T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

PRİZMATİK LI-ION BATARYALAR İÇİN SOĞUTMA AMAÇLI SIVI SOĞUTMA BLOKLARININ TASARIMI VE HAD ANALİZİ

Salih KAYA

Yüksek Lisans Tezi

PRİZMATİK LI-ION BATARYALAR İÇİN SOĞUTMA AMAÇLI SIVI SOĞUTMA BLOKLARININ TASARIMI VE HAD ANALİZİ

Salih KAYA

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PRİZMATİK LI-ION BATARYALAR İÇİN SOĞUTMA AMAÇLI SIVI SOĞUTMA BLOKLARININ TASARIMI VE HAD ANALİZİ

Salih KAYA

0000-0001-5423-3115

Prof. Dr. Muhsin KILIÇ
(Danışman)

0000-0003-2113-4510

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PRİZMATİK LI-ION BATARYALAR İÇİN SOĞUTMA AMAÇLI SIVI SOĞUTMA BLOKLARININ TASARIMI VE HAD ANALİZİ

Salih KAYA

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

Sıvı soğutmalı batarya termal yönetim sistemleri (BTYS) için soğutucu blok tasarımları, bataryanın optimum çalışma sıcaklığını korumak açısından kritik bir öneme sahiptir. Bataryalar için sıvı soğutmalı soğutucu blok tasarımında dikkate alınması gereken temel faktörler; blok tasarım parametreleri, soğutucu akışkan türü, giriş sıcaklığı ve soğutucu akışkanın giriş hızı olarak sıralanabilir. Ayrıca, batarya için şarj ve deşarj durumlarındaki ısı akışının etkili bir şekilde uzaklaştırılması da önemli bir gerekliliktir.

Bu çalışmada, 3C deşarj koşulunda çalışan bir elektrikli aracın 16 prizmatik tip hücreli batarya paketi için soğutma bloğu tasarımı ve HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, çok kanallı yapı içerisine yerleştirilen üçgen, kare, daire ve altıgen gibi farklı geometrilere sahip soğutucu blokların ısıl ve hidrodinamik performansları karşılaştırılmıştır. Daha sonra, bu analizlerden elde edilen verilere dayanarak, optimize edilmiş çift giriş çıkışlı çok kanallı soğutucu blok tasarımı geliştirilmiştir. Bu tasarımın, kanatçıklı ve kanatçık içermeyen soğutucu bloklara kıyasla daha verimli bir soğutma sağladığı ve batarya yüzeylerindeki sıcaklık dağılımında daha fazla homojenlik elde ettiği belirlenmiştir.

It was concluded that improvements in the parameters of homogeneous surface temperature distributions and maximum temperature differences in effective cooling designs play an important role in increasing battery pack performance as well as extending its life. The designs developed in this direction aim to support the safe, efficient and long-lasting operation of batteries.

Anahtar Kelimeler: Batarya termal yönetim sistemi, HAD, soğutucu blok, sıvı soğutma,
2025, xiv + 51 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DESIGN AND CFD ANALYSIS OF LIQUID COOLING BLOCKS FOR COOLING PRISMATIC LI-ION BATTERIES

Salih KAYA

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

Liquid-cooled battery thermal management system (BTMS) designs play a critical role in maintaining the optimal operating temperature of batteries. Key factors to consider in the design of liquid-cooled cooling blocks for batteries include block design parameters, coolant type, inlet temperature, and coolant flow rate. Additionally, it is essential to effectively remove the heat generated during charge and discharge cycles.

In this study, the cooling block design and CFD (Computational Fluid Dynamics) analyses were performed for a 16-prismatic-cell battery pack of an electric vehicle under 3C discharge conditions. Initially, the thermal and hydrodynamic performance of cooling blocks with different geometric shapes, such as triangular, square, circular, and hexagonal, integrated into a multi-channel structure were compared. Subsequently, based on the data obtained from these analyses, an optimized new dual-split multi-channel cooling block design was developed. This design was found to provide more efficient cooling and achieve greater temperature uniformity on the battery surfaces compared to finned and non-finned cooling blocks.

It was concluded that effective cooling designs not only enhance the performance of electric vehicle battery packs but also play a crucial role in extending their lifespan. In this context, the developed designs aim to support the safe, efficient, and long-lasting operation of batteries.

Key words: Battery thermal management system, CFD, cooling block, liquid cooling
2025, xiv + 51 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana yol gösteren, değerli fikirleriyle destek olan kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Sayın Muhsin KILIÇ'a tez çalışmama katkılarından dolayı en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması TÜBİTAK 1004 programı kapsamında desteklenen 22AG001 Nolu Elektrikli Taşıtlar için Batarya Teknolojileri Araştırma ve Geliştirme Platformu (BATEG) dahilinde gerçekleştirilmiştir. BATEG kapsamındaki desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

Tez çalışmasına katkılarından dolayı Prof. Dr. Sayın Gökhan SEVİLGEN, Prof.Dr. M. Özgün KORUKÇU, Doç. Dr. Ayşe Fidan ALTUN ve Dr. Öğr. Üyesi Ali Hüsnü BADEMLİOĞLU'na teşekkür ederim.

Eğitim sürecimde sabırları, destekleri ve samimi dostluklarıyla yanımda olan iş arkadaşlarıma gönülden teşekkür ederim.

Hayatım boyunca sevgisini, sabrını ve desteğini hiç eksik etmeyen, her zaman yanımda olan kıymetli aileme; özellikle sevgili anneme ve babama, ayrıca hayat yolundaki en büyük desteğim olan sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Salih KAYA
20/02/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
İÇİNDEKİLER xi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xii
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 4
3. MATERYAL VE YÖNTEM 16
3.1 Mevcut Soğutucu Blok Tasarımı 16
3.2. Kanatçıklı Soğutucu Blok Tasarımları 17
3.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi 18
3.4 Sayısal Model 19
3.5 HAD Çözüm Ağı Modellerinin Oluşturulması 20
3.6 Korunum Denklemleri 23
3.7 Batarya Modeli 25
4. BULGULAR 30
4.1 Mevcut Soğutucu Blok Tasarımı 30
4.2 Altıgen Kanatçıklı Soğutucu Blok Tasarımı 31
4.3 Daire Kanatçıklı Soğutucu Blok Tasarımı 32
4.4 Üçgen Kanatçıklı Soğutucu Blok Tasarımı 34
4.5 Kare Kanatçıklı Soğutucu Blok Tasarımı 35
4.6 Çok Kanallı Daire Kanatçıklı Yeni Soğutucu Blok Tasarımı 37
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 47
KAYNAKLAR 49
ÖZGEÇMİŞ 51

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$cp,_b$	Bataryanın özgül ısısı [J/(kg·K)]
$cp,_m$	Özgül ısı [J/(kg·K)]
C_p	Isıl kapasite [J/(kg·K)]
E_{OCV}	Açık devre voltajı [V]
f	Sürtünme faktörü
I	Akım [A]
j	Isı transfer performans katsayısı
kb	Bataryanın ısıl iletkenliği [W/(m·K)]
k_m	Isıl iletim katsayısı [W/(m·K)]
μ	Viskozite [Pa·s]
Nu	Nusselt Sayısı
Pb	Basınç [Pa]
Pr	Prandtl Sayısı
Q_b	Batarya hacimsel ısı üretimi [W/m³]
Re	Reynolds Sayısı
T	Sıcaklık [°C]
V	Voltaj [V]
V_b	Batarya hacmi [m³]
ρ_b	Batarya yoğunluğu [kg/m³]

Kısaltmalar	Açıklama
BYTS	Batarya Termal Yönetim Sistemi
CFD	Computational Fluid Dynamics
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LTO	Lityum Titanat Oksit
MSMD	Multi-Scale Multi-Domain
NTGK	Newman, Tiedemann, Gu ve Kim

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Şarj esnasında patlayan otomobil (Erişim Tarihi:2023.06.17). 1
Şekil 2.1. Trafiğe kayıtlı otomobillerin yakıt cinsine göre dağılımı, 2011- 2024..... 4
Şekil 2.2. Yıllara bağlı batarya termal yönetim sistemi ile ilgili patent verileri **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
Şekil 2.3. Doğrudan kanal ve serpantin tip kanal..... 6
Şekil 2.4. Sıvı soğutma blokları (Aktaş,2020) 8
Şekil 2.5. Kanal Kesitleri 9
Şekil 3.1. İzlenen Çözüm Yolu 16
Şekil 3.2. Çok Kanallı Mevcut Soğutucu Blok Geometrisi 17
Şekil 3.3. Soğutucu Blok Geometrileri 17
Şekil 3.4. HAD çözüm aşamaları..... 19
Şekil 3.5 Li-ion batarya paketi ve HAD analiz modeli..... 20
Şekil 3.6. Mevcut soğutucu blok çözüm ağı detayları 21
Şekil 3.7. Çözüm ağları a) Kare kanatçık, b) Üçgen kanatçık, c) Daire kanatçık, d) Altıgen kanatçık 21
Şekil 3.8. Yeni tasarım Soğutucu blok modeli çözüm ağı 22
Şekil 3.9. Çözüm ağından bağımsızlık analizi..... 22
Şekil 3.10. Batarya modeli geometrik boyutları 26
Şekil 3.11. Batarya hücresi çözüm ağı..... 26
Şekil 3.12. Hücre ısı üretimi doğrulama çalışması 1C, 2C ve 3C karşılaştırması 27
Şekil 3.13. Batarya model sıcaklık doğrulama çalışması 1C, 2C ve 3C karşılaştırması 28
Şekil 4.1. Mevcut soğutucu blok sıcaklık dağılımı..... 30
Şekil 4.2. Mevcut soğutucu blok batarya yüzeyi sıcaklık dağılımı 31
Şekil 4.3. Altıgen kanatçıklı soğutucu blok sıcaklık dağılımı 31
Şekil 4.4. Altıgen kanatçık batarya yanal yüzey sıcaklık dağılımları..... 32
Şekil 4.5. Dairesel kanatçıklı soğutucu blok sıcaklık dağılımı 33
Şekil 4.6. Daire kanatçık batarya yüzey sıcaklık dağılımları..... 34
Şekil 4.7. Üçgen kanatçıklı soğutucu blok sıcaklık dağılımı..... 34
Şekil 4.8. Üçgen kanatçık batarya yüzey sıcaklık dağılımları 35
Şekil 4.9. Kare kanatçık soğutucu blok sıcaklık dağılımı..... 36
Şekil 4.10. Kare kanatçık batarya yüzey sıcaklık dağılımları..... 36
Şekil 4.11. Çift çok kanallı daire kanatçıklı yeni soğutucu blok tasarımı..... 38
Şekil 4.12. Yeni tasarım batarya yüzeyleri sıcaklık dağılımı..... 39
Şekil 4.13. Yeni tasarım soğutucu blok sıcaklık dağılımı..... 40
Şekil 4.14. Yeni tasarım batarya yüzeyleri sıcaklık dağılımı..... 40
Şekil 4.15. Soğutucu blok basınç düşüşü ve maksimum sıcaklıkları..... 42
Şekil 4.16. Soğutucu blok sıcaklık farkları 43
Şekil 4.17. Soğutucu akışkan giriş hızına bağlı basınç düşüşü ve maksimum sıcaklık 44
Şekil 4.18. Farklı deşarj eğrilerinde maksimum sıcaklık değerleri..... 45
Şekil 4.19. Soğutmalı ve Adyabatik Durumun Karşılaştırması 46

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Literatürde soğutucu blok bazı nünerik ve deneysel çalışmalar 14
Çizelge 3.1. Kanal içi kanatçık özellikleri 18
Çizelge 3.2. Batarya Zamana Bağlı Isı Üretimi Denklemi Katsayıları..... 24
Çizelge 3.3. Analiz sınır ve başlangıç koşulları 25
Çizelge 3.4. Soğutma Sıvısı, Hücre ve Soğutucu Blok Termofiziksel Özellikleri 25
Çizelge 4.1. Soğutucu blok basınç düşüş ve maksimum sıcaklık değerleri..... 41

1. GİRİŞ

Günümüzde fosil yakıtların kullanımı, artan emisyon oranları, iklim değişikliği ve hava kirliliği gibi sorunları tetikleyen başlıca etkenlerden biri olarak bilinmektedir. Araştırmalar, fosil yakıt kullanımını en aza indirmek amacıyla çevreci enerji teknolojilerine odaklanmakta ve bu doğrultuda taşınabilir enerji depolama araçları olan batarya teknolojileri gibi alternatif çözümler geliştirmektedir (Özel, M. A., 2019).

Taşınabilir enerji teknolojilerinin önemli bir parçası olan bataryalar, çevreye ve insan sağlığı açısından kısmen zarar vermeyen enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, batarya enerjisinin kullanımının yaygınlaştırılması ve sürdürülebilir hale getirilmesi, verimli enerji depolama çözümleriyle mümkün kılınmaktadır.

Batarya teknolojilerinde sıklıkla tercih edilen lityum-iyon (Li-ion) bataryalar, tekrar tekrar şarj edilebilme özelliğinin yanı sıra yüksek enerji yoğunluğu ve hafifliği ile taşınabilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi önemli ölçüde artırmaktadır. Telefon ve tablet gibi tüketici elektroniği cihazlarının yanı sıra “scooter”lar, elektrikli araçlar ve hibrit otomobiller de bu bataryaların en yaygın kullanım alanları arasında bulunmaktadır.



Şekil 1.1 Şarj esnasında patlayan otomobil (Erişim Tarihi:2023.06.17).

Li-ion bataryaların farklı çevresel koşullarda değişken performans göstermesi ve güvenli bir şekilde çalışması için ısıl kontrolleri önem kazanmaktadır. Çünkü batarya paketinin

şarj ve deşarj işlemleri sırasında meydana gelen kimyasal olaylar sebebiyle aşırı ısınma, hem performansı düşürmekte hem de yangın veya patlama riski gibi güvenlik sorunlarını artırmaktadır. Bu nedenle, bataryaların çalışma koşullarında uygun sıcaklık aralığında kalmasını sağlamak amacıyla batarya termal yönetim sistemleri (BTYS) kullanılır.

Li-ion batarya grubunun kritik sıcaklıklar altında, belirli bir sıcaklık aralığında ve optimum sıcaklıklarda çalışması termal yönetim sistem tasarımları ile ilişkilidir. Sıvı soğutmalı BTYS'de soğutucu plaka tasarımlarının amacı batarya paketinin bütün yüzeylerinde optimum çalışma sıcaklığını koruyarak sıcaklık farklarını minimuma indirmektir. Soğutucu plakaların batarya grubu ile temasında ısı transferinde bataryada oluşan ısının atımı gerçekleşir. Elektrikli araçlarda, batarya paketinin sıcaklık dağılımının tüm yüzeylerde olabildiğince homojen tutulması BTYS'lerde soğutucu plakaların konfigürasyonları ile ilgilidir. Yüksek sıcaklıklarda bataryalarda açığa çıkan ısının termal yönetim sistemi sayesinde absorbe edilmesi, düşük sıcaklıklarda ise soğutmanın tam tersi bataryanın uygun sıcaklıklar için ısıtılması ile sıcaklık kontrolü sağlanması gerekmektedir. Bu nedenle batarya grubunun çevre koşullarında karşılaşılan aşırı sıcak ve aşırı soğuk durumlardan olumsuz etkilenmemesi ve optimum sıcaklıklar altında tutulması gerekmektedir.

Soğutucu bloklar veya soğuk plaka uygulamaları, batarya paketinin etrafına yerleştirilen ve şarj/deşarj durumlarında açığa çıkan ısının uzaklaştırılması ile sıcaklığı düşürmek veya dağıtmak için kullanılan bileşenlerdir. Bu bloklar, bataryanın temas yüzey alanını ve dolayısıyla ısı transfer miktarını artırır. Bu sayede bataryanın aşırı ısınmasını engeller. Soğutucu plakalrın malzemelerinin termofiziksel özellikleri, şekli ve boyutu gibi faktörler, bataryanın sıcaklık dağılımını etkiler. Ayrıca, blokların batarya hücreleri ile temas eden yüzeylerinin düzgün ve homojen bir şekilde temas etmesi, gerektiğinde yüksek ısıl iletkenliğe sahip arayüz malzemeleri kullanılması da ısı transferinin daha verimli olmasını sağlar. Bu şekilde, sıvı soğutmalı BTYS'de kullanılan soğutucu blok tasarımları, bataryanın optimum çalışma sıcaklığını korumak için kritik bir rol oynar ve bataryanın performansını ve çalışma ömrünü etkiler.

Batarya grubu için sıvı soğutmalı soğutucu blok tasarlanırken göz önünde bulundurulması gereken önemli faktörler arasında blok kanal tasarım parametreleri, soğutucu akışkan türü ve debisi bulunurken batarya grubu için ise şarj ve deşarj durumlarındaki ısı akışlarının optimizasyonu olmaktadır.

Bu kapsamda, farklı deşarj durumlarında bir elektrikli aracın prizmatik batarya hücresi için geliştirilecek olan soğutma bloğu tasarımı ve HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizi yapılması amaçlanmaktadır. Optimum soğutma bloklarının termal tasarımı ile batarya üzerinde homojen sıcaklık dağılımı ve minimum sıcaklık farkının sağlanması amaçlanmaktadır. Bu çalışma ile birlikte;

• Elektrikli araç batarya termal yönetim sistemlerinde kullanılan prizmatik tip bataryaların HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemi ile nümerik modellenmesi

• Batarya sıcaklık dağılımlarını etkileyen soğutucu plaka tasarım parametrelerinin belirlenmesi

• Sıvı soğutma bloğu içerisine yerleştirilen üçgen, kare, dairesel ve altıgen biçiminde bulunan geometrilerin soğutucu blok ve batarya sıcaklık davranışına etkisinin incelenmesi

• Elektrikli araçlarda sıvı soğutma tekniği kullanarak homojen sıcaklık dağılımı elde edilmesi ile batarya termal performansının deşarj durumlarında iyileştirilmesi

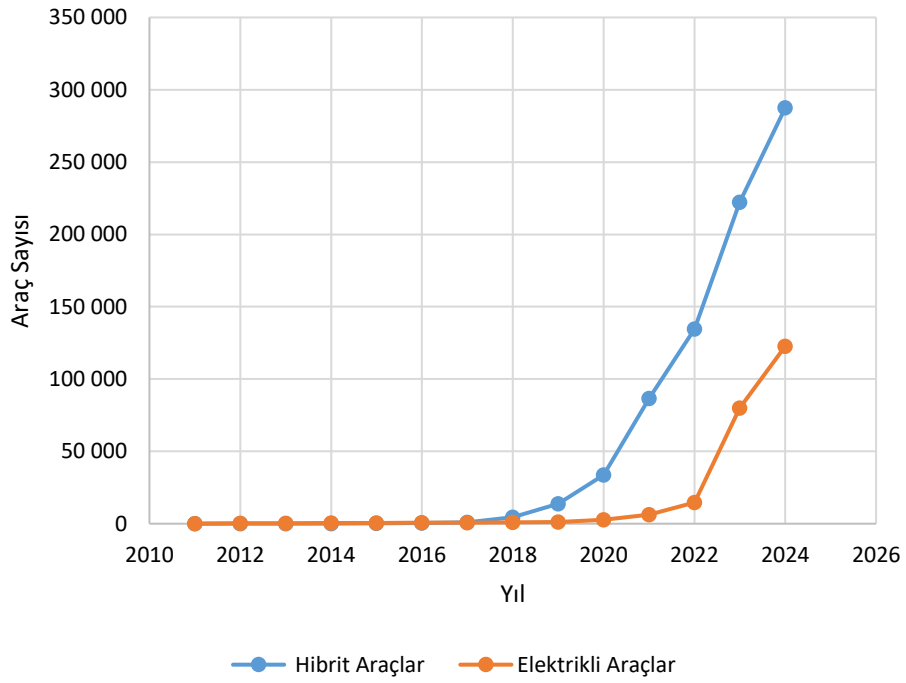
• Sıvı soğutma tekniği kullanarak batarya hücresi üzerindeki sıcaklıkların kritik sıcaklık altında kalmasının sağlanması

• İnsan ve araç güvenliği için şarj durumu koşullarında tehlike oluşturabilecek termal kaçaklar (thermal runaway) ve aşırı ısınma durumları gibi risklerin araştırma ve geliştirme aşamasında önüne geçilmesi amaçlanmaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

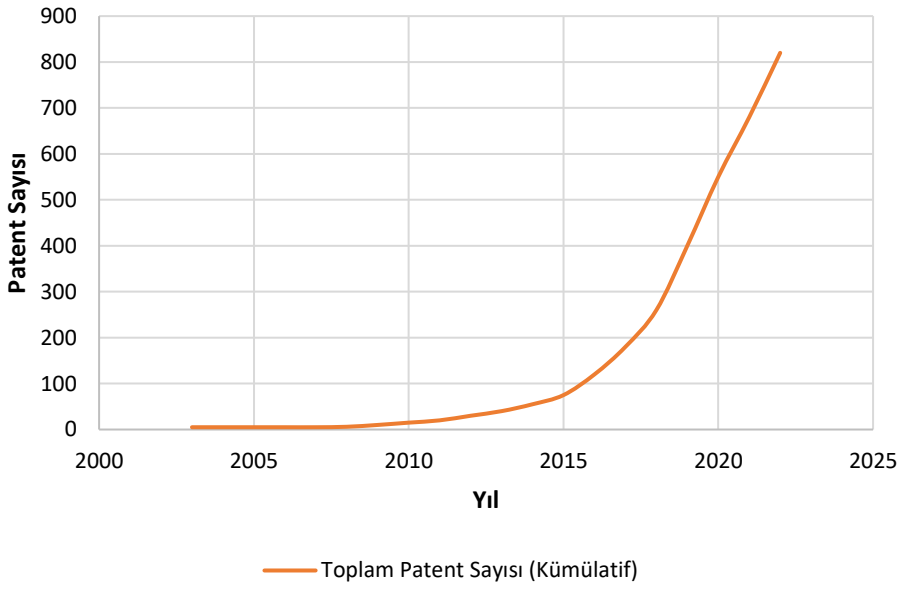
Bu bölümde, sıvı soğutmalı sistemlerde bulunan plaka ve blok tasarımları ile ilgili mevcut literatür kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Geçmişten bugüne elektrikli ve hibrit araçlarda batarya termal yönetim sistemleri enerji gereksinimlerinin artması ile farklı soğutma teknikleri geliştirilmiştir. Yapılan literatür araştırmasında lityum iyon bataryaların yüksek enerjiye sahip olmalarının termal yönetim sistemlerinin gerekliliğinin zaruri olduğu anlaşılmıştır. Elektrikli araç endüstrisinin gelişmesi, bataryalardaki ısıl kontrol için farklı çözümler üretmeye devam ederek artacağı düşünülmektedir. Elektrikli ve hibrit araçlara olan talep her geçen gün artma eğilimindedir. Yüksek enerji yoğunluğu ve düşük enerji maliyetleri bu talebi çekici kılmaktadır. Ayrıca benzinli araçlarla karşılaştırıldığında da çevreci olması bu talebin artma sebepleri arasındadır. Şekil 2.1'de TUIK tarafından 19 Temmuz 2024 tarihinde yayınlanan trafiğe kayıtlı araç sayılarında bu talebin son yıllarda büyüme eğiliminde olduğu görülmektedir.



Şekil 2.1. Trafiğe kayıtlı otomobillerin yakıt cinsine göre dağılımı, 2011- 2024

Araştırmalara göre bataryaların yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmalarının getirdiği riskler başında araç ve insan güvenlik risklerinin değerlendirilmesi, enerji kaynaklarının verimliliği termal yönetim sistemlerinin gerekliliğinin zaruri olduğu anlaşılmıştır. Şekil 2.2'de verilen 2003 ve 2022 yılları arasında batarya termal yönetim sistemleri ile ilgili patentinspiration.com web sitesinden alınan verilere göre batarya termal yönetim sistemleri ile ilgili alınan patent sayısı giderek artmaktadır. Elektrik araç endüstrisinin gelişmesi bataryalardaki ısıl kontrolü için farklı çözümler üretmeye devam ederek artacağı anlaşılmaktadır.

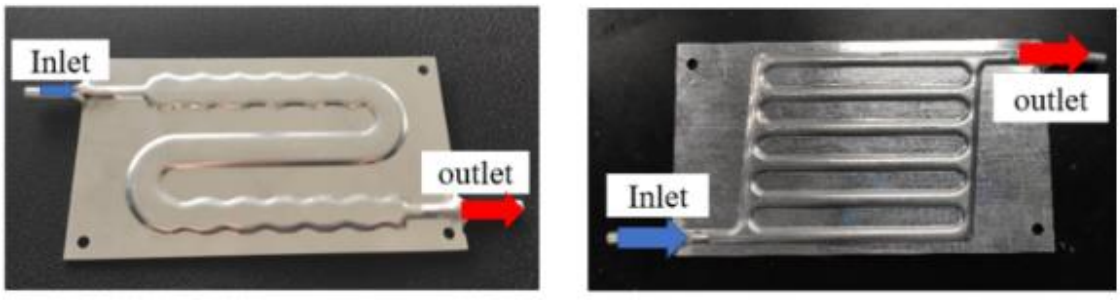


Şekil 2.2. Yıllara bağlı batarya termal yönetim sistemi ile ilgili patent verileri

Sıvı soğutma blokları doğrudan veya dolaylı temas olmak üzere iki farklı şekilde sıvı soğutma tekniği görülmektedir. Doğrudan temaslı sıvı soğutma uygulamasında batarya paketi soğutucu akışkan içerisinde bulunmaktadır. Soğutucu akışkan yüksek termal iletkenlik ve düşük viskoziteye sahip olduğundan dolayı doğrudan temaslı sıvı soğutma sistemleri öne çıkmaktadır (Çelen (2023)). Soğutucu akışkan ile batarya yüzeyi arasında daha düşük bir termal direnç olacağından dolayı yüzey üzerindeki ısı transfer katsayısı daha yüksek olacaktır. Doğrudan akışkan ile etkileşim içerisinde olan bu mekanizmada ısı transfer verimi daha yüksektir. Kullanılan soğutucu akışkanın termofiziksel özellikleri de ısı transferini etkiler.

Literatürde sıvı soğutmalı veya hibrit soğutmalı (faz değiştiren malzemeler + sıvı soğutma, termoelektrik soğutma + sıvı soğutma vb.) batarya termal yönetim sistemleri için farklı konfigürasyonlarda ve boyutlarda soğutucu bloklar veya plakalar bulunmaktadır.

Chen ve ark. (2022) prizmatik lityum iyon bataryalarda sıvı soğutma tekniği kullanarak roll bond olarak adlandırdıkları alüminyum soğutucu plakalar üzerinde soğutucu akışkan debisi ve temas yüzeylerinin termal performansa etkisini incelediler. Tasarlanan iki farklı soğutucu plakanın üretim yönteminin kolay, maliyet etkin ve hafif olduğuna dikkat çektiler. Serpantin tip kanal içerisine rip ve kavity olarak adlandırılan girinti-çıkıntılar ekleyerek düz kanala göre farklı bir tasarım yaptılar. 1C ve 2C deşarj akımlarında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, düşük akışkan debilerinde temas yüzeyinden dolayı kavity yapısının etkili olduğu yüksek akışkan debilerinde ise rib yapılarının öne çıktığı gözlenmiştir. Deneysel çalışmalarda batarya sıcaklık dağılımları ve batarya üzerinden alınan sıcaklık farkları ortaya kondu. Serpantin kanal yapısının yüksek debilerde basınç kayıplarını yükselmesinden dolayı doğrudan kanal yaklaşımı tercih edilmiştir. Her iki durumda da roll bond sıvı soğutma plakalarının mevcut kanal yapılarından maliyet, üretim yöntemi ve termal performans açısından daha iyi olduğunu açıkladılar. Serpantin tip ve doğrudan kanal tasarımı Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



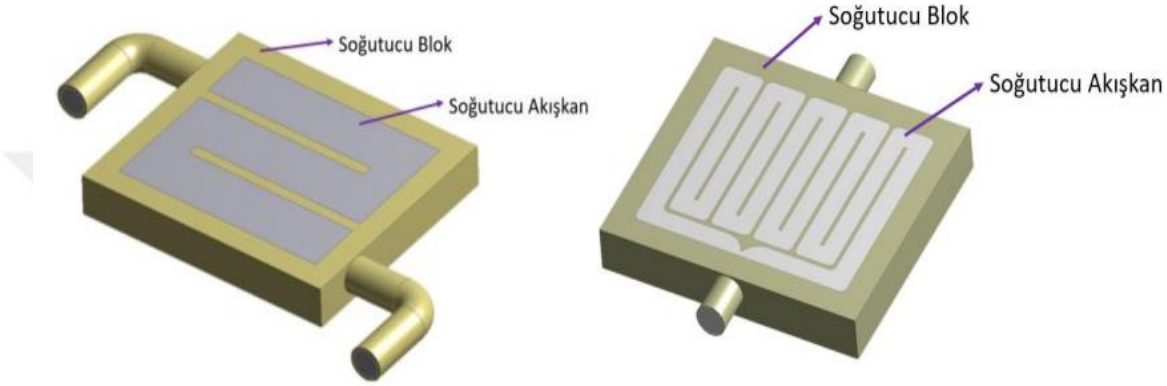
Şekil 2.3. Doğrudan kanal ve serpantin tip kanal

Liu ve ark (2022) çalışmalarında, prizmatik tip Li-ion piller için geliştirdikleri serpantin tipi soğutucu plakalara V şeklinde kesişen rib tasarımları entegre ederek batarya termal yönetim sisteminin termal ve hidrolik performansını incelediler. Bataryalarda homojen sıcaklık dağılımının elde edilmesi ve gerekli minimum pompa gücünün hesaplanması için

boyutsuz j/f faktörü performans parametresi olarak belirlenmiştir. j faktörü Re, Nu ve Pr sayılarına bağlı olarak hesaplanmaktadır. f ise sürtünme faktörünü temsil ederek hidrolik hesaplamalarda performans kriteri olarak kullanılmaktadır. Sayısal çalışmaları sonunda, konvansiyonel serpantin kanallara göre geliştirilen v tip kesişen serpantin kanallarının daha iyi termal ve hidrolik performans olduğunu gözlemlediler. Buna göre v tip ribler eklenen kanal tasarımlarında arasında bypass geçişleri akan akışkanın basınç kayıplarını azalttığını, akışkan giriş çıkışlarının konumlarının karşılıklı olmasının konvansiyonel serpantin tip kanala göre homojen sıcaklık dağılımı elde ettiği, kanal diziliminin ise bataryanın genişliği boyunca olmasının daha iyi bir performans sergilediğini tartıştılar.
Zhang ve ark. (2018) çalışmalarında 22 Ah kapasiteye sahip kese tipi lityum iyon bataryalar için tasarladıkları soğutucu plakalarda 4C deşarj durumunda plaka üzerinde maksimum sıcaklık, sıcaklık farkı ve basınç kayıpları parametrelerini incelediler. Farklı soğutucu akışkan debilerinde ve kanal kesit alanı değişimlerinin belirtilen parametreler üzerindeki etkisini ortaya koydular. Yüksek debilerde maksimum sıcaklık ve sıcaklık farkının azaldığını lakin debi ile basınç kayıplarının bağlantılı olduğundan basınç kayıplarına göre debi miktarının belirlenmesine dikkat çektiler. Ayrıca yüksek akışkan debileri için kanal giriş genişlik uzunluğunun önemli olduğunu vurguladılar.

Aktaş (2020) doktora tez çalışmasında otomotiv dış aydınlatma ürünleri için sıvı soğutma bloklarının hidrolik ve termal performansını deneysel ve sayısal yöntemler ile değerlendirmiştir. Yapılan farklı tipte soğutucu blok tasarımları laminer akış bölgesinde çalışılmıştır. Tek ve iki hücreli soğutma bloklarında karar kılınmış ve sayısal çalışmalar bu bloklar üzerinden yürütülmüştür. Tek hücreli soğutma bloğu içerisine yerleştirilen silindirik blokların etkisi de kanallar içerisindeki sıcaklık dağılımına ve basınç düşümüne etkisi incelenmiştir. İki hücreli blok yapısında ikiye ayrılmış kanal giriş bölgesi ile tekli ve dörtlü LED'li baskı devre kartları üzerinde homojen sıcaklık dağılımı elde edilmesi hedeflenmiştir. Tek hücreli soğutma bloklarına 0.0005-0.01 kg/s debi aralığında çalışırken, iki hücreli blok çalışmasında debi aralığını düşürerek laminer bölgede ısı transferini etkin biçimde görmeyi amaçladılar, ayrıca artan debinin basınç düşüşünü artırdığı ortaya çıkmıştır. Tek hücreli soğutma bloğunda kanal içerisine yerleştirilen silindirik blokların ortalama Nusselt sayısına etki ettiği gözlenmiştir. Kanal içerisinde silindirik blok olmayan bloklara göre Nusselt sayısının yüksek olduğu görülmüştür.

Çalışmada mevcut hava soğutma sistemlerine nazaran sıvı soğutma blokları kullanımı ile LED aydınlatma ürünlerinin ömrünü uzattığı ve ışık kalitesini artırdığı gözlenmiştir. Sonuç olarak kanatçıklı soğutma yapılan LED baskı devre kartlarında 510 lm ışık yoğunluğu, sıvı soğutma blokları ile bu değerin 562 lm ye ulaşarak sıvı soğutmalı ısıl yönetimin %10 daha fazla ışık kalitesinde artış elde edildiği gözlenmiştir. Soğutucu blok tasarımları Şekil 2.4'de gösterilmektedir.

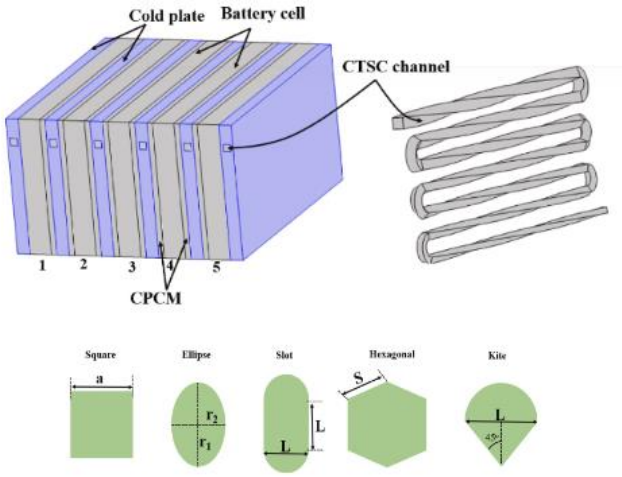


Şekil 2.4. Sıvı soğutma blokları (Aktaş,2020)

Kalkan (2021) doktora tez çalışmasında 20 Ah kapasiteye sahip LiFePo4 esaslı bir lityum iyon batarya hücresinde sıvı soğutma ve hava soğutma tekniklerini kullanarak deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirmiştir. Batarya modelleme ve analiz çalışmaları iki fazda gerçekleşmiştir. İlk durumda batarya hücresinin oda koşullarında doğal taşınım süreci test edilerek deşarj eğrileri oluşturulmuştur. Daha sonra batarya hücresinin elektro termal fiziğinin modellenmesi için MSMD (Multi scale multi domain) yaklaşımında yarı ampirik elektrokimyasal model olan NTGK (Newmann Tiedemann Guu ve Kim) metodu kullanılarak sıcaklık değerleri ve deşarj eğrileri doğrulaması yapılmıştır. Soğutma tasarımlarında plakalardan birisi mini kanal yaklaşımını diğeri ise serpantin tipi temsil etmek üzere iki farklı çalışma üzerine odaklanmıştır. Sayısal çalışmalarında ANSYS Fluent programında hem laminer hem de türbülanslı bölge için 0.1 L/dk, 0.6 L/dk ve 1.1 L/dk şeklinde üç farklı debi değeri için hesaplamalar yapmıştır. Sıvı soğutmalı sistemde akışkan olarak su kullanılmıştır. Akışkan giriş sıcaklıklarında etkisi de bu çalışmada incelenmiştir. 15°, 25° ve 35°C sıcaklıklarda giriş yapan akışkanın yüksek sıcaklıklarda olumsuz etkilediği görülmüştür. Çalışmada mini kanallı soğutucu plakanın, serpantin tip

soğutucu plakaya göre daha düşük basınç kaybı ve daha homojen sıcaklık elde edildiği gözlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, 3C ve üstü deşarj durumunda oda koşullarında hava ile soğutmanın yeterli olmayacağı ve sıvı soğutmanın gerekli olduğu görülmüştür. Mini kanallı soğutucu plakada model geometrisi ve soğutucu akışkan giriş debisi gibi tasarım değişkenleri belirlenerek basınç kaybının minimuma indirilmesi ve homojen sıcaklık dağılımının elde edilmesi için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Optimize edilen yeni mini kanal tasarımı sonucu ısı transfer hızında 5C'de %22 artış yaşanmıştır. Ayrıca akışkan giriş debisi ise 0.706 L/dk bulunmuştur.

Faizan ve ark. (2023) tarafından yapılan çalışmada Newman'ın 1D elektrokimyasal batarya modeli kullanılarak 18 Ah kapasiteye sahip kese tipi batarya için tasarladıkları hibrit soğutma sisteminde mini kanallı serpantin tipi soğutucu plaka içerisinden geçirdikleri farklı kesit geometrilerine (kare, elips, yuva, altıgen ve uçurtma tip) sahip kanalların ve kanalların yiv açılarının çeşitli soğutucu debileri için sayısal modellemesini COMSOL Multiphysics programında gerçekleştirdiler. Hibrit soğutma sistemi sıvı soğutma ve faz değiştiren malzeme kullanımı ile sağlanmıştır. Batarya paketi şeklinde geliştirdikleri tasarımda sıvı soğutma sistemi ile batarya arasına faz değiştiren malzeme entegre edilmektedir. Çalışmalarında yivli büküm tip serpantin kanal geometrisinin bükümsüz sabit kesitli serpantin kanal geometrisine göre daha iyi termal performans sergilediğini gösterdiler. Şekil 2.5'de kesit şekilleri gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Kanal Kesitleri

Patil ve ark. (2021) çalışmalarında 20 Ah kapasiteye sahip kese tipi batarya hücresinin sıvı soğutmalı batarya termal yönetim sistemindeki termal ve hidrolik davranışını etkileyen tasarım parametrelerini incelediler. Giriş soğutma sıvısı sıcaklığı, soğutucu akışkan debisi, soğutma kanallarının sayısı ve maksimum kanal genişliği gibi parametreler üzerinde durdular. Çok amaçlı optimizasyon tekniği genetik algoritma kullanarak batarya performansının iyileştirilmesi için belirlenen parametrelerin optimum değerlerini sağlamayı amaçladılar. Amaç fonksiyonu basınç kaybı, maksimum sıcaklık ve maksimum sıcaklık farkı olarak belirlendi. Çalışmalarında batarya termal ve hidrolik performansını etkileyen en önemli parametrelerin soğutucu akışkan debisi ve giriş sıcaklığı olduğunu açıkladılar.

Chen ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada lityum iyon bataryalarda farklı soğutma yöntemlerinin termal performanslarını karşılaştırdılar. Batarya üzerindeki sıcaklık artışı, doğrudan veya dolaylı sıvı soğutma ile hava ve kanatlı fin soğutmaya göre daha düşüktür. Kanatçıkla soğutmanın ekstra ağırlık oluşturduğu ve hava soğutmanın da ekstra güç gerektirdiği tartışıldı. Ayrıca çalışmada farklı soğutucu akışkanlar analiz edilerek sıcaklık dağılımı ve maksimum sıcaklık farkına etkisi incelenmiştir. 50/50 karışım oranına sahip su glikol karışımının daha düşük sıcaklık değerleri gösterdiği görülmüştür.

Xu ve ark. (2019) çalışmalarında prizmatik batarya paketi için tasarladıkları düz kanal içerisinde yerleştirdikleri riblerle ısı transfer katsayısını artırmayı amaçladılar. Farklı rib dizilişleri, sayıları, açı ve boyutlarını parametrize ederek optimizasyon çalışmaları yaptılar. Batarya paketinin termal performansını etkileyen en önemli parametrelerin rib açısı ve rib uzunluğu olduğunu tartıştılar. Rib sayısının artışı bataryalar üzerindeki sıcaklık farklarının azalması ile doğru orantılı olduğuna dikkat çektiler.

Dong ve ark. (2022) çalışmalarında batarya modülündeki sıvı soğutma plakalarının alttan yerleşiminde sınırlı temas yüzeyi kaynaklı enine ve boyuna doğru ısınmaların yol açtığı sıcaklıkları düşürmek için sayısal çalışmalar yaparak farklı bir çözüm sundular. Düz kanal yapısının yerine dalgalı kanal yapısı kullanarak batarya modülü üzerinde maksimum sıcaklığı 1.75°C azalttılar. Yerleşimde sıvı soğutma plakaları içerisinde düz kanal yapısının kanal içerisindeki akışkanın kanal sonlarına doğru sıcaklık yükselmesinin

önüne geçmek için düz kanal ve dalgalı kanal yapılarını birleştirerek kompozit bir kanal yapısı elde ederek akışkan içerisinde oluşan sıcaklık farklarının önüne geçmeyi amaçladılar. Bataryanın boyuna ısınmasını engellemek ve homojen sıcaklık dağılımı elde etmek için ise hibrit soğutma tekniği yaklaşımı ile faz değiştiren malzeme kullanarak batarya modülü üzerinde oluşan sıcaklık farkını geleneksel düz kanala göre %41 azalttılar.

Deng ve ark. (2018) çalışmalarında dikdörtgen li-ion bataryalar sıvı soğutma plaka tasarımlarında serpantin tip konfigürasyonu kullandılar. Sayısal çalışmalarında bataryada oluşan ısıyı simüle etmek için plakaya sabit 7000 W/m^2 ısı akısı koşulu tanımlayarak farklı tasarım parametrelerinde çalıştılar. Soğutucu plaka tasarımlarında parametre olarak soğutucu akışkan giriş sıcaklığının, kanal sayılarının, kanal dizilişinin, debi ve akış yönünün soğutma verimine etkisini incelediler. Çalışmada kanal sayısının artışında maksimum sıcaklıkların düştüğü ve kanal sayısının beşten sonra soğutma verimine nadir etki ettiğini gözlemlediler. Ayrıca kanal diziliş yönünün akış yönünde daha yüksek performans soğutma verimi gösterdiğini gözlemlediler. Sonuç olarak kanal içerisindeki soğutucu akışkan sıcaklığının belirli debilerde batarya üzerinde etkin termal yönetim elde edilebileceğini çıkardılar.

Araştırmacılar, Xiong ve ark. (2023) 50 Ah kapasiteye sahip kese tipi hücrelerden oluşan batarya modülünün termal yönetim sistemi için sıvı soğutma plakalarının yapısal tasarımları üzerine HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) çalışmaları gerçekleştirdiler. Soğutucu plakalar üzerinde akış ve ısı transferini etkileyen pin-fin olarak adlandırılan blokları kullandılar. Çalışmada aynı yüzey alanına sahip farklı geometrik şekillerin (kare, elips, daire ve üçgensel) soğutma plaka üzerindeki dağılımları, blok sayısı, şekli gibi yapısal tasarım parametrelerinin ısı atımı ve basınç kayıpları gibi etkenler açısından davranışlarını incelediler. Çalışmada blok yapılarının basınç kayıpları üzerinde, blok sayı ve dizilişlerinin ise sıcaklık dağılımlarında büyük etkisinin olduğunu açıkladılar. Sayısal çalışmalarda kare kesitli blokların ısı atım kabiliyetlerinin diğer blok yapılarından daha iyi olduğunu, kare kesitli bloklar için 3x6 diziliş şeklinin en iyi ısı atım kapasitesi ve düşük basınç kaybı gösterdiğini tartıştılar.

İncelenen diğer bir çalışmada, Jarrett ve Kim (2011) batarya termal yönetim sisteminde sıvı soğutma plakasını geliştirmek için nümerik optimizasyon çalışmaları gerçekleştirdiler. Sıvı soğutma plakasını karakterize etmek amacıyla plaka içerisindeki kanallara ait 18 farklı tasarım değişkeni tanımlanarak 8 farklı tasarım çalışması ortaya koydular. Bataryanın ısıl modellemesi için plakanın duvar kısmına 500 W/m^2 değerinde sabit ısı akısı tanımlanarak LHS (Latin hypercube sampling) optimizasyon metodunda basınç, sıcaklık ayrı ayrı amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Çalışmada referans tasarıma göre kayda değer bir iyileşme sağlanmıştır. Yazarlar ileri çalışmalarında soğutucu plaka optimizasyon çalışmaları için sabit ısı akısı olmadan farklı kanal tasarımlarına farklı sınır koşulları dahil edilerek gerçekleşmesine, yönelik olabileceğini vurguladılar.

Wang ve ark. (2021) çalışmalarında 7 Ah kapasiteye sahip LiCoO2 (LCO) kese tipi batarya için doğadan esinlenerek farklı bir soğutucu plaka tasarımı üzerinde odaklandılar. Yapılan deneysel çalışmada bataryanın içerisindeki elektrokimyasal tepkimeler sonucu oluşan ısının modellenmesi için sıcaklık ve zamana bağlı karakteristik hacimsel ısı üretimi denklemini oluşturdular. STAR CCM+ hesaplamalı akışkanlar dinamiği programında yapılan sayısal çalışmalar ile deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğu görüldü. Örümcek ağı yapısını lityum iyon batarya yüzeylerinde soğutucu plakalara uyarlayarak soğutucu plakasının yapısal parametrelerini ortogonal deney tasarımı metodu kullanarak optimizasyon çalışmalarında bulundular. Basınç kayıpları, maksimum sıcaklık ve maksimum sıcaklık farkının ana parametre olarak belirlendiği çalışmada kanal sayısı, kanal genişliği ve kanal açısı üzerinde optimum değerler incelendi. Parametreler içerisinde kanal genişliğinin soğutma performansına en büyük etkisi olduğu gözlendi.

Sevilgen ve ark. (2023) 23 Ah kapasiteli Lityum Titanat Oksit (LTO) prizmatik batarya hücrelerinden oluşan elektrik araç batarya modülü üzerinde çok kanallı, serpantin ve alt plaka olmak üzere üç farklı tip tasarıma ait soğutucu plakanın batarya modülü üzerindeki sıcaklık değişimlerini zamana bağlı ANSYS Fluent programı ile hesapladılar. Yapılan sayısal çalışmada, çok kanallı soğutucu plakanın diğer geometriler ile karşılaştırıldığında daha düşük basınçta yüksek ısıl atım davranışı gösterdiği ortaya çıkmıştır. Batarya modülü üzerinde 4.25 C deşarj değerinde maksimum sıcaklık farkları incelendiğinde

serpantin ve çok kanallı tip soğutucu plakaların 3 K ile 4 K arasında değiştiği, alt plaka geometrisinde ise 8 K olduğu hesaplanmıştır.

Yidong ve ark (2020) çalışmalarında mini kanallı soğutucu blok üzerinde farklı akışkan debisi ve farklı kanal sayılarında ani değişen ısı akısı durumlarının batarya üzerindeki sıcaklık dağılımına etkisini soğutucu plaka tasarımı ışığında incelediler. Soğutucu akışkan debisinin artması ile batarya ortalama sıcaklıklarının düştüğü, yüksek ısı akı değerlerinde ise sıcaklık farklarının da arttığı gözlenmiştir. Soğutucu blok kanal sayısının artışı kanal içlerinde farklı akışkan hızları oluşturduğu ve homojen sıcaklık dağılımını olumsuz etkilerken ortalama sıcaklıkları değiştirmediği gözlenmiştir.

Kılıç ve ark. (2023) çalışmalarında Goupli G6 adlı elektrik araç batarya paketi için sıvı soğutma plakası tasarım, analiz ve çok amaçlı optimizasyon çalışmaları gerçekleştirdiler. Deneysel çalışmalarında araç batarya paketi modelinde AMESİM adlı bir boyutlu analiz yazılımı kullanılarak ısı akısı tahmin edilmiş. HAD analiz modellerinde batarya ısı üretimi sınır şartı olarak kullanılmıştır. Sayısal çalışmalarında su ve etilen glikol %25. %50 karışımlarının soğutma plakasındaki maksimum sıcaklık, sıcaklık standart sapması ve basınç kayıplarını parametrelerine etkisini incelediler. Suyun diğer akışkanlara göre plaka içerisindeki sıcaklık dağılımı ve basınç kaybı davranışının en iyi olduğunu gösterdiğini gözlenmiştir. Etilen glikol karışımlarında karışım oranının artması termal ve hidrolik performansı olumsuz etkilediği vurgulanmıştır. Ayrıca soğutucu plakada homojen sıcaklık dağılımında kanal yüksekliklerinin önemli olduğu ortaya çıkmıştır.

Monika ve ark. (2021) 20 Ah kese tipi bir batarya paketi için sandviç yapıda soğutucu blokları ekleyerek akışkan debisi, sıvı giriş sıcaklığı, kanal boyutları, ortam sıcaklığı ve farklı deşarj koşullarına bağlı optimizasyon çalışmaları gerçekleştirdiler. Yüksek deşarj akımlarda soğutucu akışkan debisi ve soğutma sıvısı giriş sıcaklığının batarya yüzey sıcaklık dağılıma etkisi olduğunu vurguladılar. Ayrıca çalışmada farklı debilerde basınç ve sıcaklık değişimlerinin 0.003 kg/s akışkan debisinden sonra değişmediği gözlendi. Böylece gerekli optimum pompa gücü de sıvı soğutma sistemi için sağlanırken giriş debisi parametresinin termal ve hidrolik performans üzerindeki etkisi anlaşılmıştır. Giriş akışkan sıcaklığının batarya sıcaklıkları üzerindeki dağılımına bakıldığında ise bataryanın

20°C ile 30°C arasındaki giriş sıcaklıklarında bataryaların 25°C ila 40°C arasında kaldığı gözlenmiştir. Bunun yanında, soğutucu plaka kanal sayısının, kanal genişliğinden daha etkili olduğu batarya sıcaklık dağılımları üzerinden ortaya çıkmıştır.

Çizelge 2.1. Literatürde soğutucu blok bazı nünerik ve deneysel çalışmalar

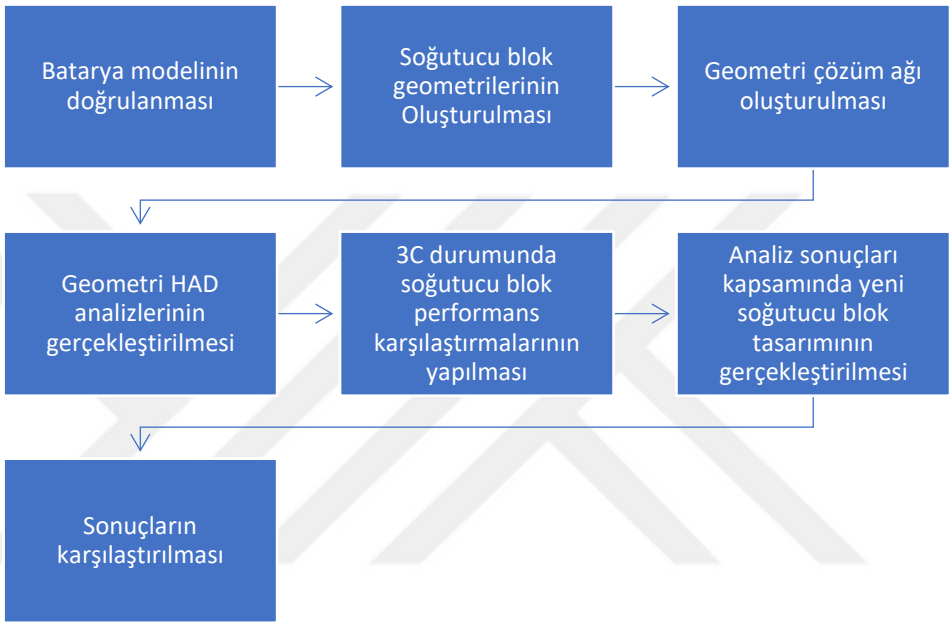
Yazar (lar)	**Batarya Tipi**	**Batarya Modeli**	**Deşarj Akımı**	**Parametreler**
Monika ve ark. (2021)	Kese	1D Elektrokimyasal Model	3C, 4C, 5C	Kanal tasarımı, akışkan özellikleri
Liu ve ark (2022)	Prizmatik	Hacimsel Isı Üretimi	3C,5C,7C ve 9C	kanal tasarım parametreleri
Dong ve ark. (2022)	Prizmatik	Hacimsel Isı Üretimi	-	Kanal yapısı
Chen ve ark. (2022)	Prizmatik	Deneysel	1C, 2C	soğutucu akışkan debisi ve temas yüzeyleri
Xiong ve ark. (2023)	Kese	Hacimsel Isı Üretimi	5C	farklı geometrik şekiller, şekil dizilimi debi
Sevilgen ve ark. (2023)	Prizmatik	MSMD, NTGK	1C, 3.5C, 4.25C	soğutucu akışkan debisi, soğutucu blok
Faizan ve ark. (2023)	Prizmatik	1D Elektrokimyasal Model	-	farklı geometrik şekiller, debi

Bu çalışmada, sıvı soğutmalı batarya termal yönetim sistemi için farklı soğutucu blokların 3C deşarj durumunda termal ve akış performansı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi (HAD) ile incelenmesi hedeflenmektedir. Çok kanallı yapının akışkan ile batarya yüzeylerinde sıcaklık dağılımının homojen bir şekilde elde edilmesinin batarya ömür ve performansını artıracağı düşünülmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde farklı soğutucu blok tasarımlarının termal ve akış performanslarının sayısal olarak elde edilmesi ve karşılaştırılması amacıyla problemin çözümünde kullanılan metot ve yöntemlerden bahsedilmektedir.

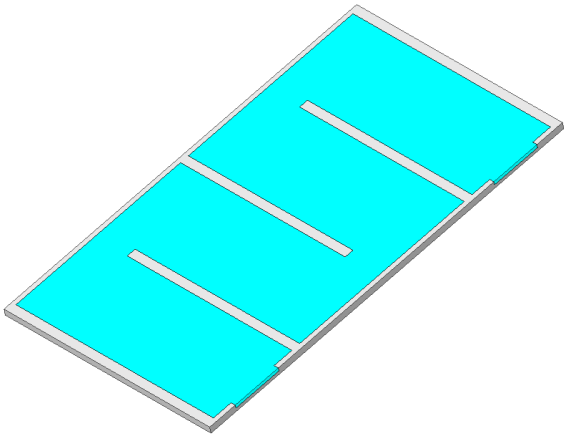
Tasarım ve HAD analiz çalışmaları kapsamında izlenen yol Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. İzlenen Çözüm Yolu

3.1 Mevcut Soğutucu Blok Tasarımı

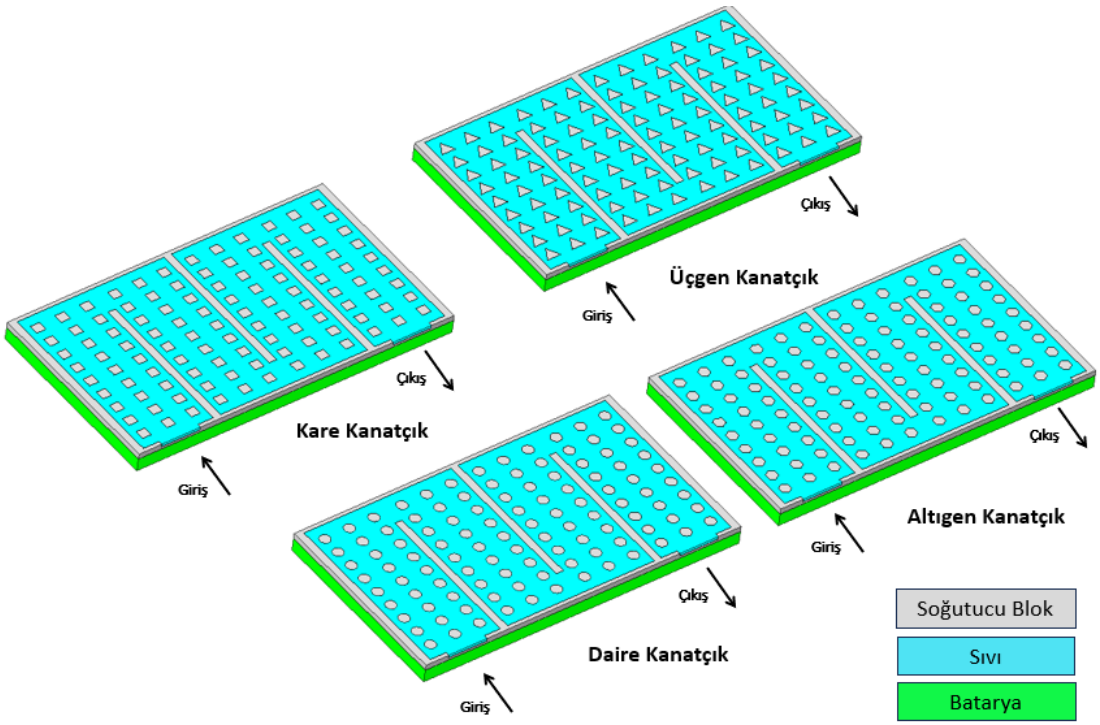
Batarya termal yönetim sisteminde sıvı soğutma siteminde soğutucu bloklar bataryalara direkt temas halinde yapılmıştır. Mevcut tasarımda kanallı yapı ile akışkanın bataryanın büyün yüzeylerinde ısı akışının sağlanması amaçlanmaktadır. Mevcut çok kanallı yapı ile soğutucu akışkanın blok içerisinde taşınımının eşit bir şekilde sağlanması ile batarya yüzey sıcaklıklarının daha düşük olması beklenmektedir. Şekil 3.2'de mevcut tasarım gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Çok Kanallı Mevcut Soğutucu Blok Geometrisi

3.2. Kanatçıklı Soğutucu Blok Tasarımları

Bu çalışmada prizmatik tip Li-Ion batarya paketi yanal yüzeyleri üzerinde soğutucu blok yerleşimi yapılarak modelleme ve analiz çalışması kapsamında aşağıda soğutucu blok geometrileri gösterilmektedir. Sıvı, batarya ve soğutucu blok geometrisi Şekil 3.3'de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Soğutucu Blok Geometrileri

Soğutucu boklar içerisinde kare, üçgen, daire ve altıgen kanatçık geometrileri çok kanallı soğutucu blok içerisine tasarımı yapılmıştır. Blok içerisine yerleştirilen kanatçık kesit alanları birbirine yakın olacak şekilde boyutlandırma çalışması gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.1'de kanatçık şekil ve kesit alanları gösterilmektedir.

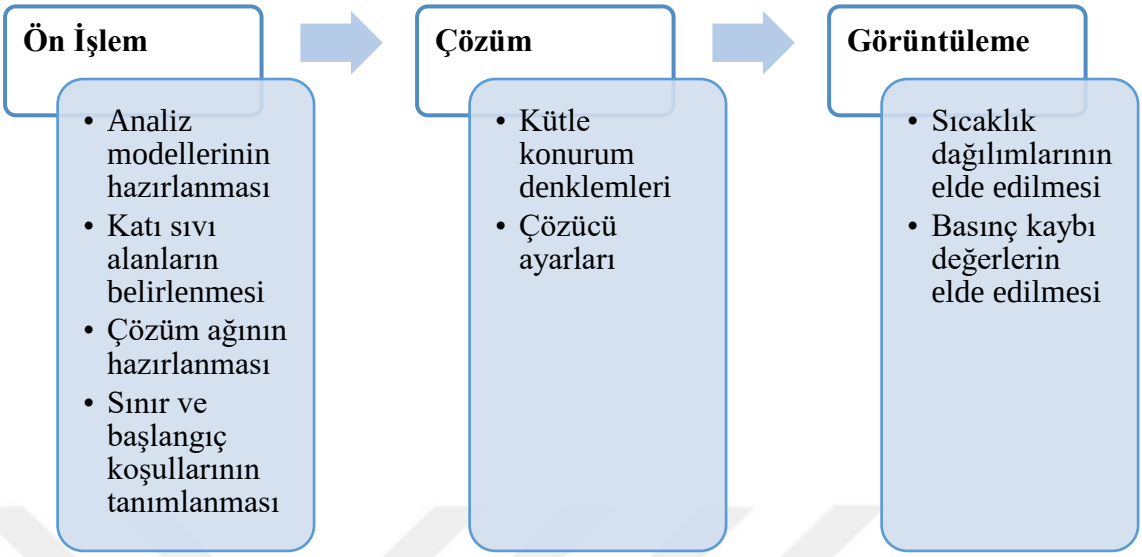
Çizelge 3.1. Kanal içi kanatçık özellikleri

Geometri	Şekil	Kesit Alanı
	Kare	25.00 mm^2
	Üçgen	24.81 mm^2
	Daire	24.91 mm^2
	Altıgen	24.91m^2

3.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi, ısı transferi ve akışkan dinamikleri problemlerinin çözümünde mühendislik alanında yaygın olarak kullanılan güçlü bir araçtır. Bu yöntem, akışkanların hareketini ve ısı transferini tanımlayan denklemlerin sayısal olarak çözülmesini sağlar. HAD, özellikle karmaşık geometri ve sınır koşullarına sahip sistemlerin modellenmesi ve analizinde önemli avantajlar sunmaktadır (Tokgoz ve Süfer, 2023).

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemiyle gerçekleştirilen çözümler, sistematik bir şekilde ilerleyen belirli aşamaları içerir. Bu çalışmada kullanılan HAD modelinin çözüm aşamaları şu şekilde özetlenebilir**:**



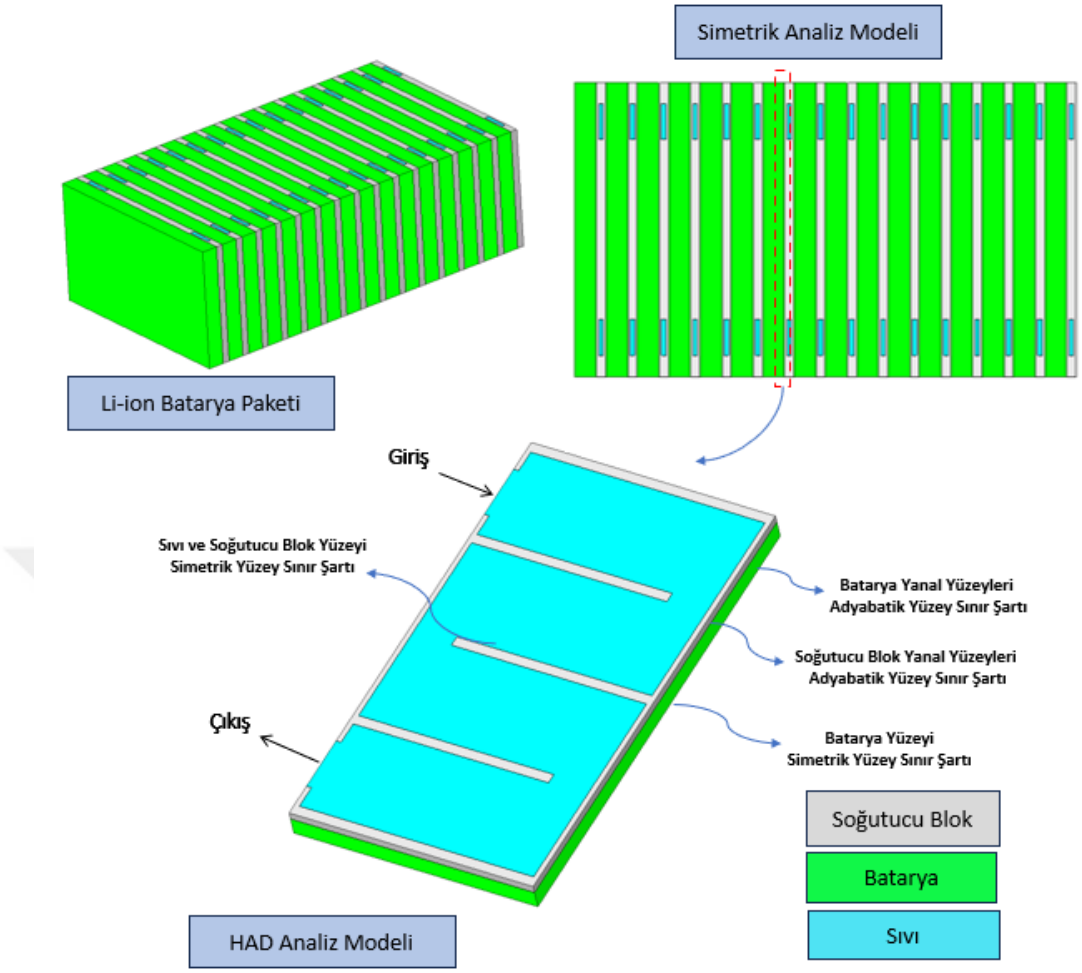
Şekil 3.4. HAD çözüm aşamaları

HAD analizleri çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Savunma, havacılık, makine imalatı, elektronik soğutma, araç iç ve dış iklimlendirme, araç ve uçak aerodinamiği gibi örnekler verilebilir (Tokgoz ve Süfer, 2023).

3.4 Sayısal Model

Bu çalışmada, sayısal analizler, üç boyutlu modeller üzerinde sıkıştırılamaz, laminer ve zamana bağlı akış kabulleri altında gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak batarya paketi ve soğutma sisteminin ısıl ve akışkan davranışları incelenmiştir.

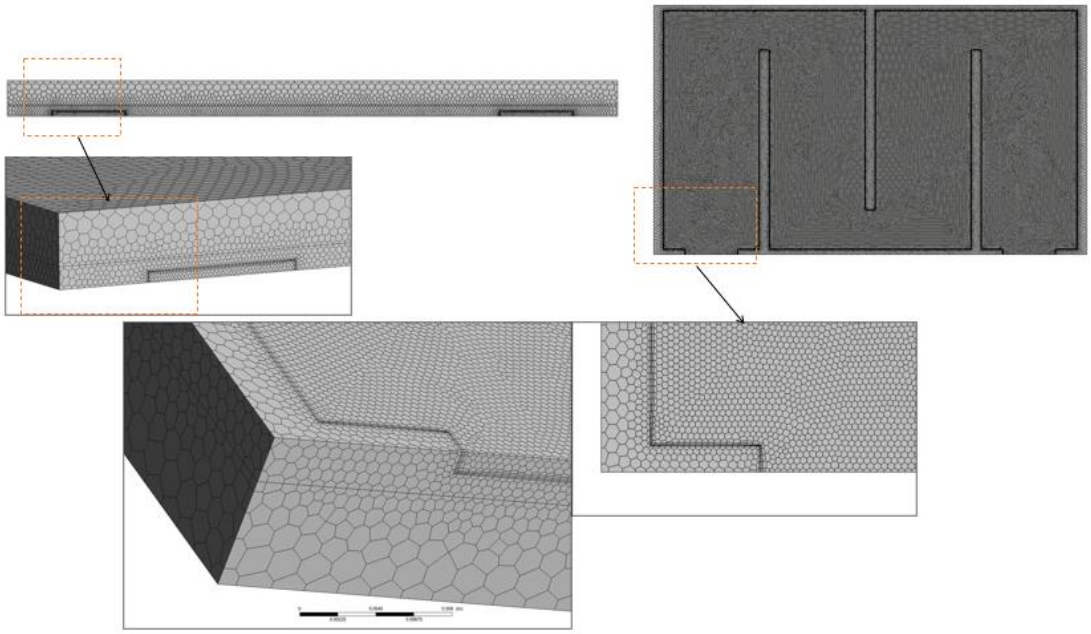
Modelleme sürecinde, batarya ve soğutucu bloklar katı alanlar olarak ele alınırken, tasarlanan soğutma sistemindeki akışkan hareketi sıvı alanlarla temsil edilmiştir. Şekil 3.5'de sayısal model gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Li-ion batarya paketi ve HAD analiz modeli

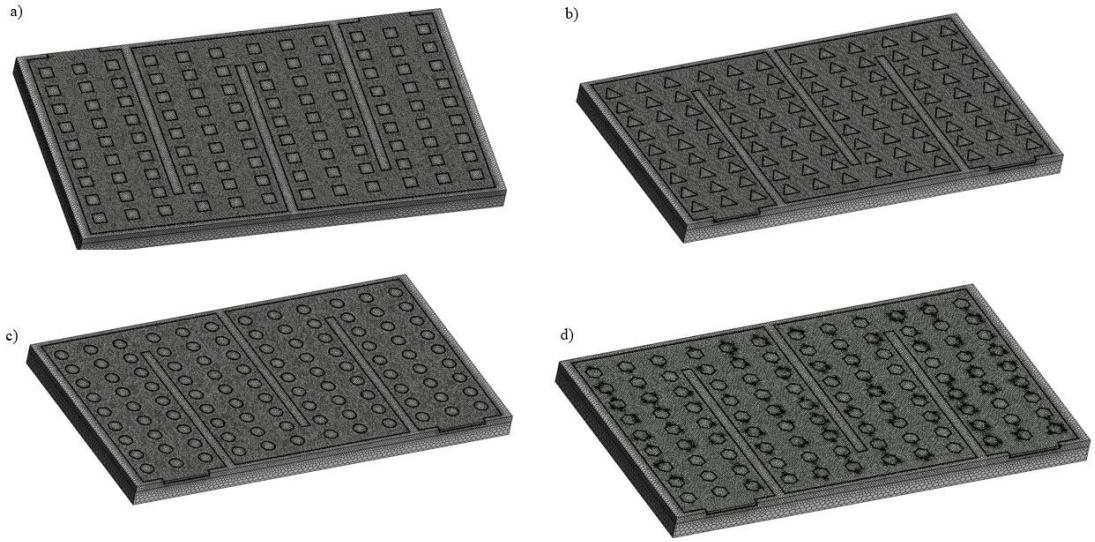
3.5 HAD Çözüm Ağı Modellerinin Oluşturulması

Soğutucu blok modellerinin çözüm ağı işlemleri ANSYS Fluent Meshing programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mevcut soğutucu blok tasarımının çözüm ağı Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Çözüm ağında sıvı alanlara, katı alanlara göre daha sık ağ yapılarak akış alanının daha hassas sonuçlar elde edilmesi sağlanmıştır.



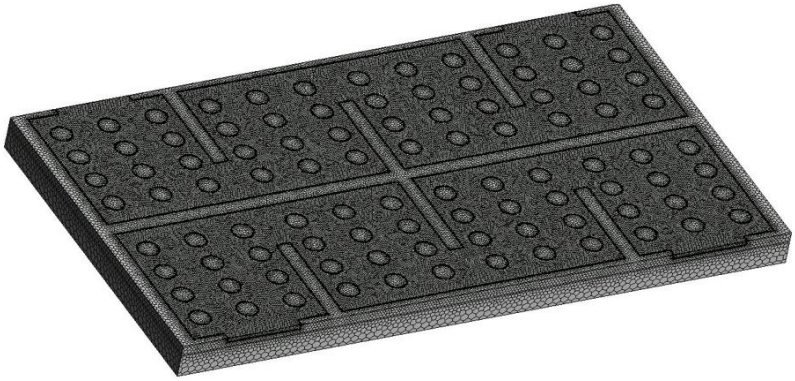
Şekil 3.6. Mevcut soğutucu blok çözüm ağı detayları

Kanatçıklı blok modellerinin çözüm ağ yapıları Şekil 3.'de gösterilmektedir.



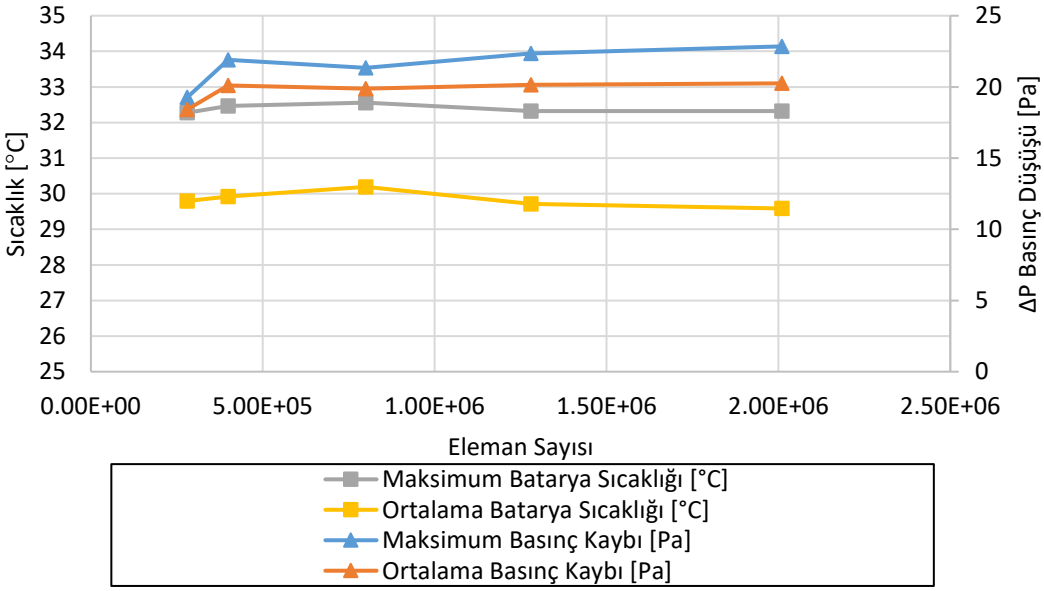
Şekil 3.7. Çözüm ağları a) Kare kanatçık, b) Üçgen kanatçık, c) Daire kanatçık, d) Altıgen kanatçık

Şekil 3.8'de yeni tasarıma ait soğutucu blok tasarımına ait çözüm ağı gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Yeni tasarım Soğutucu blok modeli çözüm ağı

Sayısal analiz çalışmalarında matematiksel modelde yeterli sayışa eleman sayısı sonuçların hassasiyetini etkilemektedir. Yüksek eleman sayısı çözüm zorlaştırır ve analiz sürelerini etkiler. Optimuma eleman sayısının bulunması gereğinden fazla eleman kullanıldığı durumda ortaya çıkabilecek sayısal hataların önüne geçer. Bu sebeple analiz modellerinde kanatçık olmayan çok kanallı soğutucu blok tasarımı için çözüm ağından bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9 grafiğinde eleman sayısına bağlı maksimum ve ortalama basınç sıcaklık parametreleri verilmiştir. Eleman sayısının yaklaşık 1 milyondan sonra çözüme etkisinin fazla olmadığı görülmektedir.



Şekil 3.9. Çözüm ağından bağımsızlık analizi

3.6 Korunum Denklemleri

Matematiksel modelde katı ve sıvı için kullanılan korunum denklemleri aşağıda gösterilmektedir. Çözüm ağında her bir eleman hacmi için süreklilik, momentum ve enerji denklemleri kullanılır (Sevilgen, Dursun ve Kılıç, 2023).

Süreklilik denklemi

$$\nabla . \vec{v} = 0 \tag{3.1}$$

Momentum denklemi

$$\rho_w \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} . \nabla)\vec{v} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} \tag{3.2}$$

Enerji korunumu denklemi,

$$\rho_w c_{pw} \frac{\partial T_w}{\partial t} + \nabla . \left(\rho_w C_{pw} \vec{v} T_w \right) = \nabla . (k_w \nabla T_w) \tag{3.3}$$

Soğutucu blok enerji denklemi,

$$\rho_m c_{pm} \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k_m \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_m \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_m \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) \tag{3.4}$$

$c_{pm}\,[J/kgK]$ Blok öz ısısını, $\rho_m\,[kg/m^3]$ blok yoğunluğunu, $k_m\,[W/m.K]$ ısıl iletkenlik değerini soğutucu blok katı alanları için ifade eder.

Li-ion batarya şarj ve deşarj durumlarında oluşan Joule ve elektrokimyasal ısınmalar denklem (3.4)'de görülmektedir. Hacimsel ısı üretimi, I, V, E_{OCV} ve V_b akım, voltaj, açık devre voltajı ve batarya hacmini ifade etmektedir. Li-ion bataryalarda ısı üretimi birçok faktöre bağlıdır. Isı üretimi, şarj ve deşarj eğrileri zamana bağlı olduğundan uygulamada belirli bir akım durumunda kalorimetre kabı ölçümleri ile belirlenir.

$$Q_b = \frac{\left[I(E_{OCV} - E) - IT\frac{dE_{OCV}}{dT}\right]}{V_b} \tag{3.5}$$

Batarya hücresi modeli enerji denklemi,

$$\rho_b c_{pb}\frac{\partial T_b}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k_{btx}\frac{\partial T_b}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_{bty}\frac{\partial T_b}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_{btz}\frac{\partial T_b}{\partial z}\right) + Q_b \tag{3.6}$$

Q_b $[W/m^3]$ batarya içi hacimsel ısı üretimini temsil etmektedir. ρ_b $[kg/m^3]$ batarya yoğunluğu c_{pb} $[J/kgK]$ batarya öz ısısını, k_{bx} $[W/m.K]$, k_{by} $[W/m.K]$, ve k_{bz} $[W/m.K]$ anisotropik ısıl iletkenlik değerlerini göstermektedir.

Referans çalışmada zamana bağlı ısı üretimi için denklem polinom katsayılarını göstermektedir. 1C,2C ve 3C deşarj eğrilerine göre A1-A7 katsayıları değerleri Çizelge 3.2'de verilmektedir (Liu, Chika ve Zhao, 2018). C deşarj terimi olarak bilinmektedir. akım yoğunluğunun bir göstergesidir. C deşarj oranı, bir pilin birim zamanda verebileceği akım miktarını gösteren bir ifadedir. C değeri yükseldikçe, pil daha yüksek akım çekilmesine izin verir, dolayısıyla daha fazla güç sağlar ancak daha kısa sürede boşalır.

$$Q_b = A_1t^6 + A_2t^5 + A_3t^4 + A_4t^3 + A_5t^2 + A_6t + A_7 \tag{3.7}$$

Çizelge 3.2. Batarya Zamana Bağlı Isı Üretimi Denklemi Katsayıları

Desarj Oranı	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
1C	4.9132e-16	-3.7742e-12	1.0679e-08	-1.3417e-05	0.0076	-2.2208	17151.7482
2C	1.2578e-13	-4.8310e-10	6.8347e-07	-4.2934e-04	0.1216	-17.7630	66623.3365
3C	3.2235e-12	-8.2542e-09	7.7851e-06	-3.2303e-03	0.6157	-59.9607	148414.7651

HAD analiz modelinde bütün komponentlerin başlangıç sıcaklığı 25°C olarak belirlenmiştir. Ayrıca soğutucu akışkan hızı 0.05 m/s ile 25°C sıcaklığında kanal

geometrilerine giriş yapmaktadır. Analiz sınır ve başlangıç koşulların Çizelge 3.3'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.3. Analiz sınır ve başlangıç koşulları

Akışkan	**Giriş Hızı**	**Giriş Sıcaklığı**	**Çıkış Basıncı**	**Soğutucu Blok ve Batarya Yüzeyleri**
Su	0.05 [m/s]	25 [°C]	0 [Pa s]	Adyabatik Yüzey

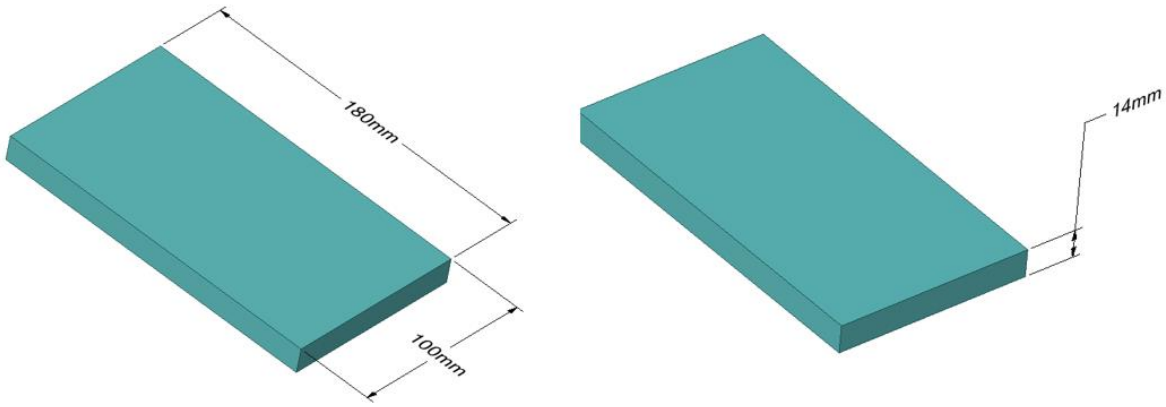
HAD analiz modelinde katı ve sıvı alanların malzemeleri Çizelge 3.4'de gösterilmektedir (Wu, 2023).

Çizelge 3.4. Soğutma Sıvısı, Hücre ve Soğutucu Blok Termofiziksel Özellikleri

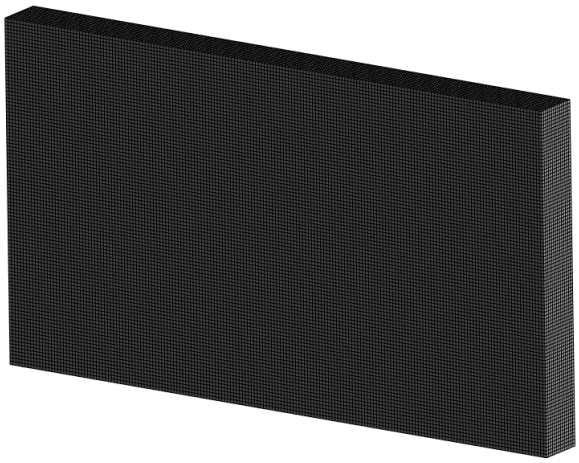
Malzeme	**Özgül Isı (C_p)**	**Yoğunluk (ρ)**	**Termal İletkenlik Katsayısı (k)**	**Viskozite (μ)**
Batarya	1515 [$Jkg^{-1}K^{-}$	2475 [kgm^{-3}	$k_{bx} = 1.3\ [Wm^{-1}K^{-1}]$ $k_{by} = k_{bz} = 36.8\ [Wm^{-1}K^{-1}]$	-
Blok	871 [$Jkg^{-1}K^{-1}$	2719 [kgm^{-3}	$k_m = 237\ [Wm^{-1}K^{-1}]$	-
Su	4282 [$Jkg^{-1}K^{-}$	1000 [kgm^{-3}	$k_w = 0.46\ [Wm^{-1}K^{-1}]$	*0.01* [Pa

3.7 Batarya Modeli

Soğutucu blok termal analizlerinde kullanılan prizmatik tip li-ion bataryanın geometrik modelin boyutları 180 [mm] x 100 [mm] olup, genişliği 14 [mm]'dir. Şekil 3.10'da gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Batarya modeli geometrik boyutları



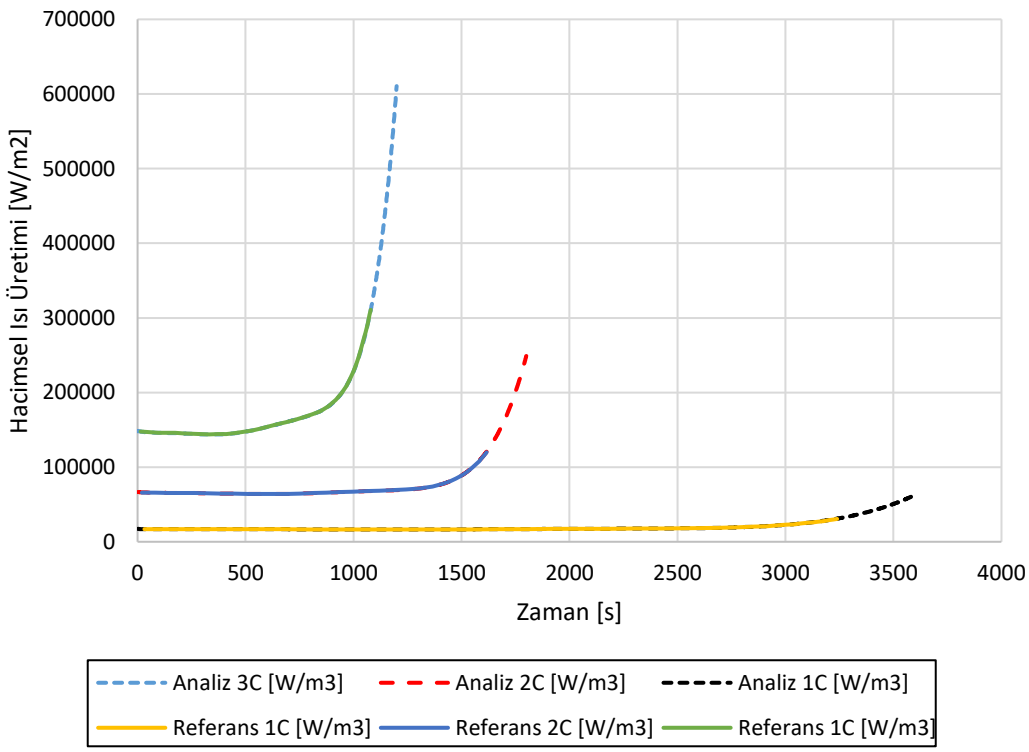
Şekil 3.11. Batarya hücresi çözüm ağı

Batarya modelinde hacimsel ısı üretimi, akım, voltaj ve çevre sıcaklığı gibi etmenlerden etkilenmektedir. HAD analizlerinde bataryaların modellenmesi için birçok elektrotermal model bulunmaktadır. Bu modeller çeşitli elektriksel parametrelere bağlı ampirik ve yarı ampirik denklemler bulunmaktadır (Bulut, Albak, Sevilgen ve Öztürk, 2022).

Bu çalışmada, batarya modelinde farklı deşarj durumlarındaki ısı akışlarını modellemek için, referans bir çalışmadan alınan polinom katsayıları kullanılmıştır (Liu, Chika ve Zhao, 2018). Akım, voltaj ve çevre sıcaklığı gibi parametrelerin bataryanın içindeki ısı

üretimine olan etkilerini daha hassas bir biçimde modellemek, bataryanın termal yönetim sistemlerinin optimizasyonu için kritik öneme sahiptir.

Simülasyon sonuçları, referans çalışmada belirlenen polinom katsayıları ile karşılaştırıldığında eğrilerin uyum içerisinde olduğunu göstermektedir. Bu uyum, kullanılan modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini doğrular. Bataryanın ısıl davranışını doğru bir şekilde öngörmek, batarya tasarımında ve termal yönetimde önemli bir adımdır, çünkü aşırı ısınma gibi sorunları önleyerek bataryanın ömrünü uzatabilir. Şekil 3.12'de modelde kullanılan katsayılar için referans ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

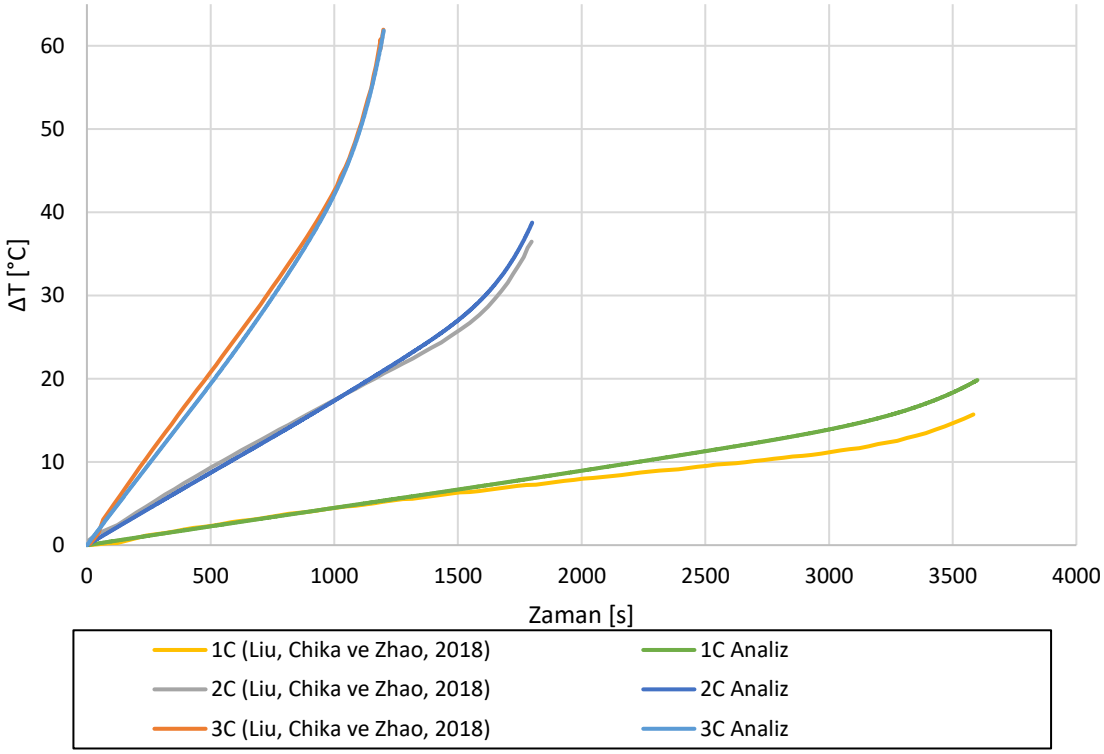


Şekil 3.12. Hücre ısı üretimi doğrulama çalışması 1C, 2C ve 3C karşılaştırması

HAD analiz modellerinde kullanılan 45 [Ah] kapasiteye sahip prizmatik tip Li-ion batarya, daha önce yapılan bir referans çalışmanın verileriyle karşılaştırılarak analizlerde kullanılan hücre modelinin sayısal doğrulaması yapılmıştır (Liu, Chika ve Zhao, 2018). Doğrulama çalışması kapsamında, batarya hücresinin tüm yüzeyleri adyabatik sınır

koşulları altında 1C, 2C ve 3C deşarj eğrileri için incelenmiş ve hücrede meydana gelen maksimum sıcaklık farkları zamana bağlı olarak değerlendirilmiştir.

Sonuçlar karşılaştırıldığında her bir deşarj eğrisi sıcaklık değerlerinin referans çalışma değerleri ile uyum içinde olduğu gözlenmiştir. Ayrıca adyabatik sınır koşulu durumunda bataryanın çalışma dışı sıcaklığında kaldığı etkili bir termal yönetim sisteminin gerekliliği görülmektedir. Şekil 3.13'de karşılaştırma sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Batarya model sıcaklık doğrulama çalışması 1C, 2C ve 3C karşılaştırması

Referans çalışmada adyabatik sınır koşulu sebebiyle batarya yüzeylerindeki sıcaklık farkları 3C durumunda yaklaşık 60°C sıcaklık değerlerine ulaşmıştır.

Bu çalışmada, bataryanın en kötü koşul olarak belirlenen 3C durumu altında soğutucu blok HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. 3C durumu, bataryanın yüksek akım yoğunluğu ve sıcaklık artışı gibi aşırı koşullarda çalıştığı durumu temsil eder. Bu tür koşullar, bataryanın aşırı ısınmasına yol açabileceğinden, soğutucu blok soğutma kapasitesi performansını hesaplamak için büyük önem taşır.

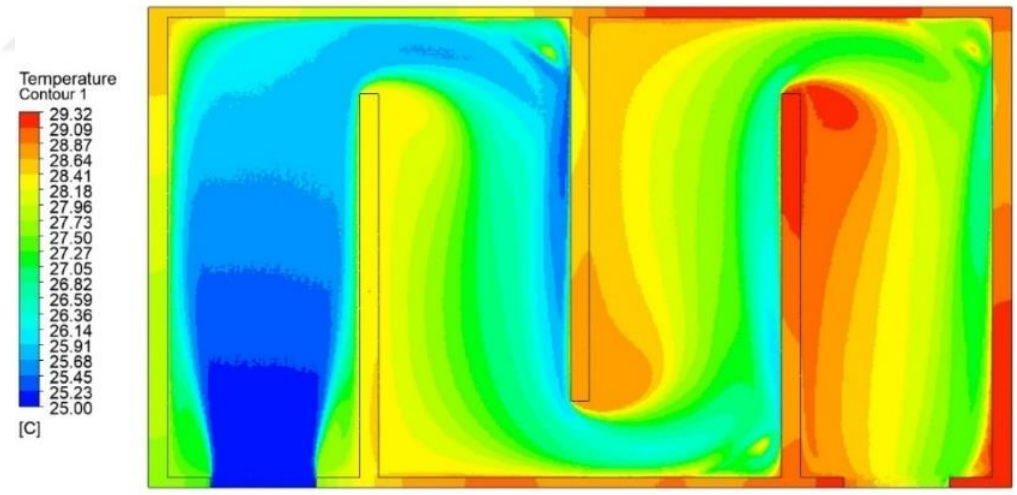
3C durumunda yapılan soğutucu blok analizleri, batarya içindeki ısının kanallar içerisindeki sıcaklık dağılımını ve aşırı ısınmayı önlemek için gereken soğutma tasarımı stratejilerini belirlemiştir. En kötü durumda ortaya çıkan soğutucu blok sonuçlarından yola çıkarak soğutucu blok tasarımının iyileştirilmesine olanak sağlar. Sonuç olarak, bu çalışma, bataryanın yüksek akım koşullarında dahi verimli bir şekilde soğutulmasını sağlayacak tasarım çözümleri geliştirmeye yardımcı olmaktadır.

4. BULGULAR

Bu bölümde HAD analizleri sonucunda elde edilen farklı soğutucu blok tasarımlarına ait sıcaklık ve basınç dağılımları gösterilmektedir. Soğutucu bloklarda, kanal içerisine yerleştirilen farklı şekil geometrilerinin akış ve ısı transferine etkileri bu bölümde sunulmaktadır.

4.1 Mevcut Soğutucu Blok Tasarımı

Soğutucu blok tasarımlarında kanal içinde herhangi bir kanatçık olmadığı durumun kanal ve batarya sıcaklık dağılımlarına etkisi incelendiğinde, soğutucu blok sıcaklık dağılımlarında yüksek sıcaklıklar kanal çıkışında gözlenmiştir. Soğutucu blok geometrisinde maksimum 29.32°C sıcaklık gözlenirken kanal içine sıvı 25 °C sıcaklıkta giriş yapmaktadır. Soğutucu blok kanal içerisinde basınç düşüşü 22.27 Pa değerinde gözlenmiştir.



Şekil 4.1. Mevcut soğutucu blok sıcaklık dağılımı

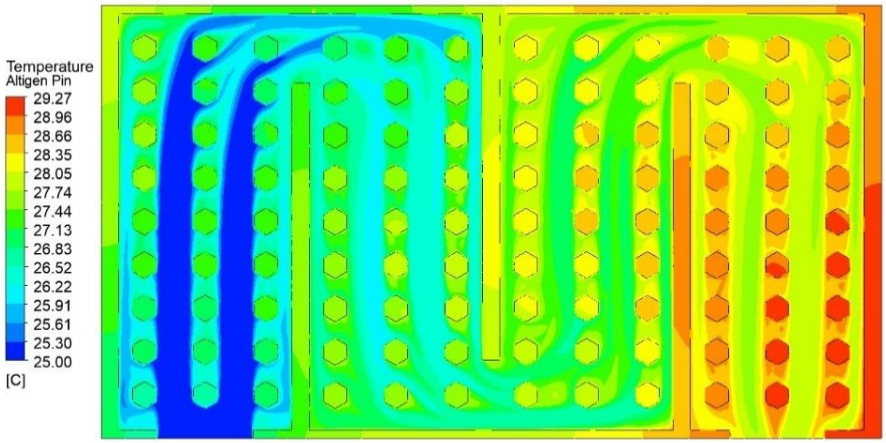
Mevcut tasarımın, Şekil 4.2'deki batarya simetri yüzeylerindeki etkisi incelendiğinde, maksimum 32.31°C sıcaklığın gözlendiği ortaya çıkmaktadır. Batarya yüzey sıcaklıklarının çıkışa doğru daha yüksek dağılım gösterdiği kanallar içerisindeki akışkanın tek yönlü hareketi olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.2. Mevcut soğutucu blok batarya yüzeyi sıcaklık dağılımı

4.2 Altıgen Kanatçıklı Soğutucu Blok Tasarımı

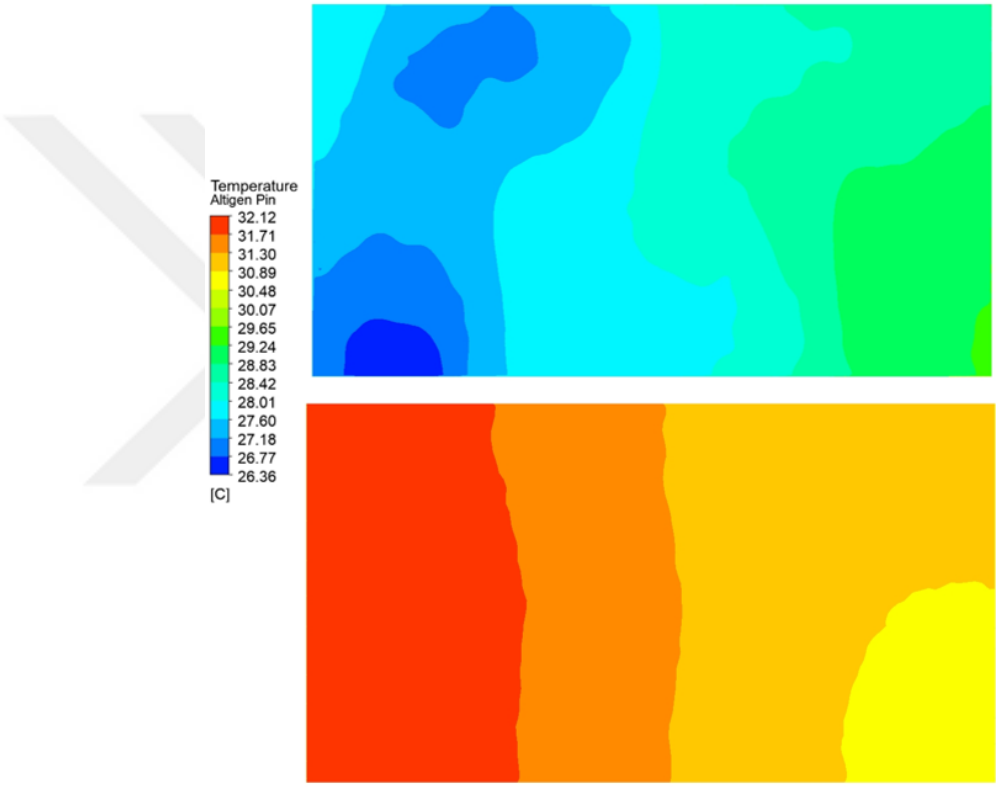
Soğutucu blok tasarımlarında kanal içinde altıgen kanatçıkların olduğu durumun kanal ve batarya sıcaklık dağılımlarına etkisi incelenmiştir. Kanal içerisine yerleştirilen kanatçıkların akışkanı kanal yüzeylerine dağıttığı Şekil 4.2'de görülmektedir.



Şekil 4.3. Altıgen kanatçıklı soğutucu blok sıcaklık dağılımı

Altıgen kanatçıklı yapıda batarya yüzeylerinde sıcaklık dağılımları, kanatçıkların olmadığı duruma göre bir miktar homojen dağılım gösterse de çıkışa doğru sıcaklık dağılımlarında yükseldiği gözlenmiştir. Kanatçıklar, akışkan dağılımını homojene yakın

şekilde kanal içerisinde dağıttığından kanallar arası sıcaklık farkları azalmaktadır. Altıgen kanatçıklı tasarımda soğutucu blok üzerinde maksimum 29.27°C sıcaklık gözlenmiştir. Soğutucu blok tarafındaki batarya yüzeyi ve bataryanın simetri yüzey sıcaklıkları şekil 4.4'de gösterilmektedir. Bataryanın en soğuk tarafı 26.36°C ile akışkan girişi sağlandığı konum olduğu gözlenmiştir. Ayrıca batarya yüzeylerinde çıkışa doğru sıcaklık dağılımlarının arttığı eğilim görülmektedir. Batarya üzerinde maksimum 32.12°C görülmüştür.

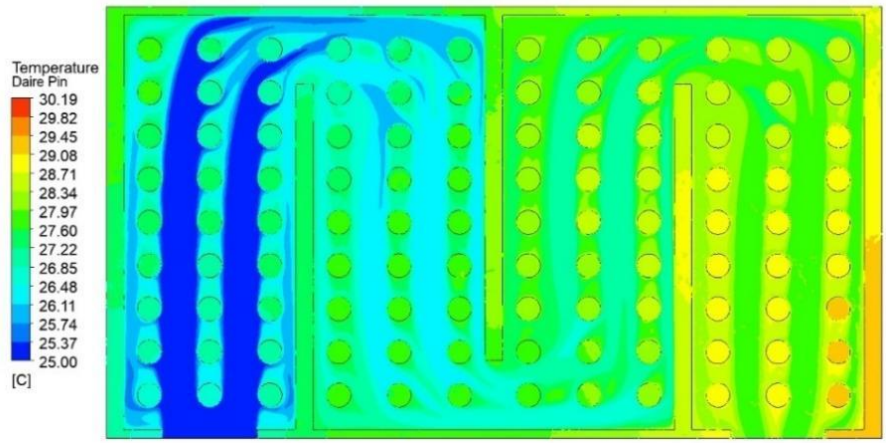


Şekil 4.4. Altıgen kanatçık batarya yanal yüzey sıcaklık dağılımları

4.3 Daire Kanatçıklı Soğutucu Blok Tasarımı

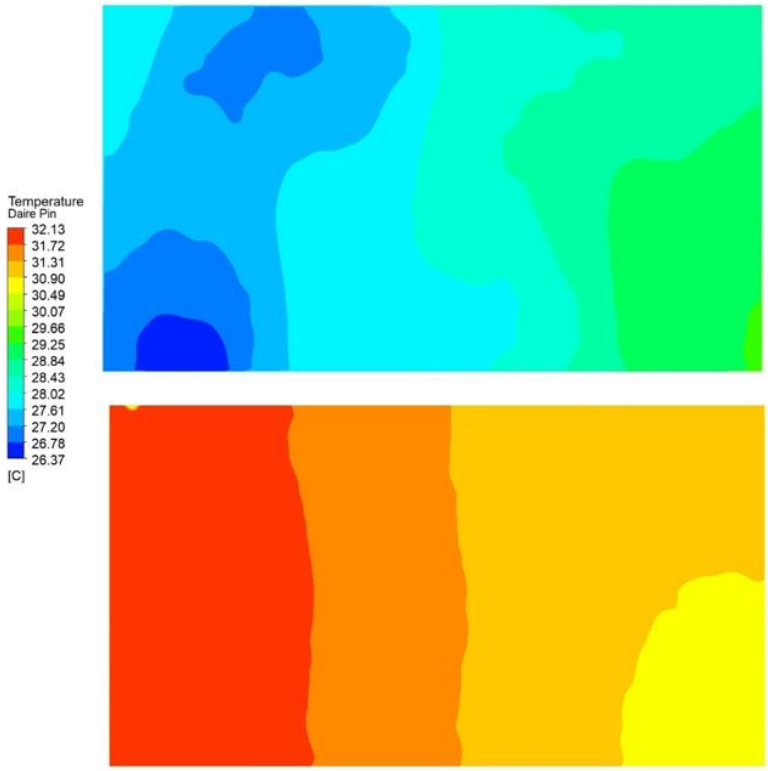
Mevcut soğutucu blok tasarımında, altıgen kanatçıkların bulunduğu alanın yakın bir yüzey alanına sahip dairesel kanatçıklar eklenerek, kanal içinde dairesel kanatçıkların etkisi incelenmiştir. Soğutucu blok içerisinde altıgen ve dairesel kanatçıkların geometrik farklılıklarının kanal içi ısı ve akış performansına etkileri değerlendirilmiştir.

Dairesel kanatçıklı soğutucu blok modelinde maksimum 30.19°C gözlenirken, batarya üzerinde ise 32.13°C gözlenmiştir. Bu değer altıgen kanatçıklı soğutucu blok modeline oldukça yakın olmaktadır. Şekil 4.5'de dairesel kanatçığa ait soğutucu blok sıcaklık dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Dairesel kanatçıklı soğutucu blok sıcaklık dağılımı

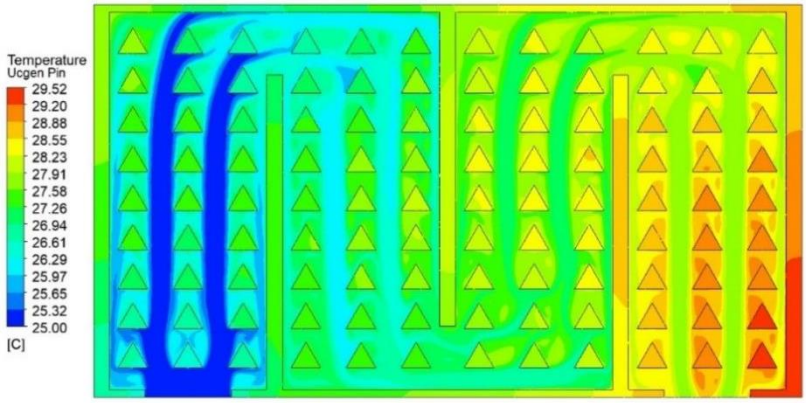
Mevcut tasarımlarda gözlenen benzer durum dairesel kanatçıklı yapıda da ortaya çıktığı gözlenmektedir. Giriş bölgesinde sıcaklık değerleri düşük, çıkış bölgesinde ise yüksek sıcaklık değerleri görülmektedir. Şekil 4.6'da batarya yüzey sıcaklık dağılımları gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Daire kanatçık batarya yüzey sıcaklık dağılımları

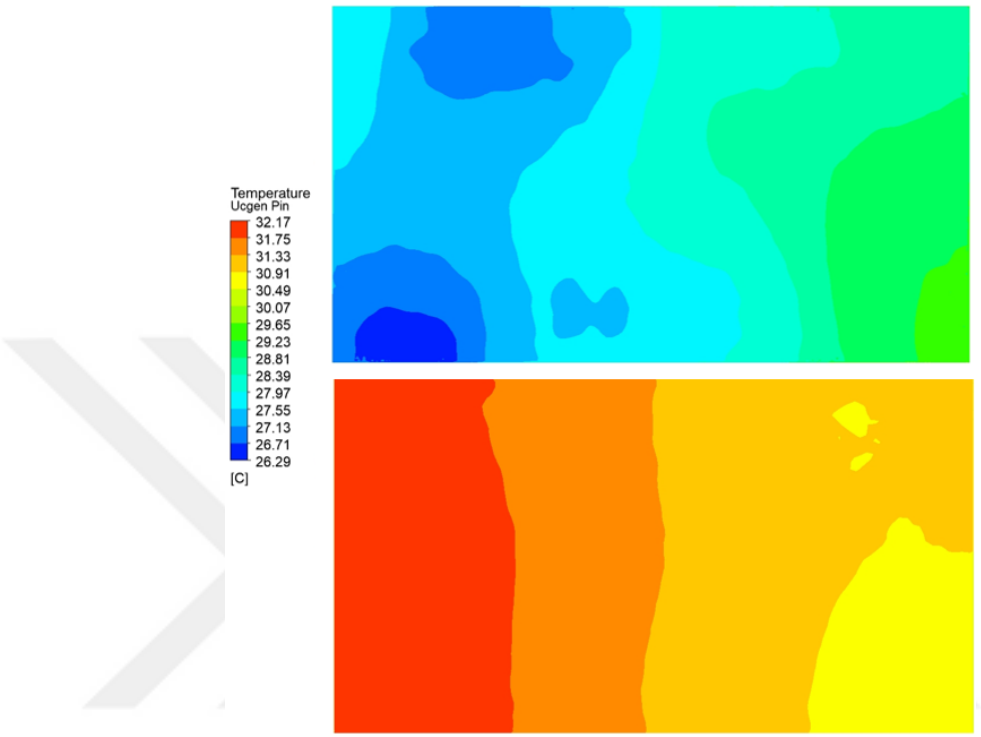
4.4 Üçgen Kanatçıklı Soğutucu Blok Tasarımı

Soğutucu blok tasarımlarından birisi olan üçgensel yapıların kanal içerisindeki sıcaklık ve basınç kayıpları değerleri incelenmiştir. Şekil 4.7'de soğutucu blok sıcaklık dağılımları gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Üçgen kanatçıklı soğutucu blok sıcaklık dağılımı

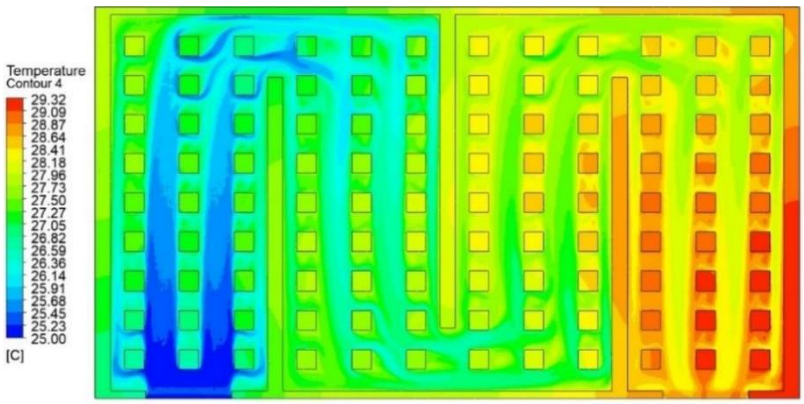
Üçgen yapıların olduğu soğutucu blok batarya kombinasyonunda bataryada maksimum 32.17°C sıcaklık gözlenmektedir. Sıcaklık dağılımı diğer kanatçıklara benzemektedir. Şekil 4.8'de batarya sıcaklık dağılımları gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Üçgen kanatçık batarya yüzey sıcaklık dağılımları

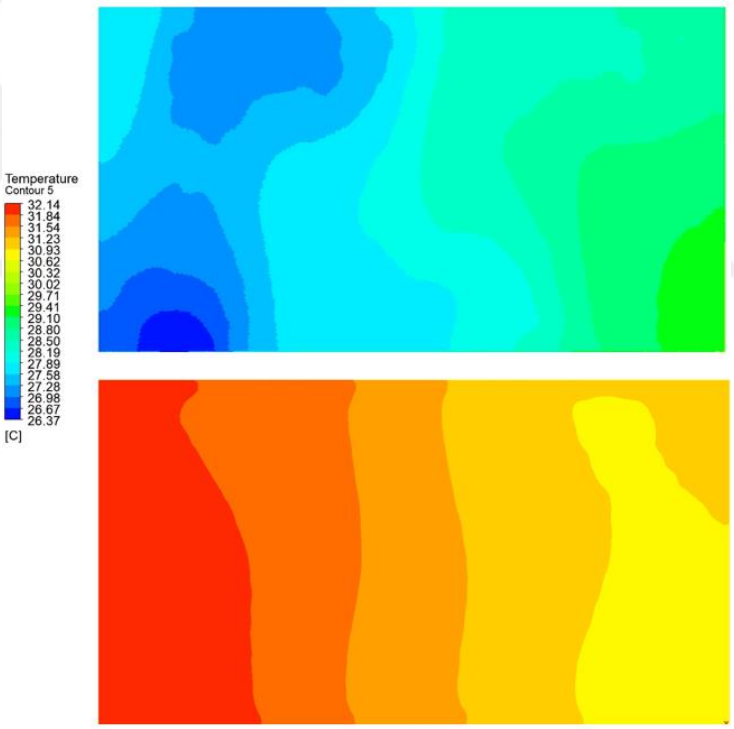
4.5 Kare Kanatçıklı Soğutucu Blok Tasarımı

Soğutucu blok tasarımlarında kanal içinde kare kanatçıkların olduğu durumun kanal ve batarya sıcaklık dağılımlarına etkisi incelenmiştir. Şekil 4.9'da sıcaklık dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Kare kanatçık soğutucu blok sıcaklık dağılımı

Kare kanatçıklı modelin batarya yüzey sıcaklık dağılımlarına etkisi şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.10. Kare kanatçık batarya yüzey sıcaklık dağılımları

HAD analizlerinde bütün soğutucu blokların giriş ve çıkış bölümleri aynı yöne baktığından dolayı çıkışa doğru sıcaklık dağılımlarının giderek yükseldiği anlaşılmıştır. Ayrıca kanal içerisindeki akışkanın bataryanın ürettiği ısı sonucu ısınması da çıkış

bölümünde ısı transferinin düşmesi sonucunda sıcaklık dağılımı homojenliğini olumsuz etkilemiştir.

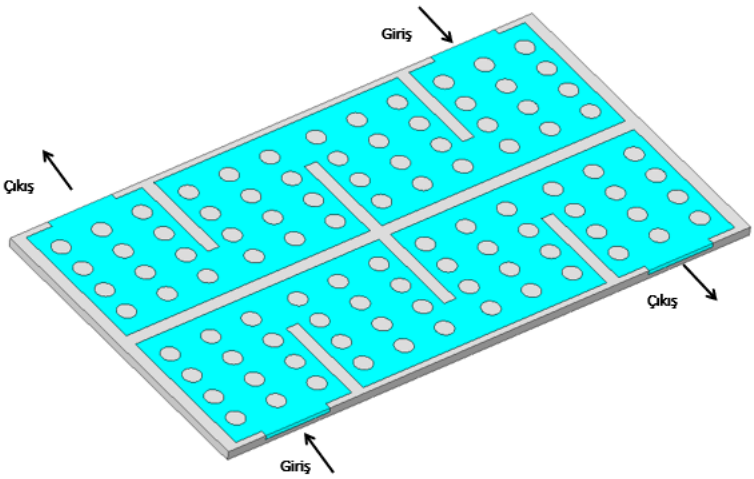
Mevcut soğutucu blok geometrisine nazaran sıcaklık dağılımlarında kayda değer değişim olmaması ve basınç kaybı değerlerinin yüksek gelmesi daha farklı bir soğutucu blok tasarımına yöneltmektedir. Bu analiz sonuçlarında basınç düşüşü ve sıcaklık değerleri dikkate alınarak çift giriş ve çift çıkışlı yeni bir soğutucu blok tasarımı yapılarak analiz çalışmaları gerçekleşmiştir.

4.6 Çok Kanallı Daire Kanatçıklı Yeni Soğutucu Blok Tasarımı

Mevcut soğutucu blok tasarımına eklenen kanatçıkların ısıl performansları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. İlk aşamada, altıgen, dairesel, kare ve üçgen şekilli kanatçıkların akışkan üzerindeki etkileri ile ısı transferi performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler, kanal içindeki akış dinamiklerini, basınç kaybını ve sıcaklık dağılımını kapsamlı bir şekilde inceleyerek yeni tasarım için fikirler sunmuştur.

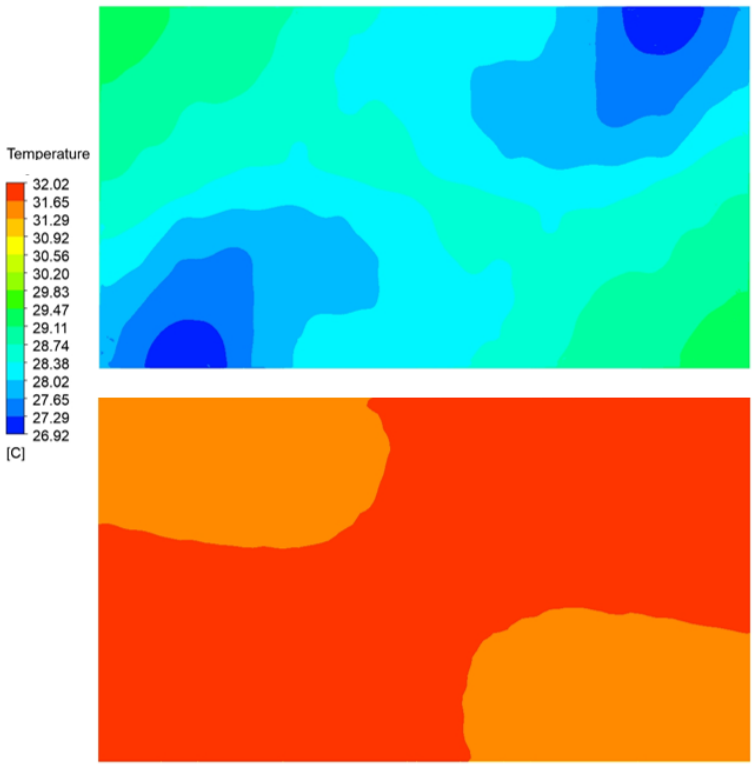
Mevcut kanal tasarımında sınır şartı olarak belirlenen 0.05 m/s soğutucu akışkan hız değeri yarıya indirilerek kanala girişi iki farklı yerden gerçekleştirildi. Böylece hem basınç kayıplarının azaltılması hem de giriş ve çıkış bölgelerinde oluşan sıcaklık farklarını minimuma indirilmesi amaçlanmıştır. Yeni soğutucu blok tasarımında çapraz akışlı bir ısı değiştirici özelliği sayesinde giriş ve çıkış bölgelerinde sıcaklık dağılımının homojene yakın olması sağlandı.

Şekil 4.11’de yeni çok kanallı soğutucu blok tasarımı ve kanal giriş, çıkış bölgeleri gösterilmektedir.



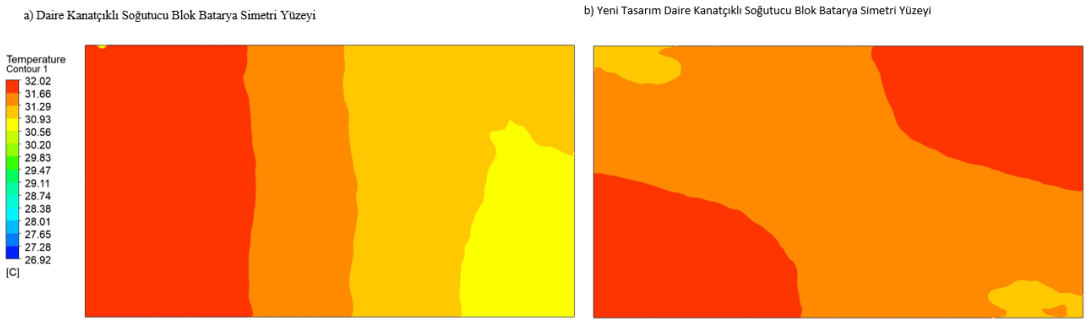
Şekil 4.11. Çift çok kanallı daire kanatçıklı yeni soğutucu blok tasarımı

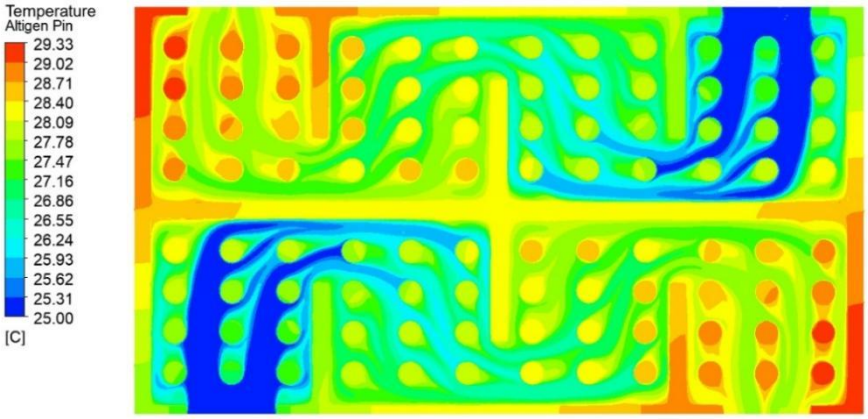
Batarya simetri yüzey sıcaklıkları incelendiğinde hem mevcut soğutucu blok tasarımında hem de kanatçık eklenen soğutucu blok tasarımlarında gözlenen önemli noktanın giriş ve çıkış konumlarına bağlı sıcaklık dağılımının çıkışa doğru yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu da akışkanın kanallar içerisinde ısıyı homojen bir şekilde taşıyarak çıkış yaptığı göstermektedir. Bu sebeple, elde edilen analiz sonuçları bulgularına göre etkin bir soğutma tasarımı yapılarak batarya ve soğutucu blok üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı homojene dönüştürülmesi hedeflendi.



Şekil 4.12. Yeni tasarım batarya yüzeyleri sıcaklık dağılımı

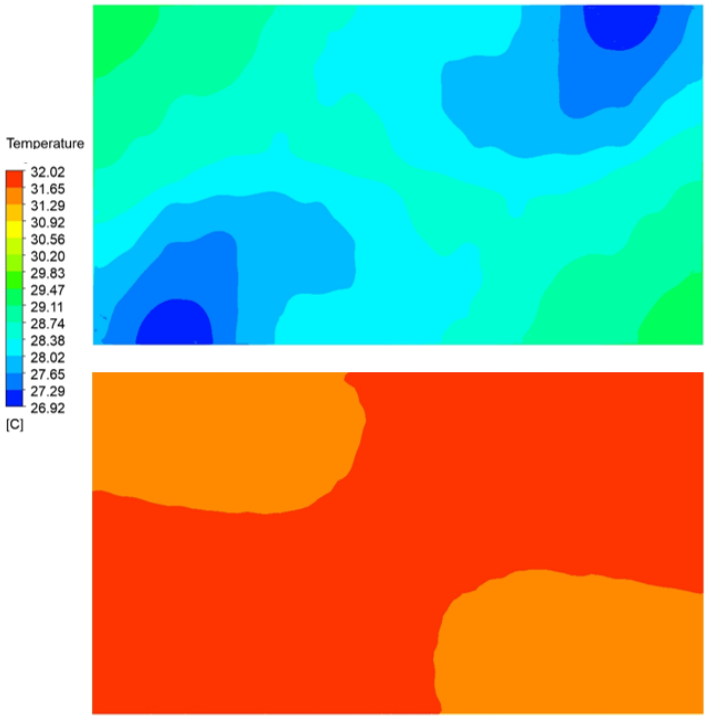
Aşağıdaki şekilde aynı legenda yeni ve mevcut soğutucu blok tasarımlarına ait batarya simetri yüzey sıcaklığı gösterilmektedir. İlk tasarım e nihai tasarımlar incelendiğinde batarya sıcaklıklarının düştüğü ve homojen sıcaklık dağılımının iyileştiği görülmüştür. Sonuç olarak, mevcut tasarımın ısıl ve hidrodinamik performansı iyileştirilmiş ve yenilikçi birçok kanallı soğutma çözümü ortaya çıkarılmıştır.





Şekil 4.13. Yeni tasarım soğutucu blok sıcaklık dağılımı

Batarya simetri ve soğutucu blok tarafı yüzey sıcaklıkları incelendiğinde maksimum 32.02°C, minimum 26.92°C sıcaklık değerine ulaştığı görülmüştür. Batarya üzerine maksimum 5.1°C sıcaklık farkı meydana gelmektedir.



Şekil 4.14. Yeni tasarım batarya yüzeyleri sıcaklık dağılımı

Kanatçık şekilleri incelendiğinde altıgen ve daire kanatçık tiplerinin sıcaklık alan sonuçlarının birbirine yakın olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca çift kanallı daire

soğutucu blok içerisinde kanal sayısının artması ile sıcaklığın daha düşük değerlere gerilediği gözlenmiştir. Böylece soğutucu blok tasarımında etkili parametrenin kanal sayısı olduğu analiz sonuçlarından elde edilmiştir.

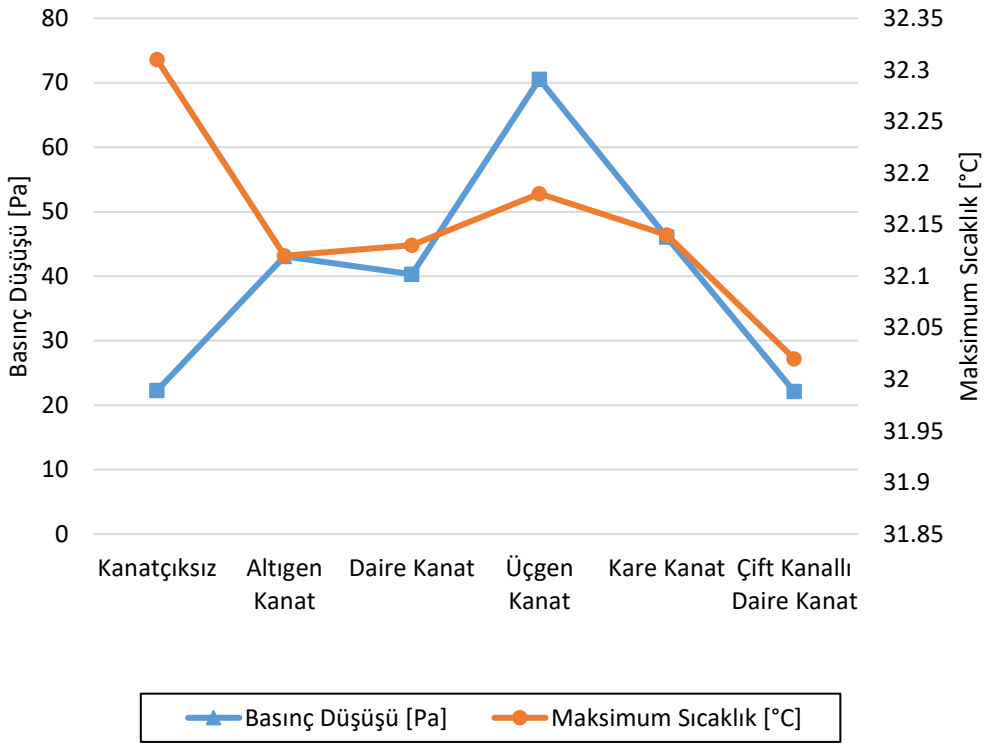
Sıvı soğutmalı batarya termal yönetim sisteminde akışkanın soğutucu blok içerisinde hareket etmesi için gerekli pompa gücünün bilinmesi enerji tüketimi açısından önemlidir. Soğutucu blok içerisinde oluşan basınç kayıpları, yüksek akışkan hızlarında, pompanın daha fazla enerji harcamasına ve akış hızının düşmesiyle de soğutma performansının azalmasına neden olur. Gerekli soğutucu akışkan debisinin hesaplanması sistem performansını artırarak, basınç kayıplarının azaltılmasını sağlar.

HAD analizleri çalışmaları sonuçları incelendiğinde, basınç kaybı değerlerinde altıgen ve dairesel kanatçıkların birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. Maksimum basınç kaybının üçgensel kanatçık kullanım durumunda ortaya çıktığı, minimum basınç kaybının ise yeni tasarım soğutucu blok modelinde olduğu gözlenmiştir. Basınç kayıplarının en az olduğu durum yeni çok kanallı tasarımda 22.02 Pa değerinde meydana geldiği gözlenmiştir. Üçgensel kanatçık yapıların olduğu soğutucu blok tasarımında en yüksek basınç kaybı 70.54 Pa değerinde olmaktadır. Mevcut soğutucu blok tasarımı ile yeni çok kanallı tasarımlar karşılaştırıldığında basınç kaybı değerlerinin nispeten birbirine yakın olduğu, yeni soğutucu blok tasarımın daha az olduğu bulgusu ortaya çıkmıştır. Çizelge 4.1'de her bir soğutucu blok tasarımına ait basınç düşüşü ve maksimum sıcaklık değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Soğutucu blok basınç düşüş ve maksimum sıcaklık değerleri

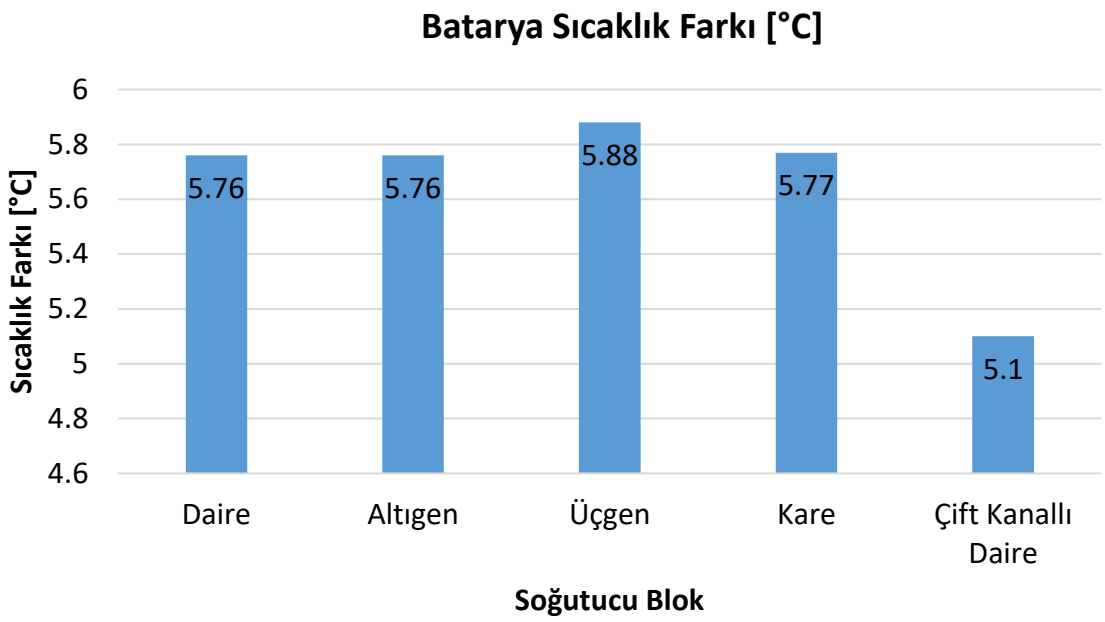
Kanatçık Tipi	**Basınç Düşüşü [Pa]**	**Maksimum Sıcaklık [°C]**
Mevcut Soğutucu Blok	22.27	32.31
Altıgen Kanat Soğutucu Blok	43.06	32.12
Daire Kanat Soğutucu Blok	40.3	32.13
Üçgen Kanat Soğutucu Blok	70.54	32.18
Kare Kanat Soğutucu Blok	46.06	32.14
Çift Kanallı Daire Kanat Soğutucu Blok	22.02	32.02

Soğutucu blok modellerinde kanal içi tasarımların maksimum sıcaklık ve basınç düşüşü üzerindeki etkileri Şekil 4.15'te gösterilmektedir.



Şekil 4.15. Soğutucu blok basınç düşüşü ve maksimum sıcaklıkları

Soğutucu blok termal analizleri sonucunda batarya üzerine oluşan maksimum ve minimum sıcaklıkları arasında oluşan sıcaklık farkları her bir soğutucu blok için bakıldığında sıcaklık farkının birbirine yakın olduğu elde edilmiştir. Çift kanallı yeni tasarımın sıcaklık farkı en düşük olduğu ortaya çıkmıştır. Şekil 4.16'da farklı kanatçık şekillerine ait sıcaklık farkları gösterilmektedir.

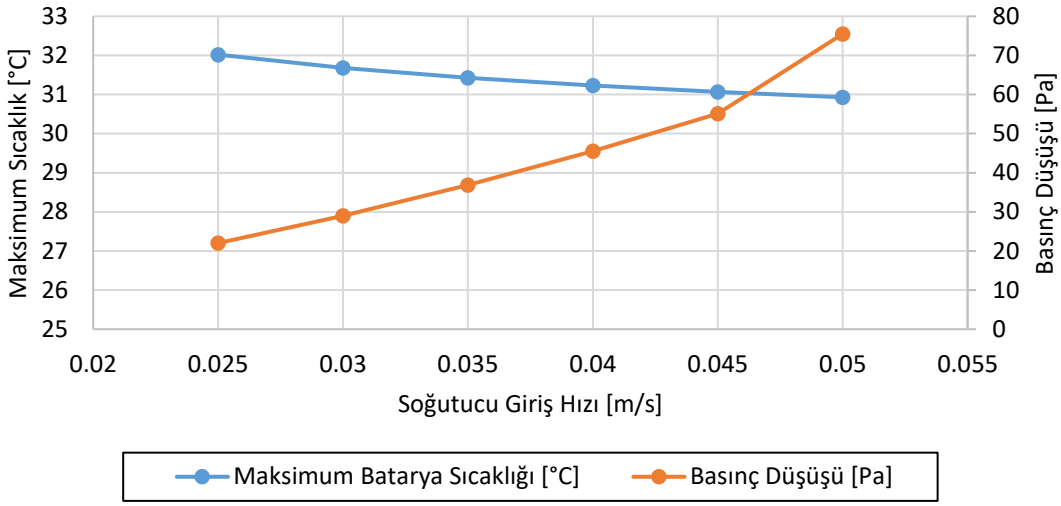


Şekil 4.16. Soğutucu blok sıcaklık farkları

Analiz sonuçlarına göre, kanallar boyunca akışkanın düzgün bir şekilde hareket ettiği ve batarya yüzeylerindeki sıcaklık farklarının minimum seviyede tutulduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, çok kanallı yapının ısı transferinde etkili bir çözüm sunduğunu açıkça göstermektedir. Ayrıca, çift yönlü akışkan tasarımı sayesinde batarya yüzeylerinin homojen bir şekilde soğutulduğu analiz verileri sonucu elde edilmiştir.

Li-ion batarya paketi üzerindeki sıcaklık dağılımının homojen olmaması durumu, bataryalar için ciddi problemlere yol açabilir. Oluşan bu sıcaklık farklılıkları, elektrokimyasal tepkimelere bağlı bataryanın hücreleri arasında dengesiz yük dağılımına neden olur. Bu durum, bazı hücrelerin diğerlerine göre daha hızlı deşarj olmasına veya şarj olamamasına yol açar. Batarya hücreleri arasında oluşan bu etkiler enerji verimliliğini düşürür ve batarya kapasitesinin tam olarak kullanılmasını engeller. Sıı soğutmalı batarya termal yönetim sistemlerinde soğutucu blokların termal tasarımlarında farklı kanal tasarımları sayesinde akışkan yönlendirilerek ısı transfer homojen olması sağlanır. Ayrıca kanal tasarımı ve gerekli akışkan miktarı da sıcaklık farklarının azalması yönünde etki eder.

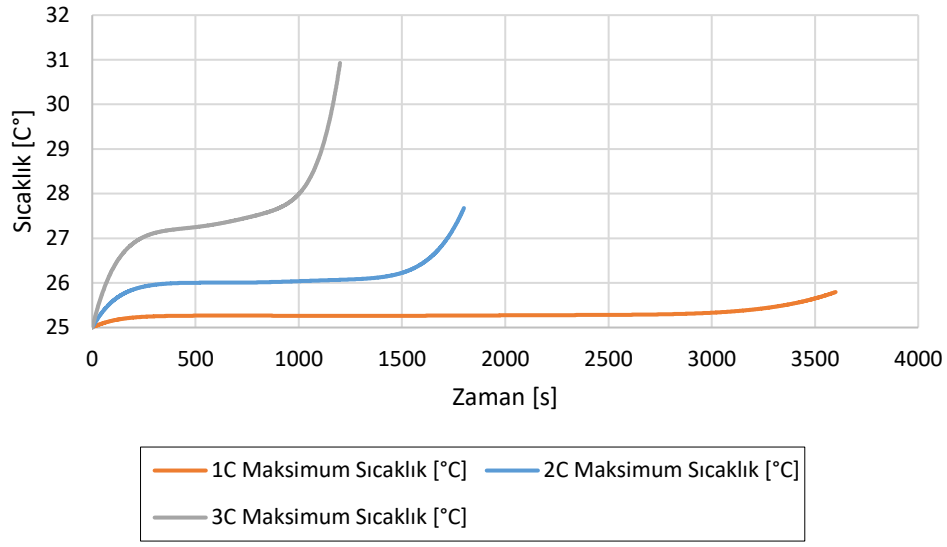
Çift kanallı dairesel kanat tasarımına sahip soğutucu blok üzerinde, farklı akışkan giriş hızlarında basınç düşüşü ve sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Şekil 4.17'de grafik olarak sonuçlar gösterilmektedir.



Şekil 4.17. Soğutucu akışkan giriş hızına bağlı basınç düşüşü ve maksimum sıcaklık

Çok kanallı yeni tasarımda batarya sıcaklık farklarını azaltmak ve soğutucu akışkan giriş hız değerleri 0.025 m/s den başlayarak 0.05 m/s'ye kadar farklı akışkan giriş hızlarında soğutucu blok ısıl performansı incelenmiştir. Soğutucu giriş hızı 0.05 m/s olduğu durumda batarya üzerinde yaklaşık maksimum 31°C gözlendiği analiz verileri ile elde edilmiştir.

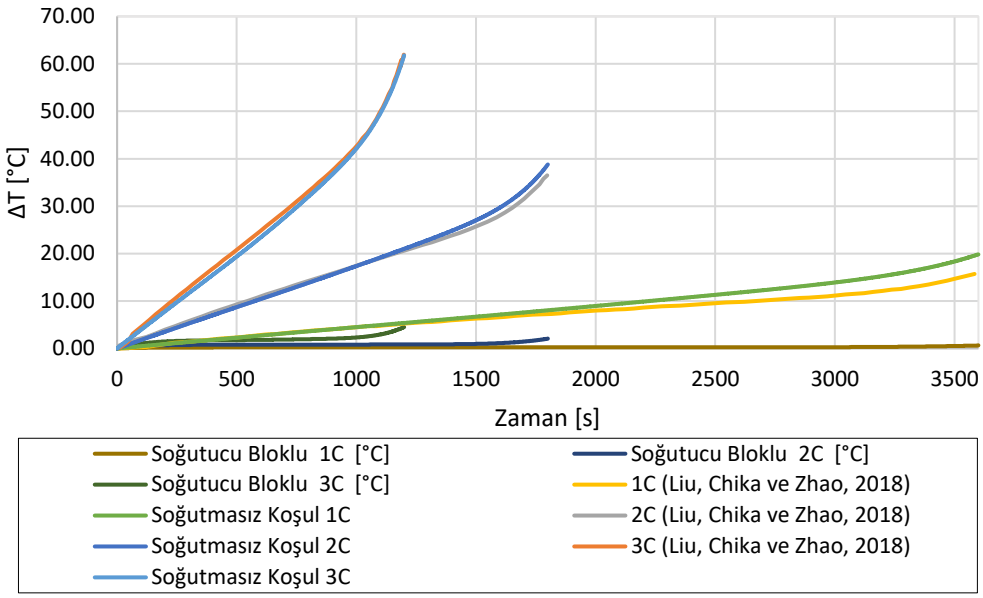
Yeni tasarım soğutucu bloğun farklı akım yoğunluğu koşullarında sıcaklıklarının hesaplanması için akışkan giriş hızı 0.05 m/s durumunda bataryanın 1C, 2C ve 3C deşarj durumlarında oluşan maksimum sıcaklık farkı, maksimum sıcaklık değerleri Şekil 4.18'de gösterilmektedir.



Şekil 4.18. Farklı deşarj eğrilerinde maksimum sıcaklık değerleri

1C koşulu sonunda 25.79°C olarak gözlenirken, 2C durumunda 27.68°C ve en yüksek akım yoğunluğuna sahip 3C durumunda ise 30.92°C maksimum sıcaklık değeri gözlenmiştir.

Sıvı soğutmanın batarya üzerindeki etkisinin incelenmesi için herhangi bir soğutma tasarımının olmadığı ve adyabatik sınır şartı durumu olduğu durum her bir deşarj eğrisi için incelenmiştir. Şekil 4.19'da zamana bağlı sıcaklık grafiği her bir eğri için gösterilmektedir. Soğutmasız durumun, soğutmalı duruma göre bataryalar için kritik sıcaklıklara ulaştığı gözlenmiştir.



Şekil 4.19. Soğutmalı ve Adyabatik Durumun Karşılaştırması

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, prizmatik tip Li-ion batarya paketi için sıvı soğutmalı batarya termal yönetim sistemi (BTYS) performans karşılaştırması kapsamında çok kanallı soğutucu blok geometrisi içerisine yerleştirilen daire, üçgen kare ve altıgen kanatçıkların akış ve ısı transfer performansı bataryanın 3C koşulu altında akışkanın 0.05 m/s hız ile giriş yaptığı durum Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile incelenmiştir. HAD modeli için çözüm ağından bağımsızlık çalışması gerçekleştirilerek sayısal modelin doğruluğu kontrol edilmiştir.

Soğutucu blok içerisinde kanatçıklar batarya yüzeylerinde etkisini göstermiş ve batarya yüzey sıcaklıklarının azaltmasına rağmen, blok içerisine yerleştirilen kanatçıkların etkisinin sıcaklık alanı bakımından birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Lakin kanatçıklar sayesinde akışkanın blok içerisinde homojene yakın sıcaklık dağılımı sebebi ile soğutucu bloklarda kanatçıkların olmadığı duruma göre daha olumlu bir etki göstermiştir.

Kanatçık yapıların birbiri arasında karşılaştırılması durumunda basınç düşüşünün, kanallar içerisinde olmadığı durumdan neredeyse iki katında gerçekleştiği gözlenmiştir. Kanatçık geometrileri arasında basınç düşüşünün en fazla üçgen kanatçık geometrisinde gerçekleştiği gözlenmiştir. Altıgen ve dairesel kanatçıklarının sıcaklık ve basınç kaybı değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Bu ön tasarım aşamasında enerji verimliliği göz önünde bulundurularak pompa seçimi konusunda fikir verebileceği ön görülmektedir.

HAD analiz çalışmalarında dört farklı kanatçığa sahip soğutucu blok sıcaklık ve basınç kaybı performans karşılaştırması sonucunda dört analizde de akışkan çıkışına doğru batarya yüzeylerinde ısınma olduğu, giriş bölgesinin daha soğuk, çıkış bölgesinin ise sıcaklık dağılımlarının daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Ayrıca soğutucu blok modellerinde basınç kaybı değerlerinin kanatçıksız duruma göre daha yüksek değerlere çıktığı görülmüştür. Bu sebeple mevcut HAD analiz sonuçları üzerinden basınç kaybı ve homojen sıcaklık dağılımı dikkate alarak yeni bir soğutucu blok tasarımına gidilmiştir.

Yeni tasarımda akışkan giriş hızı yarıya düşürülerek çift giriş ve çift çıkış olmak üzere çapraz akışlı bir ısı değiştirici modeli üzerinde durulmuştur. Yeni tasarımın diğer tasarımlar ile karşılaştırılmasında daha düşük basınç kaybı ve düşük sıcaklık değerleri elde edildiği gözlenmiştir. Yeni tasarımda farklı giriş hızlarında soğutma bloğu ısıl kapasitesi hesaplanmış yaklaşık 0.05 m/s hız değerinde optimum soğutmanın sağlandığı görülmüştür.

Sonuçların soğutmasız, adyabatik durum ile karşılaştırıldığında ise soğutucu blok tasarımının sıcaklık farklarını azalttığı, maksimum sıcaklıkların lityum iyon batarya çalışma sıcaklıkları arasında olduğu kaydedildi.

Bu çalışmanın, Li-ion temelli sıvı soğutmalı batarya termal yönetim sistemleri için geliştirilen soğutucu blok tasarımlarında hücre ömür, performans ve verim açısından olumlu yönde etkili olduğu, sayısal sonuçların uygulamada avantaj sağlayacağı öngörülmektedir. Gelecek çalışmalarda, çok kanallı soğutucu blok tasarımlarında kanal boyutu, kanal sayısı ve farklı soğutucu akışkan seçimleri gibi parametrelerin optimizasyonuna yönelik çalışmalar yapılarak sistem performansı daha da iyileştirilebilir. Ayrıca, HAD analiz modellerinin deneysel verilerle destekleyerek doğrulanması, elde edilen sonuçların güvenilirliğini ve uygulanabilirliğini büyük ölçüde artıracaktır.

KAYNAKLAR

Smith, J., Singh, R., Hinterberger, M., & Mochizuki, M. (2018). Battery thermal management system for electric vehicle using heat pipes. International Journal of Thermal Sciences, 134, 517–529. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.08.022

Chen, Z., Yang, S., Pan, M., & Xu, J. (2022). Experimental investigation on thermal management of lithium-ion battery with roll bond liquid cooling plate. Applied Thermal Engineering, 206, 118106. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118106

Liu, H., Gao, X., Niu, D., Yu, M., & Ji, Y. (2022). Thermal-hydraulic characteristics of the liquid-based battery thermal management system with intersected serpentine channels. Water, 14(19), 3148. https://doi.org/10.3390/w14193148

Faizan, M., Pati, S., & Randive, P. (2023). Effect of channel configurations on the thermal management of fast discharging Li-ion battery module with hybrid cooling. Energy, 267, 126358. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126358

Patil, M. S., Seo, J.-H., Panchal, S., & Lee, M.-Y. (2021). Numerical study on sensitivity analysis of factors influencing liquid cooling with double cold-plate for lithium-ion pouch cell. International Journal of Energy Research, 45(2), 2533. https://doi.org/10.1002/er.5946

Chen, D., Jiang, J., Kim, G.-H., Yang, C., & Pesaran, A. (2016). Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells. Applied Thermal Engineering, 94, 846–854. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.015

Aktaş, M. (2020). Otomobil dış aydınlatma gruplarında inovatif soğutma uygulamaları (Doktora tezi)Yükseköğretim Kurulu Tez Merkezi. (Tez No. 635401)

Kalkan, O. (2021). Elektrikli araç bataryalarının farklı metotlarla soğutulmasının deneysel ve sayısal analiz (Doktora tezi, Yükseköğretim Kurulu Tez Merkezi. (Tez No. 675997)

Xu, X., Tong, G., & Li, R. (2020). Numerical study and optimizing on cold plate splitter for lithium battery thermal management system. Applied Thermal Engineering, 167, 114787. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114787

Dong, J., Lu, X., Sun, Y., Mitin, V., Xu, H., & Kong, W. (2022). Design of battery thermal management system with considering the longitudinal and transverse temperature difference. Energies, 15(19), 7448. https://doi.org/10.3390/en15197448

Deng, T., Zhang, G., & Ran, Y. (2018). Study on thermal management of rectangular Li-ion battery with serpentine-channel cold plate. International Journal of Heat and Mass Transfer, 125, 143–152. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.065

Xiong, M., Wang, N., Li, W., Garg, A., & Gao, L. (2023). Study on the heat dissipation performance of a liquid cooling battery pack with different pin-fins. Batteries, 9(1), 44. https://doi.org/10.3390/batteries9010044

Jarrett, A., & Kim, I. Y. (2011). Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance. Journal of Power Sources, 196(23), 10359–10368. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.06.090

Wang, J., Liu, X., Liu, F., Liu, Y., Wang, F., & Yang, N. (2021). Numerical optimization of the cooling effect of the bionic spider-web channel cold plate on a pouch lithium-ion battery. Case Studies in Thermal Engineering, 26, 101124. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101124

Celen, A. (2023). Experimental investigation on single-phase immersion cooling of a lithium-ion pouch-type battery under various operating conditions. Applied Sciences, 13(5), 2775. https://doi.org/10.3390/app13052775

Özel, M. A. (2019). Elektrikli araçlarda kullanılan batarya paketinin termal modeli ve analizi (Yüksek Lisans Tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Sevilgen, G., Dursun, H., & Kılıç, M. (2023). Experimental and numerical investigations on the thermal performance of three different cold plates designed for the electrical vehicle battery module. Sustainability, 15(19), 1–21.

Tokgoz, N., & Süfer, Ö. (2023). Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğine Genel Bir Bakış. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6(3), 2392-2408. https://doi.org/10.47495/okufbed.1191498

Bulut, E., Albak, E. İ., Sevilgen, G., & Öztürk, F. (2022). Prediction and optimization of the design decisions of liquid cooling systems of battery modules using artificial neural networks. International Journal of Energy Research.

H. Liu, E. Chika, J. Zhao, Investigation into the effectiveness of nanofluids on the minichannel thermal management for high power lithium ion battery, *Applied Thermal Engineering* (2018),doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.037