

## Zorlanmış Hava Soğutma Esaslı Lityum Bazlı Silindirik bir Batarya Hücresinin Isı Dağılım Performansının Nümerik İncelenmesi

Seyda ÖZBEKTAŞ<sup>1</sup>, Bilal SUNGUR<sup>2\*</sup>, Alirıza KALELİ<sup>3</sup>

### Öz

Batarya modülünden çekilen güç miktarının artmasıyla batarya hücrelerinin ve dolayısıyla batarya modülünün sıcaklıkları da artmaktadır. Bu durum batarya hücresinde kapasite ve performans kaybına sebep olmaktadır. Bu amaçla, bu çalışmada giriş kısmına fan yerleştirilen bir kanal içerisinde konumlandırılmış silindirik bir LiFeS<sub>2</sub> batarya hücresinin 1000 rpm, 2000 rpm ve 3000 rpm olmak üzere üç farklı fan devrinde ve 0.2C, 0.4C, 0.6C ve 0.8C olmak üzere dört farklı deşarj oranında sergilediği termal ve elektriksel performans nümerik olarak incelenmiştir. Nümerik modelleme için ANSYS Fluent paket programı içerisinde yer alan İkili Potansiyel Çok Ölçekli Çok Alanlı (MSMD) batarya modülü kullanılmıştır. Lityum bataryanın termal ve elektriksel karakteristiğinin modellenmesinde Eşdeğer Devre Modeli (ECM) kullanılmıştır. Sonuçlar deşarj oranları açısından değerlendirildiğinde, artan deşarj oranlarıyla batarya sıcaklıklarının da arttığı ve verebildikleri gerilim değerlerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, deşarj oranının artmasıyla batarya hücresinin stabil olarak sağladığı gerilim süresi de azalmıştır. Bu bağlamda 0.2C deşarj oranında gerilim değeri 1.42 V seviyelerinde stabil bir seyir izlerken, 0.8C’de 0.8V ve 1V arasında değişkenlik göstermiştir. Fan devrinin etkisi incelendiğinde, 0.8C deşarj oranında hesaplama süresi sonunda batarya hücresi üzerinde meydana gelen ortalama sıcaklıklar 1000 rpm durumuna göre karşılaştırıldığında fan devrinin iki katına çıkmasıyla %20.35, üç katına çıkmasıyla %28.56 oranında azalmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Lityum Batarya, Deşarj Hızı, Batarya Modelleme, Fanlı Soğutma.

## Numerical Modelling of a Heat Dissipation Performance of a Lithium-Based Cylindrical Battery Based on Forced Air Cooling

### Abstract

As the amount of power drawn from the battery module increases, the temperatures of the battery cells and therefore the battery module also increase. This causes loss of capacity and performance in the battery cell. For this purpose, in this study, the thermal and electrical performance of a cylindrical LiFeS<sub>2</sub> battery cell located in a duct with a fan at the entrance is numerically investigated at three different fan revolutions 1000 rpm, 2000 rpm and 3000 rpm and four different discharge rates 0.2C, 0.4C, 0.6C and 0.8C. The Dual Potential Multi-Scale Multi-Domain (MSMD) battery module in the ANSYS Fluent package was used for numerical modelling. Equivalent Circuit Model (ECM) was used to model the thermal and electrical characteristics of the lithium battery. When the results were evaluated in terms of discharge rates, it was observed that battery temperatures increased and voltage values decreased with increasing discharge rates. In addition, the duration of the stable voltage provided by the battery cell decreased with increasing discharge rate. In this context, while the voltage value at 0.2C discharge rate was stable at 1.42 V, it varied between 0.8V and 1V at 0.8C. When the effect of fan revolution was examined, the average temperatures on the battery cell at the end of the calculation duration at 0.8C discharge rate decreased by 20.35% with doubling the fan revolution and 28.56% with tripling the fan revolution compared to 1000 rpm.

**Keywords:** Lithium Battery, Discharge Rate, Battery Modelling, Fan Cooling.

<sup>1</sup>Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, seyda.ozbektas@omu.edu.tr

<sup>2</sup>Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, bilal.sungur@samsun.edu.tr

<sup>3</sup>Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, aliriza.kaleli@samsun.edu.tr

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

## 1. Giriş

Çoğunlukla taşıtlardan oluşan ulaştırma sektörü, dünya çapında toplam enerji talebinin ve toplam insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının yaklaşık beşte birini oluşturmaktadır (Bilgen, 2014). Bu durum sınırlı fosil yakıt kaynaklarının hızla tükenmesine ve bu yakıt türlerinin kullanımından dolayı çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bu dezavantajların aşılabilmesi için son yıllarda temiz enerjiye dayalı ulaşım sistemleri üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır. Bu bağlamda elektrikli ve hibrit elektrikli araçlara yönelik eğilim tüm dünyada hızla artmakta ve bu araç türleri fosil yakıt kullanan içten yanmalı motora dayalı araçların yerini almaktadır.

Elektrik enerjisinin depolanmasını ve kullanımını sağlayan bataryalar, elektrikli ve hibrit elektrikli araçların performansını belirleyen en kritik faktördür. Bataryaların çalışma performansı sıcaklığa bağlıdır. Bataryaların şarj ve deşarj kapasiteleri sıcaklıktan oldukça etkilenir. Elektrikli ve hibrit elektrikli araçların hızlanma performansı özellikle deşarj oranına göre belirlenmektedir. Ayrıca batarya ömrü açısından optimum batarya sıcaklığı da çok önemlidir.

Lityum-iyon bataryalar, düşük kendi kendine deşarj oranı, uzun çevrim ömrü, hafıza etkisinin olmaması, daha yüksek verimlilik ve enerji yoğunluğu gibi öne çıkan özellikleri nedeniyle EV ve HEV'lerde genellikle gelişmiş enerji kaynakları olarak tercih edilmektedir (Deng, 2015). Lityum iyon bataryalar için en uygun çalışma aralığı 20°C ila 40°C'dir. Ayrıca batarya paketindeki hücreler arasındaki maksimum sıcaklık farkının 5°C'yi geçmemesi istenmektedir (Greco ve ark., 2015). Aksi takdirde deşarj oranında dengesizlik meydana gelir ve performansın bozulmasına neden olur (Shahid ve Agelin-Chaab, 2017). Bu sorunlara çözüm olarak bataryanın termal durumunu kontrol etmek ve optimum sıcaklık aralığında tutmak için Batarya Termal Yönetim Sistemleri (BTYS) geliştirilmiştir. BTYS'de hava soğutma, sıvı soğutma ve faz değiştiren malzeme bazlı soğutma gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır (Rao ve ark., 2017).

Son yıllarda Batarya Termal Yönetim Sistemleri üzerine birçok çalışma yapılmıştır. (Lyu ve ark., 2021) sıvı soğutucu ile entegre edilmiş bir termoelektrik soğutucu kullanarak akrilik bir kutuya yerleştirilmiş altı batarya hücresini soğutmaya çalışmıştır. BTYS ile batarya takımının sıcaklığı normal duruma kıyasla yaklaşık 20°C azalmıştır. (Li ve ark., 2019) sekiz lityum iyon bataryadan oluşan bir batarya modülü için en uygun soğutma yöntemini araştırmıştır. Farklı deşarj oranlarında termoelektrik soğutucu, doğal ve zorlanmış konveksiyon yöntemlerini karşılaştırmışlar ve termoelektrik soğutucunun diğer yöntemlere göre daha iyi soğutma performansı sergilediğini tespit etmişlerdir. (Li ve ark., 2022) yirmi lityum-iyon bataryadan oluşan bir batarya modülünün soğutma performansına mini kanal soğutma plakalarının etkisini sayısal olarak incelemiştir. Giriş hızı 0,05 m/s olan soğutma plakalı model ile 4C deşarj oranında bataryaların en yüksek sıcaklığını 303,26 K ile, bataryalar arasındaki en yüksek sıcaklık farkını ise 1,98 K ile sınırlamayı başarmışlardır. (Jiang

ve ark., 2017) doğal ve zorlamalı hava soğutması kullanarak alüminyum tüp kabuklu batarya takımının soğutulması üzerinde çalışmıştır. Bataryalardaki sıcaklık artışını ve bataryalar arasındaki sıcaklık farkını azaltmak için her batarya hücresi kompozit faz değiştirici malzeme ile kaplanmıştır. Kompozit malzeme, 5C deşarj hızında batarya sıcaklıklarını büyük ölçüde azaltmıştır. (Rao ve ark., 2017) akış hızını ve alüminyum blok uzunluğunu değiştirerek termal yönetim sistemine dayalı lityum iyon bataryalardan oluşan sıvı soğutmalı bir batarya modülü üzerine çalışmıştır. Uzunluk ve akış hızının artmasıyla birlikte batarya modülündeki en yüksek sıcaklık ve bataryalar arasındaki en yüksek sıcaklık farkının azaldığını tespit etmişlerdir.

BTYS için batarya hücrelerinin elektrokimyasal karakteristiklerinin de bilinmesi gerekmektedir. Bu bağlamda literatürde batarya karakteristiğinin modellenmesi üzerine birçok çalışma mevcuttur. (Hatchard ve ark., 2001) 18650 lityum iyon batarya hücresi için tek boyutlu bir tahmin modeli geliştirmiştir. (Guo ve ark., 2010) yüksek kapasiteli lityum iyon bataryaların termal açıdan zayıf çalışma koşulları altında performansını tahmin etmek için üç boyutlu bir model önermiş ve bu koşullar altında sıcaklık dağılımını analiz etmiştir. (Chen ve ark., 2005) lityum iyon bataryanın termal davranışını incelemek için hücre yığınlarının katmanlı yapısını, batarya modülünün durumunu ve her iki öge arasındaki boşluğu hesaba katarak ayrıntılı bir üç boyutlu termal model geliştirmiştir. (Kök ve Alkaya, 2020) NTGK modeli kullanarak farklı deşarj oranlarında plaka tipi bir lityum iyon bataryanın termal davranışını modellemiştir. (Alsharif ve ark., 2022) bir lityum bataryanın Hibrit Güç Darbesi Karakterizasyonu (HPPC) testinden elde edilen sonuçlarla MATLAB Simulink'te bir eşdeğer devre modeli kurmuş ve bu modele ait parametreleri kullanarak ANSYS Fluent paket programı içerisinde yer alan MSMD modeliyle bataryanın termal davranışını incelemişlerdir. (Alsabari ve ark., 2021) bir lityum iyon bataryanın elektriksel davranışını şarj durumu (SOC) ve uç gerilimi parametrelerine göre Matlab programında İkinci Derece Eşdeğer Devre Modeli kullanarak modellemiştir. (Madani ve ark., 2019) ikinci derece elektriksel eşdeğer devre modeliyle kapasitesi 13 Ah olan lityum titanat oksit batarya hücresinin elektrokimyasal karakteristiğini modellemiştir. (Yao ve ark., 2013) MATLAB Simulink ile lityum ferro fosfat batarya hücresinin akım-gerilim performansını tespit eden bir model ortaya koymuştur. (Chaoui ve Gualous, 2017) lityum iyon bataryalar için literatürde mevcut birçok tahmin algoritmasıyla kullanılacak evrensel bir telafi stratejisi öneren hibrit bir tahmin yöntemi sunmuştur. (Liu ve ark., 2013) batarya hücresinin şarj durumunu (SOC) daha iyi tahmin edebilen doğrusal olmayan bir gözlemci tasarımı ortaya koymuştur. (Gao ve ark., 2017) konvektif termal modelini eşdeğer devre modeliyle birleştirerek LiFePO<sub>4</sub> batarya hücresinin gerçek bir ortamdaki sıcaklığını ve şarj durumunu tahmin eden yeni bir model geliştirmiştir.

Bu çalışmada da elektrokimyasal davranışı eşdeğer devre modeliyle karakterize edilen bir lityum batarya hücresinin kare kesitli bir kanal içerisinde farklı fan devirlerinde ve farklı deşarj

oranlarında sergilediği termal ve elektriksel davranış nümerik olarak incelenmiştir. Bu bağlamda lityum batarya hücresinin termal karakteristiği Alsharif ve ark.'larının (Alsharif ve ark., 2022) deneysel çalışmasıyla doğrulanmıştır. Literatürden farklı olarak bu çalışmada batarya hücresi gerçek durumlarda olduğu gibi bir fan ile zorlamalı taşınımına maruz bırakılmış ve farklı deşarj oranlarında sergilediği termal davranışın yanısıra elektriksel davranışta incelenmiştir. Bu çalışmayla hava ile soğutulan ve çok sayıda batarya hücresinden oluşan bir batarya modülü tasarımı için farklı deşarj oranlarında ihtiyaç duyulan soğutma performansı hakkında bir fikir vermesi amaçlanmıştır. Bu duruma ek olarak batarya hücresinin farklı deşarj oranlarında verebileceği gerilim değerleri açısından da bir değerlendirme yapılmış olup ne tür uygulamalarda kullanılabileceği üzerine literatüre katkı sağlaması hedeflenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Matematiksel Model

Lityum bataryalarda, anot ve katot, metal folyoların yüzeyine kaplanmış aktif malzemelerden oluşmaktadır. Bu bataryalarda zıt kutuplu folyolar arasına polimer bir ayırıcı yerleştirilerek elektronların geçişi engellenir. Bir bataryadaki kimyasal, termal ve elektriksel süreçlerin gelişimini tahmin etmek için Tek Potansiyel Ampirik Batarya Modeli ve İkili Potansiyel Çok Ölçekli Çok Alanlı (MSMD) Batarya Modeli olmak üzere iki model kullanılmaktadır. Tek Potansiyel Ampirik Batarya Modeli, akım toplayıcısı, elektrotlar ve ayırıcının geometrisi tamamen çözüldüğünde kullanışlı bir modeldir. Bu model, tek bir batarya hücresinde elektrot ölçeği tahminler için uygundur. Diğer taraftan, özellikle karmaşık geometri sistemlerindeki tüm elektrokimyasal olayları incelemek için sınırlıdır. Hatta tek bir batarya hücresi için bile tüm katmanları açıkça çözmek maliyetli olabilmektedir. Ayrıca, birçok endüstriyel uygulama, seri veya paralel bağlanmış bir dizi hücreden oluşan bir batarya modülü kullanılmaktadır (Kök ve Alkaya, 2020).

MSMD batarya modeli, bu sınırlamaları aşmak için çok ölçekli çok boyutlu bir yaklaşıma dayanan homojen bir model kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda, tüm batarya, ortotropik bir sürekli olarak düşünülür ve dolayısıyla ağ, bataryanın mikroyapısı tarafından artık sınırlanmaz. Bu modelde batarya termal ve elektrik alanları, Denklem 1-3'deki diferansiyel denklemler kullanılarak batarya hücresi ölçeğinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) alanında çözülür.

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \sigma_+ |\nabla \varphi_+|^2 + \sigma_- |\nabla \varphi_-|^2 + \dot{q}_{ECh} + \dot{q}_{short} + \dot{q}_{abuse} \quad (1)$$

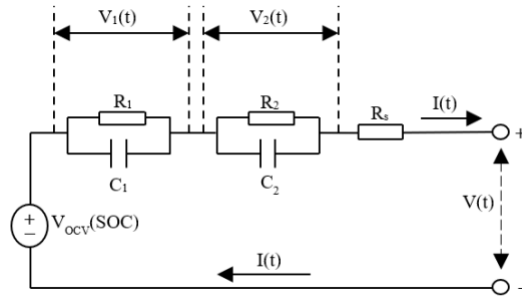
$$\nabla \cdot (\sigma_+ \nabla \varphi_+) = -(j_{ECh} - j_{short}) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_- \nabla \varphi_-) = j_{ECh} - j_{short} \quad ((3))$$

Bu denklemlerde  $\sigma_+$  ve  $\sigma_-$  sırasıyla pozitif ve negatif elektrotlar için etkili elektrik iletkenlikleridir.  $\varphi_+$  ve  $\varphi_-$  sırasıyla pozitif ve negatif elektrotlar için faz potansiyelleridir.  $j_{ECh}$  ve  $\dot{q}_{ECh}$  sırasıyla hacimsel akım aktarım hızı ve elektrokimyasal reaksiyonlardan kaynaklanan elektrokimyasal reaksiyon ısısıdır.  $j_{short}$  ve  $\dot{q}_{short}$  sırasıyla bataryanın dahili kısa devresinden kaynaklanan akım aktarım hızı ve ısı üretim hızıdır.  $\dot{q}_{abuse}$ , termal olarak kötü çalışma koşulu altında termal kaçak reaksiyonlarından kaynaklanan ısı üretimidir. Bu modelde  $j_{ECh}$  ve  $\dot{q}_{ECh}$  kaynak terimleri bir elektrokimyasal alt model kullanılarak elde edilmektedir. Çeşitli analiz gereksinimlerine uygun olarak MSMD modelde Newman, Tiedemann, Gu ve Kim (NTGK) ampirik modeli, Eşdeğer Devre Modeli (ECM) ve Newman alt Pseudo 2D (P2D) modeli olmak üzere üç elektrokimyasal alt model bulunmaktadır. Bu modeller, farklı düzenlemelere sahip batarya sistemlerinde çeşitli uzunluk ölçeklerine yayılan fiziksel ve elektrokimyasal olayları inceleme esnekliği sunmaktadır (ANSYS Fluent Battery Module Manual (2015)).

Bu çalışmada yarı ampirik bir model olan Eşdeğer Devre Modeli kullanılmıştır. Bu model, karmaşık bir sistemdeki elemanları basit elektrik devre elemanları ile temsil etmektedir. Eşdeğer Devre Modeli, bataryanın iç yapısını temsil eden direnç, kapasitans ve indüktans gibi elektrik devre elemanlarını içerir ve her bir eleman, bataryanın belirli bir özelliğini temsil eder. Eşdeğer Devre Modeli, bataryanın performansını anlamak, optimize etmek ve kontrol etmek için tasarım sürecinde ve gerçek kullanım sırasında öne çıkan bir modeldir (Tran ve ark., 2021).

Bu çalışmada nümerik modelleme Ansys Fluent paket program kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ansys Fluent, Chen'in çalışmalarını takip ederek altı parametrelili Eşdeğer Devre Modelini (ECM) benimsemiştir. Üç direnç ve iki kapasitörden oluşan bu devre modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Devredeki voltaj kaynağı, hücre yüksüz ve tam dengede olduğunda batarya terminallerinden geçen voltajı tanımlayan açık devre voltajını ( $V_{OCV}$ ) temsil eder. Seri bağlı direnç ( $R_s$ ), bataryanın ısı enerjisi olarak harcadığı gücü açıklayan Ohmik dirençtir (Plett, 2015). İki direnç-kapasitör alt devreleri ( $R_1, C_1, R_2$  ve  $C_2$ ), bataryanın difüzyon dinamiklerini açıklayan devredeki zaman sabitlerini temsil etmektedir.  $V(t)$ , bataryanın kayıplarını elde etmek için açık devre geriliminden çıkarılan devrenin pasif bileşenleri boyunca ölçülen gerilim düşüşüdür.  $I(t)$ , devrenin girişi olan ve deneysel olarak elde edilen akım ölçümleridir (Alsharif ve ark., 2022).



Şekil 1. Eşdeğer devre modeli

Şekilde gerilim-akım ilişkisi aşağıdaki elektrik devre denklemlerinin çözülmesiyle elde edilmektedir.

$$V = V_{ocv}(SOC) - V_1 - V_2 - R_s(SOC)I(t) \quad (4)$$

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{1}{R_1(SOC)C_1(SOC)}V_1 - \frac{1}{C_1(SOC)}I(t) \quad (5)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{1}{R_2(SOC)C_2(SOC)}V_2 - \frac{1}{C_2(SOC)}I(t) \quad (6)$$

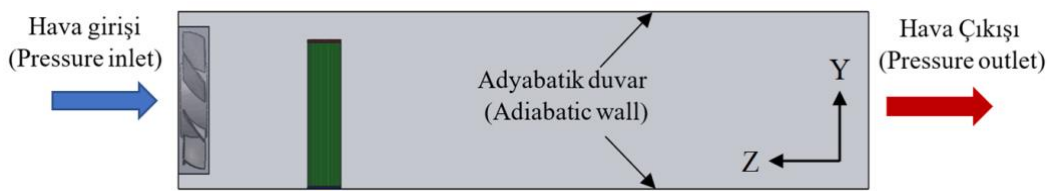
$$\frac{d(SOC)}{dt} = \frac{I(t)}{3600Q_{ref}} \quad (7)$$

Denklem 4'te V, Devre Ağı çözüm yönteminde doğrudan devre çözümünden elde edilebilen veya MSMD çözüm yönteminden  $\varphi_+$ -  $\varphi_-$  olarak hesaplanabilen batarya hücresi voltajıdır. Belirli bir batarya için açık devre voltajı, rezistör dirençlerinin, kapasitör kapasitanslarının, bataryanın şarj durumunun (SOC) ve sıcaklığın fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonlar Ansys Fluent'te iki boyutlu tablo, polinom ve Chen'in sunduğu biçim olmak üzere üç farklı şekilde ifade edilebilmektedir. Diğer iki yöntemden farklı olarak tablo yönteminde polinom ve Chen biçiminde dikkate alınmayan sıcaklık etkisi hesaplamaya dahil edilebilmektedir. Ancak, Alsharif ve ark.'larının (Alsharif ve ark., 2022) çalışmasında sıcaklık sabit tutulduğu için bu çalışmada da sabit olarak benimsenmiştir. Bu bağlamda bu çalışmada tablo yöntemi benimsenmiş ve ECM parametrelerinin sabit sıcaklıkta SOC değerine bağlı değişimi literatürdeki Alsharif ve ark.'larının (Alsharif ve ark., 2022) çalışmasından bir boyutlu tablo olarak alınmıştır.

## 2.2. Sınır Koşulları

Çalışma kapsamında kare kesitli bir kanal içerisine yerleştirilmiş ve fan ile soğutulan bir lityum bataryanın farklı deşarj oranlarında ve farklı fan devirlerinde sergilemiş olduğu termal davranış nümerik olarak incelenmiştir. Termal davranışa ek olarak bataryanın farklı deşarj oranlarında

sergilediği elektriksel davranışı da çalışma içerisinde verilmiştir. Bataryanın termal ve elektriksel davranışı ANSYS Fluent paket programı içerisinde yer alan MSMD batarya modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Batarya içerisinde meydana gelen kimyasal reaksiyonların modellenmesinde Eşdeğer Devre Modeli (ECM) kullanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan lityum bataryaya ait özellikler Tablo 1’de verilmiştir. Lityum bataryaya ait ECM parametreleri Alsharif ve ark.’larının (Alsharif ve ark., 2022) çalışmasından alınmıştır. Bu bağlamda batarya 0.2C, 0.4C, 0.6C ve 0.8C olmak üzere dört farklı oranda deşarj edilmiştir. Fan devri 1000 rpm, 2000 rpm ve 3000 rpm olarak seçilmiş ve fanın dönme hareketi için ağ hareketi (mesh motion) seçeneği aktif edilmiştir. Hava akışının modellenmesinde Standart k-ε model seçilmiş olup, yakın duvar davranışı olarak gelişmiş duvar (enhanced wall treatment) seçilmiştir. Fan tarafından havanın çekilebilmesi için kare kesitli kanalın giriş kısmında basınç girişi (pressure inlet), çıkış kısmında ise basınç çıkışı (pressure outlet) sınır koşulları kullanılmıştır. Kanalın yan yüzeylerinde ise adyabatik duvar (adiabatic wall) sınır şartı tanımlanmıştır. Modele ait sınır koşulları Şekil 2’de gösterilmiştir. Hava giriş sıcaklığı bataryanın literatürdeki çalışmada HPPC testinin gerçekleştirildiği sıcaklığa göre seçilmiş olup 26.85°C olarak tanımlanmıştır (Alsharif ve ark., 2022). Hesaplamalar zamana bağlı olarak üç boyutlu koşullarda gerçekleştirilmiştir. Toplam hesaplama zamanı literatürdeki çalışmayla aynı ve 3000 s olarak belirlenmiş, zaman adımı ise 30 s seçilmiştir (Alsharif ve ark., 2022). Bu şartlar altında hesaplamalara fanın dönme hareketiyle sürüklenen havanın kararlı hale getirilmesiyle başlanmıştır. Bu amaçla batarya modeli aktif edilmeden akış analizi 350 adım ve toplamda 10500 s boyunca gerçekleştirilmiştir. Kanal içerisindeki akış kararlı hale geldikten sonra batarya modeli aktif edilmiş ve farklı deşarj oranlarında hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

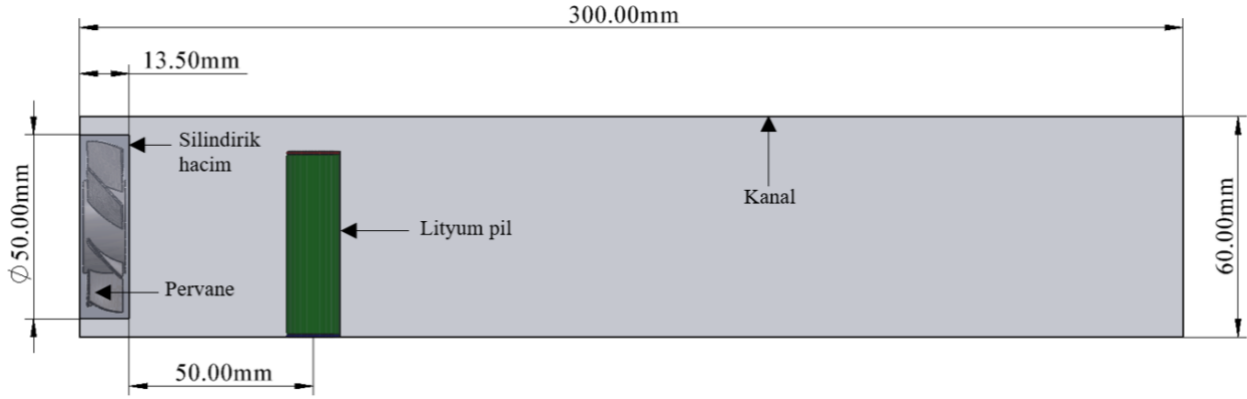


Şekil 2. Modele ait sınır koşulları

### 2.3. Geometri

Nümerik modele ait geometri lityum batarya, pervane, silindirik hacim ve kare kesitli bir kanaldan oluşmaktadır. Modele ait geometri ve boyutlar Şekil 3’de gösterilmiştir. Pervane, 50 mm çapında ve 13.50 mm genişliğinde silindirik bir hacmin içerisinde merkezlenmiş ve bu hacim kanal girişine sıfır bir şekilde ve merkezlenmiş olarak yerleştirilmiştir. Fan ile silindirik hacim yüzeyleri arasında 1 mm mesafe bırakılmıştır. Batarya hücresi silindirik hacme çok yakın konulduğunda pervane merkezinde hava akışı açısından ölü bölge oluşması nedeniyle iyi soğutulamayacaktır. Diğer

tarafından batarya hücresi çok uzağa konulduğunda hava hızı düşük olacağından yine kötü bir soğutma performansı elde edilecektir. Bu nedenle hava hızının yüksek olduğu ve hava akışında ölü bölgenin az olduğu bir mesafe olarak lityum batarya silindirik hacimden 50 mm mesafede ve kanalı merkezleyecek şekilde XZ düzleminde konumlandırılmıştır. Hava akışının gerçekleştiği kanalın kesiti 60 mm x 60 mm boyutunda ve uzunluğu 300 mm'dir. Lityum batarya, pozitif, negatif ve aktif olmak üzere üç bölgeden oluşmaktadır. Pozitif ve negatif bölgelerin yüksekliği 0.8 mm, aktif bölgenin yüksekliği ise 48.9 mm'dir.



Şekil 3. Modele ait geometri ve boyutlar

Tablo 1. LiFeS<sub>2</sub> batarya hücresi özellikleri (Alsharif ve ark., 2022)

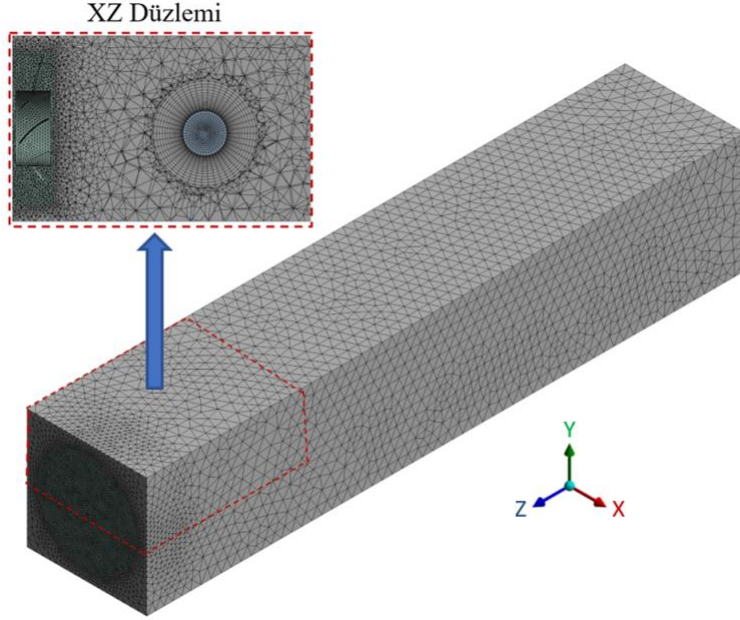
Parametre	Değer
Nominal Kapasite [mAh]	3000
Nominal Gerilim [V]	1.5
Durdurma Gerilimi [V]	0.8
Boyutlar [mm]	Ø14.5 x 50.5

## 2.4. Ağ Yapısı

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği programlarında hesaplamaların yapılabilmesi için modellenen geometrinin ağ yapısıyla örülmesi gerekmektedir. Hesaplamaların yapıldığı ağ yapısı Şekil 4'te gösterilmiştir. Elde edilen sonuçların tutarlılığı ve doğruluğu, ağ yapısının kalitesi ile doğrudan ilişkilidir. Bu amaçla ağ yapılarının çarpıklık ve ortogonal kalitesinin sırasıyla 0-0,25 ve 0,75-1 aralığında olması istenmektedir (Ozbektas ve ark., 2023). Ayrıca ağ yapısında eleman tipi ve boyutu da önemlidir. Geometri ile ağ yapısı arasında iyi bir uyum sağlamak için geometriye uygun eleman tipi seçilmelidir. Bu bağlamda bu çalışmada batarya üzerinde ve yakın çevresinde altı yüzlü (hexahedral) eleman tipi kullanılırken, geri kalan alanlarda dört yüzlü (tetrahedral) eleman tipi kullanılmıştır. Eleman boyutu küçüldükçe genellikle daha iyi bir ağ yapısı elde edilmektedir ancak bu durum çözüm için gereken süreyi arttırmakta ve bilgisayar işlemcilerine ağır bir yük



bindirmektedir. Bu durumda, zamandan tasarruf etmek ve ağ yapısının hesaplamalar sonucunda elde edilen parametreler üzerindeki etkisini en aza indirmek için ağ yapısının optimize edilmesi gerekmektedir.

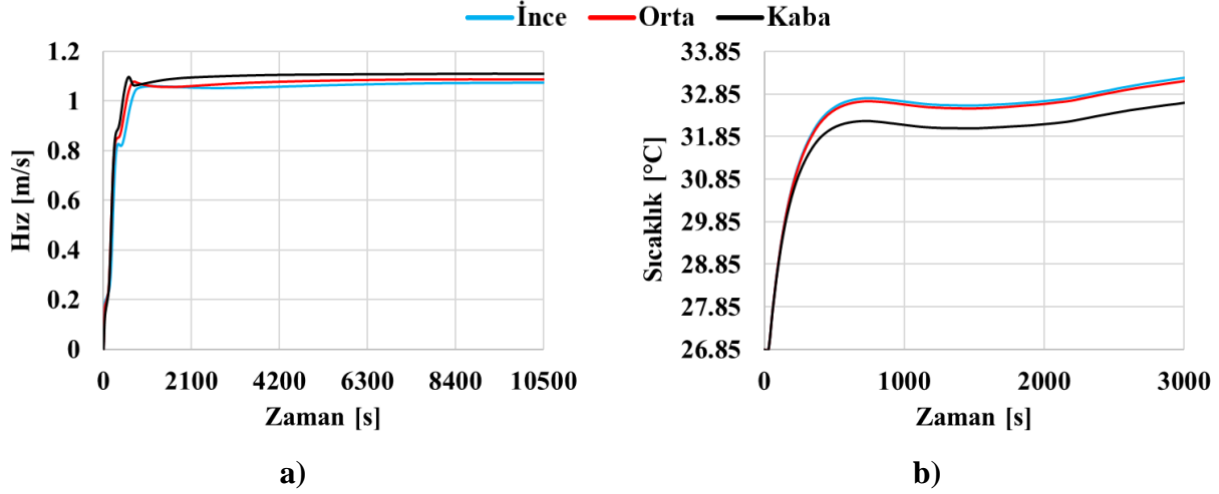


Şekil 4. Modele ait ağ yapısı

Bu çalışmada da ağdan bağımsızlık testi gerçekleştirilerek optimum ağ yapısı belirlenmiştir. Ağdan bağımsızlık testi hava hızının ve batarya sıcaklığının zamana bağlı değişimi göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiş ve Tablo 2'de verilmiştir. Tabloya göre hava hızındaki bir önceki ağ yapısına göre değişimler göz önüne alındığında %1.15'lik ve batarya sıcaklığındaki %0.21'lik değişimle orta ağ boyutu optimal ağ yapısı olarak seçilmiştir. Bu bağlamda hava hızının ağdan bağımsızlık testi 2000 rpm fan devrinde ve fandan 30 mm uzaklıktaki düzlem üzerinde meydana gelen ortalama hıza göre gerçekleştirilmiştir. Batarya sıcaklığının ağdan bağımsızlık testi ise 26.85°C hava sıcaklığında ve 0.5C deşarj oranında batarya üzerinde meydana gelen ortalama sıcaklığa göre gerçekleştirilmiştir. Hava hızının ve batarya sıcaklığının farklı ağ boyutlarında zamana bağlı değişimi Şekil 5'te gösterilmiştir.

Tablo 2. Ağdan bağımsızlık testi

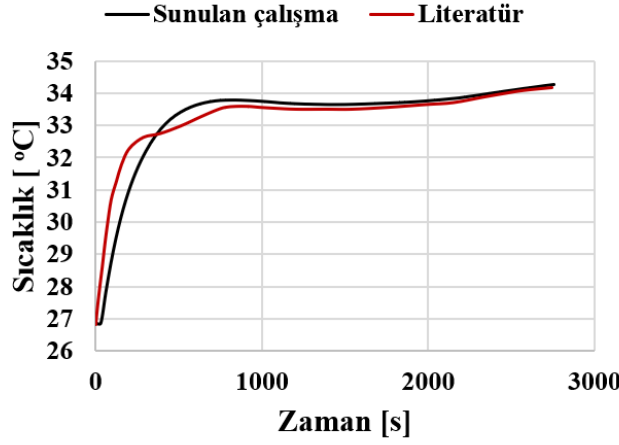
Ağ boyutu	Eleman Sayısı	Hız (m/s)	Hızdaki değişim (%)	Batarya sıcaklığı (°C)	Batarya sıcaklığındaki değişim (%)
Kaba	408898	1.109291	-	32.6402	-
<b>Orta</b>	463229	1.087518	1.96	33.1600	1.59
İnce	697564	1.074922	1.15	33.2313	0.21



Şekil 5. a) Hava hızının ve b) batarya sıcaklığının farklı ağ boyutlarında zamana bağlı değişimi

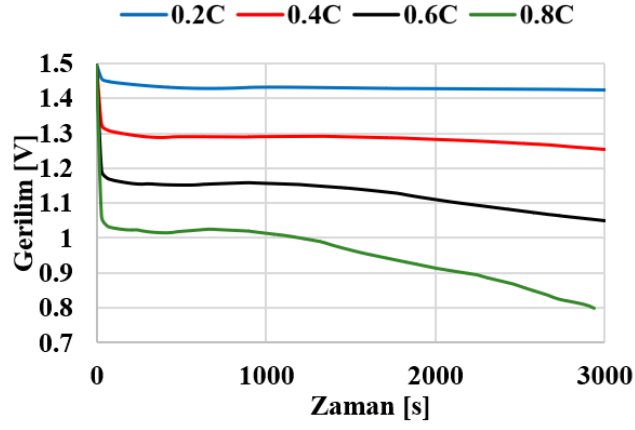
### 3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada 0.2C, 0.4C, 0.6C ve 0.8C olmak üzere farklı oranlarda deşarj edilen ve fan ile soğutulan silindirik bir lityum bataryanın farklı fan devirlerinde sergilediği termal ve elektriksel davranış nümerik olarak incelenmiştir. Lityum bataryaya ait karakteristik özellikleri tanımlayan ECM parametreleri Alsharif ve ark.'larının (Alsharif ve ark., 2022) çalışmasından alınmış olup, 0.5C deşarj oranında tek batarya hücresi için termal davranış zamana bağlı olarak doğrulanmıştır. 0.5C deşarj oranı için lityum bataryanın zamana bağlı termal davranışının literatürdeki çalışmayla karşılaştırması Şekil 6'da verilmiştir. Literatürdeki çalışmada 0.5C deşarj oranında bataryanın yaklaşık 2800 s boyunca sergilediği elektriksel davranış verilmiştir. Bu nedenle bu çalışmada da doğrulama işlemi 2800 s'ye göre gerçekleştirilmiş, geri kalan durumlar ise 3000 s'ye değerlendirilmiştir. Batarya sıcaklığının zamana bağlı değişim grafiği değerlendirildiğinde literatürdeki çalışma ve sunulan çalışma arasında iyi bir uyum sağlanmıştır. Model doğrulamasından sonra batarya hücresi, girişine fan yerleştirilen kare kesitli bir kanal içerisinde konumlandırılmış ve kanal içerisinde bataryanın farklı fan devirlerinde ve deşarj oranlarında sergilediği termal davranışı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar batarya sıcaklığının zamana ve fan devrine bağlı değişimi, batarya hücresi geriliminin zamana bağlı değişimi, kanal içerisinde meydana gelen sıcaklık dağılımı ve hız vektörleri açısından değerlendirilmiştir.



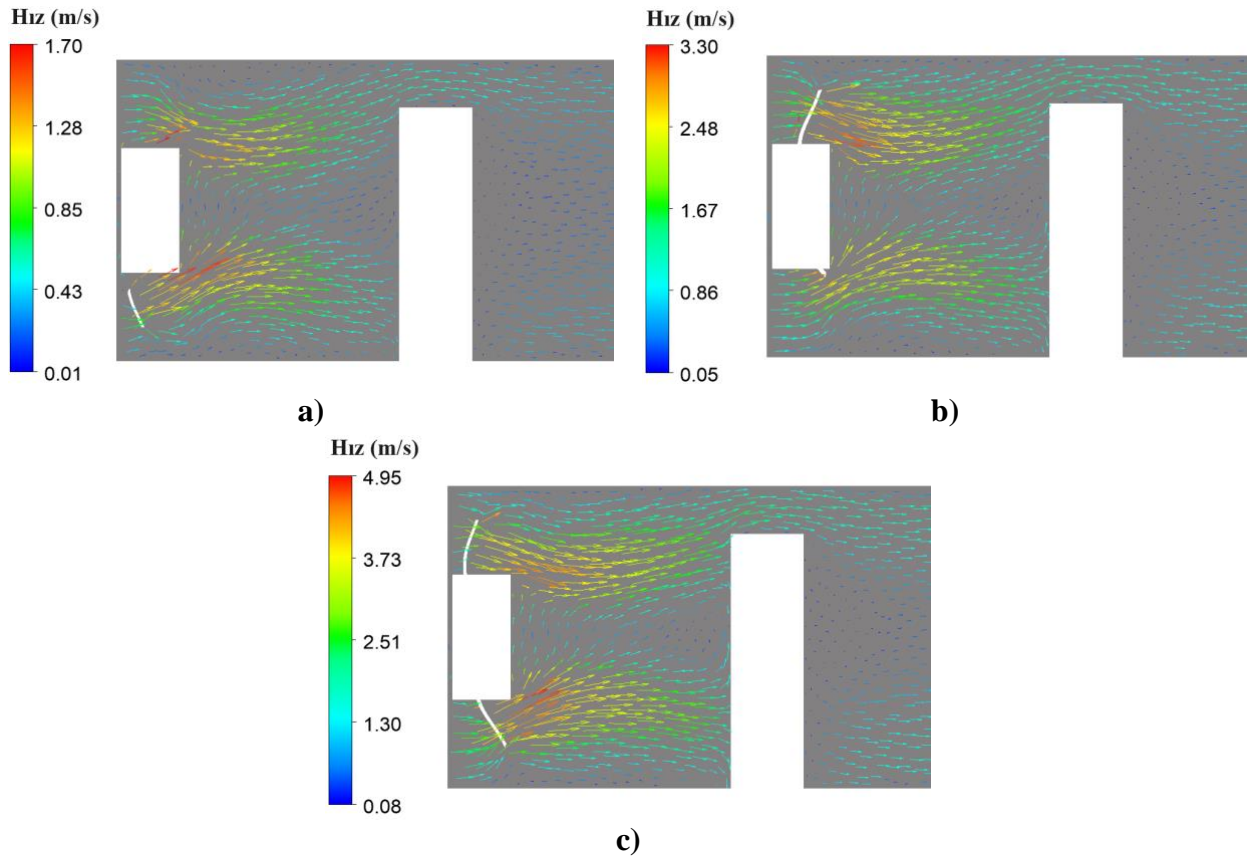
Şekil 6. 0.5C deşarj oranı için lityum bataryanın zamana bağlı termal davranışının literatürdeki çalışmayla karşılaştırması

Lityum bataryanın farklı deşarj oranlarında sergilediği elektriksel davranış Şekil 7’de gösterilmiştir. Genel olarak bakıldığında, başlangıçta batarya hücrelerine yük binmesiyle gerilim değerlerinde ani düşüşler gözlemlenmiştir. Deşarj oranı arttıkça düşüş miktarları da artmıştır. Buna bağlı olarak bataryanın farklı deşarj oranlarında verebildiği gerilim değerleri de farklı olmuştur. Batarya hücresi daha düşük deşarj oranında daha yüksek gerilim verebilirken, yüksek deşarj oranında daha düşük gerilim sağlamıştır. Ayrıca, batarya düşük deşarj oranında stabil bir gerilim değeri sağlayabilirken, deşarj oranı arttıkça verebileceği gerilim değeri belli bir zaman sonra düşüşe geçmiştir. Deşarj oranının artmasıyla birlikte bu düşüş miktarı artmış ve stabil olarak verebildiği gerilim süresi azalmıştır. Bu bağlamda 0.2C deşarj oranında batarya tüm süre boyunca stabil olarak kabaca 1.42 V gerilim verebilmiştir. 0.4C deşarj oranında batarya hücresi yaklaşık olarak 2000 s boyunca 1.29 V gerilim sağlayabilmiş ve sonrasında 1.25 V civarlarına düşmüştür. 0.6C deşarj oranında batarya hücresi yaklaşık olarak 1500 s boyunca 1.15 V gerilim sağladıktan sonra 1.05 V seviyelerine düşmüştür. 0.8C deşarj oranında ise batarya hücresi 1000 s boyunca kabaca 1 V gerilim değeri vermiş ve sonrasında diğer deşarj oranlarına göre daha hızlı bir şekilde ve daha yüksek bir düşüşle 0.8 V seviyelerine gerilemiştir. Ayrıca, 0.8C deşarj oranında batarya hücresi 3000 s’yi tamamlayamadan durma voltajına gelmiştir.



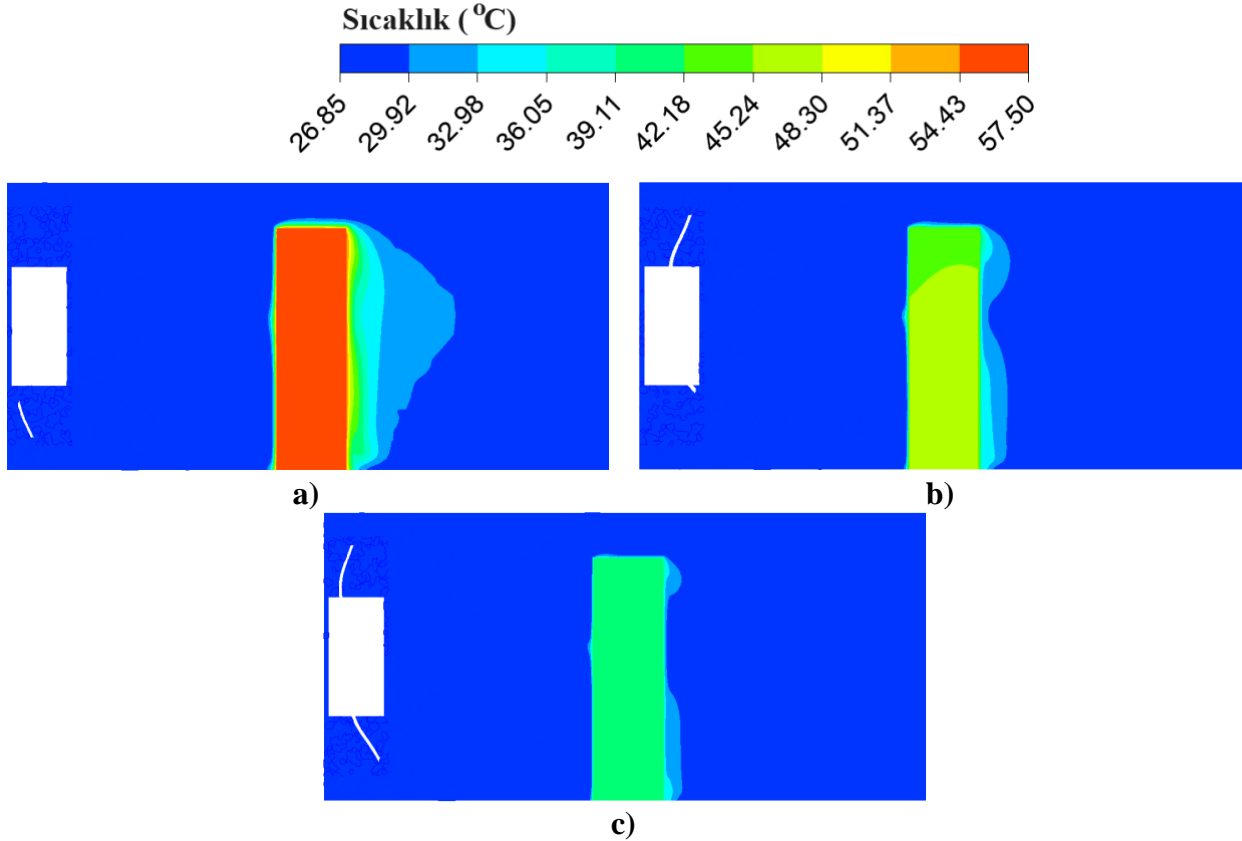
Şekil 7. Farklı deşarj oranlarında batarya hücresi geriliminin zamana bağılı değişimi

Şekil 8’de hava akışının kararlı hale geldikten sonraki durum için kanalın ortasında YZ düzlemi üzerinde farklı fan devirlerindeki hız vektörü dağılımı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde fanın dönme hareketiyle hava akışı merkeze doğru yönelmiş ve sonrasında yayılarak dağılmıştır. Beklenildiği üzere fan devrinin artmasıyla birlikte hava hızları da artmıştır. Bu bağlamda verilen düzlem üzerinde en yüksek hızlar 1000 rpm için 1.70 m/s, 2000 rpm için 3.30 m/s, 3000 rpm için 4.95 m/s seviyelerinde meydana gelmiştir.



Şekil 8. Kararlı haldeki hava akışına ait hız vektörlerinin fan devrine bağılı değişimi. a) 1000 rpm, b) 2000 rpm ve c) 3000 rpm

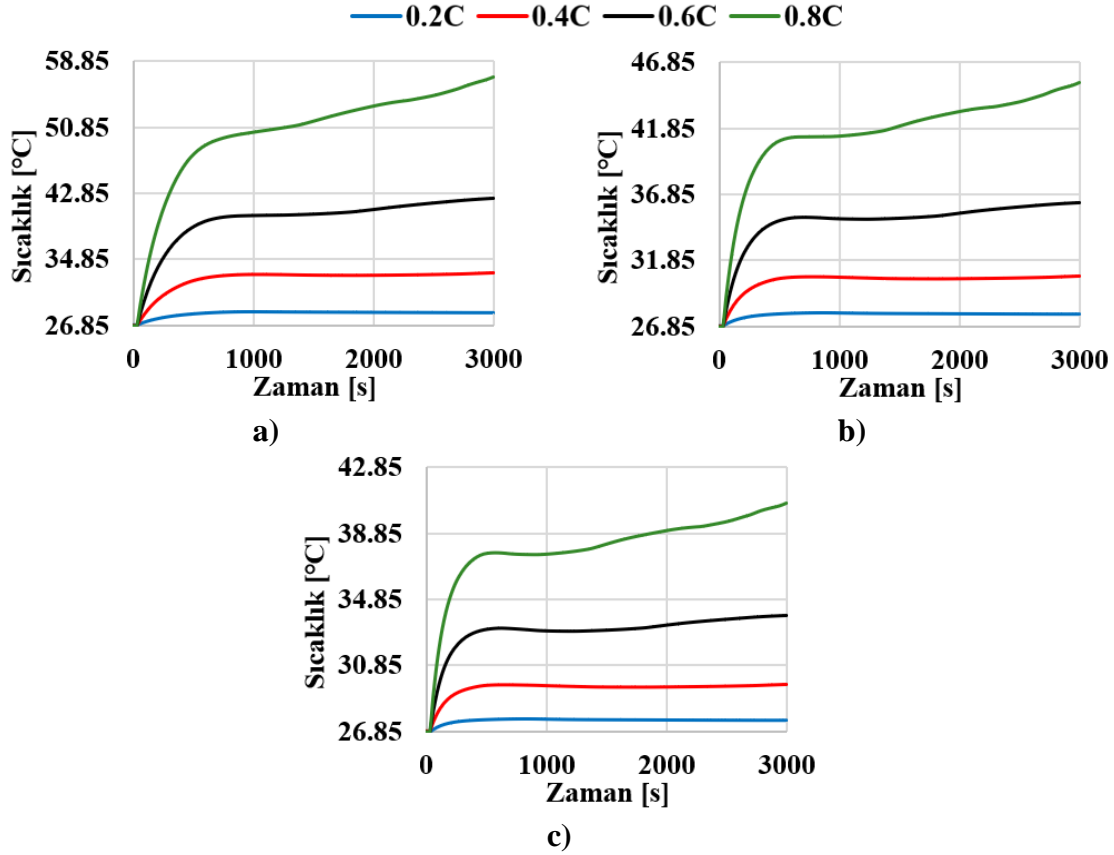
Hesaplama süresi sonunda 0.8C deşarj oranı için farklı fan devirlerinde kanalın ortasında YZ düzlemi üzerinde meydana gelen sıcaklık dağılımı Şekil 9’da gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde fan devrinin ve dolayısıyla hava hızının artmasıyla batarya hücresi sıcaklıkları azalmıştır. Bu bağlamda ortalama batarya sıcaklıkları 1000 rpm için 57.0°C, 2000 rpm için 45.4°C ve 3000 rpm için 40.7°C civarlarına ulaşmıştır.



**Şekil 9.** 3000 saniye ve 0.8C deşarj oranında farklı fan devirlerinde YZ düzlemi üzerindeki sıcaklık dağılımları. **a)** 1000 rpm, **b)** 2000 rpm ve **c)** 3000 rpm

Farklı fan devirlerinde ve deşarj oranlarında batarya hücresi üzerinde meydana gelen sıcaklıkların zamana bağlı değişimi Şekil 10’da verilmiştir. Batarya sıcaklıkları genel olarak zamanla artış göstermiştir. Özellikle başlangıç kısmında batarya sıcaklıklarındaki artış çok daha hızlı gerçekleşmiştir. Ancak, 0.2C ve 0.4C gibi düşük deşarj oranlarında bu sıcaklık artışı belli bir süreden sonra durmuş ve batarya sıcaklığı sabit kalmıştır. 0.6C ve 0.8C oranlarında ise batarya sıcaklıkları incelenen süre boyunca artmaya devam etmiştir. Deşarj oranının artması batarya hücresi sıcaklıklarını arttırırken fan devrinin artmasıyla batarya sıcaklıklarında düşüş meydana gelmiştir. Ancak, 0.2C deşarj oranında üç fan devrinde de batarya sıcaklıkları hemen hemen birbiriyle ve ortam sıcaklığıyla aynı kalmıştır. Bu durum 0.2C deşarj oranında yüksek fan devri kullanımının gereksiz olduğunu ortaya koymuştur. Diğer taraftan 0.8C deşarj oranında ve 1000 rpm fan devrinde batarya hücresi

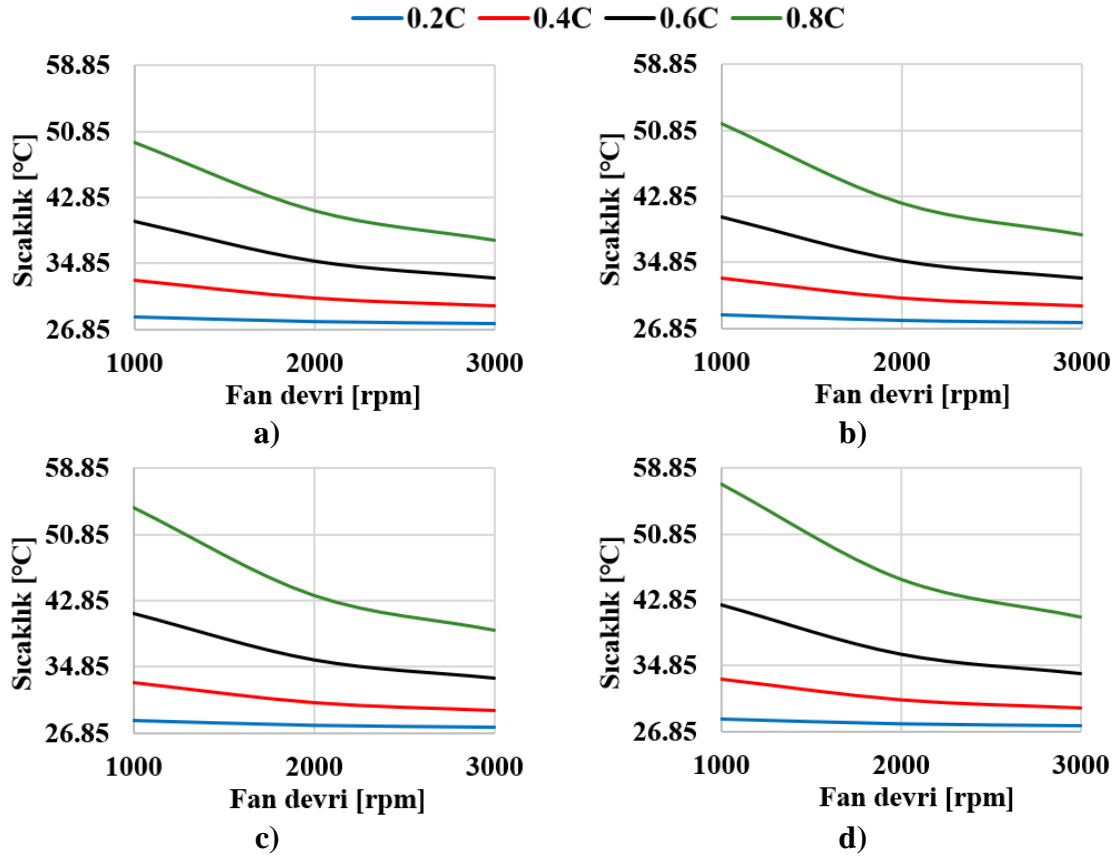
çalışma sıcaklığı aralığının neredeyse dışına çıkmış ve bu fan devrinin bu deşarj oranı için yetersiz olduğunu göstermiştir.



**Şekil 10.** Farklı fan devirlerinde ve deşarj oranlarında batarya hücresi üzerinde meydana gelen sıcaklıkların zamana bağlı değişimi. a) 1000 rpm, b) 2000 rpm ve c) 3000 rpm

Farklı zamanlarda ve deşarj oranlarında batarya hücresi üzerinde meydana gelen sıcaklıkların fan devrine bağlı değişimi Şekil 11’de verilmiştir. Fan devrinin artması tüm deşarj oranlarında batarya hücresi sıcaklığını düşürmüştür. Farklı deşarj oranları için batarya hücresinde meydana gelen sıcaklıklar arasındaki fark fan devrinin artmasıyla azalmıştır. Diğer taraftan geçen sürenin artmasıyla farklı deşarj oranları için batarya hücresinde meydana gelen sıcaklıklar arasındaki fark artmıştır. 0.2C deşarj oranında batarya hücresi sıcaklığı şekilde incelenen dört farklı zamanda ve üç farklı fan devrinde de hemen hemen aynı kalmıştır. Bu bağlamda 0.2C deşarj oranında batarya hücresi sıcaklığı 1000 rpm, 2000 rpm ve 3000 rpm fan devirlerinde yaklaşık olarak 28°C’de sabit kalmıştır. 0.4C deşarj oranında batarya hücresi sıcaklığı fan devriyle azalmış ancak farklı zamanlarda çok az bir değişim meydana gelmiştir. 0.4C deşarj oranında batarya hücresi sıcaklıkları şekilde incelenen dört zaman için kabaca 1000 rpm fan devrinde 33°C, 2000 rpm’de 30.5°C, 3000 rpm’de 29.6°C’dir. 0.6C deşarj oranında fan devrinin artmasıyla sıcaklıklar düşerken, özellikle 2250 s’den sonra sıcaklıklarda gözle görülür bir artış gerçekleşmiştir. Bu bağlamda fan devrinin 1000 rpm’den 3000 rpm’e çıkmasıyla batarya hücresi sıcaklığında kabaca 8°C düşüş meydana gelmiştir. 750 s ve 3000 s arasında sıcaklıklar kabaca 1000 rpm için 2°C, 2000 rpm için 1°C, 3000 rpm için 0.8°C artmıştır. 0.8C deşarj oranı için

1000 rpm ve 3000 rpm fan devri arasında batarya hücresi sıcaklığındaki düşüş miktarı diğer durumlara göre daha büyük olmuştur. Bu fark zamanla giderek artmıştır. Ayrıca, 750 s'den 3000 s'ye kadar batarya hücresi sıcaklıklarında diğer durumlara göre daha büyük artışlar meydana gelmiştir. Bu bağlamda fan devrinin üç katına çıkmasıyla batarya hücrelerindeki sıcaklık düşüşü 750 s için 11.9°C, 1500 s için 13.4°C, 2250 s için 14.8°C ve 3000 s için 16.2°C seviyelerinde gerçekleşmiştir. Diğer taraftan, 750 s'den 3000 s'ye sıcaklık artışları fan devri 1000 rpm'de 7.4°C, 2000 rpm'de 4.1°C, 3000 rpm'de 3.1°C olarak gerçekleşmiştir.



**Şekil 11.** Farklı zamanlarda ve deşarj oranlarında batarya hücresi üzerinde meydana gelen sıcaklıkların fan devrine bağlı değişimi. a) 750 s, b) 1500 s, c) 2250 s ve d) 3000 s

#### 4. Sonuçlar ve Öneriler

Çalışma kapsamında silindirik bir lityum bataryanın farklı deşarj oranlarında zorlanmış hava soğutma etkisinde sergilediği elektriksel ve termal performans nümerik olarak incelenmiştir. Bu bağlamda, batarya hücresi, girişinde fan bulunan kare kesitli bir kanalda konumlandırılmış ve farklı fan devirleri için termal davranışı değerlendirilmiştir. Batarya hücresinin elektrokimyasal karakteristiğinin modellenmesinde Eşdeğer Devre Modeli kullanılmış olup, model parametreleri Alsharif ve ark.'larının (Alsharif ve ark., 2022) çalışmasından alınmıştır. Elde edilen sonuçlar batarya



sıcaklığının zamana ve fan devrine bağlı değişimi, batarya hücresi geriliminin zaman bağlı değişimi, kanal içerisinde meydana gelen sıcaklık dağılımı ve hız vektörleri açısından değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

- Deşarj oranındaki artışla birlikte batarya hücresi sıcaklığı artmış ve batarya hücresinin verebildiği gerilim değeri azalmıştır. Bu bağlamda en yüksek sıcaklık ve en düşük gerilim değerleri 0.8C deşarj oranında, en düşük sıcaklık ve en yüksek gerilim değerleri 0.2C deşarj oranında elde edilmiştir.
- Deşarj oranı arttıkça batarya hücresindeki anlık gerilim düşüş miktarı da artmış ve stabil olarak verebildiği gerilim süresi azalmıştır. 0.2C, 0.4C, 0.6C ve 0.8C deşarj oranlarında batarya hücresi gerilimindeki anlık düşüşler sırasıyla 0.05V, 0.18V, 0.31V ve 0.44V seviyelerindedir. Ayrıca, 0.2C deşarj oranında batarya hücresi 3000 s boyunca 1.43 V, 0.4C'de yaklaşık 1500 s boyunca 1.29 V, 0.6C'de yaklaşık 1000 s boyunca 1.15 V ve 0.8C'de yaklaşık 750 s boyunca 1.02 V gerilimi değerini stabil olarak verebilmiştir.
- Fan devrinin artmasıyla batarya hücrelerinin sıcaklıkları düşmüştür. Bu düşüş 0.2C deşarj oranında ihmal edilebilir düzeyde gerçekleşmiştir. Çalışma kapsamında incelenen süre sonunda sıcaklık düşüşleri fan devrinin iki katına çıkmasıyla 0.4C için %7.45, 0.6C için %14.30 ve 0.8C için %20.43 oranında gerçekleşmiştir. Fan devrinin üç katına çıkmasıyla 0.4C için %10.34, 0.6C için %19.91 ve 0.8C için %28.54 oranında sıcaklık düşüşleri meydana gelmiştir.
- En yüksek batarya hücresi sıcaklığı 1000 rpm fan devrinde 0.8C deşarj oranında yaklaşık olarak 57°C'dir. Sonuç olarak batarya hücresi, çalışma sıcaklığı aralığının neredeyse dışına çıkmıştır ve fan devri 0.8C deşarj oranı için yetersiz kalmıştır. 0.2C deşarj oranında ise tüm fan devirlerinde batarya hücresi sıcaklığı en düşük ve hemen hemen aynı kalmıştır. Bu durumda yüksek fan devrinin gereksiz olduğu ortaya çıkmıştır.
- Fan devrinin artmasıyla hava hızı da artmıştır. Bu bağlamda çalışmada ele alınan düzlem üzerinde meydana gelen en yüksek hız değerleri yaklaşık olarak fan devrindeki artış oranı kadar artmıştır.

Bu çalışmada kullanılan batarya modeli kullanılarak gelecekteki çalışmalarda çok sayıda batarya hücresinin seri ve paralel bağlı olduğu bir batarya modülünün farklı soğutma koşullarında ve farklı batarya modelleri için sergilemiş olduğu termal ve elektriksel performanslar incelenebilir.



## Tesekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK, proje no 123M582) tarafından desteklenmiştir.

## Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

## Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

## Kaynaklar

- Alsabari, A., Hassan, M. K., che soh, A., & Zafira, R. (2021). Modeling and validation of lithium-ion battery with initial state of charge estimation. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 21, 1317. doi:10.11591/ijeecs.v21.i3.pp1317-1331
- Alsharif, K. I., Pesch, A., Borra, V., Cortes, P., MacDonald, E., Li, F. X., & Choo, K. (2022). Transient Thermal and Electrical Characteristics of a Cylindrical LiFeS<sub>2</sub> Cell with Equivalent Circuit Model. *ArXiv*, abs/2311.02095.
- ANSYS *Fluent Battery Module Manual* (2015). ANSYS®, Inc. Canonsburg, PA: SAS IP Inc.
- Bilgen, S. (2014). Structure and environmental impact of global energy consumption. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 38, 890-902. doi:10.1016/j.rser.2014.07.004
- Chaoui, H., & Gualous, H. (2017). Online parameter and state estimation of lithium-ion batteries under temperature effects. *Electric Power Systems Research*, 145, 73-82. doi:https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.12.029
- Chen, S. C., Wan, C. C., & Wang, Y. Y. (2005). Thermal analysis of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 140(1), 111-124. doi:10.1016/j.jpowsour.2004.05.064
- Deng, D. (2015). Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. *Energy Science & Engineering*, 3(5), 385-418. doi:10.1002/ese3.95
- Gao, Z., Chin, C. S., Woo, W. L., & Jia, J. (2017). Integrated Equivalent Circuit and Thermal Model for Simulation of Temperature-Dependent LiFePO<sub>4</sub> Battery in Actual Embedded Application. *Energies*, 10(1). doi:10.3390/en10010085
- Greco, A., Jiang, X., & Cao, D. P. (2015). An investigation of lithium-ion battery thermal management using paraffin/porous-graphite-matrix composite. *Journal of Power Sources*, 278, 50-68. doi:10.1016/j.jpowsour.2014.12.027
- Guo, G. F., Long, B., Cheng, B., Zhou, S. Q., Xu, P., & Cao, B. G. (2010). Three-dimensional thermal finite element modeling of lithium-ion battery in thermal abuse application. *Journal of Power Sources*, 195(8), 2393-2398. doi:10.1016/j.jpowsour.2009.10.090
- Hatchard, T. D., MacNeil, D. D., Basu, A., & Dahn, J. R. (2001). Thermal model of cylindrical and prismatic lithium-ion cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 148(7), A755-A761. doi:10.1149/1.1377592

- Jiang, G. W., Huang, J. H., Liu, M. C., & Cao, M. (2017). Experiment and simulation of thermal management for a tube-shell Li-ion battery pack with composite phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 120, 1-9. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.03.107
- KÖK, C., & Alkaya, A. (2020). Investigation of Thermal Behavior of Lithium-Ion Batteries under Different Loads. *European Mechanical Science*, 4(3), 96-102. doi:10.26701/ems.635707
- Li, W., Garg, A., Wang, N., Gao, L., Le Phung, M. L., & Tran, V. M. (2022). Computational Fluid Dynamics-Based Numerical Analysis for Studying the Effect of Mini-Channel Cooling Plate, Flow Characteristics, and Battery Arrangement for Cylindrical Lithium-Ion Battery Pack. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 19(4). doi:10.1115/1.4054648
- Li, X. X., Zhong, Z. D., Luo, J. H., Wang, Z. Y., Yuan, W. Z., Zhang, G. Q., . . . Yang, C. X. (2019). Experimental Investigation on a Thermoelectric Cooler for Thermal Management of a Lithium-Ion Battery Module. *International Journal of Photoenergy*, 2019. doi:10.1155/2019/3725364
- Liu, L., Wang, L. Y., Chen, Z., Wang, C., Lin, F., & Wang, H. (2013). Integrated System Identification and State-of-Charge Estimation of Battery Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 28(1), 12-23. doi:10.1109/TEC.2012.2223700
- Lyu, Y., Siddique, A. M., Gadsden, S. A., & Mahmud, S. (2021). Experimental investigation of thermoelectric cooling for a new battery pack design in a copper holder. *Results in Engineering*, 10. doi:10.1016/j.rineng.2021.100214
- Madani, S. S., Schaltz, E., & Knudsen Kær, S. (2019). An Electrical Equivalent Circuit Model of a Lithium Titanate Oxide Battery. *Batteries*, 5(1). doi:10.3390/batteries5010031
- Ozbektas, S., Sungur, B., & Topaloglu, B. (2023). Numerical Investigation of the Effect of Heat Sinks With Various Fin Geometries on the Performance of a Thermoelectric Generator. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 15(3). doi:10.1115/1.4056245
- Plett, G. L. (2015). *Battery Management Systems* (Vol. 1). Norwood, Massachusetts: Artech House.
- Rao, Z. H., Qian, Z., Kuang, Y., & Li, Y. M. (2017). Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface. *Applied Thermal Engineering*, 123, 1514-1522. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.06.059
- Shahid, S., & Agelin-Chaab, M. (2017). Analysis of Cooling Effectiveness and Temperature Uniformity in a Battery Pack for Cylindrical Batteries. *Energies*, 10(8). doi:10.3390/en10081157
- Tran, M. K., Mathew, M., Janhunen, S., Panchal, S., Raahemifar, K., Fraser, R., & Fowler, M. (2021). A comprehensive equivalent circuit model for lithium-ion batteries, incorporating the effects of state of health, state of charge, and temperature on model parameters. *Journal of Energy Storage*, 43. doi:10.1016/j.est.2021.103252
- Yao, L. W., Aziz, J. A., Kong, P. Y., & Idris, N. R. N. (2013, 10-13 Nov. 2013). *Modeling of lithium-ion battery using MATLAB/simulink*. Paper presented at the IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.