



Numerical investigation of different cooling applications for pouch type lithium ion battery cells

Ceyda Kök^{1*}, Alkan Alkaya²

¹Department of Electrical and Electronics Engineering, Institute of Science and Technology, Mersin University, Mersin, Türkiye

² Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Mersin University, Mersin, Türkiye

Highlights:

- Electric vehicles battery design
- Comparison of the performance of battery cooling systems
- Elimination of non-uniform temperature distribution for pouch type lithium-ion battery

Keywords:

- Electric Vehicles
- Pouch Type Lithium-Ion Battery
- Temperature Distribution
- Battery Thermal Management System
- Battery Cooling System

Article Info:

Research Article

Received: 07.10.2020

Accepted: 11.02.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.804866

Correspondence:

Author: Ceyda Kök

e-mail:

ceydaberber@mersin.edu.tr

phone: +90 531 357 0915

Graphical/Tabular Abstract

Thermal behavior of 14.6 Ah pouch type LIB at 0.5 C, 1 C, 2 C, 3 C and 5 C discharge rates was analyzed. At high discharge rates, the discharge time decreases and the total heat generated and the temperature in the battery increased. When batteries are examined in different temperature ranges, it has been observed that they have non-uniform temperature distribution. In order to eliminate this non-uniformity, their performances were examined by cooling them with 3 different cooling systems. Air, liquid and phase change materials were applied to the battery while all of the cooling systems were discharged, and their cooling performance was observed (Figure A).

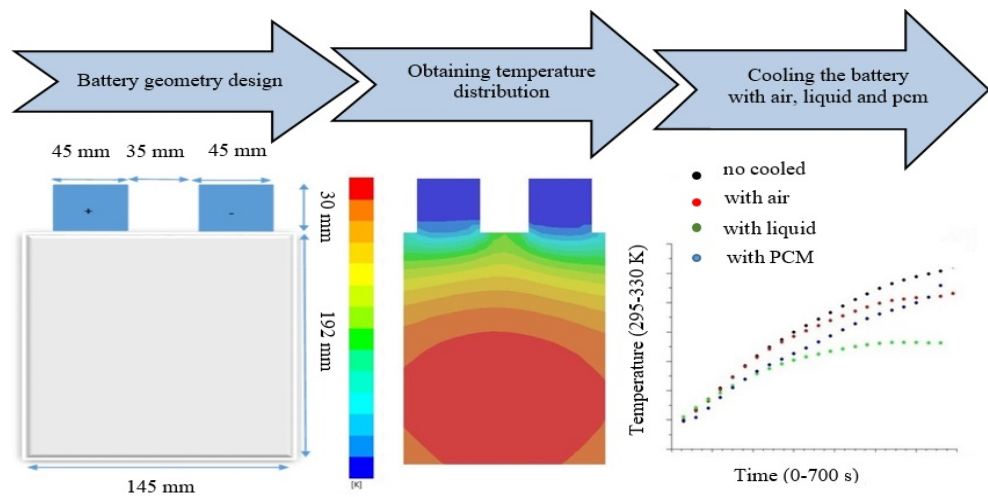


Figure A. Schematic representation of the path followed to compare the performance of battery cooling systems

Purpose: The purpose of this study is to eliminate the non-uniform distribution of the temperature that occurs during the discharge of lithium-ion batteries used in electric and hybrid vehicles under different loads and to keep the batteries in the ideal operating temperature range.

Theory and Methods: In this study, a simulation program using the finite element method, which uses to analyze the thermal behavior of batteries at 0.5 C, 1 C, 2 C, 3 C and 5 C discharge rates, was used. MSMD method is a homogeneous model capable of solving systems with complex geometry and used in many industrial applications. First of all, thermal analysis of the battery at different discharge rates has been examined. The battery must be cooled, as the non-uniform temperature distribution affects the performance of the battery. Therefore, in the study, air, liquid and phase change materials methods, which are also used in industrial applications, were used for battery cooling.

Results: Comparing the performances of these cooling systems, it cooled the battery by 1.11% with air, 3% with liquid, 1.33% with FDM. The fact that liquid cooling is preferred commercially in EA cooling systems compared to other cooling systems has been confirmed by this simulation study.

Conclusion: In the study, it has been shown that among the battery cell cooling methods, it is more effective than liquid cooling, air and FDM cooling systems, and the fact that it is preferred more commercially in EV cooling systems than other cooling systems has been confirmed by this simulation study.



Zarf tipi lityum iyon batarya hücreleri için farklı soğutma uygulamalarının sayısal incelenmesi

Ceyda Kök^{1*}, Alkan Alkaya²

¹Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye

²Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Elektrikli araçlar batarya tasarımı
- Batarya soğutma sistemleri performanslarının karşılaştırılması
- Zarf tipi lityum iyon batarya için düzensiz sıcaklık dağılımının ortadan kaldırılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 07.10.2020

Kabul: 11.02.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.804866

Anahtar Kelimeler:

Elektrikli araçlar,
zarf tipi lityum iyon batarya
hücresi,
batarya ısı yönetim sistemi,
sıcaklık dağılımı,
batarya soğutma sistemleri

ÖZ

Bu çalışmada, sayısal simülasyonlara dayalı olarak Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA) ve Elektrikli Araçlarda (EA) kullanılan zarf tipi Lityum-iyon batarya hücresinin farklı deşarj oranlarındaki termal davranışı ve performansı incelenmiştir. Sayısal simülasyon, batarya hücresinin deşarj davranışını analiz etmek ve ısı performansını araştırmak için çift potansiyel çok ölçekli- çok boyutlu batarya modelini kullanan geleneksel yazılım paketi aracılığıyla yapılmıştır. Batarya hücresinin maruz kaldığı yükler arttıkça sıcaklığın arttığı ve düzensiz sıcaklık dağılımının olduğu gözlemlenmiştir. Uygulanan modelin bataryaların düzenli ısı dağılımlarının sağlanması için batarya ısı yönetim sistemlerinde kullanılabilecek doğrulukta olduğu görülmüştür. Üç farklı soğutma sistemi olan hava ile soğutma, sıvı ile soğutma ve faz değişim materyalleri (FDM) ile soğutma deşarj durumundaki batarya hücresine uygulanmış ve performansları karşılaştırılmıştır. Soğutma sistemlerinin performansları karşılaştırıldığında batarya hücresinin soğutmasız hallerine göre hava ile %1,11; sıvı ile %3 ve FDM ile %1,33 oranlarında soğuttuğundan dolayı simülasyon sonuçlarının, ticari olarak da oldukça yaygın olan sıvı ile soğutma sisteminin diğerlerinden daha iyi soğuttuğu gerçeğini yansıtmıştır.

Numerical investigation of different cooling applications for pouch type lithium ion battery cells

H I G H L I G H T S

- Electric vehicles battery design
- Comparison of the performance of battery cooling systems
- Elimination of non-uniform temperature distribution for pouch type lithium-ion battery

Article Info

Research Article

Received: 07.10.2020

Accepted: 11.02.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.804866

Keywords:

Electric vehicles, pouch type
lithium-ion battery ,
Temperature distribution
battery thermal management
system, battery cooling
system

ABSTRACT

In this study, the thermal behavior and performance of pouch type Lithium-ion batteries cell used in Hybrid Electric Vehicles (HEV) and Electric Vehicles (EV) at different discharge rates were investigated based on numerical simulations. Numerical simulation was performed through a traditional software package using the dual potential Multi-Scale Multi-Dimensional (MSMD) battery model to analyze the cell discharge behavior and investigate its thermal performance. When the battery load is increased, non-uniform thermal distribution and temperature rise has been observed. It has been seen that applied model is accurate to be used in battery thermal management systems to ensure uniform thermal distribution of battery cell. Air, liquid and phase change materials (FDM), which are one of the three methods of cooling systems, were applied to the battery cell in cooling discharge state and their performance was compared. Comparing the performances of the cooling systems, the simulation results reflected the fact that the liquid cooling system, which is also quite common in commercial, cools the battery better than the others, as it cools the battery by 1.11% with air, 3% with liquid, 1.33% with FDM.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *ceydaberber@mersin.edu.tr, alkanalkaya@mersin.edu.tr /
Tel: +90 531 357 0915

1. Giriş (Introduction)

İklim değişikliği dünyamızda genel kabul görmüş bir gerçektir. Son yüzyılda dünya genelinde sıcaklığın 0,74 K arttığı görülmekte ve bu artışın yakın gelecekte azalması beklenmemektedir [1]. Sıcaklıktaki artışla birlikte, çevrede gözlenebilir birçok etki oluşmuştur. Artan okyanus seviyeleri (yılıda 1,7 ila 3 mm), buzulların çekilmesi, olan buzulların azalması ve anormal hava olayları, küresel iklim değişikliğinin şüpheli sonuçlarından bazılarıdır. Bu etkilerin nedeni ve ciddiyeti hakkında tartışma olsa da, genel olarak kabul edilen neden, yirminci yüzyılın sonuna kadar sera gazı emisyonlarındaki büyük artıştır [2, 3]. Yirminci yüzyılın sonlarından başlayarak ve günümüze kadar devam eden, genel olarak iklim değişikliği ve çevre uygulamaları ile ilgili sosyal farkındalıkta bir artış olmuştur. İnsanlar artık aşırı enerji tüketiminin, özellikle taşımacılığın çevre üzerindeki etkilerini daha iyi anlamaktadır. Büyük metropol şehirlerinde hava kalitesinin düşmesi, hem çevresel hem de sağlık sorununu meydana getirmektedir [4]. Tüm bu düşünceler, yakıt kullanmayan sıfır emisyonlu EA'lar için bir pazar alanı yaratmıştır [5].

Ülkemizde ve dünyada elektrikli araçlara gün geçtikçe ilgi artmaktadır. EA'lar ve HEA'lar ticari pazara giriş yapmalarından sonra son on yıl içerisinde otomobil satışlarını yükseltmiştir. 2010'da dünyada sadece 17 bin EA var iken 2019'da 7,2 milyona kadar yükselmiştir. %47 pazar payına sahip ülke Çin, en büyük elektrikli otomobil stoğuna sahip ülke olmuştur [6]. Ülkemizde ise pandemiye rağmen araç satış rakamlarında artış görülmüştür. 2020'nin ilk yarısında toplam 4871 adet araç satışıyla 2019'a göre %50 büyüme kaydedilmiştir [7].

Otomotiv sektöründe HEA'larda ve EA'larda kullanılan lityum iyon bataryaların üç hücre tipi vardır. Bunlar; silindirik, zarf ve prizmatik hücrelerdir [8]. Silindirik hücrelerin aktif maddesi naylon mandrel üzerine spiral olarak sarılırken, prizmatik hücreler eliptik ve zarf tipi hücreler ise istiflenmiş plakalar şeklindedir [9]. Silindirik ve prizmatik hücreler genellikle alüminyum ve paslanmaz çelik kasadan yapılmaktadır. Ancak, zarf hücreleri yumuşak metalize plastik ambalajlara sahiptir [10]. Bir zarf tipi hücre, genellikle dikdörtgen ve çok ince, büyük, yassı bir hücredir. Bu, çok sayıda hücrenin çok kompakt bir şekilde istiflenmesine izin verir ve her hücre, ısıtma veya soğutma gerektiğinde termal transfer için geniş bir yüzey alanına sahiptir. Silindirik hücreler Tesla Model S, zarf tipi hücreler Chevrolet Volt ve prizmatik hücreler Nissan Leaf, BMW i3 ve Toyota Prius tarafından kullanılmaktadır [11].

Lityum iyon bataryaların en önemli dezavantajı, şarj/deşarj sırasında ohmik ve entropik reaksiyonlar nedeniyle çok fazla ısı üretmeleridir [12]. HEA'ların ve EA'ların şarj/deşarj sırasındaki bu sıcaklık artışı, onarılamaz ve durdurulamaz hale geldiğinde termal kaçaklara, patlamalara ve insanların yaralanmasına sebebiyet verebilmektedir [13]. Li-ion bataryalar için kabul edilebilir çalışma sıcaklığı aralığı -20 °C ile 60°C arasındadır ve optimum performansını korumak için 15°C ila 35°C arasında dar bir sıcaklık aralığı önerilmektedir [14]. Arzu edilen aralık dışındaki sıcaklıklar önemli kapasite kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle, Li-ion tabanlı EA'lar, HEA'lar için batarya paketinde üretilen ısıyı hızlı bir şekilde dağıtmak için etkili bir Batarya Isıl Yönetim Sistemi (BIYS) gerekmektedir. Bataryalarda ısı, şarj/deşarj işlemi sırasında, elektrokimyasal reaksiyonlar ve iç dirençlerin bir sonucu olarak üretilmektedir. Batarya içinde üretilen bu ısı doğru yayılmaz ise pilin içerisinde birikir ve düzensiz bir dağılıma neden olur. Isı etkili bir şekilde dağılmazsa paketin içinde birikir. Ayrıca, bataryanın dış yüzeylerinde iç yüzeyine oranla taşınım ısı katsayısı daha yüksektir, bu nedenle paket dışındaki hücreler paket içindeki iç hücrelere göre daha iyi dağılım koşulları sağlamaktadır. Böylece, ortadaki bataryalar ile kenardaki bataryalar arasında büyük

bir sıcaklık farkı oluşmaktadır. Tek bir hücrenin performansı, sıcaklığının güçlü bir fonksiyonu olduğu için bu durum, hücreden hücreye büyük bir kapasite değişimi anlamına gelmektedir. Hücreler arasındaki düzensiz sıcaklık dağılımının yanı sıra bir hücre içindeki sıcaklık dengesizliği de önemli endişe kaynağıdır. Elektrokimyasal reaksiyonların büyük bir kısmı elektrotlarda gerçekleştiğinden ısı üretme oranı, bir Lityum-iyon hücresi içindeki her konumda aynı değildir. Bir LiCoO₂ pozitif elektrodun tüm bataryanın dört katı kadar ısı ürettiği belirtilmektedir [15]. Dolayısıyla sıcaklık artışı hücrenin içinde düzgün olmamaktadır. Bu durum, tüm hücrenin performansı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip yerel bozulma yaratarak bataryanın bozulmasına neden olabilmektedir. Kısacası, hem hücreden hücreye hem de hücrelerdeki sıcaklık eşitsizliği, batarya paketinin genel performansı üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu nedenle, Lityum-iyon bataryanın ısı davranışını vedeşarj esnasında ısı performansını anlamak daha da önemli hale gelmektedir. Bataryadaki arzu edilen çalışma aralığındaki sıcaklığın ve düzensiz dağılımın etkisi performansı etkilemek ile birlikte sıcaklığı onarılmaz bir şekilde artışı can ve mal kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle BIYS batarya performansı için oldukça önemlidir. BIYS'nin temel işlevleri, kullanım sırasında bataryanın sıcaklık artışını sınırlamak olduğu için genellikle soğutma sistemleri olarak adlandırılan batarya termal yönetim sistemleri kullanılmaktadır. İyi tasarlanmış bir termal yönetim sistemi, bataryanın performansını etkin bir şekilde artırabilen çalışma sıcaklığı penceresinde bataryayı koruyacaktır. Sistem ayrıca, çoklu hücrelerin kullanıldığını varsayarak hem tek tek hücrelerin içinde hem de tüm paket boyunca mümkün olan bir sıcaklığı korumaktadır. EA'larda batarya termal yönetimine en yaygın yaklaşımlar üç ana grupta incelenmiştir. Bunlar hava ile, sıvı ile, FDM ile soğutma sistemleridir [16]. Bu soğutma sistemleri arasında, hava ve sıvı ile soğutma, ticari elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan geleneksel yöntemlerdir [17]. Hava ile soğutma, düşük maliyetli olması, kolay uygulanabilir olması ve soğutma sıvısı malzemesinin kolay bulunabilirliği avantajlarına sahiptir. Bu soğutma sistemi, doğal taşınım (pasif) ve zorlanmış taşınım (aktif) olarak iki grupta incelenmektedir [18]. Sıvı soğutma sistemi ise, hava soğutmasının zayıf ısı giderme katsayısına kıyasla termal yönetimin verimliliğini büyük ölçüde artırmaktadır. Soğutucunun farklı hücreler arasında veya bataryanın etrafındaki bir kap içinde borular ve kanallardan aktığı en çok kullanılan sistemdir [19]. Pasif bir soğutma yöntemi olan FDM ile soğutma ise, üfleyci gibi ekstra bileşenlere ihtiyaç duymadan soğutma etkisini gösteren özelliğe sahiptir [20]. Basit, kolay uygulanabilir ve daha ekonomik olması sebebiyle FDM ile soğutma son birkaç yıldır araç uygulamalarında dikkat çekmiştir [21].

Li vd. [22], çift silika soğutma plakası kullanarak soğutma kapasitesini incelemek için hava soğutmalı bir BIYS tasarlamışlardır. Batarya paketinde en yüksek sıcaklık 5 Cdeşarj hızında meydana gelmiştir. Batarya performansı, 1,5 mm kalınlığında ve 3,5 m/s rüzgar hızında bir silikon soğutma plakası kullanılarak önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Ayrıca fan sayısındaki artışla soğutma etkisinin hemen hemen aynı kaldığı ve ön taraftaki fanın verimli soğutma gösterdiği gözlemlenmiştir. Chen ve ark. zarf tipi bataryayı soğutmak için hava, doğrudan sıvı soğutma, dolaylı sıvı soğutma ve kanat ile soğutma yöntemlerini kullanmışlardır [19]. Soğutma yöntemlerini karşılaştırırken yalnızca 2,71 Cdeşarj hızını kullanmışlardır. Na vd. [23], tek ve ters yönlü hava akışının batarya paketi üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Yazarlar, ters yönlü hava akışının batarya paketindeki düzensiz sıcaklık dağılımını önemli ölçüde iyileştirebileceğini gözlemlemişlerdir. Ters yönlü hava akışının, sıcaklık farkını 1,1°C azalttığı ve maksimum ve ortalama sıcaklığın sırasıyla 0,5°C ve 2,7°C azaldığı bulunmuştur. Alipanah vd. [21] FDM malzemesi olarak saf oktadekan, saf galyum ve oktadekan-Al köpük kompozit kullanarak yapılmış simülasyon verileri ile BIYS'i incelemişlerdir. FDM olarak galyum kullanıldığında, bataryadaki

sıcaklık dağılımının daha düzenli ve deşarj süresi 4,7 kat daha uzun olduğu görülmüştür. Oktadekana Al köpüğü eklenmesi ile düzensiz sıcaklık dağılımı en aza indirilmiştir. Wang vd. [24], BIYS için termal silika plakalar ve bakır borulardan oluşan bir sıvı soğutma plakası önermişlerdir. Önerilen BIYS'nin soğutma kapasitesini, farklı sayıda silika plaka ve kanalda, akış hızlarında ve üç farklı deşarj hızı altında akış yönlerinde deneyler ve simülasyonlar yoluyla araştırmışlardır. Bu çalışma sonucunda termal silika plakaların ve sıvı kanallarının sayısı arttıkça soğutma performansının arttığı ancak akış yönünün önemli olmadığı gözlemlenmiştir. Xie vd. [25] farklı şarj durumunda (SOC 0-1), farklı deşarj hızlarında (1 C, 2,5 C, 3,5 C) ve farklı ortam sıcaklığında (263 K- 323 K) ısıl analiz yapmışlardır.

Bu makalede, zarf tipi lityum-iyon batarya hücrelerinin farklı yükleri temsil etmek amacıyla tek deşarj hızında kalmayıp 0,5 C; 1 C; 2 C; 3 C ve 5 C'deki deşarj hızlarındaki ısıl davranışları analiz edilmiştir. Bu analizde (SOC=1) bataryanın maksimum ve minimum sıcaklık kontrolünden ziyade batarya hücresi içerisinde oluşan düzensiz sıcaklık dağılımının kontrolü yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen modelin düzensiz sıcaklık dağılımını ortadan kaldıracak hava, sıvı ve literatürde az örneği bulunan ancak geleceğin soğutma yöntemlerinden biri olarak kabul edilen FDM yöntemleri ile soğutma sistemi tasarımı yapılmış ve bu sistemlerin performansları soğutmasız halleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda sıvı ile soğutma diğer iki soğutma türüne göre daha iyi performans göstermiştir.

2. Batarya Isıl Yönetim Sistemlerinin Bataryaya Uygulanması (Application of Battery Thermal Management Systems to Battery)

Bir bataryadaki kimyasal, termal ve elektriksel işlemlerin gelişimini tahmin etmek için iki model kullanılmaktadır: 1) Tek Potansiyel Ampirik Batarya Modeli (*Single-Potential Empirical Battery Model*) 2) İkili Potansiyel Çok Ölçekli Çok Alanlı Batarya Modeli (*Dual-Potential Multi-Scale Multi-Domain (MSMD) Battery Model*). Tek Potansiyel Ampirik Batarya Modeli, batarya sistemlerinde özellikle karmaşık geometri sistemlerdeki tüm elektrokimyasal olayları inceleme sınırlı yeteneğine sahiptir. MSMD batarya modeli, çok ölçekli çok boyutlu bir yaklaşıma dayanan homojen bir model kullanarak bu sınırlamaları aşmaktadır. Çeşitli analiz gereksinimlerine uyacak şekilde, bu modelde üç elektrokimyasal alt model bulunmaktadır: 1) Newman, Tiedemann, Gu ve Kim (NTGK) ampirik modeli, 2) Eşdeğer Devre modeli (ECM) ve 3) Newman's Pseudo 2D (P2D) modelleridir [26].

2.1. NTGK Model (NTGK Model)

Newman, Tiedemann, Gu ve Kim (NTGK) modeli, Kwon tarafından önerilen basit bir ampirik elektrokimyasal modeldir [27]. Eş. 1'de hacimsel akım transfer hızı ifade edilmiştir.

$$j_{ECh} = aY[U - (\varphi_+ - \varphi_-)] \quad (1)$$

Burada, a: Elektrot levhasının spesifik alanını, φ_+ , φ_- pozitif ve negatif elektrotlar için faz potansiyellerini j_{ECh} hacimsel akımı temsil etmektedir. Eş. 2'de bataryanın boşalma derinliği (DoD) fonksiyonu gösterilmiştir. Buradaki U ve Y ise bataryanın boşalma derinliği (DoD) fonksiyonlarının model parametreleridir. Vol, akü hacmi ve Q_{Ah} akü toplam elektrik kapasitesidir.

$$DoD = \frac{Vol}{3600Q_{Ah}} \left(\int_0^t j dt \right) \quad (2)$$

Belirli bir batarya için, gerilim akımı tepki eğrisi deney yoluyla elde edilmekte ve daha sonra veriye uyan eğri ile belirlenmektedir. Kwon [27] 'de önerilen fonksiyonlar için Eş.3 uygulanmaktadır. Burada, C₁ ve C₂ NTGK modele özgü parametrelerdir.

$$Y = \left(\sum_{n=0}^5 a_n (DoD)^n \right) \exp \left[-C_1 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (3)$$

$$U = \left(\sum_{n=0}^3 b_n (DoD)^n \right) - C_2 (T - T_{ref})$$

Elektrokimyasal reaksiyon ısısı Eş.4'te gösterilmiştir. Burada ilk terim aşırı gerilimden kaynaklanan ısı; ikinci terim ise entropik ısıdan kaynaklanan ısıdır.

$$q_{ECh} = j_{ECh} [U - (\varphi_+ - \varphi_-) - T \frac{dU}{dT}] \quad (4)$$

2.1.1. Model Parametreleri (Model Parameters)

Paket yazılım programında 3D modellenen 14,6 Ah LiMn₂O₄ LIB boyutları ve bu 3D geometrinin ağ boyutunun tasarlanan görüntüsü ve MSMD batarya modülü giriş parametreleri sırasıyla Şekil 1 ve Tablo 1'de verilmiştir [28]. Tasarlanan modelin ağı 5mm boyutlarında ağ yakınsaması 'coarse' olarak seçilmiştir. Ağ, 2620 düğüm, 1210 elementten oluşturulmuştur. Mesh kalitesi, mesh sizing bölümündeki kalite ölçütleri ile karşılaştırılıp karar verilmiştir.

2.2. Lityum İyon Bataryaların Farklı Yükler Altındaki Isıl Davranışlarının İncelenmesi

(Investigation of Thermal Behavior of Lithium Ion Batteries Under Different Loads)

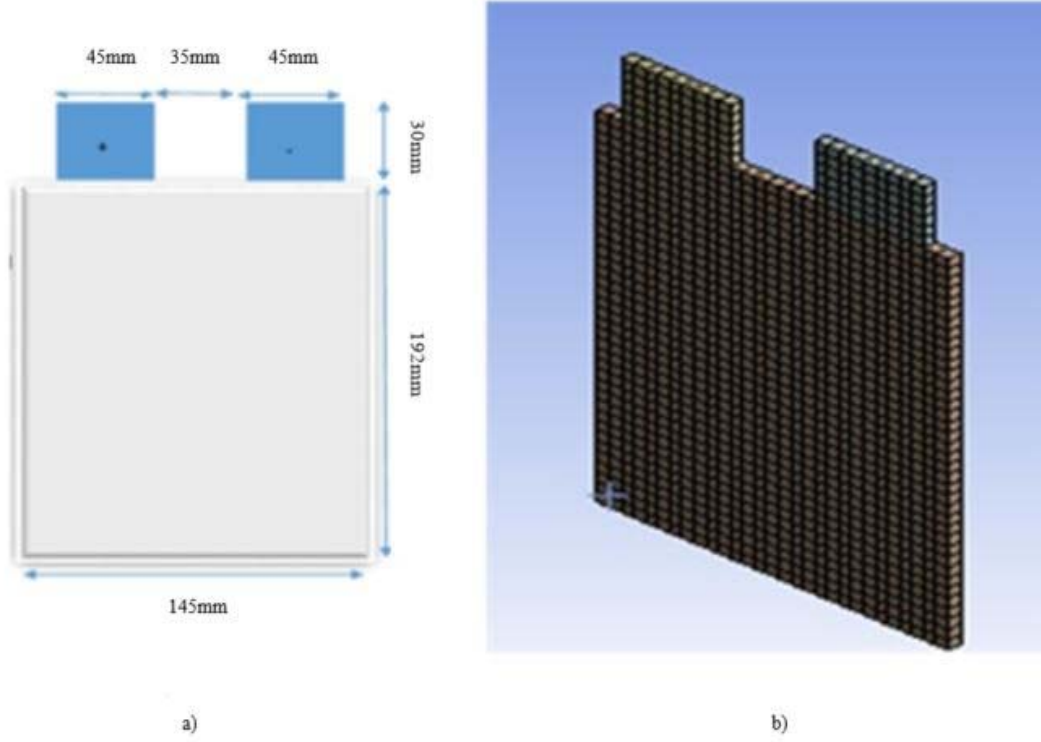
Bu çalışmada, MSMD batarya hücrelerinin elektriksel parametreler 14,6 Ah'lık LIB verilerine uygun seçilmiştir. Burada minimum ve maksimum durdurma gerilimleri sırasıyla 3 V ve 4 V olarak gösterilmiştir. Bunun sebebi; bataryanın şarj veya deşarj esnasında potansiyel farkın bataryaya zarar vermemesini sağlamaktır. Sistemden deşarj esnasında 3 V'un altına düşmemesi, şarj esnasında 4 V'un üstüne çıkmaması kontrol altına alınmaktadır.

Deşarj hız parametreleri ise sırasıyla 0,5 C; 1 C; 2 C; 3 C ve 5 C olarak uygulanmıştır. NTGK model polarizasyon parametreleri, yazılım paketinin modele uygun varsayılan parametrelerdir. Malzeme bilgileri hücre malzemesi ve kutup malzemesi olarak sisteme girilmiştir. Kutup malzemeleri pozitif ve negatif malzemeler için bazı çalışmalarda farklı seçilse de bu çalışmada büyük fark yaratmadığı için aynı seçilmiştir. Hücre modellemesinde ısı transferi olmadığı farz edilmiştir. Kutuplar ve hücre için sınır şartları ortam sıcaklığı 300 K ve hava ile batarya arasında ısı taşınım katsayısı (h) 5 W/m² K alınmıştır. Şekil 2'de sırasıyla 0,5 C; 1 C; 2 C; 3 C ve 5 C de simülasyon sonucundan elde edilen deşarj eğrileri, Şekil 3'de deşarj esnasındaki bataryadaki sıcaklık artış eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4'te ise aynı deşarj hızlarındaki sıcaklık dağılımları gösterilmiştir.

Şekil 2'deki grafiğe göre deşarj hızı artırıldığında bataryadaki deşarj süresinin kısaldığı görülmüştür. Şekil 3'de deşarj hızı arttıkça bataryadaki sıcaklığın arttığı görülmüştür. Şekil 4'te sırasıyla 0,5 C; 1 C; 2 C; 3 C ve 5C deşarj hızlarındaki aynı sıcaklık skalasında sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Şekil 5'de ise sırasıyla 0,5 C; 1 C; 2 C; 3 C ve 5C deşarj hızlarındaki farklı sıcaklık skalasında sıcaklık dağılımları gösterilmiştir.

Şekil 4'te sıcaklık skalaları aynı tutularak deşarj oranlarının arttıkça sıcaklığın batarya yüzeyi üzerinde arttığı gösterilmiştir. Şekil 5'de ise skalalar farklı tutularak bataryada meydana gelen sıcaklığın düzensiz dağılımı gösterilmiştir.

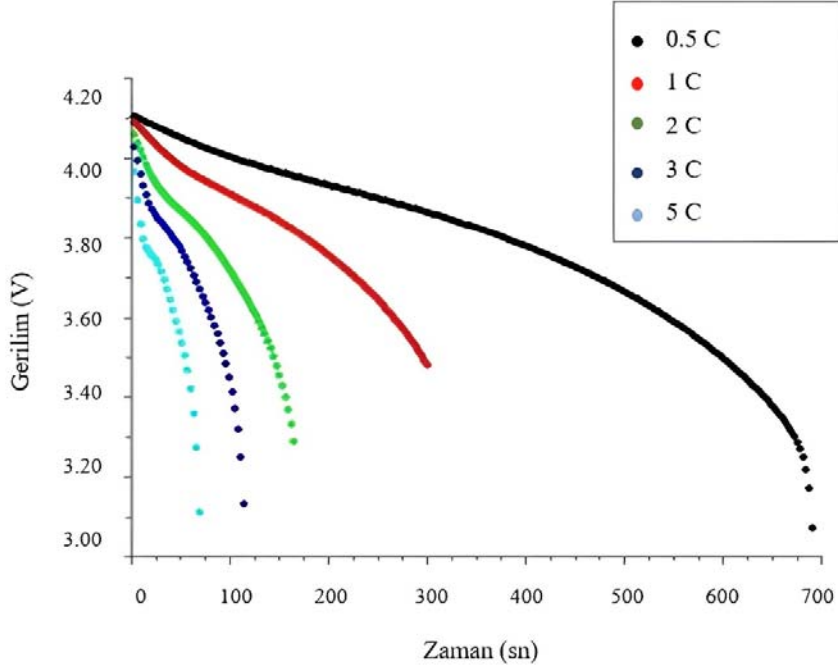
Şekil 5'de görüldüğü gibi sıcaklık deşarj hızına bağlı olarak yükselmektedir. Hücrenin merkezinde meydana gelen reaksiyon nedeniyle sıcaklığın arttığı, kutuplara doğru ise azaldığı görülmektedir. Bu şekildeki düzensiz sıcaklık dağılımının BIYS için bir sorun olduğu ve soğutmanın bu düzensizliği ortadan kaldıracak şekilde uygulanması gerektiği görülmektedir



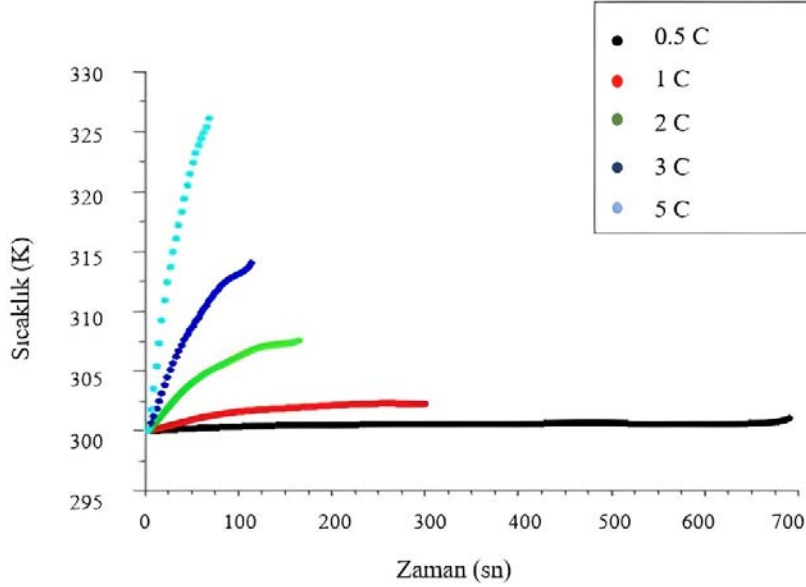
Şekil 1. a) 14,6 Ah LiMn₂O₄ LIB boyutları b) tasarlanan modelin ağ (mesh) görüntüsü
(a) 14.6 Ah LiMn₂O₄ LIB dimensions b) mesh image of the designed model

Tablo 1. MSMD Batarya Modülü Giriş Parametreleri (MSMD Battery Module Input Parameters)

MSMD Batarya Modül Parametreleri		
Parametre	Değer	Birim
Elektriksel parametreler		
Nominal Hücre Kapasitesi	14,6	Ah
C-hızı	0,5,1,2,3,5	-
Min. durdurma gerilimi	3	V
Max durdurma gerilimi	4	V
NTGK model polarizasyon parametreleri		
İlk DoD	0	-
Kapasite referansı	14,6	Ah
U sabitleri:		
a0,a1,a2,a3,a4,a5	4,12, -0,804, 1,075, -1,177, 0,0	
Y sabitleri:		
b0,b1,b2,b3,b4,b5	1168,59, -8928, 52504,6, -136231, 158531,7, -67578,5	
Sıcaklık düzeltmeleri:		
C1,C2	1800, -0,00095	
Hücre Malzemeleri		
Yoğunluk	2092	kg/m ³
Özgül Isı (Cp)	678	J/kg-K
Termal iletkenlik	18,2	W/m-K
UDS-1	1,19e+06	kg/m-s
Elektiriksel iletkenlik	9,83e+05	kg/m-s
	3,541e+07	Siemens/m
Kutup malzemeleri		
Yoğunluk	8978	kg/m ³
Özgül Isı (Cp)	381	J/kg-K
Termal iletkenlik	387,6	W/m-K
UDS-0	Model parametresi	kg/m-s
Elektiriksel iletkenlik	1e+07	Siemens/m



Şekil 2. Farklı deşarj hızlarındaki deşarj eğrileri (Discharge curves at different discharge rates)



Şekil 3. Farklı deşarj hızlarındaki sıcaklık artışı (Temperature increase at different discharge rates)

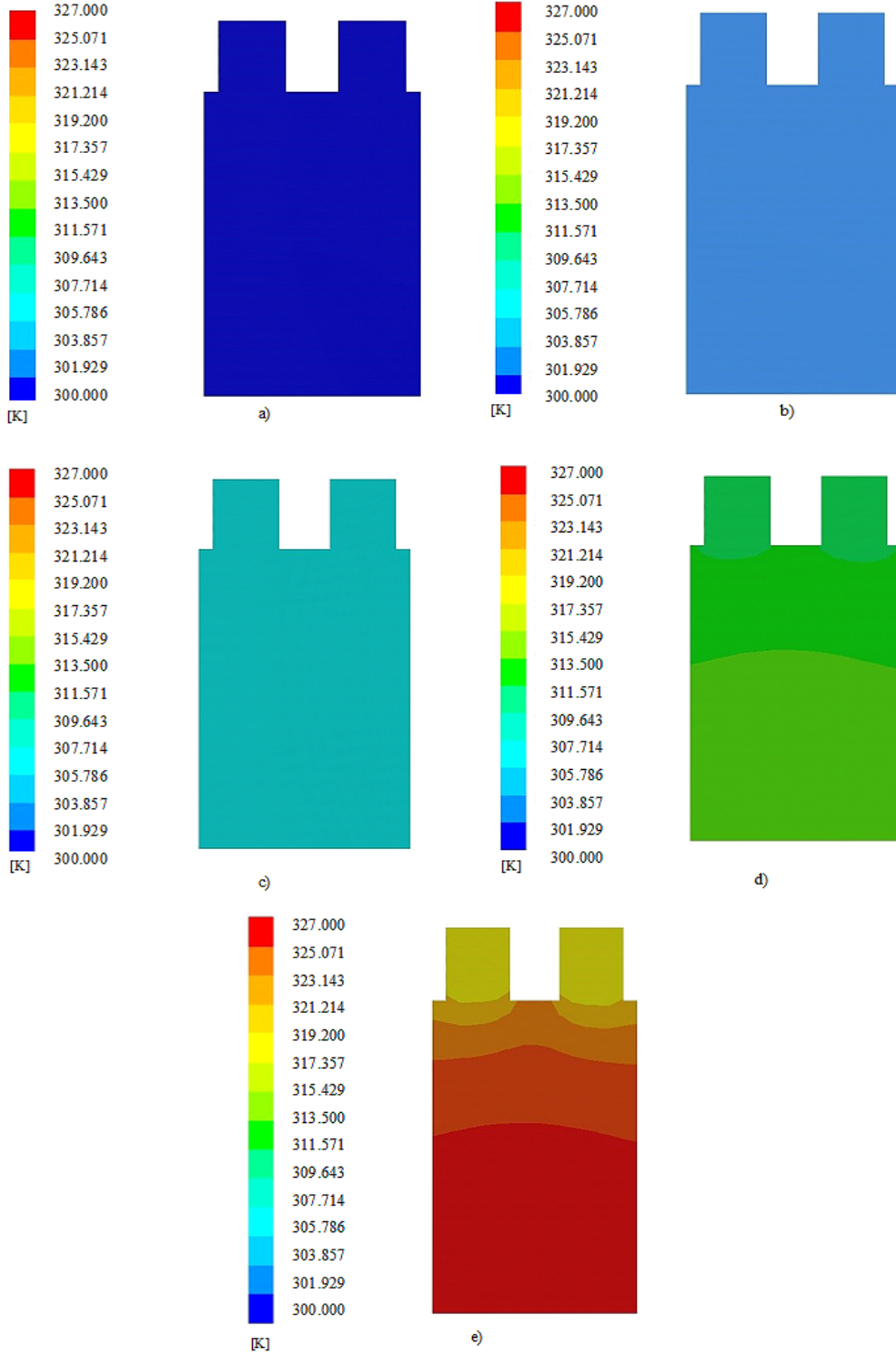
3. Batarya Soğutma Sistemleri (Battery Cooling Systems)

Batarya hücresi; hava, sıvı ve faz değişim materyalleri ile soğutulmuştur. Hava ve sıvı ile soğutmada bataryanın her iki yüzeyini kapsayacak şekilde 3 mm boyutunda hava aralığı (air gap) oluşturulmuştur. Hava ve sıvı akışkanları laminer ($Re < 2000$) özellikte olup her iki taraf içinde tek yönlü uygulanmıştır. Sıvı ile soğutmada bataryayla herhangi bir kısa devre oluşturmaması için su/glikol yerine mineral yağ kullanılmıştır. Hava ve su ile soğutma sistemlerinde

kullanılan soğutucuların termofiziksel özellikleri Tablo 2'de belirtilmiştir.

3.1. Hava ile Soğutma (Cooling with air)

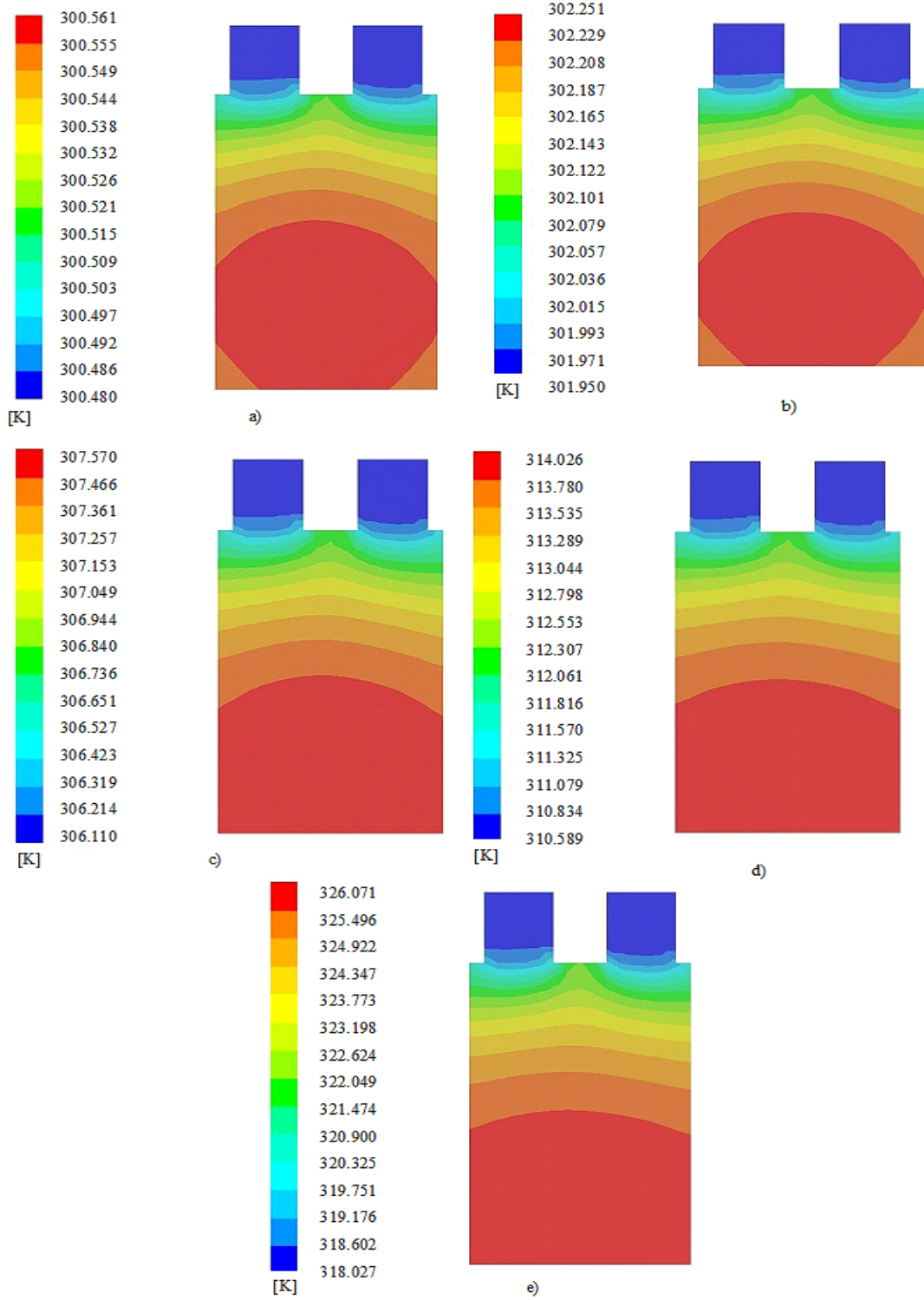
Batarya soğutma sistemlerindeki en geleneksel yöntem olan hava ile soğutma sistemi sonlu elemanlar yöntemini kullanan analiz programı ile tasarlanmıştır. Şekil 6'da oluşturulan hava aralığının görüntüsü ve giriş çıkış tanımlaması verilmiştir.



Şekil 4. a) 0,5 C b) 1 C c) 2 C d) 3 C e) 5 C deşarj oranlarındaki aynı sıcaklık skalasında sıcaklık dağılımları (Temperature distributions in same temperature scale at a) 0,5 C b) 1 C c) 2 C d) 3 C e) 5 C discharge rates)

Mesh atma fiziksel bir tanım aralığını daha küçük tanım aralıklarına (elemanlara) bölme işlemi olarak tanımlanabilir. Buradaki amaç, modeli oluşturan bir diferansiyel denklemin çözümünü kolaylaştırmaktır. Ne kadar sık mesh atılırsa o kadar gerçeğe yakın analiz elde edilmektedir. Tasarlanan modelin ağı 5mm boyutlarında

ağ yakınsaması 'coarse' olarak seçilmiştir. Ağ, 7300 düğüm, 3414 elementten oluşturulmuştur. Şekil 6b'de hava akımının giriş ve çıkış yerleri gösterilmiştir. Mesh kalitesi, mesh sizing bölümündeki kalite ölçütleri ile karşılaştırılıp karar verilmiştir. Batarya hücresi sırasıyla 0,5 C; 1 C; 2 C; 3 C ve 5 C deşarj hızlarında deşarj esnasında iken

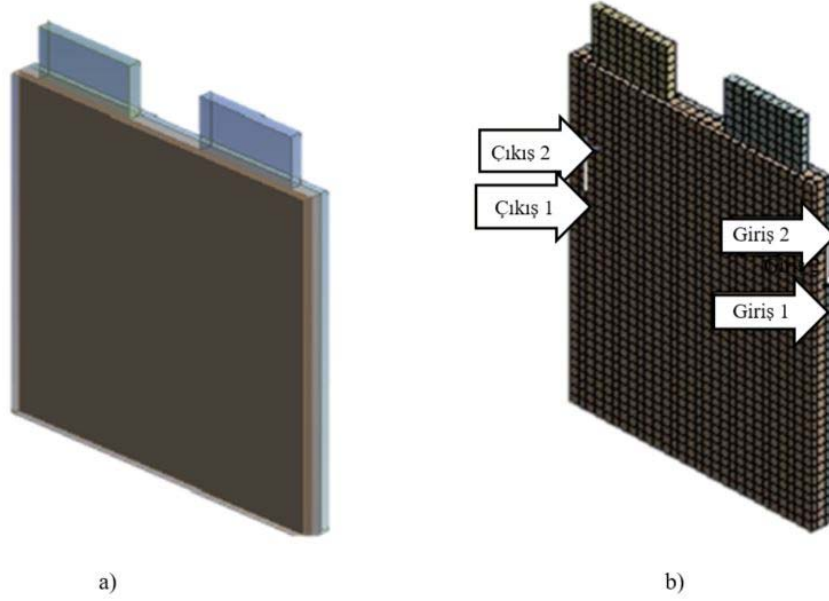


Şekil 5. a) 0,5 C b) 1 C c) 2 C d) 3 C e) 5 C deşarj hızlarındaki farklı sıcaklık skalasında sıcaklık dağılımları
(Temperature distributions in different temperature scale at a) 0,5 C b) 1 C c) 2 C d) 3 C e) 5 C discharge rates)

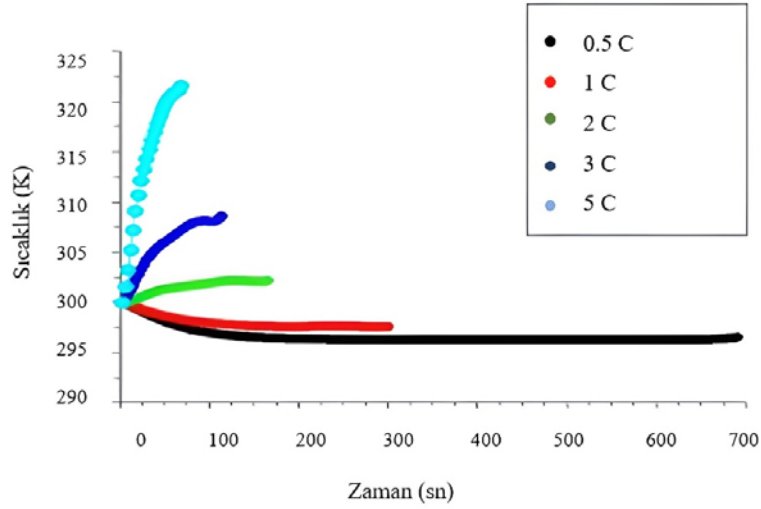
hava ile soğutulmuştur. Hücreye 0,5 m/s, 3 m/s, 7 m/s ve 19 m/s hızlarında (laminer) 300 K sıcaklığında (ortam sıcaklığı) hava üflenmiştir. Şekil 7’de 0,5 m/s’deki hava hızıyla farklı deşarj oranlarındaki soğutma grafiği gösterilmiştir. Şekil 7’deki hava ile soğutulmuş grafik ile Şekil 3’deki soğutmasız grafik

karşılaştırıldığında yaklaşık 5 K sıcaklık düşüşü olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 8’de farklı hızlardaki hava ile soğutmanın 5 C deşarj hızlarındaki karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 6. a) Batarya soğutması için tasarlanan hava aralığının batarya ile görüntüsü b) Hava aralığındaki giriş çıkış tanımlaması
(a) Battery view of the air gap designed for battery cooling b) Input and output identification in the air gap)



Şekil 7. 0,5 m/s'deki hava hızıyla farklı deşarj oranlarındaki soğutma grafiği
(Cooling graph at different discharge rates with air velocity of 0,5 m/s)

Tablo 2. Soğutma sistemlerinin termofiziksel özellikleri
(Thermophysical properties of cooling systems)

Özellik	Hava	Mineral yağ
Hacim	1,225	924
Özgül ısı kapasitesi	1006	1900
Termal iletkenlik	0,0242	0,13
Kinematik vizkozite	$1,46 \times 10^{-5}$	$5,60 \times 10^{-5}$

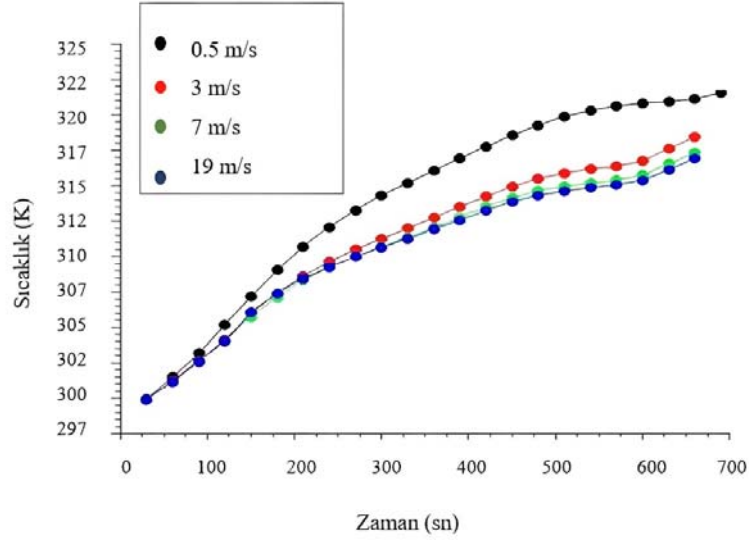
0,5 m/s, 3 m/s, 7 m/s ve 19 m/s farklı hava hızlarında 5 C deşarj hızlarında karşılaştırılması yapıldığında hızın arttıkça sıcaklığın azaldığı gözlemlenmiştir. Hava ile soğutma Şekil 3'deki soğutmasız hali ile karşılaştırıldığında 0,5 m/s hava hızı ile yaklaşık 5 K, 5 m/s hızda yaklaşık 7,5 K, 7 m/s hızında yaklaşık 10 K, 19 m/s hızda ise 11 K sıcaklık düşüşü gözlemlenmiştir. Aynı zamanda Şekil 9'da

soğutucu hızının artırıldığında düzensiz sıcaklık dağılımının olmadığı gösterilmiştir.

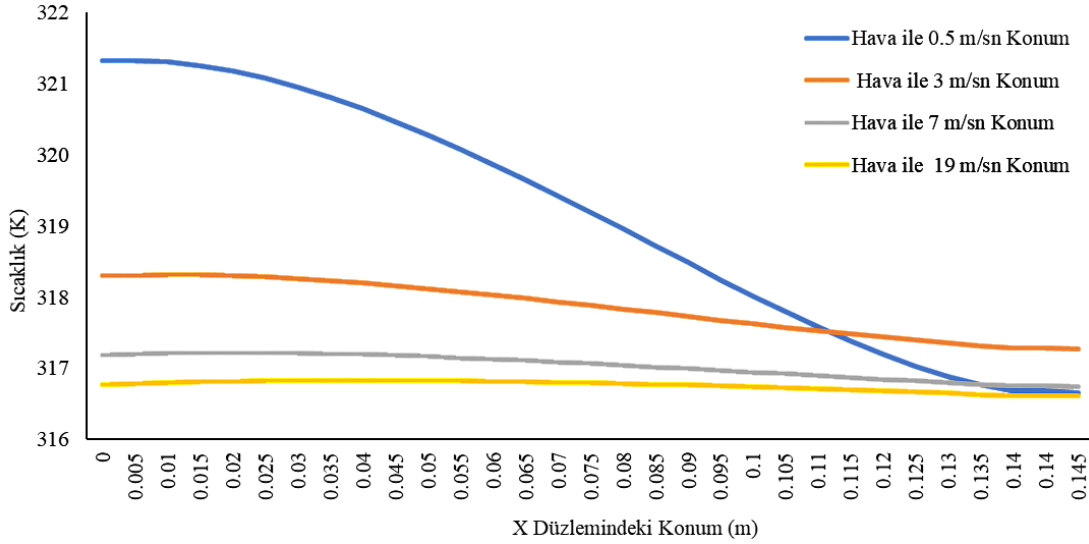
Şekil 9'da batarya x düzlemindeki farklı konumlardaki sıcaklıklar ölçülmüştür. Alınan değerlere göre, soğutucu akışkanın hızı arttıkça düzlem üzerindeki sıcaklıklar neredeyse eşitlenmiştir. Hava ile soğutma sistemi ile bataryada sıcaklık düşüşü gözlemlenirken aynı zamanda düzenli sıcaklık dağılımı sağlanmıştır.

3.2. Sıvı ile Soğutma (Cooling with Liquid)

Ticari olarak oldukça yaygınlaşmış olan sıvı ile soğutma yönteminde Şekil 6'da gösterildiği gibi hava aralığı ve giriş çıkış tanımlaması kullanılmıştır. Batarya hücresi sırasıyla 0,5 C; 1 C; 2 C; 3 C ve 5 C deşarj esnasında iken sıvı ile soğutulmuştur. 0,001 m/s, 0,003 m/s,



Şekil 8. 5 C deşarj hızında farklı hızlarda hava soğutmasının karşılaştırılması
(Comparison of air cooling at different speeds at 5C discharge rate)



Şekil 9. Farklı hava hızlarındaki batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımı
(Temperature distribution on the battery surface at different air velocities)

0,005 m/s, 0,2 m/s giriş hızlarıyla (laminar) 300 K sıcaklığında sıvı gönderilip bataryanın soğuması sağlanmıştır. Şekil 10'da 0,001m/s'deki hava hızıyla farklı deşarj oranlarındaki soğutma grafiği gösterilmiştir.

Şekil 10'a bakıldığında sıvı ile soğutma sisteminin hava ile soğutma sistemine göre daha etkili olduğu görülmüştür. Hava ile soğutmada 5 C deşarj hızında en yüksek hız olan 19 m/s hava hızı ile soğutulduğunda dahi 11 K sıcaklık düşüşü olmasına rağmen, sıvı ile aynı batarya hücresi 0,001 m/s sıvı hızı ile soğutulduğunda yaklaşık 12 K sıcaklık düşüşü gözlemlenmiştir. Şekil 11'de 5 C deşarj hızındaki sıvı soğutma karşılaştırılması yapılmıştır.

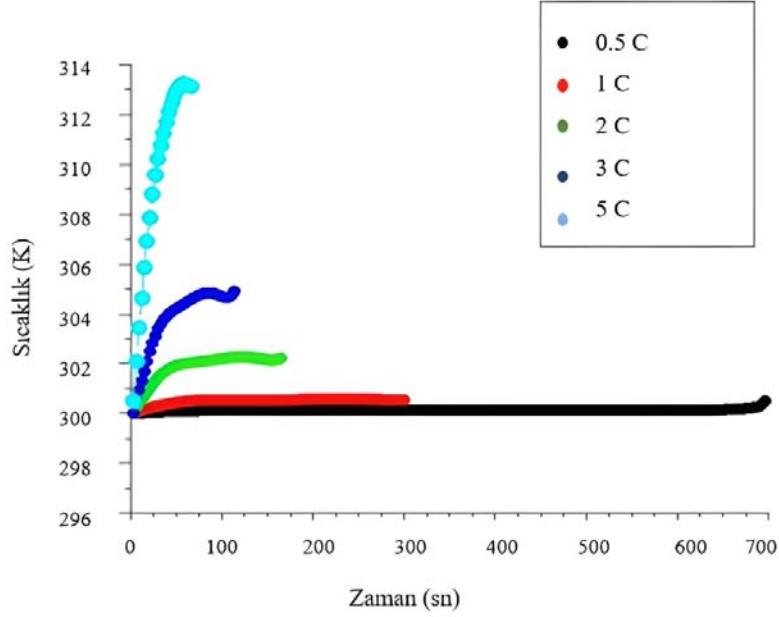
Şekil 11'de 0,001 m/s, 0,003 m/s, 0,005 m/s, 0,2 m/s farklı sıvı hızlarında 5 C deşarj hızlarında karşılaştırılması yapıldığında hız arttıkça sıcaklığın azaldığı gözlemlenmiştir. Sıvı ile soğutma Şekil 3'deki soğutmasız hali ile karşılaştırıldığında en düşük hızda yaklaşık 390

12 K, en yüksek hızda yaklaşık 19 K sıcaklık düşüşü gözlemlenmiştir. Aynı zamanda Şekil 12'de görüldüğü gibi soğutucu hızının artırıldığında düzensiz sıcaklık dağılımının olmadığı gösterilmiştir.

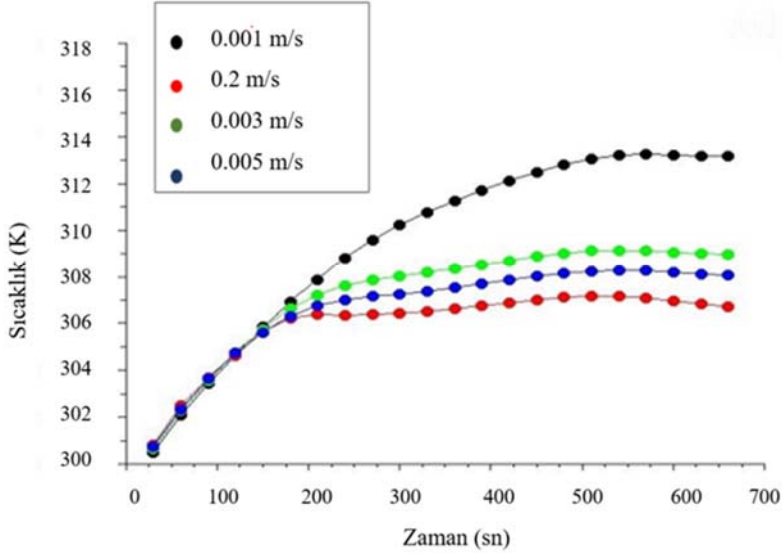
Şekil 12'de batarya x düzlemindeki farklı konumlardaki sıcaklıklar ölçülmüştür. Alınan değerlere göre, sıvının hızı arttıkça düzlem üzerindeki sıcaklıklar neredeyse eşitlenmiştir. Sıvı ile soğutma sistemi ile bataryada sıcaklık düşüşü gözlemlenirken aynı zamanda düzenli sıcaklık dağılımı sağlanmıştır.

3.3. Faz Değişim Materyali ile Soğutma (Cooling with Phase Change Material)

Çeşitli BIYS stratejileri arasında pasif ve aktif tipler göz önünde bulundurulmaktadır. Aktif soğutma sistemlerinin ana dezavantajı, BIYS'nin karmaşıklığını artıran ilave donanım, fanlar, kanallar veya sıvı sirkülasyon pompaları, ısı eşanjörleri ve kompresörlerdir. Hava



Şekil 10. 0,001 m/s'deki sıvı hızıyla farklı deşarj oranlarındaki soğutma grafiği
(Graph of cooling at different discharge rates with liquid velocity at 0.001 m / s)



Şekil 11. 5 C deşarj hızında farklı hızlarda sıvı soğutmasının karşılaştırılması
(Comparison of liquid cooling at different speeds at 5 C discharge rate)

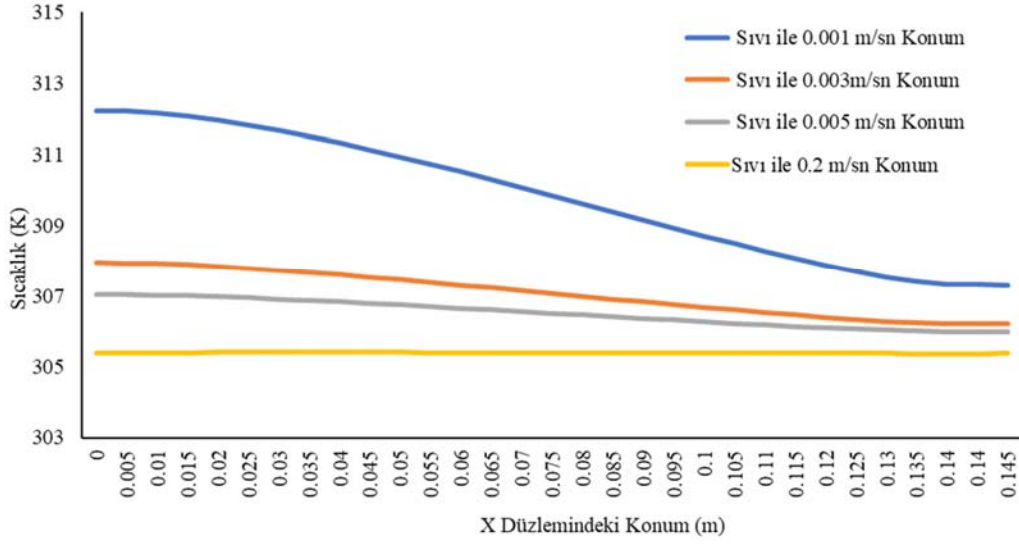
ve sıvı soğutmadaki bu ekstra ağırlıklar FDM ile soğutma da bulunmadığından avantaj olarak değerlendirilmektedir. FDM'nin kullanımına dayanan verimli ve basit termal yönetim sistemleri bulunmaktadır. FDM kullanılması, havadan ve sıvılardan belirli avantajlar sağlamaktadır. Avantajları temel olarak sıcaklık eşitliği, düşük bakım maliyetleri ve düşük parazit enerji tüketiminin yanı sıra düşük sistem hacminin korunmasına yardımcı olan basitleştirme anlamındadır.

Bu çalışmada, batarya çevresine n-octadecane malzemesinde 7mm boyutunda faz değişim materyali tanımlanmıştır. Kutuplar ve hücre için sınır şartları ortam sıcaklığı 294 K ve ısı taşınım katsayısı (h) 7

W/m² K alınmıştır. Malzeme bilgileri Tablo 3'de gösterilmiştir. Hücre bilgisi Tablo 4'te gösterilmiştir.

Faz değişim materyali batarya hücresinin çevresine Şekil 13a'da gösterildiği gibi 7 mm boyutunda olacak şekilde dizayn edilmiştir. Şekil 13b'de bataryaya uygulanan FDM malzemesinin mesh (ağ) görüntüsü verilmiştir.

Tasarlanan modelin ağı 5mm boyutlarında ağ yakınsaması 'coarse' olarak seçilmiştir. Ağ, 3052 düğüm ve 1315 elementten oluşturulmuştur. Mesh kalitesi, mesh sizing bölümündeki kalite ölçütleri ile karşılaştırılıp karar verilmiştir.



Şekil 12. Farklı sıvı hızlarındaki batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımı
(Temperature distribution on the battery surface at different liquid velocities)

Tablo 3. Faz Değişim Materyali Özellikleri (n-octadecane)
(Phase Change Material Properties (n-octadecane))

Özellik	Katı faz $T_s > T$	Peltemsi faz $T_s < T < T_L$	Sıvı faz $T_L > T$
$\rho (kg/m^3)$	814	869	724
$k (W/mk)$	0,358	0,255	0,152
$c_p (\frac{J}{kgK})$	2150	225000	2180
$\mu (\frac{kg}{ms})$	$2,68 \times 10^{-3}$	-	-
$\beta (\frac{1}{K})$	0,0033	-	-
$L (\frac{J}{kg})$	225000	-	-
$T_s (K)$	301,15	-	-
$T_L (K)$	303,15	-	-

Tablo 4. Faz değişim materyallerinde kullanılan hücre malzemeleri (Cell materials used in phase change materials)

Hücre Malzemeleri		
Yoğunluk	2092	kg/m ³
Özgül Isı (Cp)	678	J/kg-K
Termal iletkenlik	18,2	W/m-K
UDS-0	1,19e+06	kg/m-s
UDS-1	9,83e+05	kg/m-s
Elektriksel iletkenlik	3,541e+07	Siemens/m

Şekil 14'de sırasıyla 0,5 C; 1 C; 2 C; 3 C; 5 C deşarj hızlarındaki FDM ile soğutmalı ve soğutmasız halleri karşılaştırılmıştır.

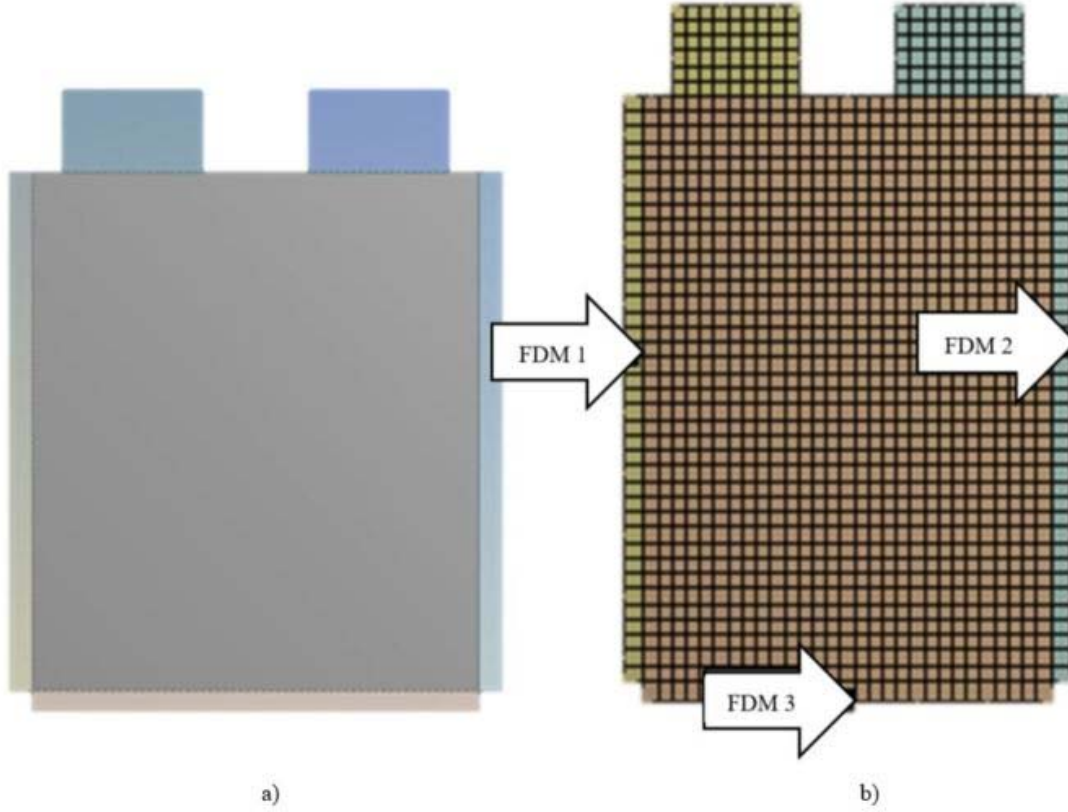
Şekil 14'de FDM ile soğutmada 0,5 C ve 1 C'de ortam sıcaklığına düşerken 2 C'de yaklaşık 5 K, 3 C ve 5 C de yaklaşık 4 K düşüş gözlemlenmiştir. Grafiklerdeki deşarj sonunda anlık sıcaklık artışının seçilen n-octadecane malzemesinin deşarj durumunda sıcaklık artışından dolayı katı halden sıvı hale geçiş esnasındaki erimesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Batarya hücresine hava, sıvı ve faz değişim materyalleri soğutma sistemleri uygulanmış ve performansları incelenmiştir. Hava ve sıvı soğutucu akışkanların soğutucu hızının da deneyleri yapıp incelenmiştir. Üç etkili soğutma yöntemlerinin özeti Tablo 5'te gösterilmiştir.

Şekil 15'de 5 C deşarj hızında hava, sıvı ve faz değişimi ve soğutmasız halinin karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 15'de görüldüğü gibi sıvı ile soğutma, hava ve FDM ile soğutma sistemlerinden daha etkili olmuştur. Bu soğutma sistemlerinin performanslarının karşılaştırılması Eş. 5 ile sağlanmıştır.

$$S_0 = \frac{[\sum_{i=1}^n K(\text{soğutmasız})_i - n \cdot \sum_{i=1}^n K(\text{soğutmalı})_i] \times 100}{\sum_{i=1}^n K(\text{soğutmasız})_i} \quad (5)$$

Burada, $K_{\text{soğutmasız}}$, batarya hücresinin soğutulmamış halinin Kelvin cinsinden sıcaklık değerini, $K_{\text{soğutmalı}}$ batarya hücresinin hava, sıvı ve faz değişimi ile soğutulmuş hallerinin Kelvin cinsinden sıcaklık değerini, n zamana göre alınan sıcaklık değerlerinin sayısını, S_0 ise soğutma oranını temsil etmektedir. Eş. 5'e göre batarya hücresi hava ile %1,11; sıvı ile %3 ve FDM ile %1,33 oranında soğutulmuştur.



Şekil 13. a) Faz değişim materyalinin batarya hücresindeki görüntüsü b) Bataryaya uygulanan fdm malzemesinin mesh(ağ) görüntüsü
(a) Image of phase change material in battery cell b) Mesh image of fdm material applied to battery)

Tablo 5. Soğutma yöntemlerinin özeti (Summary of cooling methods)

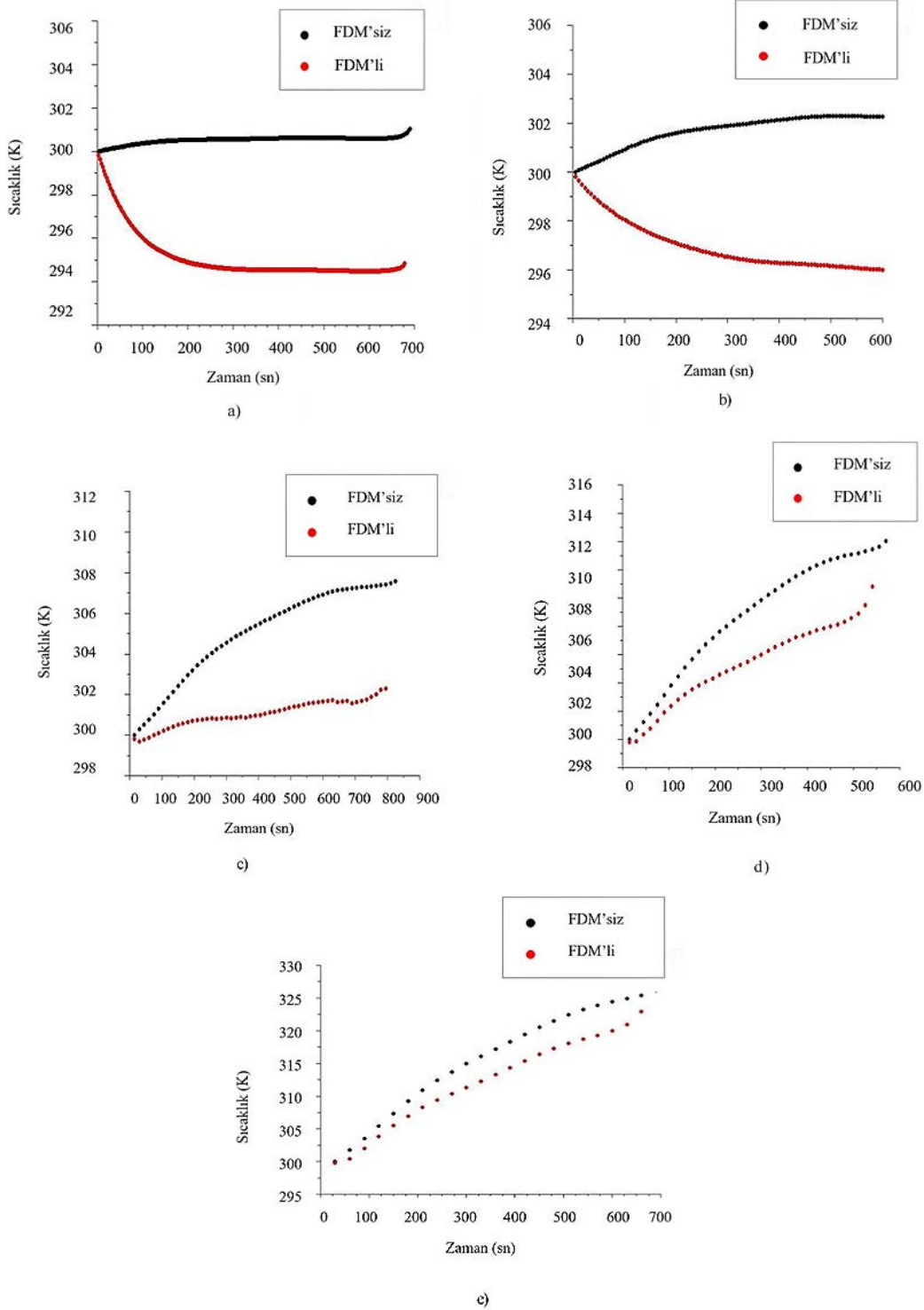
Soğutma Sistemleri	Kullanılan Soğutucu	Soğutucu Hızları	Sıcaklık Düşüşü
Hava (Laminer)	Hava (300 K)	0,5 m/s	5 K
		5 m/s	7,5 K
		7 m/s	10 K
		19 m/s	11 K
Sıvı (Laminer)	Mineral yağ (300 K)	0,001 m/s	12 K
		0,003 m/s	17 K
		0,005 m/s	18 K
		0,2 m/s	19 K
Faz değişimi materyali	n-octadecane malzemesi	Batarya çevresine 7 mm boyutunda dizayn edilmiştir.	0,5 C'de 5 K 1 C'de 5 K 2 C'de 5 K 3 C'de 4 K 5 C'de 4 K

Hava ve sıvı ile soğutma analiz sonuçları Chen vd. [19] tarafından yapılan çalışma ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada, hava ve direk sıvı ile soğutma çalışmalarında farklı soğutucu hızları karşılaştırdıklarında soğutucu hızı arttığında sıcaklık düşüşünün arttığı gözlemlenmiştir.

Hava ile soğutmanın en hızlı soğutucusu ile ($v=20$ m/s) batarya hücresini maksimum $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, direk sıvı soğutmada en hızlı soğutucusu ile ($v=0,01$ m/s) maksimum $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ soğutulmuştur. Direk sıvı ile soğutmanın, hava ile soğutmada daha etkili olduğu gösterilmiştir. Bu makalede ise, hava ile soğutmanın en hızlı soğutucusu ile ($v=19$ m/s) maksimum 11 K , direk sıvı soğutmada en hızlı soğutucusu ile ($v=0,2$

m/s) maksimum 19 K soğutulmuştur. Şekil 16 ve Şekil 17 ile makalenin yapılan diğer çalışma ile farklı materyal (batarya malzemesi ve boyutları) ve uygulama yöntemi (farklı deşarj oranları) farkından dolayı birebir aynı olmadığı ancak uyumlu olduğu gösterilmiştir.

FDM ile soğutma analiz sonuçları Javani vd. [29] tarafından yapılan çalışma ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada faz değişim materyali batarya hücresinin çevresine $3, 6, 9$ mm boyutlarında tasarlanmıştır. Faz değişim materyali ile 2 C deşarj hızındaki batarya hücresi 20 dakikada ortalama 4 K soğutulmuştur. Bu makalede ise, 7 mm

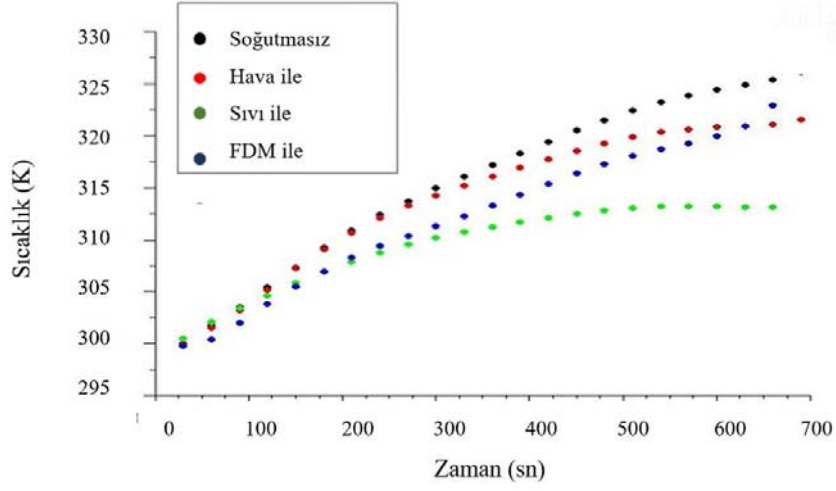


Şekil 14. a) 0,5 C b) 1 C c) 2 C d) 3 C e) 5 C deşarj hızlarında FDM ile soğutma ve soğutmasız karşılaştırılması (a) 0.5 C b) 1 C c) 2 C d) 3 C e) 5 C discharge rates with FDM cooling and non-cooling comparison)

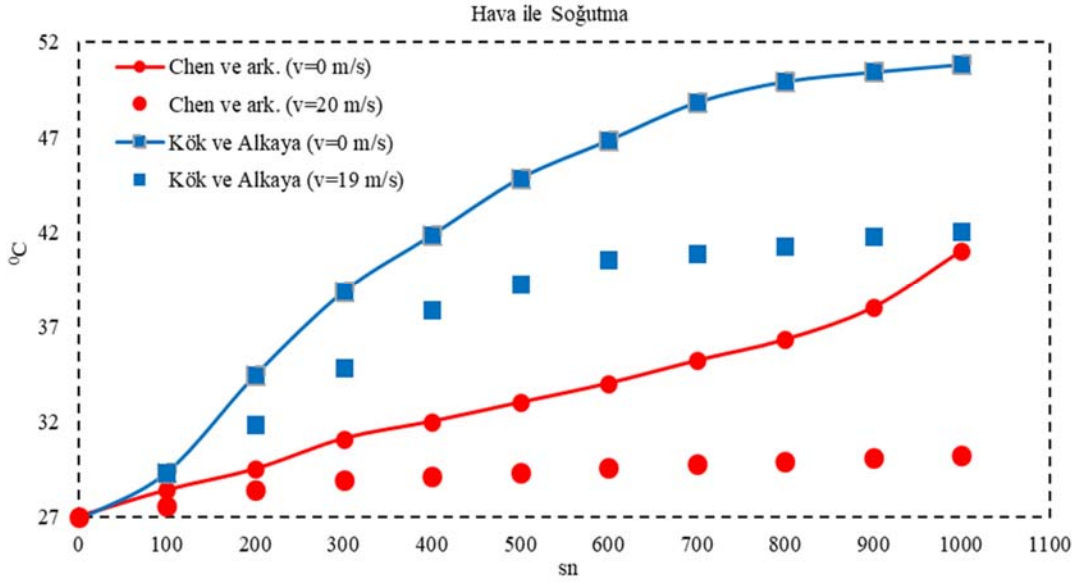
boyutunda kullanılan faz değişim materyali uygulanmış ve 2 C deşarj hızındaki batarya hücresi yaklaşık 5 K soğutulmuştur. Şekil 18 ile makalenin yapılan diğer çalışma ile farklı materyal (batarya malzemesi ve boyutları) ve uygulama yöntemi (farklı deşarj oranları) farkından dolayı birebir aynı olmadığı ancak uyumlu olduğu gösterilmiştir. Uygulanan soğutma sistemleri arasında sıvı ile

soğutma, ticari olarak EA soğutma sistemlerinde diğer soğutma sistemlerine oranla daha çok tercih ediliyor olması bu simülasyon çalışması ile doğrulanmıştır.

Soğutma yöntemlerinin diğer makaleler ile karşılaştırılması Tablo 6'da özetlenmiştir



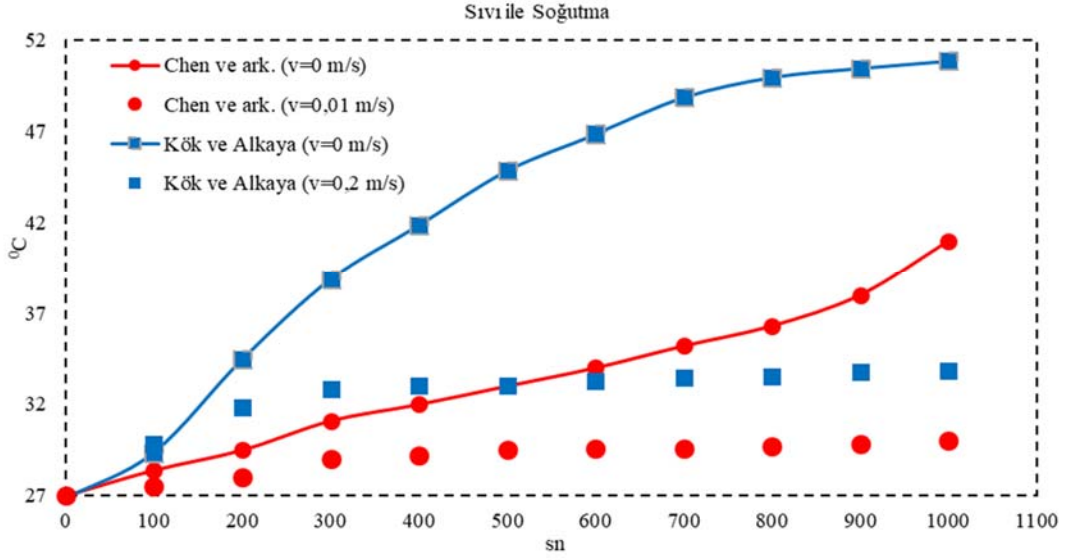
Şekil 15. 5 C deşarj hızındaki soğutmalı ve soğutmasız hallerinin karşılaştırılması
(Comparison of cooled and uncooled states at 5 C discharge rate)



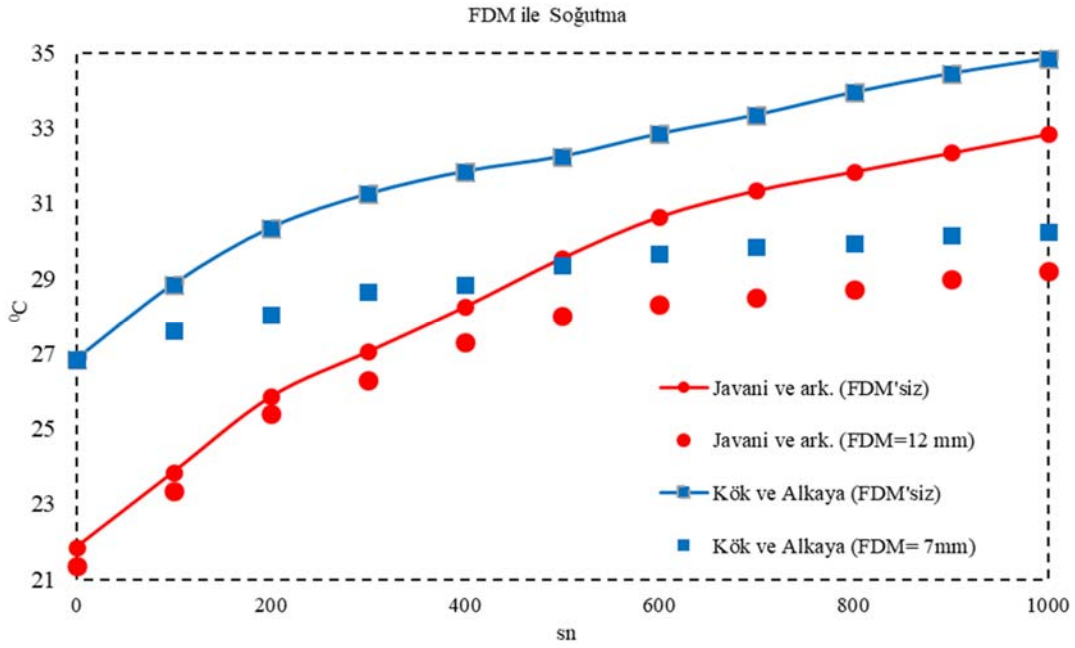
Şekil 16. Hava ile soğutmanın diğer makaleler ile karşılaştırılması (Comparison of air cooling with other articles)

Tablo 6. Soğutma yöntemlerinin diğer makaleler ile karşılaştırılması (Comparison of cooling methods with other articles)

	Soğutma Yöntemi	Soğutma Hızı (m/s)	Batarya Çevresindeki Materyal (mm)	Sıcaklık Düşüşü
Kök ve Alkaya	Hava	19	7	11 K
	Sıvı	0,2		19 K
	FDM	-		~ 5 K
Chen vd.	Hava	20		8 °C
	Sıvı	0,01		12 °C
Javani vd.	FDM	-	3	4K (ort.)
			6	
			9	



Şekil 17. Sıvı ile soğutmanın diğer makaleler ile karşılaştırılması (Comparison of liquid cooling with other articles)



Şekil 18. FDM ile soğutmanın diğer makaleler ile karşılaştırılması (Comparison of FDM cooling with other articles)

4. Simgeler (Symbols)

BIYS	: Batarya Isıl Yönetim Sistemi
EA	: Elektrikli Araç
FDM	: Faz Değişim Materyali
HEA	: Hibrit Elektrikli Araç
LIB	: Lityum İyon Batarya
MSMD	: Multi-Scale Multi-Domain Battery Model
NTGK	: Newman, Tiedemann, Gu ve Kim ampirik modeli

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, Lityum iyon batarya hücresinin farklı yükler altındaki davranışları sonlu elemanlar yöntemini kullanan simülasyon programı 396

yardımıyla gözlemlenmiştir. 14,6 Ah zarf tipi LIB hücresinin 0,5 C; 1 C; 2 C; 3 C ve 5 C deşarj oranlarında ısıl davranışı analiz edilmiştir. Yüksek deşarj oranlarında deşarj süresinin azaldığı ve batarya hücresindeki sıcaklığın arttığı görülmüştür. Bu sıcaklık hücrenin merkezinde daha yüksek iken kutuplara doğru azalmıştır. Batarya hücreleri farklı sıcaklık aralığında incelendiğinde düzensiz sıcaklık dağılımına sahip olduğu görülmüştür. Bu düzensizliği ortadan kaldırmak için üç farklı soğutma sistemi ile soğutulmuş batarya hücrelerine hava, sıvı ve faz değişim materyalleri soğutma sistemlerinin hepsi batarya deşarj esnasında iken uygulanmış ve soğutma performansları gözlemlenmiştir. Hava ve sıvı soğutma sisteminde hava kanalları oluşturularak bataryada aktif soğutma gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemlerle batarya sıcaklığını düşürmekle birlikte akışkanın hızı

arttırıldığında düzensiz dağılımın ortadan kaldırıldığı görülmüştür. Faz değişim materyali gibi pasif bir yöntem kullanılarak malzemenin sıcaklıkla birlikte eriyerek bataryaya bir sıcaklık bariyeri oluşturduğu ve batarya yüzeyindeki sıcaklığı kısmen de olsa düzenli hale getirdiği tespit edilmiştir. Bataryaya uygulanan soğutma sistemleri performans açısından karşılaştırıldığında ise hava ile %1,11; FDM ile %1,33 oranında soğutur iken sıvı ile %3 soğutmuştur. Oranlara bakıldığında sıvı ile soğutmanın diğer soğutmalardan daha etkili olduğu ve EA soğutmalarında en çok sıvı tercih edilmesini doğrular nitelikte olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, yüksek doğrulukta ve etkili bir termal yönetim sistemi ile verimli bir batarya modeli oldukça arzu edilmektedir. BIYS'ler, pratik uygulamalara daha benzer olan dinamik çevrim ile batarya paketi seviyesine uzatılmalıdır, böylece şarj / deşarj döngüleri sırasında ısı birikimi daha iyi düşünülmelidir. Etkili bir ısı yönetim sistemi batarya performansını artırır, performansı artan batarya düşük menzil problemini giderir ve çevre dostu elektrikli araçların hayat kalitemizi artırmasını sağlar.

Kaynaklar (References)

- Zhao G., Wang X., Negnevitsky M., Zhang H., A review of air-cooling battery thermal management systems for electric and hybrid electric vehicles, *Journal of Power Sources*, 501, 230001, 2021.
- Ring M. J., Lindner D., Cross E. F., Schlesinger M. E., Causes of the global warming observed since the 19th century, *Atmospheric and Climate Sciences*, 2(04), 401, 2012.
- Kocakulak T., Solmaz H., Control of pre and post transmission parallel hybrid vehicles with fuzzy logic method and comparison with other power systems, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(4), 2269-2286, 2020.
- Smith K. R., Jerrett M., Anderson H. R., Burnett R. T., Stone V., Derwent R., Pope C. A., Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: health implications of short-lived greenhouse pollutants, *The Lancet*, 37 4(9707), 2091-2103, 2009.
- Başlamışlı S.Ç., İnce B., Design of energy management system algorithms for the improvement of fuel economy of intracity hybrid buses and development of an adaptive hybrid algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(1), 559-575, 2021.
- International Energy Agency. 'Global EV Outlook 2020' <https://www.iea.org/> Son Erişim Tarihi: Temmuz 2020
- Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçlar Derneği.'Elektrikli ve Hibrit Araç Satış Raporları' <http://tehad.org/> Son erişim Tarihi: 16 Ocak 2021
- Moralı U., Erol S., Electrochemical impedance analysis of 18650 lithium-ion and 6HR61 nickel-metal hydride rechargeable batteries, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(1), 297-309, 2020.
- Huat B.S.L., Thermal management of electric vehicle battery packs, Doctoral Thesis, National University of Singapore, Singapore, 2014.
- Van W., Scrosati B., Advances in lithium ion batteries introduction, In *Advances in Lithium-Ion Batteries*, Springer, Boston, 1-5, 2002.
- Arcus C., Tesla Model S Battery vs Nissan LEAF Battery vs Chevy Volt Battery, 2017.
- Chen S. C., Wan C. C., Wang Y. Y., Thermal Analysis of Lithium-Ion Batteries, *Journal of Power Sources*, v140, pp 111-124, 2005.
- Gu W. B., Wang C. Y., Thermal-electrochemical modeling of battery systems, *Journal of The Electrochemical Society*, 147(8), 2910-2922, 2000.
- Tie S. F., Tan C. W., A review of energy sources and energy management system in electric vehicles, *Renewable and sustainable energy reviews*, 20, 82-102, 2013.
- Huang Q., Yan M., Jiang Z., Thermal study on single electrodes in lithium-ion battery, *Journal of Power Sources*, 156(2), 541-546, 2006.
- Thakur A. K., Prabakaran R., Elkadeem M. R., Sharshir S. W., Arıcı M., Wang C., Saidur R., 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, 2020.
- Liu H., Wei Z., He W., Zhao J., Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review, *Energy conversion and management*, 150, 304-330, 2017.
- Park H., A design of air flow configuration for cooling lithium ion battery in hybrid electric vehicles, *Journal of Power Sources*, 239:30-6, 2013.
- Chen D., Jiang J., Kim G.H., Yang C., Pesaran A., Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells, *Applied Thermal Engineering*, 94:846-54, 2016.
- Bandhauer T.M., Garimella S., Passive internal thermal management system for batteries using microscale liquid-vapor phase change, *Applied Thermal Engineering*, 61:756-69, 2013.
- Alipanah M., Li X., Numerical studies of lithium-ion battery thermal management systems using phase change materials and metal foams, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 1159-1168, 2016.
- Li X., He F., Zhang G., Huang Q., Zhou D., Experiment and simulation for pouch battery with silica cooling plates and copper mesh based air cooling thermal management system, *Applied Thermal Engineering*, 146, 866-880, 2019.
- Na X., Kang H., Wang T., Wang Y., Reverse layered air flow for Li-ion battery thermal management, *Applied Thermal Engineering*, 143, 257-262, 2018.
- Wang C., Zhang G., Meng L., Li X., Situ W., Lv Y., Rao M., Liquid cooling based on thermal silica plate for battery thermal management system, *International Journal of Energy Research*, 41(15), 2468-2479, 2017.
- Xie Y., He X. J., Hu X. S., Li W., Zhang Y. J., Liu B., Sun Y. T., An improved resistance-based thermal model for a pouch lithium-ion battery considering heat generation of posts, *Applied Thermal Engineering*, 164, 114455, 2020.
- ANSYS Fluent, Advanced Add-On Modules Manual ANSYS®, Inc. Canonsburg, PA: SAS IP Inc, 2015.
- Kwon, K. H., Shin, C. B., Kang, T. H., Kim, C. S., A two-dimensional modeling of a lithium-polymer battery, *Journal of Power Sources*, 163(1), 151-157, 2006.
- Kök C., Alkaya A., Investigation of Thermal Behavior of Lithium-Ion Batteries under Different Loads, *European Mechanical Science*, 4 (3), 96-102, 2020.
- Javani N., Dincer I., Naterer G. F., Yilbas B. S., Heat transfer and thermal management with PCMs in a Li-ion battery cell for electric vehicles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72, 690-703, 2014.

