Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1579284

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 - 8991

Araştırma Makalesi (Research Article)
Cilt 8 - Sayı 3: 855-862 / Mayıs 2025
(Volume 8- Issue 3: 855-862 / May 2025)

BİR ELEKTRİKLİ ARAÇ LİTYUM İYON BATARYASININ DOĞAL TAŞINIM ŞARTLARINDA SOĞUTULMASININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Muhittin BİLGİLİ[1], Yunus Emre GÖNÜLAÇAR[1]*, Emre Aşkın ELİBOL[2]

[1]*Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 06570, Ankara, Türkiye*
[2]*Giresun University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 28200, Giresun, Türkiye*

Özet: Bu çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan 10 Ah kapasitedeki bir Lityum Demir Fosfat (LFP) bataryanın, doğal taşınım şartları ve farklı deşarj hızları altındaki termal ve elektriksel performansı deneysel olarak incelenmiştir. Farklı deşarj hızlarında bataryanın yüzey sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi hem termal kamera kullanılarak görüntülenmiş hem de veri kaydedici yardımıyla kaydedilerek sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca bataryanın deşarjı sırasında batarya yüzeyinden çevre havaya olan ısı transfer hızları hesaplanmış, voltaj değişimleri ölçülmüş ve elde edilen bulgular grafiksel olarak sunulmuştur. Sonuç olarak deşarj hızının artmasıyla ortalama batarya yüzey sıcaklığı ve bataryadan çevreye olan ısı transfer hızının arttığı görülürken voltaj değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Deneysel bulgular 1C, 2C ve 3C deşarj hızlarındaki maksimum batarya yüzey sıcaklıklarının sırasıyla 37,3°C, 49,1°C ve 55,1°C olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla bataryayı doğal taşınımla soğutmanın yüksek deşarj hızları için (2C ve 3C) yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır. Deşarj hızının 1C'den 3C'ye çıkarılması maksimum ısı transfer hızını yaklaşık % 255 oranında arttırmıştır. Termal görüntülerden ve ısıl çift verilerinden elde edilen sonuçların maksimum %2,2'lik bir fark ile birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Elektrikli araç, Lityum iyon batarya, Doğal taşınım, Batarya termal yönetimi, Isı transferi

Experimental Investigation of Cooling of an Electric Vehicle Lithium Ion Battery Under Natural Convection Conditions

Abstract: In this study, the thermal and electrical performance of a 10 Ah Lithium Iron Phosphate (LFP) battery used in electric vehicles was experimentally investigated under natural convection conditions and different discharge rates. The changes in the surface temperatures of the battery with time at different discharge rates were both imaged using a thermal camera and recorded with the help of a data logger, and the results were compared with each other. In addition, the heat transfer rates from the battery surface to the ambient air during battery discharge were calculated, voltage changes were measured and the obtained findings were presented graphically. As a result, it was found that the average battery surface temperature and the heat transfer rate from the battery to the environment increased with the increase in the discharge rate, while the voltage value decreased. Experimental findings showed that the maximum battery surface temperatures at 1C, 2C and 3C discharge rates were 37.3°C, 49.1°C, and 55.1°C, respectively. Consequently, it was determined that natural convection cooling for the battery is insufficient for high discharge rates (2C and 3C). Increasing the discharge rate from 1C to 3C increased the maximum heat transfer rate by approximately 255%. Results from thermocouple data and thermal images were found to be consistent with each other, with a maximum difference of 2.2%.

Keywords: Electric vehicle, Lithium-ion battery, Natural convection, Battery thermal management, Heat transfer

***Sorumlu yazar (Corresponding author):** Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 06570, Ankara, Türkiye
E mail: yunusemre.gonulacar@gazi.edu.tr (Y.E. GÖNÜLAÇAR)
Muhittin BİLGİLİ https://orcid.org/ 0000-0003-0692-8646
Yunus Emre GÖNÜLAÇAR https://orcid.org/ 0000-0002-1565-8564
Emre Aşkın ELİBOL https://orcid.org/0000-0001-8573-6065

Gönderi: 4 Kasım 2024 **Kabul:** 13 Nisan 2025 **Yayınlanma:** 15 Mayıs 2025
Received: November 4, 2024 **Accepted:** April 13, 2025 **Published:** May 15, 2025

Cite as: Bilgili M, Gönülaçar YE, Elibol EA. 2025. Experimental ınvestigation of cooling of an electric vehicle lithium ıon battery under natural convection conditions. BSJ Eng Sci, 8(3): 855-862.

1. Giriş

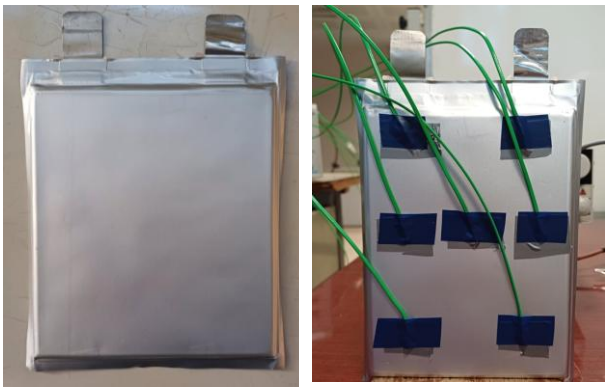
Dünya çapında sınırlı fosil enerji rezervleri ile küresel ısınmanın ve çevre kirliliğinin olumsuz etkileri, araştırmacıları mevcut fosil yakıt kaynaklarını çevre dostu ve temiz diğer alternatiflerle değiştirmeye yöneltmiştir (Can vd., 2022; Iqbal vd., 2023; Li vd., 2020). Çevre için zararlı olan sera gazı salınımlarının büyük bir kısmı, aşırı miktarda fosil yakıt kullanan geleneksel araç teknolojisi tarafından yayılmaktadır (Sikarwar vd., 2023). Fosil yakıttan kaçınılarak kirlilik miktarının küresel olarak neredeyse yüzde altmış oranında azaltılabileceği belirtilmektedir (Sikarwar vd., 2023). Günümüzde elektrikli araçlar, neredeyse ihmal edilebilir düzeyde kirletici emisyona sahip olduklarından kirlilik seviyelerinin azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmakta ve iklim değişiklikleri ve sera gazı emisyonlarına ilişkin küresel hedeflerin karşılanmasında önemli bir rol oynamaktadırlar (Iqbal vd., 2023; Sikarwar vd., 2023; Youssef vd., 2020). Elektrikli araçlarda genellikle enerji kaynağı olarak hafıza etkisinin olmaması, büyük enerji yoğunluğu, düşük kendi kendine deşarj oranı ve uzun ömür gibi avantajları nedeniyle lityum iyon

bataryalar tercih edilmektedir (Iqbal vd., 2023; Monika vd., 2021; Youssef vd., 2020). Bununla birlikte, lityum iyon bataryalar yüksek hızlı şarj veya deşarj sırasında çok fazla ısı üretmektedir. Şarj ve deşarj döngüleri sırasında üretilen bu ısı zamanında uzaklaştırılamazsa, termal kaçağı tetikleyebilmekte ve hatta hücre patlamasına yol açabilmektedir (Iqbal vd., 2023; Panchal vd., 2016; Wu ve Rao, 2017). Öte yandan, günümüzün lityum-iyon bataryaları bile tamamen güvenli ekipman olarak kullanılamıyor iken, geleceğin daha yüksek performanslı bataryalarının, daha yüksek enerji ve güç yoğunlukları nedeniyle daha fazla güvenlik sorunu yaratacağı öngörülmektedir (Gümüşsu vd., 2017). Dolayısıyla elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon bataryaların güvenliği hayati bir konu haline gelmiştir. Lityum iyon bataryaların güvenli çalışma sıcaklığı 20°C ile 60°C arasında olmakla birlikte en iyi batarya performansı için optimum sıcaklık ise 25°C ile 40°C arasındadır (Abdelkareem vd., 2022; Iqbal vd., 2023). Bir lityum iyon bataryasının performansı optimum sıcaklık aralığının dışına çıktığında düşmeye başlamaktadır. Sıcaklık aralığının alt sınırının altında çalışmak, elektrokimyasal reaksiyonların yavaşlamasına neden olmakta ve böylece iç direnci arttırmaktadır (Bazinski vd., 2016). Sıcaklık sınırının üstünde çalışmak ise bataryanın kapasitesi ve performansını azaltmakta aynı zamanda termal kaçak olasılığının artmasına neden olmaktadır (Liao vd., 2022; Sikarwar vd., 2023). Ayrıca, batarya yüzeyindeki homojen olmayan sıcaklık dağılımı, bataryanın yaşlanma ritminde bozulmaya neden olmakta ve genel kapasitesini azaltmaktadır (Dilbaz vd., 2022; Sarchami vd., 2022). Sonuç olarak lityum iyon bataryaların ömrünü, etkinliğini ve kapasitesini arttırmak için uygun bir Batarya Termal Yönetim Sistemi (BTYS) gereklidir. Bu nedenle son yıllarda çok önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. BTYS, hücrelerde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar tarafından üretilen ısıyı kontrol etmek ve uzaklaştırmakla görevli bileşen olup bataryanın güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır (Iqbal vd., 2023; Li vd., 2022; Panchal vd., 2016). Bataryaları optimum sıcaklıkta tutmak için farklı türde BTYS yöntemleri mevcuttur (Jayabalan vd., 2022). Hava, sıvı ve faz değişim malzemesi (FDM) ile soğutma teknikleri BTYS'de yaygın olarak kullanılmaktadır. Hava tabanlı BTYS küçük alan gereksinimi, basit yapı ve ekonomik olması nedeniyle avantajlı hale gelmektedir. Hava tabanlı BTYS, doğal taşınım sürecine dayanan pasif hava soğutma sistemi ve zorlanmış taşınım kullanan aktif hava soğutma sistemi olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Doğal taşınımla soğutma, çalışma sırasında hiçbir dış enerji tüketmeyen, bir soğutma yöntemi olarak ön plana çıkmaktadır (Iqbal vd., 2023; Sikarwar vd., 2023). Literatürde lityum iyon bataryasının doğal taşınım şartlarında soğutulması ile ilgili bazı çalışmalar bulunmaktadır. Kalkan vd. (2021), LiFePO4 (LFP) torba tipi bir bataryanın 23°C ortam sıcaklığında ve doğal taşınım koşullarında 1C-5C deşarj oranı aralığındaki termal performansı deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Farklı deşarj hızlarında bataryanın yüzey sıcaklıklarının zamana bağlı dağılımı termal kamera kullanılarak görüntülenmiş, elde edilen deneysel sonuçlar sayısal sonuçlarla karşılaştırılmış ve her iki yöntemle batarya yüzeyinden geçen ısı transfer hızı belirlenmiştir. Sonuç olarak yüksek deşarj hızlarında batarya için doğal taşınım soğutmasının yeterli olmadığını ve deşarj oranıyla batarya yüzey sıcaklığının doğru orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Niculuţă ve Veje (2012) tarafından yapılan çalışmada, doğal taşınım şartları altında tek bir LFP tipi batarya hücresinin şarj ve deşarjı sırasındaki davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Hücrenin düşük bir akım değeri kullanılarak şarj/deşarj edildiğinde sıcaklık profilinin neredeyse homojen olduğu ancak daha yüksek akımlar için sıcaklık profilinin düzgün olmadığı ve hücrenin orta bölgesindeki yüzey sıcaklığının yüksek bir artışa sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca deneysel ve sayısal sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu vurgulanmıştır. Wang vd. (2019), doğal taşınımla soğutulan NCM (Ni, Co, Mn) tipi Li-iyon bataryanın termal davranışını deneysel bir yaklaşımla araştırmışlardır. Kızılötesi görüntüleme (IR) teknolojisi ile farklı deşarj oranları ve deşarj derinliği (DoD) için sıcaklık dağılımı elde etmişlerdir. Sonuçta katot tarafında ısı üretim oranının anot tarafına göre daha yüksek olduğunu, yüksek sıcaklık bölgesinin düşük hızlı deşarjda bataryanın merkezi iken yüksek hızlı deşarjda bataryanın üst kısmı olduğunu ve deşarj hızının artmasıyla sıcaklık farkının da arttığını göstermişlerdir. Gümüşsu vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, Li-iyon bataryaların doğal taşınım altındaki termal davranışını araştırmak için 3 boyutlu bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modeli geliştirilmiş ve hesaplamalı çözümdeki etkilerini ölçmek için makro ölçekli termofiziksel özellikler, bataryanın entropik terimi, kullanım geçmişi ve deşarj oranı analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları üzerinde özgül ısının önemli bir etkisinin olduğu ancak termal iletkenliğin nispeten küçük bir öneme sahip olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, tüm deşarj oranlarında batarya yüzey sıcaklığı açısından deneysel ve simülasyon sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu belirtilmiştir. Panchal vd. (2016) farklı deşarj oranlarının Li-iyon bataryanın termal ve elektriksel performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Termal kamera ile yapılan deneyler sırasında kızılötesi görüntüleri çekilmiş ve MATLAB Simulink kullanarak batarya için bir termal model oluşturulup doğrulanmıştır. Düşük deşarj hızlarında, batarya yüzey sıcaklığının ortam sıcaklığına yakın kaldığını, ancak yüksek deşarj hızlarında yüzey sıcaklığının hızla arttığını tespit etmişlerdir. Jayabalan vd. (2022), kanatçık gibi davranan alüminyum plakalarla Li-iyon bataryaların soğutulmasını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Bunun için yedi hücreli bir batarya paketi modeli oluşturup doğal ve zorlanmış taşınım durumlarını araştırmışlardır. Simülasyondaki doğal taşınımın, deneysel olana göre daha etkili olduğu ve alüminyum kanatçıklardan oluşan bir model kullanılarak batarya sistemindeki sıcaklık düşüşünün mümkün olduğu sonucuna varmışlardır. Youssef vd. (2021), prizmatik

NCM lityum-iyon batarya hücresinin doğal taşınım altında termal karakteristiğini ve davranışını deneysel olarak incelemişler ve üç boyutlu bir termal model oluşturarak sonuçları deneylerle doğrulamışlardır. Batarya yüzeyinin sıcaklık artışını ve dağılımını, değişken yükler ve başlangıç sıcaklık koşulları altında karşılaştırmışlardır. Sonuçta deneylerle elde edilen sıcaklık ile simülasyon arasındaki maksimum farkın 2°C'den az ve yüzeydeki sıcaklık artışının başlangıç sıcaklığıyla ters orantılı olduğunu vurgulamışlardır. Yine Youssef vd. (2020) tarafından yapılan diğer çalışmada NCM prizmatik lityum-iyon batarya hücresi için doğal taşınım şartlarında farklı ortam sıcaklığı koşullarında sayısal bir termal model geliştirilmiştir. Ayrıca termal kamera ve ısıl çiftler kullanılarak hücrenin yüzey sıcaklığı simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Üç boyutlu termal modelleme sonuçları ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu ve maksimum sıcaklığın bataryanın merkez noktasında görüldüğü belirtilmiştir. Yang vd. (2021), NCM tipi prizmatik lityum-iyon bataryanın iç ve dış yüzeylerine ısıl çiftler yerleştirerek farklı soğutma şartlarındaki termal davranışını incelemişlerdir. Sonuç olarak maksimum sıcaklığın ve sıcaklık farkının deşarj oranıyla arttığını ve maksimum sıcaklık farkının meydana geldiği konumun bataryanın merkezi olduğunu belirtmişlerdir. Metallo (2024) yaptığı çalışmada, batarya soğutmada kullanılan hava bazlı sistemlerin ısı transfer katsayısını artırmak için yeni soğutucu gaz karışımları kullanmıştır. İnce, dikey silindirik bir konfigürasyonda doğal ve zorlanmış taşınımı değerlendirmek için kapsamlı bir FEM (Sonlu Elemanlar Metodu) modeli ve deneysel doğrulama gerçekleştirmiştir. Sonuçta geliştirdiği soğutucu karışımla ısı transfer katsayısının doğal taşınım sırasında yaklaşık %65 ve zorlanmış taşınım sırasında ise yaklaşık %80 arttığını vurgulamıştır. Iqbal vd. (2023), silindirik bir Li-iyon bataryasının yüksek şarj/deşarj hızlarında farklı soğutma teknikleri kullanılarak soğutulmasını deneysel olarak incelemişler ve buldukları sonuçları birbiriyle karşılaştırmışlardır. Doğal taşınım, zorlanmış taşınım ve faz değişim malzemesi (FDM) ile soğutma yöntemleri kullanarak gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda doğal taşınıma kıyasla zorlanmış taşınım ve FDM soğutması kullanıldığında hücre sıcaklığının daha fazla düştüğünü ve en etkili soğutmayı FDM ile elde ettiklerini belirtmişlerdir. Ma vd. (2024), daldırma sıvısı olarak çok bileşenli bir yağ kullanan tipik bir BTY (Batarya Termal Yönetimi) ünitesi tasarlamışlar ve doğal taşınımın etkisini karakterize etmek için üç boyutlu bir model geliştirmişlerdir. BTY modülünde doğal taşınımlı ve doğal taşınımsız durumların bir karşılaştırmasını yapmışlardır. Doğal taşınım etkisinin ısı dağılımını artırdığını söylemişlerdir. Behi vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada silindirik bir batarya modülünde soğutma ve sıcaklık dağılımını iyileştirmek için bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Hava soğutma ve ısı borusu içeren bir hibrit termal yönetim sistemi (TMS) sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçta doğal taşınımla soğutmaya kıyasla zorlanmış taşınım, ısı borusu ve bakır levhalı ısı borusu (HPCS) kullanan soğutma stratejisi için maksimum modül sıcaklığının azaltıldığı ve batarya modülünün sıcaklık dağılımının iyileştirildiği vurgulanmıştır. Yapılan bu çalışmada, 10 Ah kapasiteye sahip LFP torba tipi bataryanın doğal taşınım şartlarında soğutulması deneysel olarak araştırılmıştır. Yapılan deneylerde farklı deşarj hızlarının bataryanın yüzey sıcaklığına etkisi hem termal görüntüleme tekniği hem de ısıl çiftler yardımıyla ölçülmüştür. Deşarj işlemi süresince meydana gelen voltaj değişimleri kaydedilmiş ve incelenmiştir. Batarya yüzeyinden doğal taşınım ile çevreye olan ısı transfer hızları da hesaplanmış ve sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem

Doğal taşınım ile soğutma deneyleri 24°C ortam sıcaklığında 1C, 2C ve 3C deşarj hızları için gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Şekil 1a'da gösterilen ve Tablo 1'de özellikleri verilen 10 Ah kapasitedeki Lityum Demir Fosfat torba tip batarya kullanılmıştır. Batarya her deneyden önce MARXLOW marka doğru akım (DC) güç kaynağı kullanılarak standart sabit akım - sabit voltaj (CC/CV) metodu ile 1C hızında tam şarj edilmiştir. Bataryanın boşaltma işlemi ise MERVESAN marka elektronik yük cihazı ile yapılmıştır. Tam dolu haldeki bataryanın (3,6 V) deşarj işlemi, 1C-3C aralığındaki hızlarda yapılmış ve deşarj kesme voltajı olan 2 V değerinde sonlandırılmıştır. Deşarj işlemi süresince batarya yüzey sıcaklıklarının termal görüntüleme işlemi TESTO marka termal kızılötesi kamera ile gerçekleştirilmiş ve bataryanın maksimum, minimum ve ortalama yüzey sıcaklıkları kamera yazılımı aracılığıyla belirlenmiştir. Termal kamera bir tripodun üzerine sabitlenmiş ve batarya yüzeyini görecek şekilde dik olarak yerleştirilmiştir. Ayrıca Şekil 1b'de görüldüğü gibi bataryanın yüzeyindeki farklı noktalara yedi adet K tipi ısıl çift konumlandırılmıştır. Bu ısıl çiftlerden alınan sıcaklık değerleri AGILENT marka veri kaydedici ve bilgisayar yardımıyla anlık olarak kaydedilmiştir. Bu veriler termal kameradan elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca ısıl çiftler kullanılarak elde edilen veriler ile her bir deşarj hızı için bataryadan çekilen ısı transfer hızları da hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan tüm ısıl çiftler buzlu suda ve kaynayan suda titizlikle kalibre edilmiştir. Deşarj işlemi süresince bataryanın voltaj değerleri, elektronik yük cihazı ile kaydedilmiştir. Çalışma kapsamında kurulan deney düzeneği Şekil 2'de görülmektedir.

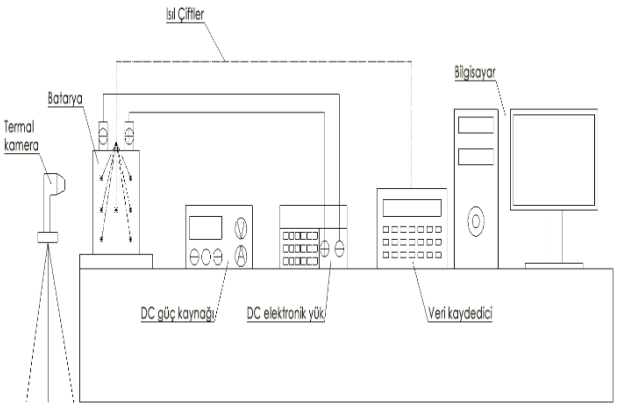


(a) (b)

Şekil 1. a) Torba tip batarya b) Batarya yüzeyine yerleştirilen ısıl çiftler.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan bataryanın özellikleri

Özellik	Değer
Marka/Model	GreenBatt / GLP10Ah
Anot/Katot malzemesi	Grafit / $LiFePO_4$
Nominal kapasite	10 Ah
Nominal voltaj	3,2 V
Şarj voltajı	3,6 V
Deşarj kesme voltajı	2 V
Çalışma sıcaklığı	-20°C - 55°C
Ağırlık	260 g
Ölçüler	6,2 x 126 x 183 mm



Şekil 2. Çalışmada kullanılan deney düzeneği.

Her bir deşarj hızı için, 24°C ortam sıcaklığında doğal taşınım ile soğutulan bataryadan çevre havaya transfer edilen ısı transfer hızını ($\dot{Q}$) hesaplamak için eşitlik 1'de verilen Newton'un soğuma yasası denklemi kullanılmıştır.

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (1)$$

Burada A_s bataryanın yüzey alanını (0,126 m x 0,183 m), T_s batarya yüzey sıcaklığını, T_∞ ortam sıcaklığını (24 °C) ve h ortalama ısı taşınım katsayısını belirtmekte olup, ortalama ısı taşınım katsayısı eşitlik 2'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$h = \frac{Nuk}{L_c} \quad (2)$$

Burada Nu Nusselt sayısını, k ısıl iletkenlik değerini ve L_c geometrinin karakteristik uzunluğunu (0,183 m) göstermektedir. Nusselt sayısını hesaplamak için Churcill ve Chu (1975) tarafından önerilen ve dikey plakaların yüzeyinde gerçekleşen doğal taşınım ile ısı transferi uygulamalarında sıkça tercih edilen Eşitlik 3'teki denklem kullanılmıştır.

$$Nu = \left\{ 0{,}825 + \frac{0{,}387 Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left[1+(0{,}492/Pr)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (3)$$

Bu denklemde Ra_L Rayleigh sayısını ve Pr Prandtl sayısını temsil etmektedir. Eşitlik 4'te ise Rayleigh sayısı (Ra_L), Grashof (Gr) ve Prandtl (Pr) sayılarının çarpımı olarak tanımlanmıştır (Çengel ve Ghajar, 2015).

$$Ra = GrPr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (4)$$

Burada g yerçekimi ivmesini (9,81 m/s^2), β hacimsel genleşme katsayısını ($1/T_f$) ve ν akışkanın kinematik viskozitesini göstermektedir. Eşitlik 3'te verilen bağıntı hem laminar hem de türbülanslı akış için geçerlidir. Mevcut çalışmada Grashof sayısı, bütün durumlarda dikey plakalar için kritik değer olan 10^9'dan küçük elde edildiğinden akış rejimi laminardır. Çalışma kapsamında yapılan deneyler üç defa tekrarlanarak belirsizlik hesabı yapılmıştır. Belirsizlik analizi için, ilk olarak Kline ve McClintock (1953) tarafından önerilen ve Eşitlik 5 ile gösterilen denklem kullanılmıştır.

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n\right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

Burada x_1, x_2, x_n ölçüm yapılan bağımsız değişkenler iken R bu değişkenlere göre hesaplanan bağımlı değişkendir. w_1, w_2, w_n ve w_R ise bu değişkenlerin belirsizlik miktarlarıdır. Sıcaklık ölçümünde kullanılan ısıl çiftlerin, termal kameranın ve voltaj ölçüm cihazının hassasiyetleri sırasıyla ±0,2°C, %±2 ve %±0,08'dir. Bu çalışmada bağımlı değişken olarak sadece bataryadan çevre havaya olan ısı transfer hızı ($\dot{Q}$) mevcut olup tüm durumlarda belirsizlik miktarının %3,8'den az olduğu belirlenmiştir.

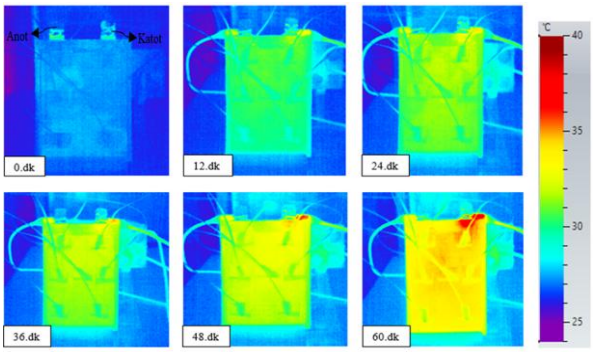
3. Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında deneyler 24°C ortam sıcaklığında üç farklı deşarj hızı (1C, 2C, 3C) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve batarya yüzey sıcaklığı, batarya yüzeyinden olan ısı transfer hızı ve voltaj değişimi incelenmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda ayrı başlıklar altında sunulmuştur.

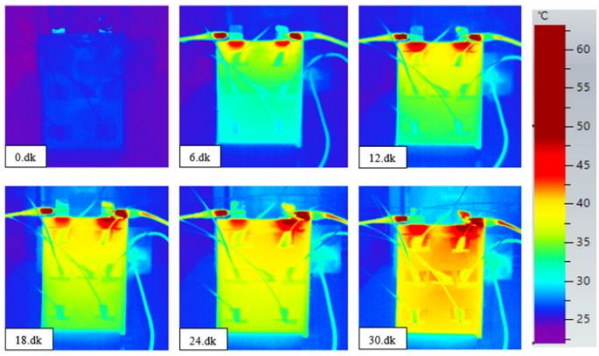
3.1. Termal Kamera Görüntüleri

Farklı deşarj hızları için LFP bataryanın zamana bağlı yüzey sıcaklığı dağılımını incelemek için termal görüntüleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 24°C ortam sıcaklığındaki batarya 1C-3C aralığındaki hızlarda deşarj edilerek yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi termal kamera ile görüntülenmiş ve Şekil 3-5'te gösterilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, deşarj hızının artmasıyla bataryanın yüzey sıcaklığının da arttığı ve tüm deşarj hızları için maksimum batarya yüzey sıcaklığına deşarj sonunda ulaşıldığı görülmektedir. Ayrıca 1C deşarj hızında batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımının 2C ve 3C

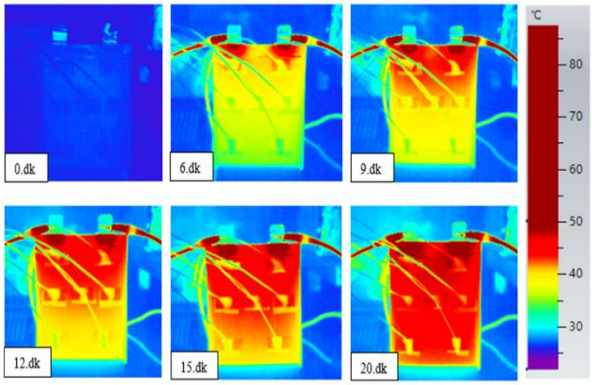
hızlarına göre daha homojen olduğu anlaşılmaktadır. Yüksek deşarj oranında tersinmez ısı baskın olup polarizasyon önemli ölçüde artmaktadır. Bu da ısı üretim hızının daha yüksek olmasına ve kısa deşarj süresinde batarya yüzeyinden uzaklaştırılamayan yoğun ısıya sebep olduğundan daha büyük bir sıcaklık gradyanına yol açmaktadır (Panchal vd., 2016; Wang vd., 2019). Şekil 3-5'e bakıldığında tüm deşarj hızlarında ısının yoğunlaştığı alanların bataryanın üst tarafındaki anot (negatif) ve katot (pozitif) bölgeleri olduğu anlaşılmaktadır. Bunun nedeni, bu sırada tersinmez ısının baskın olması ve iyon konsantrasyonu farkı ve yüksek çıkış akımı (elektron transferi) nedeniyle üst alanın ısı üretme oranının daha yüksek olması, joule ısısının ve polarizasyon ısısının çoğunun bataryanın üst kısmında yoğunlaşmasıdır (Panchal vd., 2016; Wang vd., 2019). Şekil 3-5'teki tüm görüntülere bakıldığında katot ucunun anot ucuna göre hep daha sıcak olduğu görülmektedir. Bu sıcaklık farkının nedeni katot ve anot malzemesinin elektriksel dirençlerinin farklı olmasıdır (Panchal vd., 2016; Pesaran, 2003; Wang vd., 2019). Her bir deşarj hızı için kamera yazılımı kullanılarak termal görüntülerden batarya yüzeyinin sıcaklığı belirlenmiştir. Şekil 3'te verilen 1C hızında boşaltılan bataryanın farklı zamanlardaki termal kamera görüntülerinden elde edilen sonuçlar ortalama batarya yüzey sıcaklığının 26,9°C'den 32,7°C'ye yükseldiğini ve deşarj sonunda ölçülen maksimum ve minimum sıcaklıkların sırasıyla 37,3°C ve 31,7°C olduğunu göstermektedir. 2C deşarj hızında batarya yüzeyinin termal kamera görüntülerinin verildiği Şekil 4 incelendiğinde, deşarj sonunda ölçülen ortalama ve maksimum batarya yüzey sıcaklıklarının sırasıyla 41,1°C ve 49,1°C olduğu görülmektedir. Şekil 5'te 3C hızındaki kamera görüntüleri, ortalama yüzey sıcaklığının başlangıçta 26,6°C iken deşarj sonunda 47,5°C'ye yükseldiğini ve maksimum yüzey sıcaklığının 55,1°C'ye ulaştığını göstermektedir.



Şekil 3. 1C deşarj hızında batarya yüzeyinin termal kamera görüntüleri.



Şekil 4. 2C deşarj hızında batarya yüzeyinin termal kamera görüntüleri.

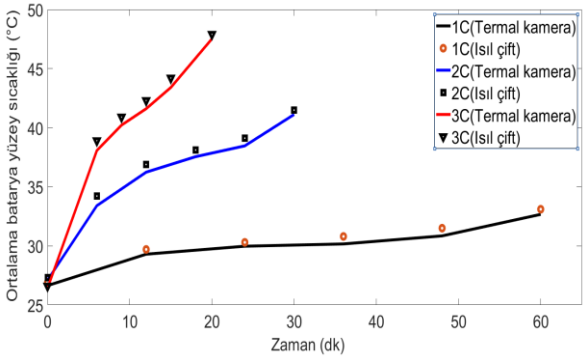


Şekil 5. 3C deşarj hızında batarya yüzeyinin termal kamera görüntüleri.

3.2. Termal Kamera ile Isıl Çift Verilerinin Karşılaştırılması

Termal görüntüler ve batarya yüzeyine konumlandırılan ısıl çiftlerden zamana bağlı sıcaklık verileri elde edilerek batarya yüzeyindeki ortalama sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır. Ortalama batarya sıcaklığının farklı deşarj hızları için zamana bağlı değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde, deşarj hızının artmasıyla hem ortalama batarya yüzey sıcaklığının hem de maksimum sıcaklık farkının arttığı ve termal kamera ile ısıl çift sonuçlarının birbiriyle tutarlı olduğu görülmektedir. Tüm sonuçlar sayısal olarak değerlendirildiğinde maksimum %2,2'lik bir farkın olduğu belirlenmiştir. Bu fark, Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'ten de görülebileceği gibi batarya yüzeyine konumlandırılan ısıl çiftler nedeniyle termal kameranın batarya yüzey sıcaklığını daha düşük ölçmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 6'dan anlaşılacağı üzere deşarj hızı arttıkça batarya deşarj süresi kısalmış ve tüm hızlar için deşarj işleminin sonuna doğru sıcaklık artışında bir ivmelenme olmuştur. Bu durum, deşarj işleminin sonunda bataryanın iç direncinin hızla artması ve tersinir ısı üretiminden kaynaklanmaktadır (Niculuță ve Veje, 2012; Wang vd., 2019; Youssef vd., 2021). Ayrıca Şekil 6'ya bakıldığında, 1C deşarj hızında ortalama batarya yüzey sıcaklığının lityum iyon bataryalar için optimum çalışma sıcaklığı aralığını (25-40°C) aşmadığı ancak 2C ve 3C deşarj hızlarında bu sıcaklığın aşıldığı anlaşılmaktadır.

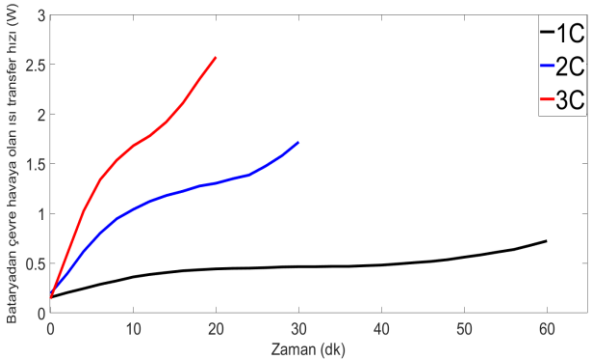
Dolayısıyla mevcut şartlarda 2C ve 3C deşarj hızları için doğal taşınımla soğutmanın yetersiz kaldığı söylenebilir.



Şekil 6. Farklı deşarj hızlarında ortalama batarya yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

3.3. Isı Transfer Hızı

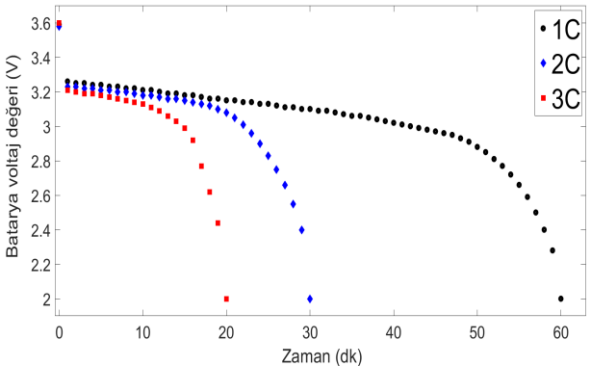
Bataryadan çevre havaya olan ısı transfer hızları hesaplanırken Eşitlik (1)'den yararlanılmıştır. MATLAB programına Materyal ve metot kısmında verilen tüm eşitlikler ve bilinen değişkenler girilerek her bir deşarj hızı için bataryadan çevre havaya olan ısı transfer hızları sayısal olarak hesaplanmış ve zamana bağlı değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, deşarj hızı ve deşarj süresinin artmasıyla bataryadan çevre havaya olan ısı transfer hızının da arttığı görülmektedir. Deşarj hızının artması, Şekil 6'dan da görülebileceği gibi ortalama batarya yüzey sıcaklığının artmasına ve dolayısıyla batarya yüzeyi ile ortam arasındaki sıcaklık farkının artışına neden olmaktadır. Ayrıca ısı taşınım katsayısının, yüzey ve ortam arasındaki sıcaklık farkı ile doğru orantılı olduğu göz önüne alındığında, bataryadan çevre havaya olan ısı transfer hızının deşarj hızıyla artması beklenen bir durumdur (Kalkan vd., 2021). Maksimum ısı transfer hızları 1C, 2C ve 3C deşarj hızları için sırasıyla 0,724 W, 1,719 W ve 2,574 W olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla deşarj hızının 1C'den 3C'ye çıkarılması maksimum ısı transfer hızını yaklaşık % 255 oranında arttırmıştır.



Şekil 7. Farklı deşarj hızları için bataryadan çevreye olan ısı transfer hızının zamanla değişimi.

3.4. Voltaj Değişimi

Bataryanın deşarj işlemi süresince voltaj değişimi elektronik yük cihazı aracılığıyla kaydedilmiş ve zamana bağlı olarak Şekil 8'de verilmiştir. Batarya tam dolu iken yaklaşık 3,6 V voltaja sahipken bataryanın deşarj kesme voltajı olan 2 V'ta deşarj işlemi sonlandırılmıştır. Şekil 8 incelendiğinde tüm deşarj hızları için zamanla voltaj değerinin azaldığı ve özellikle deşarj işleminin sonuna doğru bu azalış miktarının arttığı görülmektedir. Ayrıca deşarj hızının artmasıyla hem voltaj değeri hem de deşarj süresi azalmıştır. Deşarj hızı arttıkça batarya voltaj değerinin daha fazla düşmesi ohmik, aktivasyon ve kütle transferi kayıplarının artması nedeniyledir (Panchal vd., 2016).



Şekil 8. Farklı deşarj oranlarında zamana bağlı batarya voltaj değişimi.

4. Sonuç

Bu çalışmada, doğal taşınım koşullarında soğutulan bir lityum iyon bataryasının farklı deşarj hızları altındaki ısıl ve elektriksel davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ve gelecekteki çalışmalar için öneriler aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

1) Deşarj hızıyla ortalama batarya yüzey sıcaklığı doğru orantılıdır. Maksimum batarya yüzey sıcaklığı, en yüksek deşarj hızı olan 3C'de ve tüm deşarj hızları için deşarj işleminin sonunda elde edilmiştir. Deşarj hızının 1C'den 3C'ye yükselmesiyle ortalama batarya yüzey sıcaklığında yaklaşık olarak % 44,7 artış meydana gelmiştir.

2) Mevcut çalışma şartları için doğal taşınımla soğutmanın düşük deşarj hızında (1C) yeterli olduğu görülürken daha yüksek deşarj hızlarında (2C ve 3C) batarya yüzey sıcaklığının maksimum sıcaklık sınırını aştığı ve bu hızlarda doğal taşınımla soğutmanın yetersiz olduğu tespit edilmiştir.

3) Deşarj hızının artmasıyla batarya yüzeyinden çevre havaya olan ısı transfer hızı da artmıştır.

3C deşarj hızındaki maksimum ısı transferinin 1C hızıyla kıyaslandığında yaklaşık % 255 oranında attığı görülmüştür.

4) Termal görüntüler ile ısıl çift verilerinden elde edilen sonuçların birbiriyle tutarlı olduğu görülmüştür. Ölçülen tüm sıcaklık sonuçları birbiriyle karşılaştırıldığında maksimum farkın %2,2 olduğu bulunmuştur.

5) Deşarj hızı ile hem batarya voltaj değeri hem de deşarj süresi ters orantılı olarak değişmektedir. Aynı şartlarda deşarj hızı arttıkça polarizasyon kayıplarına bağlı olarak batarya voltaj değeri azalmaktadır.

Günümüzde artan elektrikli araç sayısı ile birlikte batarya

kaynaklı ısınma ve yanma gibi olaylarla karşılaşılmaktadır. Bu çalışma ile elektrikli araç Li-iyon batarya tipi için doğal taşınımla soğutmaya dair bir araştırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar gelecekte bir lityum iyon bataryasının soğutulmasını incelemeyi düşünen araştırmacılar için bilgilendirici niteliktedir. Ek olarak, farklı soğutma yöntemleri ve lityum iyon batarya tipleri gelecekteki araştırmalar için dikkate alınabilir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	M.B.	Y.E.G.	E.A.E.
K	20	20	60
T	40	30	30
Y	40	30	30
VTI	40	30	30
VAY	40	30	30
KT	20	60	20
YZ	30	50	20
KI	40	30	30
GR	40	40	20
PY	40	30	30
FA	50	50	0

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2023-8879 proje koduyla desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı kendilerine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Abdelkareem MA, Maghrabie HM, Abo-Khalil AG, Adhari OHK, Sayed ET, Radwan A, Olabi AG. 2022. Battery thermal management systems based on nanofluids for electric vehicles. J Energy Storage, 50: 104385.

Bazinski SJ, Wang X, Sangeorzan BP, Guessous L. 2016. Measuring and assessing the effective in-plane thermal conductivity of lithium iron phosphate pouch cells. Energy, 114: 1085-1092.

Behi H, Karimi D, Behi M, Ghanbarpour M, Jaguemont J, Sokkeh MA, Van Mierlo J. 2020. A new concept of thermal management system in Li-ion battery using air cooling and heat pipe for electric vehicles. Appl Therm Eng, 174: 115280.

Can A, Selimefendigil F, Öztop HF. 2022. A review on soft computing and nanofluid applications for battery thermal management. J Energy Storage, 53: 105214.

Çengel Y, Ghajar A. 2015. Heat and mass transfer. McGraw-Hill, New York, USA, 5th ed., pp: 533-577.

Churchill SW, Chu HHS, 1975. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. Int J Heat Mass Transf, 18(11): 1323-1329.

Dilbaz F, Selimefendigil F, Öztop HF. 2022. Lithium-ion battery module performance improvements by using nanodiamond-Fe3O4 water/ethylene glycol hybrid nanofluid and fins. J Therm Anal Calorim, 147(19): 10625-10635.

Gümüşsu E, Ekici Ö, Köksal M. 2017. 3-D CFD modeling and experimental testing of thermal behavior of a Li-Ion battery. Appl Therm Eng, 120: 484-495.

Iqbal U, Ali M, Khalid HA, Waqas A, Mahmood M, Ahmed N, Mehboob K. 2023. Experimental study to optimize the thermal performance of Li-ion cell using active and passive cooling techniques. J Energy Storage, 70: 108013.

Jayabalan J, Govindarajan M, Madhav VV, Sabareesaan KJ. 2022. Thermal management for green vehicle batteries under natural and forced convection modes. Curr Appl Sci Technol, 22(4): 1-21.

Kalkan O, Celen A, Bakirci K. 2021. Experimental and numerical investigation of the LiFePO4 battery cooling by natural convection. J Energy Storage, 40: 102796.

Kline S, McClintock F. 1953. Describing uncertainties in single-sample experiments. Mech Eng, 75: 3-8.

Li J, Zuo WEJ, Zhang Y, Li Q, Sun K, Zhang G. 2022. Multi-objective optimization of mini U-channel cold plate with SiO_2 nanofluid by RSM and NSGA-II. Energy, 242: 123039.

Li X, Zhang Z, Wang W, Tian Y, Li D, Tian J. 2020. Multiphysical field measurement and fusion for battery electric-thermal-contour performance analysis. Appl Energy, 262: 114518.

Liao G, Wang W, Zhang FEJ, Chen J, Leng E. 2022. Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system based on nanofluid. Appl Therm Eng, 216: 118997.

Ma R, Xuan W, Jiang Z, Wang D, Cao J, Xia F, Yu B, Wu D, Shi J, Chen J. 2024. Natural convection characteristics of novel immersion liquid applied to battery thermal management in static mode. J Energy Storage, 101: 113927.

Metallo A. 2024. Innovative approaches to optimizing Li-Ion battery cooling performance using gas mixtures. Appl Therm Eng, 257: 124472.

Monika K, Chakraborty C, Roy S, Dinda S, Singh SA, Datta SP. 2021. An improved mini-channel based liquid cooling strategy of prismatic LiFePO4 batteries for electric or hybrid vehicles. J Energy Storage, 35: 102301.

Niculuţă MC, Veje C. 2012. Analysis of the thermal behavior of a LiFePO4 battery cell. J Phys, 395(1): 012013.

Panchal S, Dincer I, Agelin-chaab M, Fraser R, Fowler M. 2016. Experimental and simulated temperature variations in a LiFePO4 -20 Ah battery during discharge process. Appl Energy, 180: 504-515.

Pesaran AA. 2003. Thermal characterization of advanced lithium-ion polymer cells. In: Third Advanced Automotive Battery Conference, June 10-13, Nice, France, pp: 1-7.

Sarchami A, Najafi M, Imam A, Houshfar E. 2022. Experimental study of thermal management system for cylindrical Li-ion battery pack based on nanofluid cooling and copper sheath. Int J Therm Sci, 171: 107244.

Sikarwar S, Kumar R, Yadav A, Gwalwanshi M. 2023. Battery thermal management system for the cooling of Li-Ion batteries, used in electric vehicles. Mater Today Proc, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.293.

Wang S, Li K, Tian Y, Wang J, Wu Y, Ji S. 2019. Infrared imaging investigation of temperature fluctuation and spatial

distribution for a large laminated lithium-ion power battery. Appl Therm Eng, 152(February): 204-214.

Wu F, Rao Z. 2017. The lattice Boltzmann investigation of natural convection for nanofluid based battery thermal management. Appl Therm Eng, 115: 659-669.

Yang X, Gao X, Zhang F, Luo W, Duan Y. 2021. Experimental study on temperature difference between the interior and surface of Li[Ni1/3Co1/3Mn1/3]O2 prismatic lithium-ion batteries at natural convection and adiabatic condition. Appl Therm Eng, 190: 116746.

Youssef R, He J, Akbarzadeh M, Jaguemont J, De Sutter L, Berecibar M, Van Mierlo J. 2020. Investigation of thermal behavior of large lithium-ion prismatic cell in natural air convection. In: Proceedings of the 9th International Conference on Applied Energy, September 27-30, Glasgow, UK, pp: 43-47.

Youssef R, Hosen MS, He J, Jaguemont J, Akbarzadeh M, De Sutter L, Berecibar M. 2021. Experimental and numerical study on the thermal behavior of a large lithium-ion prismatic cell with natural air convection. IEEE Trans Ind Appl, 57(6): 6475-6482.