

## Derleme makale

### Elektrikli araç batarya yönetim sistemleri için hücre eşitleme yöntemleri

Yusuf Hançar<sup>1</sup>, Habib Kaymaz,<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Mercedes Benz Türk AŞ, Otobüs Geliştirme, İstanbul, Türkiye

\*Sorumlu Yazar: [habib.kaymaz@daimler.com](mailto:habib.kaymaz@daimler.com)

DOI:10.51513/jitsa.897126

**Özet:** Bu çalışmada, elektrikli araç batarya sistemleri için hücre dengeleme sistemleri incelenmiştir. Elektrikli araçlarda kullanılan teknolojinin temel bileşenleri; güç sistemleri, kontrol elektroniği ve araca enerji sağlayan batarya paketidir. Bu batarya paketlerinde kullanılan piller ihtiyaca ve üretimine göre çeşitlilik arz etmektedir. Son yıllardaki gelişimi ve artan talep yoğunluğu ile elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar ve bu bataryaları yöneten sistemler otomotiv teknolojileri içerisinde ön plana çıkmaktadır. Çalışmada, elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan lityum bataryalar ile batarya yönetim sistemlerinin önemi ve özellikleri incelenmiştir. Bunların yanı sıra, bataryanın ömrünü etkileyen faktörlerden biri olan grup içi hücre gerilimlerinin farklı olmasının nedenleri ve sonuçları incelenerek eşitsizliği gidermek için uygulanan pasif ve aktif eşitleme (dengeleme) sistemleri detaylı olarak analiz edilmiştir. Pasif hücre dengeleme sistemlerinde kapasitesi yüksek hücredeki fazla enerji bir direnç üzerinden ısı enerjisi olarak paketten atılmaktadır. Aktif hücre dengeleme sistemlerinde ise enerji, yüksek gerilimli hücreden düşük gerilimli olan hücreye transfer edilmekte ve verim yükseltilmektedir. İlave olarak, bu dengeleme sistemlerine ait yöntemler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Batarya, batarya yönetim sistemi, hücre eşitleme, aktif batarya dengeleme, pasif batarya dengeleme

### Cell equalization methods for electric vehicle battery management systems

**Abstract:** In this study, cell balancing systems for electric vehicle battery systems were investigated. The basic components of the technology used in electric vehicles are the power system and control electronics and the battery pack that provides energy to the vehicle. The batteries used in these battery packs vary according to the requirement and production. With the development and increasing demand intensity in recent years, the batteries used in electric vehicles and the systems that manage these batteries stand out in automotive technologies. In the study, the importance and properties of lithium batteries and battery management systems, which are widely used in electric vehicles, have been examined. In addition to these, the reasons and results of the differences in cell voltages within the group, which is one of the factors affecting the life of the battery, were examined and the passive and active equalization (balancing) systems applied to eliminate the inequality were analyzed in detail. In passive cell balancing systems, the excess energy in the cell with a high capacity is dissipated as heat energy through a resistance. In the active cell balancing systems, energy is transferred from the high voltage cell to the low voltage cell and the efficiency is increased. Furthermore, the methods of these balancing systems are analysed comparatively.

**Key words:** Battery, battery management system, cell equalization, active battery balancing, passive battery balancing

\* Corresponding author. Tel.: +0212 6227000

E-mail address: [habib.kaymaz@daimler.com](mailto:habib.kaymaz@daimler.com)

ORCID: 0000-0002-0469-5052; 0000-0002-8338-004X (in hierarchical order)

Received 15 March 2021; accepted 28 April 2021

Peer review under responsibility of Bandirma Onyedi Eylul University.

## 1. Giriş

Sera gazı emisyonlarını azaltma ihtiyacı ve fosil yakıt rezervlerinin azalması çevresel olarak sürdürülebilir alternatif sürüş sistemlerine olan talebi arttırmaktadır. 2030 iklim hedefleri kapsamında birçok ülkede, konvansiyonel araçların üretimi, satışı ve nihai aşamada kullanımının yasaklanması tartışılan ve yakın bir gelecekte planlanan bir konudur (Enrique, 2020). Ülkemizdeyse teşviklere rağmen elektrikli araç sayısı, menzilin düşük olması ve şarj altyapı yetersizliği sebebiyle arzu edilen seviyenin altında kalmıştır (TEHAD, 2020). Ülkemizde elektrikli araç sayısının yerli araç girişimiyle (TOGG) artacağı düşünülmektedir.

Elektrik enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürerek saklayan bataryalar, elektrikli araçlarda enerjiyi depolamak için kullanılan en önemli tekniklerden biridir. Ancak çevreci sloganlarla ortaya çıkan elektrikli araçların çevreye hiç zararının olmadığını söylemek mümkün değildir. Elektrikli araçların çevresel etkilerinin belirlenmesinde üretim ve kullanım sonrası sonuçların belirlenmesi önemlidir. (Manzetti ve Mariasiu, 2015). Özellikle yeni nesil araç bataryalarının üretim aşamasında içten yanmalı motorlu araçlara göre daha fazla çevresel etkiye sahip olduğu ifade edilmektedir (Girardi ve ark., 2015). Bu yüzden bataryaların ömrünü uzatan sistemler sadece ekonomik olarak değil, çevresel olarak da önem arz etmektedir.

Lityum-iyon batarya öncesi Nikel-Kadmiyum (NiCd), Nikel Metal Hidrür (Ni-MH) ve Kurşun-Asit bataryalar taşınabilir elektronik cihazlar ve mobil araçlarda şarj edilebilir enerji saklama sistemleri (Rechargeable Energy Storage System, RESS) olarak kullanılmıştır. Ancak lityum iyon bataryalar yüksek enerji yoğunluğu, çalışma gerilimi seviyelerinin fazla değişmemesi, uzun çevrimsel ömrü ve hafif olması gibi avantajlarından dolayı taşınabilir elektronik pazarında tercih edilmiştir.

Ortalama bir araç deposunun aldığı 45 litre benzin yaklaşık 450 kWh enerjiye denk gelmektedir. Ortalama elektrikli bir aracın 0,180 kWh/km enerji tükettiği düşünüldüğünde, km başına elektrik tüketimi 0,018 \$/km olarak hesaplanmaktadır. Bu hesap konvansiyonel bir araca göre beş ile on kat arası avantaj sağlamaktadır (Tunçyürek, 2019).

Birim yakıt maliyeti ve çevre açısından avantaj sağlayan bu araç teknolojinin adaptasyon ve geliştirme süreci halen devam etmektedir.

Batarya seviyesinde yüksek maliyet ve iyi bir yönetim sistemine olan ihtiyaç dezavantaj oluşturmaktadır. Araç seviyesinde, kısıtlı menzil ve uzun şarj süresi, sistem seviyesinde ise şarj altyapı eksikliği sorun oluşturmaktadır.

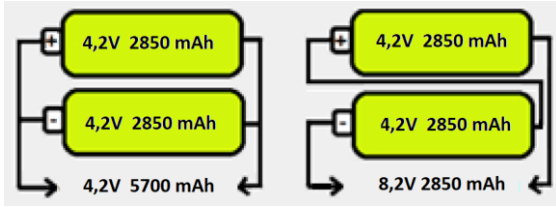
Elektrikli araçlar için şarj edilebilir lityum-iyon, NiCd ve Ni-MH gibi batarya seçenekleri mevcuttur. Bu seçim yapılırken güvenlik, çevreye duyarlılık, çevrim ömrü, güç yoğunluğu, maliyet, sıcaklık karakteristiği ve bakım gibi parametreler üzerinden değerlendirmeler yapılmaktadır (Karadeniz, 2012). Farklı pil teknolojileri arasında yüksek enerji yoğunlukları ve uzun ömürleri sebebiyle lityum-iyon piller ön plana çıkmaktadır. Son yıllarda talep gören lityum-iyon pil çeşitleri ve kısaltmaları Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Lityum pil çeşitleri ve kısaltmaları

Lityum Demir Fosfat (LiFePO4)	LFP
Lityum Kobalt Oksit (LiCoO2)	LCO
Lityum Magnezyum Fosfat	LMP
Lityum Manganez Oksit (LiMn2O4)	LMO
Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (LiNiCoAlO2)	NCA
Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (LiNiMnCoO2)	NMC
Lityum Titanat (Li2TiO3)	LTO

Lityum bazlı hücreler; diğer pil sistemlerindeki gibi enerjiyi muhafaza etmek için anot, katot ve elektrolit alt bileşenlerden oluşturulur. Anot malzeme eksi elektrot, katot ise artı elektrot olarak çalışmaktadır. Katı polimer elektrolit kullanılan bataryalar ise Lityum-iyon Polimer (LiPo) pil olarak adlandırılır. Artı elektrotlar genel olarak tabakalı yapılara sahip metal oksitlerden (LiMOx) oluşmaktadır. Bu yapılarda pilin doldurulup boşaltılması esnasında lityum iyonları, artı ve eksi elektrotlar arasında etkin bir şekilde yer değiştirmektedir (Polat ve Özgül, 2020).

Temel bir elektrik prensibi olarak araç bataryalarının seri bağlantısı gerilimin yükselmesini, paralel bağlantısı akımın yükselmesini sağlar. İhtiyaç duyulan batarya gerilim seviyesi ile akım ihtiyacına göre Şekil 1’de gösterilen bağlantı tipleri tercih edilir. Silindirik veya prizmatik formda üretilen pil hücreleri seri veya paralel bağlanarak batarya modülleri oluşturulur (Ramoni, Monsuru & Zhang, Hong-Chao. 2013).



Şekil 1. Batarya paralel ve seri bağlantı

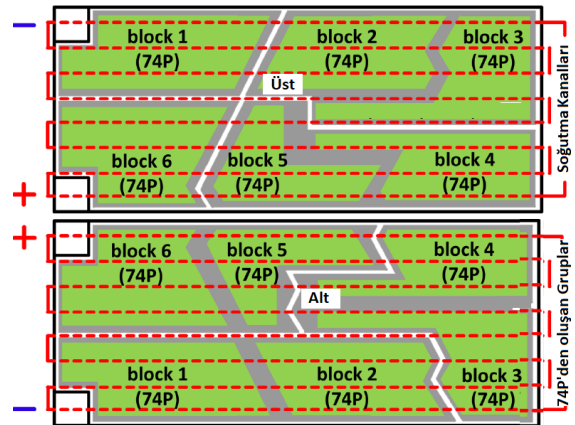
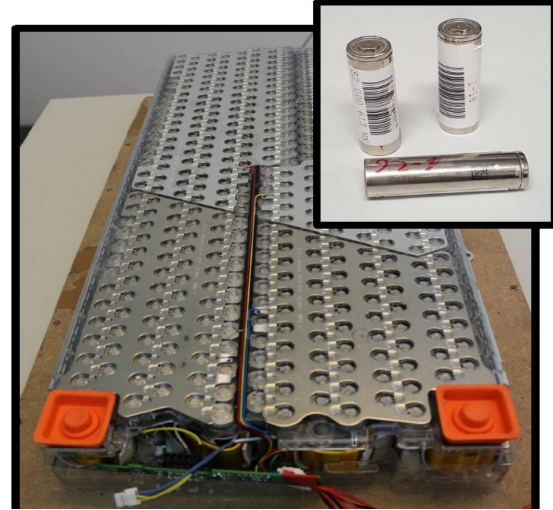
Bu modüller arzu edilen akım ve gerilim seviyesine göre seri veya paralel olarak bağlanmış hücreler, aktif veya pasif soğutma sistemleri ile elektronik kontrol ünitesi içerirler. Elektrikli araçlarda batarya yapısı hücrelerden grup, gruplardan modül, modüllerden paket oluşturmak suretiyle elde edilir (Hücre→Grup→Modül→Paket). Bir örnek vermek gerekirse; 2012 yılında 85 kWh pil paketine sahip Tesla S modeli 7104 adet silindirik lityum-iyon pil hücresine sahipti (18650 tip). Batarya paketi seri olarak birbirine bağlanmış 16 modülden oluşmaktaydı. Her modül 6 grubun seri bağlanmasıyla elde edilmişti. Bu gruplar ise paralel bağlanmış 74 hücreden oluşmaktaydı. 540 kg ağırlığındaki pil paketi EPA testlerine göre 426 km menzil sağlamaktaydı (Ingram, 2013). Detayları Tablo 2’de verilen bu modül Şekil 2’de gösterilmiştir (Kuipers ve ark., 2017).

Tablo 2. Tesla S modeline ait batarya paketi

<b>Hücre Gerilimi</b>	4,2 V (Azami) 3,7 V (Anma)
<b>Grup Gerilimi</b>	4,2 V (74 hücre, 74P)
<b>Modül Gerilimi</b>	25,2 V (444 Hücre, 74P6S)
<b>Modül Gücü</b>	5,3 kWh (210Ah)
<b>Modül Ağırlığı</b>	26 kg (14,38 lt)
<b>Paket Gerilimi</b>	403,2V (16 modül, 74P96S)
<b>Paket Gücü</b>	85 kWh (210 Ah)

Batarya teknolojisinde paketin oluşturulması, hücrelerin dengelenmesi, güvenlik önlemlerinin yanında şarj sistemleri için de birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu şarj işlemlerinde hızlı ve verimli şekilde bataryanın sınırları çerçevesinde maksimum şarj akımı ile doldurmak önemlidir. Hızlı şarj için yüksek akım kaynağına ihtiyaç vardır. Batarya şarj yöntemleri kablolu şarj (conductive) ve kablosuz şarj (wireless) olarak değerlendirilir. Ayrıca kullanılacak enerji için çevre kirliliği ve doğaya en az zararlı süreci yönetmek tasarım kadar önem arz etmektedir (Terzi ve ark., 2020). Enerji aktarımı yapılırken sıcaklık kontrolü, uygun olmayan şarj durumunda durdurma, hava koşullarından bağımsız şarj, kolay kullanım, AC/DC şarj

edilebilme, elektriksel izolasyon ve uygun maliyet gibi isteklerin karşılanması beklenmektedir. Kullanılacak şarj altyapısıyla batarya grubunun uyumu dikkate alınmalıdır.



Şekil 2. Tesla batarya modülü (Kuipers, 2017)

İlerleyen bölümlerde elektrikli araçlar için batarya yönetim sistemleri ve yapıları hakkında bilgi verildikten sonra elektrikli araç batarya hücrelerinin dengeleme yöntemleri detaylı bir şekilde açıklanacaktır.

## 2. Elektrikli araçlar için batarya yönetim sistemleri

Elektrikli ve hibrit araçların yaygınlaşmasına paralel olarak batarya yönetim sistemlerinin (BYS) üretim ve kullanım miktarları artarak pazar büyüklüğü 2019 yılında 4,3 milyar dolara ulaşmıştır. Pazar büyüklüğünün 2027 yılında 16,6 milyar dolara ulaşması beklenmektedir (TMR, 2019). Otomotiv sektörünün yanında tüketici elektroniği, tıp ve sağlık, askeri ve savunma, yenilenebilir enerji sistemleri, telekomünikasyon sektörleri batarya ve batarya yönetim sistemlerine ihtiyaç duymaktadır.

Teknolojik gelişmelerin önümüzdeki yıllarda batarya yönetim sistemlerine olan ihtiyacı artırması beklenmektedir. Global BYS üreticileri arasında öne çıkan firmalar şunlardır:

- Denso (Japon)
- Calsonic Kansei (Japon)
- Hitachi Automotive Systems (Japon)
- Mitsubishi Electric (Japon)
- Hyundai Kefico (Kore)
- LG Chem (Kore)
- SK Innovation (Kore)
- Tesla Motors (ABD)
- Lithium Balance (Danimarka)
- Vecture (Kanada)
- Digi-Triumph Technology (Tayvan)
- Clayton Power (Danimarka)
- BYD (Çin)
- Huizhou E-power Electronics (Çin)

BYS imalatçalarına yönelik çip üreten global mikroişlemci firmaları şunlardır (Research and Markets, 2018 ve TMR, 2019):

- Analog Devices / Linear Technology (ABD)
- Texas Instruments (ABD)
- Infineon (Almanya)
- NXP (Philips) Semiconductors (Hollanda)
- Maxim Integrated Products (ABD)

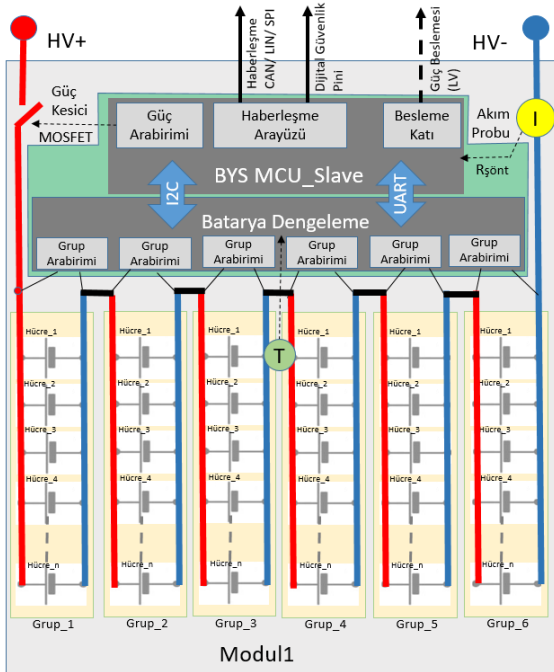
Batarya yönetim sistemleri bir veya birden fazla pilin seri veya paralel bağlantısıyla oluşan batarya paketlerinin dolum/boşaltım işlemlerini denetleyen ve yöneten sistemler olarak tanımlanmaktadır (Daowd, 2011). Bu yapılar, batarya paketlerinde akım, gerilim, sıcaklık gibi temel değerlerin ölçümünü yapıp, nominal aralık dışına çıktığında sisteme müdahale etmektedir. Bu yüzden batarya hücre değerlerinin yüksek çözünürlük ve doğruluk ile ölçülmesi için kullanılan Analog-Dijital dönüştürücüler (ADC) önem kazanmaktadır. Ölçtüğü bu fiziksel büyüklüklere ek olarak; batarya doluluk oranı (State of Charge, SoC), sağlık durumu (State of Health, SoH) ve kalan faydalı ömür (Remaining Useful Life, RUL) gibi önemli parametreleri yaklaşım metodlarıyla tespit eder (Matúš ve ark., 2019).

BYS'nin güç tüketim verimliliği ve batarya ömrünü artırdığını destekleyen farklı çalışmalar bulunmaktadır (Dubarry 2007, Conte 2006). Gerçek zamanlı batarya koruması ve performansının iyileştirilmesi için BYS, batarya dolum/boşaltım işlemlerini düzenlemede ve takipte kullanılmaktadır (Chiasson ve Vairamohan 2006, Plett 2004).

Ayrıca otomobil endüstrisi, ilgili tüm ürünlere uluslararası ISO26262 (Yol araçları için fonksiyonel güvenlik) standardını uygulamaya başlamıştır. Fonksiyonel güvenlik standardı olarak bilinen ISO 26262, IEC 61508 standardının otomotiv sektörüne uyarlamasıdır. Karayolu taşıtlarının güvenlikle ilgili elektrik elektronik sistemlerine uygulanır. Bu standart; gittikçe bilgisayarlı hale gelen otomobil sistemlerinin güvenliğini sağlamak için muhtemel arızaların neden olacağı sonuçların risk seviyelerine göre otomotiv güvenilirlik seviyelerini (Automotive Safety Integrity Level, ASIL) tanımlar. BYS için risk seviyesi "aşırı şarj nedeniyle lityum iyon pilden kaynaklanan yangın tehlikesi" ve "hataların risk oluşturma potansiyeli" sebebiyle yüksek olarak değerlendirilerek BYS'nin önemine bir kez daha dikkat çekilmiştir (Khan, 2017).

### 2.1. BYS yapısı

Batarya yönetim sistemlerinin bataryanın sağlıklı çalışmasına yapacağı katkı, bataryanın "Paket-Modül-Grup-Hücre" şeklindeki hiyerarşik dizilimine etkisiyle orantılıdır. Bu dizilimde aşağıya inildikçe bataryanın takibi ve kontrolü artmaktadır. Bu artışa oranla maliyet ve sistemin karmaşıklık seviyesi yükselmektedir. Binlerce hücreye sahip bir bataryanın tüm hücrelerini takip etmek ticari bir ürün için oldukça zordur. Bundan dolayı Tablo 2'de verilen Tesla S modelinin batarya yönetimine "grup seviyesinden" başlamak optimum çözüm sağlamaktadır. Her modül içerdiği altı grubun takibini, dengelemesini, yönetimini yapmaktadır. Şekil 3'te verilen modülün grup arabirimi, modüldeki her grubun sıkı yönetimini ve izlenmesini sağlar. Grup sayısına bağlı olarak gerektiği kadar grup arabirimi kullanır. Grup arabirimi her bir grubun gerilimini mümkün olduğu kadar yüksek çözünürlükle dönüştürür, işler ve modül arabirimine iletir. SoC, SoH gibi değerlerin akım ve sıcaklık sensör değerleri göz önünde bulundurularak hesaplanır. Bu bilgiler gruplar arasındaki farkın dengelenmesi için tekrar alt seviyeli işlemciye aktarılır. Güç arabirimi akımı ve solid state bir röle üzerinden diğer modüllerle bağlantıyı kontrol eder. Haberleşme arayüzü diğer modüller ile CAN, LIN gibi otomotiv tipi veya SPI, I2C, UART gibi endüstriyel iletişim protokolleriyle haberleşmeyi sağlar. Ayrıca harici bir pinle tehlikeli durumlarda (iletişim hatlarında bir sıkıntı olsa dahi) kapatma görevini üstlenir.

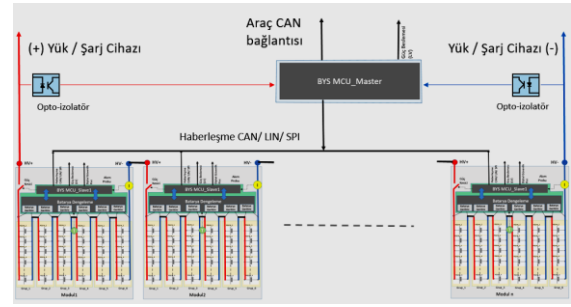


**Şekil 3.** Altı gruptan oluşan bir modülün örnek batarya yönetim sistemi yapısı

BYS için düşük voltaj hattından besleme alınabileceği gibi, BYS kendini doğrudan pillerinden de besleyebilmektedir. Böyle durumlarda BYS'nin çalışması için harici güç gereksinimi ortadan kalkar. Grup arayüzleri modül arabirimine, modül arabirimi birden çok modülü izleyen ve yöneten ana denetleyiciye (BYS MCU\_Master) Şekil 4'teki gibi bağlanır. Ana denetleyici batarya modüllerini yüksek voltaj hatlarına bağlar.

Bu yöntemler tasarlanırken kullanılan entegrelerden biri de Linear Technology tarafından üretilen LTC6803 serisi pasif dengeleme yöntemlerinde, LTC3300 ve Texas Instruments'in ürettiği BQ76 serisi de aktif dengeleme yönteminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Belirlenen ihtiyaca göre bu entegrelerden birden fazla kullanılarak gereken hücreler izlenerek dengelenmektedir. Diğer bir seçenek, 16 bit ADC ile 12 hücre voltajı ölçebilen ve hücre dengeleme yapabilen, 5 sıcaklık ölçüm kanalına sahip, UART üzerinden 20 entegreyle haberleşme potansiyeline sahip ve ana pil denetleyicisiyle izole iletişim yapabilen Infineon TLE9012AQU entegresidir.

Tüm bunların yanı sıra, elektrikli araç bataryaları için dengeleme algoritması (hücre değerlerinin değerlendirilme şart ve sıklığı, dengelemenin şartları, dengeleme başarısız olursa nasıl ilerleneceği gibi konular) kararlaştırılmış olmalıdır.



**Şekil 4.** Batarya yönetim sisteminin haberleşme katmanları (Master - Slave)

## 2.2. BYS nin görevleri

BYS bir koruyucu gibi davranarak bataryaların anlık çalışma durumlarını inceler, nominal çalışma değer aralıklarında kalmalarını sağlar. Herhangi bir hücrede aşırı voltaj yüklenmesi ya da düşük gerilim oluşup gerilim dengelerinin bozulması durumunda sisteme müdahale ederek kesime götürür. Gerekli şartlar oluştuğunda enerjiyi en dolu hücreden en az yüklü hücreye aktararak veya fazla yüklü pildeki enerjiyi ısı olarak dışarı atarak dengelenmelerini sağlar. Batarya yönetim sistemleri sürekli bir denetim kurarak olağan ve olağandışı işlemleri kontrol etmeye çalışır. Bu görevler, yüksek maliyetli batarya paketlerinin uzun ömürlü olmaları için son derece önemlidir.

BYS'lerin bir diğer görevinde, yüksek sıcaklık altında yanıcı ve patlayıcı özellik gösteren bu piller için güvenliğin sağlanmasıdır. Alınan yazılımsal ve donanımsal tedbirler sayesinde bataryalar daha uzun süre ve güvenle kullanılabilir (Changhao ve ark., 2015).

Elektrikli araçlar da güvenlik ve yüksek verim için batarya yönetim sistemlerine ihtiyaç duyarlar. Bunun sağlanabilmesi için batarya değerlerinin yanında araca ait bazı parametrelerin de sürekli kontrol edilmesi gerekmektedir. Elektronik bir donanım ve yazılımdan oluşan batarya yönetim sistemi, akü üreticisinden temin edilebilen bir sistem olabileceği gibi araç kontrol sistemine tümleşik bir alt sistem olarak da tasarlanabilir. Batarya ile ilgili kararlar daha üst seviyeli bir kontrol ünitesi ile denetlenmektedir. İyi tasarlanmış bir BYS'den aşağıdaki fonksiyonları "doğrudan" veya "üst seviyeli kontrol ünitesiyle ortaklaşa" gerçekleştirmesi beklenir (Kaymaz, 2018):

1. Gerilim, akım, sıcaklık, empedans (U, I, T, Z) ölçümü, SoC, SoH ve RUL değerinin düzenli olarak hesaplanması
2. İşletme limitleri içinde hücrelerin sağlıklı çalışmasının sağlanması



3. Tüm hücrelerin sağlıklı olarak şarj edilebilmesi (Uygun şarj algoritması, şarj istasyonları ve şebekeyle iletişim, V2G)
4. Araç işletim durumuna uygun enerjinin temini (Uygun Deşarj Algoritması)
5. Hücrelerin dengelenmesi
6. Diğer kontrol üniteleri için gereken bilginin ve hata kodlarının üretilmesi ve araç içi diğer sistemlerle iletişim (CAN Bus)
7. Termal kontrol
8. Kalan enerjiyle tahmini menzil bilgisi (ileri sistemlerde GPS ile entegrasyon)
9. Akü kullanımının (çalışma süresi, dolun ve boşaltım sayısı) ve kötü kullanımın kaydedilmesi (Log Book)
10. Kontrol dışı durumlarda güvenli modun oluşturulması (Safety Mode)
11. Acil durumlarda “servise ulaşım” imkânının planlanması (Limp Home Mode)
12. Kaza durumunda akü izolasyonunun sağlanması (Crash Mode)

İlk maddede belirtilen SoC bataryanın enerji oranını verdiğinden araç için önemli bir bilgidir ve akünün anma kapasitesi ile şarj miktarına bağlıdır. Ancak bataryalar anma kapasitelerini şu iki etki sebebiyle kaybederler:

- Zamana bağlı yaşlanma (Calendar aging)
- Çalışmaya bağlı yaşlanma (Cyclic aging)

Sıcaklık, her iki etki üzerinde hızlandırıcı bir fonksiyona sahiptir. Yaşlanmaya bağlı kaybolan bu kapasite sebebiyle SoC'nin yanında SoH ve RUL bilgisi hesaplanır. Bataryada depolanan kimyasal enerji miktarına doğrudan erişim mümkün olmadığından bu önemli parametreler bir takım yaklaşım metodlarıyla hesaplanır. SoC / SoH yaklaşım metodlarını dört kategori altında toplamak mümkündür:

1. Doğrudan ölçüm (Açık devre voltaj yöntemi, Terminal voltaj yöntemi, Empedans yöntemi, Empedans spektroskopisi yöntemi)
2. Kayıt tutma yöntemi (Standart ve geliştirilmiş Coulomb sayma yöntemi)
3. İleri sistemler (Kalman filtresi, Destek vektör makinesi, Bulanık ve yapay sinir ağı)
4. Hibrit yöntemler (Coulomb sayımı ve Terminal voltaj yöntem kombinasyonu, Coulomb sayımı ve Kalman filtre kombinasyonu, Birim başına Kalman filtre sistemi) (Matúš ve ark., 2019)

Mevcut batarya yönetim sistemlerinde çoğunlukla görülen yöntem, doğrudan ölçüm yöntemi ile mikroişlemci destekli kayıt tutma yöntemlerinin (Coulomb sayımı ve terminal voltaj yönteminin) kombinasyonudur. Hata payını düşük seviyede tutmak için empedans ölçümü, Kalman filtre ve yapay zekâ destekli uygulamalar üzerinde çalışılmaktadır.

Gelişen teknolojiler batarya yönetim sistemlerinin özelliklerini ve görev tanımını da değiştirmektedir. Son dönemde bataryaların bulut tabanlı izleme ve analiz ile hibrit/elektrikli araçlarda ekonomik ömrünü tamamlamış bataryaların yeniden kullanımı ön plana çıkmaktadır:

### **Bulut tabanlı izleme ve analiz**

Araç bataryaları hızlı şarj, aşırı sportif sürüş tarzı ve yüksek veya düşük ortam sıcaklıkları gibi stres kaynakları sebebiyle öngörülenden daha hızlı yaşlanırlar. Bulut tabanlı servisler, bu stres tetikleyicilerini algılamak ve bunlara karşı koymak için mevcut ortam sıcaklığı ve şarj etme alışkanlıkları gibi bataryayla ilgili tüm verileri gerçek zamanlı yapay zeka analizi için buluta iletmektedir. Bu sayede bulut tabanlı batarya yönetim sistemleri son kullanıcılara SOC, SOH gibi kritik bilgileri izleme ve analiz imkânı sağlar (Li, 2020). Ayrıca kritik batarya arızalarının çevrim içi olarak tanımlanmasına ve hücre yaşlanmasının uzun vadeli izlenmesine olanak tanımaktadır (Adhikaree, 2017). Bu tür yüksek teknoloji özelliklerinin artan popülaritesi, batarya yönetim sistemi paydaşları için iş stratejilerinde dönüşüme neden olmaktadır. Örneğin; 2019'da Bosch bireysel elektrikli araç akülerinin hizmet ömrünü uzatmak için bulut tabanlı sürüş istihbarat hizmetlerinin geliştirildiğini duyurmuştur. Bu özellik, bulut hizmetinde pil durumunu sürekli olarak analiz eden ve hücre yaşlanmasını önlemek veya yavaşlatmak için uygun eylemleri gerçekleştiren akıllı yazılım işlevlerini içermektedir (Bosch, 2019).

### **Yeniden Kullanım**

Elektrikli araçlarda kullanılmış ve ekonomik ömrünü tamamlamış bataryalar (elektrikli araç için yeterli olmasa da) elektrik şebekelerinde güç dengelemesi gibi ikincil kullanımlar için halen yüksek bir depolama kapasitesine sahiptir (Lluc 2019, Martinez-Laserna, 2016). Böyle bataryaların yenilenebilir enerji sistemleri ve telekomünikasyon gibi diğer alanlarda yeniden kullanılması yüksek hassasiyetli batarya yönetim sistemlerine olan ihtiyacı artıracaktır.

### 3. Hücre eşitleme (batarya dengeleme) yöntemleri

Bataryanın uzun ömürlü olmasını sağlayan parametrelerden biri de hücre grup gerilimlerinin eşit olmasıdır. Çünkü seri bağlı bir pil grubunun deşarj durumunu gruptaki en düşük gerileme sahip hücre belirlemekte ve pil grubu ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Benzer şekilde şarj sırasında yüksek gerilime sahip olan hücre, bataryada denge kaybına neden olur ve düşük gerilime sahip hücrenin tam dolmasına izin vermez (DelRossi, 2002).

Hücreler arasındaki dengesizliklere sebep olan bazı nedenler şunlardır:

- Üretimden kaynaklı farklılıklar
- Hücre empedansındaki farklılıklar
- Termal (paket-modül içi) dengesizlik
- Araç üzerindeki titreşim (Bruen, 2016 ve Zhang, 2017)

Bu durumlar batarya içerisindeki piller arasında kapasite farklılıkları oluşturmakta ve daha sık şarj/deşarj işlemi gerektirmektedir. Bu dengesizlikler sistemin performansı düşürerek, kullanım ömrünü kısaltmaktadır. Batarya dengeleme sistemleri bu noktada her bir hücrenin gerilim seviyesini, dolayısıyla kapasitesini birbirine en yakın noktada tutmaya çalışarak batarya grubunun ömrünün uzamasını sağlamaktadır. Bu nedenle hücre dengeleme devresi, her hücre yapısının dengeli koruma durumunu ve sistemin en uygun çalışma noktasını dikkate almalıdır.

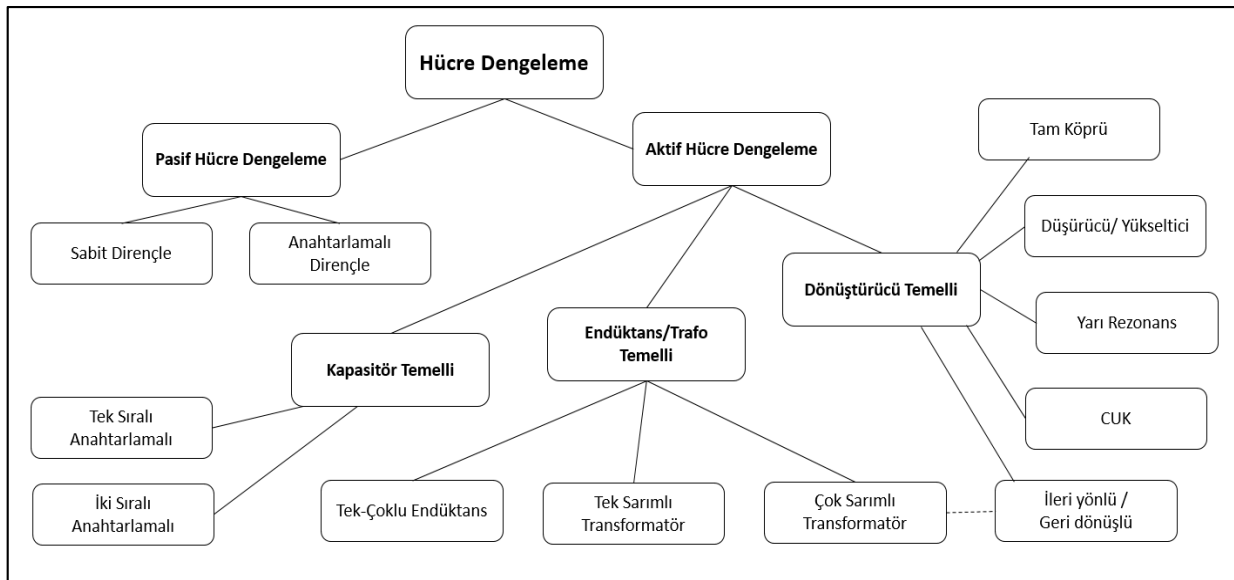
Dengeleme yöntemleri Şekil 5’te gösterildiği gibi pasif ve aktif dengeleme yöntemi olarak ikiye ayrılmaktadır. Uygun yöntem, kullanılacak sistemin yapısı ve maliyeti göz önünde bulundurularak seçilir (Balıkcı, 2012). Pasif hücre dengelemede kapasitesi yüksek hücredeki fazla enerji bir direnç üzerinden ısı enerjisi olarak paketten atılırken aktif hücre dengeleme sistemlerinde enerji, yüksek gerilimli hücreden düşük gerilimli olan hücreye transfer edilmekte ve verim yükseltilmektedir.

#### 3.1. Pasif dengeleme yöntemi

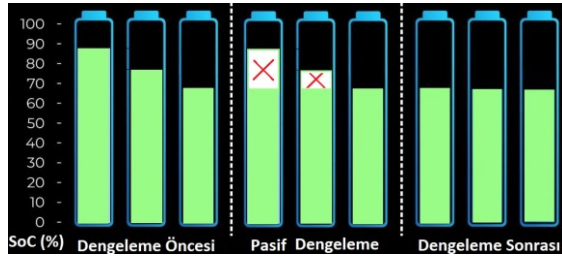
Bu dengeleme yöntemlerinden ilki olan pasif dengelemeli batarya yönetim sistemlerinde; bir eşik değeri seçilir ve herhangi iki hücre arasındaki fark bu eşik aşarsa, bypass dirençlerini kullanarak bu fazla enerji harcanır. Pasif dengeleme, şarj durumunu belirli bir noktada genellikle ya "en üst şarj seviyesinde" ya da "en alt şarj seviyesinde" iken eşitler. Bu daha yüksek şarj durumuna sahip hücrelerden (bir direnç üzerinden kontrollü bir kısa devre ile) enerjiyi boşaltılarak yapılır.

Prensip uygulama Şekil 6’da verilen bu dengeleme yönteminin en büyük dezavantajı enerjinin ısı enerjisi olarak dışarı atılmasıdır. Isı olarak paket dışına atılan enerji miktarı toplam batarya paketi düşünüldüğünde göz ardı edilemeyecek düzeye gelecektir.

Pasif dengeleme yönteminde sabit veya anahtarlamalı direnç kullanılır. Sabit direnç ile dengeleme yönteminde hücrelerden sürekli olarak akım çekildiğinden verim düşmektedir.

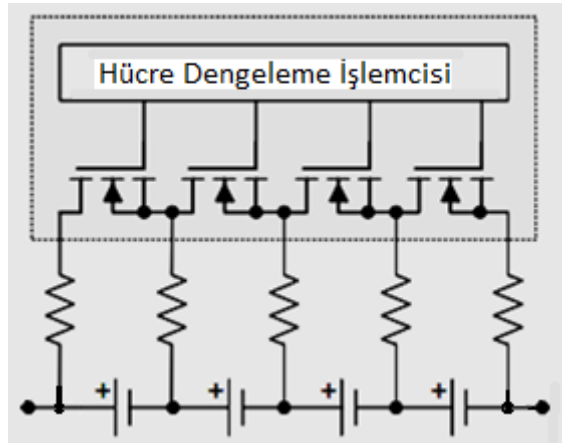


Şekil 5. Aktif ve Pasif dengeleme yöntemleri



**Şekil 6.** Pasif Dengeleme Yöntemi

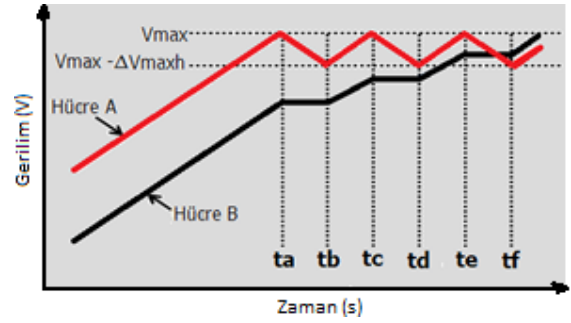
Seri bağlı hücrelerin gerilim seviyeleri kontrolcü tarafından ayrı ayrı ölçülmesi gerekmektedir. Bu sistem bir anahtar, bir direnç ve bir kontrolörden oluşmaktadır. Kullanımı oldukça yaygındır. Anahtarlamalı dengeleme için en ideal yöntemlerden biri de Şekil 7'deki gibi bypass alan etkili transistör (MOSFET) kullanımudur. Yeterince dolmuş hücrenin kol direnci artırılarak daha az akım çekmesi ve bu esnada diğer hücrelerin bu hücreyi yakalaması sağlanır. Buradaki ana seçim, dengeleme entegresinin içinde olan ve düşük seviyede bypass akımlarına müsaade eden FET'leri kullanmak veya özel uygulama ihtiyaçları için serbestçe ayarlama imkânı veren harici Harici FET'ler kullanmaktır. Harici FET'lere tipik bir örnek oluşturan Infineon Small Signal OptiMOS-606 entegre ailesi 60 volta kadar çalışabilir. (Tamma Kumar, 2013).



**Şekil 7.** Anahtarlamalı dirençle dengeleme

Dolum esnasında farklı şarj seviyelerinde olan ve şarj miktarları gerilim seviyeleriyle anlaşılan seri bağlanmış iki hücrenin (Hücre-A ve Hücre-B) dolum zamanı Şekil 8'de gösterilmektedir. Enerjisi daha fazla olan Hücre-A şarj işleminin kesileceği üst noktaya ( $V_{max}$ ) Hücre-B'den daha önce, "ta" anında ulaşmaktadır. Tam bu noktada Hücre-A ile Hücre-B arasındaki enerji farkı fazla olduğundan, şarj işlemi kesilerek Hücre-A üzerindeki enerjinin bir kısmı bir yük üzerinden boşalır ve "tb" anında şarj işlemi tekrar başlar. Şarj işlemini durdurup Hücre-A

üzerindeki enerjini yük üzerinden boşaltılması işlemi "tc-td" ve "te-tf" arasında tekrar edilmektedir. Dolum işlemi bitince her iki hücre arasındaki enerji farkı belirlenen seviyeye kadar indirilmektedir.



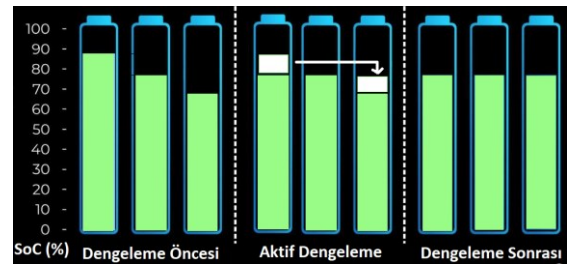
**Şekil 8.** Pasif Dengeleme Hücre Gerilimleri

Pasif dengeleme yöntemi hibrit ve elektrikli araçlar için kolay uygulanabilirlik ve maliyet avantajı sağlamaktadır. Dengelemenin uzun sürmesi ve enerji kayıpları dezavantajıdır.

### 3.2. Aktif dengeleme yöntemi

Diğer dengeleme yöntemi olan aktif dengeleme yöntemi enerjinin yüksek yüklü hücreden düşük şarj hücrene kapasitör ve bobinler kullanılarak transfer edildiği sistemdir. Prensiş şeması Şekil 9'da verilen aktif dengeleme yöntemi üç farklı metotla uygulanmaktadır:

1. Kapasitör Temelli
  - a) Tek Sıralı Kapasitör
  - b) İki Sıralı Kapasitör
2. Endüktans/Transformatör Temelli
  - a) Tek-Çoklu Endüktans
  - b) Tek Sarımlı Transformatör
  - c) Çok Sarımlı Transformatör
3. Dönüştürücü Temelli
  - a) Geri dönüşlü / ileri yönlü dönüştürücü
  - b) CUK Dönüştürücü
  - c) Düşürücü/Yükseltici Dönüştürücü
  - d) Tam Köprü Dönüştürücü
  - e) Yarı Rezonans Dönüştürücü



**Şekil 9.** Aktif dengeleme yöntem

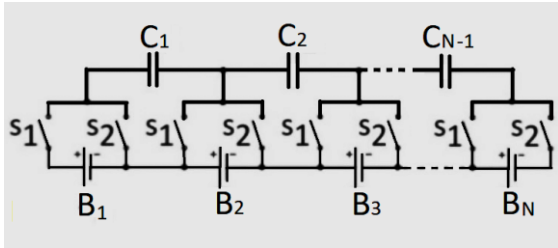


### 3.2.1. Kapasitör temelli dengeleme

Bu dengeleme mekanizması, seçilen bir hücredeki enerjiyi kapasitör üzerinde depolayarak bir başka hücreye aktaran sistemdir. Farklı sayıda anahtarlama ve kapasitör kullanarak farklı dengeleme tasarımları yapılabilmektedir.

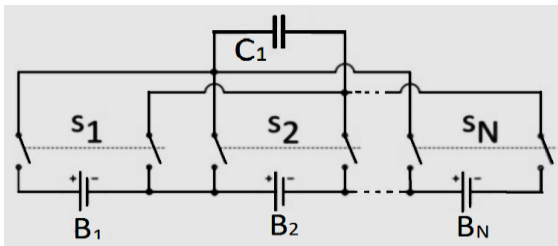
#### Tek sıralı kapasitör ile dengeleme

Bu yöntemde  $n$  sayıdaki hücreyi dengelemek için Şekil 10'da görüldüğü gibi  $(n-1)$  sayıda kapasitör ve  $2n$  sayıda dengeleme için anahtar gerekmektedir. Sistem bileşenleri sebebiyle maliyeti, pasif dengelemeli yöntemle göre daha yüksektir. Hem şarj hem de deşarj işleminde kullanılabilir. Dengeleme uzun sürmektedir.



Şekil 10. Tek sıralı kapasitör dengeleme

Anahtarlama dengeleme için en ideal yöntemlerden biri de Şekil 7 deki gibi bypass MOSFET kullanımıdır. Dörde kadar Li-Ion veya Li-Po hücrenin dengelemesi için analog ön uç (Analog Front End, AFE) olarak BQ29330 entegresi kullanılmıştır (Wen, 2009). Prensipten uygulama şeması Şekil 11'de verilen benzer bir uygulamada tek kapasitör ile dengeleme yönteminde yine  $n$  sayıda hücrenin dengelenmesi için tek kapasitör ve  $2n$  adet anahtar gerekmektedir. Hem şarj hem de deşarj işleminde kullanılabilir. Her bir batarya aynı kapasitöre sırayla bağlanarak birbirleri arasında enerji aktarımı yaparlar.

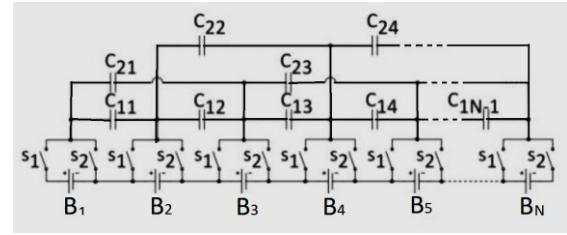


Şekil 11. Tek kapasitörlü dengeleme

#### İki sıralı kapasitör ile dengeleme

Prensipten uygulama şeması Şekil 12'de verilen iki sıralı anahtarlama kapasitörlü dengeleme sistemde  $n$  sayıda kapasitör ve  $2n$  sayıda anahtar gerekmektedir. Alt katmandaki kapasitörler

uzak hücreler arasındaki enerji akımının hızlandırılması için eklenmiştir. Dengeleme süresi diğer kapasitörlü yöntemlere göre daha uzun sürmektedir.



Şekil 12. İki sıralı anahtarlama kapasitör

İki sıralı anahtarlama kapasitörlü dengeleme yönteminde yüksek veya düşük konumda olmak üzere tüm anahtarların aynı anda çalıştırılmasıyla sağlanır. Anahtarlama yapıldığında kapasitör voltajından daha yüksek hücreler bu kapasitörü şarj eder ve anahtar tekrar konum değiştirdiğinde kapasitörden daha düşük hücreler onu deşarj etmektedir. Ve bu olay dengeleme sağlanana kadar tüm hücreler için tekrar edilir. Dengeleme doğal olarak kontrol edilemez. Çünkü yığındaki her bir hücre aynı şekilde çalıştırılır. Enerji aktarım hızı kapasitörlerin büyüklüğü ve anahtarlama frekansı ile doğru orantılıdır.

#### 3.2.2. Endüktans/trafo temelli dengeleme

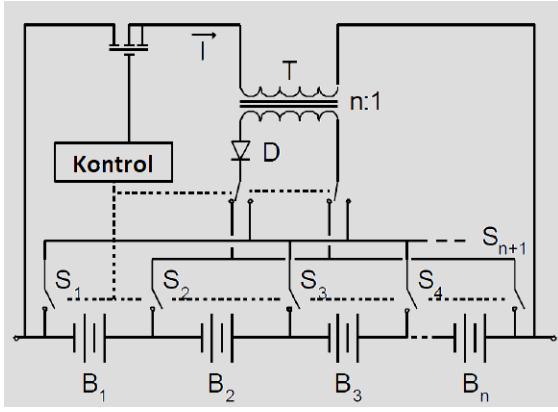
Bu yöntemde hücre dengelemesinde bir hücre veya hücre grubunun bir başka hücre veya hücre grubuna enerji taşınması için bobin temelli (endüktans veya transformatör) elemanlar kullanılmaktadır. Dengeleme metodu kullanılan bu eleman tipi ve kullanılan transformatörün sarım kat sayısına göre isimlendirilir.

#### Endüktanslı dengeleme

Endüktanslı dengeleme yönteminde-kapasitörlü sistemlerde olduğu gibi- enerji aktarımı için bir veya daha fazla sayıda endüktans kullanılabilir. Kontrol mekanizması gereken anahtarlama sinyali uygulayarak enerji aktarımı yapılacak hücrelere iletimi sağlamaktadır. Çok hücreli paketlerde dengeleme süresi uzamaktadır. Tek endüktanslı sistemlerde bu süre daha kısadır ancak bu topoloji yalnızca komşu hücreler arasında enerji aktarımı yapabilir. Bu nedenle enerji, dengelenen tüm hücreler arasındaki aktarılır.

#### Tek sarımlı transformatör ile dengeleme

Bilindiği üzere transformatör primer ve secondary sargılar ile bunların bağlandığı bir nüveden oluşmaktadır. Bu sargılar birbirinden elektriksel olarak izole edilmektedir.



**Şekil 13.** Tek sarımlı transformatör yöntemi

Transformatörlere ilk enerji verildiğinde yüksek akım çekmektedirler. Bu durum koruma rölelerinde hataya ve sistemdeki diğer elemanların zarar görmesine neden olabilmektedir. Bundan dolayı trafo sargısı ve bu kalkış akımı için ideal önlemlerin alınması gerekmektedir. Paketten hücreye ve hücreden pakete olmak üzere çift yönlü bir aktarım söz konusudur. Bu topolojide kullanılan trafonun primer tarafında depolanan enerji MOSFET tarafından tetiklenerek sekonder üzerinden boş hücreye aktarılır. Bu yöntemde kullanılan trafo, MOSFET ile bunlara ait anahtarlama frekansı maliyeti etkileyen faktörlerdir. Şekil 13'te verilen tek yönlü dengeleme için daha az sistem bileşenine ihtiyaç duyulmaktadır.

### Çok sarımlı transformatör ile dengeleme

Çok sarımlı transformatörlü dengeleme sistemleri, yapıları gereği dönüştürücü temelli tasarlandıklarından "Geri dönüşlü ve ileri yönlü dönüştürücü" başlığı altında anlatılacaktır.

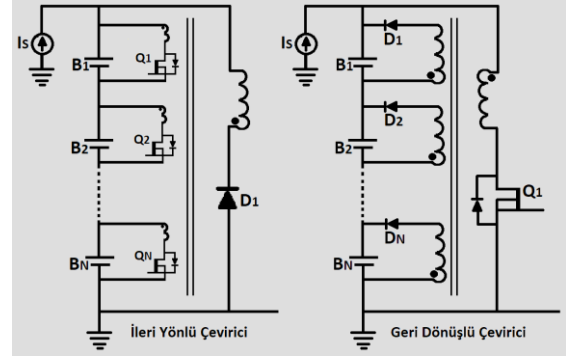
#### 3.2.3. Dönüştürücü temelli dengeleme

Dönüştürücü temelli dengeleme yöntemleri seri bağlı hücrelerin her birine birer dönüştürücü bağlanması temeline dayanmaktadır. Dönüştürücü tabanlı topolojilerin verimi daha yüksektir ve güç akışı üzerinde iyi bir kontrole sahiptir (Ma ve ark., 2018). Burada farklı tip ve yöntemlerle tasarlanan dönüştürücülerden geri dönüşlü/ileri yönlü, cuk, düşürücü/yükseltici, tam köprü ve yarı rezonans tip dönüştürücülerden bahsedilecektir.

#### Geri dönüşlü ve ileri yönlü dönüştürücü

Çok sarımlı trafolarla yapılan geri dönüşlü (fly-back) ve ileri yönlü (forward) yapılarda hücre sayısı kadar ayrı transformatör bulunmaktadır. Modüler sistemlerde oldukça kolaylık sağlamaktadır. Manyetik olan nüveye temas etmeden hücre ekleme ve çıkarma işlemi yapılabilmektedir. Ancak maliyeti diğer yöntemlere kıyasla yüksektir. Şekil 14'te çok

sarımlı trafolarla yapılan geri dönüşlü ve ileri yönlü yapılar gösterilmiştir. Geri dönüşlü yapıda tek, ileri yönlü yapıda hücre sayısı kadar anahtar bulunmaktadır.

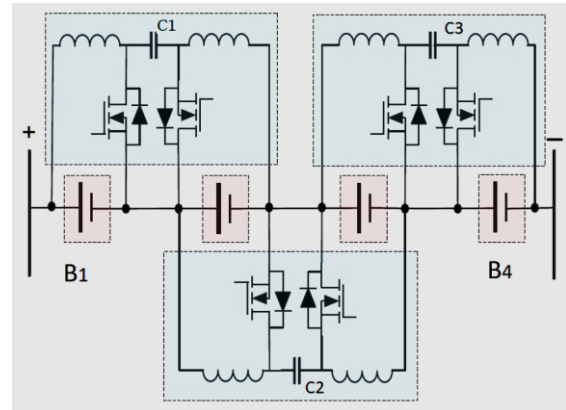


**Şekil 14.** Geri dönüşlü ve ileri yönlü yapılar

Geri dönüşlü dönüştürücüde yardımcı yan anahtar açıldığında, herhangi bir hücredeki yüksek voltaj düşük voltajlı hücrelere diyot aracılığıyla iletilir (Deepa ve ark., 2013). İleri yönlü dönüştürücüde de, voltaj farkı oluştuğunda yüksek enerjiye sahip hücre, transformatör sargıları, diyotlar ve anahtarlar aracılığıyla diğer zayıf hücrelere aktarılır (Shang ve ark., 2017).

#### CUK dönüştürücü

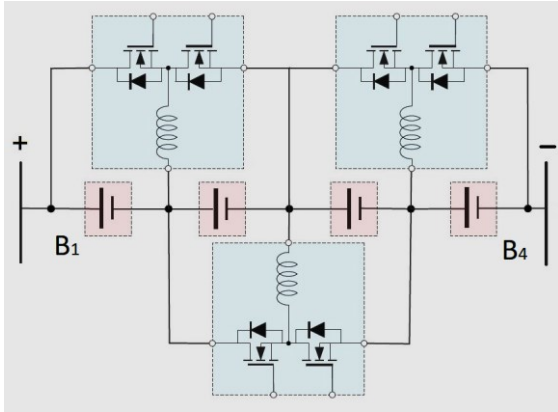
Prensip uygulama şeması Şekil 15'de verilen Cuk dönüştürücü, giriş voltajı büyüklüğünden daha büyük veya daha küçük bir çıkış voltajı büyüklüğüne sahip bir DC / DC Düşürücü-Yükseltici dönüştürücü türüdür. Komşu hücreler arasındaki dengeleme için kullanılmaktadır. Bu dengelemede n sayıda hücre için (n-1) sayıda dönüştürücü gerekmektedir. Çok hücreli paketlerde dengeleme oldukça yavaştır. Çıkış voltajını artırabilir veya azaltabilir. Yalnızca komşu hücrelerin dengelenmesi için uygulanabilir (Ouyang ve ark. 2018, Moghaddam ve Van Den Bossche, 2019).



**Şekil 15.** CUK dönüştürücü

### Düşürücü-Yükseltici dönüştürücü

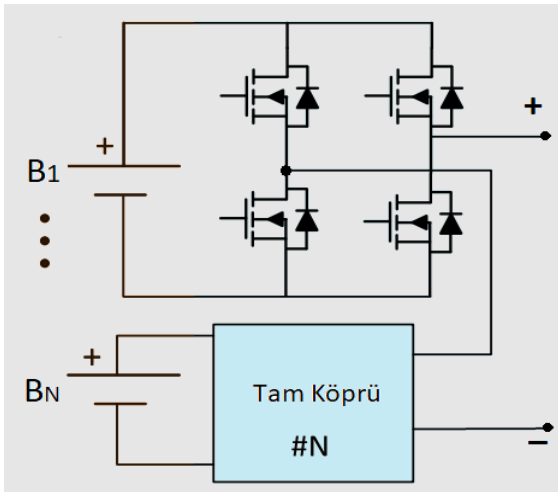
Düşürücü-Yükseltici (Buck-Boost) dönüştürücü Şekil 16'da gösterildiği gibi bir adet düşürücü ve bir adet yükseltici dönüştürücünün (bir araya gelmesiyle oluşmuş bir topolojidir. Yükseltici kullanılarak hücrenin enerjisi tüm pakete, düşürücü kullanılarak tüm paketin enerjisi bir hücreye aktarılmaktadır. Akıllı bir kontrolcü ile gerilimlerin okunması ve gerekli anahtarlama sinyalleri ile dönüştürücü gerilimlerinin kontrol edilmesi gerekir. Modüler bir yapıya sahiptir. Kullanımı oldukça yaygındır. Düşürücü-Yükseltici topolojisi, hücreler arasındaki voltaj sapmalarının minimum olduğu ve uygulamaların yüksek dengeleme akımlarına ihtiyaç duyduğu durumlarda kullanılır (Shubiao ve ark., 2017).



Şekil 16. Düşürücü-Yükseltici dönüştürücü

### Tam köprü dönüştürücü

Tam köprü dönüştürücü, tam kontrollü dönüştürücü olarak da adlandırılır. Düşürücü-Yükseltici dönüştürücü modu, tam köprü dönüştürücünün iki çalışma modudur (Chatzinikolaou ve Rogers, 2016).



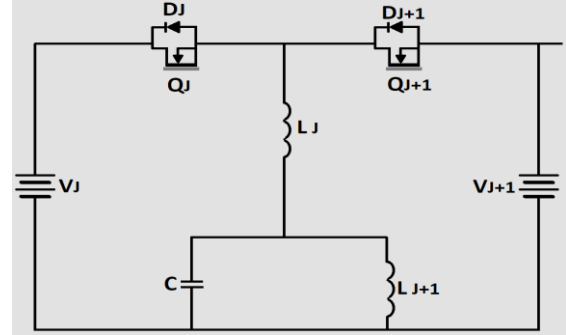
Şekil 17. Tam köprü dönüştürücü

Bu yöntem iki yönlü ve tam kontrollü bir enerji akarımı sağlamaktadır. Şekil 17'deki yüksek güç aktarımı gerektiren modüler sistemlerde kullanılmaktadır. Karmaşık ve pahalı bir sistem olmasına rağmen hızlı bir dengeleme topolojisidir.

### Yarı rezonans dönüştürücü

Yarı Rezonans (Quasi-resonant) dönüştürücü, son derece verimli bir dönüştürücüdür. Çünkü anahtarlar sıfır voltaj ve / veya sıfır akımda açılır ve kapanır.

Bu dengeleyicide bobin ve kapasitörler, sıfır akımda anahtarlama (Zero Current Switching, ZCS) fonksiyonunu elde etmek için rezonant olarak tasarlanmıştır (Shang ve ark., 2015). Sıfır akım veya sıfır gerilim yarı rezonans çevirici olarak da adlandırılır. Anahtarlama kayıpları azaltılarak dengeleme veriminin artırılması amaçlanarak oluşturulmuştur. Oldukça karmaşık ve yüksek maliyeti vardır. Şekil 18'de yarı rezonans dönüştürücünün prensip şeması verilmiştir.



Şekil 18. Yarı rezonans dönüştürücü

Bahsi geçen aktif hücre dengeleme yöntemlerinin dengeleme hızı, güvenilirlik, kontrol stratejisi, maliyet, boyut, dolmuş-boşalma esnasındaki etkinlik, verim ve uygulama gücü gibi kriterler üzerinden yapılan karşılaştırmaları Tablo 3'de verilmiştir (Thiruvonasundari ve Deepa, 2020). Kontrol stratejisi zor olsa da düşürücü/yükseltici dönüştürücü ile yapılan dengeleme devrelerinin daha hızlı ve güvenilir bir dengeleme yaptığı söylenebilir. Hem dolmuş (şarj) hem de boşaltım (deşarj) esnasında aktif olarak çalışan bu dönüştürücü tipi orta ve yüksek güçlü batarya gruplarına uygulanabilmektedir. düşük maliyet bu dönüştürücünün diğer avantajı sağlamaktadır. Uygulanacak hücre dengeleme topoloji seçiminde, dengelemenin hangi şartlar altında ve ne kadar süreyle yapılacağı (müsade edilen azami akım) gibi parametreler de göz önünde bulundurulmalıdır.

**Tablo 3. Aktif hücre dengeleme yöntemlerinin karşılaştırması**

<i>Aktif Dengeleme Yöntemi</i>	<i>Dengeleme hızı</i>	<i>Güvenirlilik</i>	<i>Kontrol stratejisi</i>	<i>Maliyet</i>	<i>Boyut</i>	<i>Dolum &amp; Boşaltım</i>	<i>Verim</i>	<i>Uygulama Gücü</i>
<i>Tek sıralı kapasitör yöntemi</i>	<i>Düşük</i>	<i>Orta</i>	<i>Zor</i>	<i>Yüksek</i>	<i>İri</i>	<i>Her ikisi</i>	<i>Yüksek</i>	<i>Orta/ Yüksek</i>
<i>İki sıralı kapasitör yöntemi</i>	<i>Çok Düşük</i>	<i>Orta</i>	<i>Orta</i>	<i>Orta</i>	<i>Orta</i>	<i>Her ikisi</i>	<i>Yüksek</i>	<i>Orta/ Yüksek</i>
<i>Tekli-Çoklu Endüktans yöntemi</i>	<i>Orta</i>	<i>Orta</i>	<i>Zor</i>	<i>Orta</i>	<i>Orta</i>	<i>Her ikisi</i>	<i>Orta</i>	<i>Orta/ Yüksek</i>
<i>Tek Sarımlı Transformatör yöntemi</i>	<i>Düşük</i>	<i>Düşük</i>	<i>Zor</i>	<i>Düşük</i>	<i>Orta</i>	<i>Dolum</i>	<i>Düşük</i>	<i>Orta</i>
<i>İleri yönlü Dönüştürücü yöntemi</i>	<i>Orta</i>	<i>Orta</i>	<i>Zor</i>	<i>Orta</i>	<i>Orta</i>	<i>Her ikisi</i>	<i>Orta</i>	<i>Orta</i>
<i>Geri dönüşlü Dönüştürücü yöntemi</i>	<i>Düşük</i>	<i>Düşük</i>	<i>Orta</i>	<i>Orta</i>	<i>Orta</i>	<i>Her ikisi</i>	<i>Orta</i>	<i>Orta</i>
<i>Tam Köprü Dönüştürücü yöntemi</i>	<i>Yüksek</i>	<i>Orta</i>	<i>Zor</i>	<i>Düşük</i>	<i>Kompak</i>	<i>Her ikisi</i>	<i>Yüksek</i>	<i>Orta</i>
<i>Çuk Dönüştürücü yöntemi</i>	<i>Orta</i>	<i>Orta</i>	<i>Zor</i>	<i>Orta</i>	<i>Orta</i>	<i>Her ikisi</i>	<i>Orta</i>	<i>Orta/ Yüksek</i>
<i>Düşürücü/Yükseltici Dönüştürücü yöntemi</i>	<i>Yüksek</i>	<i>Yüksek</i>	<i>Zor</i>	<i>Orta</i>	<i>Orta</i>	<i>Her ikisi</i>	<i>Yüksek</i>	<i>Orta/ Yüksek</i>
<i>Yarı Rezonans Dönüştürücü yöntemi</i>	<i>Düşük</i>	<i>Çok Düşük</i>	<i>Zor</i>	<i>Düşük</i>	<i>Orta</i>	<i>Her ikisi</i>	<i>Orta</i>	<i>Orta/ Yüksek</i>
<i>Rampa Dönüştürücü yöntemi</i>	<i>Düşük</i>	<i>Çok Düşük</i>	<i>Zor</i>	<i>Düşük</i>	<i>Orta</i>	<i>Her ikisi</i>	<i>Düşük</i>	<i>Orta</i>

#### 4. Sonuç

Otomotiv sektörünün geleceği olan elektrikli araçların bataryalarına ait dengeleme sistemleri detaylı olarak incelenmiştir. Seri elektriksel bağlantının temel gereksinimi olan “modüllerin eşit voltaja sahip olması” üretim veya işletme farkları sebebiyle ihlal edildiğinde aynı grup içindeki pillerin dengesiz yüklenmesine ve kayıplar oluşmasına yol açar. Bunları gidermek için aktif ve pasif dengeleme yapabilen batarya yönetim sistemleri uygulanmaktadır.

Maliyet avantajı sağlayan pasif dengeleme sistemlerinin dezavantajı enerjinin boşa harcaması ve dengeleme süresinin uzun olmasıdır. Aktif dengeleme sistemleri enerjiyi kendi içinde transfer etmesi ve daha kısa dengeleme süresiyle pasif dengeleme yöntemlerine alternatif olmaktadır. Aktif dengeleme yönteminin dezavantajı ise sistem karmaşıklığı ve maliyetinin yüksek olmasıdır.

Tasarım ihtiyacına göre seçilecek yöntem kadar, dengeleme işleminin hangi şartlar altında ve ne kadar sıklıkla yapılacağı da önemlidir. Bu tip detaylar araç ve batarya üreticilerinin ortaklaşa karar vermesi gereken konulardır.

Batarya ve yönetim sistemlerinden daha yüksek verim almak için şu hususlara dikkat edilmelidir:

- Batarya grupları oluşturulurken üretim kaynaklı farkların minimize indirilmesi ve karakteristik özellikleri birbirine yakın olan hücrelerin aynı grup içinde kombinasyonu
- Batarya yönetim sistemlerinde akım, gerilim, sıcaklık değerlerinin yüksek doğruluk ile ölçülmesi, etkin ölçüm yönteminin seçilmesi ve düzenli kalibrasyon kontrolü
- SOH, SOC, RUL gibi değerlerin hesaplanmasında doğru ölçüm ve hesaplama algoritmasının oluşturulması
- Batarya paket içi sıcaklık farkının oluşumunu engelleyecek pasif ve/veya aktif soğutma sisteminin tasarımı
- Fayda-maliyet oranı yüksek, verimli bir dengeleme sisteminin seçilmesi ve etkin kullanımı
- Teknolojik gelişmelere açık altyapı

Çevreye duyarlı enerji üretiminin ve verimli şekilde tüketilmesinin her geçen gün daha fazla önem kazandığı günümüzde detaylar daha da önem arzedecektir.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı**

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

### **Destek ve Teşekkür Beyanı**

Çalışma herhangi bir destek almamıştır. Teşekkür edilecek bir kurum veya kişi bulunmamaktadır.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

### **Kaynakça**

**Adhikaree ve ark.**, (2017), "Cloud-based battery condition monitoring platform for large-scale lithium-ion battery energy storage systems using internet-of-things (IoT)," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, 2017, pp. 1004-1009,

**Balıkçı ve ark.**, (2012), Elektrikli Araç Batarya Sistemleri İçin Hücre Dengeleme (Cell Balancing) Sisteminin Tasarlanması, ELECO '2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu

**Başbakanlık Genelgesi.** *T. C. Resmî Gazete*, 30311, 24 Ocak 2018.

**Batron Enerji** (2019), Batron Enerji A.Ş <https://www.batronenerji.com/lityum-aku-ile-elektrik-depolama/>

**Bosch** (2019), Web sitesi, 12.12.2020 <https://www.bosch.co.uk/news-and-stories/news/bosch-extends-the-service-life-of-electric-vehicles/>

**Bruen ve ark.** (2016), 'Analysis of a battery management system (BMS) control strategy for vibration aged Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC) Lithium-Ion 18650 battery cells', *Energies*, vol. 9, no. 255.

**Changhao ve ark.**, (2015), Lithium-Ion Battery Cell-Balancing Algorithm for Battery Management System Based on Real-Time Outlier Detection, *Detection Mathematical Problems in Engineering* 2015(2):1-12

**Chatzinikolaou ve Rogers** (2016), "Electrochemical cell balancing using a full-bridge multilevel converter and pseudo-open

circuit voltage measurements," 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016), Glasgow.

**Chiasson ve Vairamohan** (2006), Estimating the state of charge of a battery, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, Cilt: 13, s:465-470.

**Conte** (2006), Battery and battery management for hybrid electric vehicles: a review, *Elektrotechnik und Informations-technik*, Cilt. 123, No. 10, s:424-431.

**Daowd ve ark.**, (2011), "Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation," *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Chicago, pp. 1-7

**Deepa ve ark.** (2013), "Active clamp zero voltage switching multiple output fly-back converter with voltage doubler," *International Review on Modeling and Simulations*, vol. 6, pp. 351-359.

**DelRossi Rich** (2002), Cell Balancing Design Guidelines, AN231, Microchip Technology, <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00231a.pdf>

**Dubarry ve ark.** (2007), "Capacity loss in rechargeable Lityum cells during cycle life testing: The importance of determining state-of-charge," *Journal of Power Sources*, Cilt:174, No. 2, s:1121-1125.

**Emir Tunçyürek** (2019), <https://zes.net/elektrikli-arac-dunyasi.html>.

**Enrique Dans**, (2020), Forbes, We Need To Bring Forward The Ban On Internal Combustion Engines <https://www.forbes.com/sites/enriquedans/2020/09/21/we-need-to-bring-forward-the-ban-on-internal-combustion-engines/?sh=2841da2e31cb>

**Girardi P, Gargiulo A, Brambilla PC** (2015), A Comparative LCA of an Electric Vehicle and an Internal Combustion Engine Vehicle Using The Appropriate Power Mix: The Italian Case Study.

*The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20 (8): 1127-1142.



**Gotwald ve ark.** (1997), "Equalization of EV and HEV batteries with a ramp converter", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 33, no. 1, pp. 307-312.

**Ingram, Antony** (January 2, 2013). "Tesla Model S Owner Drives Coast To Coast Electrically (Again)". Green Car Reports. Retrieved January 9, 2013.

**Jian Cao , Nigel Schofield , Ali Emadi** (2008), Battery balancing methods: A comprehensive review.

**Kaymaz Habib** (2018), Hibrit ve Elektrikli Metrobüs Araçları İçin Sürüş Çevrimi Oluşturulması, Doktora Tezi, Marmara Ün. FBE

**Kuipers ve ark.** (2017), An in-depth View into the Tesla Model S Module, Helmholtz Institute, <https://www.researchgate.net/publication/315800624>

**Li ve ark.** (2020), Digital twin for battery systems: Cloud battery management system with online state-of-charge and state-of-health estimation, Journal of Energy Storage, Volume 30, ISSN 2352-152X,

**Lluc ve ark.,** (2019), Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis, Journal of Environmental Management, Volume 232, Pages 354-363, ISSN 0301-4797,

**Ma ve ark.** (2018), "Equalization of Lithium-Ion Battery Pack Based on Fuzzy Logic Control in Electric Vehicle," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, 6762-6771

**Manzetti S., Mariasiu F.,** (2015), Electric Vehicle Battery Technologies: From Present State to Future Systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 51: 1004-1012.

**Martinez-Laserna ve ark.** (2016), "Evaluation of lithium-ion battery second life performance and degradation," 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Milwaukee, WI, pp. 1-7,

**Moghaddam Ali Farzan ve Alex Van Den Bossche** (2019), "A Cuk Converter Cell Balancing Technique by Using Coupled

Inductors for Lithium-Based Batteries," Energies, vol. 12, pp. 2881.

**Markus Lelie** (2018), Battery Management System Hardware Concepts: An Overview.

**Matúš ve ark.,** (2019), Overview of batteries State of Charge estimation methods, Transportation Research Procedia, Volume 40, Pages 186-192,

**OICA** (2017). Organization Internationale des Constructeurs d'Automobiles <http://www.oica.net/>

**Ouyang ve ark.** (2018), "SOC Estimation-Based Quasi-Sliding Mode Control for Cell Balancing in Lithium-Ion Battery Packs," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 4, pp. 3427-3436.

**Plett G. L.** (2004), Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 3. State and parameter estimation, J. Power Sources, Cilt: 134, No: 2, s:277-292.

**Polat ve Özgül** (2020), Lityum İyon Pil Teknolojisi, Metalurji Dergisi [https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi162/d162\\_4248.pdf](https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi162/d162_4248.pdf)

**Ramoni, Monsuru ve Zhang, Hong-Chao** (2013). End-of-life (EOL) issues and options for electric vehicle batteries. Clean Technologies and Environmental Policy. 15. 10.1007/s10098-013-0588-4.

**Research and Markets** (2018), Global and China Power Battery Management System (BMS) Industry Report, 2018-25, ID: 4590730, [https://www.researchandmarkets.com/research/nhg4vb/global\\_and\\_china?w=12](https://www.researchandmarkets.com/research/nhg4vb/global_and_china?w=12)

**Shang ve ark.** (2017), "An Automatic Equalizer Based on Forward-Fly-back Converter for Series-Connected Battery Strings," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 7, pp. 5380-5391.

**Shang ve ark.** (2015), "A Cell-to-Cell Battery Equalizer with Zero-Current Switching and Zero-Voltage Gap Based on Quasi-Resonant

LC Converter and Boost Converter," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 7, pp. 3731-3747.

**Shubiao ve ark.** (2017), "A Novel Layered Bidirectional Equalizer Based on a Buck-Boost Converter for Series-Connected Battery Strings," Energies, vol. 10.

**Tamma Kumar** (2013), Selection of the MOSFET for Faster Cell Balancing of Li-Ion Batteries, Infineon Application Note AN 2013-02

**TEHAD** (2020). Türkiye 2030 Elektrikli Ulaşım Yol Haritası Çalıştayı <http://tehad.org/2020/04/09/turkiye-2030-elektrikli-ulasim-yol-haritasi-calistay-sonuc-raporu-yayinlandi/>

**Tehad J.** (2017), "ISO 26262 system level functional safety validation for battery management systems in automobiles," Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), Vellore,

**Terzi ve ark.,** (2020), A Review of Commercial Electric Vehicle Charging Methods, Promet – Traffic & Transportation, Vol. 32, 2020, No. 2, 291-307

**TMR** (2019), Battery Management System Market- Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast, 2019 – 2027 <https://www.transparencymarketresearch.com/battery-management-system-market.html>

**Thiruvonasundari ve Deepa** (2020), Active cell balancing for electric vehicle battery management system, International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS) Vol. 11, No. 2, pp. 571~579 ISSN: 2088-8694,

**TÜBİTAK** (2019), <https://challenge.tubitak.gov.tr/assets/batarya-yonetim-sistemleri.pdf>

**Wen Simon** (2009), Application Report SLUA420, Fast Cell Balancing Using External MOSFET. <https://www.ti.com/lit/an/slua420a/slua420a.pdf?ts=1608962445985>

**Yevgen Barsukov** (2015), Battery Cell Balancing: What to Balance and How, Texas

Instruments Inc. <https://www.researchgate.net/publication/265028955>

**Zhang ve ark.** (2017), 'Effects of Vibration on the Electrical Performance of Lithium-Ion Cells Based on Mathematical Statistics', Applied Sciences, vol. 7, no. 8. p. 802.