi BYS için sınırlı bir çalışma aralığı doğuracaktır. Dahası, ana kontrolör hücre dengelemesinin tek kaynağı olduğu için aşırı ısıya maruz kalabilmektedir. Yüzlerce-binlerce hücreye sahip EV'ler için, büyük sensör donanımları oldukça karmaşıktır ve yüksek bir ölçüm hassasiyetine sahip olması gerekmektedir. Bundan dolayı merkezi BYS'de kontrolörün yükü oldukça ağırdır. Bu nedenle, merkezi BYS, EA batarya grubunun BYS sistemi için kullanılması oldukça nadirdir (Kong vd., 2017).

Parçalı BYS’de yapı olarak merkezi BYS’ye benzemektedir. Ancak burada denetim iki birime ayrılmıştır. Birincisi ana kontrolör, ikinci ise modül yardımcı kartıdır. Batarya gurubu kullanıcıya göre istenilen şekilde 2 gruba ayrılmaktadır. Yardımcı kart birinci gruptan gerekli ölçüm verilerini alıp iletişim ağıyla ana kontrolöre gönderir, ana kontrolör de ikinci gruptan aldığı ölçümleri ve yardımcı karttan gelen diğer birinci grup ölçümlerini alıp gerekli hesaplama ve iletişimi sağlama görevini üstlenmektedir. Parçalı BYS, merkezi BYS ile benzer avantajlara sahiptir. Bunun yanında yardımcı kart ile ana kontrolör denetleyicisi batarya gurubunun yakınına kurulabileceğinden dolayı hücrelerden gelen kablo bağlantılarının kurulumu daha kolaydır. Ancak maliyet bakımından merkezi BYS’ye göre daha pahalıdır (Andrea, 2010).

Ana-Yardımcı kart BYS’de, birden fazla seri-paralel hücreden oluşan modüllerin yardımcı kartlar ile denetlenmesi ve bu yardımcı kartların hem kendi aralarında hem de bir ana kontrolör ile iletişim kurmasıyla uygulan bir BYS türüdür. Buradaki yardımcı kartların görevi modüllerdeki gerilim, akım ve sıcaklık ölçümlerinin yapılması, hücre dengelemesinin yapılması ve bu verilerin haberleşme ağı ile ana kontrolöre gönderilmesini sağlamaktır. Ana kontrolörün buradaki görevi yardımcı kartlardan gelen ölçümler doğrultusunda batarya grubu için kestirim, termal yönetim, koruma, hesaplama vb. görevleri yerine getirmektir (Messier vd., 2019). Çalışma yapısı, bazı avantaj ve dezavantajları bakımından parçalı BYS ile benzer özellikler göstermektedir. Ancak burada ana kontrolör, parçalı BYS’deki gibi gerilim ölçümü yapmaz, sadece hesaplama ve iletişimi yapar. Bundan dolayı ana kontrolörün hesaplama yükü daha azdır. Sonuç olarak EA’lar gibi büyük batarya gruplarına sahip sistemler için ana kontrolörün yükünü hafifleten, birden fazla modülde yardımcı kartların kullanılması daha hassas, daha güvenilir sonuçları doğurduğundan dolayı üreticiler tarafından diğer türlere göre daha çok tercih edilmektedir (Kong vd., 2017).

Dağıtılmış BYS, ana-yardımcı kart BYS ile benzer yapı göstermektedir. Buradaki fark yardımcı kartların batarya grubundaki hücre modüllerine değil de tek tek her hücreye direkt olarak bağlanması şeklindedir. Her bir hücreye direkt bağlı olan yardımcı kartlar bir haberleşme ağıyla birbirine ve ana kontrolöre bağlanmaktadır. Yardımcı kartların görevi hücrelerdeki gerilim, akım, sıcaklık vb. verileri almaktadır. Hücreye direkt bağlı olduğu için ölçüm güvenilirliği oldukça yüksektir. Burada ana kontrolörün görevi, yardımcı kartlardan gelen bilgiler doğrultusunda sadece hesaplama ve haberleşme işlemlerini yerine getirmektir. Bu yöntem de her bir hücre için bir yardımcı kart olduğundan dolayı sistemin uygulanması karmaşık ve geniş alan kaplamaktadır. Dahası diğer türler arasında en maliyet olan türdür. Bu yüzden endüstriyel uygulamalarda pek tercih edilmemektedir (Messier vd., 2019).

Literatürde BYS türlerinin kullanıldığı bazı çalışmalar yapılmıştır. Stuart vd. (2002), elektronik kontrol birimi ve hücre dengelemeden oluşan geleneksel bir BYS türünün blok diyagramını vermişlerdir. Ancak bu geleneksel yöntemin ucuz olması ve karmaşık olmaması gibi avantajları olsa da EA’lar gibi büyük batarya gurubunun gereksinimlerini karşılamakta yetersiz olduğunu vurgulamışlardır. Bu yüzden daha ucuz, daha hafif, daha az yer kaplayan ve birkaç değişik batarya türüne uygulanabilecek parçalı bir BYS sistemi önermişlerdir. Steinhorst vd. (2016), dağıtılmış ve yeniden yapılandırılabilir bir BYS türü önermişlerdir. Çalışma 2 boyutlu olarak geliştirilmiştir. Birinci boyutta merkezi ve dağıtılmış BYS türlerine göre sınıflandırma yapılırken, ikinci boyutta sabit ve yeniden yapılandırılabilir sistem olarak sınıflandırma yapılmıştır. Bu sınıflandırma sonucunda dağıtılmış ve yeniden yapılandırılabilir BYS türünün zorluklarının çözülmesi halinde gelecekteki batarya gruplarında tercih edilen bir BYS türü olabileceğini belirtmişlerdir. Steinhorst vd. (2014) diğer bir çalışmada ise merkezi BYS yerine, her bir hücreye monte edilmiş bir hücre yönetim birimi ile gömülü bir batarya yönetim türü önermişlerdir. Bu tür, dağıtılmış BYS türü olarak kullanılmış ve merkezi BYS’ye göre önemli üstünlüklerinin olduğu vurgulanmıştır. Zhu vd. (2013), dağıtılmış BYS türü üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Sistemin bağlantı kablo sayısının azalttığı ve esnek çalıştığı belirtilmiştir. Çalışma sonucunda, önerdikleri BYS türünün bataryanın durum bilgisi verilerini güvenilir bir şekilde ölçebildiğini ve EA’ların güvenilir bir şekilde çalışmasına destek vereceği bildirmişlerdir. Stuart ve Zhu (2011), parçalanmış bir BYS türünü önermişlerdir. Önerdikleri sistemin ticari elektrikli araçlarda veya havacılık uygulamalarında kullanılacak büyük batarya gruplarını yönetmek için görece olarak basit ancak doğru bir sonuç verecek bir sistem olduğunu vurgulamışlardır. BYS türleri için en kapsamlı ve bilgilendirici çalışma Andrea (2010) tarafından yapılmıştır. Kitabında BYS türleri hakkında genel bilgiler, gösterimler, bazı avantaj ve dezavantajları sunmuştur.

BYS türlerinin kendi içerisinde bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Derlenen çalışmalardan yola çıkarak BYŞ türleri bazı nitelikler bakımından karşılaştırılmıştır (Andrea, 2010; Kong vd., 2017; Saw vd., 2016; Steinhorst vd., 2016, 2014; T. Stuart vd., 2002; T. A. Stuart ve Zhu, 2011). Bu nitelikler Tablo 7’de verildiği üzere; karmaşıklık düzeyi (KD), (yüksek 1, orta 2, düşük 3), maliyet (M) (ucuz 3, orta 2, pahalı 1), ölçüm kalitesi (ÖK) (Yüksek 3, orta 2, düşük 1), bakım (B) (kolay 3, orta 2, zor 1), işlemciye yüklenme (İY) (Yüksek 1, orta 2, düşük 3), haberleşme süresi (HS) (Yüksek 3, orta 2, düşük 1) ve güvenilirlik (G) (Yüksek 3, orta 2, düşük 1) olarak belirlenmiştir. Her bir nitelik kendi içerisinde kullanıcının yararı doğrultusunda 1, 2 ve 3 puanları verilmiştir. Daha sonra her bir türün niteliklerinden aldığı puanlar toplanıp, nitelik sayısına bölünmek suretiyle bir ortalama elde edilmiştir. Alınan bu ortalamanın yüzdeler olarak hesaplanması yapıp BYŞ türlerinin uygunluk oranları elde edilmiştir. Elde edilen verilere göre her ne kadar maliyet ve haberleşme süresi bakımından düşük puan almışsa da EA’lar için en uygun ve güvenli türün dağıtılmış BYŞ türü olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 7. BYŞ Türlerinin Nitelik Bakımından Karşılaştırılması

BYŞ türü	KD	M	ÖK	B	İY	HS	G	Ortalama	Yüzdeler
Merkezi BYŞ	1	3	2	1	1	3	1	1,71	%57
Parçalı BYŞ	2	1	2	1	2	2	1	1,57	%52
Ana-Yrd. kart BYŞ	1	1	2	1	2	2	1	1,43	%48
Dağıtılmış BYŞ	2	1	3	2	3	1	3	2,14	%71

5. SONUÇ

Ulaşım sektörü kaynaklı sera gazı salınımları, çevre kirlenmesi, küresel ısınmaya sebep vb. durumlarından dolayı geleneksel içten yanmalı motorlu araçların yerine alternatif bir kaynak olan elektrikli araçlar gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Özellikle bataryalı elektrikli araçlar yolda iken tamamıyla temiz, sessiz ve çevre dostu bir hizmet sunmaktadır. Ancak bataryaların enerji kapasitesi araca güç aktarımı açısından sınırlı bir çalışma aralığı sunmaktadır. Bundan dolayı mevcut batarya sistemlerinin daha verimli ve daha güvenli çalışması için bir batarya yönetim sistemine ihtiyaç duyulması kaçınılmaz olmuştur. Bu alandaki akademik çalışmalar, araştırma-geliştirme çalışmaları birçok yerli-yabancı araştırmacılar tarafından yapılmaktadır. Ülkemizde de özellikle TOGG girişiminin başlanması ve geleceğin ulaşım araçları olacak elektrikli araçlar ile ilgili kaynak, kavram ve araştırmaların Türkçe literatüründe çokça yer alması gerektiği düşünülmektedir. Bu çalışma elektrikli araçlarda batarya yönetim sistemi ile ilgili detaylı bir derleme çalışmasının Türkçe literatürüne katkı sağlaması amacıyla yapılmıştır. Çalışma da genel olarak elektrikli araçların gerekliliği, tarihçesi, bir enerji kaynağı olarak kullanılan bataryaların işlevinden ve zorluklarından dolayı bir batarya yönetim sisteminin gerekliliğinden bahsedilmiştir.

Bu çalışmada batarya yönetim sistemleri ile ilgili literatürde var olan araştırma, derleme çalışmaları incelenmiş ve derlenmiştir. BYŞ alt gruplarında olan hücre izleme, bataryanın güvenliği, koruması, bataryanın dış-iç birimlerle haberleşmesi, bataryalarda hücre dengeleme, batarya durum kestirimleri, batarya termal yönetimi ve batarya türleri ile ilgili literatürde var olan çalışmalar derlenmiş ve kapsamlı bilgiler sunulmuştur. Özellikle hücre dengeleme, durum kestirimleri, termal yönetim ve BYŞ türleri ile ilgili yöntemlerin avantaj-dezavantajları sunulmuş ve nitelik bakımından karşılaştırılmaları yapılmıştır.

Bu derleme çalışması BYŞ hakkında araştırma ve çalışma yapmak isteyen araştırmacılar, üreticiler, firmalar vb. için genel bir bakış açısı kazandıracağı ve literatüre daha çok hâkim olmaya yardımcı olacaktır. Bu çalışmayla beraber, yapılacak herhangi BYŞ sistemi için hangi kavramlar, kriterler, avantaj-dezavantajlar olduğu ve buna göre sistemin kurulması adına bir yol haritası olarak, Türkçe literatürüne katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar çıkar çatışması beyan etmemektedir.

KAYNAKLAR

- Adany, R., Aurbach, D., & Kraus, S. (2013). Switching algorithms for extending battery life in Electric Vehicles. *Journal of Power Sources*, 231, 50-59. doi:[10.1016/j.jpowsour.2012.12.075](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.12.075)
- Aktaş, M., Baygüneş, B., Kıvrak, S., Çavuş, B., & Sözen, F. (2020). Elektrikli Araç İçin Düşük Maliyetli Bir Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Ejosat Special Issue 2020 (HORA)*, 227-238. doi:[10.31590/ejosat.779720](https://doi.org/10.31590/ejosat.779720)
- Al-Hallaj, S., & Selman, J. R. (2002). Thermal modeling of secondary lithium batteries for electric vehicle/hybrid electric vehicle applications. *Journal of Power Sources*, 110(2), 341-348. doi:[10.1016/S0378-7753\(02\)00196-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00196-9)
- Alvarez Anton, J. C., Garcia Nieto, P. J., Blanco Viejo, C., & Vilan Vilan, J. A. (2013). Support Vector Machines Used to Estimate the Battery State of Charge. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(12), 5919-5926. doi:[10.1109/TPEL.2013.2243918](https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2243918)
- Álvarez Antón, J. C., García Nieto, P. J., de Cos Juez, F. J., Sánchez Lasheras, F., González Vega, M., & Roqueñi Gutiérrez, M. N. (2013). Battery state-of-charge estimator using the SVM technique. *Applied Mathematical Modelling*, 37(9), 6244-6253. doi:[10.1016/j.apm.2013.01.024](https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.01.024)
- Amir, U., Tao, L., Zhang, X., Saeed, M., & Hussain, M. (2018). A Novel SOC Estimation Method for Lithium Ion Battery Based On Improved Adaptive PI Observer. 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), 1-5. doi:[10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607386](https://doi.org/10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607386)
- Andrea, D. (2010). Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs. Artech house.
- Ariantara, B., Putra, N., & Supriadi, S. (2018). Battery thermal management system using loop heat pipe with LTP copper capillary wick. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 105(1), 012045. doi:[10.1088/1755-1315/105/1/012045](https://doi.org/10.1088/1755-1315/105/1/012045)
- Arora, S. (2018). Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies. *Journal of Power Sources*, 400, 621-640. doi:[10.1016/j.jpowsour.2018.08.020](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.020)
- Aydın, S., Gümüş, R., & Akçay, İ. H. (2013). Yakıt Pili ile Çalışan Elektrikli Bir Aracın Güç , Sıcaklık , Bağlı Nem ve Hızının Anlık Olarak İzlenmesi ve Kontrolü. *Teknik Bilimler Dergisi*, 3(2), 7-12.
- Bahiraei, F., Fartaj, A., & Nazri, G. A. (2016). Numerical Investigation of Active and Passive Cooling Systems of a Lithium-Ion Battery Module for Electric Vehicles. SAE Technical Papers, 2016-01-0655. doi:[10.4271/2016-01-0655](https://doi.org/10.4271/2016-01-0655)
- Balogopal, B., & Chow, M. Y. (2015). The state of the art approaches to estimate the state of health (SOH) and state of function (SOF) of lithium Ion batteries. Proceeding - 2015 IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2015, 2, 1302-1307. doi:[10.1109/INDIN.2015.7281923](https://doi.org/10.1109/INDIN.2015.7281923)
- Bandhauer, T. M., & Garimella, S. (2013). Passive, internal thermal management system for batteries using microscale liquid-vapor phase change. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), 756-769. doi:[10.1016/j.applthermaleng.2013.08.004](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.08.004)
- Barai, A., Uddin, K., Widanalage, W. D., McGordon, A., & Jennings, P. (2016). The effect of average cycling current on total energy of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 303, 81-85. doi:[10.1016/j.jpowsour.2015.10.095](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.10.095)
- Barré, A., Deguilhem, B., Grolleau, S., Gérard, M., Suard, F., & Riu, D. (2013). A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. *Journal of Power Sources*, 241, 680-689. doi:[10.1016/j.jpowsour.2013.05.040](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.040)
- Berecibar, M., Gandiaga, I., Villarreal, I., Omar, N., Van Mierlo, J., & Van Den Bossche, P. (2016). Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 572-587. doi:[10.1016/j.rser.2015.11.042](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.042)

- Campestrini, C., Heil, T., Kosch, S., & Jossen, A. (2016). A comparative study and review of different Kalman filters by applying an enhanced validation method. *Journal of Energy Storage*, 8, 142-159. doi:[10.1016/j.est.2016.10.004](https://doi.org/10.1016/j.est.2016.10.004)
- Cao, J., Schofield, N., & Emadi, A. (2008). Battery balancing methods: A comprehensive review. 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2008, 3-8. doi:[10.1109/VPPC.2008.4677669](https://doi.org/10.1109/VPPC.2008.4677669)
- Carter, J., Fan, Z., & Cao, J. (2020). Cell equalisation circuits: A review. *Journal of Power Sources*, 448, 227489. doi:[10.1016/j.jpowsour.2019.227489](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227489)
- Chan, C. C. (2013). The Rise & Fall of Electric Vehicles in 1828–1930: Lessons Learned [Scanning Our Past]. *Proceedings of the IEEE*, 101(1), 206-212. doi:[10.1109/JPROC.2012.2228370](https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2228370)
- Chau, K. T., Wu, K. C., & Chan, C. C. (2004). A new battery capacity indicator for lithium-ion battery powered electric vehicles using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Energy Conversion and Management*, 45(11-12), 1681-1692. doi:[10.1016/j.enconman.2003.09.031](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.031)
- Chemali, E., Kollmeyer, P. J., Preindl, M., & Emadi, A. (2018). State-of-charge estimation of Li-ion batteries using deep neural networks: A machine learning approach. *Journal of Power Sources*, 400, 242-255. doi:[10.1016/j.jpowsour.2018.06.104](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.06.104)
- Chen, L., Wang, Z., Lu, Z., Li, J., Ji, B., Wei, H., & Pan, H. (2018). A Novel State-of-Charge Estimation Method of Lithium-Ion Batteries Combining the Grey Model and Genetic Algorithms. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(10), 8797-8807. doi:[10.1109/TPEL.2017.2782721](https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2782721)
- Chen, X., Shen, W. X., Cao, Z., & Kapoor, A. (2012). Sliding Mode Observer for State of Charge Estimation Based on Battery Equivalent Circuit in Electric Vehicles. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 9(3), 225-234. doi:[10.1080/1448837X.2012.11464327](https://doi.org/10.1080/1448837X.2012.11464327)
- Chen, Xiaopeng, Shen, W., Cao, Z., & Kapoor, A. (2014a). A novel approach for state of charge estimation based on adaptive switching gain sliding mode observer in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 246, 667-678. doi:[10.1016/j.jpowsour.2013.08.039](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.08.039)
- Chen, Xiaopeng, Shen, W., Cao, Z., & Kapoor, A. (2014b). Adaptive gain sliding mode observer for state of charge estimation based on combined battery equivalent circuit model. *Computers & Chemical Engineering*, 64, 114-123. doi:[10.1016/j.compchemeng.2014.02.015](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.02.015)
- Chen, Zewang, Yang, L., Zhao, X., Wang, Y., & He, Z. (2019). Online state of charge estimation of Li-ion battery based on an improved unscented Kalman filter approach. *Applied Mathematical Modelling*, 70, 532-544. doi:[10.1016/j.apm.2019.01.031](https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.01.031)
- Chen, Zheng, Fu, Y., & Mi, C. C. (2013). State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries in Electric Drive Vehicles Using Extended Kalman Filtering. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62(3), 1020-1030. doi:[10.1109/TVT.2012.2235474](https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2235474)
- Chen, Zonghai, Sun, H., Dong, G., Wei, J., & Wu, J. (2019). Particle filter-based state-of-charge estimation and remaining-dischargeable-time prediction method for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 414, 158-166. doi:[10.1016/j.jpowsour.2019.01.012](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.01.012)
- Choudhari, V. G., Dhoble, D. A. S., & Sathe, T. M. (2020). A review on effect of heat generation and various thermal management systems for lithium ion battery used for electric vehicle. *Journal of Energy Storage*, 32, 101729. doi:[10.1016/j.est.2020.101729](https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101729)
- Choudhury, J. R., Banerjee, T. P., Gurung, H., Bhattacharjee, A. K., & Das, S. (2009). Real time state of charge prediction using Kalman Filter. 2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC), 1190-1194. doi:[10.1109/NABIC.2009.5393786](https://doi.org/10.1109/NABIC.2009.5393786)
- Daowd, M., Omar, N., van den Bossche, P., & van Mierlo, J. (2012). Capacitor based battery balancing system. *World Electric Vehicle Journal*, 5(2), 385-393. doi:[10.3390/wevj5020385](https://doi.org/10.3390/wevj5020385)
- Daowd, M., Omar, N., Van Den Bossche, P., & Van Mierlo, J. (2011). Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation. 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 1-7. doi:[10.1109/VPPC.2011.6043010](https://doi.org/10.1109/VPPC.2011.6043010)

- Dong, G., Wei, J., & Chen, Z. (2016). Kalman filter for onboard state of charge estimation and peak power capability analysis of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 328, 615-626. doi:[10.1016/j.jpowsour.2016.08.065](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.08.065)
- Dong, G., Zhang, X., Zhang, C., & Chen, Z. (2015). A method for state of energy estimation of lithium-ion batteries based on neural network model. *Energy*, 90, 879-888. doi:[10.1016/j.energy.2015.07.120](https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.120)
- Drori, Y., & Martinez, C. (2005). The benefits of cell balancing. Application Note, Xicor Incorporated, 1-9. <http://www.neue-verpackung.de/ai/resources/a03b3cf05d5.pdf>
- Du, J., Liu, Z., Wang, Y., & Wen, C. (2016). An adaptive sliding mode observer for lithium-ion battery state of charge and state of health estimation in electric vehicles. *Control Engineering Practice*, 54, 81-90. doi:[10.1016/j.conengprac.2016.05.014](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.05.014)
- Duong, V.-H., Bastawrous, H. A., Lim, K., See, K. W., Zhang, P., & Dou, S. X. (2015). Online state of charge and model parameters estimation of the LiFePO₄ battery in electric vehicles using multiple adaptive forgetting factors recursive least-squares. *Journal of Power Sources*, 296, 215-224. doi:[10.1016/j.jpowsour.2015.07.041](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.07.041)
- Duraisamy, T., & Kaliyaperumal, D. (2020). Active cell balancing for electric vehicle battery management system. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 11(2), 571-579. doi:[10.11591/ijpeds.v11.i2.pp571-579](https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i2.pp571-579)
- Eddahech, A., Briat, O., & Vinassa, J. M. (2012). Adaptive voltage estimation for EV Li-ion cell based on artificial neural networks state-of-charge meter. 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1318-1324. doi:[10.1109/ISIE.2012.6237281](https://doi.org/10.1109/ISIE.2012.6237281)
- Ekici, Y. E. (2019). Batarya yönetim sistemleri. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye.
- Ekici, Y. E., & Tan, N. (2019). Charge and discharge characteristics of different types of batteries on a hybrid electric vehicle model and selection of suitable battery type for electric vehicles. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 3(4), 62-70. doi:[10.30939/ijastech..527971](https://doi.org/10.30939/ijastech..527971)
- Fang, Y., Xiong, R., & Wang, J. (2018). Estimation of Lithium-Ion Battery State of Charge for Electric Vehicles Based on Dual Extended Kalman Filter. *Energy Procedia*, 152, 574-579. doi:[10.1016/j.egypro.2018.09.213](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.213)
- Gallardo-Lozano, J., Romero-Cadaval, E., Milanés-Montero, M. I., & Guerrero-Martinez, M. A. (2014). Battery equalization active methods. *Journal of Power Sources*, 246, 934-949. doi:[10.1016/j.jpowsour.2013.08.026](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.08.026)
- Gao, M., Liu, Y., & He, Z. (2011). Battery state of charge online estimation based on particle filter. 2011 4th International Congress on Image and Signal Processing, 2233-2236. doi:[10.1109/CISP.2011.6100603](https://doi.org/10.1109/CISP.2011.6100603)
- Guenther, C., Schott, B., Hennings, W., Waldowski, P., & Danzer, M. A. (2013). Model-based investigation of electric vehicle battery aging by means of vehicle-to-grid scenario simulations. *Journal of Power Sources*, 239, 604-610. doi:[10.1016/j.jpowsour.2013.02.041](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.02.041)
- Hallaj, S. Al, & Selman, J. R. (2000). A Novel Thermal Management System for Electric Vehicle Batteries Using Phase-Change Material. *Journal of The Electrochemical Society*, 147(9), 3231. doi:[10.1149/1.1393888](https://doi.org/10.1149/1.1393888)
- Hametner, C., & Jakubek, S. (2013). State of charge estimation for Lithium Ion cells: Design of experiments, nonlinear identification and fuzzy observer design. *Journal of Power Sources*, 238, 413-421. doi:[10.1016/j.jpowsour.2013.04.040](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.04.040)
- Han, X., Lu, L., Zheng, Y., Feng, X., Li, Z., Li, J., & Ouyang, M. (2019). A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle. *eTransportation*, 1, 100005. doi:[10.1016/j.etrans.2019.100005](https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100005)
- Hannan, M. A., Lipu, M. S. H., Hussain, A., & Mohamed, A. (2017). A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 834-854. doi:[10.1016/j.rser.2017.05.001](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.001)

- Hansen, T., & Wang, C.-J. (2005). Support vector based battery state of charge estimator. *Journal of Power Sources*, 141(2), 351-358. doi:[10.1016/j.jpowsour.2004.09.020](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.09.020)
- Hauser, A., & Kuhn, R. (2015). Cell balancing, battery state estimation, and safety aspects of battery management systems for electric vehicles. İçinde: B. Scrosati, J. Garche & W. Tillmetz (Eds.) *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles* (ss. 283-326). Elsevier. doi:[10.1016/B978-1-78242-377-5.00012-1](https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-377-5.00012-1)
- He, H. W., Zhang, Y. Z., Xiong, R., & Wang, C. (2015). A novel Gaussian model based battery state estimation approach: State-of-Energy. *Applied Energy*, 151, 41-48. doi:[10.1016/j.apenergy.2015.04.062](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.062)
- He, H., Xiong, R., & Peng, J. (2016). Real-time estimation of battery state-of-charge with unscented Kalman filter and RTOS µCOS-II platform. *Applied Energy*, 162, 1410-1418. doi:[10.1016/j.apenergy.2015.01.120](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.120)
- He, H., Zhang, X., Xiong, R., Xu, Y., & Guo, H. (2012). Online model-based estimation of state-of-charge and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Energy*, 39(1), 310-318. doi:[10.1016/j.energy.2012.01.009](https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.009)
- He, W., Williard, N., Chen, C., & Pecht, M. (2013). State of charge estimation for electric vehicle batteries using unscented kalman filtering. *Microelectronics Reliability*, 53(6), 840-847. doi:[10.1016/j.microrel.2012.11.010](https://doi.org/10.1016/j.microrel.2012.11.010)
- He, W., Williard, N., Chen, C., & Pecht, M. (2014). State of charge estimation for Li-ion batteries using neural network modeling and unscented Kalman filter-based error cancellation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 62, 783-791. doi:[10.1016/j.ijepes.2014.04.059](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.04.059)
- Hoque, M. M., Hannan, M. A., Mohamed, A., & Ayob, A. (2017). Battery charge equalization controller in electric vehicle applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1363-1385. doi:[10.1016/j.rser.2016.11.126](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.126)
- Hou, Z. Y., Lou, P. Y., & Wang, C. C. (2017). State of charge, state of health, and state of function monitoring for EV BMS. 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics, ICCE 2017, 1, 310-311. doi:[10.1109/ICCE.2017.7889332](https://doi.org/10.1109/ICCE.2017.7889332)
- Hu, J. N., Hu, J. J., Lin, H. B., Li, X. P., Jiang, C. L., Qiu, X. H., & Li, W. S. (2014). State-of-charge estimation for battery management system using optimized support vector machine for regression. *Journal of Power Sources*, 269, 682-693. doi:[10.1016/j.jpowsour.2014.07.016](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.016)
- Hu, L., Hu, X., Che, Y., Feng, F., Lin, X., & Zhang, Z. (2020). Reliable state of charge estimation of battery packs using fuzzy adaptive federated filtering. *Applied Energy*, 262, 114569. doi:[10.1016/j.apenergy.2020.114569](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114569)
- Hu, X., Feng, F., Liu, K., Zhang, L., Xie, J., & Liu, B. (2019). State estimation for advanced battery management: Key challenges and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109334. doi:[10.1016/j.rser.2019.109334](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109334)
- Hu, X., Zheng, Y., Howey, D. A., Perez, H., Foley, A., & Pecht, M. (2020). Battery warm-up methodologies at subzero temperatures for automotive applications: Recent advances and perspectives. *Progress in Energy and Combustion Science*, 77, 100806. doi:[10.1016/j.pecs.2019.100806](https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.100806)
- Hu Xiaosong, Sun Fengchun, Zou Yuan, & Peng Huei. (2011). Online estimation of an electric vehicle Lithium-Ion battery using recursive least squares with forgetting. *Proceedings of the 2011 American Control Conference*, 935-940. doi:[10.1109/ACC.2011.5991260](https://doi.org/10.1109/ACC.2011.5991260)
- Ianniciello, L., Biwolé, P. H., & Achard, P. (2018). Electric vehicles batteries thermal management systems employing phase change materials. *Journal of Power Sources*, 378, 383-403. doi:[10.1016/j.jpowsour.2017.12.071](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.12.071)
- Jaguemont, J., Boulon, L., & Dubé, Y. (2016). A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures. *Applied Energy*, 164, 99-114. doi:[10.1016/j.apenergy.2015.11.034](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.034)
- Jaguemont, Joris, & Van Mierlo, J. (2020). A comprehensive review of future thermal management systems for battery-electrified vehicles. *Journal of Energy Storage*, 31, 101551. doi:[10.1016/j.est.2020.101551](https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101551)

- Ji, Y., & Wang, C. Y. (2013). Heating strategies for Li-ion batteries operated from subzero temperatures. *Electrochimica Acta*, 107, 664-674. doi:[10.1016/j.electacta.2013.03.147](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.03.147)
- Jiang, C., Taylor, A., Duan, C., & Bai, K. (2013). Extended Kalman Filter based battery state of charge (SOC) estimation for electric vehicles. 2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 1-5. doi:[10.1109/ITEC.2013.6573477](https://doi.org/10.1109/ITEC.2013.6573477)
- Jiménez-Bermejo, D., Fraile-Ardanuy, J., Castaño-Solis, S., Merino, J., & Álvaro-Hermana, R. (2018). Using Dynamic Neural Networks for Battery State of Charge Estimation in Electric Vehicles. *Procedia Computer Science*, 130, 533-540. doi:[10.1016/j.procs.2018.04.077](https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.077)
- Juang, L. W., Kollmeyer, P. J., Jahns, T. M., & Lorenz, R. D. (2012). Implementation of online battery state-of-power and state-of-function estimation in electric vehicle applications. 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2012, 1819-1826. doi:[10.1109/ECCE.2012.6342591](https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342591)
- Jun Xu, Mi, C. C., Binggang Cao, Junjun Deng, Zheng Chen, & Siqi Li. (2014). The State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries Based on a Proportional-Integral Observer. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(4), 1614-1621. doi:[10.1109/TVT.2013.2287375](https://doi.org/10.1109/TVT.2013.2287375)
- Jung, D. Y., Lee, B. H., & Kim, S. W. (2002). Development of battery management system for nickel-metal hydride batteries in electric vehicle applications. *Journal of Power Sources*, 109(1), 1-10. doi:[10.1016/S0378-7753\(02\)00020-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00020-4)
- Karabeyoğlu, E. D., Güzel, E., Kılıç, H., Sarıoğlu, B., Gökdel, Y. D., & Serincan, M. F. (2019). Investigation and Design of an Active Cell Balancing System for Li-Ion Batteries. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(4), 869-877. doi:[10.21923/jesd.553295](https://doi.org/10.21923/jesd.553295)
- Kim, I.-S. (2006). The novel state of charge estimation method for lithium battery using sliding mode observer. *Journal of Power Sources*, 163(1), 584-590. doi:[10.1016/j.jpowsour.2006.09.006](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.09.006)
- Kıvrak, S., Özer, T., & Oğuz, Y. (2020). Can Bus Based BMS Control Card Design And Implementation By Using STM32f103 Series Microcontroller. *Engineering Sciences*, 15(1), 27-33. doi:[10.12739/NWSA.2020.15.1.1A0448](https://doi.org/10.12739/NWSA.2020.15.1.1A0448)
- Kong, X., Zheng, Y., Ouyang, M., Li, X., Lu, L., & Li, J. (2017). Signal synchronization for massive data storage in modular battery management system with controller area network. *Applied Energy*, 197, 52-62. doi:[10.1016/j.apenergy.2017.04.002](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.002)
- Li, Yanwen, Wang, C., & Gong, J. (2016). A combination Kalman filter approach for State of Charge estimation of lithium-ion battery considering model uncertainty. *Energy*, 109, 933-946. doi:[10.1016/j.energy.2016.05.047](https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.047)
- Li, Yi, Liu, K., Foley, A. M., Zülke, A., Berecibar, M., Nanini-Maury, E., Van Mierlo, J., & Hoster, H. E. (2019). Data-driven health estimation and lifetime prediction of lithium-ion batteries: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109254. doi:[10.1016/j.rser.2019.109254](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109254)
- Li, Yigang, Chen, J., & Lan, F. (2020). Enhanced online model identification and state of charge estimation for lithium-ion battery under noise corrupted measurements by bias compensation recursive least squares. *Journal of Power Sources*, 456, 227984. doi:[10.1016/j.jpowsour.2020.227984](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227984)
- Li, Yue, Chattopadhyay, P., Xiong, S., Ray, A., & Rahn, C. D. (2016). Dynamic data-driven and model-based recursive analysis for estimation of battery state-of-charge. *Applied Energy*, 184, 266-275. doi:[10.1016/j.apenergy.2016.10.025](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.025)
- Li, Zhe, Huang, J., Liaw, B. Y., & Zhang, J. (2017). On state-of-charge determination for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 348, 281-301. doi:[10.1016/j.jpowsour.2017.03.001](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.001)
- Li, Zhenhe, Khajepour, A., & Song, J. (2019). A comprehensive review of the key technologies for pure electric vehicles. *Energy*, 182, 824-839. doi:[10.1016/j.energy.2019.06.077](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.077)
- Lin, C., Mu, H., Xiong, R., & Cao, J. (2017). Multi-model probabilities based state fusion estimation method of lithium-ion battery for electric vehicles: State-of-energy. *Applied Energy*, 194, 560-568. doi:[10.1016/j.apenergy.2016.05.065](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.065)

- Lin, C., Mu, H., Xiong, R., & Shen, W. (2016). A novel multi-model probability battery state of charge estimation approach for electric vehicles using H-infinity algorithm. *Applied Energy*, 166, 76-83. doi:[10.1016/j.apenergy.2016.01.010](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.010)
- Lipu, M. S. H., Hannan, M. A., Hussain, A., Hoque, M. M., Ker, P. J., Saad, M. H. M., & Ayob, A. (2018). A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 205, 115-133. doi:[10.1016/j.jclepro.2018.09.065](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.065)
- Liu, H., Wei, Z., He, W., & Zhao, J. (2017). Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review. *Energy Conversion and Management*, 150, 304-330. doi:[10.1016/j.enconman.2017.08.016](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.016)
- Liu, K., Li, K., Peng, Q., & Zhang, C. (2019). A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 14(1), 47-64. doi:[10.1007/s11465-018-0516-8](https://doi.org/10.1007/s11465-018-0516-8)
- Liu, X., Wu, J., Zhang, C., & Chen, Z. (2014). A method for state of energy estimation of lithium-ion batteries at dynamic currents and temperatures. *Journal of Power Sources*, 270, 151-157. doi:[10.1016/j.jpowsour.2014.07.107](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.107)
- Lopez, C. F., Jeevarajan, J. A., & Mukherjee, P. P. (2016). Evaluation of Combined Active and Passive Thermal Management Strategies for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 13(3), 1-10. doi:[10.1115/1.4035245](https://doi.org/10.1115/1.4035245)
- Lu, J., Chen, Z., Yang, Y., & L.V., M. (2018). Online Estimation of State of Power for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles Using Genetic Algorithm. *IEEE Access*, 6, 20868-20880. doi:[10.1109/ACCESS.2018.2824559](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2824559)
- Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., & Ouyang, M. (2013). A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 226, 272-288. doi:[10.1016/j.jpowsour.2012.10.060](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.060)
- Lu, M., Zhang, X., Ji, J., Xu, X., & Zhang, Y. (2020). Research progress on power battery cooling technology for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 27, 101155. doi:[10.1016/j.est.2019.101155](https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101155)
- Lukic, S., & Emadi, A. (2008). Charging ahead. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2(4), 22-31. doi:[10.1109/MIE.2008.930361](https://doi.org/10.1109/MIE.2008.930361)
- Ma, Y., Li, B., Xie, Y., & Chen, H. (2016). Estimating the State of Charge of Lithium-ion Battery based on Sliding Mode Observer. *IFAC-PapersOnLine*, 49(11), 54-61. doi:[10.1016/j.ifacol.2016.08.009](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.08.009)
- Mamadou, K., Lemaire, E., Delaille, A., Riu, D., Hing, S. E., & Bultel, Y. (2012). Definition of a State-of-Energy Indicator (SoE) for Electrochemical Storage Devices: Application for Energetic Availability Forecasting. *Journal of The Electrochemical Society*, 159(8), A1298-A1307. doi:[10.1149/2.075208jes](https://doi.org/10.1149/2.075208jes)
- Martinez, A. C., Sorlien, D., Goodrich, R., Chandler, L., & Magnuson, D. (2005). Multi-cell Li-Ion Battery Packs. An167. www.xicor.com
- Maskey, M., Patten, M., Vines, D., & Maxwell, T. (1999). Intelligent battery management system for electric and hybrid electric vehicles. IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conference, VTC 1999-Fall, 2, 1389-1391. doi:[10.1109/vetec.1999.780575](https://doi.org/10.1109/vetec.1999.780575)
- Mastali, M., Vazquez-Arenas, J., Fraser, R., Fowler, M., Afshar, S., & Stevens, M. (2013). Battery state of the charge estimation using Kalman filtering. *Journal of Power Sources*, 239, 294-307. doi:[10.1016/j.jpowsour.2013.03.131](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.03.131)
- Meissner, E., & Richter, G. (2003). Battery Monitoring and Electrical Energy Management precondition for future vehicle electric power systems. *Journal of Power Sources*, 116(1-2), 79-98. doi:[10.1016/S0378-7753\(02\)00713-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00713-9)

- Meng, J., Ricco, M., Acharya, A. B., Luo, G., Swierczynski, M., Stroe, D.-I., & Teodorescu, R. (2018). Low-complexity online estimation for LiFePO₄ battery state of charge in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 395, 280-288. doi:[10.1016/j.jpowsour.2018.05.082](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.05.082)
- Messier, P., Lebel, F. A., Rouleau, J., & Trovão, J. P. F. (2019). Multi-cell emulation for battery management system validation. 2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2018 - Proceedings. doi:[10.1109/VPPC.2018.8604959](https://doi.org/10.1109/VPPC.2018.8604959)
- Messier, P., Nguyễn, B. H., LeBel, F. A., & Trovão, J. P. F. (2020). Disturbance observer-based state-of-charge estimation for Li-ion battery used in light electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 27, 101144. doi:[10.1016/j.est.2019.101144](https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101144)
- Moore, S. W., & Schneider, P. J. (2001). A review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems. SAE Technical Papers, 724. doi:[10.4271/2001-01-0959](https://doi.org/10.4271/2001-01-0959)
- Navet, N., Song, Y., Simonot-Lion, F., & Wilwert, C. (2005). Trends in automotive communication systems. *Proceedings of the IEEE*, 93(6), 1204-1222. doi:[10.1109/JPROC.2005.849725](https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.849725)
- Ng, K. S., Moo, C.-S., Chen, Y.-P., & Hsieh, Y.-C. (2009). Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. *Applied Energy*, 86(9), 1506-1511. doi:[10.1016/j.apenergy.2008.11.021](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.021)
- Omariba, Z. B., Zhang, L., & Sun, D. (2019). Review of Battery Cell Balancing Methodologies for Optimizing Battery Pack Performance in Electric Vehicles. *IEEE Access*, 7, 129335-129352. doi:[10.1109/ACCESS.2019.2940090](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2940090)
- Pan, H., Lü, Z., Lin, W., Li, J., & Chen, L. (2017). State of charge estimation of lithium-ion batteries using a grey extended Kalman filter and a novel open-circuit voltage model. *Energy*, 138, 764-775. doi:[10.1016/j.energy.2017.07.099](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.099)
- Park, S., Ahn, J., Kang, T., Park, S., Kim, Y., Cho, I., & Kim, J. (2020). Review of state-of-the-art battery state estimation technologies for battery management systems of stationary energy storage systems. *Journal of Power Electronics*, 20(6), 1526-1540. doi:[10.1007/s43236-020-00122-7](https://doi.org/10.1007/s43236-020-00122-7)
- Pesaran, A. (2001). Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions. Advanced Automotive Battery Conference, January 2001, 10.
- Pesaran, A. A., Burch, S., & Keyser, M. (1999). An Approach for Designing Thermal Management Systems for Electric and Hybrid Vehicle Battery Packs Preprint. The Fourth Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition 24-27, January, 1-18.
- Plett, G. L. (2004). Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. *Journal of Power Sources*, 134(2), 252-261. doi:[10.1016/j.jpowsour.2004.02.031](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.02.031)
- Qaisar, S. M. (2020). Event-Driven Approach for an Efficient Coulomb Counting Based Li-Ion Battery State of Charge Estimation. *Procedia Computer Science*, 168, 202-209. doi:[10.1016/j.procs.2020.02.268](https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.268)
- Qi, J., & Dah-Chuan Lu, D. (2014). Review of battery cell balancing techniques. 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2014 - Proceedings, October, 2-7. doi:[10.1109/AUPEC.2014.6966514](https://doi.org/10.1109/AUPEC.2014.6966514)
- Qian, K., Huang, B., Ran, A., He, Y. B., Li, B., & Kang, F. (2019). State-of-health (SOH) evaluation on lithium-ion battery by simulating the voltage relaxation curves. *Electrochimica Acta*, 303, 183-191. doi:[10.1016/j.electacta.2019.02.055](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.02.055)
- Qiu, X., Wu, W., & Wang, S. (2020). Remaining useful life prediction of lithium-ion battery based on improved cuckoo search particle filter and a novel state of charge estimation method. *Journal of Power Sources*, 450, 227700. doi:[10.1016/j.jpowsour.2020.227700](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227700)
- Rahimi-Eichi, H., Ojha, U., Baronti, F., & Chow, M. Y. (2013). Battery management system: An overview of its application in the smart grid and electric vehicles. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7(2), 4-16. doi:[10.1109/MIE.2013.2250351](https://doi.org/10.1109/MIE.2013.2250351)

- Rajalakshmi, M., & Razia Sultana, W. (2020). Intelligent Hybrid Battery Management System for Electric Vehicle. İçinde A. Chitra, P. Sanjeevikumar, J. B. Holm-Nielsen & S. Himavathi (Eds.) *Artificial Intelligent Techniques for Electric and Hybrid Electric Vehicles* (ss. 179-206). Wiley. doi:[10.1002/9781119682035.ch10](https://doi.org/10.1002/9781119682035.ch10)
- Ramadan, H. S., Becherif, M., & Claude, F. (2017). Extended kalman filter for accurate state of charge estimation of lithium-based batteries: a comparative analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(48), 29033-29046. doi:[10.1016/j.ijhydene.2017.07.219](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.219)
- Rao, Z., & Wang, S. (2011). A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4554-4571. doi:[10.1016/j.rser.2011.07.096](https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.096)
- Rezvanianiani, S. M., Liu, Z., Chen, Y., & Lee, J. (2014). Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility. *Journal of Power Sources*, 256, 110-124. doi:[10.1016/j.jpowsour.2014.01.085](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.085)
- Rivera-Barrera, J., Muñoz-Galeano, N., & Sarmiento-Maldonado, H. (2017). SoC Estimation for Lithium-ion Batteries: Review and Future Challenges. *Electronics*, 6(4), 102. doi:[10.3390/electronics6040102](https://doi.org/10.3390/electronics6040102)
- Sabbah, R., Kizilel, R., Selman, J. R., & Al-Hallaj, S. (2008). Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution. *Journal of Power Sources*, 182(2), 630-638. doi:[10.1016/j.jpowsour.2008.03.082](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.03.082)
- Salkind, A. J., Fennie, C., Singh, P., Atwater, T., & Reisner, D. E. (1999). Determination of state-of-charge and state-of-health of batteries by fuzzy logic methodology. *Journal of Power Sources*, 80(1-2), 293-300. doi:[10.1016/S0378-7753\(99\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00079-8)
- Saraf, P. (2012). The Traditional and New Generation in-vehicle Networks in Automotive Field. *International Conference on Advances in Computer, Electronics and Electrical Engineering*, March, 978-981. doi:[10.3850/978-981-07-1847-3](https://doi.org/10.3850/978-981-07-1847-3)
- Sarikurt, T., & Balıkçı, A. (2017). Tam elektrikli araçlar için özgün bir enerji yönetim sistemi uygulaması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(2), 323--333. doi:[10.17341/gazimmfd.322153](https://doi.org/10.17341/gazimmfd.322153)
- Saw, L. H., Ye, Y., & Tay, A. A. O. (2016). Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles battery pack. *Journal of Cleaner Production*, 113, 1032-1045. doi:[10.1016/j.jclepro.2015.11.011](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.011)
- Shen, M., & Gao, Q. (2019). A review on battery management system from the modeling efforts to its multiapplication and integration. *International Journal of Energy Research*, 43(10), 5042-5075. doi:[10.1002/er.4433](https://doi.org/10.1002/er.4433)
- Shen, P., Ouyang, M., Lu, L., Li, J., & Feng, X. (2018). The co-estimation of state of charge, state of health, and state of function for lithium-ion batteries in electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(1), 92-103. doi:[10.1109/TVT.2017.2751613](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2751613)
- Shen, Y. (2010). Adaptive online state-of-charge determination based on neuro-controller and neural network. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 1093-1098. doi:[10.1016/j.enconman.2009.12.015](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.12.015)
- Shen, Y. (2018a). A chaos genetic algorithm based extended Kalman filter for the available capacity evaluation of lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 264, 400-409. doi:[10.1016/j.electacta.2018.01.123](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.01.123)
- Shen, Y. (2018b). Improved chaos genetic algorithm based state of charge determination for lithium batteries in electric vehicles. *Energy*, 152, 576-585. doi:[10.1016/j.energy.2018.03.174](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.174)
- Shen, Y. (2018c). Adaptive extended Kalman filter based state of charge determination for lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 283, 1432-1440. doi:[10.1016/j.electacta.2018.07.078](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.07.078)
- Sheng, H., & Xiao, J. (2015). Electric vehicle state of charge estimation: Nonlinear correlation and fuzzy support vector machine. *Journal of Power Sources*, 281, 131-137. doi:[10.1016/j.jpowsour.2015.01.145](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.145)
- Shrivastava, P., Soon, T. K., Idris, M. Y. I. Bin, & Mekhilef, S. (2019). Overview of model-based online state-of-charge estimation using Kalman filter family for lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109233. doi:[10.1016/j.rser.2019.06.040](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.040)

- Siddique, A. R. M., Mahmud, S., & Heyst, B. Van. (2018). A comprehensive review on a passive (phase change materials) and an active (thermoelectric cooler) battery thermal management system and their limitations. *Journal of Power Sources*, 401, 224-237. doi:[10.1016/j.jpowsour.2018.08.094](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.094)
- Singh, P., Fennie, C., & Reisner, D. (2004). Fuzzy logic modelling of state-of-charge and available capacity of nickel/metal hydride batteries. *Journal of Power Sources*, 136(2), 322-333. doi:[10.1016/j.jpowsour.2004.03.035](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.03.035)
- Singh, P., Vinjamuri, R., Wang, X., & Reisner, D. (2006). 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. doi:[10.1016/j.jpowsour.2005.04.039](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.04.039)
- Steinhorst, S., Lukasiwycz, M., Narayanaswamy, S., Kauer, M., & Chakraborty, S. (2014). Smart cells for embedded battery management. Proceedings - 2nd IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications, CPSNA 2014, 59-64. doi:[10.1109/CPSNA.2014.22](https://doi.org/10.1109/CPSNA.2014.22)
- Steinhorst, S., Shao, Z., Chakraborty, S., Kauer, M., Li, S., Lukasiwycz, M., Narayanaswamy, S., Rafique, M. U., & Wang, Q. (2016). Distributed reconfigurable Battery System Management Architectures. Proceedings of the Asia and South Pacific Design Automation Conference, ASP-DAC, 25-28 Jan, 429-434. doi:[10.1109/ASPDAC.2016.7428049](https://doi.org/10.1109/ASPDAC.2016.7428049)
- Stuart, T. A., & Zhu, W. (2011). Modularized battery management for large lithium ion cells. *Journal of Power Sources*, 196(1), 458-464. doi:[10.1016/j.jpowsour.2010.04.055](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.04.055)
- Stuart, T., Fang, F., Wang, X., Ashtiani, C., & Pesaran, A. (2002). A modular battery management system for HEVs. SAE Technical Papers, 111, 777-785. doi:[10.4271/2002-01-1918](https://doi.org/10.4271/2002-01-1918)
- Sun, F., Hu, X., Zou, Y., & Li, S. (2011). Adaptive unscented Kalman filtering for state of charge estimation of a lithium-ion battery for electric vehicles. *Energy*, 36(5), 3531-3540. doi:[10.1016/j.energy.2011.03.059](https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.059)
- Teng, H., & Yeow, K. (2012). Design of direct and indirect liquid cooling systems for high-capacity, high-power lithium-ion battery packs. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 1(2), 525-536. doi:[10.4271/2012-01-2017](https://doi.org/10.4271/2012-01-2017)
- Thakur, A. K., Prabakaran, R., Elkadeem, M. R., Sharshir, S. W., Arıcı, M., Wang, C., Zhao, W., Hwang, J.-Y., & Saidur, R. (2020). A state of art review and future viewpoint on advance cooling techniques for Lithium-ion battery system of electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 32, 101771. doi:[10.1016/j.est.2020.101771](https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101771)
- Tian, H., Qin, P., Li, K., & Zhao, Z. (2020). A review of the state of health for lithium-ion batteries: Research status and suggestions. *Journal of Cleaner Production*, 261, 120813. doi:[10.1016/j.jclepro.2020.120813](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120813)
- Tian, Y., Xia, B., Sun, W., Xu, Z., & Zheng, W. (2014). A modified model based state of charge estimation of power lithium-ion batteries using unscented Kalman filter. *Journal of Power Sources*, 270, 619-626. doi:[10.1016/j.jpowsour.2014.07.143](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.143)
- Ting, T. O., Man, K. L., Lim, E. G., & Leach, M. (2014). Tuning of Kalman Filter Parameters via Genetic Algorithm for State-of-Charge Estimation in Battery Management System. *The Scientific World Journal*, 2014, 176052. doi:[10.1155/2014/176052](https://doi.org/10.1155/2014/176052)
- TOGG Press Release. (2020). 'More Than a Factory' Construction starts at TOGG Gemlik. (Accessed:18/09/2020) <https://www.togg.com.tr/Dosyalar/Press/togg-construction-pr.pdf>
- Ungurean, L., Cârstoiu, G., Micea, M. V., & Groza, V. (2017). Battery state of health estimation: a structured review of models, methods and commercial devices. *International Journal of Energy Research*, 41(2), 151-181. doi:[10.1002/er.3598](https://doi.org/10.1002/er.3598)
- Urbain, M., Rael, S., Davat, B., & Desprez, P. (2007). State Estimation of a Lithium-Ion Battery Through Kalman Filter. 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2804-2810. doi:[10.1109/PESC.2007.4342463](https://doi.org/10.1109/PESC.2007.4342463)
- Väyrynen, A., & Salminen, J. (2012). Lithium ion battery production. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 46, 80-85. doi:[10.1016/j.jct.2011.09.005](https://doi.org/10.1016/j.jct.2011.09.005)

- Waag, W., Fleischer, C., & Sauer, D. U. (2014). Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles. *Journal of Power Sources*, 258, 321-339. doi:[10.1016/j.jpowsour.2014.02.064](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.02.064)
- Wang, Q., Jiang, B., Li, B., & Yan, Y. (2016). A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 106-128. doi:[10.1016/j.rser.2016.05.033](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.033)
- Wang, S.-L., Fernandez, C., Zou, C.-Y., Yu, C.-M., Li, X.-X., Pei, S.-J., & Xie, W. (2018). Open circuit voltage and state of charge relationship functional optimization for the working state monitoring of the aerial lithium-ion battery pack. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1090-1104. doi:[10.1016/j.jclepro.2018.07.030](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.030)
- Wang, Y., Tian, J., Sun, Z., Wang, L., Xu, R., Li, M., & Chen, Z. (2020). A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110015. doi:[10.1016/j.rser.2020.110015](https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110015)
- Wang, Y., Zhang, C., & Chen, Z. (2016). An adaptive remaining energy prediction approach for lithium-ion batteries in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 305, 80-88. doi:[10.1016/j.jpowsour.2015.11.087](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.11.087)
- Wei, J., Dong, G., & Chen, Z. (2017). On-board adaptive model for state of charge estimation of lithium-ion batteries based on Kalman filter with proportional integral-based error adjustment. *Journal of Power Sources*, 365, 308-319. doi:[10.1016/j.jpowsour.2017.08.101](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.08.101)
- Wu, S., Xiong, R., Li, H., Nian, V., & Ma, S. (2020). The state of the art on preheating lithium-ion batteries in cold weather. *Journal of Energy Storage*, 27, 101059. doi:[10.1016/j.est.2019.101059](https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101059)
- Wu, W., Wang, S., Wu, W., Chen, K., Hong, S., & Lai, Y. (2019). A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. *Energy Conversion and Management*, 182, 262-281. doi:[10.1016/j.enconman.2018.12.051](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.051)
- Wu, W., Yang, X., Zhang, G., Ke, X., Wang, Z., Situ, W., Li, X., & Zhang, J. (2016). An experimental study of thermal management system using copper mesh-enhanced composite phase change materials for power battery pack. *Energy*, 113, 909-916. doi:[10.1016/j.energy.2016.07.119](https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.119)
- Xia, B., Chen, C., Tian, Y., Sun, W., Xu, Z., & Zheng, W. (2014). A novel method for state of charge estimation of lithium-ion batteries using a nonlinear observer. *Journal of Power Sources*, 270, 359-366. doi:[10.1016/j.jpowsour.2014.07.103](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.103)
- Xia, B., Lao, Z., Zhang, R., Tian, Y., Chen, G., Sun, Z., Wang, W., Sun, W., Lai, Y., Wang, M., & Wang, H. (2017). Online Parameter Identification and State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries Based on Forgetting Factor Recursive Least Squares and Nonlinear Kalman Filter. *Energies*, 11(1), 3. doi:[10.3390/en11010003](https://doi.org/10.3390/en11010003)
- Xia, B., Zhang, Z., Lao, Z., Wang, W., Sun, W., Lai, Y., & Wang, M. (2018). Strong Tracking of a H-Infinity Filter in Lithium-Ion Battery State of Charge Estimation. *Energies*, 11(6), 1481. doi:[10.3390/en11061481](https://doi.org/10.3390/en11061481)
- Xia, G., Cao, L., & Bi, G. (2017). A review on battery thermal management in electric vehicle application. *Journal of Power Sources*, 367, 90-105. doi:[10.1016/j.jpowsour.2017.09.046](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.09.046)
- Xing, Y., He, W., Pecht, M., & Tsui, K. L. (2014). State of charge estimation of lithium-ion batteries using the open-circuit voltage at various ambient temperatures. *Applied Energy*, 113, 106-115. doi:[10.1016/j.apenergy.2013.07.008](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.008)
- Xing, Y., Ma, E. W. M., Tsui, K. L., & Pecht, M. (2011). Battery management systems in electric and hybrid vehicles. *Energies*, 4(11), 1840-1857. doi:[10.3390/en4111840](https://doi.org/10.3390/en4111840)
- Xiong, R. (2020). Battery Management Algorithm for Electric Vehicles. İçinde Battery Management Algorithm for Electric Vehicles. Springer Singapore. doi:[10.1007/978-981-15-0248-4](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0248-4)
- Xiong, R., Gong, X., Mi, C. C., & Sun, F. (2013). A robust state-of-charge estimator for multiple types of lithium-ion batteries using adaptive extended Kalman filter. *Journal of Power Sources*, 243, 805-816. doi:[10.1016/j.jpowsour.2013.06.076](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.06.076)

- Xiong, R., Li, L., & Tian, J. (2018). Towards a smarter battery management system: A critical review on battery state of health monitoring methods. *Journal of Power Sources*, 405(5), 18-29. doi:[10.1016/j.jpowsour.2018.10.019](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.10.019)
- Xiong, R., Yu, Q., & Wang, L. Y. (2017). Open circuit voltage and state of charge online estimation for lithium ion batteries. *Energy Procedia*, 142, 1902-1907. doi:[10.1016/j.egypro.2017.12.388](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.388)
- Xiong, R., Yu, Q., Wang, L. Y., & Lin, C. (2017). A novel method to obtain the open circuit voltage for the state of charge of lithium ion batteries in electric vehicles by using H infinity filter. *Applied Energy*, 207, 346-353. doi:[10.1016/j.apenergy.2017.05.136](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.136)
- Yang, D., Wang, Y., Pan, R., Chen, R., & Chen, Z. (2017). A Neural Network Based State-of-Health Estimation of Lithium-ion Battery in Electric Vehicles. *Energy Procedia*, 105, 2059-2064. doi:[10.1016/j.egypro.2017.03.583](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.583)
- Yang, D., Wang, Y., Pan, R., Chen, R., & Chen, Z. (2018). State-of-health estimation for the lithium-ion battery based on support vector regression. *Applied Energy*, 227, 273-283. doi:[10.1016/j.apenergy.2017.08.096](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.096)
- Yang, F., Zhang, S., Li, W., & Miao, Q. (2020). State-of-charge estimation of lithium-ion batteries using LSTM and UKF. *Energy*, 201, 117664. doi:[10.1016/j.energy.2020.117664](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117664)
- Yang, S., Ling, C., Fan, Y., Yang, Y., Tan, X., & Dong, H. (2019). A review of lithium-ion battery thermal management system strategies and the evaluate criteria. *International Journal of Electrochemical Science*, 14(7), 6077-6107. doi:[10.20964/2019.07.06](https://doi.org/10.20964/2019.07.06)
- Yang, X., Chen, Y., Li, B., & Luo, D. (2020). Battery states online estimation based on exponential decay particle swarm optimization and proportional-integral observer with a hybrid battery model. *Energy*, 191, 116509. doi:[10.1016/j.energy.2019.116509](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116509)
- Yatsui, M. W., & Bai, H. (2011). Kalman filter based state-of-charge estimation for lithium-ion batteries in hybrid electric vehicles using pulse charging. 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 1-5. doi:[10.1109/VPPC.2011.6042988](https://doi.org/10.1109/VPPC.2011.6042988)
- Ye, M., Guo, H., Xiong, R., & Yu, Q. (2018). A double-scale and adaptive particle filter-based online parameter and state of charge estimation method for lithium-ion batteries. *Energy*, 144, 789-799. doi:[10.1016/j.energy.2017.12.061](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.061)
- Yenigün, M., & Utlü, Z. (2018). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Soğutma Sistemlerinin İncelenmesi ve Değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 59(692), 35-47.
- Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., & Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365-385. doi:[10.1016/j.rser.2015.04.130](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.130)
- Yu, Z., Huai, R., & Xiao, L. (2015). State-of-charge estimation for lithium-ion batteries using a Kalman filter based on local linearization. *Energies*, 8(8), 7854-7873. doi:[10.3390/en8087854](https://doi.org/10.3390/en8087854)
- Zenati, A., Desprez, P., & Razik, H. (2010). Estimation of the SOC and the SOH of li-ion batteries, by combining impedance measurements with the fuzzy logic inference. IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 1773-1778. doi:[10.1109/IECON.2010.5675408](https://doi.org/10.1109/IECON.2010.5675408)
- Zhang, Q., Cui, N., Li, Y., Duan, B., & Zhang, C. (2020). Fractional calculus based modeling of open circuit voltage of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 27, 100945. doi:[10.1016/j.est.2019.100945](https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100945)
- Zhang, S., Guo, X., Dou, X., & Zhang, X. (2020a). A data-driven coulomb counting method for state of charge calibration and estimation of lithium-ion battery. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40, 100752. doi:[10.1016/j.seta.2020.100752](https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100752)
- Zhang, S., Guo, X., Dou, X., & Zhang, X. (2020b). A rapid online calculation method for state of health of lithium-ion battery based on coulomb counting method and differential voltage analysis. *Journal of Power Sources*, 479, 228740. doi:[10.1016/j.jpowsour.2020.228740](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228740)

- Zhang, Xiujuan, Liu, P., & Wang, D. (2011). The design and implementation of smart battery management system balance technology. *Journal of Convergence Information Technology*, 6(5), 108-116. doi:[10.4156/jcit.vol6.issue5.12](https://doi.org/10.4156/jcit.vol6.issue5.12)
- Zhang, Xu, Wang, Y., Liu, C., & Chen, Z. (2018). A novel approach of battery pack state of health estimation using artificial intelligence optimization algorithm. *Journal of Power Sources*, 376, 191-199. doi:[10.1016/j.jpowsour.2017.11.068](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.11.068)
- Zhao, L., Liu, Z., & Ji, G. (2018). Lithium-ion battery state of charge estimation with model parameters adaptation using H_{∞} extended Kalman Filter. *Control Engineering Practice*, 81, 114-128. doi:[10.1016/j.conengprac.2018.09.010](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.09.010)
- Zheng, F., Xing, Y., Jiang, J., Sun, B., Kim, J., & Pecht, M. (2016). Influence of different open circuit voltage tests on state of charge online estimation for lithium-ion batteries. *Applied Energy*, 183, 513-525. doi:[10.1016/j.apenergy.2016.09.010](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.010)
- Zhi, L., Peng, Z., Zhifu, W., Qiang, S., & Yinan, R. (2017). State of Charge Estimation for Li-ion Battery Based on Extended Kalman Filter. *Energy Procedia*, 105, 3515-3520. doi:[10.1016/j.egypro.2017.03.806](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.806)
- Zhou, F., Wang, L., Lin, H., & Lv, Z. (2013). High accuracy state-of-charge online estimation of EV/HEV lithium batteries based on Adaptive Wavelet Neural Network. 2013 IEEE ECCE Asia Downunder, 513-517. doi:[10.1109/ECCE-Asia.2013.6579145](https://doi.org/10.1109/ECCE-Asia.2013.6579145)
- Zhu, H., Wu, Z., Wang, D., & Sun, J. (2013). Design and implementation of distributed battery management system. *Advanced Materials Research*, 608-609, 1039-1042. doi:[10.4028/www.scientific.net/AMR.608-609.1039](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.608-609.1039)
- Zhu, Q., Xiong, N., Yang, M.-L., Huang, R.-S., & Hu, G.-D. (2017). State of Charge Estimation for Lithium-Ion Battery Based on Nonlinear Observer: An H_{∞} Method. *Energies*, 10(5), 679. doi:[10.3390/en10050679](https://doi.org/10.3390/en10050679)
- Zhu, R., Duan, B., Zhang, J., Zhang, Q., & Zhang, C. (2020). Co-estimation of model parameters and state-of-charge for lithium-ion batteries with recursive restricted total least squares and unscented Kalman filter. *Applied Energy*, 277, 115494. doi:[10.1016/j.apenergy.2020.115494](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115494)
- Zou, Y., Hu, X., Ma, H., & Li, S. E. (2015). Combined State of Charge and State of Health estimation over lithium-ion battery cell cycle lifespan for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 273, 793-803. doi:[10.1016/j.jpowsour.2014.09.146](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.09.146)