

Lityum İyon Pillerde Farklı Deşarj Hızlarında Oluşan Sıcaklık Profillerinin Deneysel ve Sayısal Olarak Karşılaştırılması

Emre TORUN^{1*}, Ertan BUYRUK²

¹Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 58140, Sivas

²Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 58140, Sivas

¹<https://orcid.org/0000-0003-4823-7843>

²<https://orcid.org/0000-0002-6539-7614>

*Sorumlu yazar: emretorun@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 28.09.2023

Kabul tarihi: 17.11.2023

Online Yayınlanma: 11.03.2024

Anahtar Kelimeler:

Elektrikli araç

Lityum iyon bataryalar

Bataryalarda ısı üretimi

Bataryaların termal modellenmesi

ÖZ

Elektrikli araçlar ihtiyaç duydukları elektrik enerjisini batarya sistemlerinden sağlarlar. Motorun çalışması için gerekli gerilim ve akım değerleri araç bataryaları tarafından sağlanır ve bu şekilde aracın hareket etmesi sağlanır. Batarya hücreleri hem şarj olurken hem de aracın kullanım sırasında deşarj olurken yüksek miktarda ısı enerjisi açığa çıkarırlar. Bataryaların maksimum verimde ve yüksek ömürde çalışabilmeleri için gerekli şartlardan biri de batarya çalışma sıcaklığını belirli aralıkta tutmaktır. Sunulan bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan 18650 tip Lityum İyon bataryalarında farklı deşarj hızlarında oluşan sıcaklık değerleri deneysel olarak ölçülmüş, sonuçlar Ansys programı Fluent Modülünde sistemin modellenerek elde edildiği sayısal veriler ile kıyaslanmıştır. Sistem modellenirken batarya ısı üretimi Fluent’de kullanıcı tanımlı fonksiyon (UDF) yazılarak hesaplanmış ve sayısal çözüme girdi olarak dâhil edilmiştir. Sayısal modelleme ile elde edilen sonuçların deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu ve özellikle düşük deşarj hızlarında bağıl hatanın oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Experimental and Numerical Comparison of Temperature Profiles Created at Different Discharge Rates in Lithium Ion Batteries

Research Article

Article History:

Received: 28.09.2023

Accepted: 17.11.2023

Published online: 11.03.2024

Keywords:

Electric vehicle

Lithium-ion batteries

Heat generation in batteries

Thermal modelling of batteries

ABSTRACT

Electric vehicles provide the electrical energy they need from battery systems. The voltage and current values required for the engine to run are provided by the vehicle batteries, thus enabling the vehicle to move. Battery cells release high amounts of heat energy both while charging and discharging during use of the vehicle. One of the necessary conditions for the batteries to work at maximum efficiency and high lifetime is to keep the battery operating temperature within a certain range. In this study, the temperature values of 18650 type Lithium Ion batteries used in electric vehicles at different discharge rates were experimentally measured, and the results were compared with the numerical data obtained by modeling the system in the Fluent Module of the Ansys program. While modeling the system, the heat generation rate of the battery was calculated using user defined function (UDF) in Fluent and included as an input to the numerical solution. It has been observed that the results obtained by numerical modeling are compatible with the experimental results and the relative error is quite low, especially at low discharge rates.

To Cite: Torun E., Buyruk E. Lityum İyon Pillerde Farklı Deşarj Hızlarında Oluşan Sıcaklık Profillerinin Deneysel ve Sayısal Olarak Karşılaştırılması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2024; 7(2): 622-637.

1. Giriş

Toplam dünya nüfusunun zamanla artmasıyla hem gıda hem de enerji kaynaklarında kısıtlılık oluşmakta ve mevcut kaynaklar kâfi gelmemekte, kaynaklardaki kısıtlılık ise insanlığın ihtiyaçları için farklı alternatif arayışlarına yol açmakta olup bilim insanları 21. yüzyılda gıda ve enerji kaynaklarının yetersiz kalmaya başlaması, yeni fosil kaynakların bulunamaması ve rezervlerin azalması nedeniyle farklı enerji kaynaklarını kullanabilen ve depolayabilen daha etkin ve çevre dostu alet ve araçları araştırmaya yönelmiştir (Torun ve Buyruk, 2023). Bu araştırmalardan biri olan elektrikli araç çalışmaları bilhassa son yıllarda önem kazanmıştır. Özellikle son on yılda elektrikli araç pazarı hızla büyümekte olup 2018 yılında dünyadaki elektrikli araç stoku 2017 yılına göre %63'lük bir artış göstermiş ve 5 milyonu aşmıştır (URL-1, 2022).

Elektrikli araçlarda değişik tiplerde şarj edilebilen batarya sistemleri kullanılmakta olup Nikel-Kadmiyum tip bataryalar, Nikel-metal hidrit tip bataryalar, Kurşun- asit tip bataryalar ve Lityum iyon tip bataryalar bu batarya sistemlerinden bazılarıdır. Bu batarya çeşitleri arasında lityum iyon bataryalar, uzun pil ömrü, düşük kendinden boşalma hızı, yüksek enerji depolama yoğunluğu ve hafifliğinden dolayı diğer batarya çeşitlerine göre daha uygun ve verimli olduğu anlaşılmıştır (Etacheri ve ark., 2011). Lityum iyon bataryalar şarj olurken veya deşarj edilirken batarya içindeki elektrokimyasal reaksiyonlardan dolayı yüksek düzeyde ısı enerjisi açığa çıkarırlar. Lityum iyon bataryalar ısıyı hem bataryanın iç direnci, hem de batarya içindeki kimyasal reaksiyonlar nedeniyle üretirler. Bataryanın iç direnci nedeniyle üretilen ısı joule ısı olarak, bataryadaki kimyasal reaksiyonlar nedeniyle oluşan ısı ise entropik ısı olarak ifade edilir. Dolayısıyla bataryada üretilen toplam ısı, joule ısı ve entropik ısının toplamına eşittir (Thomas ve Newman, 2003). Araştırmalara göre bataryadan maksimum fayda sağlayabilmek için batarya hücre sıcaklığının 15°C - 40°C aralığında olması gerekmektedir (Pesaran, 2001; Jouhara ve ark., 2019; Ramadass ve ark., 2022; URL-2, 2022). Bu bakımdan batarya sıcaklığının doğru şekilde ölçülebilmesi sistemin verimli ve güvenli çalışması açısından oldukça önemlidir.

Bataryalarda deşarj hızı bataryanın nominal akım değerinin kaç katının çekildiği ile bağlantılıdır. 1C deşarj hızı, bataryanın nominal değeri kadar akım çekildiği, 2C deşarj hızı, bataryanın nominal değerinin iki katı kadar akım çekildiği, 3C deşarj hızı ise bataryanın nominal akım değerinin üç katı kadar akım çekildiği deşarj işlemi ifade eder. Bu çalışmada silindirik 18650 tipindeki lityum iyon bataryalardan oluşan batarya modülü gerekli deney düzenekleri oluşturularak 1C, 2C ve 3C hızlarında deşarj edilmiş, oluşan ısı ve sıcaklık değerleri ise Ansys Fluent programında sistemin sayısal olarak modellenerek elde edilen veriler ile kıyaslanmıştır. Bu konuda yabancı literatürde çokça çalışma olmasına rağmen Türkçe literatürde bu konu ile alakalı yapılan çalışmalar oldukça az sayıdadır. Yapılan çalışmanın bu boşluğu doldurması ve Türkçe literatüre katkı sağlaması hedeflenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Lityum iyon bataryaların sıcaklık dağılımı, bataryada oluşan ısı üretiminin termal modeller, elektrokimyasal modeller veya eşdeğer devre modeli (ECM) yardımı ile hesaplanmasıyla bulunabilir

(Paccha-Herrera, 2020). Ayrıca bataryaların ısı üretimini hesaplamak üzere ampirik formüller de kullanılabilir. Elektrokimyasal modellemeler Newman, Tiedemann, Gu, and Kim (NTGK) yarı ampirik alt modeli veya Newman alts Pseudo 2D (P2D) alt modeli ile yapılabilir. Elektrokimyasal modellemeler yapılırken çok sayıda batarya farklı sıcaklıklarda test edilerek bu testlerden elde edilen parametrelerin hesaplamalarda girdi olarak kullanılması gerektiği için uygulanması zordur. Elektrokimyasal modeller içinde en az parametre gereksinimi olan NTGK modelinde dahi bir batarya hücresi için 14 farklı parametre gerekmektedir. Diğer bir yandan termal modellemede ise bataryanın farklı deşarj akımlarındaki ve farklı batarya doluluk oranlarındaki ısı üretimi Bernardi ve ark. (1985) tarafından önerilen denklem yardımıyla hesaplandıktan sonra bataryanın sıcaklık dağılımı enerjinin korunum denkleminin sayısal olarak çözülmesi ile kolaylıkla bulunabilir. Bu çalışmada ısı üretimini ve batarya sıcaklık dağılımını bulmak üzere termal model kullanılmıştır. Ayrıca ısı üretiminin sabit olmayıp bataryanın doluluk oranına ve deşarj akımına göre değiştiği için ANSYS/Fluent programında kullanıcı tarafından tanımlanan fonksiyon (UDF) kullanılmıştır.

Lityum iyon bataryalar metal ceket içerisine pozitif ve negatif elektrot levhalar, elektrolit ve ayırıcıdan oluşan katmanlı bir yapıdan oluşmaktadır. Lityum iyon bataryaların katmanlı yapısı nedeniyle homojen bir yapıda olmamasına rağmen araştırmalar sayısal modelleme yapılırken bazı varsayımlar yapılarak sistemin yarı homojen olarak modellenmesiyle de oldukça doğru ve kabul edilebilir sonuçlar elde edildiğini göstermiştir (Choi ve Yao, 1979; Chen ve Evans, 1993; Wu ve ark., 1998). Literatürde benzer batarya sistemleri modellenirken batarya yoğunluğu, ısı iletim katsayısı ve ısı kapasitesinin sabit ve sırasıyla 2087 kg/m³, 3.63 W/mK ve 1679 J/kgK olarak kabul edildiğinden sunulan bu çalışmada da aynı değerler kullanılmıştır (Wang ve ark., 2020). Silindirik bataryalarda eksenel yöndeki ısı iletim direnci radyal yöndeki ısı iletim direncinden çok daha düşük olduğundan modelleme yapılırken radyal yöndeki ısı iletim katsayısı tüm bataryanın ısı iletim katsayısı olarak kabul edilebilir.

Batarya içindeki diferansiyel bir parça üzerindeki enerji korunum denkleminde batarya içindeki ısı transfer denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k_\varphi}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q}_{gen} \quad (1)$$

(1) nolu denklemde ρ değeri bataryanın yoğunluğunu, C_p değeri bataryanın ısı kapasitesini, T değeri sıcaklığı, t değeri zamanı, k_r , k_φ ve k_z değerleri bataryanın silindirik koordinatlarda r , φ ve z yönündeki ısı iletim katsayılarını, \dot{q}_{gen} değeri ise bataryanın birim hacimdeki ısı üretimini ifade etmektedir.

Batarya bir bütün olarak düşünüldüğünde ise enerji korunum denkleminde yola çıkarak aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$\dot{Q}_{gen} - (\dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad}) = \rho \forall C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

(2) nolu denklemde \forall batarya hacmini, \dot{Q}_{gen} bataryanın toplam ısı üretimini, \dot{Q}_{conv} bataryadan konveksiyonla dış ortama yapılan olan ısı taşınımını, \dot{Q}_{rad} ise bataryadan dış ortama yapılan ısı ışınlımını ifade etmektedir.

Bataryada üretilen toplam ısı, joule ısı ve entropik ısının toplamına eşittir. Bazı çalışmalarda bataryada oluşan ısı üretiminin aşağıdaki şekilde ifade edilebileceği belirtilmiştir (Bernardi ve ark., 1985). Denklemde eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim joule ısıyı, ikinci terim ise entropik ısıyı ifade etmektedir.

$$\dot{Q}_{gen} = I(V_{oc} - V) - IT \frac{dV_{oc}}{dT} \quad (3)$$

(3) nolu denklemde I şarj/deşarj akımını (deşarj olması durumunda $I > 0$, şarj olması durumunda $I < 0$), V_{oc} batarya boşta iken açık devre voltajını, V batarya yükte iken batarya voltajını, $\frac{dV_{oc}}{dT}$ ise entropi katsayısını ya da sıcaklık katsayısını ifade etmektedir. Entropi katsayısı ile entropi değişimi arasında aşağıdaki şekilde bir bağıntı mevcuttur (Karimi ve Li, 2013).

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = \frac{\Delta S}{nF} \quad (4)$$

Burada n değeri batarya içindeki kimyasal reaksiyona dâhil olan elektron sayısını (lityum iyon bataryalar için $n = 1$), F değeri ise Faraday sabitini ($F = 96485$ C/mol) ifade eder.

Bataryalarda, batarya yüke bağlandığı zaman batarya iç direncinden dolayı batarya uçları arasında okunan gerilim değerinde düşme meydana gelir ve bu düşüş değeri batarya iç direnci ile batarya üzerinden geçirilen akımın çarpımına eşittir.

$$V_{oc} - V = I.R \quad (5)$$

Isı üretiminin batarya içinde homojen dağılım gösterdiği varsayıldığından, birim hacimdeki ısı üretimi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\dot{q}_{gen} = \frac{\dot{Q}_{gen}}{\forall} \quad (6)$$

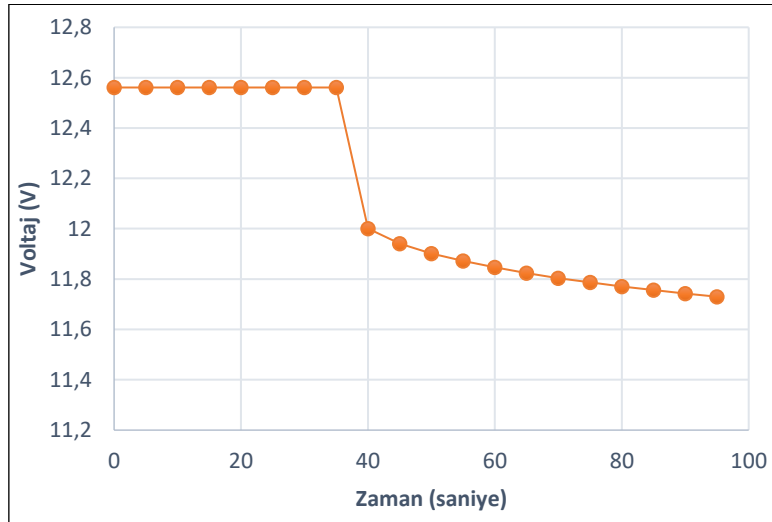
(3) nolu denklemi bataryanın birim hacmi için (5) ve (6) nolu denklemleri de kullanarak yeniden yazarsak aşağıdaki denklemi elde ederiz. Denklemde kullanılan i değeri birim hacime denk gelen şarj/deşarj akımını ifade eder.

$$\dot{q}_{gen} = i^2 R - iT \frac{dV_{oc}}{dT} \quad (7)$$

(7) nolu denklemde eşitliğin sağ tarafındaki ilk kısım batarya iç direncinden dolayı oluşan *joule ısıyı*, eşitliğin sağ tarafındaki ikinci kısım ise bataryadaki kimyasal reaksiyondan dolayı oluşan *entropik ısıyı* ifade etmektedir. Dolayısıyla batarya tarafından üretilen toplam ısıyı hesaplayabilmek için hem R batarya iç direncini hem de $\frac{dV_{oc}}{dT}$ batarya entropi katsayısını ölçmek gereklidir.

Yapılan çalışmalar, R batarya iç direncinin hem sıcaklığın hem de batarya doluluk oranının bir fonksiyonu olduğunu ancak batarya sıcaklığının artmasıyla birlikte batarya iç direncinin batarya sıcaklığı ve batarya doluluk oranına olan bağımlılığının azaldığını ve neredeyse sabit bir seyir izlediğini ortaya koymuştur (Inui ve ark., 2007; Xie ve ark., 2018; Trinuruk ve ark., 2022). Dolayısıyla bu çalışmada kullanılan hesaplamalarda R batarya iç direnci sabit olarak değerlendirilebilir.

Batarya iç direncini hesaplamak için farklı yöntemler mevcut olup bunlardan biri de DC- yükleme testidir. Bunun için batarya devreye bağlı değilken açık devre voltaj değeri V_{oc} ve batarya sabit akımlı devreye bağlanıp yük çekilmeye başlandığı ilk andaki voltaj değeri V ölçülür ve bu iki değer arasındaki farkın devre akımına bölünmesi ile bataryanın o anki çalışma sıcaklığı ve batarya doluluk oranındaki R iç direnci hesaplanabilir. Şekil-1' de 3 adet seri bağlı lityum iyon bataryanın boşa ve 1C (2 Amper) deşarj durumunda iken başlangıç gerilim değişimi verilmiştir. Tablo-1'de ise R batarya iç direncini hesaplamak için yapılan testler ve elde edilen sonuçlar görünmektedir. Yapılan testler sonucunda elde edilen R batarya iç direncini değerlerinin ortalaması alındığında ortalama batarya iç direnci $R_{ort} = 0,1 \Omega$ olarak bulunur.



Şekil 1. DC-yükleme testi gerilim değişimi (3. Test)

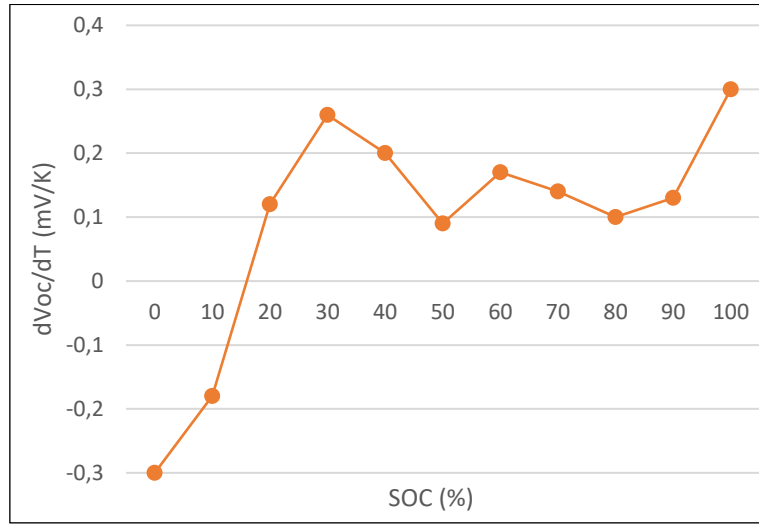
Tablo 1. İç direnç ölçüm testleri ve batarya ortalama iç direncinin hesaplanması

	1. Test	2. Test	3. Test
V_{oc} (Volt)	12,612	12,602	12,561
V (Volt)	11,944	12,021	12
I (Amper)	2	2	2
R (Ω)	0,1113	0,0968	0,0935
R_{ort} (Ω)		0,1	

Batarya entropi katsayısı $\frac{dV_{oc}}{dT}$ ise batarya doluluk oranının bir fonksiyonu olup sıcaklık ile çok fazla değişkenlik göstermemektedir (Inui ve ark., 2007; Karimi ve Li, 2013; Wu ve ark., 2017). Entropi katsayısı yaklaşık olarak aşağıdaki formülle ifade edilebilir.

$$\frac{dV_{oc}}{dT} \cong \frac{V_{oc}(T_2) - V_{oc}(T_1)}{(T_2 - T_1)} \quad (8)$$

Bataryaların farklı doluluk oranlarında ve farklı ortam sıcaklıklarında göstermiş olduğu açık devre voltajı dağılımları ölçülerek bataryanın farklı doluluk oranlarındaki entropi katsayısı değişimi bulunabilir. Wu ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada 18650 Tip Silindirik lityum iyon bataryanın entropi katsayısının batarya doluluk oranına göre değişimini ölçmüş olup sunulan bu çalışmada da bu değerler kullanılmıştır. Entropi katsayısının batarya doluluk oranına göre değişimi Şekil-2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.18650 Tip Lityum iyon batarya için entropi katsayısının batarya doluluk oranına göre değişimi (Wu ve ark., 2017).

Yapılan çalışmada bataryaları deşarj etmekte kullanılan elektronik yük cihazı kapasitesine göre 9 adet 18650 tip lityum iyon batarya 3 seri ve 3 paralel olacak şekilde (3S3P) bağlanmış ve 11,1 Volt ve 6 Ah kapasitede batarya modülü elde edilmiştir. Kullanılan batarya hücrelerinin termal, fiziksel ve elektriksel özellikleri Tablo-2 de, oluşturulan batarya modülünün elektriksel özellikleri ise Tablo-3’de belirtilmiştir.

Tablo 2. Bataryanın termal, fiziksel ve elektriksel özellikleri

Pil Tipi	18650, Silindirik, Lityum İyon
Nominal Kapasitesi	2000 mAh
Nominal Voltajı	3,7 V
Yükseklik	65 mm
Çap	18 mm
Isı İletim Katsayısı	3,63 W/mK
Isı Kapasitesi	1679 J/kgK
Yoğunluk	2087 kg/m ³
Şarj Kesme Voltajı	4,2 V
Deşarj Kesme Voltajı	2,7 V

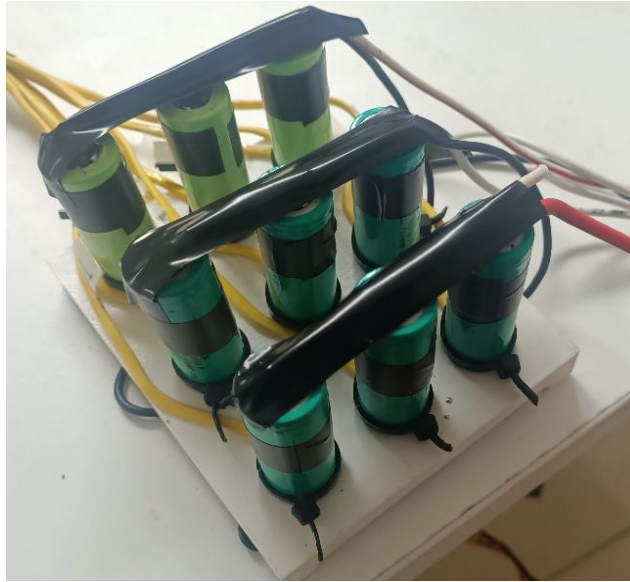
Tablo 3: Batarya modülünün elektriksel özellikleri

Pil Sayısı	9 adet
Bağlantı Şekli	3 seri ve 3 Paralel (3S3P)
Nominal Kapasitesi	6000 mAh
Nominal Voltajı	11,1 V

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Deneysel Yöntem ve Bulgular

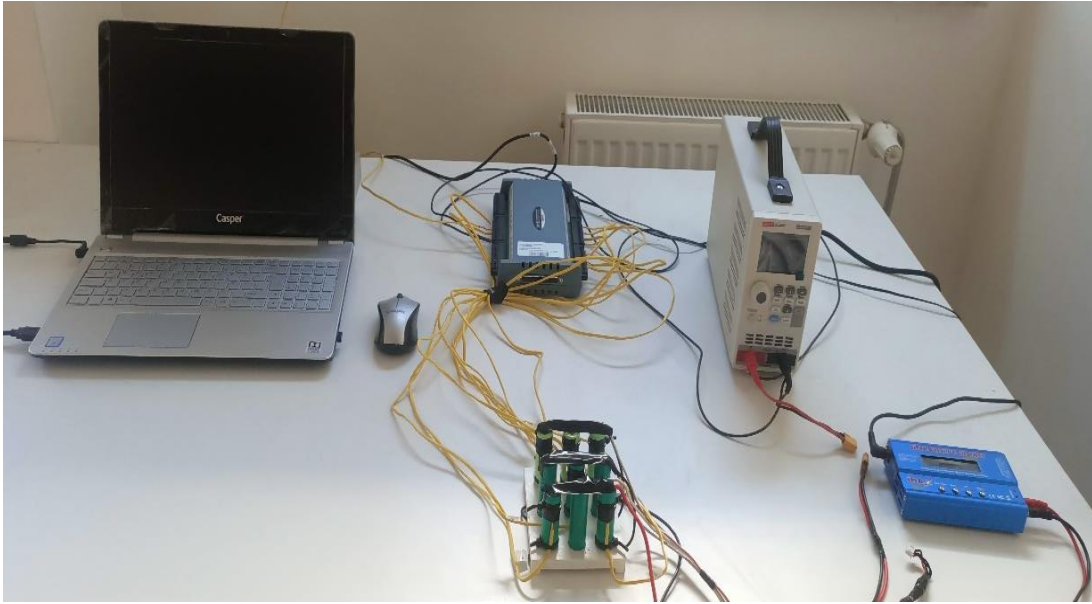
Bu çalışmada 9 adet 18650 tip silindirik lityum iyon bataryalar ile 3 Seri ve 3 Paralel bağlantı yapılarak (3S3P) oluşan batarya modülü 20°C ortam sıcaklığında 1C, 2C ve 3C deşarj hızlarında test edilerek modüldeki maksimum hücre sıcaklıkları ölçülmüştür. Oluşturulan batarya modülü Şekil-3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Batarya modülü (3S3P)

Deney düzeneği olarak 9 adet 2000 mAh ve 3,7 V 18650 Silindirik Tip Lityum iyon batarya, bataryaları sabit akımda deşarj edebilmek için 1 adet Elektronik Yük Cihazı (40 A, 15 Volt, 400 Watt), batarya sıcaklıklarını ve ortam sıcaklığını ölçmek için $\pm 0,5^\circ\text{C}$ sıcaklık okuma hassasiyetinde 10 adet K tipi termokupl, sıcaklık ve voltaj verilerini belirli sürelerde kaydetmek için 1 adet veri kayıt cihazı, batarya

hücreleri boşaldığında tekrar şarj edebilmek için 1 adet batarya şarj cihazı (5A - 12,6V) ve veri kayıt cihazının kaydettiği verileri işlemek üzere 1 adet PC kullanılmıştır. Elektronik Yük Cihazı, bataryaları sabit gerilimde yahut sabit akımda belirlenen kesme gerilimine göre deşarj etmek için kullanılan ekipmandır. Bu deneyde 400 Watt gücünde ve sabit akım deşarj işleminde $\pm \%0.05$ hassasiyetinde olan UNI-T marka ve UTL8211 model elektronik yük cihazı kullanılmıştır. Kullanılan veri kayıt cihazı ise MC Measurement Computing marka ve USB-2416 model olup termokupl sıcaklık değerlerini $\pm 0,457^{\circ}\text{C}$ hassasiyette kayıt altına alabilir. Batarya şarj cihazı olarak ise modüldeki her üçlü batarya serisini aralarında gerilim farkı olmayacak şekilde dengeli bir şekilde şarj edebilme özelliği olan 6 amper kapasitesinde IMAX marka B6 model şarj cihazı kullanılmıştır. Uygulanan deney düzeneği Şekil-4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Deney düzeneği görseli

Batarya modülü şarj edildikten sonra 1C, 2C ve 3C deşarj hızlarında deşarj edilmiş batarya hücrelerinin yüzey sıcaklıkları, ortam sıcaklığı ve batarya modülünün yükteki voltaj değeri veri kayıt cihazı ile kayıt altına alınmıştır. Bataryanın maksimum çalışma sıcaklığı olan 60°C ' ye 3C deşarj hızında yaklaşıldığı için bataryaların testleri en fazla 3C deşarj hızında gerçekleştirilmiştir.

3 farklı deneyde uygulanan akım ve voltaj değerleri Tablo-4'de gösterilmiştir. Batarya hücrelerindeki zamana göre sıcaklık değişimi veri kayıt cihazı ile kayıt altına alınmış ve sıcaklıkların batarya doluluk oranına göre değişimi hesaplanmıştır. Tablo-4'te ifade edilen V_{oc} açık devre voltajı, bataryanın her iki ucu boşta iken yani batarya yükte değilken okunan değeri, V_{cutoff} batarya deşarj kesme voltajı ise bataryaların deşarj edilirken deşarj işleminin durdurulduğu voltaj değerini ifade eder.

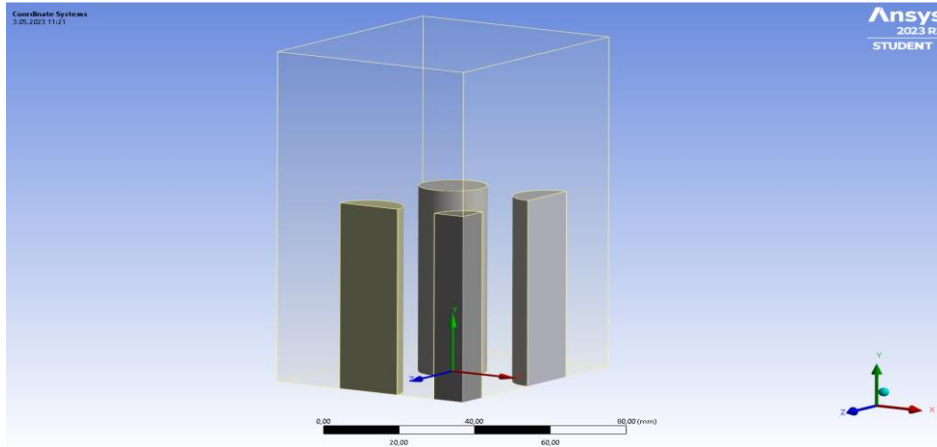
Tablo 4. Batarya modülüne uygulanan testler ve okunan voltaj değerleri

	Test-1	Test-2	Test-3
Deşarj Hızı, C	1C	2C	3C
Uygulanan Deşarj Akımı, I	6 Amper	12 Amper	18 Amper
Batarya Açık Devre Voltajı, V_{oc}	12,6 V	12,6 V	12,6 V
Batarya Deşarj Kesme Voltajı, V_{cutoff}	8,1 V	8,1 V	8,1 V

3.2. Sayısal Çözüm ve Bulgular

Sayısal çözüm için ANSYS 2023 Fluent Modülü kullanılmıştır. Modelleme yapılırken batarya ısı iletim katsayısının sıcaklığa göre, batarya iç direncinin batarya doluluk oranı ve sıcaklığa göre değişmeyip sabit kaldığı, termokuplların batarya yüzeyine tam temas ettiği, temas dirençlerinin olmadığı varsayılmış ve batarya yüzeyindeki renkli PVC tabakanın ısı iletimine olan etkisi ihmal edilmiştir.

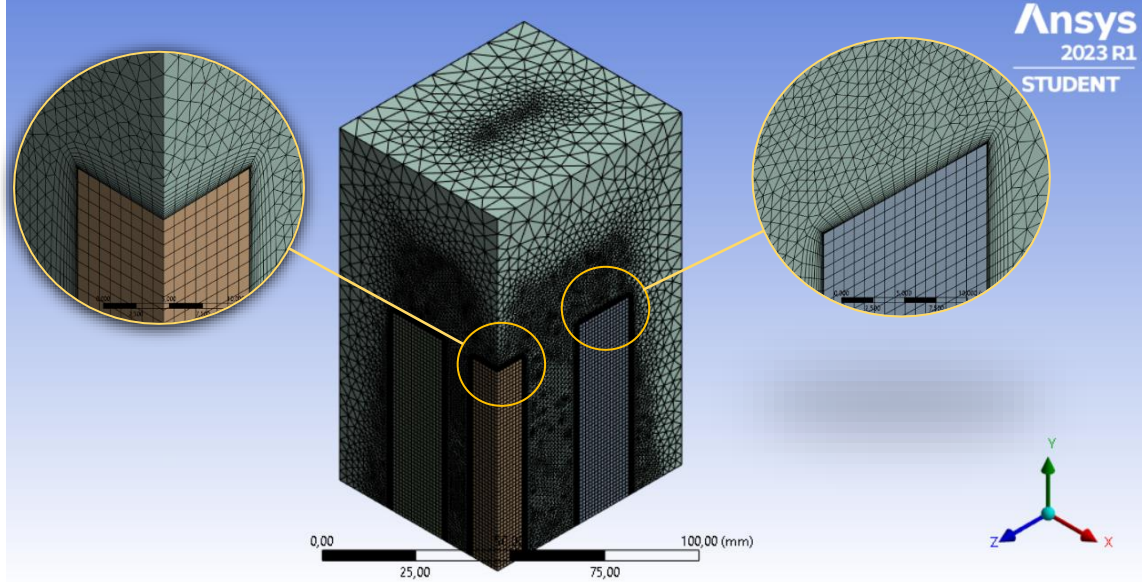
Programda modülün çeyreği simetrik olduğu için hesaplama zamanını kısaltmak ve daha hassas sonuçlar elde edebilmek amacıyla sadece Şekil 5'te gösterilen bölge modellenmiştir.



Şekil 5. Ansys fluent'de kullanılan model

Mesh yapılırken element boyutu maksimum 2 mm olacak şekilde seçilmiş, özellikle pil yüzeyine temas eden bölgelerde sıcaklık dağılımının daha keskin olacağından programın *inflation* özelliği kullanılarak Şekil-6'da gösterildiği gibi söz konusu bölgelerde daha ince bir mesh yapısı elde edilmiştir.

Programda sadece doğal taşınım ile ısı transferi modellenmiştir. Doğal taşınım ile modelleme yapılırken havanın sıkıştırılmaz ideal gaz olduğu varsayımı yapılmış olup yoğunluğu sıcaklıkla değişmektedir. Çözüm yapılırken literatürde benzer çalışmalarda sıklıkla kullanılan ve daha doğru sonuçlar veren simülasyon konfigürasyonları seçilmiştir. Bu konfigürasyonlar içerisinde, çözüm metodu için basınç ve hız alanlarını ilişkilendirmek üzere zamana bağlı ısı transferinde kullanılması tavsiye edilen ve daha doğru sonuçlar veren *SIMPLE* algoritması, basıncın boyutsal diskritizasyonu için *gövde kuvveti ağırlıklı algoritma*, momentum ve enerjinin boyutsal diskritizasyonu ve zamana bağlı modelleme için *ikinci derece örtük algoritma* seçilmiştir.



Şekil 6. Ansys fluent’de yapılan mesh modeli

Batarya hücrelerinde oluşan ve daha önce (7) nolu denklem ile belirtilen ısı üretimi modellenirken her bir deşarj akımı için Fluent programında 3 adet UDF (kullanıcı tarafından tanımlanan fonksiyon) yazılmış, ısı üretimini tanımlayan matematik model bu fonksiyon içine yerleştirilmiştir. Denklemde ısı kaynağının hesaplanabilmesi için gerekli olan R iç direnç ve I akım değerleri sabit olup entropi katsayısı değerleri ise sadece batarya doluluk oranına göre değişmektedir. Başlangıçta batarya modülü sıcaklığı ortam sıcaklığı ile aynı olup ısı üretim denkleminin ilk adımının hesaplanmasında bu sıcaklık değeri kullanılmış, bu şekilde birim hacimdeki ısı üretimi hesaplanarak ikinci adımda kullanılacak sıcaklık değeri bulunmuştur.

Sayısal çözümleme yapılırken başlangıç şartları olarak atmosferik basınçta ve ortam sıcaklığında durgun hava bulunduğu, sınır şartları olarak ise oluşturulan çeyrek modelin simetri yüzeylerinin simetri sınır şartı olduğu, yan yüzeylerinden ortam sıcaklığında ve atmosferik basınçta giriş, üst yüzeyinden ortam sıcaklığında atmosferik basınçta çıkış olduğu, zemin yüzeyinden herhangi bir ısı transferi olmadığı kabul edilmiştir.

Sayısal çözüm yapılırken maksimum iterasyon sayısı olarak 20, yakınsama değerleri için ise süreklilik ve momentum denklemleri için $1e-3$, enerji denklemleri için ise $1e-6$ olarak seçilmiştir.

Ayrıca, söz konusu model farklı hücre (eleman) ve node (düğüm) sayılarına denk gelecek şekilde mesh yapılarak elde edilen simülasyon sonuçlarının hücre sayısı ile ilişkisi incelenmiştir. Tablo-5’te farklı hücre sayılarına göre elde edilen maksimum batarya yüzey sıcaklıkları verilmiş, sıcaklıkların hücre sayısına göre değişimi ise Şekil-7’de gösterilmiştir.

Tablo 5. Farklı hücre sayılarında elde edilen batarya maksimum sıcaklık değerleri

	1. Mesh	2. Mesh	3. Mesh	4. Mesh	5. Mesh	6. Mesh	7. Mesh	8. Mesh
Hücre Sayısı	6063	12158	24796	50267	75484	199142	349344	499096
T-max (Batarya Yüzeyi) [°C]	56,846	56,976	57,222	57,323	57,429	57,480	57,523	57,533

Simülasyon yapılırken hücre sayısının artmasıyla hesaplanan batarya yüzey sıcaklığının arttığı ancak yaklaşık 350000 adet hücre sayısından sonra artan hücre sayısına rağmen hesaplanan batarya yüzey sıcaklığının neredeyse hiç değişmediği ve sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla doğru bir sayısal çözümlene yapabilmek için 350 bin hücre sayısı ile elde edilen mesh kalitesi yeterlidir.



Şekil 7. Farklı hücre sayılarına göre batarya maksimum sıcaklık değerleri değişimi

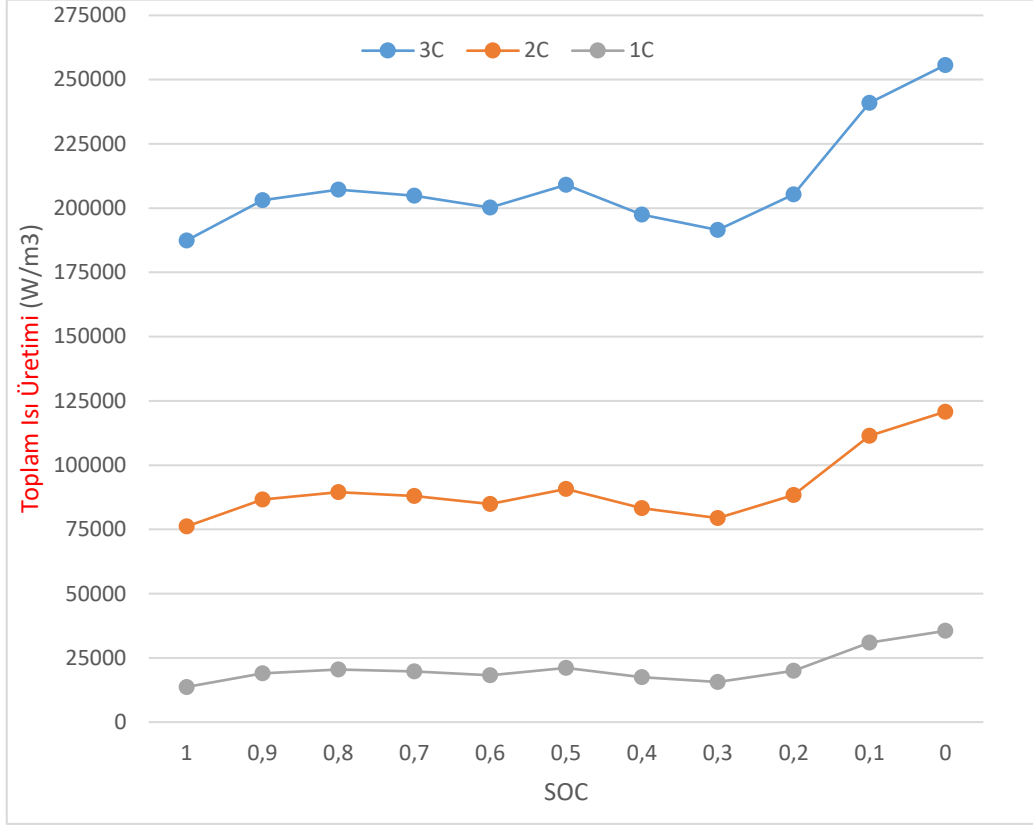
3.3. Tartışma

Bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan 18650 tip lityum iyon bataryalarında 1C, 2C ve 3C deşarj hızlarında oluşan sıcaklık değerleri deneysel olarak ölçülmüş, sonuçlar Ansys programı Fluent Modülünde sistemin modellenerek elde edildiği sayısal veriler ile kıyaslanmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

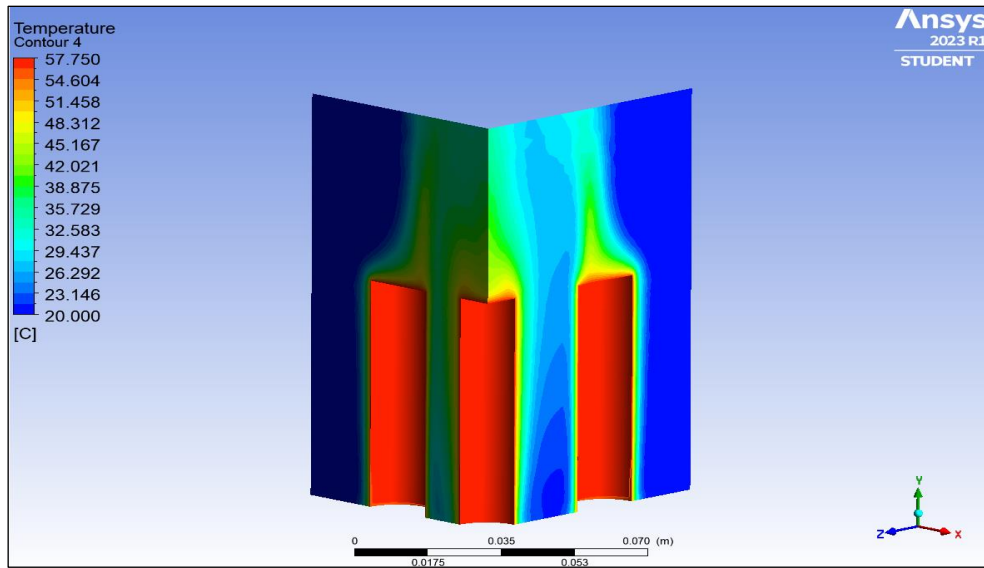
UDF olarak yazılan birim hacimdeki ısı üretimi, farklı deşarj hızlarında veri olarak kaydedilmiş olup sonuçları Şekil-8'de belirtilmiştir. Bilindiği üzere toplam ısı üretimi joule ısı ve entropik ısının toplamına eşittir. Bu çalışmada batarya iç direncinin sabit olduğu varsayıldığından sabit deşarj hızında joule ısısı da sabit kalır ve işareti pozitifdir. Diğer bir yandan ısı üretiminde ikinci terim olan entropik ısı, entropi katsayısının negatif olduğu durumlarda negatif, entropi katsayısının pozitif olduğu durumlarda ise pozitifdir. Toplam ısının joule ısısı ve entropik ısısının toplamına eşit olduğundan ve entropik ısının belirli batarya doluluk oranlarında negatif olması nedeniyle toplam ısı üretiminde zamanla artış yerine azalışlar da görünebilir. Isı üretimdeki bu azalışlar Şekil-8 de batarya doluluk oranının %80-60 değerleri arasında ve %50-30 değerleri arasında açıkça görülmektedir.

Şekil-9 ve Şekil 10'da batarya modülünün 3C deşarj hızındaki sıcaklık dağılımının ANSYS Fluent programında elde edilen sonuçları görünmektedir. Elde edilen sonuçlar UDF içerisine yazılan ısı üretim fonksiyonu yardımıyla elde edilen sayısal çözüm sonuçları ile deneysel verilerin birbirine oldukça yakın olduğunu göstermektedir. Sırasıyla Şekil-11, Şekil-12, ve Şekil 13'te 1C, 2C ve 3C batarya deşarj hızlarında elde edilen sayısal ve deneysel olarak elde edilen maksimum sıcaklıkların batarya doluluk oranına göre değişimlerini göstermektedir. Genel anlamda deneysel ve sayısal yollarla elde edilen

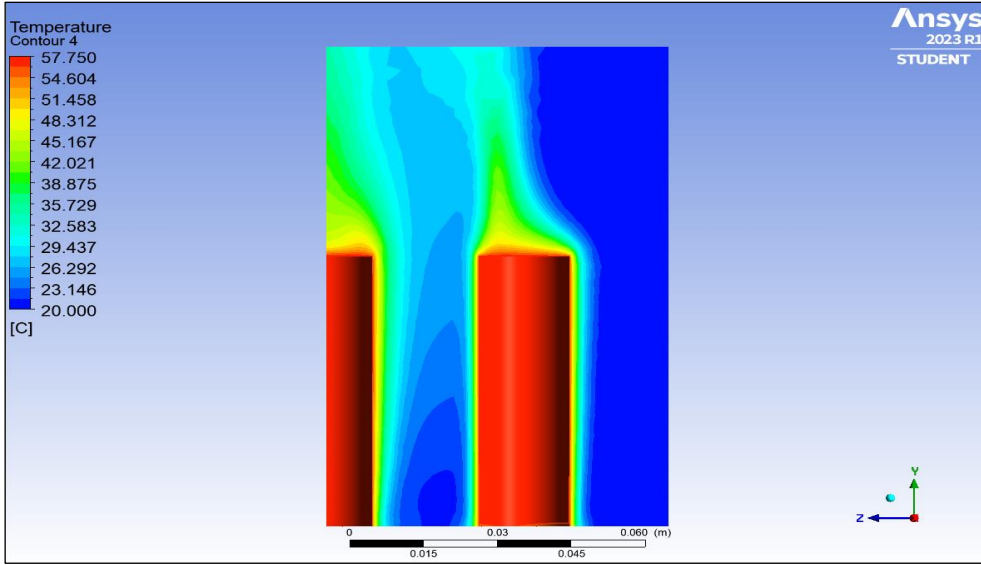
maksimum sıcaklık profillerinin seyrinin birbirine yakın olduğu, batarya doluluk oranının sıfıra yaklaşmasıyla ve batarya deşarj hızının artmasıyla birlikte sıcaklığın da arttığı görülmektedir. 1C deşarj hızında batarya modülündeki maksimum sıcaklık 32°C olarak ölçülürken, 2C deşarj hızında bu değer 44°C, 3C deşarj hızında ise bu değer 55°C'lere kadar çıkmaktadır.



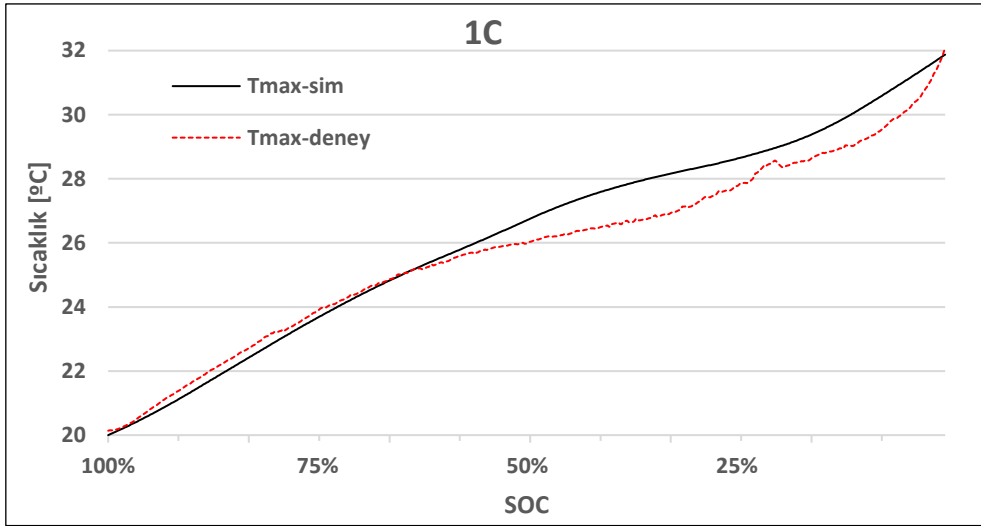
Şekil 8. 1C, 2C ve 3C deşarj hızlarında bataryada birim hacimde oluşan ısı üretiminin batarya doluluk oranına göre değişimi



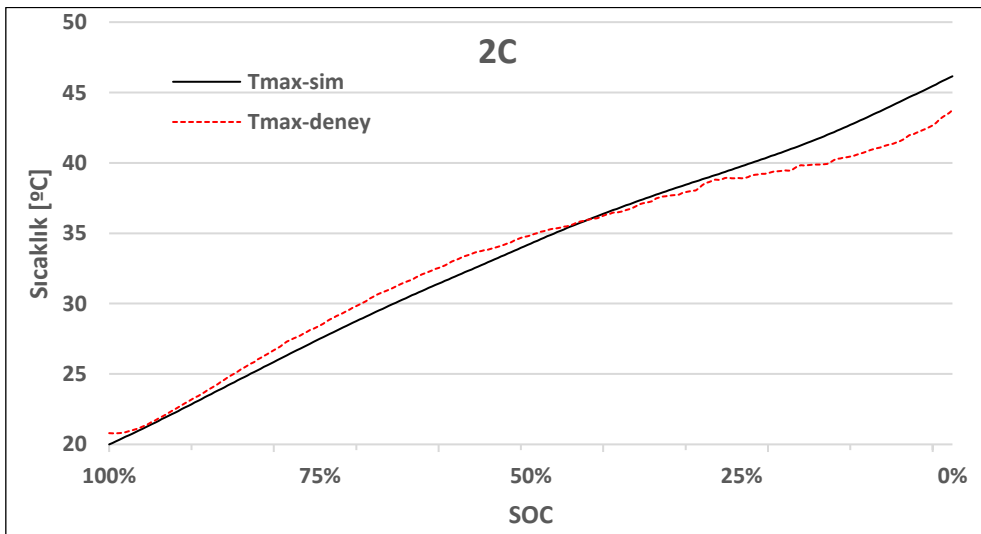
Şekil 9. 3C deşarj hızında batarya modülü sıcaklık dağılımı-1



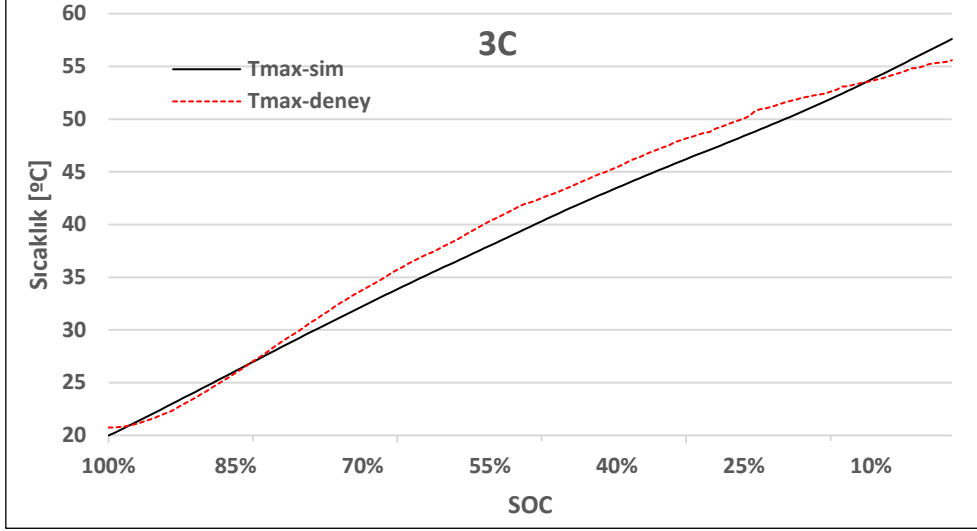
Şekil 10. 3C deşarj hızında batarya modülü sıcaklık dağılımı-2



Şekil 11. 1C deşarj hızında deneysel ve sayısal olarak batarya modülündeki maksimum sıcaklıkların batarya doluluk oranına göre değişimi



Şekil 12. 2C deşarj hızında deneysel ve sayısal olarak batarya modülündeki maksimum sıcaklıkların batarya doluluk oranına göre değişimi



Şekil 13. 3C deşarj hızında deneysel ve sayısal olarak batarya modülündeki maksimum sıcaklıkların batarya doluluk oranına göre değişimi

4. Sonuç

Yapılan çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan 18650 tip silindirik lityum iyon bataryalar ile oluşturulan deney düzeneği 1C, 2C ve 3C hızlarında deşarj edilmiş ve batarya modülündeki maksimum yüzey sıcaklığı değerlerinin zamana göre değişimi ölçülmüştür. Elde edilen maksimum yüzey sıcaklığı değerleri, deney düzeneğinin ANSYS Fluent programında modellenmesiyle elde edilen sayısal değerler ile karşılaştırılmış, artan deşarj hızlarında batarya maksimum yüzey sıcaklığının da arttığı, deşarj işlemi boyunca deneysel veriler ile sayısal verilerin birbirlerine oldukça yakın ve uyumlu bir seyir izlediği ancak batarya doluluk oranının 0 ila 0,1 gibi düşük değerlerinde sayısal veriler ile deneysel veriler arasındaki farkın arttığı görülmüştür. Bu farkın nedeninin de R batarya iç direncinin özellikle düşük batarya doluluk oranlarında sabit olmayıp batarya doluluk oranına göre değişkenlik göstermesi ile açıklanabilir. İlerleyen çalışmalarda hem R batarya iç direncinin hem de $\frac{dV_{oc}}{dT}$ batarya entropi katsayısının farklı sıcaklık ve batarya doluluk oranlarında ölçülmesiyle elde edilen veriler kullanılarak daha doğru ve hassas sonuçlara ulaşılabileceği böylece deneysel veriler ile sayısal veriler arasındaki farkın daha da azalacağı düşünülmektedir.

Çıkar Çatışma Beyanı

Makale yazarları birbirleri aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan etmektedir.

Kaynakça

Bernardi D., Pawlikowski E., Newman J. A general energy balance for battery systems. Journal of The Electrochemical Society 1985; 132(1): 5.

- Chen Y., Evans JW. Heat transfer phenomena in lithium/polymer-electrolyte batteries for electric vehicle application. *Journal of The Electrochemical Society* 1993; 140(7): 1833.
- Choi KW., Yao NP. Heat transfer in lead-acid batteries designed for electric-vehicle propulsion application *Journal of The Electrochemical Society* 1979; 126(8): 1321.
- Etacheri V., Marom R., Elazari R., Salitra G., Aurbach D. Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: a review. *Energy & Environmental Science* 2011; 4(9): 3243-3262.
- Inui Y., Kobayashi Y., Watanabe Y., Watase Y., Kitamura Y. Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries. *Energy Conversion and Management* 2007; 48(7): 2103-2109.
- Jouhara H., Khordehghah N., Serey N., Almahmoud S., Lester SP., Machen D., Wrobel L. Applications and thermal management of rechargeable batteries for industrial applications. *Energy* 2019; 170: 849-861.
- Karimi G., Li X. Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *International Journal of Energy Research* 2013; 37(1): 13-24.
- Paccha-Herrera E., Calderón-Muñoz WR., Orchard M., Jaramillo F., Medjaher K. thermal modeling approaches for a LiCoO₂ lithium-ion battery-A comparative study with experimental validation. *Batteries* 2020; 6: 40.
- Pesaran AA. Battery thermal management in EV and HEVs: issues and solutions. *Battery Man* 2001; 43(5): 34-49.
- Ramadass P., Haran B., White R., Popov BN. Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures: Part I. Cycling performance. *Journal of Power Sources* 2002; 112(2): 606-613.
- Thomas KE., Newman J. Thermal modeling of porous insertion electrodes. *Journal of The Electrochemical Society* 2003; 150(2): A176.
- Torun E., Buyruk E. Elektrikli araçlarda kullanılan pasif, aktif ve hibrit batarya soğutma sistemlerine ait bir çalışma. 3. Rumeli Sürdürülebilir Çevre için Enerji ve Tasarım Sempozyumu, 2023, Sayfa no:1-6, İstanbul.
- Trinuruk P., Onnuam W., Senanuch N., Sawatdeeju C., Jenyongsak P., Wongwises S. Experimental and numerical studies on the effect of lithium-ion batteries' shape and chemistry on heat generation. *Energies* 2022; 16(1): 264.
- URL-1. Global EV Outlook 2019, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>. Erişim Tarihi: 05 Kasım 2022.
- URL-2. Addressing The Impact of Temperature Extremes on Large Format Li-Ion Batteries for Vehicle Applications, <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58145.pdf>, Erişim Tarihi: 20 Aralık 2022.
- Wang H., Tao T., Xu J., Mei X., Liu X., Gou P. Cooling capacity of a novel modular liquid-cooled battery thermal management system for cylindrical lithium ion batteries. *Applied Thermal Engineering* 2020; 178(2): 115591.

- Wu MS, Wang YY., Wan CC. Thermal behaviour of nickel/metal hydride batteries during charge and discharge. *Journal of Power Sources* 1998; 74(2): 202-210.
- Wu X., Lv S., Chen J. Determination of the optimum heat transfer coefficient and temperature rise analysis for a lithium-ion battery under the conditions of Harbin city bus driving cycles. *Energies* 2017; 10(11): 1723.
- Xie Y., Li W., Yang Y., Feng F. A novel resistance-based thermal model for lithium-ion batteries. *International Journal of Energy Research* 2018; 42(14): 4481-4498.