Adıyaman University
Journal of Engineering Sciences
Adyü J Eng Sci 2026;13:e260101
Adıyaman Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi
Adyü Müh Bil Derg 2026;13:e260101
https://doi.org/10.54365/adyumbd.1809895

Research Article / Araştırma Makalesi

Elektrikli Araç Batarya Paketlerinde Sıvı Soğutma: Akış Debisi ve Deşarj Oranının Deneysel Değerlendirilmesi

Liquid Cooling in Electric Vehicle Battery Packs: Experimental Assessment of Flow Rate and Discharge Rate

Soner Birinci [1], Melisa Albayrak[2], Buğra Sarper[2] *, M. Yusuf Yazıcı[3], Mehmet Sağlam[2], Orhan Aydın[2]

[1]Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye
[2]Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye
[3]Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

Öz

Elektrikli araçların (EV) verimliliği ve güvenliği için batarya termal yönetim sistemi (BTYS) kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, sıvı soğutmalı aktif BTYS ile soğutulan lityum-iyon batarya paketinin ısıl ve hidrolik performansı deneysel olarak incelenmiştir. Genişletilmiş ısı transfer yüzey alanına sahip bir soğutucu plaka kullanılan sistemde, beş farklı akış debisi (0.1–1.0 L/dk) ve üç farklı deşarj oranında (0.5C–2.0C) deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Maksimum sıcaklık, maksimum sıcaklık farkı ve basınç düşümü temel performans kriterleri olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, 0.5 ve 1.0C deşarj oranlarında sıcaklıkların 26.38–32.56°C aralığında kalarak kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu, 2.0C deşarj oranında ise artan debinin maksimum sıcaklığı 10.8°C ve sıcaklık farkını 5.2°C düşürerek soğutma performansını belirgin biçimde iyileştirdiğini göstermiştir. Bununla birlikte, debi artışı basınç düşümünün de artmasına neden olmuştur. İncelenen performans kriterleri birlikte değerlendirildiğinde, ideal akış debisinin 0.5 L/dk olduğu belirlenmiştir. İdeal debi değerinin hem termal güvenlik hem de enerji verimliliği açısından dengeli bir BTYS tasarımı sunduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Li-iyon batarya, Batarya termal yönetim sistemi, Elektrikli araç, Sıvı soğutma*

Abstract

An effective battery thermal management system (BTMS) is crucial to improve the efficiency and safety of electric vehicles (EVs). In this study, thermal and hydraulic performance of a liquid-cooled active BTMS for a Li-ion battery pack is experimentally investigated. The system, employing a cooling plate with an extended heat transfer surface area, is tested under five different coolant flow rates (0.1–1.0 L/min) and three different discharge rates (0.5C–2.0C). Maximum temperature, maximum temperature difference, and pressure drop are evaluated as key performance criteria. The results showed that, while temperatures remained within the acceptable limits of 26.38–32.56 °C at 0.5 and 1.0C, increasing the flow rate reduced the maximum temperature by 10.8°C and the temperature difference by 5.2°C, significantly improving cooling performance at 2.0C. However, higher flow rates also led to an increase in pressure drop. Considering all criteria, optimum flow rate was determined as 0.5 L/min, offering a balanced BTMS design for both thermal safety and energy efficiency.

Keywords: *Li-ion Battery, Battery thermal management system, Electric vehicle, Liquid cooling*

* Sorumlu yazar e-posta (Corresponding e-mail): bugrasarper@tarsus.edu.tr
Geliş Tarihi (Received):24.10.2025, **Kabul Tarihi (Accepted):** 24.12.2025

1. Giriş

İçten yanmalı motorlar (İYM), modern ulaşımın temel bileşenlerinden biri olup insan yaşamının kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ancak, İYM kullanımındaki hızlı artış, fosil yakıt tüketiminde ciddi bir yükselişe yol açmış ve çeşitli çevresel sorunları beraberinde getirmiştir. Ulaşım sektöründe artan fosil yakıt kullanımı, sera gazı ve kirletici emisyonların artmasına yol açarak hem insan sağlığını hem de çevreyi olumsuz yönde etkilemektedir [1]. Bu nedenle, çevresel problemler ve sağlıkla ilgili sorunların azaltılması için ekolojik açıdan daha sürdürülebilir çevre dostu araçların sayıca artışı büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda küresel otomotiv endüstrisi, ulaşım sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılması, karbon ayak izinin düşürülmesi ve nihai olarak sıfır karbon emisyon hedeflerine ulaşılması konusunda elektromobiliteyi önemli bir potansiyel olarak değerlendirmektedir. Teknolojik gelişmeler ve yatırımlar, elektromobilite, özellikle de elektrikli araçlara (EA) olan ilginin yoğunlaştığını ortaya koymaktadır [2].

Bellek etkisinin olmaması, düşük self-deşarj oranı, yüksek enerji yoğunluğu, hızlı şarj kabiliyeti, uzun çevrim ömrü, hafiflik ve geri dönüştürülebilirlik gibi avantajları sayesinde lityum-iyon bataryalar (LİB), günümüzde yalnızca elektrikli araçlarda değil; elektronik, robotik, havacılık-uzay ve yenilenebilir enerji sektörlerinde de yaygın biçimde tercih edilen bir enerji depolama teknolojisi olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, LİB teknolojisinin ömür, performans (termal ve elektriksel) ve güvenlik unsurlarının çalışma sıcaklıklarının fonksiyonu olması, sıcaklığı temel bir tasarım kriteri haline getirmektedir. Optimum performans için LİB'lerin 15–35°C aralığında tutulması ve hücreler arasındaki sıcaklık farkının 5°C'yi aşmaması önerilmektedir [3]. Ancak, LİB'in iç dirençler ve şarj/deşarj süreçlerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlardan kaynaklanan ısıl yükün etkin bir şekilde uzaklaştırılamaması, bir başka ifade ile fazla ısının yüzeyden süpürülememesi, hücrenin ideal ve istikrarlı çalışma koşullarından sapmasına neden olmaktadır. Bu durum performans kaybı, ısıl sürüklenme (termal kaçak), malzeme bozulması, çevrim ömrünün kısalması ve güvenlik sorunlarına yol açabilmektedir [4]. Isıl sürüklenme (termal kaçak) ise gaz salınımı, duman, yangın ve patlama gibi ciddi güvenlik risklerini beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla, LİB'lerin optimum performans, ömür ve güvenliğinin sağlanabilmesi için etkin bir batarya termal yönetim sistemi (BTYS) geliştirilmesi kaçınılmaz bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır [5].

BTYS'ler kullanılan soğutma yöntemine göre dört grupta sınıflandırılmaktadır: sıvı soğutma [6,7], hava soğutma [8,9], faz değişim malzemeleri ile soğutma (FDM) [10,11] ve hibrit sistemler [12,13]. Yüksek soğutma performansları nedeniyle sıvı soğutmalı sistemler, özellikle yüksek güç yoğunluğuna sahip batarya paketlerinde (BP) tercih edilmektedir. Literatürde sıvı soğutmalı BP'ler için soğutucu plaka kullanımına yönelik birçok çalışma bulunmasına karşın, bu çalışmaların büyük ölçüde benzer soğutucu plaka tasarımlarını tekrar ettiği ve özellikle prizmatik ve kese tip bataryalar üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir [14-16]. Ayrıca, silindirik lityum-iyon BP'lerin sıvı ile soğutulmasına yönelik deneysel çalışmaların da oldukça sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu doğrultuda, literatür özetinde silindirik LİB'lerin yer aldığı BP'lerde sıvı soğutma yaklaşımını kullanan deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Du vd. [17] farklı soğutma stratejileri altında, silindirik LİB'lerden oluşan bir BP için kullanılan mini kanal sıvı soğutma sisteminin ısıl performansını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada enerji tüketiminin azaltılması ve etkin soğutma sağlanması hedeflenmiş, sonuçlar mini kanal sisteminin BP'nin ortalama sıcaklığını ve hücreler arası sıcaklık farkını önemli ölçüde düşürdüğünü ortaya koymuştur. Wang vd. [18] soğutucu akışkan hızı ve soğutma metodunun (seri ve paralel soğutma) BP'nin ısıl davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla deneysel ve sayısal yöntemlerle yeni bir modüler sıvı soğutma sistemi önermiştir. Araştırmacılar, akış hızındaki artışın maksimum sıcaklığı önemli ölçüde azaltabildiğini, belirli bir hız aralığında sıcaklık homojenliğini iyileştirebildiğini ve seri soğutmaya kıyasla paralel soğutmanın BP içerisindeki sıcaklık dağılımını daha homojen hale getirdiğini belirtmişlerdir. Gao vd. [19] silindirik lityum-iyon BP'de sıcaklık homojenliğini iyileştirmek amacıyla değişken kesit alanına (gradyan yapıya) sahip bir sıvı soğutmalı BTYS geliştirmişlerdir. Çalışmada bölüntü sayısı ve bölüntü uzunlukları optimize edilmiş, elde edilen sonuçlar optimize edilmiş tasarımın tüm akış hızlarında sıcaklık homojenliğini

belirgin şekilde artırdığını göstermiştir. Sarchami vd. [20] silindirik LİB'lerin sıcaklık kontrolü için dalgalı/merdiven kanallı sıvı soğutma ve bakır kılıf içeren yeni bir BTYS geliştirmiş ve deşarj oranı, nanoparçacık konsantrasyonu, giriş hızı ve kanal geometrisinin etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonunda, önerilen sistemin BP'nin maksimum sıcaklığını ve sıcaklık farkını belirgin şekilde azalttığı görülmüştür. Angani vd. [21], silindirik lityum-iyon BP için Zig-Zag plakalarla entegre edilmiş hibrit paralel borulu soğutma ve sıvı tabanlı alt soğutma sistemlerinden oluşan bir BTYS geliştirmişlerdir. Araştırmacılar, hibrit paralel borulu BTYS'nin termal performansı %28 oranında iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Birinci vd. [22] silindirik lityum-iyon BP'de uniform olmayan sıcaklık dağılımını iyileştirmek amacıyla soğutucu plaka ile pil temas yüzey alanını artıran yeni bir soğutucu plaka tasarımı önermişlerdir. Çalışmada, 6S6P konfigürasyonu için farklı plaka yükseklikleri (30–60 mm), akış debileri (0.1–1.0 L/dk) ve deşarj oranları (0.5C–2.0C) incelenmiştir. Elde edilen bulgular, incelenen tüm çalışma ve tasarım koşulları içerisinde 0.5 L/dk akış hızı ve 50 mm plaka yüksekliğinin BTYS için en uygun performansı sağladığını ortaya koymuştur.

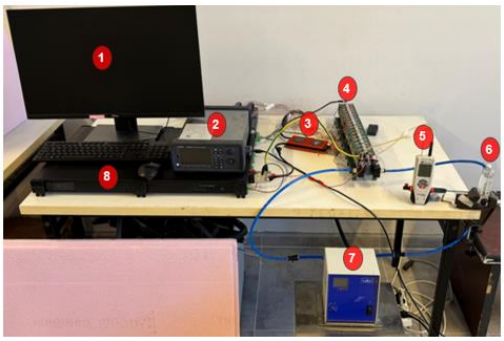
Sunulan çalışmaların büyük çoğunluğunun yalnızca soğutucu bloklar içerisine yerleştirilmiş soğutma kanalları tasarımına odaklandığı görülmektedir. Ancak, BP içerisindeki ısı transferi davranışı/karakteristiği dikkate alındığında, doğrudan soğutucu plaka tasarımına yönelik çalışmaların oldukça sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Isının BP üzerinden uzaklaştırılmasında, LİB ile doğrudan temas yüzey alanına sahip soğutucu plaka tasarımı belirleyici bir kriter olarak değerlendirilmekte, bu alandaki çalışma eksikliği ise önemli bir araştırma boşluğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, temelde, silindirik LİB'lerin sahip olduğu fiziksel kısıtlamalar/zorluklar ile ilişkilidir. Konvansiyonel soğutucu plakalar ile LİB arasındaki sınırlı ısı transfer yüzeyi (çizgisel temasa yakın durumlar) ısı transfer hızını sınırlandırmaktadır. Buna rağmen, LİB ile temas alanını artırmayı hedefleyen yenilikçi geometrik tasarımlara yönelik yaklaşımlarının önemli ölçüde eksik olduğu görülmektedir. Bu eksiklik, özellikle yüksek deşarj oranlarında hücre sıcaklığının güvenli aralıkta tutulması açısından kritik bir boşluk oluşturmaktadır. İlave olarak, silindirik LİB'lerin yüksek stabilite, üretim kolaylığı ve uzun ömür gibi avantajları bulunmasına rağmen [23,24], bu batarya tipine ilişkin deneysel verilerin yetersizliği de önemle vurgulanmalıdır. Bu doğrultuda, bu çalışma literatürde yaygın olarak tekrar eden konvansiyonel soğutucu plakalardan ayrışarak, LİB ile plaka arasındaki temas yüzey alanını artıran ve LİB yüzeyleri üzerinden soğutucu akışkana olan ısı transferinin iyileştirmeyi hedefleyen, yenilikçi soğutucu plaka tasarımını deneysel olarak incelemektedir.

Çalışma kapsamında, 6S6P konfigürasyonuna sahip BP için, artırılmış temas yüzey alanına sahip soğutucu plaka tasarımı kullanılarak beş farklı akış debisi (0.1–1.0 L/dk) ve üç farklı deşarj oranının (0.5C–2.0C) batarya ısıl performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar maksimum sıcaklık, maksimum sıcaklık farkı ve basınç kayıpları üzerinden sunulurken, soğutma performansı ile enerji verimliliği arasındaki denge ortaya konulmaktadır. Yapılan çalışma soğutucu plaka tasarımına yönelik yeni yaklaşımların sunulması ve deneysel veri üretimi ile literatüre önemli kazanımlar sunmaktadır.

2. Materyal ve Metod

Sıvı soğutmalı aktif bir BTYS ile soğutulan 6S6P konfigürasyonundaki bir BP'de, 40 mm yüksekliğe sahip soğutucu plaka kullanılarak beş farklı akış debisi (0.1–1.0 L/dk) ve üç farklı deşarj oranının (0.5C–2.0C) ısıl performans üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deney düzeneğinin genel görünümü Şekil 1'de sunulmaktadır. Deney düzeneği; test bölgesi, bilgisayar, programlanabilir DC güç kaynağı, sabit sıcaklık su banyosu, rotametre, batarya yönetim sistemi (BYS), veri toplama ünitesi ve fark basınç sensöründen oluşmaktadır. Bataryaların şarj ve deşarj işlemleri ITECH 80V/±80A/±4 kW programlanabilir güç kaynağı ile gerçekleştirilmiş, soğutucu akışkanın sıcaklığı Labo PL300-H22 sabit sıcaklık banyosu ile kontrol altında tutulmuştur. Bataryaların yüzey sıcaklıkları DAQ970A Keysight veri toplama sistemi ile ölçülmüş ve tüm deneysel veriler Dell T5820 iş istasyonunda kaydedilmiştir. BP'nin elektriksel olarak dengeli şarj/deşarjı için Power-Xtra 6S (22.2V, 100A) BYS kullanılmıştır. Soğutucu

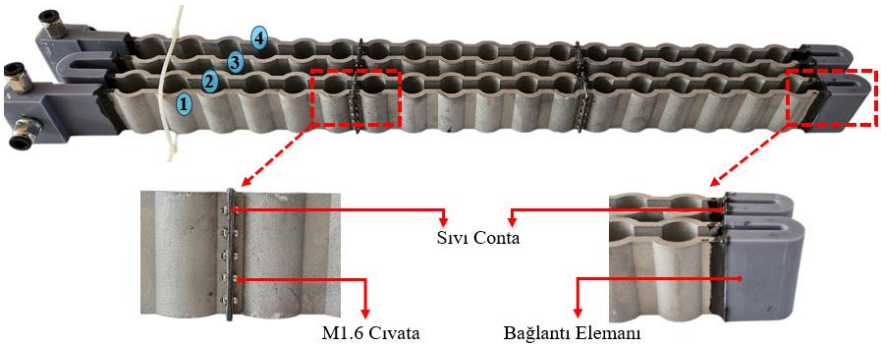
akışkan debisi ise şamandıralı rotametre (0-1 L/dk) ile ölçülmüş olup istenilen debi ve sıcaklık değerindeki akışkan soğutucu plaka girişine beslenmiştir. Soğutucu plaka giriş ve çıkışları arasındaki basınç farkı, HT-1890 dijital manometre ile ölçülmüştür.



1. Bilgisayar
2. Veri Toplama Cihazı
3. BMS
4. Test Bölgesi
5. Fark Basınç Sensörü
6. Rotametre
7. Su Banyosu
8. Çift Yönlü Güç Kaynağı

Şekil 1. Deney düzeneğinin genel görünümü

BTYS için kullanılacak soğutucu plakanın imalatı metal üç boyutlu yazıcı ile yapılmıştır. Soğutucu plaka, yüksek ısıl iletkenliği ve hafifliği nedeniyle AlSi10Mg alaşımı kullanılarak üretilmiştir. Soğutucu plakanın bir bütün olarak hazırlanması süreci Şekil 2'de sunulmuştur. Soğutucu plaka, 3-D metal yazıcının üretim kabiliyeti göz önünde bulundurularak on iki parça hâlinde imal edilmiştir. Bu çalışmada soğutucu akışkan olarak su kullanılmıştır. Kullanılan AlSi10Mg malzemesi ve suya ait ait temel termofiziksel özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Parçalar üçlü gruplar halinde düzenlenerek bir flanş tasarımı üzerinden M1.6 cıvata/somun ile uç uca bağlanmıştır. Benzer yaklaşımla üçerli grup olarak dört adet soğutucu plaka montajı yapılmıştır. Nihai olarak, her biri 554 mm uzunluğunda olan dört adet soğutucu plaka parçasının uç uca eklenmesi ile soğutucu plaka bir bütün olarak elde edilmiştir (bkn. Şekil 2). Soğutucu plaka parçalarının dönüş noktalarındaki bağlantıları ise U-şeklindeki bağlantı elemanları üzerinden sağlanmıştır. Çalışmada kullanılan soğutucu plakanın yüksekliği 40 mm, duvar kalınlığı (t) 0.5 mm ve genişliği (w) 4 mm'dir. LİB'ler ile soğutma plakası arasındaki temas açısı (θ) ise 120°'dir. Plakaların birleşimlerinde sızdırmazlık, yüzeylere uygulanan sıvı conta ile sağlanmıştır.



Şekil 2. Soğutucu plakanın birleştirilme süreci

Tablo 1. AlSi10Mg termofiziksel özellikleri

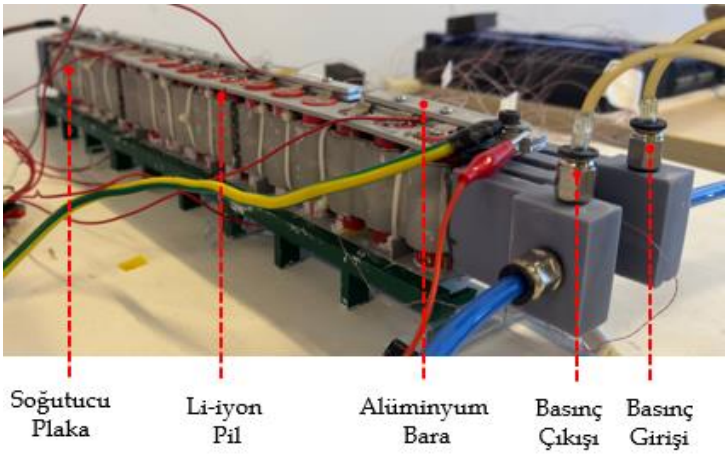
Malzeme	ρ (kgm^{-3})	c_p $(Jkg^{-1}K^{-1})$	k $(Wm^{-1}K^{-1})$	μ $(kgm^{-1}s^{-1})$
AlSi10Mg	2670	910-920	130-150	-
Su	996.58	4072.7	0.61229	0.0008684

BP 3.4Ah kapasiteye ve 4.2V nominal gerilime sahip ticari Panasonic NCR18650GB LİB'ler kullanılarak, altı seri ve altı paralel (6S6P) konfigürasyonuna göre hazırlanmıştır (Şekil 3). NCR18650GB' ye ait temel teknik özellikler Tablo 2'de verilmiştir. LİB'lerin soğutucu plakaya yerleştirilmesinde temas direncini azaltmak amacıyla termal macun kullanılmıştır. Seri ve paralel bağlantılar için alüminyum baralar, LİB'lerin nokta kaynağı için ise nikel şeritler kullanılmıştır. BP'yi oluşturan soğutucu plaka, basınç farkını

ölçmek için kullanılan basınç giriş ve çıkış noktaları, LİB'ler ve alüminyum bara Şekil 3'te gösterilmektedir.

Tablo 2. NCR18650GA'ya temel özellikler

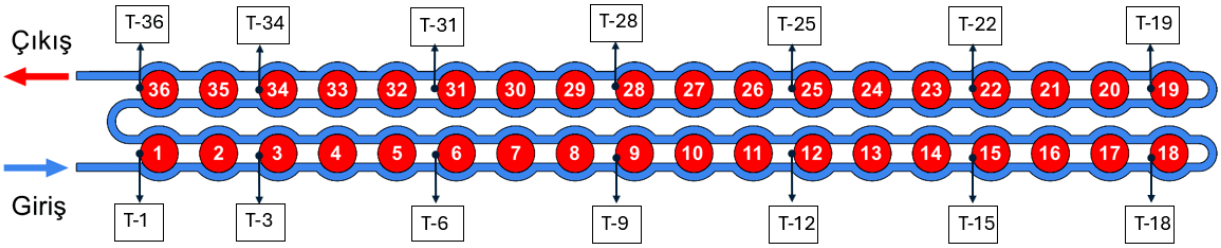
Parametre	**Değer**
Katot	NCA
Anot	Graphite+SiOx
Çapı (mm)	18.50
Yüksekliği (mm)	65.30
Ağırlığı (g)	48
Minimum Kapasite	3350 mAh
Tipik Kapasite	3450 mAh
Üst Kesme Voltajı (V)	4.2
Alt Kesme Voltajı (V)	2.5
Nominal Gerilimi (V)	3.6



Şekil 3. Oluşturulan batarya paketi

Deneyler süresince BP, sabit akım–sabit voltaj (CC–CV) yöntemi ile şarj edilmiştir. Şarj işlemi, voltaj 24.9 V değerine ulaşana kadar 10.2 A (her paralel bağlantı için 0.5C) sabit akım altında devam etmektedir. Voltaj 24.9 V değerine ulaştıktan sonra, akım 0.402 A seviyesine düşünceye kadar sabit gerilim altında (24.9 V) şarj işlemi devam etmekte ve bu noktada şarj işlemi tamamlanmaktadır. Şarj işlemi tamamlandıktan sonra LİB'lerin elektrokimyasal dengeye ulaşabilmeleri için bir saat beklenilmektedir.

Deşarj işlemi süresince LİB'lerin yüzey sıcaklıklarının ölçülmesi ve kaydedilmesi için T tipi termoeleman çiftleri (± 1°C) kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümleri pillerin merkez noktalarından alınmış ve DAQ970A Keysight Veri Toplama Sistemi (± 1.1°C) ile bilgisayara kaydedilmiştir. Termoelemanlar pil yüzeylerine kapton bant yardımıyla monte edilmiş olup termoeleman konumları detaylı olarak Şekil 4'te gösterilmiştir. Çalışmada sunulan tüm sıcaklık ölçümleri her test koşulu için gerçekleştirilen tek bir deneysel ölçüme dayanmaktadır. Basınç ölçümleri ise yapılan ölçümlerin ortalamasını ifade etmektedir.



Şekil 4. Sıcaklık ölçüm noktaları

Deneyler süresince soğutucu akışkan olarak kullanılan suyun plakaya giriş sıcaklığı, sabit sıcaklık su banyosu (± 0.02°C) ile 25°C'de sabitlenmiş, ortam sıcaklığı ise klima sistemi ile 25 °C±0.5°C'de tutulmuştur.

Tablo 2'de bu çalışmada kullanılan akım, gerilim ve sıcaklık ölçüm sistemlerine ait belirsizlik değerleri verilmiştir. Termoelemanlar ve veri toplama cihazından kaynaklanan hata oranları birlikte değerlendirildiğinde, sıcaklık ölçümlerine ilişkin toplam belirsizlik ±1.49 °C olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, gerilim ve akım değerleri dikkate alındığında, güç kaynağı için toplam belirsizlik %0.23 olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Kullanılan ölçüm cihazlarının belirsizlik değerleri

Cihazlar		**Belirsizlikler**
Sıcaklık Banyosu		± 0.02 °C
BYS	Şarj	± 0.05 V
	Deşarj	± 0.1 V
Güç Kaynağı	Gerilim	± 0.001 V
	Akım	± 0.1 A
Veri Toplama Cihazı		± 1.1 °C
Termoeleman		± 1 °C

3. Bulgular ve Tartışma

BTYS'nin ısıl performansı 40 mm yüksekliğe sahip soğutucu plaka için beş farklı akış debisi (0.1–1.0 L/dk) ve üç farklı deşarj oranı (0.5C, 1.0C ve 2.0C) altında test edilmiştir. Isıl performans değerlendirmesi BP içerisindeki maksimum sıcaklık, maksimum sıcaklık farkı ve basınç farkı parametreleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Maksimum sıcaklık farkı;

$$\Delta T_{maks} = T_{maks} - T_{min} \tag{1}$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada ΔT_{maks}, T_{maks} ve T_{min} sırasıyla BP içerisindeki maksimum sıcaklık farkını, BP'de ulaşılan maksimum sıcaklık değeri ve minimum sıcaklık değerini göstermektedir. Deneysel çalışmalarda farklı çalışma koşulları için BP'de sabit kesme voltajı değeri kullanılmıştır. Böylece, farklı debilerde gerçekleştirilen deşarj testleri aynı sınır koşulları altında yürütülmüş ve sonuçların karşılaştırılabilirliği sağlanmıştır.

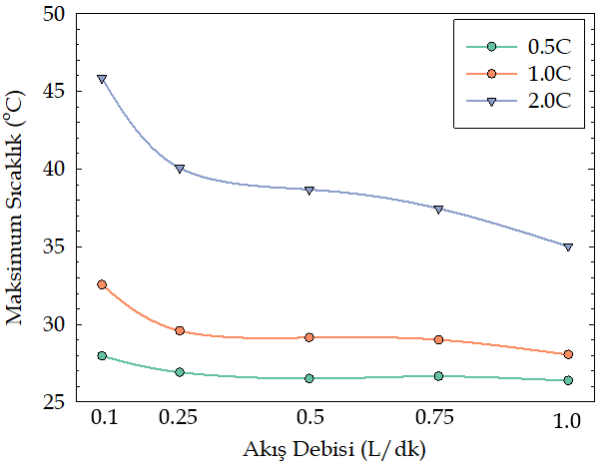
Boyutsuz basınç farkı;

$$\Delta P^* = \frac{\Delta P}{\Delta P_{ref}} \tag{2}$$

eşitliği ile hesaplanır. ΔP soğutucu plaka giriş ve çıkışları arasındaki basınç farkını (Pa) ifade etmektedir. Bu çalışmada basınç farkı, referans bir değer kullanılarak boyutsuz hale getirilmiş olup ΔP^* boyutsuz basınç farkını ifade ederken, ΔP_{ref} 0.1 L/dk debi için ölçülen referans basınç farkını göstermektedir.

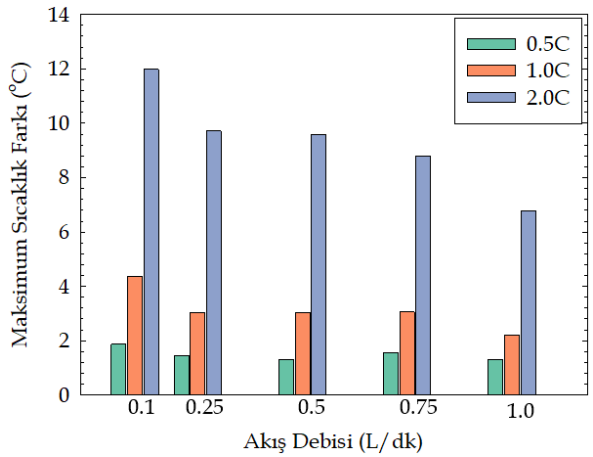
Şekil 5, BP içerisindeki maksimum sıcaklığın akış debisi ve deşarj oranına bağlı olarak değişimini göstermektedir. 0.5C ve 1.0C deşarj oranlarında maksimum sıcaklıklar yaklaşık 26.5–32.5 °C aralığında değişim göstererek LİB'ler için kabul edilebilir sınırlar (35°C) içerisinde kalmıştır [3]. Ayrıca, düşük deşarj oranı değerlerinde (0.5C ve 1C) soğutucu akışkan debisinin maksimum sıcaklıklar üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu görülmektedir. Özellikle 0.25 L/dk'dan sonra maksimum çalışma sıcaklıklarının, 0.5C

deşarj oranı için yaklaşık %2 ve 1.0C deşarj oranı için ise yaklaşık %5 azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, düşük deşarj oranlarındaki düşük soğutma ihtiyacına bağlı olarak, debi artışının maksimum sıcaklıklar üzerindeki etkisinin görece düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşın, 2.0C deşarj oranında LiB'lerin iç ısı üretiminin artması nedeniyle maksimum sıcaklık değerleri belirgin şekilde yükselmiş ve daha yüksek soğutma yükü ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Özellikle 0.1 L/dk debide maksimum çalışma sıcaklığı yaklaşık 46°C seviyelerine ulaşırken, artan debi ile maksimum sıcaklığın 35°C seviyelerine kadar düştüğü gözlenmiştir. Bu durum, yüksek deşarj oranlarında artan debinin BTYS'nin soğutma performansını belirgin ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. 2.0C deşarj oranı değerinde 1.0 L/dk için maksimum çalışma sıcaklığı 0.25 L/dk'ya kıyasla yaklaşık %13 oranında azalmıştır.



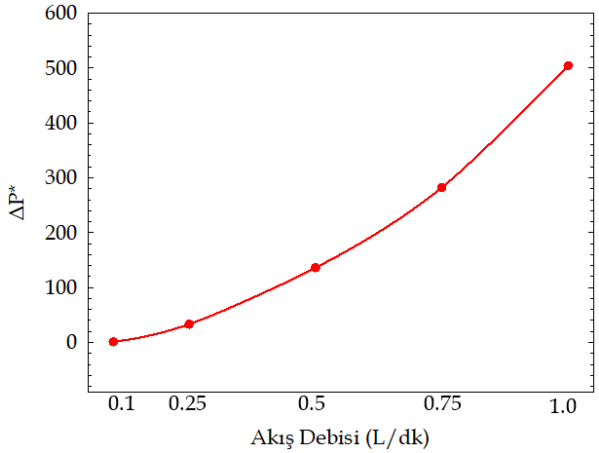
Şekil 5. BP içerisindeki maksimum sıcaklığın debi ve deşarj oranı ile değişimi

BP içerisindeki maksimum sıcaklık farkının akış debisi ve deşarj oranına bağlı değişimi Şekil 6'da sunulmuştur. Görüldüğü üzere, 0.5C ve 1.0C deşarj oranlarında maksimum sıcaklık farkı tüm debiler için 5°C'nin altında kalarak kabul edilebilir sınırlar (5°C) içerisinde gerçekleşmiştir [3]. Bu durum, düşük deşarj oranlarında batarya paketi içerisinde sıcaklık dağılımının oldukça homojen olduğunu ortaya koymaktadır. 0.5C deşarj oranında 0.1, 0.25, 0.5, 0.75 ve 1.0 L/dk debi değerleri için maksimum sıcaklık farkları, sırasıyla, 1.87°C, 1.46°C, 1.32°C, 1.56°C ve 1.31°C olurken; 1C'de sırasıyla 4.38°C, 3.05°C, 3.04°C, 3.06°C ve 2.21°C olarak elde edilmiştir. Buna karşın, 2.0C deşarj oranında artan ısı üretimi nedeniyle maksimum sıcaklık farkı belirgin şekilde yükselmiş ve hücreler arası homojen olmayan sıcaklık dağılımı meydana gelmiştir. Özellikle 0.1 L/dk'da maksimum sıcaklık farkı yaklaşık 12°C seviyelerine ulaşmış, debinin artırılmasıyla birlikte kademeli olarak azalarak 1.0 L/dk'da 7°C seviyelerine kadar düşmüştür. Bu bulgular, artan debinin yüksek deşarj oranlarında BP içerisindeki sıcaklık homojenliğinin iyileştirilmesinde kritik bir rol oynadığını göstermektedir.



Şekil 6. BP içeresindeki maksimum sıcaklık farkının debi ve deşarj oranı ile değişimi

Soğutucu plaka giriş ve çıkışları arasında meydana gelen basınç farkının akış debisi ile değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Artan debi ile basınç farkının da arttığı görülmektedir. Bu durum, yüksek debide elde edilen düşük maksimum sıcaklık (bkn. Şekil 5) ve düşük maksimum sıcaklık farkları (bkn. Şekil 5 ve Şekil 6) için yüksek pompalama gücü ihtiyacına gereksinim duyulacağını ve enerji tüketiminin artacağını ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, sürdürülebilirlik hedefleri kapsamında daha enerji etkin sistemlerin tasarımı ve optimum soğutma koşullarının belirlenmesinde, termal ve hidrolik etkilerin birlikte dikkate alınması gerekmektedir. Elde edilen çıktılar birlikte değerlendirildiğinde 0.5 L/dk'lık akış debisinde paket içerisindeki maksimum sıcaklık farkı 10°C'ye yakın olmasına karşın Şekil 5'ten görüldüğü gibi paket içerisindeki maksimum hücre sıcaklığı halen kabul edilebilir çalışma koşulları içerisindedir [3]. Dolayısıyla 0.5 L/dk'nın ötesinde bir akış debisinde çalışarak pompalama için daha fazla güç tüketimi akılcı olmayacaktır. Sonuç olarak, sıcaklık koşulları göz önünde bulundurulduğunda ideal akış debisinin 0.5 L/dk olduğu değerlendirilmektedir. İdeal debi değeri ile hem ısıl güvenlik hem de enerji verimliliği açısından dengeli bir BTYS tasarımı elde edilebilmektedir.



Şekil 7. Soğutucu plaka giriş-çıkış arasındaki boyutsuz basınç farkının debi ile değişimi

4. Sonuç

Bu çalışmada, sıvı soğutmalı aktif bir BTYS'nin termohidrolik performansı 6S6P konfigürasyonuna sahip bir lityum-iyon BP için test edilmiştir. Artırılmış temas alanına sahip soğutucu plaka tasarımı kullanılarak beş farklı akış debisi (0.1–1.0 L/dk) ve üç farklı deşarj oranının (0.5C–2.0C) ısıl performans üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen çıktılar özetle aşağıda sunulmuştur:

- 0.5C ve 1.0C deşarj oranlarında maksimum sıcaklık değerleri 26.5–32.5°C aralığında kalarak kabul edilebilir sınırlar içerisinde gerçekleşirken, 2.0C deşarj oranında artan iç ısı üretimi nedeniyle maksimum sıcaklıklar 45.85-35.03°C aralığında kalarak kabul edilebilir sınırların üzerine (35°C) çıkmıştır.

- 0.5C ve 1.0C deşarj oranlarında maksimum sıcaklık farkı 5°C'nin altında kalarak paket içerisinde daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağlanmış, ancak 2.0C'de artan sıcaklıklara bağlı olarak maksimum sıcaklık farkı kabul edilebilir sınırların dışına çıkmıştır (5°C).

- 0.5C ve 1.0C deşarj oranlarında özellikle 0.25 L/dk'dan sonra soğutucu akışkan debisinin artırılmanın maksimum sıcaklıklar üzerindeki etkisinin sınırlı kaldığı (%2-5), 2.0C'de bu etkinin daha belirgin hale geldiği (%13) görülmüştür. Artan akış debisiyle birlikte hem maksimum sıcaklık hem de maksimum sıcaklık farkı azalmıştır.

- Akış debisinin artması soğutma performansını genel olarak iyileştirirken aynı zamanda soğutucu plaka giriş-çıkışları arasındaki basınç farkını da yükseltmiştir. Tüm değerlendirme kriterleri göz önüne alındığında, ideal akış debisinin 0.5 L/dk olduğu değerlendirilmiştir.

Fon Destek Beyanı

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından 123M486 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Katkı Beyanı

Bu makalede adı geçen tüm araştırmacılar, literatür incelemesi, deneysel çalışmalar, veri analizi ve raporlama süreçlerinin tamamında aktif olarak yer almıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makalenin yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

Kaynaklar

[1] Moaveni A, Siavashi M, Mousavi S. Passive and hybrid battery thermal management system by cooling flow control, employing nano-PCM, fins, and metal foam. Energy 2024; 288.
[2] Zhang X, Li Z, Luo L, Fan Y, Du Z. A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. Energy 2022; 238.
[3] Pesaran A, Santhanagopalan S, Kim G-H. Addressing the Impact of Temperature Extremes on Large Format Li-Ion Batteries for Vehicle Applications (Presentation), NREL (National Renewable Energy Laboratory). 2013.
[4] Hao M, Li J, Park S, Moura S, Dames C. Efficient thermal management of Li-ion batteries with a passive interfacial thermal regulator based on a shape memory alloy. Nat. Energy 2018; 3:899–906.
[5] Kim J, Oh J, Lee H. Review on battery thermal management system for electric vehicles. Appl. Thermal Engineering 2019; 149:192–212.
[6] Liu Q, Liu F, Liu S, Wang Y, Panchal S, Fowler M, et al. Improved performance of Li-ion battery thermal management system by ternary hybrid nanofluid. Journal of Energy Storage 2025; 109.
[7] Du X, Wang Z, Gao Q, Yang H, Bao R, Xiong S. Study on novel battery thermal management using triply periodic minimal surface porous structures liquid cooling channel. Appl. Therm. Eng. 2024; 257.
[8] Jiaqiang E, Yue M, Chen J, Zhu H, Deng Y, Zhu Y, et al. Effects of the different air cooling strategies on cooling performance of a lithium-ion battery module with baffle. Appl. Therm. Eng. 2018; 144:231–41.
[9] Yan H, Ma X, Chen Y, Tao Q, Song M. Performance analysis of a wet pad assisted air-cooled battery thermal management system with varying number of battery cells. Applied Therm. Eng. 2025; 259.
[10] Safdari M, Ahmadi R, Sadeghzadeh S. Numerical investigation on PCM encapsulation shape used in the passive-active battery thermal management. Energy 2020;193.
[11] Zare P, Perera N, Lahr J, Hasan R. Uniform temperature distribution, prolonged temperature regulation, and accelerated recovery of battery thermal management system using a novel fin design. J. Energy Storage 2025;108.
[12] Zhou H, Li W, Gong D, Xue C, Guo X, Song Z. Thermal performance of a hybrid thermal management system that couples PCM with liquid cooling for cylindrical lithium-ion battery. Appl. Therm. Eng. 2025;274.
[13] Sun Y, Zhang H, Qi F, Li Y, Guo H, Wang C, et al. Battery thermal management systems on the integration of multi-layer phase change materials and liquid cooling energy-saving strategies. Appl. Therm. Eng. 2025;278.

[14] Xu Q, Xie Y, Huang Y, Li X, Huang H, Bei S, et al. Enhancement of thermal management for cylindrical battery module based on a novel wrench-shaped design for the cold plate. Sustain. Energy Technol. Assess. 2023;59.
[15] Salimi A, Khoshvaght-Aliabadi M, Rashidi S. On thermal management of pouch type lithium-ion batteries by novel designs of wavy minichannel cold plates: Comparisonof co-flow with counter-flow. J. Energy Storage 2022;52.
[16] Kabirzadeh P, Liu Z, Olyaei M, Qiu H, Gurumukhi Y, Tyagi H. Integrating heat transfer and control optimization: A comprehensive review of battery thermal management systems. J. Energy Storage 2025; 131.
[17] Du X, Qian Z, Chen Z, Rao Z. Experimental investigation on mini-channel cooling–based thermal management for Li-ion battery module under different cooling schemes. Int. J. Energy Res. 2018; 42:2781–8.
[18] 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. Appl. Therm. Eng. 2020; 178.
[19] Gao R, Fan Z, Liu S. A gradient channel-based novel design of liquid-cooled battery thermal management system for thermal uniformity improvement. J. Energy Storage 2022; 48.
[20] Sarchami A, Najafi M, Imam A, Houshfar E. Experimental study of thermal management system for cylindrical Li-ion battery pack based on nanofluid cooling and copper sheath. Int. J. Therm. Sci. 2022.
[21] Angani A, Kim HW, Hwang MH, Kim E, Kim KM, Cha HR. A comparison between Zig-Zag plated hybrid parallel pipe and liquid cooling battery thermal management systems for Lithium-ion battery module. Appl. Therm. Eng. 2023; 219.
[22] Birinci S, Albayrak M, Sarper B, Yazici MY, Saglam M, Aydin O. Effect of cooling plate contact area and flow rate on the performance of liquid-cooled cylindrical lithium-ion battery pack. Appl. Therm. Eng. 2025;279.
[23] Lai Y, Wu W, Chen K, Wang S, Xin C. A compact and lightweight liquid-cooled thermal management solution for cylindrical lithium-ion power battery pack. Int. J. Heat Mass Transf. 2019; 144.
[24] 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 Convers. Manage. 2017; 150:304–30.