

Boru Destekli Hava Soğutmalı Sistemlerin Lityum-İyon Batarya Paketlerindeki Termal Performansının İncelenmesi

Ferhat AKKUŞ^{1,a}, Mehmet Zerrakki IŞIK^{1,b}

¹Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Batman, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-4587-7039; ^bORCID: 0000-0001-9753-6458

Makale Bilgileri

Geliş : 19.07.2025

Kabul : 31.10.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1746133

Sorumlu Yazar

Ferhat AKKUŞ

Ferhat.akkus@batman.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Elektrikli araçlar

Lityum iyon bataryalar

Batarya termal yönetim sistemleri

Hava soğutma

Uniform sıcaklık dağılımı

Atıf şekli: AKKUŞ, F., IŞIK, M.Z., (2025).
Boru Destekli Hava Soğutmalı Sistemlerin Lityum-İyon Batarya Paketlerindeki Termal Performansının İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(4), 855-866.

ÖZ

Artan küresel enerji talebi ve çevresel kaygılar, fosil yakıtlara dayalı ulaşım sistemlerinde sürdürülebilir alternatiflerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu doğrultuda elektrikli araçlar, yüksek verimlilikleri ve sıfır emisyon özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Elektrikli araçların temel bileşenlerinden biri olan lityum-iyon bataryalar, termal kararlılık açısından dikkatle izlenmeli; aşırı ısınmanın önüne geçilmelidir. Bu çalışmada, tasarlanan geometrideki sahip lityum-iyon batarya paketlerinin termal davranışı, boru destekli hava soğutmalı sistemle sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Farklı hava akış hızlarında ve boru konfigürasyonlarında analiz edilerek soğutma performansları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, artan hava hızı ve boru sayısının sıcaklık dağılımını iyileştirdiğini, hücreler arası sıcaklık farkını azalttığını ve maksimum sıcaklık değerlerini düşürdüğünü göstermektedir. Çalışma, elektrikli araçlarda batarya güvenliğini artırmaya yönelik termal yönetim sistemlerinin optimizasyonu için önemli bulgular sunmaktadır.

Investigation of Thermal Performance of Pipe-Supported Air-Cooled Systems in Lithium-Ion Battery Packs

Article Info

Received : 19.07.2025

Accepted : 31.10.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1746133

Corresponding Author

Ferhat AKKUŞ

Ferhat.akkus@batman.edu.tr

Keywords

Electric vehicles

Lithium-ion batteries

Battery thermal management systems

Air cooling

Uniform temperature distribution

How to cite: AKKUŞ, F., IŞIK, M.Z., (2025). Investigation of Thermal Performance of Pipe-Supported Air-Cooled Systems in Lithium-Ion Battery Packs. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(4), 855-866.

ABSTRACT

The increasing global energy demand and environmental concerns have necessitated the development of sustainable alternatives to fossil fuel-based transportation systems. In this context, electric vehicles have gained prominence due to their high efficiency and zero-emission characteristics. Lithium-ion batteries, as one of the core components of electric vehicles, require careful monitoring for thermal stability to prevent overheating. In this study, the thermal behavior of lithium-ion battery packs with the designed geometry was investigated numerically and experimentally with a tube-supported air-cooled system. Cooling performances were compared by analyzing different air flow velocities and pipe configurations. The results demonstrate that increasing air velocity and the number of pipes improves temperature distribution, reduces temperature gradients between cells, and lowers maximum temperature values. This study provides significant insights for the optimization of thermal management systems aimed at enhancing battery safety in electric vehicles.

1. GİRİŞ

Canlıların hayatlarını devam ettirebilmesi için enerji en temel gereksinim olmasının yanında, ekonomik, sosyal ve teknolojik gelişmelerin temel itici unsurudur. Nüfus artışı, kentleşme ve sanayi alanlarındaki hızlı ilerlemeler enerji talebini daha da artırmış, bu da enerji kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini ve üretim süreçlerinin çevresel etkilerinin azaltılmasını zorunlu kılmıştır. Fosil yakıtların kısıtlı rezervleri ve oluşturduğu çevresel sorunlar, güneş, rüzgâr, biokütle, hidrolik ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmıştır. Ulaşım sektörü, fosil yakıtlı içten yanmalı motorlara dayalı gelişimi nedeniyle yüksek enerji tüketimi ve çevresel sorunlar yaratmaktadır. Artan çevresel kaygılar ve enerji güvenliği ihtiyacı, sektörde temiz, sürdürülebilir ve çevre dostu alternatiflerin geliştirilmesini zorunlu kılmış ve elektrikli araç teknolojilerini ön plana çıkarmıştır [1-7].

Elektrikli araçlar, benzin, motorin ve LPG gibi petrol türevi yakıtlara bağımlılığı azaltmış, yüksek enerji verimliliği ve sıfır emisyon gibi avantajları sayesinde sürdürülebilir ulaşımında kritik bir rol oynar. Yapısal ve çalışma prensiplerine göre tam elektrikli araçlar (BEV), hibrit elektrikli araçlar (HEV) ve fişli hibrit elektrikli araçlar (PHEV) olarak sınıflandırılır. BEV'ler yalnızca elektrik motoru ile çalışarak sıfır emisyon sağlar, HEV'ler geleneksel içten yanmalı motor ile elektrik motorunu birlikte kullanarak yakıt verimliliğini artırır, PHEV'ler ise harici şarj imkânıyla elektrik kullanım süresini uzatır. Bu çeşitlilik, fosil yakıt kullanımını azaltmak ve enerji depolama çözümlerini geliştirmek için farklı ihtiyaçlara yanıt verir. Elektrikli araçlarda enerji depolama ve kullanımının en önemli bileşenini bataryalar oluşturmaktadır. Lityum iyon bataryalar (LiB), yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömür ve düşük kendi kendine deşarj özellikleri gibi avantajlarıyla sıklıkla tercih edilir. Yapısal olarak kese, prizmatik ve silindirik tipleri bulunur; kese tip hafif ve düşük dirençli olup termal yönetim açısından oldukça hassastır, prizmatik tip yüksek kapasite ve geniş soğutulabilir yüzeyi bulunmakta, silindirik tip ise kompakt yapısı ve yüksek güç yoğunluğu ile mekanik dayanıklılık sağlar. Bu çeşitlilik, farklı performans ve güvenlik gereksinimlerine uygun batarya çözümleri sunar [8-22].

Elektrikli araçların verimliliği ve güvenliği batarya teknolojilerine bağlıdır. LiB yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömürleriyle yaygın kullanılır; ancak maliyet, sınırlı ömür ve sıcaklık hassasiyeti gibi zorlukları bulunmaktadır. Bataryalar için sıcaklık; performans, şarj-deşarj hızı ve ömür üzerinde kritik bir etkidir. Ani sıcaklık değişimleri kimyasal yapıyı bozarak performans kaybı ve güvenlik risklerine yol açabilir. Optimum sıcaklık aralığının (20-40 °C) korunması ve hücreler arası farkın 5 °C'yi geçmemesi çok önemlidir. Yüksek şarj-deşarj hızları (C oran) termal dengesizlik yaratarak batarya ömrünü kısaltır. Bu nedenle, elektrikli araçlarda güvenli ve verimli batarya kullanımı için şarj kontrolünün yanı sıra etkili bir termal yönetim sistemi gereklidir [23-27].

Elektrikli araç bataryalarının etkin termal yönetimi, batarya performansı, güvenliği ve ömrü açısından kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda yapılan çeşitli çalışmalarda, lityum iyon batarya paketlerinin hava soğutmalı termal yönetim sistemlerinin optimizasyonu ve enerji verimliliği artırmaya yönelik yaklaşımlar incelenmiştir. Mustafa çalışmasında [28], batarya hücreleri arasındaki mesafe ile hava giriş-çıkış boyutlarının batarya sıcaklığı ve ısı transferi üzerindeki etkileri modellenmiş; hava giriş boyutunun artırılmasının sıcaklık düşürmede ve ısı transferini iyileştirmede etkili olduğu gösterilmiştir. Benzer şekilde, Hasan ve arkadaşları [29], hücreler arası mesafenin artmasının ve yüksek Reynolds sayılarının batarya yüzeyindeki sıcaklıkları düşürerek termal performansı iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, hava akışının batarya termal yönetiminde önemli bir yöntem olduğunu desteklemektedir. Zhang ve arkadaşları [30] çalışmalarında, farklı hava çıkış konumlarına sahip hava soğutmalı sistemlerin performansını inceleyerek, rüzgâr hızının ve çıkış konumunun termal dengeyi olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Çalışmada geliştirilen matematiksel model, soğutma performansının optimize edilmesi için değerli bir referans sunmaktadır. Isı borulu soğutma sistemleri üzerine yapılan araştırmalar da termal yönetim alanında önemli katkılar sağlamaktadır. Alihosseini ve Shafae [31] tarafından önerilen bakır ısı borulu sistem, zorlanmış taşınım ile batarya sıcaklığının optimum aralıkta tutulmasını sağlamış, ortam sıcaklığının batarya performansı üzerindeki etkisi vurgulanmıştır. Ren ve arkadaşları [32] ise U şekilli mikro ısı borusu içeren aktif soğutma sistemlerinin, farklı şarj/deşarj oranlarında batarya sıcaklığını önemli ölçüde düşürdüğünü ve yüksek yük koşullarında tercih edilmesi gerektiğini göstermiştir. Ancak aktif soğutma sistemlerinde sıcaklık homojenliğinin pasif sistemlere kıyasla daha düşük olduğu da belirtilmiştir. Genel olarak, literatürde hava akışı optimizasyonu, hava giriş-çıkış boyutlarının ayarlanması, ısı borulu aktif soğutma

sistemlerinin LiB'lerin termal yönetiminde etkili olduğu ve batarya performansını artırdığı görülmektedir. Bu yöntemler, elektrikli araç batarya sistemlerinin güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışmasını destekleyerek, sürdürülebilir ulaşım teknolojilerinin gelişimine katkı sağlamaktadır.

Bu bağlamda, bu çalışmada, 14,4 V maksimum voltaj ve 24,5 A maksimum akım kapasitesine sahip, 4 seri 7 paralel (4S7P) konfigürasyonlu LiB paketinin termal yönetimi için bakır ısı borulu soğutma sistemleri üzerine odaklanılmıştır. Tasarlanan batarya paketinde, ısı borularının içinden yönlendirilen hava akışı ile batarya hücrelerinden ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılması amaçlanmıştır; böylece hücreler arasındaki sıcaklık farkının minimize edilmesi ve termal kaçak riskinin azaltılması hedeflenmiştir. Literatürde yaygın olarak incelenen hava soğutmalı ve pasif/aktif ısı borulu sistemlerin ötesinde, bu çalışma dizilim geometrisi ve bakır ısı borularının yönlendirilmiş hava akışı ile entegrasyonunu bir araya getirerek batarya paketinin termal davranışını özgün bir şekilde ele almaktadır. Önceki çalışmalarda genellikle hücreler arası mesafe, hava giriş-çıkış boyutları veya mikro ısı borulu sistemlerin farklı geometrilerdeki performansları incelenmişken, bu çalışmada yüksek akım ve 4S7P konfigürasyonlu batarya paketlerinde aktif ısı borulu soğutma sisteminin performansı sistematik olarak değerlendirilmiştir. Bu özellikleri ile çalışma, literatürdeki hava ve ısı borulu soğutma sistemleri araştırmalarından farklılaşmakta ve elektrikli araç bataryalarının güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışmasını destekleyen özgün bir tasarım ve analiz yaklaşımı sunmaktadır.

2. YÖNTEM

2.1. Model Tasarımı

Bu çalışmada, oluşturulan geometrik dizilime sahip 4 seri 7 paralel (4S7P) konfigürasyonda toplam 28 adet 18650 silindirik tip lityum iyon batarya hücresinden oluşan paketin termal performansını artırmak amacıyla bakır borular kullanılarak bir soğutma sistemi tasarlanmıştır. Yüksek ısıl iletkenliğe sahip bakır borular, batarya hücreleri arasına doğrudan entegre edilerek açığa çıkan ısının hızlı ve dengeli bir şekilde uzaklaştırılması hedeflenmiştir. Her bir batarya hücresinin çapı 18 mm, yüksekliği 65 mm olup, nominal gerilimi 3,6–3,7 V, kapasitesi 3500 mAh, minimum kesme voltajı 2,5 V ve maksimum kesme voltajı 4,2V'tur. Bataryalar, iki plaka arasında akım koruma kartı, nikel şerit ve punta kaynağı ile güvenli şekilde monte edilmiştir. Batarya paketinin maksimum voltajı 14,4 V, maksimum akımı ise 24,5 A olarak belirlenmiştir. Şarj işlemleri sabit akım–sabit voltaj (CC–CV) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu bilgiler, çalışmada pil seçim kriterlerinin ve paket tasarımının anlaşılmasını sağlamaktadır.

Oluşturulan geometrik dizilimde (Şekil 1), bataryalar plaka üzerinde düzenli bir şekilde yerleştirilmiş olup, merkezler arasındaki mesafeler yatay ve dikey olarak 25 mm'dir. Bataryalar, plakanın dörtkenarına paralel konumlandırılmış ve geometrik merkeze göre simetrik bir düzen oluşturulmuştur. İlk sıradaki batarya merkezleri, plakanın alt ve yan kenarlarından 37,5 mm uzaklıktadır. Üst sıralara doğru düzenli ve simetrik yerleşim devam etmiş, bu sayede hem mekanik denge sağlanmış hem de elektriksel bağlantıların düzenli ve güvenli yapılması mümkün olmuştur. Ayrıca, bataryalar arasında eşit mesafe bırakılmasıyla ısı dağılımı optimize edilerek termal yönetim iyileştirilmiştir. Bu tasarım, mekanik dayanıklılığı artırırken termal güvenliği destekleyen önemli avantajlar sunmaktadır. Pil paketi, 2,5 x 3,5 x 3 mm boyutlarındaki U şeklindeki metal profille 400 mm uzunluğunda ve 200 mm genişliğindeki alt plakaya sabitlenmiş ve 400 x 400 x 200 mm boyutlarındaki dikdörtgen prizma şeklindeki şartlandırma ortamına yerleştirilmiştir. Toplam 28 bataryanın 14'ü alt kısımda düzenli şekilde konumlandırılırken, üst kısımda simetrik bir yerleşim sağlanmıştır. Bu simetrik düzenleme, mekanik dengeyi artırmakla kalmayıp, termal ve elektriksel bağlantıların düzenli ve güvenli yapılmasına da olanak tanımaktadır. Tasarım, mekanik dayanıklılık ile termal ve elektriksel güvenliği optimize edecek şekilde geliştirilmiştir. Bakır boruların bir ucu aktif hava giriş bölgesine, diğer ucu ise hava çıkış noktasına konumlandırılarak sistemde doğrusal ve yönlendirilmiş bir hava akışı sağlanmıştır. Havanın, girişten çıkışa sapma olmadan ilerlemesi sayesinde borular boyunca etkili bir ısı taşıma mekanizması oluşmuştur. Borular doğrudan batarya hücrelerinin dış yüzeyleriyle temas ederek ısıyı hızlıca iletmiş; bakırın yüksek ısıl iletkenliği sayesinde ısı borular boyunca taşınmış ve zorlanmış hava akımıyla sistem dışına aktarılmıştır. Böylece aşırı ısınma önlenmiş, sıcaklık farkları azaltılarak dengeli sıcaklık dağılımı sağlanmıştır. Bu yapı, bataryanın termal güvenliğini artırırken ömrü ve performansını da iyileştirmiştir.

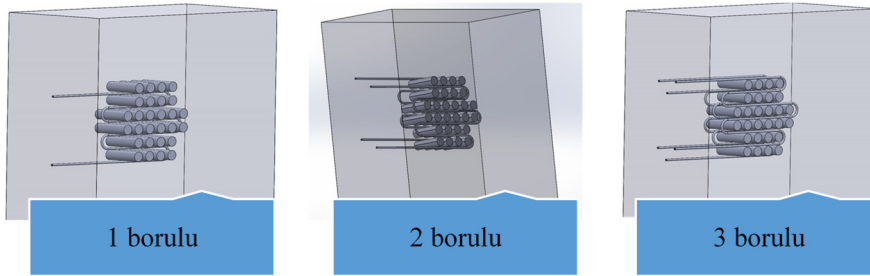


Şekil 1. Tasarlanan dizilim geometrisinde bataryaların yerleşimi ve deney düzeneği

2.2. Sayısal Simülasyon Tasarımlarının Oluşturulması

BTMS sayısal analizi için üç boyutlu bir model oluşturulmuş ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler, deneysel bulguların doğrulanması ve sistemin farklı çalışma koşullarındaki termal performansının detaylı bir şekilde incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Batarya paketinin üç boyutlu geometrik modeli, SolidWorks bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı kullanılarak geliştirilmiş ve analizler, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) uygulaması olan Ansys-Fluent ile gerçekleştirilmiştir. Batarya termal yönetiminde soğutma verimliliği ve sıcaklık dağılımının homojenliğini değerlendirmek amacıyla CFD yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, akış alanı ve sıcaklık alanının detaylı bir şekilde hesaplanmasını sağlamaktadır. Çalışmada, CFD analizleri ile deneysel sonuçların doğruluğu test edilmekte ve sistemin ileriye dönük optimizasyonu için çalışmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda, CFD analizleri, BTMS performansını artırmaya yönelik önemli bir araç olarak kullanılmaktadır.

Tasarlanan dizilim geometrisinde, bataryalar plaka üzerinde düzenli bir şekilde yerleştirilmiş ve yapılan çalışmalarda (Şekil 2), sayısal simülasyon analizleri 1, 2 ve 3 borulu soğutma sistemleri için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Her bir konfigürasyonda, bakır borular batarya hücrelerinin yalnızca belirli bir kısmına temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu dizilimde, boruların yerleştirildiği alanlar ile batarya hücreleri arasındaki mesafeler geniş olduğundan, özellikle 1 borulu konfigürasyonda boru yalnızca tek bir katmana temas edebilmekte, dikey mesafeden dolayı diğer katmanlarla temas sağlanamamaktadır. Buna karşılık, 2 ve 3 borulu konfigürasyonlarda borular alt ve üst katmanlara yerleştirilerek çift taraflı temas sağlanmış, böylece daha fazla batarya hücresine doğrudan temas ile ısı transfer yüzeyi artırılmıştır. Bu yerleşim, özellikle ısı dağılımının daha dengeli olması ve daha etkin bir soğutma performansı elde edilmesi açısından avantaj sağlaması düşünülmektedir.



Şekil 2. Tasarlanan dizilim geometrisi için ısı borulu soğutma modelleri

Sayısal simülasyon çalışmaları geniş bir parametre aralığında gerçekleştirilmiştir. 10 amperlik sabit deşarj akımı altında, 1, 2 ve 3 borulu soğutma konfigürasyonları için hava hızları 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s ve 20 m/s olacak şekilde analizler yürütülmüştür. Bu kapsamlı sayısal analizlerle, hem boru sayısının hem de hava akış hızının batarya paketinin termal performansı üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenmiş; elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılarak sayısal modelin doğruluğu değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, tasarlanan dizilim geometrisinde 28 adet lityum-iyon bataryadan oluşan bir batarya paketine ait üç boyutlu sayısal akışkanlar dinamiği (CFD) analizleri, ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerin doğru, güvenilir ve hesaplama açısından verimli olabilmesi amacıyla çeşitli varsayımlar yapılmıştır. Batarya hücreleri sabit ve homojen ısı üreten kaynaklar olarak modellenmiş; bireysel hücrelerin ısı etkileri ihmal edilmiştir. Soğutucu akışkan olarak kullanılan hava, su ve antifriz

sıkıştırılmaz, sabit yoğunluklu ve Newton tipi akışkanlar olarak ele alınmıştır. Batarya paketine ait bağlantı elemanları ve tutucular, termal ve akışkan davranış üzerindeki etkilerinin sınırlı olduğu varsayımıyla modellemeye dâhil edilmemiştir. Ayrıca, deney düzeneği adyabatik ortam koşullarında değerlendirilmiş ve çevresel etkiler göz ardı edilmiştir. Giriş sıcaklığı ve dış ortam basıncı sabit tutulmuş; analizlerde kullanılan akışkanların fiziksel özellikleri, sıcaklıkla değişimlerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilerek sabit alınmıştır. Boru içi hava akışı üzerinden yapılan analizlerde, batarya paketi çevresi sabit sıcaklıkta kabul edilmiş olup, ortamda herhangi bir hava akışı veya doğal taşınım etkisi modellenmemiştir. Bu yaklaşım sayesinde, yalnızca borular içerisinde geçen havanın taşıdığı ısı transferini değerlendirilmektedir.

Boru içinden geçen hava için yapılan hesaplamalarda, deneylerin 25–30 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirildiği dikkate alınarak, havanın termodinamik özellikleri sabit kabul edilmiştir. Bu doğrultuda, 25 °C sıcaklıkta yoğunluk 1,184 kg/m³, dinamik viskozite 1,85 × 10⁻⁵ Pa·s ve kinematik viskozite 1,56 × 10⁻⁵ m²/s olarak alınmıştır [33]. Boru çapının 2 mm, hava akış hızının 5–20 m/s aralığında olduğu çalışma için, boru içindeki akışın karakterizasyonu için Reynolds sayısı (Eşitlik 1) kullanılmıştır [34]:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{v d}{\nu} \quad (1)$$

Burada v boru içindeki hava hızı, ρ yoğunluk, μ dinamik viskozite ve ν kinematik viskoziteyi temsil etmektedir. 2 mm boru çapında, 5–20 m/s aralığındaki hızlara karşılık gelen Reynolds sayıları 659 ile 2636 arasında değişmekte olup, bu değerler literatürde iç akışlar için laminer rejim sınırları içinde yer almaktadır. 2300 civarına yaklaşan değerlerde yerel geçiş bölgeleri oluşabileceği göz önünde bulundurulsa da, genel akış rejimi laminer kabul edilerek sayısal çözümler bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada hava akışı sadece boru içerisinde gerçekleşmektedir; boru dışındaki bölgelerde herhangi bir hava akışı bulunmamaktadır. Bu sebeple Reynolds sayısının hesaplanmasında yalnızca dairesel boru iç akış için klasik hidrolik çap yaklaşımı kullanılmıştır. Düzgün olmayan akış alanları söz konusu olmadığından, lokal Reynolds dağılımlarının değerlendirilmesi bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur.

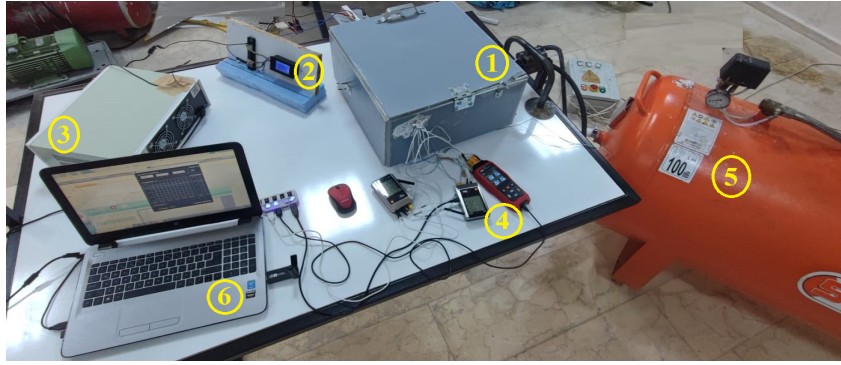
2.3. Deney Düzeneğinin Oluşturulması

Deneyel çalışmalar yalnızca 2 borulu soğutma konfigürasyonu için gerçekleştirilmiş ve bu amaçla tasarlanan dizilim geometrisine uygun özel bir test düzeneği tasarlanmıştır. Düzenekte, bakır borular batarya hücrelerinin yalnızca bir yüzeyine temas edecek şekilde yerleştirilmiştir; biri alt, diğeri üst kısımdan karşılıklı konumlandırılan borularla sınırlı yüzey temasına dayalı tek taraflı soğutma sağlanmıştır. Bu yapı sayesinde boruların oluşturduğu sıcaklık dağılımları gözlemlenmiş ve elde edilen veriler, sayısal simülasyonların kalibrasyonu ile doğrulama sürecinde kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarıyla birlikte değerlendirilerek boru sayısının sistemin termal performansı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Batarya paketine yönelik deneylerde, farklı hava hızlarında 2 borulu soğutma sistemi test edilmiştir. Bakır borulara belirli hızlarda hava üflenmiş, sıcaklık değişimleri hassas sensörlerle izlenmiştir. Yüksek akım için kritik değer olan 10 amperlik deşarj akımı altında 5 m/s, 10 m/s ve 12 m/s hava hızlarında; 15 amperlik daha yüksek akım altında ise yalnızca 5 m/s ve 10 m/s hızlarında testler yapılmıştır. Bu testlerle sistemin farklı akım ve hava hızlarına karşı termal tepkisi değerlendirilmiştir. Deneylerin gerçekleştirilmesi amacıyla, dış ortam koşullarından tamamen yalıtılmış bir şartlandırma ortamı tasarlanmış ve oluşturulmuştur. Bu ortam, deneylerin adyabatik olarak gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Deneylerde, batarya paketinde sıcaklık dağılımlarını hassas bir şekilde ölçmek amacıyla toplamda 12 adet termokupl kullanılmıştır. Batarya paketlerinin termal davranışını incelemek amacıyla, batarya paketleri üzerinde farklı stratejik noktalara 9 adet termokupl yerleştirilmiştir. Bu yerleşimle, batarya paketlerinin yüzey sıcaklıklarının homojenliğini ve termal davranışlarını analiz etmek için optimize edilmiştir. Ölçüm noktaları, paket merkezindeki maksimum sıcaklık bölgeleri, kenar ve köşe bölgeleri, akım koruma kartı ve bağlantı elemanlarına yakın bölgeler ile hava giriş-çıkış alanlarını kapsayacak şekilde seçilmiştir. Bu sayede, batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımı doğru şekilde tespit edilerek sayısal simülasyon sonuçları ile karşılaştırılabilirlik sağlanmıştır. Geriye kalan 3 tane termokupl ise düzenek dışında konumlandırılmıştır ve çevresel sıcaklık ölçümleri için kullanılmıştır. Dış ortam ölçümleri için kullanılan termokupllardan biri, şartlandırma ortamının genel hava sıcaklığını ölçmek amacıyla üst kapağa monte edilmiştir. Diğer iki

termokupl ise soğutma sistemine entegre edilmiştir. Bu termokupllardan biri, soğutucu akışkanın giriş sıcaklığını ölçmek amacıyla soğutma hattının giriş noktasına yerleştirilmiştir. Diğeri ise soğutucu akışkanın çıkış sıcaklığını ölçmek amacıyla çıkış hattına bağlanmıştır. Bu yerleşim, soğutma sisteminin performansını ve ısı transfer etkinliğini değerlendirmek için kritik veriler sağlamaktadır. Şartlandırma ortamının tasarımı, dış ortam etkilerinin tamamen izole edilmesini ve düzeneklerin termal davranışlarının yalnızca deneysel parametreler doğrultusunda incelenmesini mümkün kılacak şekilde optimize edilmiştir. Bu sayede, deneylemlerden elde edilen verilerin doğruluğu ve güvenilirliği artırılmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanılan test düzeneği (Şekil 3), batarya paketinin termal performansını ayrıntılı şekilde analiz etmek amacıyla tasarlanmış ve çeşitli bileşenlerden oluşmuştur. Şekil 3'te gösterilen sistemin temel bileşenleri şu şekildedir: Batarya paketinin yerleştirildiği şartlandırma ünitesi (1), deneylerin sabit ve kontrollü çevresel koşullar altında yürütülmesini sağlamıştır. Akım ve voltaj değerlerinin izlenebilmesi için kullanılan gösterge paneli (2), batarya paketine uygulanan yüklerin hassas biçimde kontrol edilmesine olanak tanımıştır. Ayarlanabilir akım deşarj ünitesi (3), batarya paketine 10–15 A aralığında farklı akım yükleri uygulayarak çeşitli çalışma koşulları altında termal performans değerlendirmesine imkân vermiştir. Sıcaklık ölçümleri, batarya paketine yerleştirilen termokupllar aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve bu veriler datalogger cihazı (4) kullanılarak güvenilir şekilde kaydedilmiştir. Boru içi hava akışını sağlamak üzere kullanılan 200 litrelik pistonlu kompresör (5), sisteme sabit hava temini sağlamış; çıkış hattına yerleştirilen ayarlanabilir vana ile hava debisi istenen düzeyde ayarlanmıştır. Tüm deneysel veriler bilgisayar destekli veri toplama sistemi (6) üzerinden kaydedilmiş ve analiz edilmiştir. Bu deney düzeneği, batarya paketine ait termal yönetim sisteminin performansını değerlendirmeye yönelik kapsamlı ve karşılaştırmalı bir altyapı sunarak sayısal simülasyon verilerinin doğrulanmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 3. Isı borulu deney düzeneği ekipmanları

Bu çalışmada, 14,4 V maksimum voltaj ve 24,5 A maksimum akım kapasitesine sahip LiB paketi incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, sistemin termal performansında belirleyici bir sınır olarak 10 A akım değeri kritik eşik olarak belirlenmiş ve sayısal simülasyonlar ile deneysel çalışmalar bu değer temel alınarak yürütülmüştür. Deneysel düzende, batarya paketinin termal davranışını değerlendirmek amacıyla iki adet ısı borusu entegre edilmiştir. Doğal taşınım ve ısı borulu soğutma koşullarını test edebilecek esnekliğe sahip bu sistem, yüksek hassasiyetli sıcaklık sensörleriyle donatılmış ve tüm veri toplama işlemleri kontrollü bir test ortamında gerçekleştirilmiştir. Böylece sayısal ve deneysel analizlerin güvenilir, tekrarlanabilir ve karşılaştırılabilir sonuçlar sunması sağlanmıştır. Bu kapsamda elde edilen bulgular, batarya dizilim geometrisinin ve ısı borulu soğutma stratejisinin sistemin termal performansı üzerindeki etkilerinin detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımış ve bir sonraki bölümde sunulacak sonuçların temelini oluşturmuştur.

2.4. Enerji Dengesi ve Isı Üretimi Modeli

LiB, şarj/deşarj sırasında batarya hücresinin içinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar ve iç direnç kaynaklı enerji kayıplarından ısı üretmektedir. Bataryalar, pozitif elektrot (katot), negatif elektrot (anot), ayırıcı ve elektrolit olmak üzere dört ana bileşenden meydana gelmektedir. Şarj/deşarj sırasında katot ve anot arasında bulunan lityum iyonları ve elektronlar hareket eder; elektronlar harici devre üzerinden, iyonlar ise elektrolit aracılığıyla taşınır. Bu taşınım sırasında elektrot ve elektrolit malzemelerindeki iç direnç, elektrik enerjisinin bir kısmının Joule ısısına dönüşmesine ve hücre içinde ısı olarak açığa çıkmasına neden

olur. Çalışmada, hücrelerde üretilen toplam ısı yalnızca Joule ısı (Eşitlik 2) olarak ele alınmış ve aşağıdaki denklem ile ifade edilmiştir [35-37]:

$$\dot{Q}_{\text{üretim}} = I^2 R \quad (2)$$

Çalışmada, hücrelerde üretilen toplam ısı yalnızca Joule ısı (Eşitlik 1) olarak ele alınmış ve aşağıdaki denklem ile ifade edilmiştir: Burada I hücre akımını (A), R ise hücre iç direncini (Ω) göstermektedir. Üretilen bu ısı, hücre yüzeyinden çevredeki soğutucu hava akımına taşınım ve iletim (Eşitlik 3) yoluyla aktarılır. Modül genelinde enerji dengesi ise şu şekilde ifade edilmiştir:

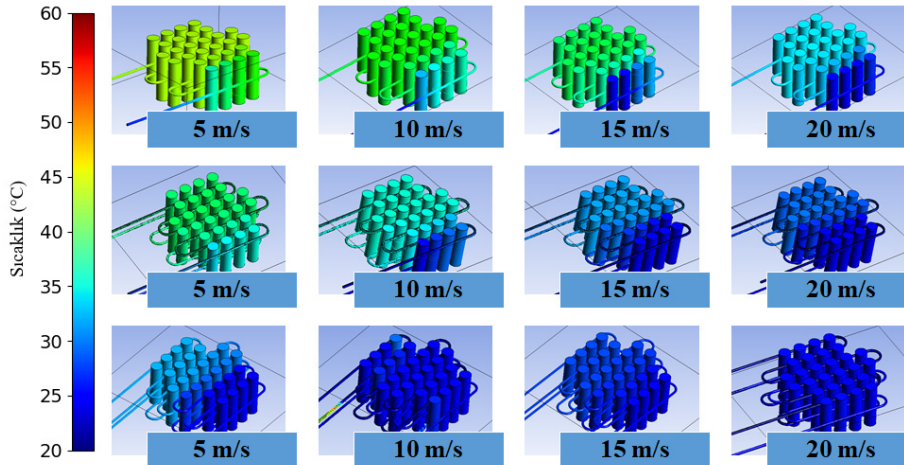
$$\dot{Q}_{\text{üretim}} = \dot{Q}_{\text{taşınım}} + \dot{Q}_{\text{iletim}} + \dot{Q}_{\text{depolama}} \quad (3)$$

Burada $\dot{Q}_{\text{taşınım}}$ taşınım, \dot{Q}_{iletim} iletim yoluyla uzaklaştırılan ısıyı ve $\dot{Q}_{\text{depolama}}$ ise batarya hücresinde depolanan enerjiyi temsil eder. Bu model, batarya sıcaklığının zamanla değişimini ve soğutma sisteminin etkinliğini değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır.

Bu çalışmada, batarya paketinde kullanılan 28 adet (4S7P) için üretilen ısı, hücre başına düşen akım ve iç direnç değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Hücrelerin iç direnci yaklaşık 0.04Ω olarak alınmıştır. Batarya paketi 10 A deşarj akımı ile çalıştırıldığında, paralel bağlı her hücre yaklaşık 1.43 A akım taşımakta ve hücre başına yaklaşık 0.082 W ısı üretmektedir; paket genelinde toplam ısı üretimi yaklaşık 2.3 W olarak belirlenmiştir. Paket deşarj akımı 15 A'ya çıktığında, hücre başına üretilen ısı yaklaşık 0.183 W'a yükselmekte ve toplam paket ısı yaklaşık 5,1 W olmaktadır. Bu hesaplamalar, ısı borusu destekli hava soğutmalı sistemin etkinliğini değerlendirmek ve hücrelerde oluşan maksimum sıcaklık artışını tahmin etmek amacıyla sayısal simülasyon çalışmalarında kullanılmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Isı borulu termal yönetim sistemi kullanılarak gerçekleştirilen sayısal ve deneysel analizler sonucunda, hücre yerleşimi ve hava akış yolları belirgin biçimde farklılık gösterdiğinden, geometrik değişikliklerin soğutma performansı üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Oluşturulan düzenek ile hava akışının hücre yüzeylerine teması, akışın yönlendirilmesi ve genel hava sirkülasyonu yeniden değerlendirilmiş; aynı deşarj akımı ve hava akış hızı parametreleri korunarak sayısal ve deneysel çalışmaların karşılaştırmalı analiz yapılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak sayısal simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Batarya paketine ait 1, 2 ve 3 borulu hava soğutma sistemleri ayrı ayrı modellenmiş ve zorlanmış hava akışı altında her bir düzenlemenin termal performansı değerlendirilmiştir. Simülasyon çalışmaları 10 amperlik deşarj akımı altında yürütülmüş olup, 1, 2 ve 3 borulu konfigürasyonlar için 5, 10, 15 ve 20 m/s hava akış hızlarında analizler gerçekleştirilmiştir. Batarya hücreleri arasında simetrik şekilde yerleştirilen bakır borular ile ısı transfer yüzey alanı artırılmış ve bunun soğutma etkinliği üzerindeki etkileri detaylı şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları değerlendirilerek, batarya paketinde farklı boru sayısı ve hava hızlarına bağlı sıcaklık dağılımlarını yansıtmaktadır.



Şekil 4. Isı borulu simülasyon çalışması sonuçları

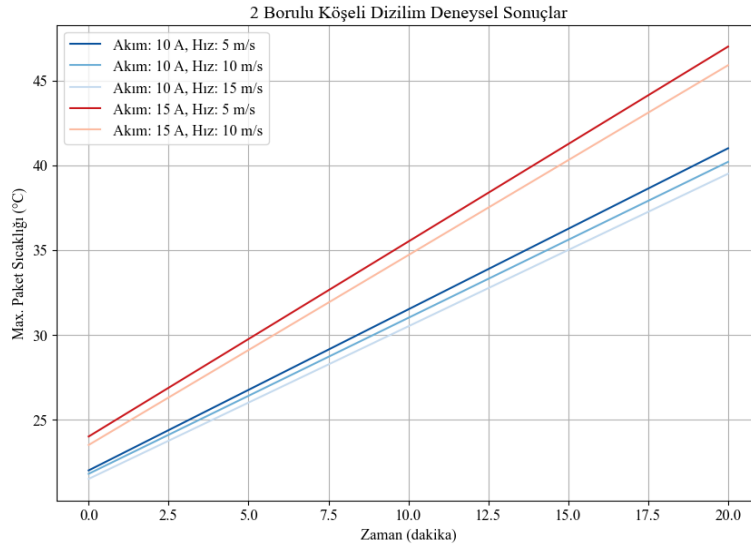
Batarya paketi için gerçekleştirilen sayısal analizlerde (Şekil 4), zorlanmış konveksiyon etkisiyle çalışan hava soğutmalı sistemin performansı, farklı hava akış hızları (5, 10, 15 ve 20 m/s) altında değerlendirilmiştir. Analizler başlangıç ortam sıcaklığının 27 °C olduğu sabit koşulda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılım haritalarına göre:

- Bir borulu sistem, soğutma performansı açısından en zayıf konfigürasyon olarak değerlendirilmiştir. Bu yapıdaki hava akışı, batarya hücrelerinin yalnızca sınırlı bir kısmıyla doğrudan temas edebilmekte ve bu durum, özellikle hücreler arası sıcaklık farklarının artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, ilk temastan kaynaklı olarak batarya paketi üzerinde oluşan şok etkisi, ani ve yoğun hava akışı nedeniyle bazı bölgelerde lokal termal streslere yol açmaktadır. Hava hızı 5 m/s olduğunda, sistemin maksimum sıcaklığı yaklaşık 40–44 °C seviyelerinde gerçekleşmiş ve sıcaklık dağılımı dengesiz şekilde ortaya çıkmıştır. Bu durum, başlangıç sıcaklığı 27 °C olan sistemde yaklaşık +13–17 °C' lik bir sıcaklık artışına karşılık gelmekte olup, batarya güvenliği açısından kritik bir seviyedir. Hava hızının 10 m/s'ye yükseltilmesiyle birlikte maksimum sıcaklık 37–42 °C seviyelerine gerilemiş ve soğutma etkisi gözle görülür şekilde artmıştır. 15 m/s hava hızında sıcaklıklar 34–38 °C aralığına düşmüş, 20 m/s hızda ise maksimum sıcaklık yaklaşık 30–36 °C seviyelerine inerek sistem nispeten daha güvenli bir çalışma alanına yaklaşmıştır. Ancak, bu konfigürasyonda hava hızının yükselmesine rağmen sıcaklık dağılımının hâlâ homojen olmadığı ve belirli bölgelerde lokal ısınmaların devam ettiği tespit edilmiştir. Bu da, tek borunun sınırlı temas alanı nedeniyle ısı transfer veriminin düşük kaldığını göstermektedir.
- İki borulu sistemde hava, batarya diziliminin hem alt hem de üst kısmından sağlandığı için, soğutma akışı batarya hücreleriyle daha geniş yüzey alanında temas etmektedir. Bu durum, konvektif ısı transfer katsayısını artırmakta ve hücreler arası sıcaklık farklılıklarını azaltarak daha dengeli bir sıcaklık dağılımı sağlamaktadır. İlk temastan kaynaklı olarak oluşan şok etkisi, hava akışının çift yönlü olması sebebiyle daha geniş alana yayılmakta ve termal stresler dengelenmektedir. 5 m/s hava hızında dahi sistemdeki maksimum sıcaklık 38–42 °C civarına düşmüş, tek borulu sisteme göre yaklaşık 10 °C' lik bir iyileşme sağlanmıştır. Bu iyileşme, hava akışının iki yönlü olması sayesinde batarya hücrelerinin daha etkin soğutulduğunu göstermektedir. 10 m/s hızda sıcaklıklar 33–36 °C seviyelerine gerilemiş ve sistem güvenli çalışma koşullarına daha da yaklaşmıştır. 15 m/s hızda sıcaklıklar 30–34 °C, 20 m/s'de ise 29–32 °C seviyelerinde sabitlenmiştir. Bu hızda, batarya hücrelerinin tamamına yakın bir bölgesinde sıcaklıklar başlangıç değerine oldukça yakın değerlere ulaşmıştır. Ayrıca, bu konfigürasyonda sıcaklık dağılımı homojenleşmiş, lokal ısınma bölgeleri büyük ölçüde ortadan kalkmıştır. İki borulu sistem, fan gücü ile birlikte düşünüldüğünde verimlilik açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.
- Üç borulu sistem, soğutma havasını batarya paketine üç farklı noktadan yönlendirerek en geniş temas alanını sağlamaktadır. Bu yapı sayesinde konvektif soğutma daha homojen dağılmakta ve sıcaklık farkları minimum düzeye inmektedir. İlk temastan kaynaklanan şok etkisi, hava akışının çoklu giriş noktalarıyla dağıtılması sonucu minimize edilmekte, böylece batarya yüzeyinde termal stresler en aza indirgenmektedir. 5 m/s hava hızında dahi sistem maksimum sıcaklığı 35–38 °C arasında kalmış, bu değer tek borulu sistemde 10 m/s hızla elde edilen değerlerle neredeyse eşdeğer olmuştur. Bu sonuç, üç borulu sistemin düşük hızlarda bile oldukça etkili bir soğutma gerçekleştirebildiğini göstermektedir. 10 m/s hava hızında batarya hücre sıcaklıkları 30–32 °C seviyesine inerken, 15 m/s hızda sıcaklıkların 28–30 °C civarına gerilediği ve sıcaklık dağılımının oldukça homojen hale geldiği gözlemlenmiştir. 20 m/s hızda ise sistemin genel sıcaklığı 27–28 °C seviyesine kadar düşmüş, yani ortam sıcaklığına oldukça yakın bir değer elde edilmiştir. Bu durumda batarya hücrelerinin tamamında minimum termal stres oluşmuş ve paket, en ideal sıcaklık koşullarında çalışmaya devam etmiştir. Bu yapı, özellikle düşük hızlarda dahi yüksek soğutma performansı sağladığı için enerji verimliliği açısından da tercih edilebilir bir konfigürasyon olarak öne çıkmaktadır.

Sayısal analizlerden elde edilen bulgular, özellikle 2 borulu soğutma konfigürasyonunun belirli hava hızlarında etkin bir termal performans sergilediğini ve batarya hücreleri arasında daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağladığını ortaya koymuştur. Bu doğrultuda, deneysel çalışmalar yalnızca 2 borulu sistem üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu tercih, hem sayısal analiz sonuçlarının deneysel olarak doğrulanması hem de uygulamaya yönelik en verimli ve uygulanabilir çözümün detaylı şekilde incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında, batarya paketine uygun özel bir test düzeneği oluşturulmuştur. Bu düzende, batarya hücrelerinin yalnızca bir yüzeyiyle temas edecek şekilde iki adet bakır ısı borusu

yerleştirilmiştir. Geometrik yerleşim gereği, ısı borularından biri dizilimin alt, diğeri ise üst kısmına konumlandırılmış; böylece hücrelerin karşılıklı yüzeyleri üzerinden çift taraflı ve çift yönlü bir soğutma sağlanmıştır. Bu yerleşim, her ne kadar sınırlı bir temas yüzeyi sunsa da, hava akışının yönlendirilmiş şekilde uygulanması sayesinde sıcaklık dağılımlarının gözlemlenebilir düzeyde kontrol altına alınmasına olanak tanımıştır. Isı borularının yüksek termal iletkenlik özellikleri sayesinde, belirli konfigürasyonlarda anlamlı düzeyde sıcaklık düşüşleri elde edilmiştir. Ancak, bazı durumlarda boru yerleşiminden kaynaklanan geometrik kısıtlar nedeniyle ısıl yayılım sınırlı kalmış ve ısı transfer etkinliğinde düşüşler gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, ısı borularının yerleşimi ve hücrelerle temas yüzeyleri dikkate alınarak iki farklı senaryo değerlendirilmiş ve bu senaryoların termal performans üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir.

Soğutma performansının değerlendirilmesi amacıyla, deneysel düzende farklı hava akış hızlarında testler gerçekleştirilmiştir. 10 A sabit deşarj akımı altında, ısı borularına sırasıyla 5 m/s, 10 m/s ve 12 m/s hızlarında hava akışı uygulanmış ve sıcaklık dağılımları hassas sıcaklık sensörleriyle izlenmiştir. Daha yüksek bir termal yük senaryosu oluşturmak amacıyla 15 A deşarj akımı altında ise, 5 m/s ve 10 m/s olmak üzere iki farklı hava akışı hızı kullanılarak sistemin sıcaklık tepkisi analiz edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler, sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılabilir olarak değerlendirildiğinde, 2 borulu soğutma sisteminin uygun yerleşim stratejileriyle birlikte hem maksimum sıcaklık değerlerinin azaltılmasına hem de sıcaklık dağılımının homojenleştirilmesine anlamlı katkılar sağladığı açıkça ortaya konmuştur. Böylece, hem sayısal hem deneysel çalışmaların bütüncül değerlendirilmesi sonucunda, 2 borulu konfigürasyonun optimum yerleşim koşulları altında yüksek termal kararlılık sağlayabileceği doğrulanmıştır.



Şekil 5. Isı borulu deneysel çalışma sonuçları

İki borulu konfigürasyonuna ait deneysel çalışmalarda elde edilen maksimum batarya paketi sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Çalışma kapsamında, iki farklı deşarj akımı (10 A ve 15 A) ve üç farklı hava hızı (5 m/s, 10 m/s, 15 m/s) altında sıcaklık değişimleri 20 dakika boyunca izlenmiştir. Deneysel sonuçlarına göre, batarya paketi sıcaklığı zamanla doğrusal olarak artış göstermektedir. Bu durum, belirli bir süre boyunca sistemin termal kararlılığa ulaşmadığını ve ısı birikiminin devam ettiğini göstermektedir. Özellikle 15 A deşarj akımı uygulanan testlerde (kırmızı tonlu eğriler), başlangıçtan itibaren daha yüksek sıcaklık artış oranları gözlemlenmiş, bu da akım şiddetinin batarya hücrelerinde oluşan ısı üretimi üzerinde belirleyici bir faktör olduğunu doğrulamıştır. 10 A akımı altında yapılan deneylerde, hava hızının artırılmasıyla sıcaklık eğimlerinin belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. 5 m/s hava hızında maksimum sıcaklık yaklaşık 43 °C, 10 m/s'de yaklaşık 40 °C, 15 m/s'de ise yaklaşık 38 °C seviyelerinde sınırlanmıştır. Bu durum, hava hızının artmasıyla birlikte konvektif ısı transfer katsayısının arttığını ve dolayısıyla batarya paketinden çevreye aktarılan ısının daha etkin şekilde uzaklaştırıldığını ortaya koymaktadır. 15 A akımı altında ise 5 m/s hızda maksimum sıcaklık 20. dakikada yaklaşık 47 °C seviyelerine ulaşmış, bu değer 10 m/s hızda yaklaşık 44 °C seviyelerine düştüğü gözlemlenmiştir. Her iki durumda da, yüksek akım nedeniyle oluşan ısıl yükün daha fazla olduğu ve buna bağlı olarak hava hızındaki artışın daha sınırlı bir soğutma etkisi sağladığı değerlendirilmiştir.

4. SONUÇLAR

Batarya paketinin termal yönetimi, boru sayısı ve hava akış hızına direkt bağlıdır. Tek borulu konfigürasyonda hava akışının sınırlı olmasından kaynaklı sıcaklık dengesiz dağılımı ve hücreler arası sıcaklık farkı yüksek seviyelere ulaşmıştır. İki borulu konfigürasyonda, alt ve üst kısımlardan sağlanan hava ile merkez bölgelerdeki sıcaklık farklarını azaltmakta, 10 m/s hava akış hızına yaklaşık 5 °C, 20 m/s hava akış hızında 3,5 °C'ye düşürmektedir. Üç borulu sistem ise hava akışını üç noktadan sağlayarak iç bölgelerdeki durgunluğu minimize etmekte ve sıcaklık dağılımını daha homojen hâle getirmektedir.

Hava akış hızının artırılması, özellikle 10 A deşarj akımı şartları altında termal performansı önemli ölçüde iyileştirmektedir. 15 A akımlarda ise batarya hücrelerinin ısı üretimi iyice artmakta ve mevcut soğutma sistemi kapasitesine yaklaşmaktadır.

Elde edilen bulgular, BTMS' de etkin performansın boru sayısı ve hava akış hızının optimize edilmesine bağlı olduğunu göstermektedir. Üç borulu sistemler, düşük hava hızlarında bile kabul edilebilir sıcaklık homojenliği sağladığı fakat uygulamada montaj karmaşıklığı, boru yerleşimi ve hava kaçağı risklerine dikkat edilmelidir. Bu sebeple, tasarım aşamasında sistemin sadeliği ve sistemi destekleyici yapısal çözümler göz önünde bulundurulmalıdır.

Sonuç olarak, çalışmada iki ve üç borulu hava soğutma sistemlerinin tek borulu sisteme kıyasla yüksek termal performans sunduğunu ve optimizasyon ile batarya paketlerinin güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışmasının sağlanabileceğini göstermektedir. Gelecek çalışmalar, ek pasif/aktif soğutma elemanları, geometrik düzenlemeler ve farklı akışkanlar ile daha verimli termal yönetim stratejileri geliştirmeye odaklanabilir. Bu bağlamda, elektrikli araçlara uygulanabilirlik ve ileriye yönelik çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

- Boru sayısı, yerleşim geometrisi ve hava akış yönünün çok amaçlı optimizasyonu yapay zekâ veya genetik algoritma teknikleri kullanılarak araştırılabilir.
- Hava soğutmalı sistemlerin, faz değiştiren malzemeler veya sıvı soğutmalı hibrit sistemlerle entegrasyonu incelenerek yüksek akım koşullarında performans karşılaştırmaları yapılabilir.
- Fan yerleşimi, hız kontrol stratejileri ve enerji tüketimi parametreleri bir bütün olarak değerlendirilip akıllı kontrol tabanlı tasarımlar geliştirilebilir.
- Deneysel çalışmalar, farklı çevresel koşullar (örneğin sıcak/soğuk ortam sıcaklığı, nem, basınç) altında gerçekleştirilerek sistemin dayanım ve kararlılığı değerlendirilebilir.

Gerçek araç uygulamalarına yönelik prototip tasarımlar geliştirilip montaj kolaylığı, bakım erişimi ve maliyet analizi yönlerinden uygulanabilirlik incelenebilir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, yazarın doktora tezinin bir parçası olup, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programı (Başvuru No: 1649B032205256) kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca çalışma, Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından BTÜBAP-2022-Doktora-04 numaralı proje ile mali olarak desteklenmiştir. Sağlanan katkılar için TÜBİTAK'a ve Batman Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

1. Kartal, M.T. (2022). The role of consumption of energy, fossil sources, nuclear energy, and renewable energy on environmental degradation in top-five carbon producing countries. *Renewable Energy*, 184, 871-880.
2. Herzog, A.V., Lipman, T.E. & Kammen, D.M. (2000). *Renewable Energy Sources*. Energy and Resources Group. University of California, Berkeley, USA
3. Alkan, Ö. & Albayrak, Ö.K. (2020). Ranking of renewable energy sources for regions in Turkey by fuzzy entropy based fuzzy COPRAS and fuzzy MULTIMOORA. *Renewable Energy*, 162, 712-726.

4. Alrwashdeh, S.S. (2022). Energy sources assessment in Jordan. *Results in Engineering*, 13, 100329.
5. Lahnaoui, A., Wulf, C., Heinrichs, H. & Dalmazzone, D. (2018). Optimizing hydrogen transportation system for mobility by minimizing the cost of transportation via compressed gas truck in North Rhine-Westphalia. *Applied Energy*, 223, 317-328.
6. Erdoğan, B., Tan, A. & Tümay, M. (2024). Elektrikli araçlarda kullanılan batarya şarj uygulamaları için genetik algoritma ile geliştirilmiş bir rezonans dönüştürücü tasarımı. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(4), 1129-1142.
7. Karadöl, İ., Baltacı, U.S. & Keçecioglu, Ö.F. (2024). Rüzgâr enerji santralleri rampa oranı: Türkiye örneği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(3), 797-811.
8. Zhu, W. H., Zhu, Y. & Tatarchuk, B.J. (2014). Self-discharge characteristics and performance degradation of Ni-MH batteries for storage applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(34), 19789-19798.
9. Front Matter. (2021). In *Uncertainties in Modern Power Systems* [Internet]. Elsevier. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978012820491701001X>, Erişim tarihi: 22.03.2025.
10. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S. & Ebrahimi, K (2018). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles* (3rd ed.). CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/books/9780429504884>, Erişim tarihi: 22.03.2025.
11. Han, X., Ouyang, M., Lu, L. & Li, J. (2014). A comparative study of commercial lithium-ion battery cycle life in electric vehicle: Capacity loss estimation. *Journal of Power Sources*, 268, 658-669.
12. Wei, Y. & Agelin-Chaab, M. (2019). Development and experimental analysis of a hybrid cooling concept for electric vehicle battery packs. *Journal of Energy Storage*, 25, 100906.
13. Natkunarajah, N., Scharf, M. & Scharf, P. (2015). Scenarios for the return of lithium-ion batteries out of electric cars for recycling. *Procedia CIRP*, 29, 740-745.
14. Bulut, M. & Sözbir, N. (2022). Modeling and analysis of battery thermal control in a geostationary satellite. *Sakarya University Journal of Science*, 26(4), 666-676.
15. Li, Y., Chen, M., Bai, F., Song, W. & Feng, Z. (2019). Thermal equilibrium characteristic of large-size lithium-ion pouch battery: Resting time between charge and discharge. *Energy Procedia*, 158, 2623-2630.
16. Bai, F.-F., Chen, M.-B., Song, W.-J., Li, Y. & Feng, Z.-P. (2019). Thermal performance of pouch lithium-ion battery module cooled by phase change materials. *Energy Procedia*, 158, 3682-3689.
17. Baran, V., Mühlbauer, M.J., Schulz, M. & Pfanzelt, J. (2019). In operando studies of rotating prismatic Li-ion batteries using neutron diffraction. *Journal of Energy Storage*, 24, 100772.
18. Wu, W., Wu, W. & Wang, S. (2018). Thermal management optimization of a prismatic battery with shape-stabilized PCM. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 121, 967-977.
19. Panchal, S., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R. & Fowler, M. (2016). Experimental temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery at varying conditions. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 71, 35-43.
20. Mastali, M., Foreman, E., Modjtahedi, A., Samadani, E., Amirfazli, A. & Farhad, S. (2018). Electrochemical-thermal modeling of LiFePO₄ pouch batteries. *International Journal of Thermal Sciences*, 129, 218-230.
21. Huang, Y., Lu, Y., Huang, R., Chen, J., Chen, F. & Liu, Z. (2017). Study on thermal interaction and heat dissipation of cylindrical lithium-ion cells. *Energy Procedia*, 142, 4029-4036.
22. Abdulvahitoğlu, A., Abdulvahitoğlu, A. & Kılıç, M. (2022). Elektrikli araç bataryalarının bütünleşik SWARA-TOPSIS metodu ile değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(4), 1061-1076.
23. Conte, F.V. (2006). Battery and battery management for hybrid electric vehicles: A review. *Elektrotech Inftech*, 123(10), 424-431.
24. Li, W., Chen, S., Peng, X., Xiao, M., Gao, L. & Garg, A. (2019). Clustering of similar-performance cells for lithium-ion EV battery module design. *Engineering*, 5(4), 795-802.
25. Fan, L., Khodadadi, J.M. & Pesaran, A.A. (2013). A parametric study on air-cooled Li-ion battery modules. *Journal of Power Sources*, 238, 301-312.
26. Zhang, Z., Wang, J., Feng, X., Chang, L., Chen, Y. & Wang, X. (2018). Solutions to EV air conditioning systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 443-463.
27. Li, Z., Huang, J., Liaw, B. Y., Metzler, V. & Zhang, J. (2014). A review of lithium deposition in Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 254, 168-182.
28. Mustafa, J. (2022). Effect of inlet/outlet size and battery spacing on cooling of Li-ion pack and using outlet air for HVAC. *Journal of Energy Storage*, 46, 103826.

29. Hasan, H.A., Togun, H., Mohammed, H.I., Abed, A.M. & Homod, R.Z. (2023). CFD simulation of spacing effect between Li-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 72, 108631.
30. Zhang, S.-B., Nie, F., Cheng, J.-P., Yang, H. & Gao, Q. (2024). Optimizing airflow for air-cooled Li-ion battery pack. *Applied Thermal Engineering*, 236, 121486.
31. Alihosseini, A. & Shafae, M. (2021). Experimental and numerical study of Li-ion battery cooling using heat pipe. *Journal of Energy Storage*, 39, 102616.
32. Ren, R., Zhao, Y., Diao, Y. & Liang, L. (2023). Bottom liquid cooling for Li-ion battery with multichannel flat tube. *Applied Thermal Engineering*, 219, 119636.
33. Çengel, Y. A., Boles, M. A. & Kanoglu, M. (2019). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
34. Keleş, H. & Özmen, Y. (2024). 45° eğimli ikincil jetlere sahip jet dizilerinde ısı transferi incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(4), 923-937.
35. Fan, Y., Bao, Y., Ling, C., Chu, Y., Tan, X. & Yang, S. (2019). Experimental study on air cooling for high-energy cylindrical Li-ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, 155, 96-109.
36. Rao, Z. & Wang, S. (2011). A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4554-4571.
37. Malik, M., Dincer, I., Rosen, M.A., Mathew, M. & Fowler, M. (2018). Thermal and electrical performance of liquid-cooled Li-ion battery pack. *Applied Thermal Engineering*, 129, 472-481.