



Elektrikli Araçlarda Kullanılan Lityum İyon Bataryaların Hava, Sıvı ve Isı Borulu Termal Yönetim Sistemlerinin İncelenmesi

Ferhat AKKUŞ* & Mehmet Zerrakki IŞIK

Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Batman, TÜRKİYE
Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi - Makine Mühendisliği Bölümü, Batman, TÜRKİYE

Doi: 10.55024/buyasambid.1339607

Makale Bilgisi

Özet

Makale geçmişi:

İlk gönderim tarihi: 08.08.2023

Düzeltilme tarihi

Kabul tarihi: 07.11.2023

Yayın tarihi: 31.12.2023

Anahatar Kelimeler:

Elektrikli Araçlar,

Lityum İyon Bataryalar,

Batarya Termal Yönetim Sistemleri

* Sorumlu Yazar

E-mail adres:

ferhatakkus_40@hotmail.com

Orcid bilgileri:

0000-0002-4587-7039

Elektrikli araçlarda kullanılan ve direkt olarak performansı etkileyen bataryalar, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek elektrik motorunun hareket etmesini sağlayan önemli parçalardan biridir. Bataryalar içerisinde yer alan lityum iyon bataryaların diğer şarj edilebilir bataryalara göre yaygın olarak kullanılmasının sebebi; enerji yoğunluklarının, geri dönüştürülebilirliklerinin ve özgül güçlerinin yüksek, ağırlıklarının ve kendi kendine deşarj oranlarının düşük, daha uzun çevrim ömrü ve daha fazla enerji depolayabilme kapasitesine sahip olmasıdır. Bataryalarda bulunan anot ve katot elektrotlarından anot elektrotlarının hareketleri ile güç üretilirken aynı zamanda ortaya ısı enerjisi çıkmaktadır. Lityum iyon bataryalarda entropi değişimiyle tersinir, elektriksel dirençle tersinmez ısı üretimi meydana gelmektedir. Lityum iyon batarya hücrelerinin güvenliği, performansı ve dayanıklılığı sıcaklığa karşı hassas olduğundan optimum çalışma sıcaklığı 20 °C ile 40 °C aralığındadır. Bataryaların aşırı ısı üretimi optimum çalışma sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara çıkmasına ve batarya hücresinin aşırı ısınmasına neden olmaktadır. Isı üretimine bağlı olarak aşırı sıcaklık artışı bataryalarda termal kaçaklara, yanmalara ve hatta patlamaları meydana getirmektedir. Bataryaların aşırı ısınmasını engellemek amacıyla batarya hücresinin sıcaklığının homojen olarak dağılması, çalışma sıcaklığının öngörülen aralıkta tutulması ve istenilen sıcaklığın sağlanması batarya termal yönetimi için en önemli parametrelerdir. Bu çalışmada lityum iyon bataryaların termal yönetiminde kullanılan hava soğutma, sıvı soğutma ve ısı borulu soğutma yöntemlerini incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda kullanılan soğutma yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmaktadır.

2023 Batman Üniversitesi. Her hakkı saklıdır.

Investigation of Air, Liquid and Heat Pipe Thermal Management Systems of Lithium-Ion Batteries Used in Electric Vehicles

Ferhat AKKUŞ* & Mehmet Zerrakki IŞIK

Batman University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, Batman, TURKEY
Batman University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, Batman, TURKEY

Doi: 10.55024/buyasambid.1339607

ARTICLE INFO ABSTRACT

Article history:

Received: 08.08.2023

Received in revised form

Accepted: 07.11.2023

Available online: 31.12.2023

Key words:

Electric Vehicles,
Lithium-Ion Batteries,
Battery Thermal Management
Systems

* Corresponding author

E-mail address:

ferhatakkus_40@hotmail.com

Orcid:

0000-0002-4587-7039

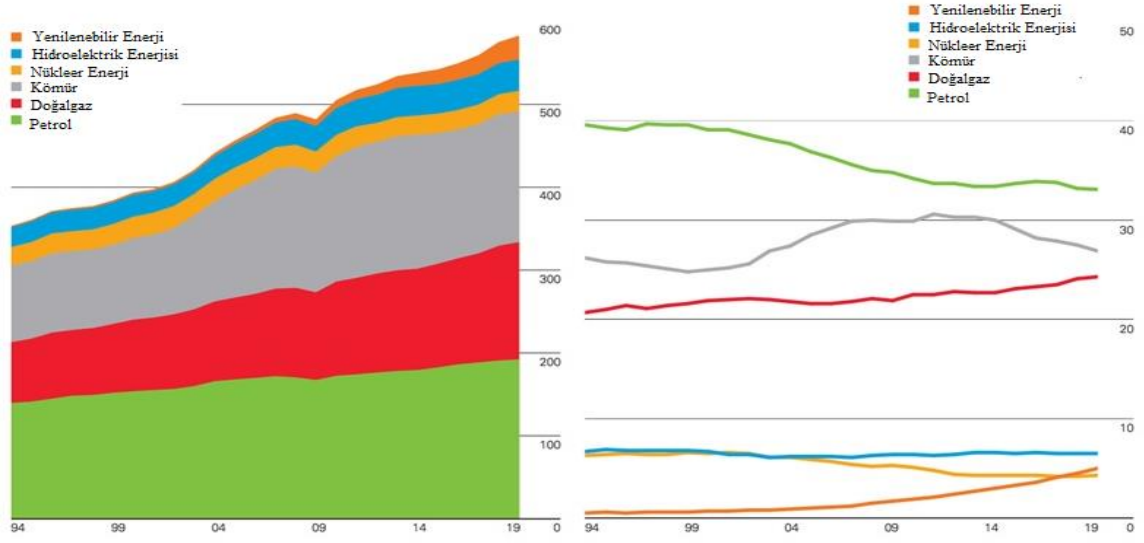
Batteries used in electric vehicles and directly affecting performance are essential parts that enable the electric motor to move by converting chemical energy into electrical energy. Lithium-ion batteries are widely used compared to other rechargeable batteries.; They have high energy density, recyclability and specific power, low weight and self-discharge rates, longer cycle life and more energy storage capacity. While power is generated from the anode and cathode electrodes in the batteries by the movements of the anode electrodes, heat energy is also generated. In lithium-ion batteries, reversible heat production occurs with entropy change, and irreversible heat production occurs with electrical resistance. Since the safety, performance and durability of lithium-ion battery cells are sensitive to temperature, the optimum operating temperature is between 20 °C and 40 °C. Excessive heat production of batteries causes temperatures above the optimum operating temperature and causes the battery cell to overheat. Excessive temperature increases due to heat production cause thermal leaks, burns and even battery explosions. In order to prevent batteries from overheating, distributing the temperature of the battery cell homogeneously, keeping the operating temperature within the prescribed range and ensuring the desired temperature are the most critical parameters for battery thermal management. In this study, air cooling, liquid cooling and heat pipe cooling methods used in the thermal management of lithium-ion batteries were examined. As a result of the examination, the advantages and disadvantages of the cooling methods used are compared.

2023 Batman University. All rights reserved

1. GİRİŞ

Canlılar hayatlarını idame ettirebilmek için enerjiye gereksinim duymaktadırlar. Zamanla nüfusun artmasının yanı sıra bilim, teknoloji ve sanayi alanındaki ilerlemeler ihtiyaç duyulan enerji miktarını daha da artırmaktadır. Enerji ihtiyacının karşılanmasında petrol, kömür, doğalgaz, rüzgar, güneş, dalga ve biokütle gibi enerji kaynakları kullanılmaktadır. Enerji kaynakları kullanılabilirliğine göre yenilenebilir (temiz enerji) ve yenilenemez (fosil kökenli yakıtlar) olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Güneş, rüzgâr, dalga, biokütle ve hidrolik gibi kaynaklardan meydana gelen yenilenebilir enerji kaynakları bir çevrimde kullanıldığında azalıp tükenmeyen ve hiçbir değişime uğramadan aynen kalabilmekte iken petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil kökenli yakıtların oluşturduğu yenilenemez enerji kaynakları bir çevrimde kendini yenileyemeden tükenen enerji kaynaklarıdır. Enerji kaynakları dönüştürülebilirliğine göre primer (birincil) ve sekonder (ikincil) enerji kaynakları olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Petrol, kömür, doğalgaz, biokütle, hidrolik, rüzgâr, dalga ve güneş gibi enerji kaynakları primer enerji kaynaklarını oluşturmakta olup herhangi bir şekilde değişime veya dönüşüme uğramamaktadır. Benzin, motorin LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı) ve elektrik gibi enerji kaynakları sekonder enerji kaynaklarını oluşturmakta olup primer enerji kaynaklarının işlemlerden geçirilerek dönüştürülmesiyle elde edilmektedir. 2022 yılında British Petroleum (BP) tarafından yayınlanan Dünya enerji raporuna göre 2000-2021 yılları arasında tüketilen enerji miktarı ve yüzdece enerji kaynaklarının dağılımı şekil 1’ de görülmektedir. Söz konusu rapora göre 2000 yılında yaklaşık 400 EJ (Exajoule, bir kentrilyon joule) enerji tüketirken 2021 yılında 600 EJ enerji tüketmiştir ve raporda ayrıca tüketilen enerjinin karşılanmasında kullanılan enerji

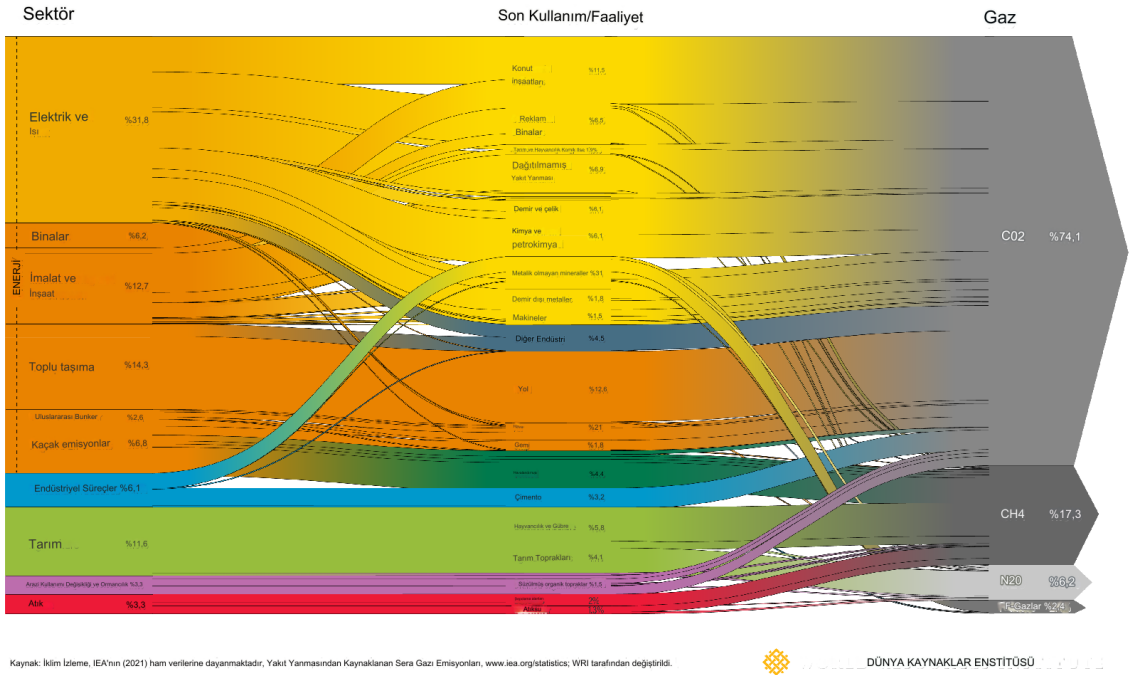
kaynaklarının yüzdelik dağılımları görülmektedir (Angin, t.y.; Karatepe vd., 2012; Kartal, 2022; Michaelides, 2012; *Statistical Review of World Energy 2022*, 2022; Şenel, t.y.)



Şekil 1. Dünya enerji tüketimi ve enerji kaynaklarının küresel payları (*Statistical Review of World Energy 2022*, 2022)..

Fosil kökenli yakıtlar olan petrol, kömür ve doğalgazın rezervlerinin kısıtlı olması ve çevreye metan, azot oksit ve florlu gazlar gibi zararlı gazların artan salınımıyla küresel ısınma oluşmaktadır. Atmosfer tabakasında ısıyı emen sera gazlarının yerküreyi aşırı miktarda ısıtması sonucu oluşan küresel ısınma iklim sisteminin bozulmasına, buzulların erimesine, mevsimsel farklılıkların oluşmasına ve canlı türlerinin azalmasına sebep olmaktadır. Hem fosil kökenli yakıtların dikkatli, düşük kayıplı ve yüksek verimli olarak kullanılmasına hem de yenilenebilir enerji kaynaklarının her alanda tercih edilmesine yönelik çalışmalar yaygın olarak yapılmaktadır. Dünya genelinde nüfusun artmasıyla birlikte teknolojinin ve sanayinin gelişmesi, insanların ve ürettikleri mal veya hizmetin bir yerden başka bir yere aktarılmasından oluşan ulaşım sektörünün kullanımı da her geçen gün artmaktadır. Dünya genelinde ulaşım sektöründe ağırlıklı olarak karayolu taşımacılığı kullanılmakta olup söz konusu taşımacılıkta petrol türevi yakıtlar (benzin, motorin ve LPG) ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Dünya genelinde şekil 2' de görülmekte olan sera gazının salınımı bakımından % 14,3 gibi bir paya sahip olup bu payın % 88' lik kısmını karayolu taşımacılığı oluşturmaktadır (*Gas emission*, t.y.; Jaguemont vd., 2016; W. Li vd., 2019; Suri & Onori, 2016; R. Zhu vd., 2019).

2019 Yılı Dünya Sera Gazı Emisyonları (Sektör | Nihai Kullanım | Gaz)
Toplam: 49,8 GtCO₂e

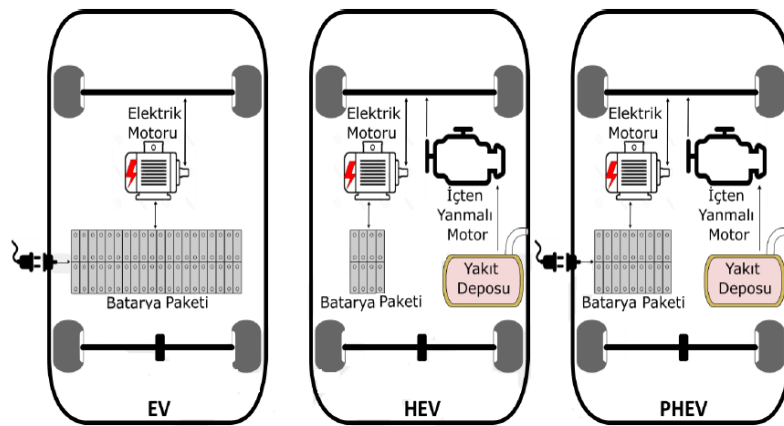


Kaynak: İklim İzleme, IEA'nın (2021) ham verilerine dayanmaktadır, Yakıt Yanmasından Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonları, www.iea.org/statistics; WRI tarafından değiştirildi.

DÜNYA KAYNAKLAR ENSTİTÜSÜ

Şekil 2. Dünya Geneline Sektörlere Göre Sera Gazı Salınımı (*Gas emission, t.y.*).

Son zamanlarda ulaşım alanında fosil kökenli yakıtların kullanıldığı geleneksel araçlarla birlikte çevre dostu ve yüksek verimliliğe sahip elektrikli araçların kullanımı da yaygınlaşmıştır. Elektrikli araçlar şekil 3' te görülen yapıları itibariyle üç sınıfa ayrılmakta olup bunlar tam elektrikli (EV), hibrit elektrikli (HEV) ve fişli hibrit elektrikli (PHEV) araçlardır. Tam elektrikli araçlarda geleneksel araç motoru bulunmayan sadece şarj edilebilir batarya paketi içermektedir. Hibrit elektrikli araçlar geleneksel araç motoru ile birlikte elektrik motoru içermekte ve frenleme esnasında kazanılan ısı enerjisinin geri kazanılmasıyla bataryaları şarj etmektedir. Fişli hibrit elektrikli araçlarda ise hem geleneksel hem de elektrik motoru bulunmakta olup frenleme ile ısı enerjisini geri kazanmakta ve harici bir kaynaktan şarj edilmektedir ("Front Matter", 2021; Kalkan, t.y.).



Şekil 3. Güncel elektrikli araç uygulamaları (Kalkan, t.y.).

2. LİTYUM İYON BATARYALAR

Elektrikli araçlarda kullanılan ve aracın performansına doğrudan etki eden önemli parçalardan birisi olan bataryalar, anot ve katot elektrotlarında meydana gelen elektrokimyasal dönüşümle kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek elektrik motorunun hareket etmesini sağlamaktadırlar. Bataryalarda bulunan anot ve katot elektrotlarının yüzey alanı ile içeriğindeki metal bataryaların ürettiği güç ile orantılıdır. Batarya içeriğinde bulunan aktif malzemenin kütlesi ve hacmi bataryanın enerjisine doğrudan etki etmektedir. Bataryalar tarafından üretilen gücü ve enerjiyi etkileyen parametrelerin artışı bataryaların maliyetini, ağırlığını ve hacmini artırmaktadır. Bataryaların seçimi ve kullanılmasında enerji ve güç parametrelerine dikkat edilmelidir. Gelişen batarya teknolojisi sayesinde elektrikli araçlar geleneksel araçlarla yarışacak seviyeye gelmiştir. Lityum iyon bataryalar diğer şarj edilebilir bataryalara göre depolanabilirliği fazla olduğundan elektrikli araç teknolojisinde oldukça yaygın olarak kullanılmakta olup bunun sebebi içeriğinde bulunan nikel kadmiyum, kurşun asit ve nikel metal hidrit gibi metallerdir. Lityum iyon bataryaların içeriğinde bulunan metaller sayesinde enerji yoğunluğunun, geri dönüştürülebilirliğinin ve özgül gücünün yüksek, ağırlığının ve kendi kendine deşarj oranlarının düşük olmasıyla birlikte uzun çevrim ömrüne sahiptir (Han vd., 2014; X. Li vd., 2019; Lyu vd., 2019; W. H. Zhu vd., 2014).

Elektrikli araçların yüksek termal çalışma performansı ve hafiflik parametrelerine yönelik kullanılan lityum iyon bataryaların kese, prizmatik ve silindirik tipleri mevcuttur. Üç farklı yapıları şekil 4' te gösterilmiştir. Kese tip lityum iyon bataryaların elektrik direncinin düşük, güvenli ve hafif olmasına rağmen yüksek şarj/deşarj oranlarında bataryanın yüzeyi ile merkezi arasındaki sıcaklık farkının değişkenlik göstermesinden dolayı sıcaklık kontrolünün sağlanması oldukça zordur. Prizmatik tip lityum iyon bataryalar içerisinde bulunan elektrot malzemesinin miktarına bağlı olarak daha yüksek enerji gerektiren ve daha fazla kapasite isteyen durumlarda kullanılmaktadır. Kese ve silindirik batarya tipleriyle karşılaştırıldığında prizmatik tip bataryaların soğutulacak yüzeyi daha büyüktür. Silindirik tip lityum iyon bataryalar ise yüksek güç yoğunluğuna ve kompakt boyutlara sahiptirler (Bai vd., 2019; Baran vd., 2019; Huang vd., 2017; W. Wu vd., 2018; Xie vd., 2020).



Şekil 4. Lityum iyon batarya tipleri (Kalkan, t.y.).

Ulaşım sektöründe elektrikli araçların kullanılmasına yönelik talebin ve ilginin son zamanlarda artarak devam etmesiyle birlikte lityum iyon bataryaların kullanılması da her geçen gün önem kazanmaktadır. Lityum iyon bataryaları sıcaklığa karşı oldukça hassastırlar ve bu sebeple batarya hücresinin performansı, dayanıklılığı ve güvenliği sıcaklık değişimlerinden etkilenmektedir. Lityum iyon bataryaların çalışmasında kullanılan optimum sıcaklık aralığı 20 °C ile 40 °C olup bu aralığın altındaki veya üstündeki sıcaklıklarda bataryaların performansı ve kararlılığı olumsuz yönde etkilenmektedir. Bataryaların sıcaklığının optimum sıcaklık aralığının çok üstünde olması durumunda ($\gg 40$ °C) termal kaçaklar, yanmalar ve hatta patlamalar meydana gelebilmektedir. Lityum iyon bataryalarda tersinir ve tersinmez olmak üzere iki tür ısı üretimi vardır. Tersinir ısı, entropi değişimiyle üretilirken tersinmez ısı elektriksel veya aşırı potansiyel dirençle üretilmektedir. Bir bataryanın ısı üretim kaynağının negatif elektrotta (anot) bulunduğu ve batarya yüzeyinin ısı transfer katsayısının küçük olması sebebiyle bataryanın ısı üretim hızı artmaktadır. Bataryaların ve paketlerinin üretmiş oldukları fazla ısının sistemden atılamamasıyla oluşan termal kaçakları önlemek amacıyla bataryaların optimum sıcaklık aralığında çalıştırılması gerekmekte olup ayrıca batarya yüzeyinde sıcaklığın homojen dağıtılması gerekmektedir (Bernardi vd., 1985; He vd., 2022; Ling vd., 2014; Malik vd., 2018; Panchal vd., 2017; Wang vd., 2012; C. Wu vd., 2023; Xu vd., 2017; Yan vd., 2016).

Bu çalışmada elektrikli araç teknolojisinde kullanılan ve aracın performansına doğrudan etki eden lityum iyon bataryaların optimum çalışma aralığında (20 °C ile 40 °C) tutulmasına ve batarya yüzeyinde sıcaklığın homojen tutulmasına yönelik yapılan çalışmalar incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda bataryaların sıcaklık homojenliğinin sağlanması ve soğutulmasına yönelik yapılan çalışmalar karşılaştırmalı olarak verilmiş olup uygun yöntem belirlenmiştir.

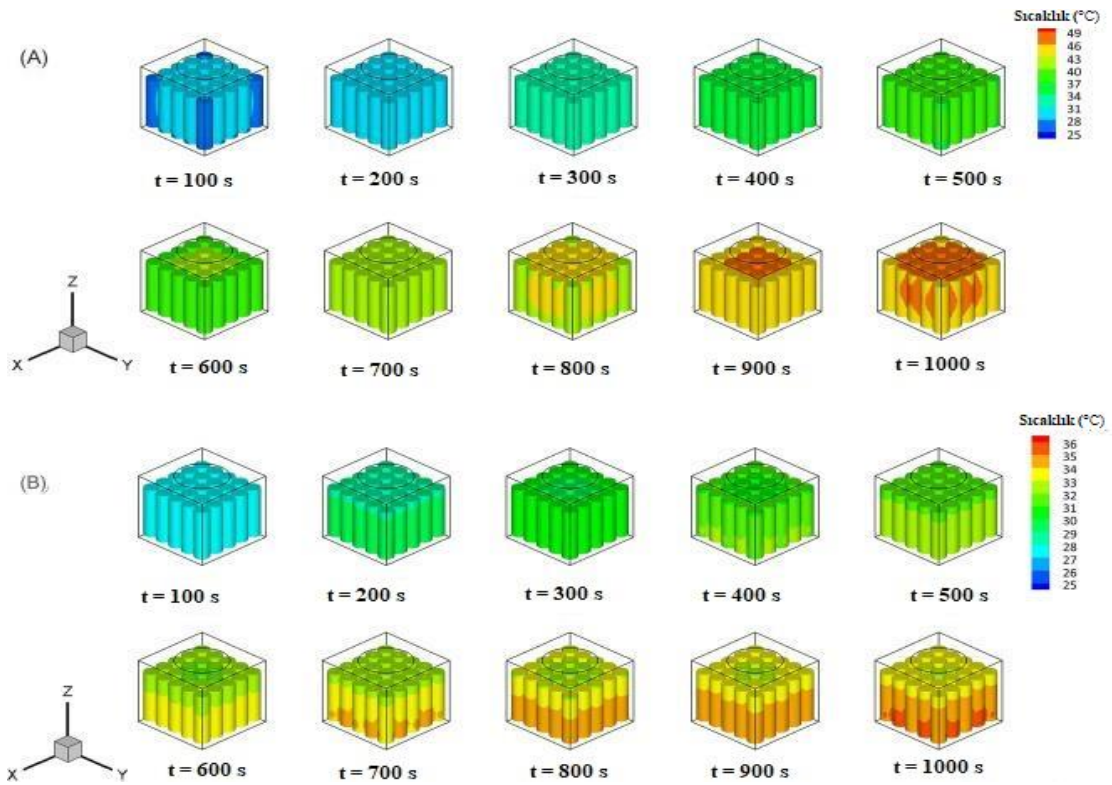
Elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon bataryalarda karşılaşılan önemli problemlerden biri sıcaklıktır. Bu çalışmada sıcaklığın optimum aralıkta tutulmasına ve homojenliğin sağlanması için yapılan termal yönetim sistemleri incelenmiştir. Bu yönetim sistemlerini hava soğutma, sıvı soğutma, ısı borusu soğutma ve faz değiştiren malzeme kullanılarak yapılan soğutma çalışmaları oluşturmaktadır.

3. HAVA SOĞUTMALI BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ

Elektrikli araçlarda hem bataryaları soğutmak hem de ısıyı homojen dağıtmak amacıyla yaygın olarak kullanılan ve geleneksel yöntemlerden biri hava soğutmalı termal yönetim sistemleridir. Bu sistemler tasarımının basit, maliyetinin az, bakımının kolay, hafif, uzun ömürlü, hücre değişiminin rahatlıkla yapılabilmesi ve düşük güç harcaması olması gibi avantajları sayesinde tercih edilmektedir. Havayla soğutma, aktif soğutmanın yapıldığı zorlanmış taşınım ve pasif soğutmanın yapıldığı doğal taşınım yöntemleriyle gerçekleştirilmektedir. Doğal taşınım temelli pasif soğutma ucuz, basit ve hafif olmasına rağmen ısı transfer katsayısının düşük ve enerji yoğunluğunun az olmasından dolayı fazla kullanılmamaktadır. Zorlanmış taşınım temelli aktif soğutmada batarya paketine fan, kompresör gibi cihazlarla daha fazla hava gönderilerek doğal taşınımdan daha yüksek ısı transfer katsayılarına

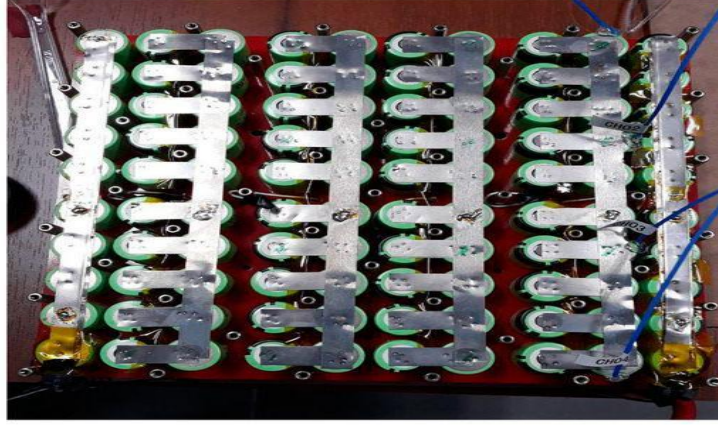
ulaşmaktadır (Akinlabi & Solyali, 2020; Na vd., 2018; Rao & Wang, 2011; Thakur vd., 2020; Yang vd., 2016).

Araştırmacılar hava soğutma yöntemi ile ilgili çok sayıda simülasyon ve deneysel çalışma yapmışlardır. Wang ve arkadaşları (T. Wang, Tseng, ve Zhao 2015), yaptıkları çalışmada (şekil 5) 25 adet 18650 silindirik tip lityum iyon bataryayı 5x5 şeklinde dizerek kübik modülün termal aktivitesini araştırmışlardır. CFD yöntemi kullanarak zorlanmış hava taşınımının farklı deşarj oranlarında etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda zorlanmış soğutma için en uygun sıcaklığın 20 °C ile 35°C aralığında olduğu, ortam sıcaklığının 35°C' nin üzerine çıkması durumunda batarya modülünün sıcaklığını 40 °C sınırı altına düşürmek için 1 m/s'nin üzerinde hava akış hızının sağlanması için enerji tükettiği ve soğutma etkisini karşılamadığı ve ortam sıcaklığı 20 °C'nin altında olması durumunda zorlanmış hava soğutmasının gerekli olmadığını gözlemlemişlerdir.



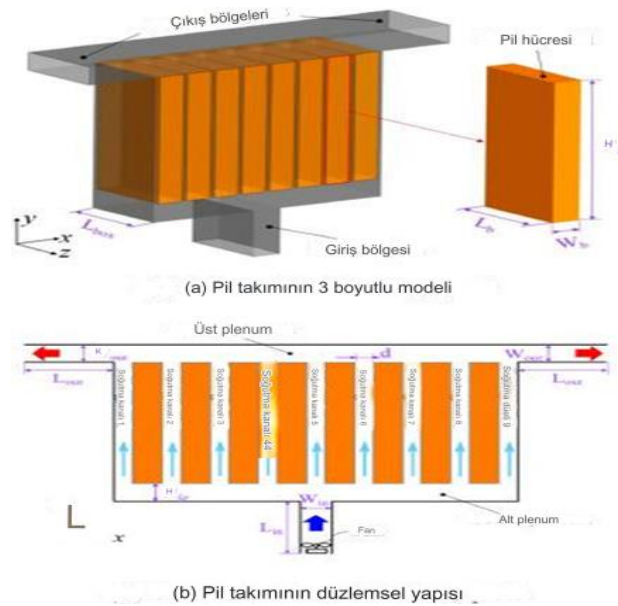
Şekil 5. 25 °C ortam sıcaklığında 3C deşarj işlemi (a) Fan çalışmıyorken sıcaklık dağılımı. (b) Fan 1 m/s hızında çalışırken sıcaklık dağılımı (T. Wang, Tseng, ve Zhao 2015)

Hakem ve Solyali (Hakeem & Solyali, 2020), yaptıkları çalışmada (şekil 6) 100 adet 18650 tipi silindirik lityum iyon bataryayı 10 seri 10 paralel birleştirerek hava menfezlerinin konumunun, sayısının ve hava akış hızının batarya hücrelerinin soğutulmasına ve homojenliğine etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, 0,5 C akım hızında havanın akış hızı 1,4 m/s'den 2,4 m/s'ye çıkartılması durumunda maksimum sıcaklığın % 15,09 kadar azaldığı, hızın 3,4 m/s' ye çıkarılması durumunda maksimum sıcaklıkta önemli bir gelişme olmadığını gözlemlemişlerdir. 0,75 C akım hızında hava akış hızının 1,4 m/s'den 2,4 m/s'ye çıkartılması durumunda maksimum sıcaklıkta % 13,20 azalma; hızın 3,4 m/s' ye yükseltilmesi durumunda ise maksimum sıcaklıkta % 22,81 oranda azalma olduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 6. Oluşturulan batarya paketi (Hakeem ve Solyali 2020).

Zhang ve arkadaşları (F. Zhang vd. 2021), yaptıkları çalışmada (şekil 7) prizmatik tip lityum iyon bataryayı soğutmak amacıyla T tipinde bir giriş iki çıkışlı hava soğutma kanalı tasarımı yaparak Z ve U tipi tasarımlarla karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Yapılan çalışma sonucunda batarya diziliminde T tipi sistemin diğer sistemlere göre termal performansının daha iyi olduğu, giriş hızının soğutma performansını artırdığı ancak aşırı yüksek hızın bir fazla güç tükettiği ve soğutmaya etkisinin olmadığını gözlemlemiştir.



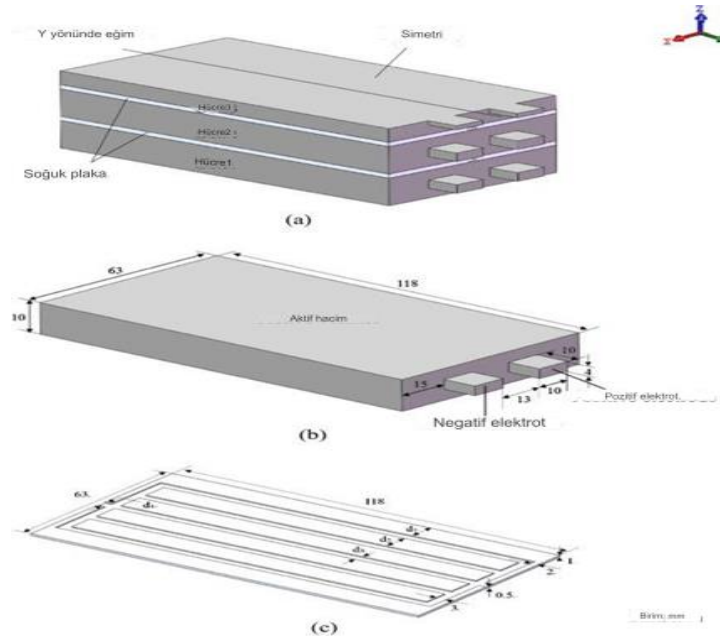
Şekil 7. T tipi batarya soğutma sistemi (F. Zhang vd. 2021)

4. SIVI SOĞUTMALI BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ

Hava ile yapılan batarya termal yönetim sistemi, ortam sıcaklığına bağlı olarak soğutmayı gerçekleştirebilmektedir. Ancak ani hız değişimlerinde ve yüksek hızlarda batarya sıcaklığının artması durumunda tek başına yeterli değildir. Batarya termal yönetim sistemleri içerisinde ısı transfer katsayısının yüksek olması, hızlı şarj/deşarj durumlarında soğutma etkinliğinin uzun süre devam etmesi nedeniyle sıvı soğutma kullanılmaktadır. Sıvı soğutma yöntemiyle bataryanın maksimum sıcaklığı ve hücredeki sıcaklık farkı kontrol edilerek çevrim ömrü uzatılabilmektedir. Batarya hücresinin sıvıyla temas etmesine göre direkt temaslı ve dolaylı temaslı olarak ikiye ayrılmaktadır. Sıvı soğutma yönteminde batarya hücrelerinin dizilimi, soğutma ve homojen sıcaklık dağılımı için

oldukça önemlidir. Su, glikol, mineral yağ, hidrojel ve sıvı-nano metallere gibi çeşitli sıvılar soğutucu akışkan olarak kullanılmakta ancak suyun donma ihtimalinden dolayı su-glikol karışımı yaygındır (X.-H. Yang, Tan, ve Liu 2016; B. Ye, Rubel, ve Li 2019; An vd. 2019; Al-Zareer, Dincer, ve Rosen 2019).

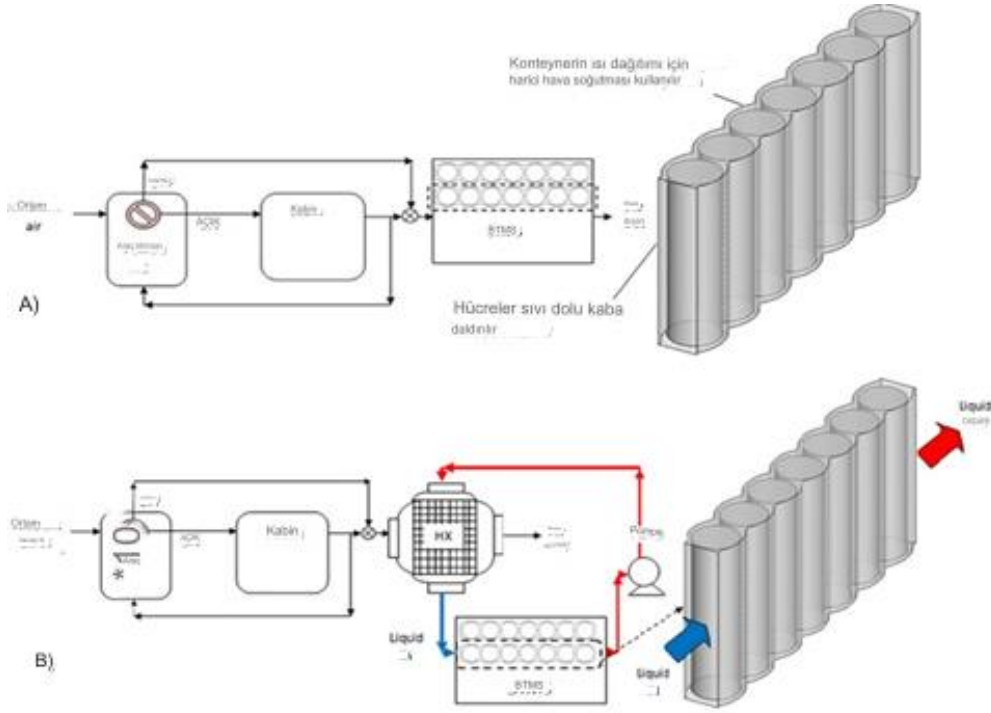
Sıvı soğutma yöntemi üzerine araştırmacılar ve firmalar çok sayıda simülasyon ve deneysel çalışma yapmışlardır. Qian ve arkadaşları (Qian vd., 2016), yaptıkları çalışmada (şekil 8) batarya paketinin sıcaklığını kontrol edebilmek amacıyla suyun soğutucu akışkan olarak kullanıldığı mini kanallı alüminyumdan imal edilmiş plakalı bir soğutma sistemi tasarımı yapmışlardır. Çalışmada kanal sayısının, giren sıvının kütleli debisinin, akış yönünün ve kanalın genişliğinin soğutma üzerine etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, tasarlanan sistemin batarya paketinin sıcaklığını kontrol etmede verimli olduğu, kanal sayısının artmasının soğutma verimliliğini artırdığı ancak beşten fazla soğutucu plakanın faydasının olmadığı, soğutucu akışkanın kütleli debisinin artırılması maksimum sıcaklığı ve sıcaklık farkını azalttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca batarya paketinin altına bir plaka daha eklemenin batarya paketinin homojenliğini iyileştirebileceği sonucuna varmışlardır.



Şekil 8. Soğutma sisteminin (a) tasarımı (b) tek batarya hücresi. (c) soğutucu levhanın yarısı (Qian, Li, ve Rao 2016)

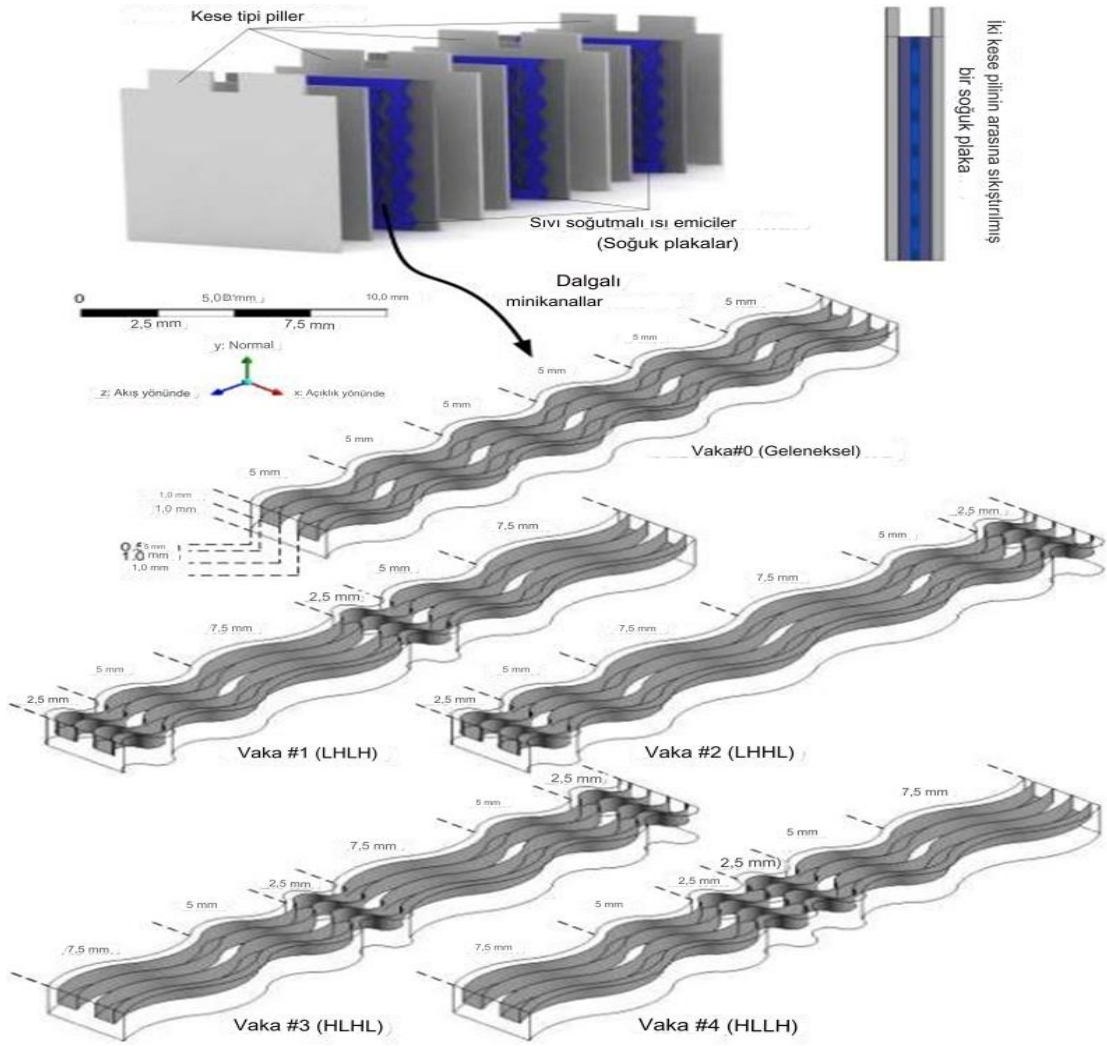
Jilte ve arkadaşları (Jilte, Kumar, ve Ahmadi 2019), yaptıkları çalışmada (şekil 9) 7 adet 18650 tip silindirik lityum iyon bataryayı suyun içerisine 40 nanometre çapında alüminyum oksit nanopartikülleri ekleyerek sıvı dolu kaba daldırmalı ve sıvı sirkülasyonlu olmak üzere iki farklı soğutma sistemi tasarımı yapmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda 2C deşarj oranında ve soğuk ortam sıcaklığında sıvı doldurmalı batarya termal yönetim sisteminin daha düşük enerji sarfiyatı ve kullanım basitliği sebebiyle yeterli olduğu, yüksek deşarj oranlarında sıvı sirkülasyonlu sistemin güvenli sınırlar aralığında kalabildiği, sıvı sirkülasyonlu sistemin sıvı daldırmalı sisteme göre sıcaklık homojenliğini daha iyi sağladığı, her iki soğutma sisteminde de nanoakışkan kullanımının batarya sıcaklığını azalttığı

sonucuna varmışlardır. Ayrıca sıcak iklim bölgelerinde soğutma sisteminin araç klima sistemine entegre edilerek çalıştırılabileceği kanısına varmışlardır.



Şekil 9. (a) Sıvı daldırmalı soğutma sistemi (b) sıvı sirkülasyonlu soğutma sistemi (Jilte, Kumar, ve Ahmadi 2019)

Khoshvaght-Aliabadi ve arkadaşları (Khoshvaght-Aliabadi vd., 2023), yaptıkları çalışmada (şekil 10), dalgalı mini kanallara sahip suyun soğutucu akışkan olarak kullanıldığı soğutma sisteminde eş ve zıt yönlü akımın kese tip lityum iyon bataryanın termal yönetimine etkilerini incelemiştir. Yapılan çalışma sonucunda, dalgalı mini kanalın akış yolunun dalga boylarının düzensizliği ve sıvı hızının artmasıyla termal verimliliğinin arttığı, karşı akımlı sistemin eş akımlı sistemden daha verimli batarya homojenliği sağladığı, en iyi sıcaklık homojenliğinin 4. durumdaki tasarımın sağladığını gözlemlemiştir.

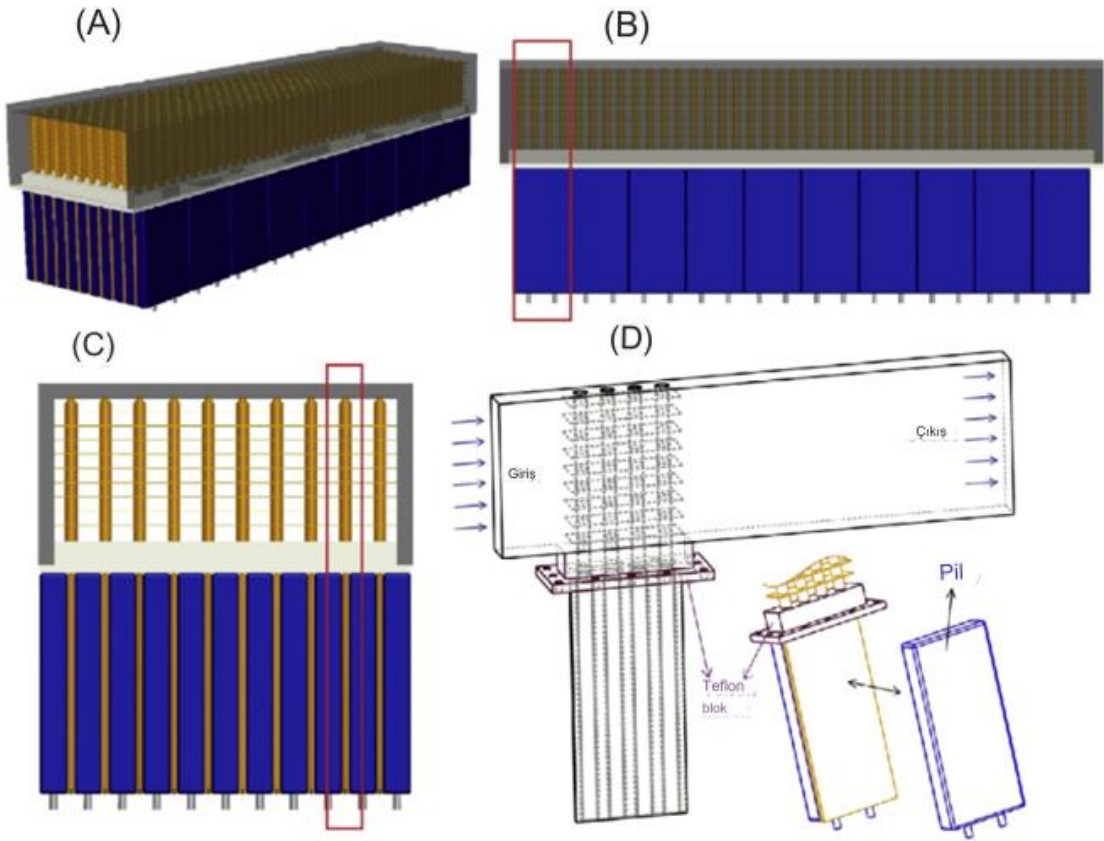


Şekil 9. Kese tip bataryanın soğutulmasında kullanılan dalgalı kanal yapıları (Khoshvaght-Aliabadi vd. 2023)

5. ISI BORULU BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ

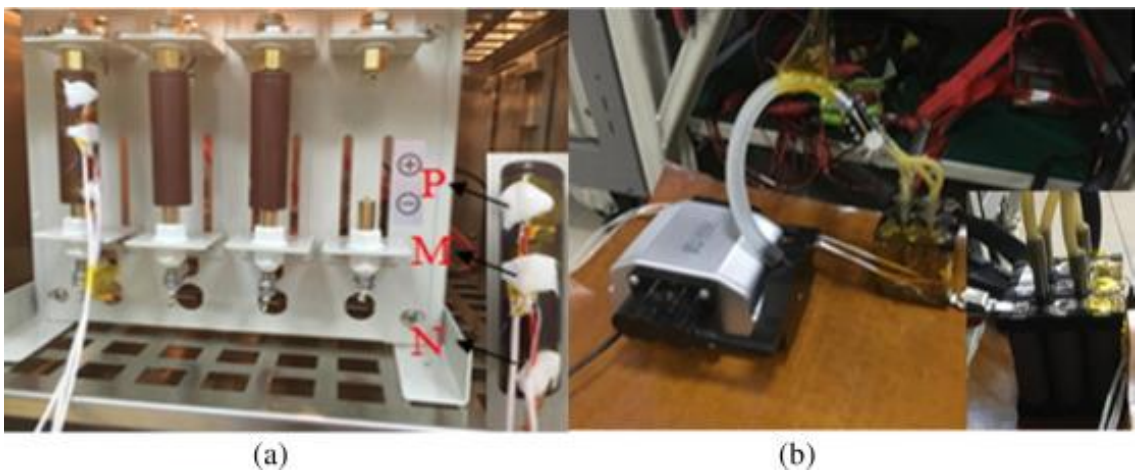
Isı boruları düşük ısıl dirençleri, yüksek ısıl iletkenliği ve basit yapıları nedeniyle askeriye, havacılık, mikro elektronik, yapı malzemeleri, metalürji ve enerji gibi birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların optimum çalışma sıcaklığı aralığında tutulması ve homojen sıcaklığın sağlanması için tasarım serbestliği ve değişken yapıları bulunan ısı boruları sıklıkla tercih edilmektedir (Rao vd., 2014; Zhang vd., 2020; Z. Zhou vd., 2021).

Hava soğutmalı sistemin ani hızlanmalarda ve yüksek hızlarda yetersiz olması, sıvı soğutmalı sistemin depo gereksinimi, yüksek maliyeti ve sızıntı riski olması ısı borularının yalnız veya diğer yöntemlerle kombine olarak kullanmaya yöneltmiştir. Ye ve arkadaşları (Ye vd., 2015)], yaptıkları çalışmada (şekil 11) prizmatik tip lityum iyon bataryayı hızlı şarj ve agresif sürüş koşullarında (3C, 5C ve 8C deşarj oranlarında) ortaya çıkan ısının yönetilmesinde ısı borulu termal yönetim sistemi tasarlamışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, ısı borusu sayısını artırmanın sürekli homojenlik sağlamadığı, sisteme kanatçıkların ve ısı yayıcıların eklenmesi soğutma kapasitesini ve homojenliğini artırdığı, havanın düşük özgül ısı kapasitesi nedeniyle homojenliği sağlamada yetersiz kaldığı fakat kanatçıkların yardımıyla verimliliğinin artırılabilirdiğini gözlemlemişlerdir.



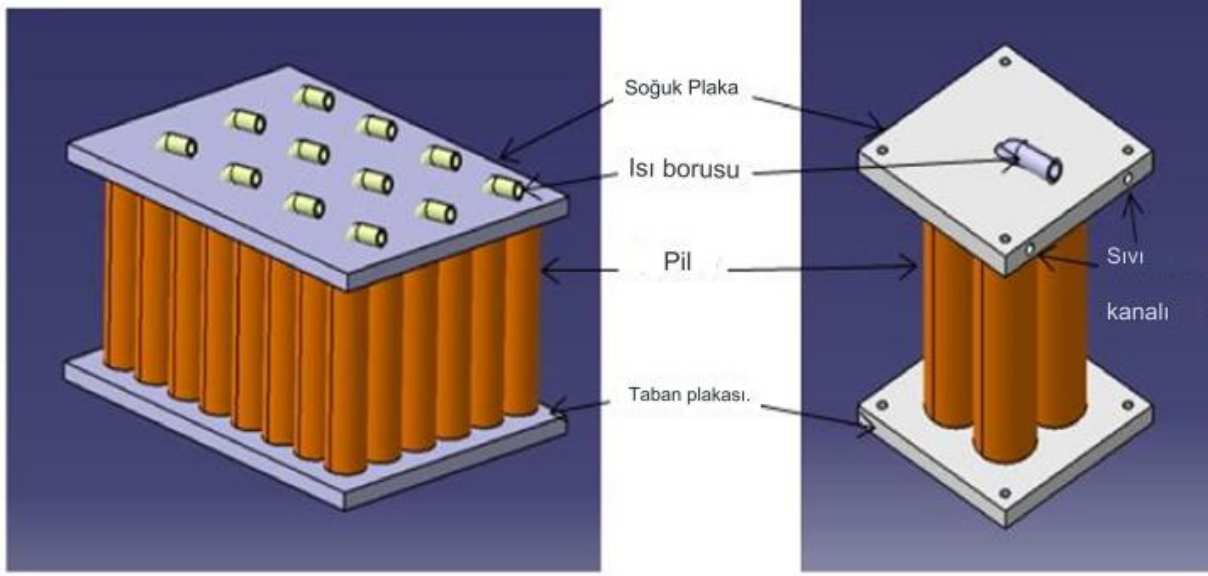
Şekil 21. Isı borulu batarya termal yönetim sisteminin (a) paket tasarımı; (b) yan görünüşü; (c) ön görünüşü; (d) deney düzeneği (Y. Ye vd. 2015).

Zhou ve arkadaşları (H. Zhou vd., 2019), yaptıkları çalışmada (şekil 12) 18650 silindirik tip lityum iyon bataryayı 3x3 dizilimle yerleştirerek hava soğutmalı sisteme ısı boruları entegre edilerek delik çapının, delik sayısının, giriş basıncının ve hava tahliye hızının farklı deşarj oranlarında soğutmaya etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda tasarımı yapılan sistemin 3C ve 4C deşarj oranlarında soğutmayı sağladığı, delik çapının ve delik sayısının artması maksimum sıcaklığı düşürdüğü ve sıcaklık homojenliğini iyileştirdiği, 3C deşarj oranında giriş basıncının artırılması durumunda sıcaklığın aniden düşebileceği fakat fazla güç harcanması sebebiyle uygun basıncın seçilmesinin gerektiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca yüksek deşarj oranında (5C ve üzeri) daha fazla ısı yayma oranının ve bu da daha fazla gücün gerektiği kanısına varmışlardır.



Şekil 12. Tek batarya ve batarya paketinin deney düzeneği (H. Zhou vd. 2019)

Chavan ve arkadaşları (Chavan, Prajapati, ve Hujare 2023), yaptıkları çalışmada (şekil 13) 8x6 dizilimle 48 adet 18650 silindirik tip lityum iyon bataryayı ısı borulu ve suyun soğutucu akışkan olarak kullanıldığı sıvı soğuk plakalı hibrit bir sistem tasarlayarak farklı deşarj oranlarında soğutmayı amaçlamışlardır. Yapılan çalışma sonucunda ısı borularının soğuk plakaya ısı transferini sağladığı, 1C deşarj oranında tasarlanan sistem ile batarya sıcaklığının 38 °C, sistem olmadan 44 °C olduğu ve hibrit sistemin soğutma uygulamalarında kullanışlı olduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 13. Batarya termal yönetim sistemi (Chavan, Prajapati, ve Hujare 2023).

6. SONUÇLAR

Son yıllarda elektrikli araçlara olan yönelimin artmasıyla elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon bataryalarla ilgili yapılan araştırmalarda artarak devam etmektedir. Yapılan çalışmada bataryaların soğutulmasında hava, sıvı ve ısı borusu kullanılarak yapılan soğutma çalışmaları ele alınmıştır. İncelenen soğutma çalışmalarının artıları ve eksileri objektif olarak değerlendirilmiş olup Tablo 1’ de verilmiştir.

Tablo 1. Soğutma yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları

Soğutma Yöntemi	Avantajları	Dezavantajları
Hava Soğutma	<ul style="list-style-type: none">• Sistem tasarımı basit• Uygulaması kolay• Kullanımı güvenli• Her çeşit bataryalara uygun• Sıvı sızıntısı gibi problemleri yok	<ul style="list-style-type: none">• Isı kapasitesi düşük• Isı iletkenliği küçük• Sınırlı termal yönetim sistemine sahip olması• Bataryalar arasında ortalama sıcaklık etkisi zayıf• Büyük sistemlerde soğutma için daha fazla hava hacmi ihtiyacı• Doğal taşınımın sadece düşük enerji yoğunluğuna sahip bataryalarda etkili olması• Zorlanmış taşınım için fan ve kompresör gibi sistemlerin maliyetli olması, aşırı güç tüketimi ve araç konforunu bozması
Sıvı Soğutma	<ul style="list-style-type: none">• Özgül ısı kapasitesi yüksek• Kütle akış hızı yüksek• Isı aktarımı daha hızlı• Sıcaklık homojenliğini sağlayabilmesi	<ul style="list-style-type: none">• Karmaşık yerleşim düzeni• Sistemin ağırlığı• Yüksek maliyet• Aşırı güç tüketimi• Sızdırmazlık için yalıtım gereksinimi• Mikro kanalların ayarlanması

Isı Borulu Soğutma	<ul style="list-style-type: none">• Yüksek ısı performans• Esnek uygulama şekli• Farklı yöntemlerle uygulanabilirliği• Hibrit soğutmaya uygunluğu• Verim artırmak amacıyla kanatçık, nanoakışkan, faz değiştiren malzeme ve sıvı metaller gibi malzemelerin kullanılabilirliği	<ul style="list-style-type: none">• Karmaşık yapı• Küçük kapasite• Sızıntı riski• Yüksek maliyet
---------------------------	--	---

Bataryaların soğutulmasında kullanılan hava, sıvı ve ısı borulu soğutma yöntemlerinin geliştirme önerileri Tablo 2’ de ki gibi özetlenebilir

Tablo 2. Soğutma yöntemlerinin geliştirme önerileri

Soğutma Yöntemi	Hava Soğutma	Sıvı Soğutma	Isı Borulu Soğutma
Geliştirme Önerileri	<ul style="list-style-type: none">• Hava hacminin artırılması• Akış hızının artırılması• Kanal boyutunun artırılması• Batarya hücrelerinin konumunun optimizasyonu• Soğutucu akışkan performansının iyileştirilmesi• Aşırı ısınmanın çözülmesi• Yangından korunma durumlarının iyileştirilmesi• Yüksek enerji yoğunluğu ve güç gereksinimleri yerine düşük enerji yoğunluğu ve güç gereksinimleri olan batarya paketleri için daha uygun	<ul style="list-style-type: none">• Tüketilen enerjinin minimuma indirilmesi• Sıvı akış hızının kontrol edilerek verimliliğin artırılması• Nanoakışkan, sıvı metaller ve kaynayan sıvı gibi malzemeler kullanarak maliyet azaltma• Sızıntı ve kaçakları en aza indirilmesi	<ul style="list-style-type: none">• Sistem karmaşıklığının azaltılması• Sızıntı ve kaçakların en aza indirilmesi

Bu çalışmayla birlikte batarya termal yönetim sistemlerinin avantaj ve dezavantajları objektif olarak değerlendirilmiş ve soğutma yöntemlerinin geliştirilmesine yönelik araştırmacılara referans olabilecek çözüm önerileri sunulmuştur. Son olarak aşağıdaki sonuçlara dikkat edilmelidir.

- Elektrikli araç bataryaları minyatürleştirilerek alan tasarrufu sağlanabileceği gelecekteki çalışmalar için oldukça önemlidir.
- Yüksek sıcaklıklarda ve hızlı şarj/deşarj sırasında bataryaların performansının azalması daha etkili ve gelişmiş termal yönetim sistemlerini gerektirmektedir.
- Yüksek sıcaklık
- Aracın klima sistemlerine entegre ve kaynakların doğru kullanımı batarya termal yönetimi için önemlidir.
- Hava soğutma yöntemi güç tüketimi olmayan düşük kapasite ve kısa çalışma süresi isteyen uygulamalarda kullanılmalıdır.
- Sıvı ısı borulu soğutma yöntemleri batarya paketinde hücresel olarak sıcaklık homojenliğinin sağlanmasında kullanılmalıdır.
- Batarya paketlerinde her kapasite ve çalışma aralığında soğutmanın ve homojenliğin sağlanmasında hava-sıvı veya hava-ısı borusu gibi hibrit yöntemler kullanılmaya özen gösterilmelidir.
- Gelecekte batarya paketinden yayılan atık ısının geri kazanılması ve uygun biçimde kullanılmasına yönelik çalışmalara odaklanılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Akinlabi, A. A. H., & Solyali, D. (2020). Configuration, design, and optimization of air-cooled battery thermal management system for electric vehicles: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 125, 109815. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109815>
- Angin, D. (t.y.). *ASPİR (Charthamus tinctorius L.) TOHUMU PRES KÜSPESİNİN ALTERNATİF ENERJİ KAYNAĞI OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ*.
- Bai, F., Chen, M., Song, W., Li, Y., Feng, Z., & Li, Y. (2019). Thermal performance of pouch Lithium-ion battery module cooled by phase change materials. *Energy Procedia*, 158, 3682-3689. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.891>
- Baran, V., Mühlbauer, M. J., Schulz, M., Pfanzelt, J., & Senyshyn, A. (2019). In operando studies of rotating prismatic Li-ion batteries using monochromatic wide-angle neutron diffraction. *Journal of Energy Storage*, 24, 100772. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100772>
- Bernardi, D., Pawlikowski, E., & Newman, J. (1985). A General Energy Balance for Battery Systems. *Journal of The Electrochemical Society*, 132(1), 5-12. <https://doi.org/10.1149/1.2113792>
- Front Matter. (2021). İçinde *Uncertainties in Modern Power Systems* (s. iii). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820491-7.01001-X>
- Gas emission*. (t.y.). Geliş tarihi 10 Haziran 2023, gönderen <https://www.wri.org/data/world-greenhouse-gas-emissions-2019>
- Hakeem, A. A. A., & Solyali, D. (2020). Empirical Thermal Performance Investigation of a Compact Lithium Ion Battery Module under Forced Convection Cooling. *Applied Sciences*, 10(11), 3732. <https://doi.org/10.3390/app10113732>
- Han, X., Ouyang, M., Lu, L., & Li, J. (2014). A comparative study of commercial lithium ion battery cycle life in electric vehicle: Capacity loss estimation. *Journal of Power Sources*, 268, 658-669. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.06.111>
- He, T., Zhang, T., Wang, Z., & Cai, Q. (2022). A comprehensive numerical study on electrochemical-thermal models of a cylindrical lithium-ion battery during discharge process. *Applied Energy*, 313, 118797. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118797>
- Huang, Y., Lu, Y., Huang, R., Chen, J., Chen, F., Liu, Z., Yu, X., & Roskilly, A. P. (2017). Study on the thermal interaction and heat dissipation of cylindrical Lithium-Ion Battery cells. *Energy Procedia*, 142, 4029-4036. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.321>

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.034>
- Kalkan, O. (t.y.). *ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ FARKLI METODLARLA SOĞUTULMASININ DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZİ*.
- Karatepe, Y., Neşe, S. V., Keçebaş, A., & Yumurtacı, M. (2012). The levels of awareness about the renewable energy sources of university students in Turkey. *Renewable Energy*, 44, 174-179. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.099>
- Kartal, M. T. (2022). The role of consumption of energy, fossil sources, nuclear energy, and renewable energy on environmental degradation in top-five carbon producing countries. *Renewable Energy*, 184, 871-880. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.022>
- Khoshvaght-Aliabadi, M., Abbaszadeh, A., Salimi, A., & Salehi, N. (2023). Structural modifications of sinusoidal wavy minichannels cold plates applied in liquid cooling of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 57, 106208. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106208>
- Li, W., Chen, S., Peng, X., Xiao, M., Gao, L., Garg, A., & Bao, N. (2019). A Comprehensive Approach for the Clustering of Similar-Performance Cells for the Design of a Lithium-Ion Battery Module for Electric Vehicles. *Engineering*, 5(4), 795-802. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.005>
- Li, X., Wang, Z., & Zhang, L. (2019). Co-estimation of capacity and state-of-charge for lithium-ion batteries in electric vehicles. *Energy*, 174, 33-44. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.147>
- Ling, Z., Zhang, Z., Shi, G., Fang, X., Wang, L., Gao, X., Fang, Y., Xu, T., Wang, S., & Liu, X. (2014). Review on thermal management systems using phase change materials for electronic components, Li-ion batteries and photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 427-438. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.017>
- Lyu, Y., Siddique, A. R. M., Majid, S. H., Biglarbegian, M., Gadsden, S. A., & Mahmud, S. (2019). Electric vehicle battery thermal management system with thermoelectric cooling. *Energy Reports*, 5, 822-827. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.06.016>
- Malik, M., Dincer, I., Rosen, M. A., Mathew, M., & Fowler, M. (2018). Thermal and electrical performance evaluations of series connected Li-ion batteries in a pack with liquid cooling.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.029>

Michaelides, E. E. (2012). *Alternative Energy Sources*. Springer Berlin Heidelberg.

<https://doi.org/10.1007/978-3-642-20951-2>

Na, X., Kang, H., Wang, T., & Wang, Y. (2018). Reverse layered air flow for Li-ion battery thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 143, 257-262.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.080>

Panchal, S., Khasow, R., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R., & Fowler, M. (2017). Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water cooled large sized prismatic lithium-ion battery. *Applied Thermal Engineering*, 122, 80-90.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.010>

Qian, Z., Li, Y., & Rao, Z. (2016). Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling. *Energy Conversion and Management*, 126, 622-631.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.063>

Rao, Z., Huo, Y., & Liu, X. (2014). Experimental study of an OHP-cooled thermal management system for electric vehicle power battery. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 57, 20-26.

<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.03.017>

Rao, Z., & Wang, S. (2011). A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4554-4571. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.096>

Statistical Review of World Energy 2022. (2022).

Suri, G., & Onori, S. (2016). A control-oriented cycle-life model for hybrid electric vehicle lithium-ion batteries. *Energy*, 96, 644-653. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.075>

Şenel, M. C. (t.y.). *DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE RÜZGÂR ENERJİSİ DURUMU-GENEL DEĞERLENDİRME*.

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. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101771>

- Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., & Chen, C. (2012). Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. *Journal of Power Sources*, 208, 210-224. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.038>
- Wu, C., Wu, L., Qiu, C., Yang, J., Yuan, X., Cai, Y., & Shi, H. (2023). Experimental and numerical studies on lithium-ion battery heat generation behaviors. *Energy Reports*, 9, 5064-5074. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.04.021>
- Wu, W., Wu, W., & Wang, S. (2018). Thermal management optimization of a prismatic battery with shape-stabilized phase change material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 121, 967-977. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.062>
- Xie, Y., He, X., Hu, X., Li, W., Zhang, Y., Liu, B., & Sun, Y. (2020). An improved resistance-based thermal model for a pouch lithium-ion battery considering heat generation of posts. *Applied Thermal Engineering*, 164, 114455. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114455>
- Xu, J., Lan, C., Qiao, Y., & Ma, Y. (2017). Prevent thermal runaway of lithium-ion batteries with minichannel cooling. *Applied Thermal Engineering*, 110, 883-890. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.151>
- Yan, J., Wang, Q., Li, K., & Sun, J. (2016). Numerical study on the thermal performance of a composite board in battery thermal management system. *Applied Thermal Engineering*, 106, 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.187>
- Yang, T., Yang, N., Zhang, X., & Li, G. (2016). Investigation of the thermal performance of axial-flow air cooling for the lithium-ion battery pack. *International Journal of Thermal Sciences*, 108, 132-144. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.05.009>
- Ye, Y., Saw, L. H., Shi, Y., & Tay, A. A. O. (2015). Numerical analyses on optimizing a heat pipe thermal management system for lithium-ion batteries during fast charging. *Applied Thermal Engineering*, 86, 281-291. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.066>
- Zhang, W., Qiu, J., Yin, X., & Wang, D. (2020). A novel heat pipe assisted separation type battery thermal management system based on phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 165, 114571. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114571>
- Zhou, H., Zhou, F., Xu, L., Kong, J., & QingxinYang. (2019). Thermal performance of cylindrical Lithium-ion battery thermal management system based on air distribution pipe. *International*

- Zhou, Z., Lv, Y., Qu, J., Sun, Q., & Grachev, D. (2021). Performance evaluation of hybrid oscillating heat pipe with carbon nanotube nanofluids for electric vehicle battery cooling. *Applied Thermal Engineering*, 196, 117300. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117300>
- Zhu, R., Duan, B., Zhang, C., & Gong, S. (2019). Accurate lithium-ion battery modeling with inverse repeat binary sequence for electric vehicle applications. *Applied Energy*, 251, 113339. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113339>
- Zhu, W. H., Zhu, Y., & Tatarchuk, B. J. (2014). Self-discharge characteristics and performance degradation of Ni-MH batteries for storage applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(34), 19789-19798. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.09.113>