

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN LİTYUM İYON BATARYA
PAKETİNİN TERMAL YÖNETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ziyaettin ATILGAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Bilim Dalı

OCAK 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN LİTYUM İYON BATARYA
PAKETİNİN TERMAL YÖNETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ziyaettin ATILGAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Cemil YİĞİT

OCAK 2024

Ziyaettin ATILGAN tarafından hazırlanan “ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN LİTYUM İYON BATARYA PAKETİNİN TERMAL YÖNETİMİ ” adlı tez çalışması 17.01.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı **Enerji** Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Doç.Dr. Cemil YİĞİT (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç.Dr. Ufuk DURMAZ Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Dr.Öğr.Üyesi Ahmet AYDIN Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN LİTYUM İYON BATARYA PAKETİNİN TERMAL YÖNETİMİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(17/01/2024).

Ziyaettin ATILGAN





Eşime ve çocuklarıma...



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında gösterdiği özen, yönlendirmeleri, değerli yorumları ve çalışmamın daha iyi bir hale getirmemdeki önemli katkılarından dolayı değerli danışmanım Doç.Dr. Cemil YİĞİT'e teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin hazırlanması sürecinde bana her türlü desteği sağlayan Burak EVYAPAN ve Anıl DEMİRKESEN'e teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmasına, eğitime destek ve teşviklerinden dolayı Altınay Teknoloji Grubu yönetimine teşekkür ederim.

Ayrıca bu süreçte her zaman yanımda olan aileme saygı ve sevgilerimi sunarım.

Ziyaettin ATILGAN



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Kapsamı	2
1.2. Tezin Amacı	2
1.3. Literatür Araştırması	2
1.4. Hipotez	7
2. BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ (BTYS)	9
2.1. Hava BTY Sistemi	9
2.2. Sıvı BTY Sistemi	10
2.2.1. Sıvı bazlı doğrudan soğutma	12
2.2.2. Sıvı bazlı dolaylı soğutma	14
2.3. Faz Değişimli Malzeme (FDM) BTY Sistemi	15
2.4. Elektrikli Araç Bataryalarının Termal Güvenliği	17
3. BATARYA PAKETİNİN YAPISI VE HAD ANALİZİ	19
3.1. Batarya Paketinin Yapısı	19
3.1.1. Batarya paketi modül dizilimi ve hücre sıcaklık okuma noktaları	21
3.1.2. Test şartları ve modül test sıcaklık değerleri	22
3.2. HAD Analizi ile Test Verilerinin Doğrulanması	24
3.2.1. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği	24
3.2.2. HAD analizi için model oluşturulması	25
3.2.3. Model ağ yapısı ve bağımsızlığı	26
3.2.4. Sınır şartları ve malzeme özellikleri	29
3.2.4.1. Soğutma sıvısı sınır şartları ve malzeme özellikleri	30
3.2.4.2. Soğutma plakası sınır şartları ve malzeme özellikleri	30
3.2.4.3. Modül sınır şartları ve malzeme özellikleri	31
3.2.5. Akış rejimi ve model seçimi	34
3.2.6. HAD çözüm şeması	35
3.2.7. Test verileri ile HAD analiz sonucunun karşılaştırılması	35
3.2.8. Boru yerleşiminin farklı tasarımları ile yapılan HAD analizleri	37
4. BULGULAR	41
4.1. Boru Dizilimi Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	41
4.1.1. Soğutma sıvısının farklı debi ile HAD analizi	43
4.1.2. Form verilmiş soğutma plakaları ile yapılan çalışmalar	44

4.2. Hücre Sıcaklıklarının İç direnç ve Kapasiteye Etkisi.....	48
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	51
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	59



KISALTMALAR

BD	: Boru Dizilimi
BDU	: Batarya Dağıtım Ünitesi
BTY	: Batarya Termal Yönetimi
BTYS	: Batarya Termal Yönetim Sistemi
C RATE	: Şarj veya deşarj hızının ifadesi
CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
DCIR	: Doğru Akım İç Direnci
FBG	: Fiber bragg ızgarası
FDM	: Faz Değişimli Malzeme
FSP	: Formlu Soğutma Plakası
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HVAC	: Havalandırma klima (HVAC) sistemi
LFP	: Lityum Demir Fosfat
M	: Modül
M1-T1	: Birinci modül birinci sıcaklık
M1-T2	: Birinci modül ikinci sıcaklık
NCA	: Nikel Kobalt Alüminyum
NMC	: Nikel Manganez Kobalt
T1	: Birinci sıcaklık
T2	: İkinci sıcaklık
2P6S	: 2 Paralel 6 Seri



SİMGELER

ρ	: Yoğunluk [kg/m ³]
c_p	: Özgül Isı [J/(kgK)]
ΔT	: Sıcaklık farkı [K, °C]
k	: Isı İletim Katsayısı [W/(mK)]
Q	: Isı miktarı [W]
V	: Hacim [m ³]
$\vec{v}$	: Hız Vektörü [m/s]
t	: Zaman [s]
μ	: Dinamik Viskozite [Pa.s]
P	: Basınç [Pa]
Re	: Reynold sayısı
D_h	: Hidrolik çap [m]
δ_T	: Toplam sınır tabaka ağ yüksekliği [mm]
Δy	: İlk ağ yüksekliği [mm]
ν	: Kinematik Viskozite [m ² /s]
Pr	: Prandtl sayısı
Ra_L	: Rayleigh sayısı
g	: Yer Çekim İvmesi [m/s ²]
β	: Hacim Genleşme Katsayısı
L_c	: Karakteristik uzunluk [m]
A_s	: Isı transferi yüzey alanı [m ²]
p	: Çevre uzunluk [m]
Nu	: Nusselt sayısı
h	: Isı Taşınım Katsayısı [W/(m ² K)]
$\dot{m}$	: Soğutucu Akışkanın Kütlesel Debisi [kg/s]
I	: Akım [A]
V	: Gerilim [V]
R	: Direnç [ohm]
I	: Türbülans Yoğunluğu [%]



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. NMC Hücre.....	20
Tablo 3.2. Batarya Modülü (2P6S).	20
Tablo 3.3. Batarya Paketi (2P96S).	20
Tablo 3.4. 35 °C'de Havanın Özellikleri.	29
Tablo 3.5. Soğutma Sıvısı Özellikleri.	30
Tablo 3.6. Soğutma Plakası Malzeme Özellikleri.	31
Tablo 3.7. Modül Malzeme Özellikleri.	32
Tablo 3.8. Modül Isıl Yükler.....	33



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Lityum İyon Pillerde Sıcaklığın Etkisi (Jaguemont & Van Mierlo, 2020)..	4
Şekil 1.2. Sıcaklık Enerji Yoğunluğu İlişkisi (Jaguemont ve ark, 2016; Omar, N. ve ark, 2011)	4
Şekil 1.3. Sıcaklık İç Direnç İlişkisi (Jaguemont ve ark, 2016; Omar, N. ve ark, 2011)	4
Şekil 1.4. Batarya Optimum Sıcaklık Aralığı (Warner, 2015)	6
Şekil 1.5. Sıcaklık Kapasite Değişimi (Ouyang ve ark, 2016)	7
Şekil 2.1. Hava BTY Sistemi Şematik Gösterimi (Pesaran, 2001).....	10
Şekil 2.2. Sıvı BTY Sistemi Şematik Gösterimi (Pesaran, 2001).....	12
Şekil 2.3. Sıvı Daldırma Soğutma Sistemi. (a) Statik Akış (Roe ve ark, 2022); (b) Zorlanmış Akış (Suresh Patil ve ark, 2021)	13
Şekil 2.4. Modülün Tek Soğutma Plakası İle Görünümü (Smith ve ark, 2014)	14
Şekil 2.5. Farklı Soğutma Plaka Şekilleri (Monika & Datta, 2022)	15
Şekil 2.6. Silindirik Hücre Soğutma Plakası (Pakrouh ve ark, 2021).....	15
Şekil 2.7. FDM Tabanlı Sistemin Sıcaklık Karakteristiği (W. Wu ve ark, 2019)	16
Şekil 2.8. FDM'lere Çeşitli Katkı Maddelerin Eklenmesi (Shirazi ve ark, 2016)	16
Şekil 2.9. FDM Homojen Sıcaklık Dağılımının Sağlanması (W. Wu ve ark, 2016).	17
Şekil 3.1. Batarya Paketi Genel Yapısı	19
Şekil 3.2. Batarya Paketi İç Yapısı	19
Şekil 3.3. Batarya Paketi Modül Dizilimi	21
Şekil 3.4. Hücre Sıcaklık Okuma Noktaları.....	22
Şekil 3.5. Isıtılmış Modül-Hücre Sıcaklık Değerleri	22
Şekil 3.6. Soğutma Sonrası Modül-Hücre Sıcaklık Değerleri	23
Şekil 3.7. Kontrol Hacmi	25
Şekil 3.8. Sadeleştirilmiş CAD Model.....	26
Şekil 3.9. Soğutma Plakası Sıvı Giriş-Çıkış	26
Şekil 3.10. Model Ağ Yapısı.....	27
Şekil 3.11. Sıvı Sınır Tabaka Ağ Yapısı	28
Şekil 3.12. Modül İç Yapısı	31
Şekil 3.13. Batarya Paketi / Soğutma Plakası Sıcaklık Dağılımı.....	36
Şekil 3.14. Test / HAD Analizi Sıcaklık Değerleri.....	36
Şekil 3.15. Soğutma Sıvısı Çıkış Sıcaklığı	37
Şekil 3.16. Boru Dizilimi İki (BD 2)	38
Şekil 3.17. Boru Dizilimi Üç (BD 3)	38
Şekil 3.18. Boru Dizilimi Dört (BD 4)	39
Şekil 4.1. Modül Üst Yüzey Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması - 1.....	41
Şekil 4.2. Modül İç Yüzey Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması - 1	42
Şekil 4.3. Soğutma Plakası Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması - 1	42
Şekil 4.4. Modül-Hücre Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması - 1	43
Şekil 4.5. Farklı Debi ile Modül-Hücre Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması	44
Şekil 4.6. Form Verilmiş Soğutma Plakaları	45

Şekil 4.7. Modül Üst Yüzey Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması – 2	45
Şekil 4.8. Modül İç Yüzey Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması - 2	46
Şekil 4.9. Soğutma Plakası Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması - 2.....	46
Şekil 4.10. Modül-Hücre Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması - 2.....	47
Şekil 4.11. Modül-Hücre Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması - 3.....	47
Şekil 4.12. Hücre Sıcaklığına Göre Direnç Değişimi	48
Şekil 4.13. Hücre Sıcaklığına Göre Kapasite Değişimi	49



ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN LİTYUM İYON BATARYA PAKETİNİN TERMAL YÖNETİMİ

ÖZET

Küresel ısınmanın etkisi ve karbon ayak izinin azaltılması kapsamında yenilebilir enerji kaynakları önem kazanmıştır. Bu kapsamda tüm sektörlerde olduğu gibi binek araçlarda da fosil yakıt kullanan içten yanmalı motorlara sahip araçlar yerini elektrikli araçlara bırakmaktadır. Son yıllarda kullanımı giderek artan elektrikli araçlarda elektronik donanım yardımıyla kontrol edilebilir yüksek enerji yoğunluğuna sahip lityum-iyon bataryalar tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra lityum-iyon bataryalar, ideal çalışma şartlarının altındaki veya üzerindeki sıcaklıklarda çalışması durumunda performans kaybı, ömürlerinin azalması veya patlama riskleri gibi farklı reaksiyonlar gösterebilmektedir. Bundan dolayı bataryaların termal yönetim ihtiyacı bulunmaktadır. Bu amaçla düşük sıcaklıklarda bataryanın ısıtılması, yüksek sıcaklıklarda ise soğutulması gerekmektedir.

Literatürde lityum iyon piller için uygun çalışma sıcaklığının 15 ila 35 °C arasında olması gerekliliği belirtilmişse de, lityum iyon hücrelerin optimum çalışma sıcaklığı yaklaşık 23-25 °C'dir. Bir diğer çalışmada ise pillerin uygun çalışma sıcaklığının yaklaşık 10 ila 35 °C arasında olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, lityum iyon kimyasallarının çoğu yaklaşık -20 °C'den yaklaşık 45 °C'ye kadar çalışmaya devam eder. Bu sıcaklık aralığında normal çalışma sırasında batarya ömründe herhangi bir azalma yaşanması beklenmez. -20 ila -40 °C arasında elektrolitler donmaya başlayabilir ve düşük sıcaklıklar hücre içindeki empedansı artırarak iyon akışına direnç gösterir, kapasite ve performansı azaltır. 60 °C'nin üzerinde birçok lityum iyon hücre kimyasının değişmeye başladığı literatürde kayıt altına alınmıştır. Termal yönetim sistemi ile en soğuk hücreden en sıcak hücreye kadar yaklaşık 2–3 °C'lik sıcaklık farkının koruyabilmesi hedeflenmektedir. Ancak, çok büyük batarya paketleri için 6–8 °C'ye kadar olan farklar da kabul edilebilmektedir.

Yüksek performanslı bir batarya termal yönetim sisteminin (BTYS) geliştirilmesi, bataryanın yüksek verimliliğini ve güvenliğini koruması açısından çok önemlidir. Genel olarak BTYS, soğutma ortamının fiziksel özelliklerine göre faz değiştiren malzemeler (FDM), sıvı ve hava dahil olmak üzere üç kategoriye ayrılabilir. FDM soğutma sistemlerinin ağırlıkları ve hava soğutma sistemlerinin düşük verimlilikleri nedeni ile temaslı soğutma sistemleri ön plana çıkmıştır. Diğer taraftan, literatürde direk temaslı-sıvı daldırma sistemlerin de kullanımındaki güçlükler ifade edilmektedir.

Aşırı ısınma durumunda elektrikli araçların batarya sistemiyle ilgili yangın tehlikesi nedeniyle de bataryanın termal güvenliği son derece önemlidir. Bundan dolayı, bataryanın termal güvenliğinin artırılması için gaz çıkış valflerinin kullanımı, termal bariyer ve sensör kullanımı gibi hususlar literatürde ele alınan konular arasında bulunmaktadır.

Gerçekleştirilen çalışmada, lityum-iyon batarya paketinin termal yönetimi sayısal yöntemler ile yapılacaktır. Bu amaçla Ansys/Fluent programı kullanılarak oluşturulan üç boyutlu model ile bataryaların olması gerektiği sıcaklık aralıklarında tutmak için kullanılan soğutma plakalarının hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri yapılmıştır. Bataryanın soğutma plakası performans testinden alınan hücre sıcaklıkları ile HAD analizin doğrulanması sağlanmıştır. HAD analizinden elde edilen sonuçlar test verileriyle iyi bir uyum göstermektedir. Referans model ile kıyaslandığında, soğutma plakasındaki optimum boru yerleşimiyle batarya hücrelerinin arasındaki maksimum sıcaklık farkı 8 °C'den 3,3 °C'ye düşürülmüş ve homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Aynı zamanda batarya paketinin çalışma sıcaklığı 30-22 °C aralığından, 27-23,7 °C aralığına çekilmiştir.

Sabit hidrolik çap ve boru uzunluğu için batarya paketi üzerindeki boru serimi değiştirilerek elde edilen farklı tasarımlar ile yapılan HAD analizlerinde soğutma performansının boru serimine bağlı olarak değişim gösterdiği tespit edilmiştir. En iyi soğutma performansını veren boru dizilimi tespit edilmiş ve debi değişimiyle soğutma performansının nasıl etkilendiği incelenmiştir. Optimum boru dizilimine sahip soğutma plakasının soğutma performansının, iki katına çıkan sıvı debisiyle %16'lık artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, farklı boru serimlerine sahip tasarımlarla mevcut şartlar altında daha iyi soğutma performansı elde edilebileceği ortaya koyulmuştur. Bunun en önemli nedeni ise soğutma sıvısının daha fazla yüzey alanı ile modüllere temasından kaynaklanmaktadır. Bu sonuçlar, soğutma plakalarının kanal yapısının ısı transferini önemli ölçüde etkilediğini ve tasarımların optimizasyonu ile batarya performans ve ömür anlamında iyileştirmelerin yapılabileceğini göstermektedir.

Yapılan optimizasyon çalışması ile hücre iç direncin %12,6 oranında azalmasına, kapasite kaybında %3,45 oranında iyileşme sağlanması ve elde edilen %11'lik soğutma verimi artışı ile batarya ömrünün ve performansının %10 ila %20 arasında iyileşmesi sağlanmaktadır.

THERMAL MANAGEMENT OF LITHIUM-ION BATTERY PACK FOR ELECTRIC VEHICLES

SUMMARY

Renewable energy sources have gained importance within the scope of the impact of global warming and reducing the carbon footprint. In this context, as in all sectors, passenger vehicles with internal combustion engines that use fossil fuels are being replaced by electric vehicles. In electric vehicles, the use of which has increased in recent years, lithium-ion batteries with high energy density that can be controlled with the help of electronic equipment are preferred. In addition, lithium-ion batteries may show different reactions such as loss of performance, reduced lifespan or explosion risks if they operate at temperatures below or above ideal operating conditions. Therefore, batteries need thermal management. For this purpose, the battery must be heated at low temperatures and cooled at high temperatures.

Although it is stated in the literature that the appropriate operating temperature for lithium-ion batteries should be between 15 and 35 °C, the optimum operating temperature of lithium-ion cells is approximately 23-25 °C. Another study stated that the appropriate operating temperature of batteries is between approximately 10 and 35 °C. However, most lithium-ion chemicals continue to operate down to about -20 °C and down to about 45 °C. No reduction in battery life is expected during normal operation in this temperature range. Between -20 and -40 °C, electrolytes can begin to freeze, and lower temperatures increase the impedance within the cell, resisting ion flow and reducing capacity and performance. It has been recorded in the literature that many lithium ion cell chemistries begin to change above 60 °C. The thermal management system aims to maintain a temperature difference of approximately 2–3 °C from the coldest cell to the hottest cell. However, for very large battery packs, differences of up to 6–8 °C are also acceptable.

At temperatures above approximately 90 °C, the polymer-based separator may begin to melt and disintegrate, and between 90 and 130 °C the separator continues to disintegrate until a series of internal short circuits are experienced between the anode and cathode. At this point thermal runaway will begin to occur in the cell. The exact temperature at which a cell reaches its thermal runaway threshold is different for different chemistries. Some cell chemistries may experience thermal runaway temperatures exceeding 140 °C when the initial temperature is 120 °C.

The development of a high-performance battery thermal management system (BMS) is very important to maintain the high efficiency and safety of the battery. In general, BTMS can be divided into three categories, including phase change materials (PCM), liquid and air, according to the physical properties of the cooling medium. Contact cooling systems have come to the fore due to the weight of FDM cooling systems and the low efficiency of air cooling systems. On the other hand, difficulties in the use of direct contact-liquid immersion systems are expressed in the literature.

The thermal safety of the battery is extremely important due to the fire hazard associated with the battery system of electric vehicles in case of overheating. Therefore, issues such as the use of gas outlet valves, thermal barriers and sensors to increase the thermal safety of the battery are among the topics discussed in the literature. The thermal safety management system should include advanced monitoring and diagnostic technologies that can be used to detect abnormal temperature increases, internal pressure, voltage, and humidity. Some sensors such as fiber Bragg grating (FBG) and built-in flexible thin-film sensors are recommended.

In the event of a fire occurring, the thermal safety management system must be equipped with fire suppression capabilities that can quickly suppress flames and prevent them from spreading. This may involve the use of extinguishing agents such as water or foam, or activating fire extinguishing systems built into the battery system itself.

A thermal barrier must be applied to suppress heat transfer between adjacent cells during thermal runaway. While the thermal barrier can ensure excellent safety performance during abnormal operating conditions, it can also disrupt the original thermal conduction path of the battery thermal management system. In addition, passive/active valves must be used in battery packs to evacuate gases emerging from lithium ion cells in case of thermal runaway.

In the conducted study, thermal management of the lithium-ion battery pack will be done with numerical methods. For this purpose, computational fluid dynamics (CFD) analysis of the cooling plates used to keep the batteries in the required temperature ranges was performed with the three-dimensional model created using the Ansys/Fluent program. CFD analysis was verified with cell temperatures taken from the battery's cooling plate performance test. The results obtained from the CFD analysis show good agreement with the test data. Compared to the reference model, with the optimum pipe placement on the cooling plate, the maximum temperature difference between the battery cells was reduced from 8 °C to 3,3 °C and a homogeneous temperature distribution was achieved. At the same time, the operating temperature of the battery pack has been reduced from 30-22 °C to 27-23,7 °C.

In the CFD analysis performed with different designs obtained by changing the pipe layout on the battery pack for fixed hydraulic diameter and pipe length, it was determined that the cooling performance varied depending on the pipe layout. The pipe arrangement that gives the best cooling performance was determined and how the cooling performance was affected by the flow rate change was examined. It has been determined that the cooling performance of the cooling plate with optimum pipe arrangement increases by 16% with doubling the liquid flow rate.

As a result, it has been revealed that better cooling performance can be achieved under current conditions with designs with different pipe layouts. The most important reason for this is due to the greater surface area of the cooling liquid in contact with the modules. These results show that the channel structure of the cooling plates significantly affects the heat transfer and that improvements can be made in terms of battery performance and life by optimizing the designs.

In the CFD analyzes performed by shaping the cooling plates, it was observed that the cooling performance could be increased by changing the form structures, based on the test data. When the analyzes of shaped cooling plates (FSP) are compared among themselves, it is observed that FSP 4 is more efficient than other shaped structures.

A comparison of cooling plates has been made, and it is seen that the cooling plate shaped in terms of cooling performance performs better in terms of efficiency compared to the others (FSP 4). Here, it was observed that FSP 4 exhibited better cooling performance than BD 4.2, which was optimized and whose flow rate was doubled. In this sense, more homogeneous and efficient cooling plates can be obtained by optimizing the shapes of the formed cooling plates.

The internal resistance of lithium ion cells is directly proportional to temperature. As the temperature increases, the internal resistance of the cells also increases. In the study, the internal resistance of the cell operating at 27 °C increased by 20,6% after 8 years, while the internal resistance of the cell operating at 30 °C increased by 33%.

The capacity of lithium-ion cells is inversely proportional to temperature. As the temperature increases, the capacity of the cells decreases. In the study, the cell operating at 27 °C experienced a 12,2% loss in capacity after 8 years, while the cell operating at 30 °C experienced a 15,65% loss.

The optimization study is an important step in terms of its impact on energy resources and sustainability, as it reduces cell internal resistance by 12,6% and provides an improvement in capacity loss by 3,45%. This study reveals the direct effect of temperature on battery life, contributing to more efficient use of natural resources and increasing the sustainability of battery performance. The 11% efficiency increase achieved by the design and application of cooling plates makes a significant contribution to improving battery life and performance by 10 to 20%.



1. GİRİŞ

Elektrikli araçlar, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir rol oynamaktadır (Duan ve ark, 2020; Shura, 2019). Bu tür araçlarda kullanılan batarya paketleri, araçların performansını ve menzilini belirleyen kritik bileşenlerdir. Lityum iyon bataryalar, elektrikli araçlarda yaygın olarak tercih edilen güç kaynaklarıdır. Ancak lityum iyon bataryaların kullanımı özellikle termal yönetim açısından bazı zorlukları beraberinde getirir.

Elektrikli araçlarda lityum iyon batarya paketlerinin termal yönetimi, bataryaların güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için kritik bir öneme sahiptir. Yüksek enerji yoğunluğu ve hızlı şarj/deşarj yetenekleri nedeniyle lityum iyon bataryalar, aşırı ısınma, sıcak noktalar oluşumu ve hatta yangın gibi potansiyel risklere maruz kalabilirler. Bu nedenle, bataryanın sıcaklık kontrolü için termal yönetim stratejileri ve sistemleri gereklidir (J. Li & Zhu, 2014).

Bu tez, elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon batarya paketlerinin termal yönetimi konusunu ele almayı amaçlamaktadır. Tez, lityum iyon bataryaların termal davranışını ve termal yönetim stratejilerinin önemini inceleyecek, mevcut termal yönetim sistemlerini değerlendirecek ve daha verimli termal yönetim stratejileri geliştirmeyi hedefleyecektir.

Ayrıca bu çalışma, elektrikli araçlarda kullanılan batarya paketlerinin güvenliğini artırmak, bataryaların ömrünü artırmak ve performansını optimize etmek için geliştirilecek soğutma plakası optimizasyonu da termal yönetim stratejilerine genel bir bakış sunacak.

Sonuç olarak, "Elektrikli Araçlar İçin Lityum İyon Batarya Paketinin Termal Yönetimi" başlıklı bu tez, lityum iyon batarya teknolojisindeki mevcut zorlukları ele alacak ve daha güvenli, verimli ve sürdürülebilir elektrikli araçlar için termal yönetim stratejilerinin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

1.1. Tezin Kapsamı

Gerçekleştirilecek tez çalışması kapsamında elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon kimyasına sahip hücrelerden oluşan bataryanın uygun konfigürasyonda lityum iyon bataryasının seçimi, batarya paket tasarımının gerçekleştirilmesi, deneysel verilerin elde edilmesi, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizlerinin gerçekleştirilmesi ve optimizasyon süreci gerçekleştirilecektir.

Batarya paketinin termal modelinin geliştirilmesi, farklı soğutma yöntemlerinin ve tasarımlarının batarya paketinin performansına etkilerinin daha ayrıntılı olarak incelenmesi, batarya paketinin termal performansının iyileştirilmesi için yeni soğutma yöntemlerinin geliştirilmesi, lityum iyon pil hücrelerinin termal davranışını etkileyen faktörlerin incelenmesi, batarya ömrüne ve performansına etkilerinin incelenmesi sağlanacaktır.

1.2. Tezin Amacı

Yapılacak çalışmada, elektrikli araçlar için optimum sıcaklık dağılımını veren bir termal sistemin tasarlanması hedeflenmektedir. Elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon pil paketlerinin termal performansını ve ömrünü iyileştirmek için HAD analizleri kullanılacaktır.

Tez kapsamında, lityum iyon bataryalar ve elektrikli araçlar hakkında literatür taraması yapılacak, batarya termal yönetimi ve soğutma plakası tasarım ilkeleri incelenecektir. Ardından, Ansys Fluent yazılımı vasıtasıyla bataryanın soğutma plakası üzerinde termal analizler gerçekleştirilecektir. Analiz sonuçları değerlendirilerek bataryanın termal performansının artırılmasına yönelik iyileştirmeler önerilecektir.

Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilecek çalışma ile elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon batarya paketlerinin termal yönetimi konusunda literatüre önemli bir katkı sunulması hedeflenmektedir.

1.3. Literatür Araştırması

İklim değişikliği, karbon ayak izinin azaltılması ve çevre kirliliğinin endişeleri doğal kaynakların kullanımı açısından motivasyon sağlamış ve elektrikli araç teknolojisinin gelişimini teşvik etmiştir. Birçok ülke fosil yakıt kullanan içten yanmalı motorlara

sahip araçların kullanımı önümüzdeki yıllar içerisinde yasaklamayı hedeflemektedir. Günümüzde elektrikli araçlar, konvansiyonel araçlar ile rekabet edebilecek konuma gelmiştir (Avcı ve ark, 2020; Citi, 2021; Helm ve ark, 2015; International Energy Agency, 2023; Schott ve ark, 2015).

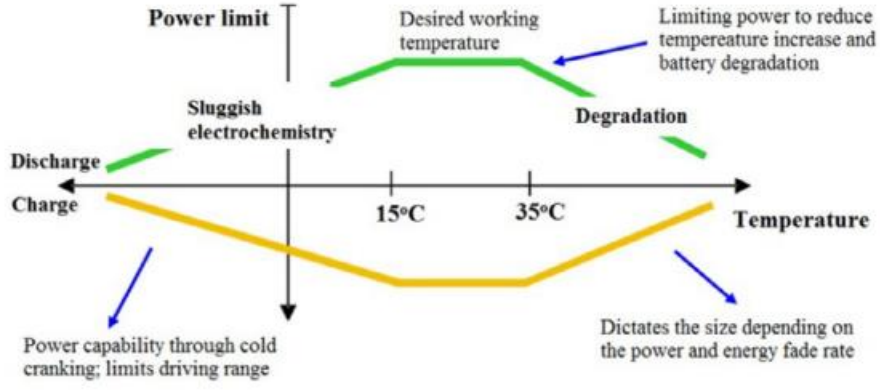
Elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon piller, mevcut teknoloji, yeryüzündeki doğal kaynakların miktarı, maliyet, depolanabilir, tekrar şarj edilebilir, elektronik ile sıcaklık ve gerilimin kontrol edilebilirliği gibi etmenlerden dolayı tercih edilmektedir (Duan ve ark, 2020; Polat, D. Keles, 2012).

Lityum iyon piller, güvenlik ve düşük performans endişeleri nedeniyle iyi bir termal yönetime sahip olmalıdır (Jaguemont & Van Mierlo, 2020). Paket içerisindeki sıcaklık dağılımının her noktada eşit olması istenmektedir. Aksi takdirde, sıcaklık gradyanı hücreler arasında farklı düzeylerde yıpranmaya ve dolayısıyla her bir hücre için farklı şarj-deşarj davranışına neden olabilir. Termal sistemin amacı, bataryayı optimum sıcaklık aralığında tutarak performans ve yıpranma arasında en iyi dengeyi sağlamaktır (Rothgang ve ark, 2015; W. Wu ve ark, 2019; X. Zhang ve ark, 2022).

Lityum iyon piller karmaşık elektrokimyasal yapıları nedeni ile özellikle yüksek hızlı şarj/deşarj çalışma süreci sırasında çok fazla ısı üretmektedir (W. He ve ark, 2021; Hu ve ark, 2021).

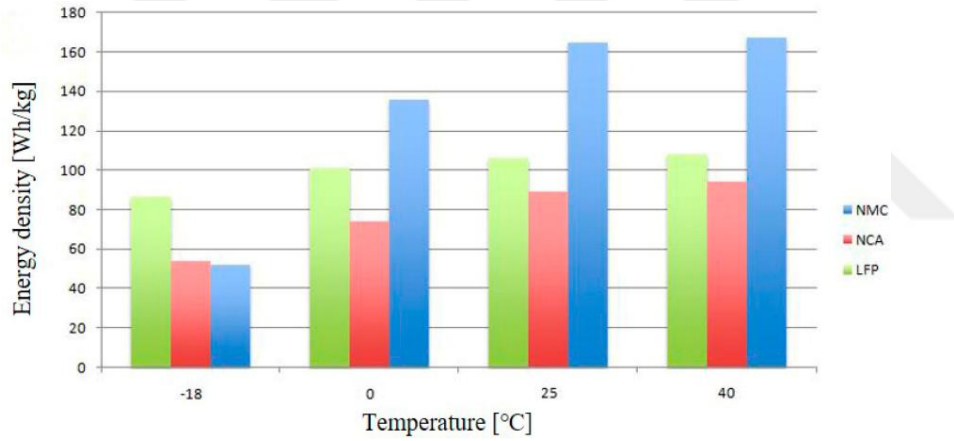
Yapılan bir diğer çalışmada, 25 °C ortam sıcaklığında bir NMC pilinin sıcaklığı, herhangi bir işlem yapılmadan 3C'likdeşarj hızında 75 °C'yi aştığı görülmüştür (Q. Zhang ve ark, 2023).

Şekil 1.1'de lityum iyon pillerin farklı voltaj ve sıcaklıklardaki davranışlarını göstermektedir. Lityum iyon piller için uygun çalışma sıcaklığının 15 ila 35 °C arasında olması gerekliliği belirtilmiştir (Q. Zhang ve ark, 2023). Sıcaklık artışıyla birlikte piller, hem elektrolit hem de elektrot malzemelerindeki hızlı iyon geçişi ve hızlı elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle gelişmiş güç çıktıları ve daha yüksek kapasite sergiler. Bununla birlikte, yan reaksiyonlar daha şiddetli hale gelir, bu da kapasitenin hızla azalmasına ve daha yüksek sıcaklıkların oluşmasına neden olur (Olabi ve ark, 2022). Isı, zamanla dağılmaz ise sıcaklık artışı gerçekleşecektir. Katı elektrolit arayüzünün yanı sıra elektrot malzemelerinin ayrışması ve sürekli yoğunlaşan yan reaksiyonlar yangın tehlikelerine yol açabilir (H. Li ve ark, 2019; Tang ve ark, 2021).

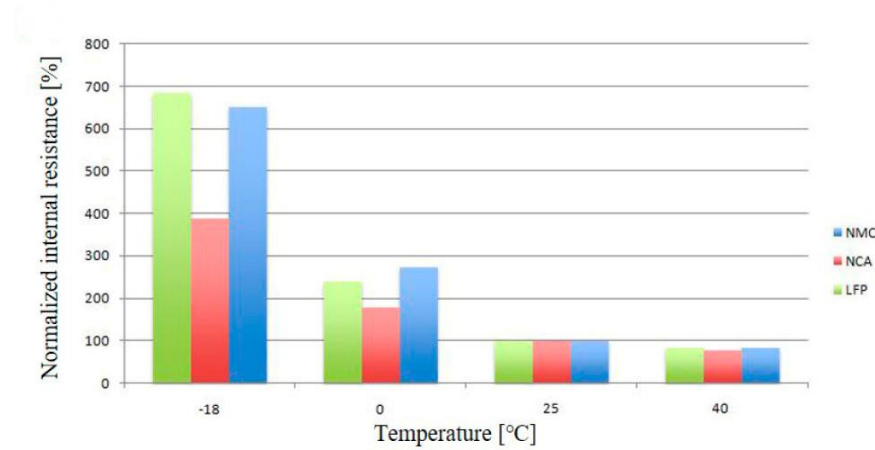


Şekil 1.1. Lityum İyon Pillerde Sıcaklığın Etkisi (Jaguemont & Van Mierlo, 2020)

Şekil 1.2 ve 1.3'te görüldüğü gibi düşük sıcaklıklar, anot üzerinde lityum kaplamaya neden olacak, elektrolitlerin viskozitesini artıracak ve Li iyonik iletkenliği azaltıp bu da mevcut enerji kaybına, iç empedansı artışına ve lityum iyon pilin zayıf hız kapasitesiyle sonuçlanacaktır (Jaguemont ve ark, 2016; Omar, N. ve ark, 2011).



Şekil 1.2. Sıcaklık Enerji Yoğunluğu İlişkisi (Jaguemont ve ark, 2016; Omar, N. ve ark, 2011)



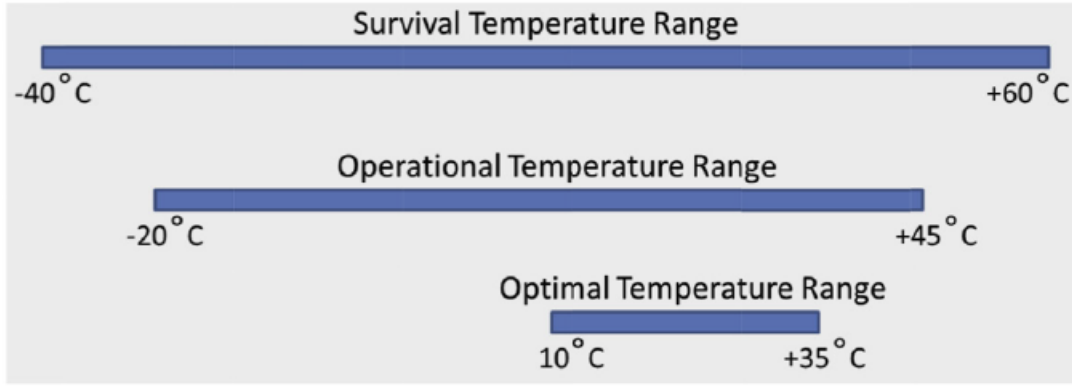
Şekil 1.3. Sıcaklık İç Direnç İlişkisi (Jaguemont ve ark, 2016; Omar, N. ve ark, 2011)

Lityum kaplamanın elektrolit ile reaksiyona girebileceği, bunun da döngü sırasında kapasitenin azalmasına ve gaz salınımına neden olacağı bildirilmektedir (Ren ve ark, 2019; Tang ve ark, 2021). Daha ciddi olarak, lityum dendritlerin sürekli büyümesi ayırıcıya daha fazla nüfuz edebilir ve pillerin dahili kısa devresine yol açabilir (Tan ve ark, 2020).

Hücreler arasındaki sıcaklık farkının artması, hücre içindeki kimyasal reaksiyonların hızını artırabilir. Bu, hücrenin daha hızlı yıpranmasına neden olur. Ayrıca, hücreler arasındaki sıcaklık farkının artması, hücre içindeki kimyasal reaksiyonların eşitliğini bozabilir ve bazı hücrelerin diğerlerinden daha hızlı yıpranmasına neden olabilir (Ma ve ark, 2018).

Lityum iyon batarya paketi, iyi bir termal yönetime sahip olmalı ve homojen bir sıcaklık dağılımı için iyi bir soğutma veya ısıtma sistemine sahip olmalıdır. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir bataryanın, ısınan hücre sıcaklıklarını batarya dışına atmak için kullanılacak soğutma plakasının verimi de bir o kadar yüksek olmalıdır (Tang ve ark, 2021). Termal yönetim sistemi, en soğuk hücreden en sıcak hücreye kadar yaklaşık 2–3 °C'lik sıcaklık farkını koruyabilmelidir. En kötü durumda, genellikle daha büyük paketler için bu fark 6–8 °C kadar olabilir. Bunun önemli olmasının nedeni, hücreler arasındaki büyük sıcaklık farkının hücrelerin farklı hızlarda yaşlanmasına neden olmasıdır. Yani daha sıcak hücreler, daha soğuk hücrelere göre daha hızlı yaşlanacak ve eğer büyük bir eğim varsa bu batarya ömrünün zamanından önce kısılacağı anlamına gelir (Warner, 2015).

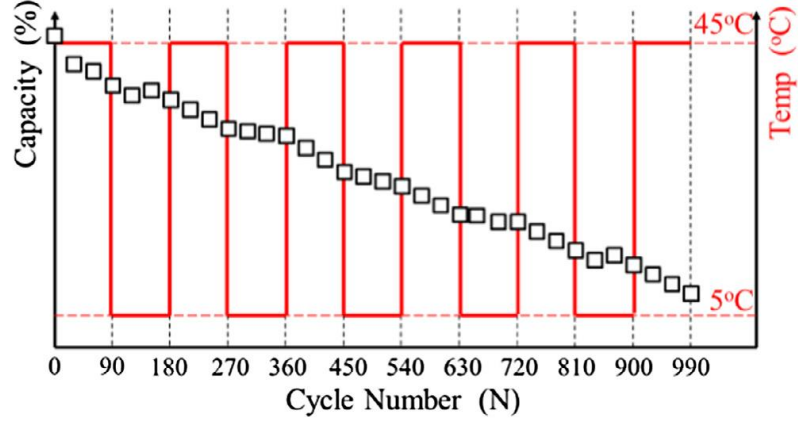
Diğer bir çalışmada ise lityum iyon hücrelerin optimum çalışma sıcaklığı yaklaşık 23–25 °C olduğu ve lityum iyon kimyaları yaklaşık 10 ila 35 °C arasında en iyi şekilde çalışma eğiliminde ve buna optimum sıcaklık aralığı denilmiştir. Bununla birlikte, lityum iyon kimyalarının çoğu yaklaşık -20 °C ila 45 °C'ye kadar çalışmaya devam eder ve buna operasyonel aralık denilmiştir. Bu sıcaklık aralığında normal çalışma sırasında batarya ömründe herhangi bir azalma yaşanması beklenmez. -20 ila -40 °C arasında elektrolitler donmaya başlayabilir ve soğuk sıcaklıklar hücre içindeki empedansı artırarak iyon akışına direnç gösterir ve kapasite ve performansı azaltır (Şekil 1.4). 60 °C'nin üzerinde birçok lityum iyon hücre kimyası değişmeye başlar. Daha istikrarsız bu durum hayatta kalma sıcaklık aralığı olarak bilinir (Aris & Shabani, 2017; Huber & Kuhn, 2015; Warner, 2015).



Şekil 1.4. Batarya Optimum Sıcaklık Aralığı (Warner, 2015)

Yaklaşık 90°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, polimer bazlı ayırıcı erimeye ve parçalanmaya başlayabilir ve 90 ila 130°C arasında anot ile katot arasında bir dizi dahili kısa devre yaşanana kadar ayırıcı parçalanmaya devam eder. Bu noktada hücrede termal kaçak oluşmaya başlayacaktır. Gerçekte termal kaçak, hücrenin kendi kendini idame ettiren ısı üretimi yaratacak kadar ısınması ve hücrelerin hava alması ve/veya patlaması (genellikle "hızlı parçalanma" olarak anılır) şeklinde arızanın yakın olduğu anlamına gelir. Bir hücrenin termal kaçak eşiğine ulaştığı kesin sıcaklık, farklı kimyalar için değişken olabilmektedir. Bazı hücre kimyaları için termal kaçak başlangıç sıcaklığı 120 °C iken, 140 °C'yi aşan lityum iyon kimyaları da olabilmektedir (Warner, 2015).

Lityum iyon bataryalarda, değişken yük altında dinamik kapasite düşüşünü açıklayan bir model ile çalışma gerçekleştirilmiş ve model ile lityum iyon bataryalarda kapasite düşüşünün temel mekanizmalarını dikkate alınmış ve bu mekanizmaların değişken yük koşullarında nasıl etkileşime girdiğini analiz edilmiştir. Lityum iyon bataryalarının kapasite düşüşünü tahmin etmek, dolayısı ile kullanım ömrünü optimize etmek ve güvenliklerini sağlamak için bu çalışmanın kullanılabileceği belirtilmiştir (Han ve ark, 2014; Ouyang ve ark, 2016). Şekil 1.5'de 45 °C ile 5 °C sıcaklık aralığında kapasite değişimi gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Sıcaklık Kapasite Değişimi (Ouyang ve ark, 2016)

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalarda lityum iyon kimyasına sahip bataryaların soğutma sisteminin performansı incelenmiş ve optimizasyon çalışması yapılmıştır. Burada incelenen soğutma sıvısının yüksek ısı iletkenlik, düşük viskozite, yüksek sıcaklıkta kaynamaması gibi özelliklere sahip olmasının gerekliliğine vurgu yapılmış ve soğutma plakasının uygun kanallara sahip olması ile iyi bir soğutma sisteminin sağlanabileceği belirtilmiştir (L. He ve ark, 2023; Patil ve ark, 2023).

1.4. Hipotez

Tez çalışmasının temel amacına ve araştırmanın beklenen sonuçlarına bağlı olarak test verilerinin elde edilmesi ve analizlerin doğrulanmaya çalışılacaktır. Ansys Fluent yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analizler, lityum iyon batarya paketinin termal yönetiminde etkili bir soğutma plakası tasarımının geliştirilmesine yardımcı olacaktır. Bu hipotez, Ansys Fluent yazılımının analitik yeteneklerinin kullanılarak yapılan simülasyonların, batarya paketinin içindeki sıcaklık dağılımını analiz edip uygun bir soğutma plakası tasarlamaya olanak sağlayacağını öne sürmekte ve tezin amacı ve yöntemini desteklemektedir.



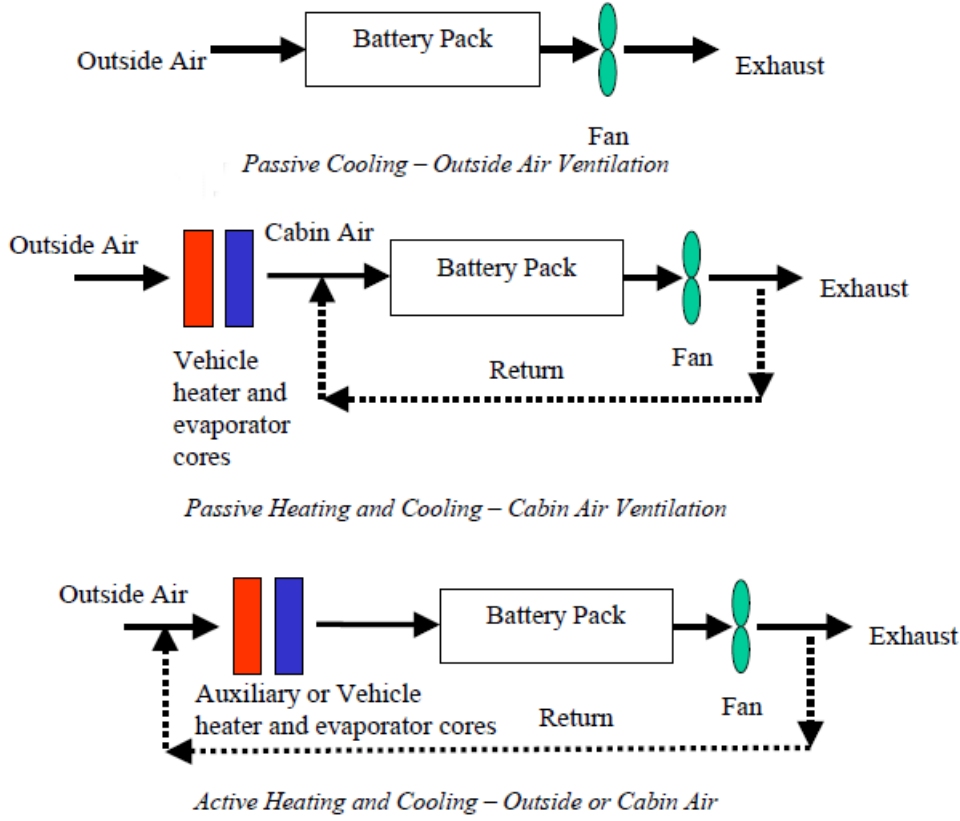
2. BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ (BTYS)

Elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon piller, şarj ve deşarj sırasında ısı üretirler. Bu ısı, bataryanın ömrünü ve performansını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, elektrikli araçlarda batarya termal yönetim sistemleri kullanılır. BTYS, batarya sıcaklığını kontrol ederek bataryanın ömrünü ve performansını korumaya yardımcı olur. BTYS temel amacı, batarya sıcaklığını belirli bir aralıkta tutmaktır. Bu aralığın üst sınırı, bataryanın aşırı ısınmasını önlemek için önemlidir. Alt sınırı ise, bataryanın donmasını önlemek için önemlidir.

BTYS, elektrikli araçların performansını ve güvenliğini iyileştirmeye yardımcı olur. Bu sistemler, batarya ömrünü uzatarak, bataryanın daha uzun süre kullanılmasını sağlar. Ayrıca, batarya sıcaklığını kontrol ederek, bataryanın aşırı ısınmasını ve patlamasını önlemeye yardımcı olur. Bu yöntemler arasında hava soğutma, sıvı soğutma ve faz değişim malzemesi (FDM) soğutma bulunur.

2.1. Hava BTY Sistemi

Basit yapıları, hafiflik ve bakım kolaylığı gibi avantajlara sahip hava soğutma, elektrikli araçların BTYS'i için uygun maliyetli ve güvenilir bir şema olarak kabul edilir (X. Zhang ve ark, 2022). Hava soğutmanın doğal konveksiyon ve zorlanmış konveksiyon olarak sınıflandırılabilceği öne sürülmüştür (Jaguemont & Van Mierlo, 2020). Doğal konveksiyon, havanın batarya paketini kendiliğinden doğal akışı ile gerçekleşen ısı transferi sonucu pillerin soğutulmasıdır. BTYS'i için havanın doğal taşınımının geçersiz ve yetersiz olduğu bildirilmektedir (Rao & Wang, 2011). Hava pompalarının kullanılması ve evaporatör ile işbirliği, zorlanmış konveksiyonun doğal konveksiyona göre daha iyi ısı değişim verimliliği sağladığını göstermiştir. BTYS'deki daha iyi performans sayesinde zorlanmış konveksiyon otomobil alanında uygulanmıştır (Rao & Wang, 2011). Zorlanmış taşınımın da kullanıma bağlı olarak pasif hava taşınım ve aktif hava taşınım olarak ikiye ayırmak mümkündür (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Hava BTY Sistemi Şematik Gösterimi (Pesaran, 2001)

Genel olarak pasif sistem, havayı atmosferden veya kabinden üfler. Ancak pasif sistemin performansı ortam sıcaklığına bağlıdır (Henke & Hailu, 2020). Buna karşılık aktif sistem, ön şartlandırılmış havayı ısıtma, havalandırma klima (HVAC) sisteminin ısıtıcısından veya buharlaştırıcısından alır. Genel olarak, bir ısıtıcı veya HVAC tarafından ön işleme tabi tutulan hava, soğuk sıcaklık (donma sıcaklığının altında) ve yüksek sıcaklık (45 °C'yi aşan) gibi aşırı koşullarda daha iyi bir termal kontrol kapasitesi gösterir.

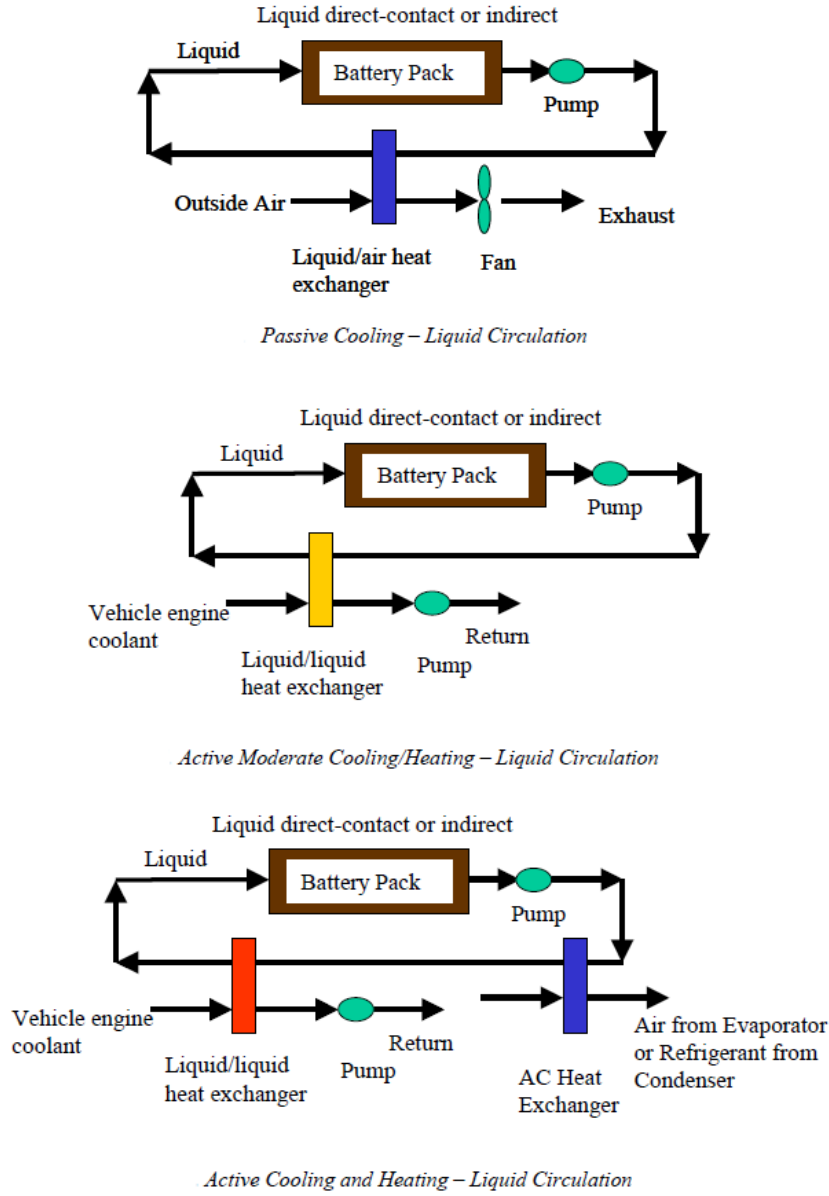
Elektrikli araçlarda kullanılan yüksek enerji yoğunluğuna sahip bataryalar için pasif ve aktif hava soğutmanın ısıyı verimli bir şekilde dağıtamayacağı belirtilmiştir (Y. Chen & Evans, 1993). Paresan ve arkadaşları ise hava akışının optimize edilmiş hali ile giriş çıkışları dikkate alınarak yeterli bir soğutmanın gerçekleştirilebileceğini belirtilmiştir (Pesaran ve ark, 1999).

2.2. Sıvı BTY Sistemi

Hava ortamıyla karşılaştırıldığında, daha yüksek termal iletkenliğe ve daha yüksek ısı kapasitesine sahip sıvı ortam, batarya modüllerinin sıcaklık dağılımında daha iyi

davranış gösterdiği ve yüksek C hızlarında şarj/deşarj olan büyük ölçekli hücrelerin soğutma gereksinimlerini karşılayabilir (S. Chen ve ark, 2022). Ancak sıvı soğutma sisteminin karmaşıklığı üretim maliyetini artırmaktadır.

Şekil 2.2'de gösterildiği gibi sıvı soğutma sistemi, sistemin kontrol stratejilerine göre aktif soğutma ve pasif soğutma olarak ikiye ayrılabilir. Geleneksel pasif soğutma sisteminde, sıvıların yüksek hassasiyetli gizli ısısından yararlanılarak, bataryadan gelen ısı soğutucuya aktarılır, sonra dış hava ile değiştirilir ve daha sonra hava egzoz fanı tarafından dışarı atılır. Pasif soğutmanın önemli noktalarından biri, batarya takımının aşırı soğumasını/aşırı ısınmasını önlemek için gelen havanın sıcaklığının 10–35 °C arasında olması gerektiğidir. Aktif soğutma sistemi, soğutucu tarafından emilen ısıyı değiştirmek için sıvı ısı eşanjörünü kullanır. Aktif soğutma için gerekli olan aktif bileşenler arasında evaporatör, pompa, ısıtma peteği, soğutucu yer alır ve bazen elektrikli ısıtıcı ve yakıt ısıtıcısına ihtiyaç duyulur. Pasif soğutma sisteminin yapısının daha basit olduğu ve imalat maliyetinin daha düşük olduğu açıktır. Ancak havanın düşük ısı iletkenliği nedeniyle geleneksel pasif soğutma sisteminin soğutma verimliliği zayıftır ve batarya sıcaklığı iyi kontrol edilememektedir. Geleneksel pasif soğutma sistemi yalnızca elektrikli araçlarda düşük enerji yoğunluğuna sahip kimyalarda kullanılmıştır.



Şekil 2.2. Sıvı BTY Sistemi Şematik Gösterimi (Pesaran, 2001)

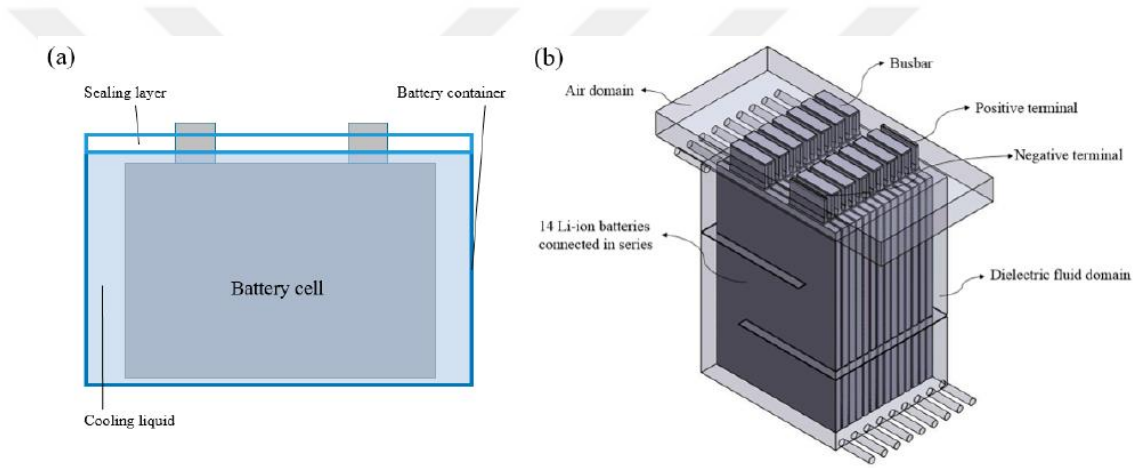
Genel olarak sıvı soğutma stratejileri doğrudan ve dolaylı soğutma olarak ikiye ayrılabilir.

2.2.1. Sıvı bazlı doğrudan soğutma

Genel olarak doğrudan soğutmaya, transformatörlerde başarıyla uygulanan sıvı daldırmalı soğutma da denir (Pesaran, 2001; Suresh Patil ve ark, 2021). Günümüzde daldırmalı soğutma, elektronik cihazlar ve elektrikli araçlar için büyük ilgi görmektedir.

Şekil 2.3'de gösterildiği gibi, batarya modülü kısmen veya tamamen, hücre tarafından üretilen ısıyı doğrudan emebilen ve batarya modülünün sıcaklık homojenliğinin

arttırılmasına yardımcı olan soğutma ortamına daldırılmıştır (Roe ve ark, 2022). Ayrıca doğrudan soğutma, sistem tasarımını basitleştirebilir ve sistem karmaşıklığını azaltabilir. Yüksek ısı transfer verimliliğine ulaşmak amacıyla, doğrudan soğutmaya yönelik soğutma ortamı, yüksek termal iletkenlik, düşük viskozite ve yüksek ısı kapasitesi gibi mükemmel kimyasal-fiziksel özelliklere sahip olmalıdır (Deng ve ark, 2018). Daldırılmış pilin harici kısa devre riski olduğundan, potansiyel soğutma ortamı elektriksel olarak yalıtkan olmalıdır. Ayrıca çevre ve güvenlik gereklilikleri açısından toksik olmaması, kimyasal stabilitesi ve yanmazlığı da dikkate alınmalıdır. Her ne kadar su/etilen glikol bazlı soğutucular dolaylı soğutma sistemlerinde yaygın olarak uygulansa da, suyun iletken özellikleri daldırılmalı soğutma sistemlerinde uygulanmasını kısıtlamaktadır (Jiang ve ark, 2022).



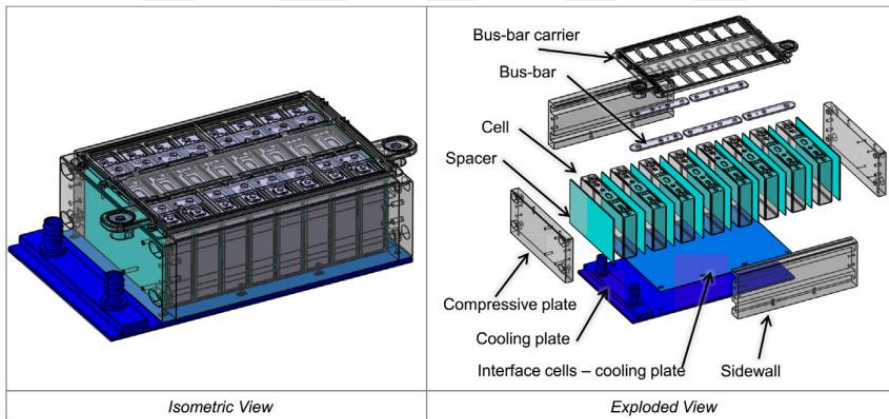
Şekil 2.3. Sıvı Daldırma Soğutma Sistemi. (a) Statik Akış (Roe ve ark, 2022); (b) Zorlanmış Akış (Suresh Patil ve ark, 2021)

Daldırma soğutma sistemleri için yaygın olarak hidrofloroeterler, hidrokarbonlar, esterler, silikon yağları ve su-glikol karışımları soğutma sıvıları kullanılmaktadır. Önemli değerler arasında viskozite, yoğunluk, termal iletkenlik, dielektrik sabiti, spesifik ısı kapasitesi, kaynama noktası, parlama noktası ve maliyet yer alır. Bunlardan hidrofloroeterler, BTYS'lerde uygulama alanı bulan 3M Novec serisi sıvılarla önemli bir umut vaat ediyor. Hidrokarbon bazlı akışkanlar da ümit verici olmuştur ancak BTYS çalışma akışkanı olarak performansı üzerine nispeten az araştırma yapılmıştır. Su-glikol gibi dielektrik olmayan akışkanlar, zayıf elektriksel yalıtım özellikleri gibi dezavantajlara sahipken, yazarlar bunu azaltmak için hücreler üzerinde çeşitli kaplama yöntemleri araştırmışlardır ve bu nedenle bunlar gelecekteki BTYS'ler için dikkate alınmaya devam etmektedir (Roe ve ark, 2022).

2.2.2. Sıvı bazlı dolaylı soğutma

Sıvı daldırmalı soğutma sistemleri ile karşılaştırıldığında, sıvı bazlı dolaylı soğutma sisteminin uygulanması daha kolaydır. Daha düşük viskoziteye sahip sıvı bazlı dolaylı soğutma sistemlerinde ortak soğutucu olarak su ve etilen glikol karışımlarının kullanılması, aynı pompalama gücüyle daha yüksek akış hızlarına yol açar. Bu nedenle sıvının ayrı borulardan veya soğutulmuş plakalardan geçirilmesi yoluyla dolaylı temas modu yaygın olarak kullanılmaktadır (Yin ve ark, 2022). Nispeten düşük maliyetinin de eklenmesiyle sıvı bazlı dolaylı soğutma elektrikli araçlar için en yaygın kullanılan BTYS olarak kabul edilmektedir.

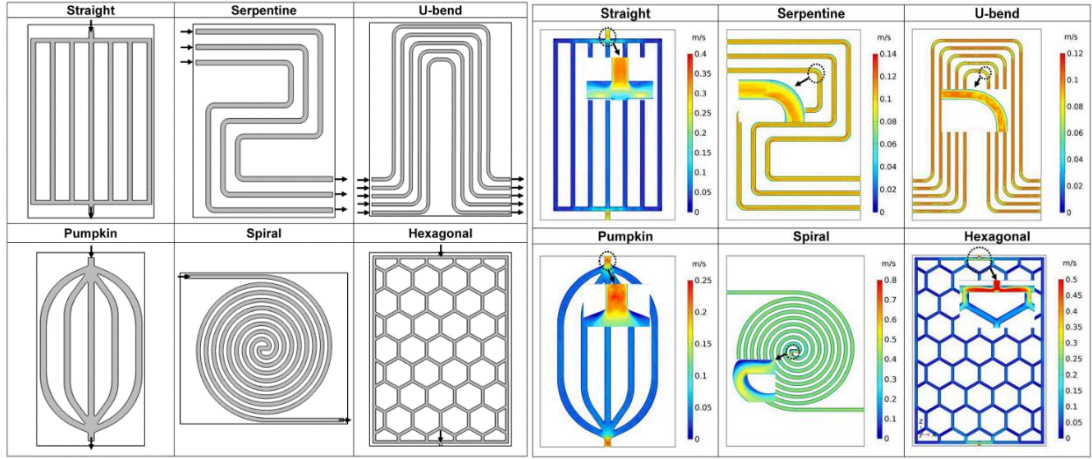
Soğutma plakası, sıvı soğutma ortamının pompalandığı iç kanalları olan düz bir metal plaka veya borulardan oluşmuş bir yapıda olabilmektedir (C. Wu ve ark, 2023; W. Wu ve ark, 2019). Soğutma plakaları farklı şekillerde ve yapılarda kullanılabilmektedir. Şekil 2.4’de tek modülün bir soğutma plakası ile soğutulması görülmektedir.



Şekil 2.4. Modülün Tek Soğutma Plakası İle Görünümü (Smith ve ark, 2014)

Yüksek enerji yoğunluğuna ve çok hızlı şarj-deşarj olabilen bataryalar içinde ısı alışverişinin verimliliğini en üst seviyeye çıkarmak için hücreler arasında da soğutma plakası yerleştirilebilmektedir (Wang ve ark, 2021).

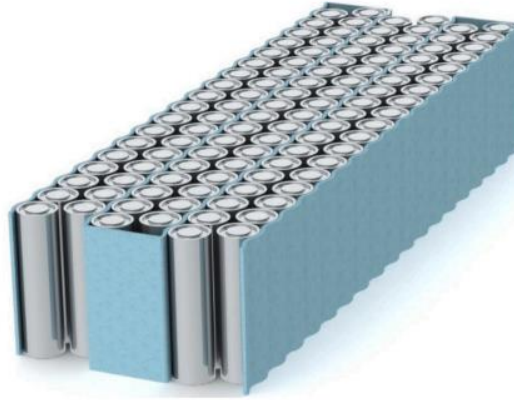
Soğutma plakası teknolojisini kullanan BTYS'nin performansını arttırmak için kanalların düzenlenmesi ve sıvı akışının optimize edilmesi gerekmektedir. Genel olarak kanal konfigürasyonu Şekil 2.5'te gösterildiği gibi düz tasarıma, serpantin, U-büküm, kabak, spiral ve altıgen gibi profillerde yapılabilir.



Şekil 2.5. Farklı Soğutma Plaka Şekilleri (Monika & Datta, 2022)

Yüksek hızlı deşarj işlemi sırasında kanal sayısının ve giriş kütleli debisinin artması batarya modülünün maksimum sıcaklığının düşmesine neden olabilir (Huo ve ark, 2015). Ayrıca yapılan çalışmalarda, kanal genişliğini 3 mm'den 6 mm'ye çıkarmak, ısı alış verişinde etkili olduğu görülmüştür (Qian ve ark, 2016).

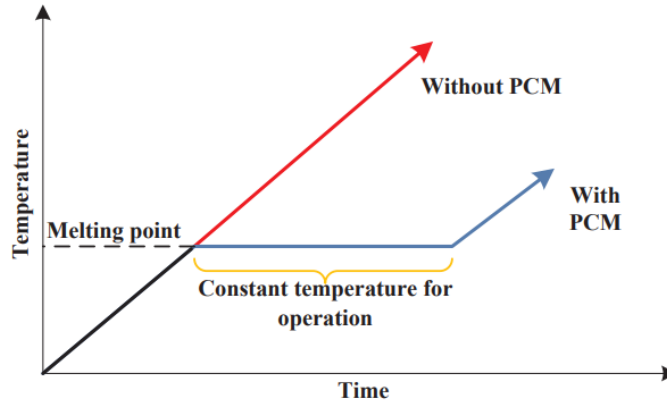
Şekil 2.6'da silindirik geometriye sahip bataryaların soğutma plakasının yapısı görülmektedir. Genel olarak ısı iletim katsayısı yüksek mini kanallı alüminyum plakalardan yapılmaktadır.



Şekil 2.6. Silindirik Hücre Soğutma Plakası (Pakrouh ve ark, 2021)

2.3. Faz Değişimli Malzeme (FDM) BTY Sistemi

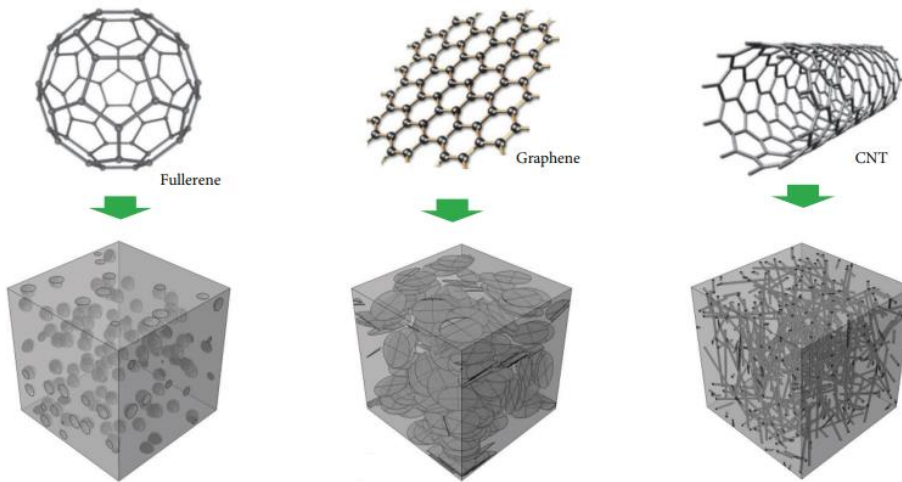
FDM, faz değişim sürecine göre ısıyı depolayan veya yayan bir malzemedir. Termal yönetim uygulamaları için yenilikçi bir çözüm olan FDM, uzun bir süre boyunca faz değişim sıcaklığı civarında sabit bir sıcaklığı korurken, erime süreci sırasında önemli miktarda gizli ısıyı emebilir (Şekil 2.7) (Zhao ve ark, 2022).



Şekil 2.7. FDM Tabanlı Sistemin Sıcaklık Karakteristiği (W. Wu ve ark, 2019)

Lityum iyon bataryaların çalışma sıcaklığını karşılamak için, erime sıcaklıkları 20 ila 60 °C arasında olan FDM'ler yaygın olarak kullanılır. FDM'ler, yüksek hızlı deşarj altında büyük ölçekli piller için sıcaklık homojenliğini sağlayabilse de, düşük termal iletkenlik, yüksek hacim değişimi, yanıcılık, zayıf yapısal dayanıklılık ve erimiş FDM'lerden sızıntı riski gibi bazı zorluklar vardır (Liu ve ark, 2020).

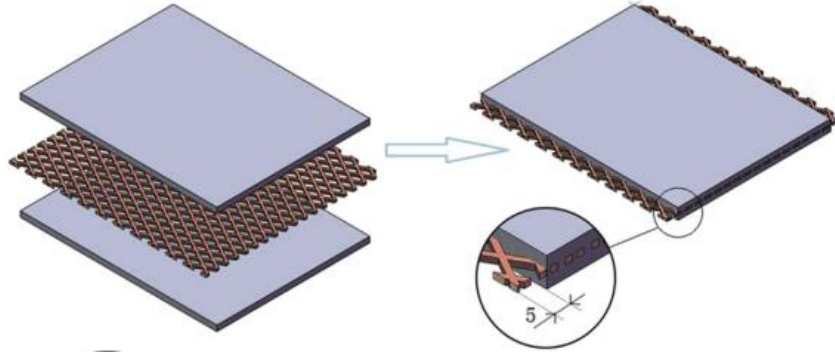
Farklı özelliklere sahip katkı maddesinin eklenmesi, termal iletkenliği artırabileceği ve şekil koruma yeteneğini sağlayabileceği belirtilmiştir (Şekil 2.8) (Liu ve ark, 2020; Shirazi ve ark, 2016).



Şekil 2.8. FDM'lere Çeşitli Katkı Maddelerin Eklenmesi (Shirazi ve ark, 2016)

Termal iletkenliğini geliştirmek için, metalik parçacıklar, metal köpük, karbon fiber, grafen ve karbon nanotüpleri dahil olmak üzere çeşitli malzemeler tanıtılmış ve incelenmiştir (Shirazi ve ark, 2016).

Batarya modül yanlarına takılan grafit levhalar, termal homojenliği geliştirmek için ikincil termal iletkenlik ağı görevi görür (Şekil 2.9) (W. Wu ve ark, 2016).



Şekil 2.9. FDM Homojen Sıcaklık Dağılımının Sağlanması (W. Wu ve ark, 2016)

2.4. Elektrikli Araç Bataryalarının Termal Güvenliği

Elektrikli araçların batarya sistemiyle ilgili yangın tehlikeleri, batarya termal güvenliği konularının önemini ortaya koymaktadır. FDM ve sıvı doğrudan soğutmaya dayanan BTYS, batarya paketleri için üstün termal koruma performansına sahip olmasına rağmen maliyet ve ağırlık gibi etmenler nedeni ile elektrikli araç uygulamalarını sınırlamaktadır.

Batarya sistemlerinin güvenli çalışmasını sağlamak için kapsamlı bir termal güvenlik yönetim sisteminin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu sistem, potansiyel batarya arızalarını oluşmadan önce tespit edecek ve termal kaçak durumunda acil soğutma ve yangın söndürme tedbirleri sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Ayrıca ısının ve alevlerin sistemin diğer bölümlerine veya çevreye yayılmasını önlemek için termal bariyer uygulanmalıdır.

Bu hedeflere ulaşmak için termal güvenlik yönetim sisteminin anormal sıcaklık artışlarını, iç basıncı, voltajı ve nem gibi durumları tespit etmek için kullanılabilecek gelişmiş izleme ve teşhis teknolojilerini içermelidir. Fiber Bragg ızgarası (FBG) ve yerleşik esnek ince sensörler-film sensörleri önerilmektedir (Nascimento ve ark, 2019).

Arıza durumunda aşırı ısınmayı ve termal kaçağı önlemek için acil soğutma önlemleri etkinleştirilmelidir. Soğutma fanları, sıvı soğutma sistemleri, HVAC soğutucu sistemleri veya sıvı nitrojen/sıvı argon/sıvı karbon dioksit/R134a sprey sistemlerinin kullanımını içerebilir (Tang ve ark, 2021).

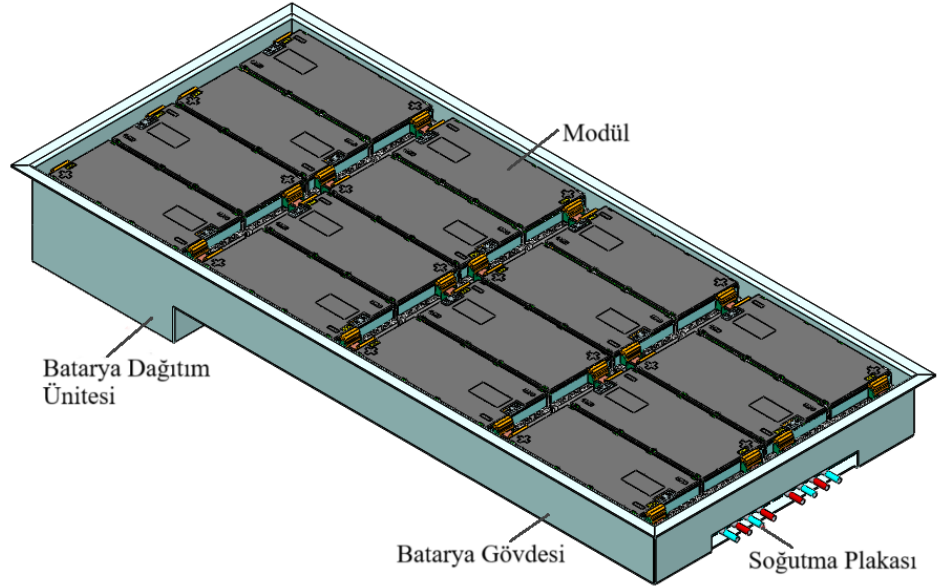
Bir yangın meydana gelmesi durumunda, termal güvenlik yönetim sistemi, alevleri hızlı bir şekilde bastırabilecek ve yayılmasını önleyebilecek yangın söndürme yetenekleriyle donatılmalıdır. Bu, su veya köpük gibi yangın söndürme maddelerinin kullanımını veya batarya sisteminin kendisinde yerleşik yangın söndürme sistemlerinin etkinleştirilmesini içerebilir.

Termal kaçak sırasında bitişik hücreler arasındaki ısı transferini baskılamak için bir termal bariyer uygulanmalıdır. Asbest yalıtımı, mika plakalar ve diğer kompozitler gibi malzemeler termal bariyerlere aday olarak değerlendirilmektedir (L. Li ve ark, 2021; Quintiere, 2020). Termal bariyer, anormal çalışma koşulları sırasında mükemmel güvenlik performansı sağlayabilirken aynı zamanda batarya termal yönetim sisteminin orijinal termal iletim yolunu da bozabilir. Bu nedenle, ısı transferi ve termal güvenlik arasında bir dengenin bulunması, üzerinde durulması gereken önemli bir konudur. Ayrıca termal kaçak durumunda lityum iyon hücrelerden ortaya çıkan gazların tahliyesi için batarya paketlerinde pasif/aktif valflerin kullanılması gerekmektedir.

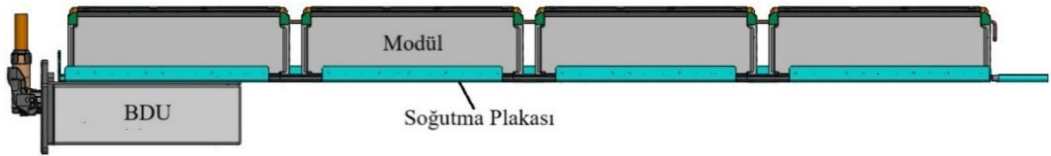
3. BATARYA PAKETİNİN YAPISI VE HAD ANALİZİ

3.1. Batarya Paketinin Yapısı

Bu çalışmada elektrikli araç için tasarlanmış ve üretilmiş, lityum-iyon kimyasına sahip batarya paketinin soğutma testinden alınan sıcaklık verileri ile Ansys/Fluent programı kullanılarak oluşturulan üç boyutlu modelin (HAD) analizleri ile sıcaklık verilerinin doğrulanması ve soğutma plakasının optimizasyon çalışmaları yapılacaktır. Şekil 3.1’de test paketinin şematik üç boyutlu tasarımı, Şekil 3.2’de test paketinin genel iç yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Batarya Paketi Genel Yapısı



Şekil 3.2. Batarya Paketi İç Yapısı

Modüller, soğutma plakası üzerinde yerleştirilmiş, batarya güç ünitesi ise soğutma plakasının altında konumlandırılmıştır.

Batarya paketi Lityum-iyon modüllerinden oluşmaktadır. Modüller, NMC kimyasında olup, 3,66 V gerilim ve 50 Ah kapasiteye sahip hücrelerden oluşmaktadır (Tablo3.1).

Tablo 3.1. NMC Hücree.

Parametre	Değer	Birim
Gerilim	3,66	V
Kapasite	50	Ah
Hücre Direnci	0,66	mΩ

Modül kendi içerisinde 2 paralel 6 seri (2P6S) konfigürasyondan oluşmaktadır (Tablo3.2).

Tablo 3.2. Batarya Modülü (2P6S).

Parametre	Değer	Birim
Gerilim	21,96	V
Kapasite	100	Ah
Modül Direnci	8	mΩ

Bir modül 12 hücreye sahip olup, 16 adet Lityum-iyon modül seri olarak bağlanarak 96S2P konfigürasyon oluşturulmuştur (Tablo3.3).

Tablo 3.3. Batarya Paketi (2P96S).

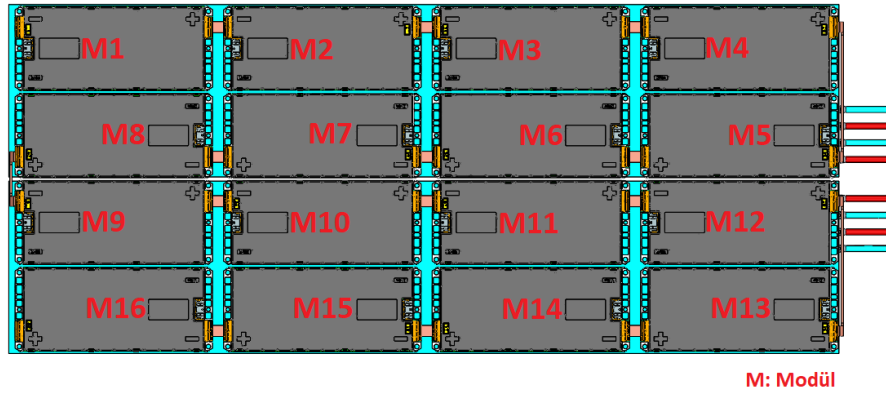
Parametre	Değer	Birim
Gerilim	351,36	V
Kapasite	100	Ah
Paket Toplam Direnci (+%11)	141,9	mΩ

Batarya paketini soğutmak amacıyla sıvı soğutma sistemi kullanılmakta olup, pakette giriş ve çıkış kollektörleri bulunmaktadır. Giriş ve çıkış kollektörleri üzerinde 4 adet

soğutma borusu yer almaktadır. Soğutma boruları, soğutma duvarı vasıtasıyla modüle temas ederek hücreleri soğutmaktadır. Her bir soğutma borusunun boyları eşit dolayısıyla aynı miktarda soğutma sıvısı kullanılarak modüller(hücreler) homojen olarak soğutulmak ve uygun sıcaklık aralığında tutulmak istenmektedir.

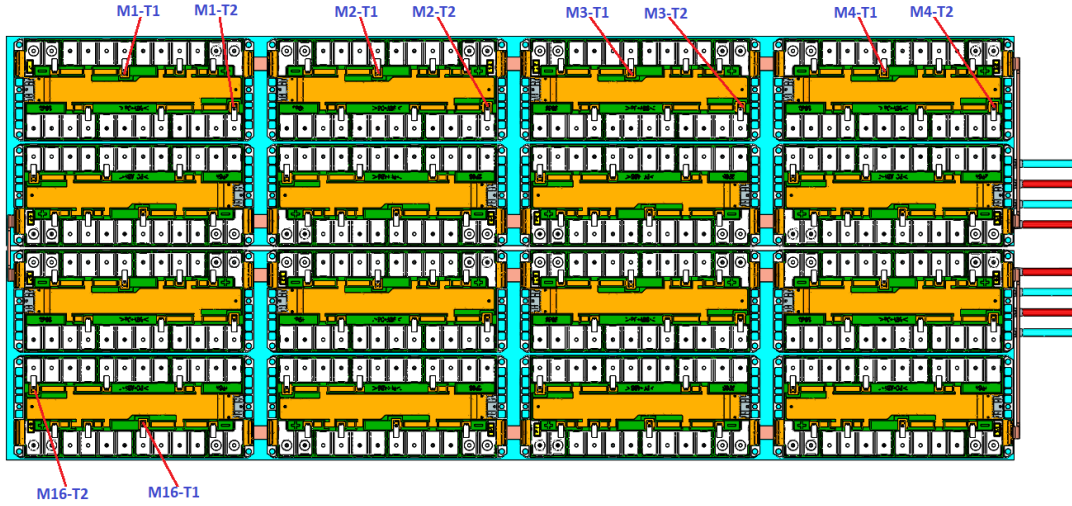
3.1.1. Batarya paketi modül dizilimi ve hücre sıcaklık okuma noktaları

Test paketinin modül dizilimi, modüllerin birbirine seri olarak bağlanması sonucunda Şekil 3.3'deki gibi birinci modül (M1) girişi eksi (-) kutbundan başlayarak, birinci modül artı (+) kutbu ile ikinci modülün (M2) eksi kutbu ile bağlanması şeklinde seri bağlantı, benzer şekilde 16 adet modülün birbirine seri olarak bağlantısı oluşturulmuştur. Paralel bağlantı ise sistemin karmaşıklığını önlemek amacıyla genellikle modül iç yapısında oluşturulmaktadır.



Şekil 3.3. Batarya Paketi Modül Dizilimi

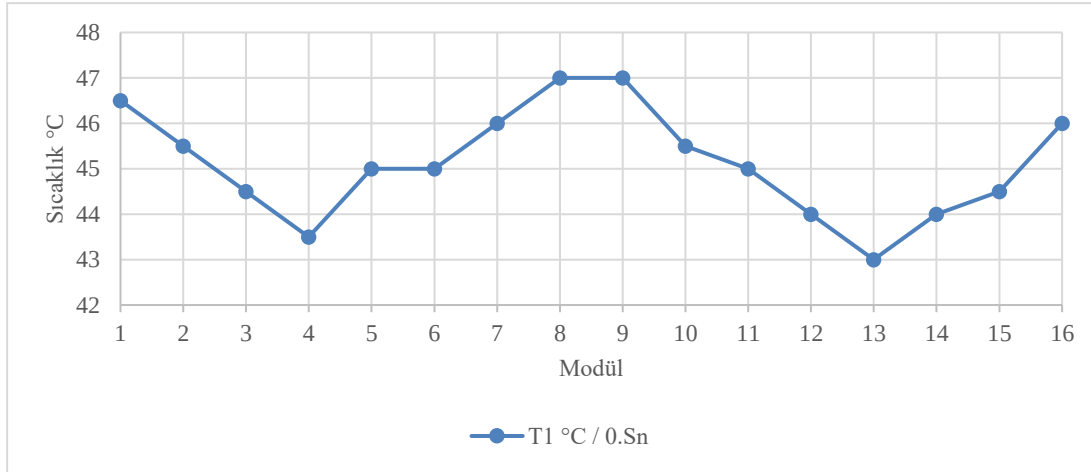
Batarya paketinin hücre sıcaklık verileri termokupl yardımıyla ölçülmektedir. Şekil 3.4'de modül iç yapısının görüntüsü ve hücre sıcaklık ölçüm noktaları görülmektedir. Her modülün sıcaklık verisi iki noktadan ölçülmektedir. Burada M1-T1 birinci modül birinci sıcaklık okuma noktasını, M1-T2 ise birinci modül ikinci sıcaklık noktasını ifade etmektedir. Diğer modülerde benzer şekilde dizilime ve okuma noktalarına sahiptir.



Şekil 3.4. Hücre Sıcaklık Okuma Noktaları

3.1.2. Test şartları ve modül test sıcaklık değerleri

Batarya paketinin hücre sıcaklık dağılımını elde etmek amacıyla soğutma sisteminin devre dışı olduğu durumda, şarj veya de-şarj edilerek kontrollü bir şekilde hücre sıcaklık değerleri 45-50 °C aralığına kadar ısıtılmaktadır. Şekil 3.5'te paket içindeki sıcaklık dağılımı verilmiştir. Burada her modül için ortalama sıcaklık değeri alınmış ve soğutma sistemi bu aşamada devreye girdiği için zaman sıfır saniye olarak grafiğe yansıtılmıştır.

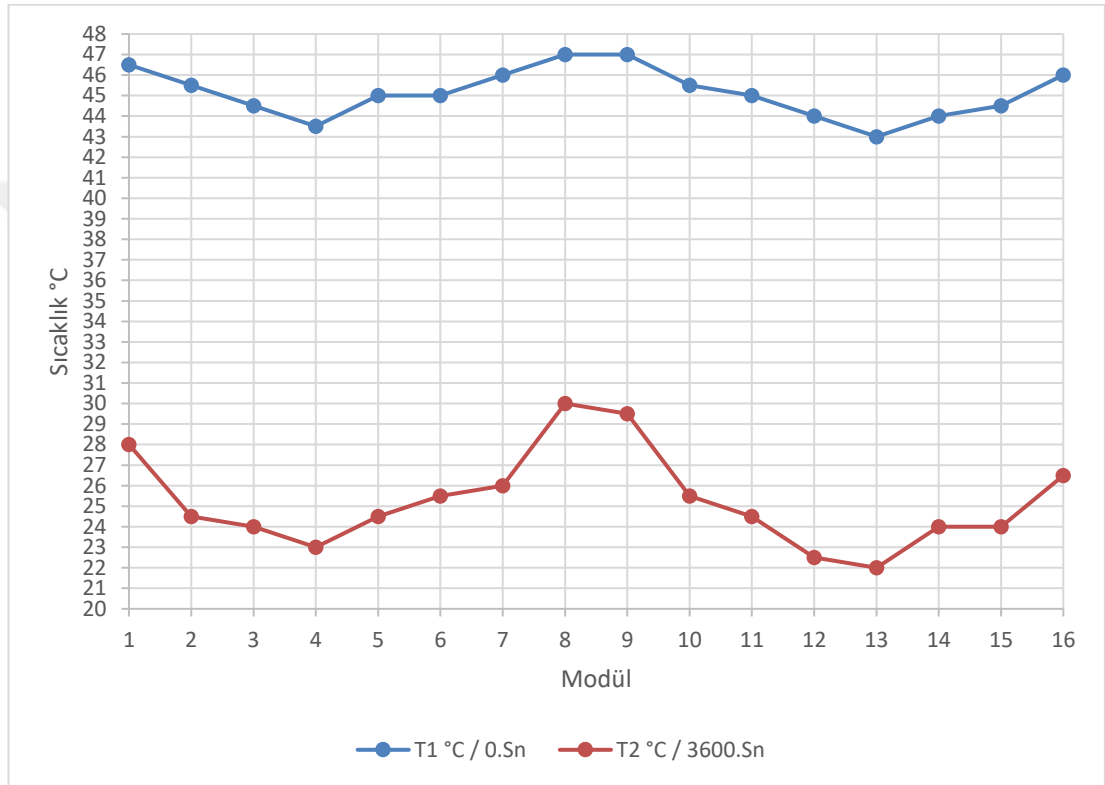


Şekil 3.5. Isıtılmış Modül-Hücre Sıcaklık Değerleri

Modül sıcaklık değerlerindeki farklılığın nedeni olarak farklı direnç değerlerine sahip olduğu söylenebilir. Modül direnç değerlerine ek olarak Şekil 3.2'deki görünen güç ünitesinin konumu da M8 ve M9 modüllerinin sıcaklıklarını arttırmış olabilmektedir. En yüksek sıcaklık değeri M8 ve M9 modülleri 47 °C iken en düşük sıcaklık değerine

sahip modül M13 ise 43 °C'dir. Bu değerler modüllerin üzerinden alınan iki noktadaki sıcaklık değerlerinin ortalamasıdır.

Bu aşamadan sonra soğutma sistemini 60 dakika boyunca çalıştırarak soğutma performansına bakılmıştır. T₁ başlangıç sıcaklıkları olacak şekilde 60 dakika sonunda hücre sıcaklık değerleri T₂ sıcaklık değerlerine düşürülmüştür (Şekil 3.6). Soğutma sistemi, ortam sıcaklığının 22 °C olduğu, soğutma sıvısının giriş sıcaklığı 15 °C ve 7,5 lt/dk debi sistem çalıştırılmıştır.



Şekil 3.6. Soğutma Sonrası Modül-Hücre Sıcaklık Değerleri

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi en yüksek sıcaklık ortalamasına sahip M8 modülü (30 °C) ile en düşük sıcaklık ortalamasına sahip M13 modülü (22 °C) arasında 8 °C sıcaklık farkı bulunmaktadır. Ve diğer modüller arasında homojen olmayan bir dağılım gözlemlenmiştir. Başlangıçta 5 °C sıcaklık farkı olmasına rağmen 60 dakikalık soğutma sonunda sıcaklık farkı 8 °C'ye çıktığı görülmektedir.

Soğutma sıvısının çıkış sıcaklığına bakıldığında 3 °C artış ile 18 °C olduğu görülmüştür.

3.2. HAD Analizi ile Test Verilerinin Doğrulanması

Bu çalışmada ısınan lityum iyon hücrelerin, oluşturulan model ile test verilerinin doğrulanması, HAD yardımıyla, bir akışkanın davranışının matematiksel modellenmesine dayanarak, akışkanların hareketini ve etkileşimleri ile ısı transferinin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

3.2.1. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), akışkan akışını ısı ve kütle transferini, kimyasal reaksiyonları ve ilgili olayların tahmin eden bilim dalıdır. Bu fenomenleri tahmin etmek için korunum denklemlerinden faydalanılmaktadır. Kütle korunumu, newton'un ikinci kanunu, hareketin korunum yasası ve enerjinin korunumu gibi çeşitli korunum denklemleri kullanılmaktadır. Sıcaklık, yoğunluk gibi akışkanın farklı değişkenlerinin dağılımlarını elde edilebildiği veya bir dış akış çözümü için sürüklenme katsayısını ya da çok fazla akışımız varsa bunları modellemesi, gaz sıvı karışımlarını, gaz katı karışımlarının modellenmesi, kimyasal reaksiyonları yanma gibi önemli reaksiyonları modelleri ve bunun gibi daha birçok uygulamayı HAD analizleri ile gerçekleştirilebilmektedir (Jiyuan Tu, Guan-Heng Yeoh, Chaoqun Liu, 2020).

HAD analizlerinde kullanılan denklemler sırasıyla katı bölgelerin enerji dengesi denklem 3.1, akışkan bölgeler için kütle korunumu denklem 3.2, momentumun korunumu 3.3 ve enerji korunumu denklem 3.4'teki gibi ifade edilir (Niu ve ark, 2021).

$$\frac{\partial}{\partial T}(\rho c_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \frac{Q}{V} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.2)$$

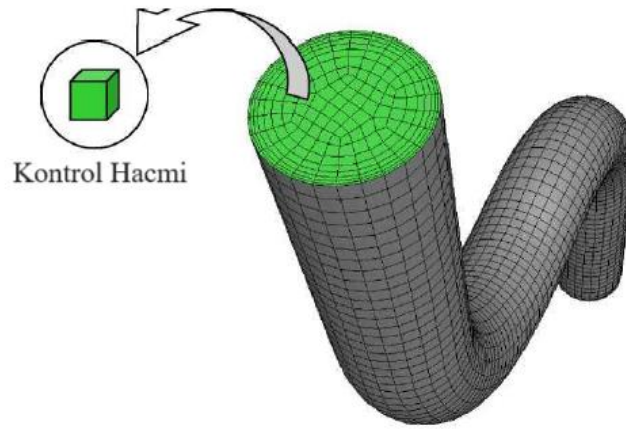
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \cdot \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{v}) \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \nabla \cdot (\rho c_p \vec{v} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3.4)$$

Bir tasarım başlangıcında, konsept tasarım yapma aşamasında HAD analizlerinden faydalanılarak geometriyi oluşturabilir, daha sonra çok detaylı ürün geliştirme

adımlarında yine HAD analizlerini yaparak tasarımlar gerçek fiziksel ortamlardaki davranışı test edilebilir. Bütün işlemlerden sonra tasarımları da yapılmak istenilen optimizasyon çalışmaları için HAD analizleri bizlere yol gösterebilmektedir. Özetle HAD analizlerini bütün mühendislik adımlarında faydalanılabilmektedir.

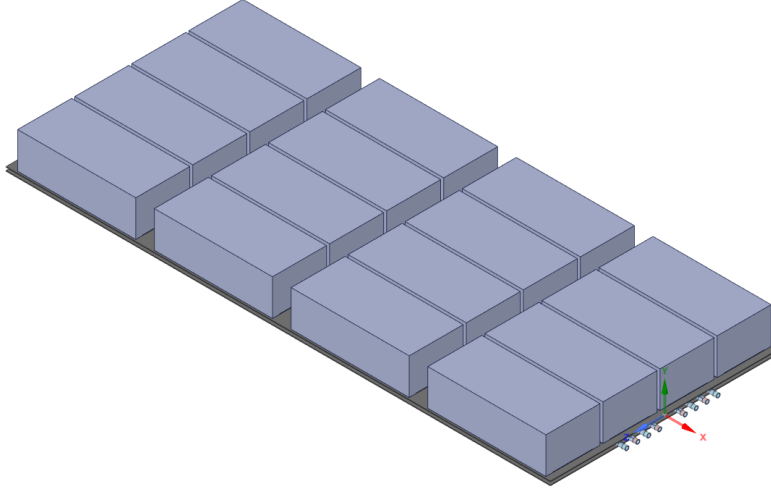
Bu çalışmada kullandığımız Ansys Fluent yazılımı HAD analizlerinde sonlu hacimler metodunu kullanarak çözüm yapılmaktadır. Sonlu hacimler metodu, akış hacmini kendisinden daha küçük hacimlere, kontrol hacmi olarak modellenen en küçük ağ yapısından iterasyonlar ile hesaplama yapmaktadır (Şekil 3.7). Her bir kontrol hacmi için süreklilik denklemlerini ve momentum denklemlerini çözülmesi gerekmektedir. Kullanılan diferansiyel denklemlerin analitik çözümleri mevcut değildir. Dolayısıyla öncelikle bu denklemlerin cebirsel denklem setlerine dönüştürerek daha sonra bu cebirsel denklem sistemlerini nümerik olarak çözülmesi gerekmektedir.



Şekil 3.7. Kontrol Hacmi

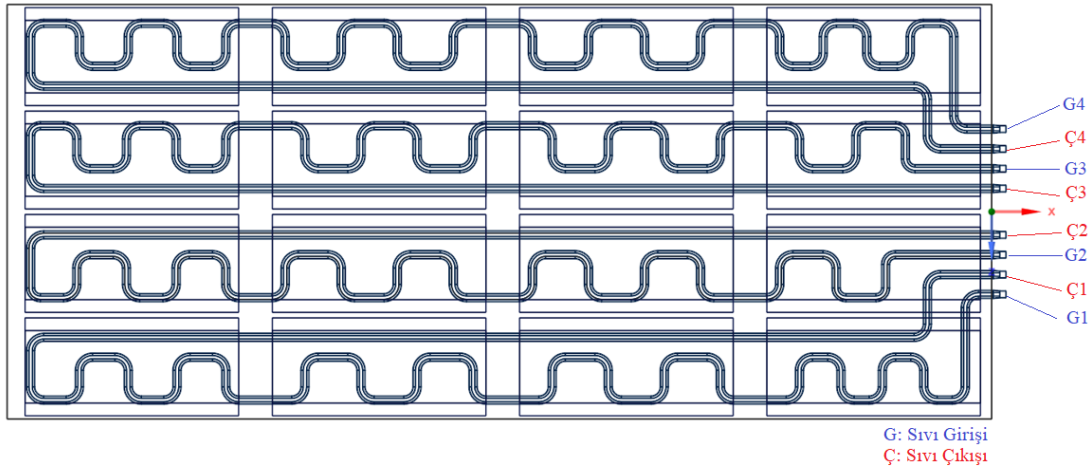
3.2.2. HAD analizi için model oluşturulması

Batarya paketinin analiz çalışmaları Ansys/Fluent programı kullanılarak yapılmıştır. Batarya paketi, soğutma plakası ve modüllerden oluşan sadeleştirilmiş modeli Şekil 3.8'deki gibidir.



Şekil 3.8. Sadeleştirilmiş CAD Model

SpaceClaim programı yardımı ile cad modelin geometri iyileştirilmeleri sağlanmış, katı eleman, yan ve üs yüzey, sıvı giriş-çıkış, lokal ağ yapısı gibi fluent ortamında ihtiyacımız olacak tanımlamaları Name Selection ile tanımlanmıştır. Batarya paketinin soğutma plakası sıvı giriş-çıkış tanımlamaları Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9. Soğutma Plakası Sıvı Giriş-Çıkış

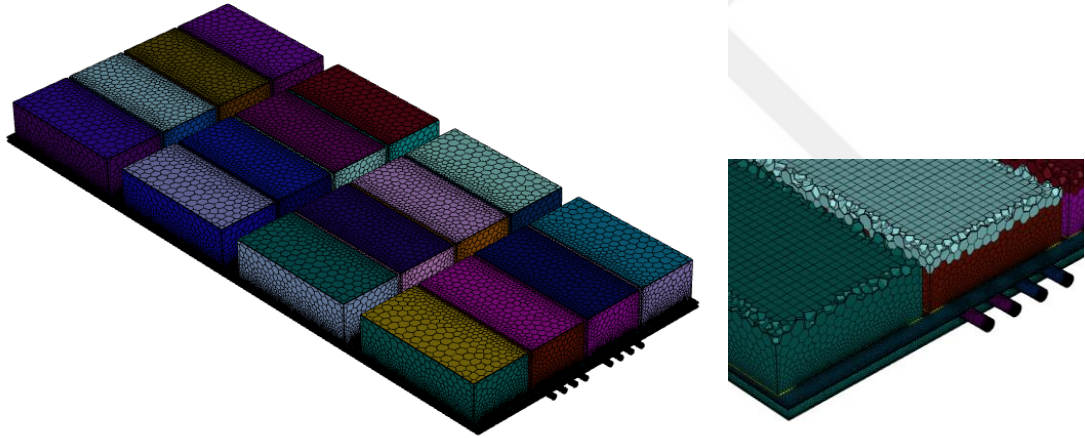
Soğutma plakası, 1,5mm kalınlığında iki alüminyum plaka arasına yerleştirilmiş Ø9,1mm iç çapa sahip dört adet alüminyum borulardan oluşmaktadır.

3.2.3. Model ağ yapısı ve bağımsızlığı

Model, Ansys Fluent Mesh’de Poly-Hexcore ağ yapısı ile oluşturulmuştur. Poly-hexcore ağ yapısı, karmaşık geometrileri simüle etmek için kullanılan bir tür yapıdır. Bu yapının temeli altıgen köşelerden oluşan hücrelerdir. Bu hücreler, poligonal altıgen yüzeylere böler, böylece daha karmaşık geometrileri temsil etmek için daha iyi uyum

sağlar. Poly-hexcore ağ yapısı, doğal olarak nesnelerin kenarlarını takip eder, bu da daha hassas sonuçlar elde etmek için daha fazla hücreyi nesne çevresine yerleştirtirmesini sağlar. Bu şekilde, akışkanların akışını daha iyi yakalayabilir ve hava veya sıvı direncini daha doğru bir şekilde hesaplamayı sağlamaktadır (Zore, K. Parkhi & Sasanapuri, B. Varghese, 2019).

Ortalama 5 milyon ile 9 milyon eleman sayısı aralığında analizler yapılmış ve mesh bağımsızlığı sağlanmıştır. Yapılan analizlerde eleman sayılarındaki değişikliklerde test sıcaklık değerlerinin yakalandığı ortalama 5 milyon eleman sayısı ile çalışmalara devam edilmiştir. Eleman boyutları, minimum 0,5mm, maksimum 8mm boyutlarında, minimum ortogonal kalite 0,28, maksimum en-boy oranı 0,6 ve maksimum çarpıklık değeri ise 0,61 olacak şekilde ortalama mesh kalite değerlerinde hesaplamalar yapılmış ve test verileri doğrulanmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Model Ağ Yapısı

Soğutma sıvısı ile soğutma plakası boru yüzeylerinde sınır tabakanın modellenmesi ve toplam yüksekliği, ilk katman yüksekliğinin belirlenmesinde y^+ değeri kullanılmaktadır. Akışkanlar dinamiğinde y^+ (y plus) Reynolds sayısı ve sınır tabakanın karakteristiğini ifade etmek için kullanılan bir parametredir. Yüksek-Reynolds sayılı akışlar için, yeterince önemsiz olan sınır tabakasının düşey bir bileşeni vardır. Yüksek-Reynolds akışı durumlarında, durgun sınır tabakası, akışkanın fiziksel özelliklerinde önemli bir değişiklik olmaksızın akışkanın hareket ettiği bir bölgeye sıkıştırılır. y^+ , bu sıkışma bölgesinin boyutunu gösteren bir ölçüdür. y^+ değeri, sınır tabakasının yüksek veya düşük olduğunu gösterir. y^+ değeri küçükse, akışın önemsiz

olduğu kabul edilir ve "ince" sınır tabakası olarak adlandırılır. y^+ değeri büyükse, sınır tabakasının karmaşık olduğu ve "kalın" bir tabaka olduğu kabul edilir (Ansys, 2023).

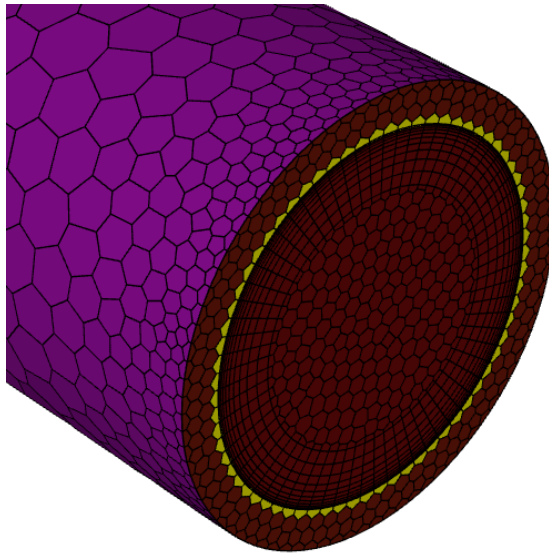
Yapılan çalışmada ısı transferi gerçekleşmesi önem arz etmesinden dolayı y^+ değeri 1 olarak seçilmiş, akış rejiminin belirlenmesi için Reynold sayısını denklem 3.5, toplam katman yüksekliği denklem 3.6 ve ilk katman yüksekliği de denklem 3.7 ile hesaplanmıştır.

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (3.5)$$

$$\delta_T = \frac{0,385}{Re^{0,2}} D_h \quad (3.6)$$

$$\Delta y = D_h y^+ \sqrt{74} Re^{-\frac{13}{14}} \quad (3.7)$$

Hesaplanan toplam katman ve ilk katman yüksekliğine göre Şekil 3.11’de sıvı akışkanın sınır tabaka modellenmesi 10 katmandan oluşacak şekilde modellenmiştir. Yapılan analiz çalışmalarında 3 katman, 5 katman ve y^+ değerine göre 10 katmandan oluşan sıvı modellemeleri yapılmış ve test verilerinin doğrulanmasında sonuçların %1’in altında değiştiği görülmüş ve 5 katmanlı sınır tabaka modelleri ile bütün çalışmalara devam edilmiştir.



Şekil 3.11. Sıvı Sınır Tabaka Ağ Yapısı

3.2.4. Sınır şartları ve malzeme özellikleri

Batarya paketi iç yapısının modellenmesi ve sınır şartlarının belirlenmesi dolayısı ile paket içerisindeki hava ile paketi oluşturan parçalar arasında taşınım ile ısı transferi gerçekleşmektedir. Ortam sıcaklığının 22 °C ve maksimum noktasal sıcaklığın 48 °C dikkate alındığında, 35 °C ortalama sıcaklık değerine göre ısı tranfer taşınım katsayısı hesaplanabilir. Tablo 3.4’te havanın 35 °C'deki özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.4. 35 °C'de Havanın Özellikleri.

Parametre		
Isıl İletkenlik	Kinematik Viskozite	Prandtl Sayısı
k, W/(m K)	ν , m ² /s	Pr
0,02625	1,655 x 10 ⁻⁵	0,7268

Doğal taşınımında akış rejimini belirlemek için denklem 3.8’de verilen Rayleigh sayısı kullanılabilir.

$$Ra_L = \frac{g \beta \Delta T L_C^3}{\nu} Pr \quad (3.8)$$

$$\beta_{ideal\ gaz} = \frac{1}{T} \left(\frac{1}{K} \right) \quad (3.9)$$

Geometrinin karakteristik boyu (L_c) dikey pozisyon için yükseklik ölçüsü, yatay pozisyonlar için ise denklem 3.10 kullanılır.

$$L_c = \frac{A_s}{p} \quad (3.10)$$

Hesaplanan Rayleigh sayısı, dikey pozisyonlar için $10^4 - 10^9$ aralığında olduğundan dolayı Nusselt sayısı denklem 3.11 ile, yatay üst pozisyonlar için $10^4 - 10^7$ aralığında olduğundan dolayı Nusselt sayısı denklem 3.12 ile hesaplanabilir.

$$Nu = 0,59 Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad (3.11)$$

$$Nu = 0,54 Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad (3.12)$$

Dikey ve yatay modül yüzeyleri için denklem 3.11 ve denklem 3.12 yardımıyla hesaplanan Nusselt sayıları denklem 3.13 ile eşitlenmesi sonucunda dikey ve yatay yüzeylerden hava ile olan taşınım katsayısı hesaplanabilir.

$$Nu = \frac{h L_c}{k} \quad (3.13)$$

3.2.4.1. Soğutma sıvısı sınır şartları ve malzeme özellikleri

Soğutma sisteminin ortam sıcaklığının 22 °C olduğu, soğutma sıvısının giriş sıcaklığı 15 °C ve 7,5 lt/dk debi sistem çalıştırılması dolayısı ile soğutma borularının giriş çapları dikkate alındığında, kullanılan dört adet soğutma borusuna tek kollektörden gelen hacimsel debi eşit dağıtılması ile sıvı giriş hızı 0,4805 m/s olarak tanımlanmıştır. Tablo 3.5’de soğutma sıvısına ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 3.5. Soğutma Sıvısı Özellikleri.

Parametre	Değer	Birim
Yoğunluk	1060	Kg/m ³
Özgül Isı	3400	J/(kg K)
Isıl İletkenlik	0,4	W/(m K)
Dinamik Viskozite	0,001003	Kg/(m s)

3.2.4.2. Soğutma plakası sınır şartları ve malzeme özellikleri

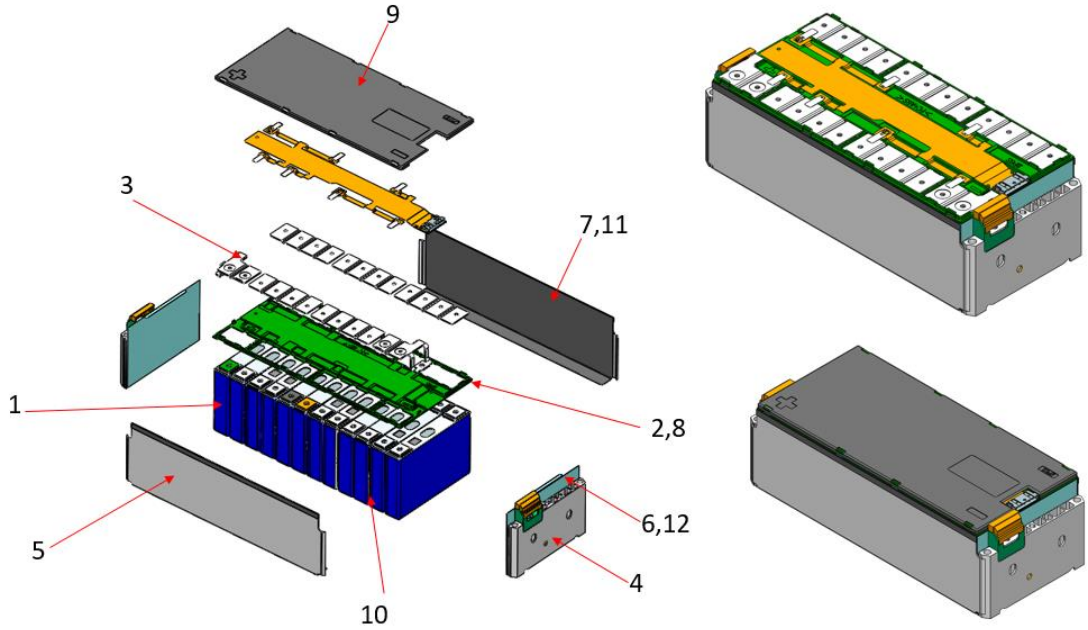
Soğutma plakası, 1,5mm kalınlığındaki iki adet alüminyum sac arasına montaj edilmiş, sıvı giriş çapı 9,1mm olan ve sıvı ile plakalar arasındaki ısı transferinin verimli olması açısından oval bir geometriye sahip borulardan oluşmaktadır. Tablo 3.6’da soğutma plakasına ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 3.6. Soğutma Plakası Malzeme Özellikleri.

Parça Adı	Malzeme	Parametre		
		Yoğunluk (Kg/m ³)	Özgül Isı J/(kg K)	Isıl İletkenlik W/(m K)
Soğutma Plakası	EN-AW 5754	2660	900	147
Soğutma Borusu	Al 1060	2705	900	230

3.2.4.3. Modül sınır şartları ve malzeme özellikleri

NMC hücre kimyasına sahip modül iç yapısı Şekil 3.12’de verildiği gibi hücrelerin elektriksel ızalasyonu, termal ızalasyon ve yapısal olarak farklı malzemelerden oluşmaktadır.

**Şekil 3.12.** Modül İç Yapısı

Lityum iyon hücreler, üretimi gereği koordinatlara göre farklı termal iletkenliğe yani ortotropik yapıda termal iletkenliğe sahiptirler ve bu şekilde tanımlanması gerekmektedir. Şekil 3.8’de sadeleştirilmiş batarya paketinin modül tanımlanması ise bütün hücreler tek yapıda ve diğer malzeme tanımlamaları da Ansys-Fluent Shell Conduction yaklaşımı ile katmalar halinde ve malzeme özellikleri tanımlanmış şekilde test verilerinin doğrulanması sağlanmıştır.

Denklem 3.8 - 3.9 - 3.10 - 3.11 - 3.12 ve 3.13 ile doğal taşınım katsayısı hesaplanmış ve hava ile temas eden yatay yüzeyler $6,55 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ve dikey yüzeyler ise $5,96 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ olarak sınır şartları tanımlanmıştır. Tablo 3.7’de modül malzemelerine ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 3.7. Modül Malzeme Özellikleri.

Parça Adı	Malzeme	Parametre		
		Yoğunluk (Kg/m ³)	Özgül Isı J/(kg K)	Isıl İletkenlik W/(m K)
1. Hücre	NMC	2225	1040	x= 17,5 y=0,3 z=17,3
2. Hücre Koruma	PC+ABC	1070	1900	0,20
3. Bara	Al 1060-0	2705	900	230
4. Ön-Arka Plaka	Al 6063-T6	2700	900	205
5. Kenar Panel	Al 5083-0	2640	900	120
6. Ön-Arka İzalasyon	PC	1150	1260	0,17
7. Kenar İzalasyon	PET	1370	2200	0,16
8. Kablo Koruma	PC+ABS	1050	1900	0,3
9. Modül Koruma	PC+ABC	1050	1900	0,3
10. Silikon Çerçeve	Silikon+PET	1325	1350	0,65
11. Kenar Yapıştırıcı	Polimer	980	1300	0,2
12. Ön-Arka Yapıştırıcı	Polimer	980	1300	0,2

Modüller, şarj veya de-şarj sırasından içerisinde geçen akım ve üretim hataları kaynaklı veya malzemelerden kaynaklı sahip olabilecekleri kontak direnç ile hücrelerin ısınması gerçekleşmektedir. Direncin artışı sıcaklığında artmasına neden olacaktır. Denklem 3.14’de bir saatte (1C) içerisinde geçen akım ve direnç ile oluşacak ısı atım miktarı hesaplanabilir.

$$Q = I^2 R \quad (3.14)$$

Batarya paketinin hızlı şarj veya de-şarj durumunda ise birim zamanda geçen akım miktarı artacağı için ısınan hücre ısı miktarı ise denklem 3.15 ile hesaplanabilir. (Örnek: Yarım saatte (2C))

$$Q = (2I)^2 R \quad (3.15)$$

Isı kaynağı olarak modüllere tanımlanan ısı miktarları Tablo 3.8’de verilmiştir. Burada hacimsel verilen ısı miktarları modüllere tanımlanmış ve test verilerinden elde edilen ilk modül sıcaklıkları ile son modül sıcaklıkları dikkate alınarak değerler oluşturulmuştur.

Tablo 3.8. Modül Isıl Yükler.

Modül	Parametre			
	Isıl Yük (W/m ³)	Isıl Yük (Watt)	Akım (A)	Direnç (ohm)
M1	25000	118	100	0,0118
M2	16000	75	100	0,0075
M3	16000	75	100	0,0075
M4	14000	66	100	0,0066
M5	17000	80	100	0,0080
M6	19000	89	100	0,0089

Tablo 3.8. (Devamı) Modül Isıl Yükler.

Modül	Parametre			
	Isıl Yük (W/m ³)	Isıl Yük (Watt)	Akım (A)	Direnç (ohm)
M7	19000	89	100	0,0089
M8	30000	141	100	0,0141
M9	30000	141	100	0,0141
M10	19000	89	100	0,0089
M11	16000	75	100	0,0075
M12	14000	66	100	0,0066
M13	13000	61	100	0,0061
M14	16000	75	100	0,0075
M15	16000	75	100	0,0075
M16	21500	101	100	0,0101

3.2.5. Akış rejimi ve model seçimi

Akış rejiminin denklem 3.5 ile belirlenmesi ve seçilen K-Omega SST türbülans modellemenin genel özellikleri şu şekilde sıralanabilir.

K-Omega SST türbülans modeli, yüksek Reynolds sayıları ve düşük Reynolds sayılarına sahip akışları doğru bir şekilde modelleyebilir, potansiyel akış ile sınır tabaka akışının arasındaki geçişi uygun bir şekilde sağlayan, hem ters basınç altındaki akışlara duyarlı olma hem de akış ayrılmalarının bulunduğu bölgelerde sonucun doğruluğunu artırmakta, geniş bir aralıktaki akış koşullarında başarılı sonuçlar veren bir türbülans modelidir (Ansys, 2023; Menter, 1994).

Denklem 3.5 ile belirlenen akış rejimi ile türbülanslı akış belirlendiği dolayısı ile de denklem 3.16 ile türbülans yoğunluğu (%) olarak hesaplanabilir.

$$I = 0,16 Re^{-\frac{1}{8}} \quad (3.16)$$

3.2.6. HAD çözüm şeması

HAD analizlerinde kullanılan SIMPLE, SIMPLEC, PISO ve Coupled çözüm şemaları arasındaki temel farklar, basınç ve hız alanları arasındaki bağıntıların çözülme şekilleri ve iterasyon adımlarının farklılıklarıdır. SIMPLEC ve PISO şemaları zamana bağlı analizlerde, SIMPLE ve Coupled şemaları ise zamandan bağımsız analizlerde kullanılır. SIMPLE ve Coupled şemaları Ansys/fluent programında zamana bağlı analiz şeklinde de çalıştırabilir (Ansys, 2023).

Analiz çalışmalarında seçilen Coupled şema, hız ve basıncı aynı anda çözer, tek bir iterasyon için bunu gerçekleştirir. Coupled şema, hız ve basınç alanlarının birbiriyle etkileşim halinde olduğunu kabul eder. Hız ve basınç alanları birbirine bağlıdır ve bir değişiklik olduğunda birbirlerini etkilerler.

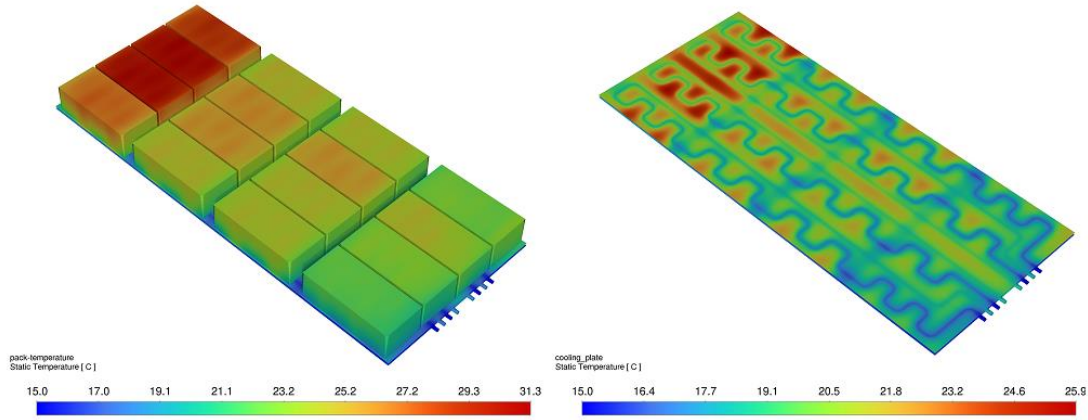
Coupled şeması, akışkan dinamiği problemlerinde genellikle daha doğru sonuçlar elde etmek için kullanılır. Ancak bazen daha hızlı çözümler elde etmek için SIMPLE gibi diğer yöntemler de tercih edilebilir.

Yapılan tüm analiz çalışmalarında şema olarak Coupled-ikinci dereceden Upwind şema kullanılmıştır.

3.2.7. Test verileri ile HAD analiz sonucunun karşılaştırılması

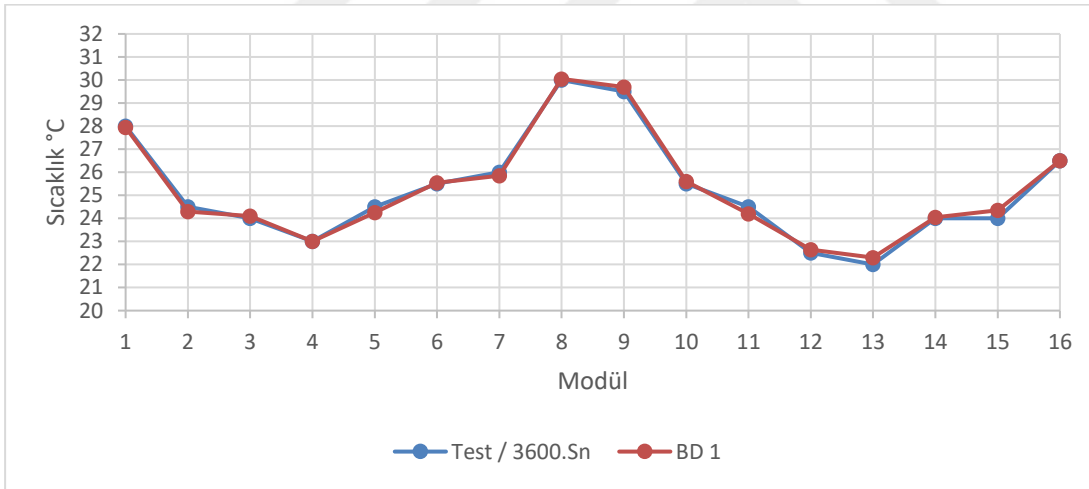
Ansys/Fluent programı kullanılarak yapılan HAD analizlerinde özetle, enerji denklemleri aktif, modelde bulunan malzemelere ait termofiziksel parametre tanımları yapılarak, test verisindeki hacimsel debiye göre sıvı giriş hızları 0,4085 m/s, hız ve soğutma sıvısı fiziksel özelliklerine bağlı akış tipi olarak türbülanslı akış, türbülans modeli olarak K-Omega SST, modül malzeme tanımlarda ise Shell thickness-layer ile sadeleştirilmiş modül yapısı modele tanımlanmıştır. Batarya paketi iç kısmında doğal taşınım ile ısı transferi gerçekleşeceğinden dolayı modüller ile hava arasındaki doğal taşınım katsayısı hesaplara dahil edilmiş ve ortalama olarak dik yüzeylere 5,96 W/m²K, yatay yüzeylere ise 6,55 W/m²K tanımlanmıştır. Model olarak Coupled-ikinci dereceden Upwind scheme kullanılarak bataryanın soğutma plakası performans testinden alınan hücre sıcaklıkları ile HAD analizin doğrulanması yapılmış, HAD analizinden elde edilen sonuçlar test verileriyle iyi bir uyum göstermiştir.

Şekil 3.13’de gerçekleştirilen HAD analizinin, batarya paketinin sıcaklık dağılımı ve soğutma plakasının sıcaklık dağılımı verilmiştir.



Şekil 3.13. Batarya Paketi / Soğutma Plakası Sıcaklık Dağılımı

Batarya paketi sıcaklık dağılımının test verileri ile HAD analiz sonuçlarının grafik üzerinde gösteriminde görüleceği gibi sonuçlar birbiri ile uyum göstermektedir (Şekil 3.14). Grafik’te BD 1 (Boru Dizilimi 1) HAD analiz sıcaklık değerleridir.

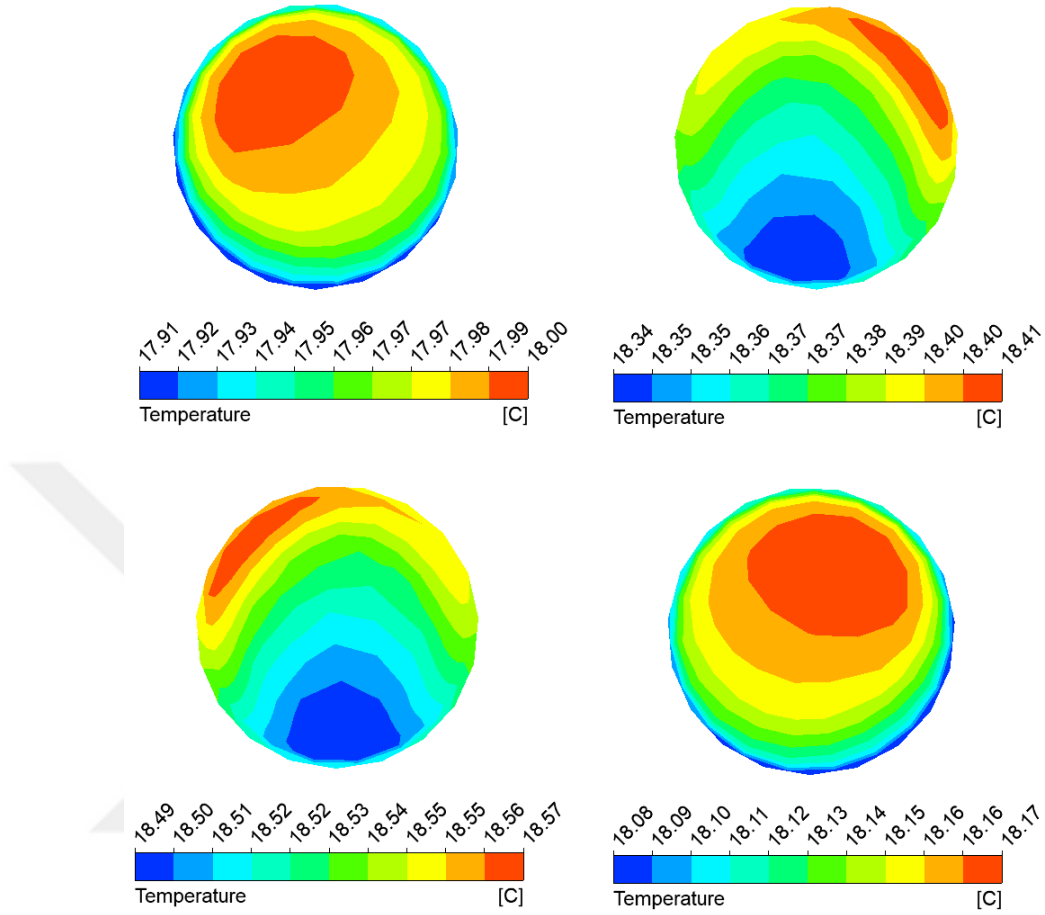


Şekil 3.14. Test / HAD Analizi Sıcaklık Değerleri

Şekil 3.14’te görüldüğü gibi en yüksek sıcaklık ortalamasına sahip M8 modülü (30 °C) ile en düşük sıcaklık ortalamasına sahip M13 modülü (22 °C) arasında 8 °C sıcaklık farkı HAD analizinde de elde edilmiştir. Benzer şekilde diğer modüller arasında homojen olmayan bir dağılım gözlemlenmiştir.

Test verilerinden elde edilen soğutma sıvısının çıkış sıcaklığına bakıldığında 3 °C artış ile 18 °C olduğu elde edilmişti. HAD analizinde ise çıkış sıcaklık değerinin Şekil 3.15’de görüldüğü gibi dört adet çıkış olarak modellenen boru yapılarında ortalama

18,25 °C sıcaklık değerleri olarak elde edilmiş ve test soğutma sıvısı çıkış sıcaklık değerleri arasında yaklaşık %1,4 oranında sapma ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.15. Soğutma Sıvısı Çıkış Sıcaklığı

Soğutucu akışkana aktarılan ısı miktarı Q_c [W] bilindiğine göre denklem 3.17 kullanılarak soğutucu akışkanın çıkış sıcaklığı hesaplanabilir.

$$\dot{Q}_c = \dot{m} c_p \Delta T \quad (3.17)$$

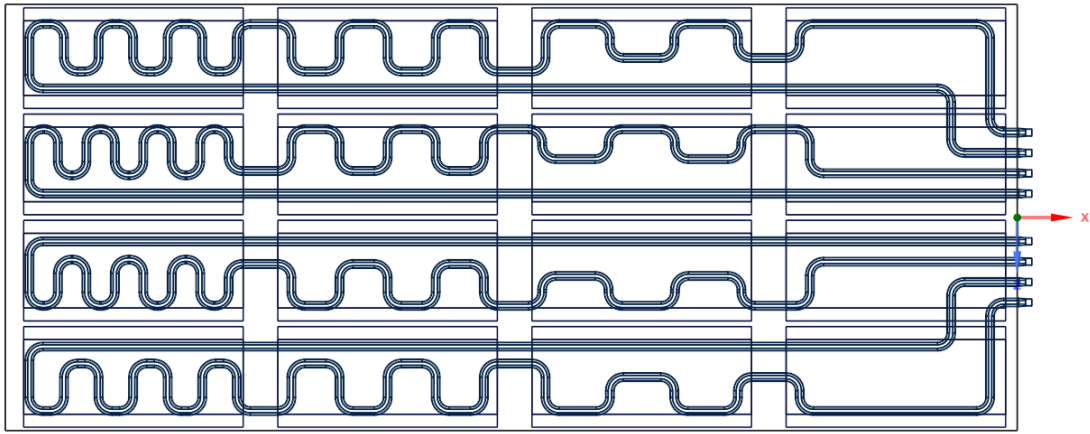
Denklem 3.17 kullanılarak soğutucu sıvı çıkış sıcaklığı hesaplanmış ve HAD analiz değeri ile test verisinden alınan sıvı çıkış sıcaklık değeri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

3.2.8. Boru yerleşiminin farklı tasarımları ile yapılan HAD analizleri

Yapılan literatür çalışmalarından elde edilen bilgiler ışığında lityum-iyon hücre kimyasına sahip bataryaların çalışma sıcaklık değerlerinin önemine vurgu yapılmıştır. Bu çerçevede batarya paketi içerisinde bulunan hücrelerin homojen bir sıcaklık dağılımı gereksinimi önem kazanmaktadır.

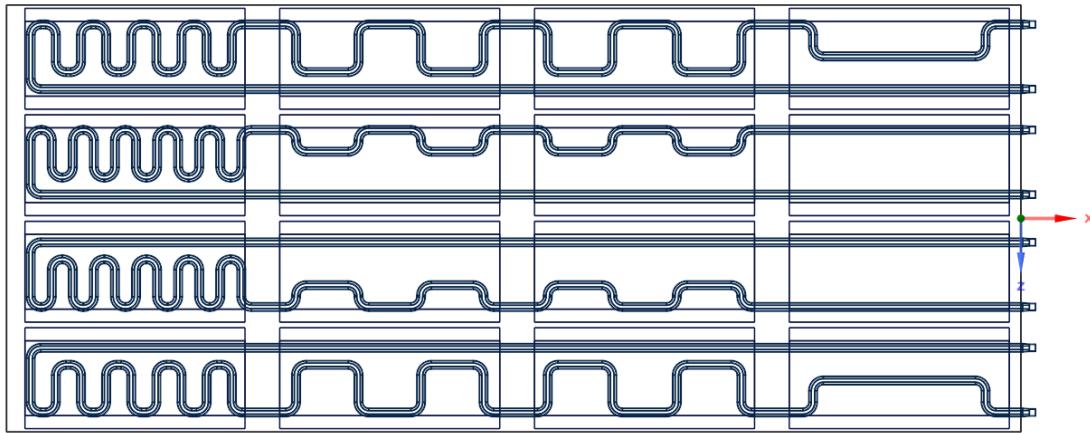
Tez çalışmasında örnek alınan batarya paketinin sıcaklık dağılımı incelendiğinde modüller arasındaki ortalama 8 °C'lık sıcaklık farkının iyileştirilmesi batarya paketinin ömür ve verimliliği anlamında fayda sağlayacaktır. Dolayısıyla aynı boru kesit ve soğutma plakasının boru yerleşimi ile çalışmalar yapılmıştır.

Şekil 3.16'da yapılan boru dizilimi iki (BD 2) yerleşimde soğutma sıvısının hızlı bir şekilde sıcak bölgeye aktarımı için soğutma sıvısının giriş ve çıkışları yer değiştirilmiş, düz bölge ile sıcak bölgeye hızlı aktarımı sağlanmış ve soğutma sıvısının yoğunluğu sıcak bölgede daha fazla dolaşımı dolayısıyla ısı alış verişinin artırılması amacıyla M1-M2, M7-M8, M9-M10, M15-M16 bölgelerinde borunun sıvı akış yolları arttırılmıştır.



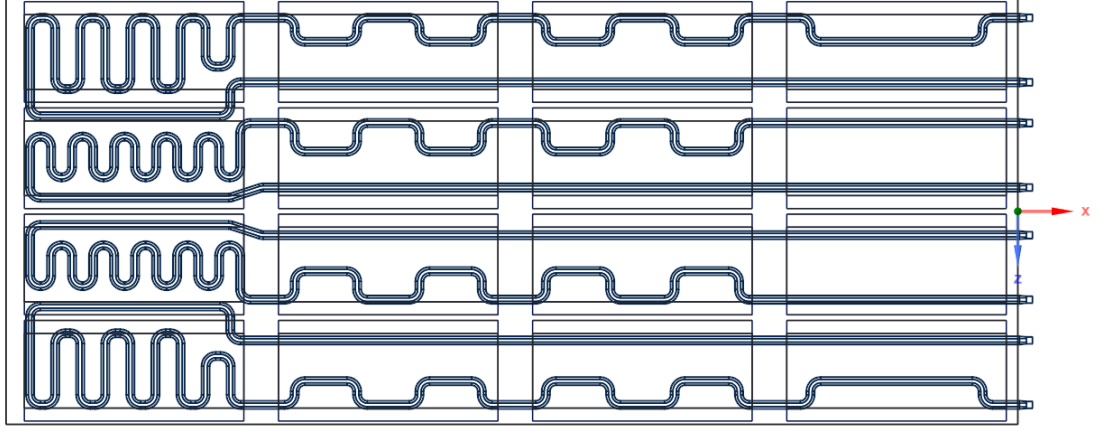
Şekil 3.16. Boru Dizilimi İki (BD 2)

Şekil 3.17'de yapılan boru dizilimi üç (BD 3) çalışmasında M1, M8, M9, M16 soğutma sıvısının yoğunluğu arttırılmış ve M4, M5, M12, M13 boru yerleşimlerinde değişiklik yapılmıştır.



Şekil 3.17. Boru Dizilimi Üç (BD 3)

Şekil 3.18’de yapılan boru dizilimi dört (BD 4) çalışmasında aynı boru boylarında, sıvı yoğunluğunun M8, M9 modüllerinde daha fazla arttırılması amacı ile dışlarda bulunan boruların bir kısmı orta bölgelere kaydırılmış ve daha fazla ısı alış verişi hedeflenmiştir.



Şekil 3.18. Boru Dizilimi Dört (BD 4)

Test verilenin doğrulanması ve yapılan üç farklı boru yerleşimi ile aynı sınır şartlarında, aynı boru boy ve kesitlerde çalışmalar yapılmış, modüller arasında homojen bir sıcaklık dağılımı hedeflenmiştir.

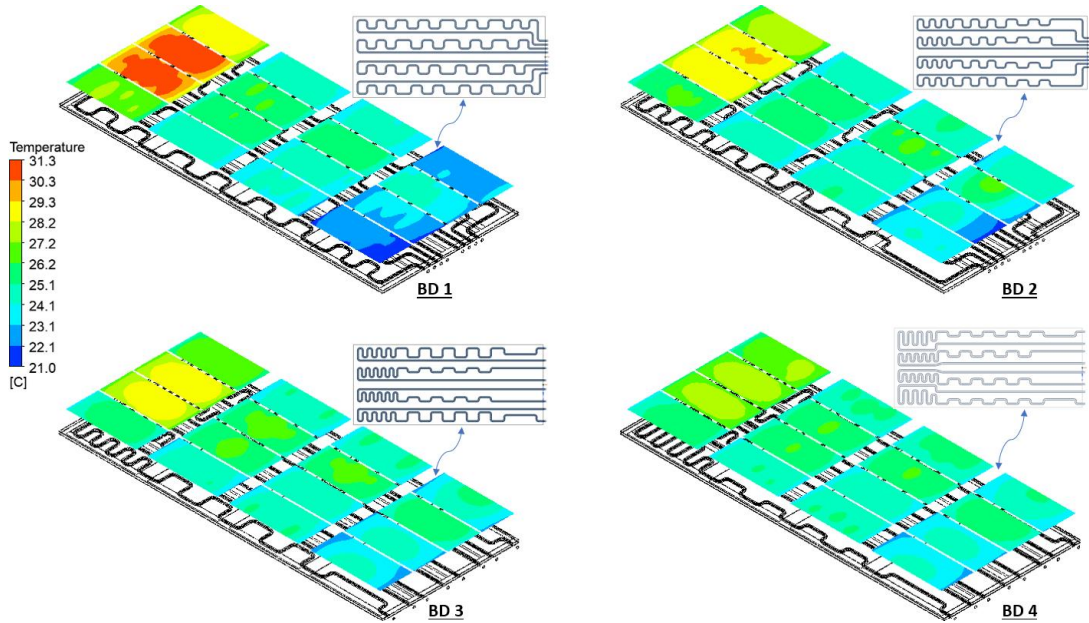


4. BULGULAR

Batarya paketi tasarımında, iç gövde yüzeyleri termal ızalasyonu sağlanmış, paket arka yüzeyinde sıvı giriş-çıkış konumları ve test verileri incelendiğinde güç ünitesi üzerindeki modüller daha fazla ısındığı görülmektedir. Normal şartlarda modül akım ve ortalama direnç değerlerine bakıldığında 80 watt ısı atımı gerçekleşmektedir. Test verileri, termal ara yüzlerden iletim ile olan ısı transfer farklılıkları ve diğer tasarım etkenleri dikkate alınarak farklı ısı girdiler ile varsayım yapılarak ısı yükler tanımlanmıştır. Test verileri ile HAD analiz verilerinin uyumluluğunun sağlanması sonrasında homojen olmayan hücre sıcaklık dağılımının iyileştirilmesi amacıyla farklı boru yerleşimleri ile analizler gerçekleştirilmiştir.

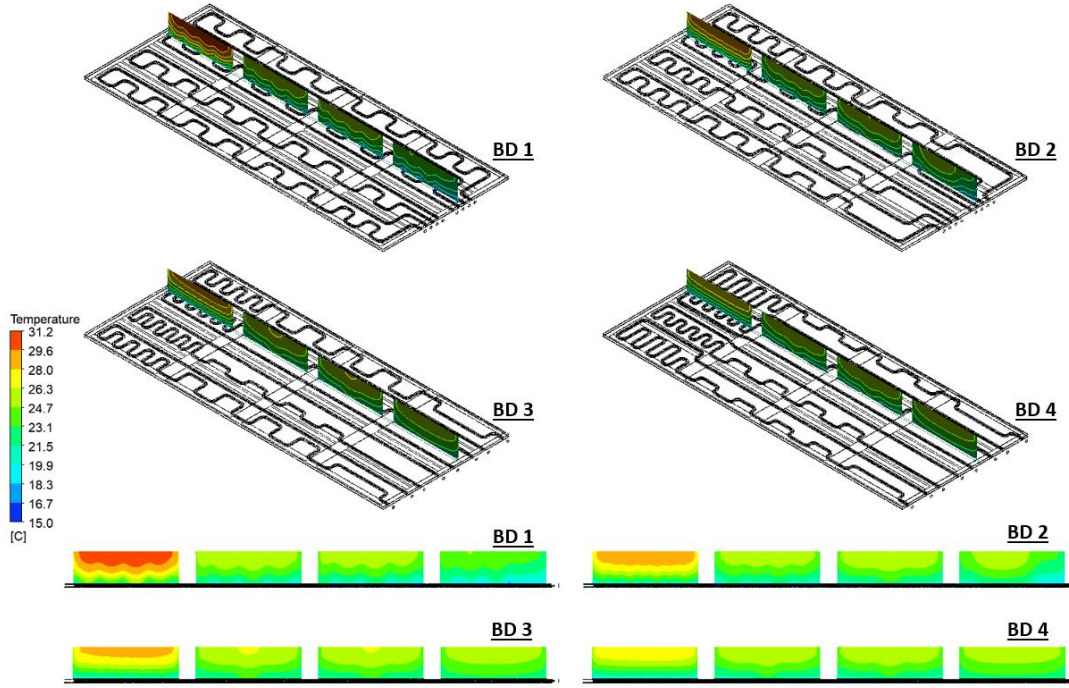
4.1. Boru Dizilimi Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Batarya paketinin test verilerinden elde edilen sıcaklık değerinin HAD analizi ile doğrulanması (BD 1), BD 2, BD 3 ve BD 4 soğutma plakaları incelendiğinde Şekil 4.1’de görüleceği gibi modül üst yüzeyinde homojen sıcaklık dağılımı BD 4 soğutma plakası ile elde edilmiştir.



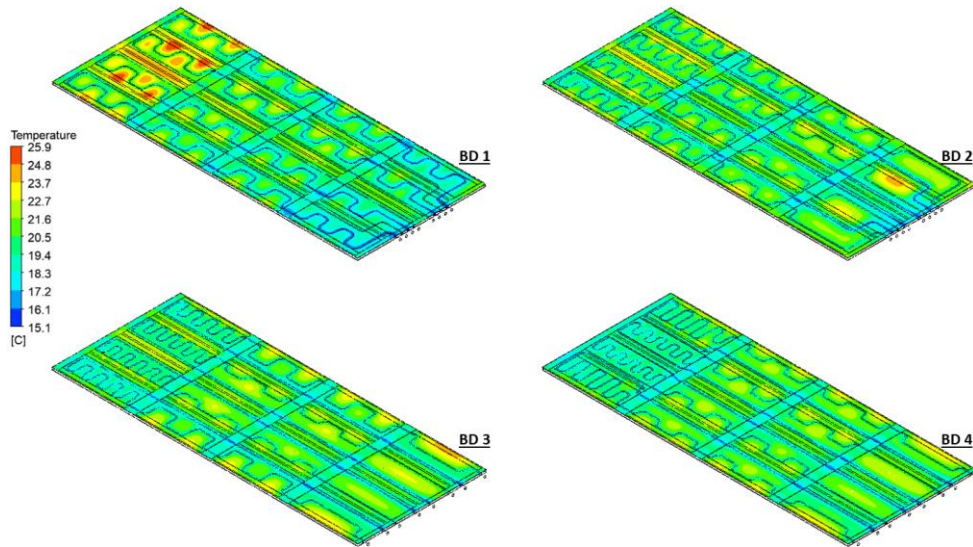
Şekil 4.1. Modül Üst Yüzey Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması - 1

Şekil 4.2’de M5, M6, M7, M8 modüllerinin orta noktasından kesit alınmış ve modül kesitinden elde edilen sıcaklık verileri incelendiğinde BD 4 çalışmanın diğerlerine göre homojen sıcaklık dağılımı sağladığı gözlemlenmiştir.



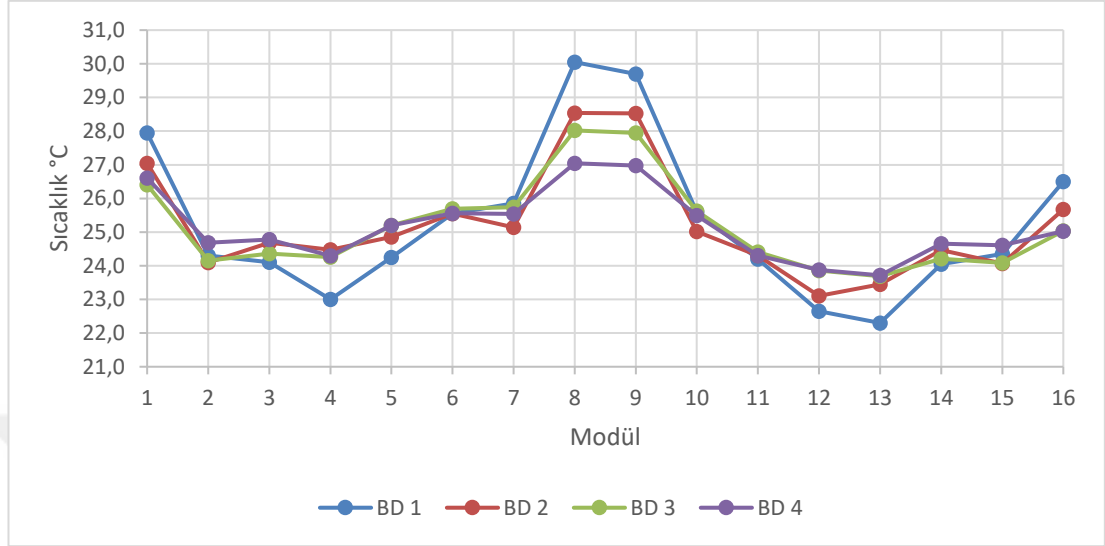
Şekil 4.2. Modül İç Yüzey Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması - 1

Şekil 4.3’de ise yapılan çalışmaların soğutma plakaları karşılaştırılmıştır. Soğutma plakalarında ise diğer modüllere göre yüksek ısıya sahip M1-M8-M9-M16 modüllerin olduğu alanların iyi soğutulması, dolayısıyla yüksek ısıdaki bu modüllerin diğer modüller ile aralarındaki sıcaklık farkının azaltıldığı görülmektedir.



Şekil 4.3. Soğutma Plakası Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması - 1

Şekil 4.4’de grafik üzerinden karşılaştırması yapılan sıcaklık değerleri, test verileri doğrulanmış HAD analiz sonuçları (BD 1), BD 2, BD 3 ve BD 4 soğutma plakalarına ait sıcaklık verileridir.

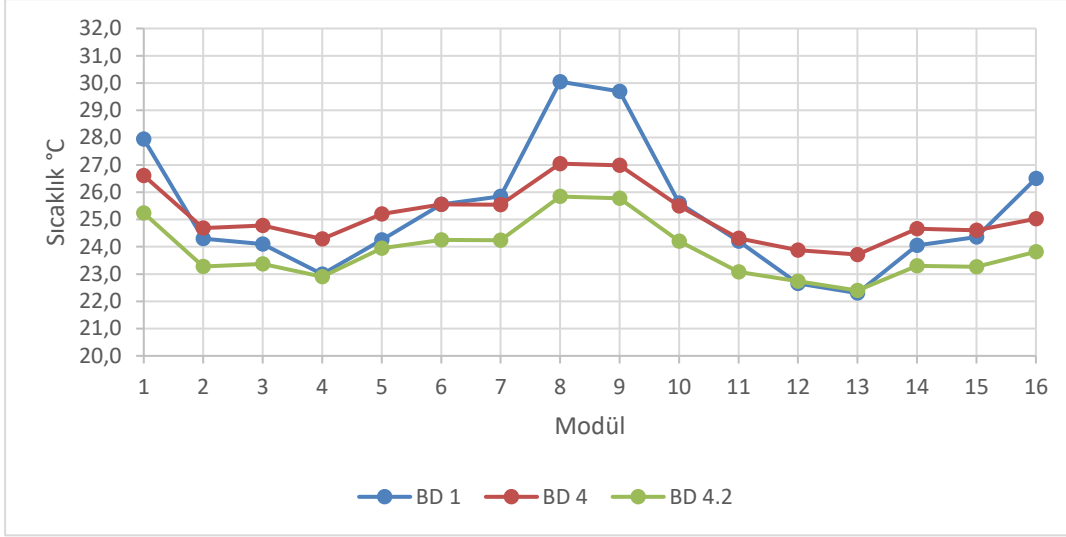


Şekil 4.4. Modül-Hücre Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması - 1

Şekil 4.4’de grafikte görüleceği gibi BD 1 soğutma plaka sonuçlarının sıcaklık farkı 8 °C iken BD 4 soğutma plakasının sıcaklık farkı 3,3 °C’ye kadar iyileştirilmiş, soğutma verimi artırılmış ve daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.

4.1.1. Soğutma sıvısının farklı debi ile HAD analizi

Batarya paketinde homojen sıcaklık dağılımının sağlanması amacıyla yapılan çalışmalarda en iyi homojen sıcaklık dağılımına sahip BD 4 soğutma plakası ile analiz gerçekleştirilmiş, soğutma sıvısı giriş hızları iki katına çıkarılarak debi miktarı artırılmış ve sonuçları incelenmiştir. Soğutma plakası çalışmasında (BD 4.2), debi artışı ile soğutma performansının yaklaşık %16 arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.5).

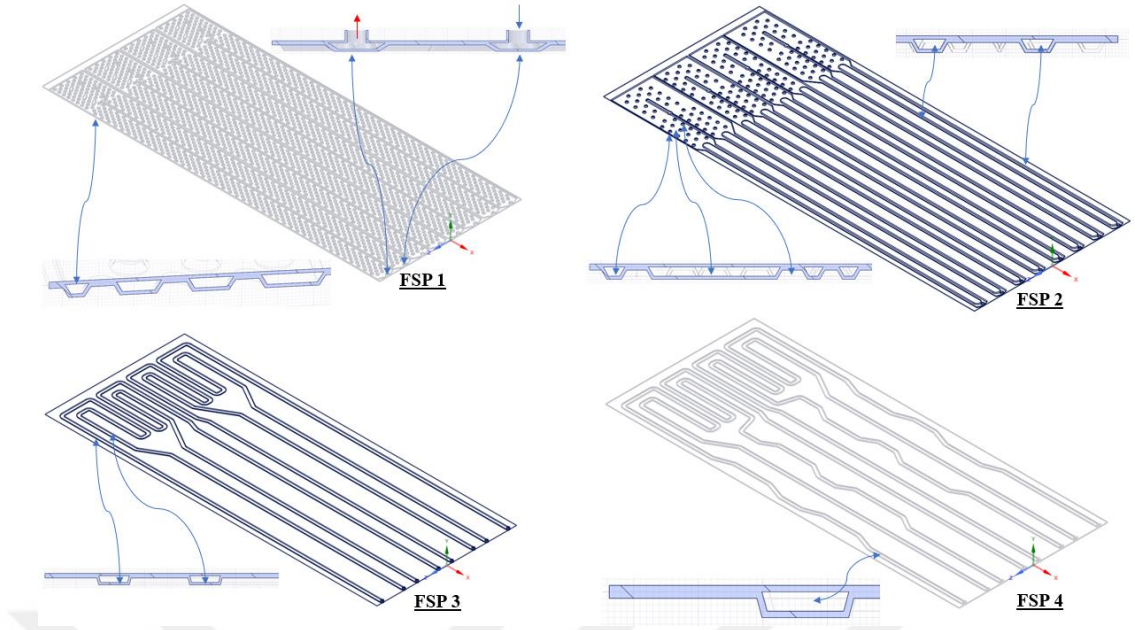


Şekil 4.5. Farklı Debi ile Modül-Hücre Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması

Grafikte de görüleceği gibi debi artışı soğutma performansını artırır iken homojen dağılıma etkisi bulunmamaktadır. Çalışmalarda soğutma sıvısının debisi için de optimum bir değer belirlenebilir.

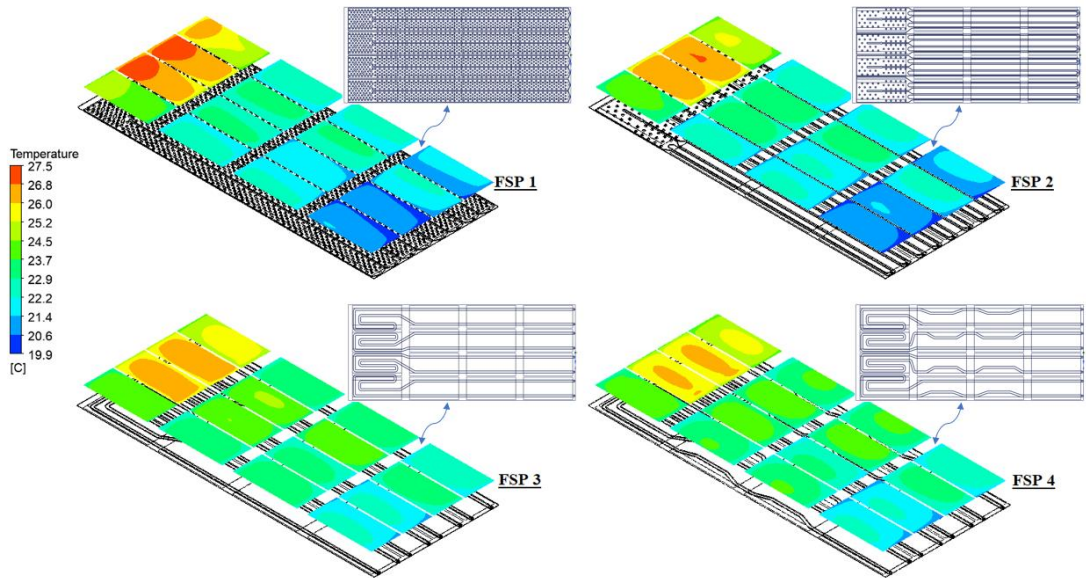
4.1.2. Form verilmiş soğutma plakaları ile yapılan çalışmalar

Literatür araştırmasında görüldüğü gibi soğutma plakaları borulu, farklı kesitli profil veya kalıpta form verilmiş halleri ile de üretilip kullanılabilir. Soğutma performansı yüksek ve homojen bir sıcaklık dağılımı için form verilmiş plakalar ile analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçları incelenmiştir. Şekil 4.6'da analizleri yapılmış soğutma plakalarının tasarımları görülmektedir. Soğutma plakaları, alüminyum sac plakalardan oluşmuş ve farklı üretim metotları ile üretilebilmektedir.



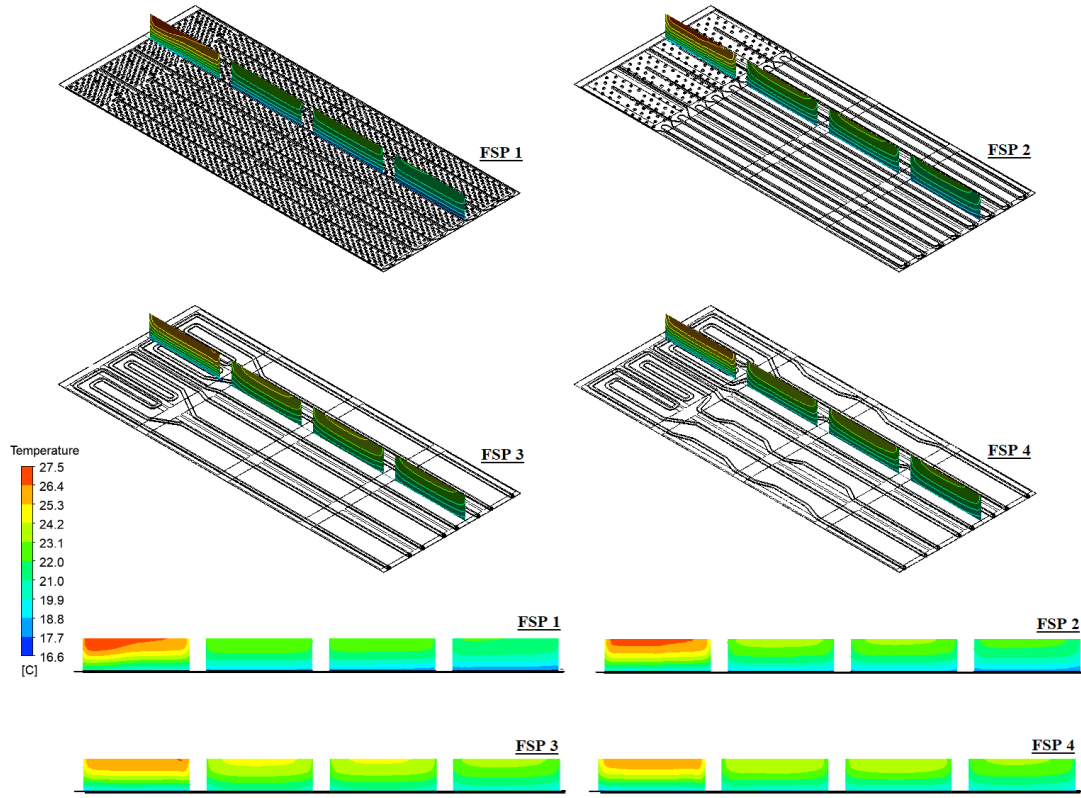
Şekil 4.6. Form Verilmiş Soğutma Plakaları

Yapılan bu çalışmalar, test verilerinin HAD analizleri ile aynı sınır şartlarında ve malzeme özelliklerine sahip olup analiz sonuçları Şekil 4.7’de verilmiştir. Burada formlu soğutma plakası (FSP 4) diğer kıyaslama yapılan soğutma plakalarına göre daha homojen bir yapıya sahiptir.



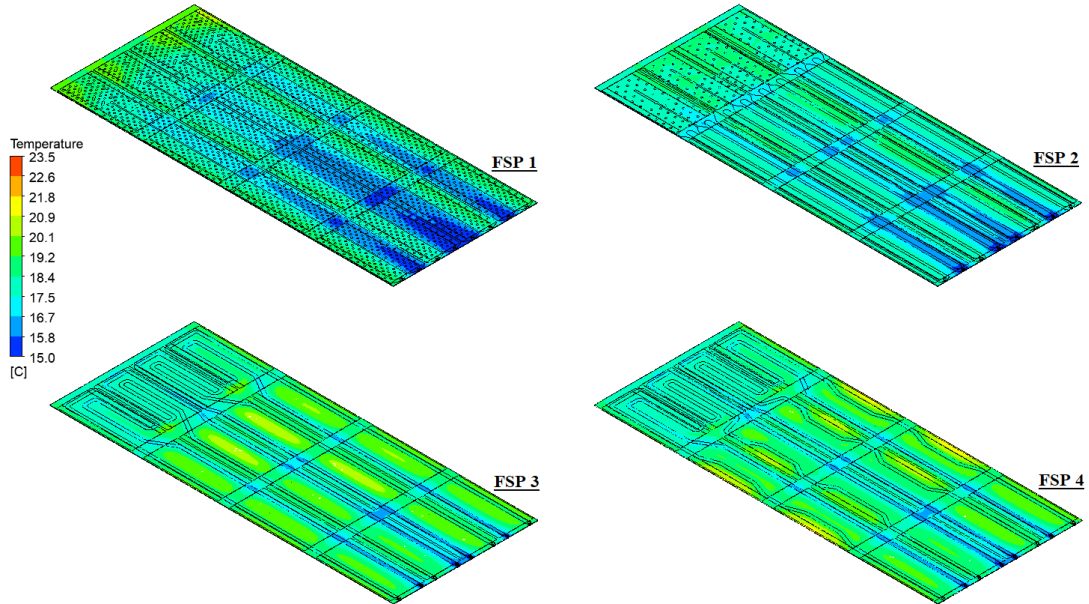
Şekil 4.7. Modül Üst Yüzey Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması – 2

Şekil 4.8’de M5, M6, M7, M8 modüllerinin orta noktasından kesit alınmış ve modül kesitinden elde edilen sıcaklık verileri incelendiğinde FSP 4 çalışmanın diğer çalışmalara göre homojen sıcaklık dağılımı sağladığı gözlemlenmiştir.



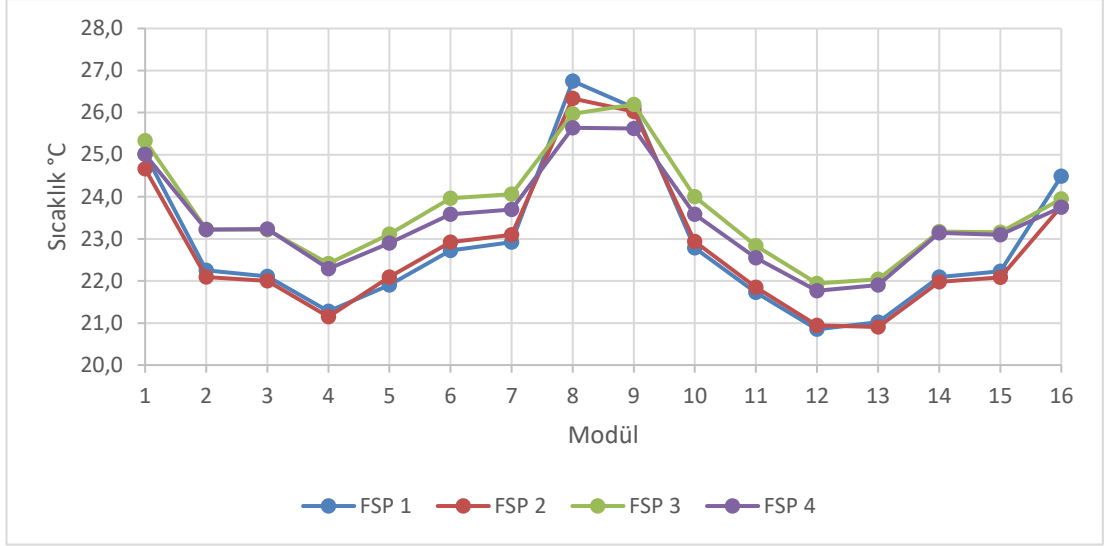
Şekil 4.8. Modül İç Yüzey Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması - 2

Şekil 4.9’da ise yapılan çalışmaların soğutma plakaları karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.9. Soğutma Plakası Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması - 2

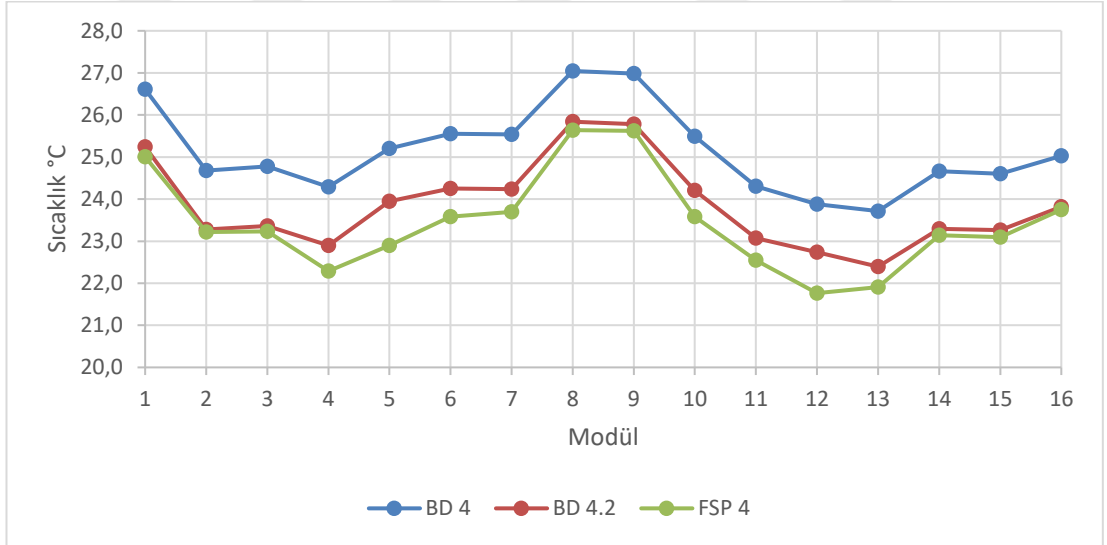
Şekil 4.10’da form verilmiş soğutma plakalarının sıcaklık karşılaştırmaları grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Modül-Hücre Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması - 2

Formlu plakaların sonuçlarına bakıldığında homojen dağılımı iyi ve sıcaklık farkı en düşük olan FSP 4'te, sıcaklık farkı 3,8 °C'dir.

Şekil 4.11'de yapılan çalışmalar arasında en iyi sonuçları sahip BD 4, BD 4.2 ve FSP 4 soğutma plakalarının sıcaklık karşılaştırmaları yapılmıştır.



Şekil 4.11. Modül-Hücre Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması - 3

Yapılan karşılaştırmada, soğutma performansı olarak form verilmiş soğutma plakasının diğerlerine göre verim anlamında iyi performans gösterdiği görülmektedir (FSP 4). Burada FSP 4, optimize edilmiş ve debisi iki katına çıkarılmış BD 4.2 çalışmasından daha iyi soğutma performansı sergilendiği görülmektedir. Bu anlamda

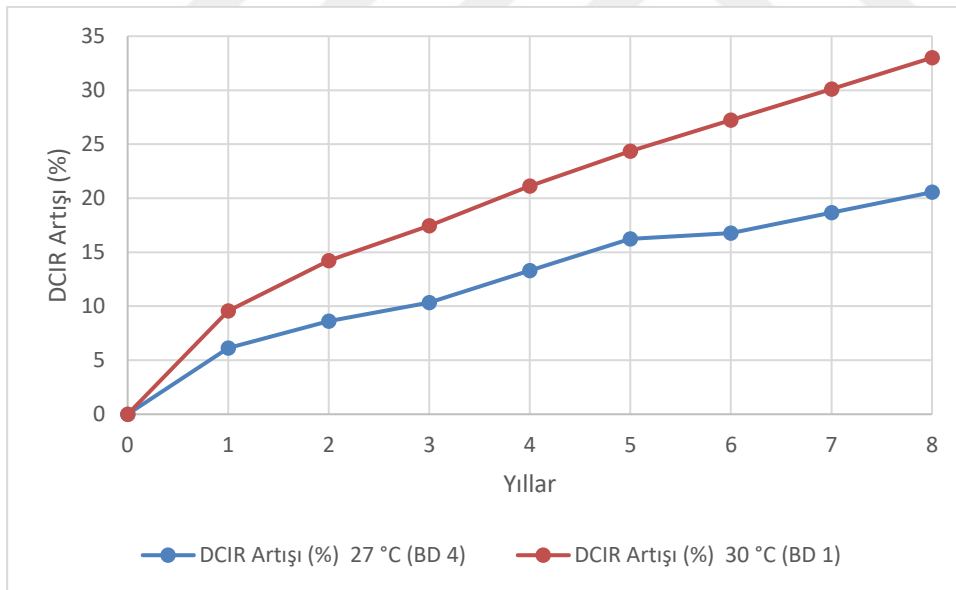
form verilmiş soğutma plakalarının formlarından optimizasyon yapılarak daha homojen ve verimli soğutma plakalarının elde edilmesi sağlanabilir.

4.2. Hücre Sıcaklıklarının İç direnç ve Kapasiteye Etkisi

Hücre sıcaklık değerlerinin yaşlanmaya olan etkileri, dolayısıyla iç direnç ve kapasite kayıplarının incelenmesi için oluşturulan Hücre 3RC parametreleriyle, Matlab Simulinkte 3RC Hücre modeli oluşturulmuştur. Bu model sayesinde istenilen güç ve sıcaklık profilleri ile batarya paketinin iç direnç ve kapasite kayıpları elde edilmiştir.

Lityum iyon hücrelerin iç direnci, sıcaklıkla doğru orantılıdır. Sıcaklık arttıkça, hücrelerin iç direnci de artar. Bunun nedeni, pil içindeki kimyasal reaksiyonların sıcaklıkla hızlanması ve daha fazla ısı üretilmesidir. İç direnç, pilin performansını olumsuz etkiler. Yüksek iç dirençli hücreler, daha düşük voltajlara düşer ve daha hızlı boşalır. Bu da pilin ömrünü kısaltır ve cihazların performansını düşürebilir.

Şekil 4.12’de analiz çalışmaları yapılmış BD 1 ve BD 4’ün yüksek sıcaklıklarının yıllara göre hücrenin iç direnç artışları verilmiştir.



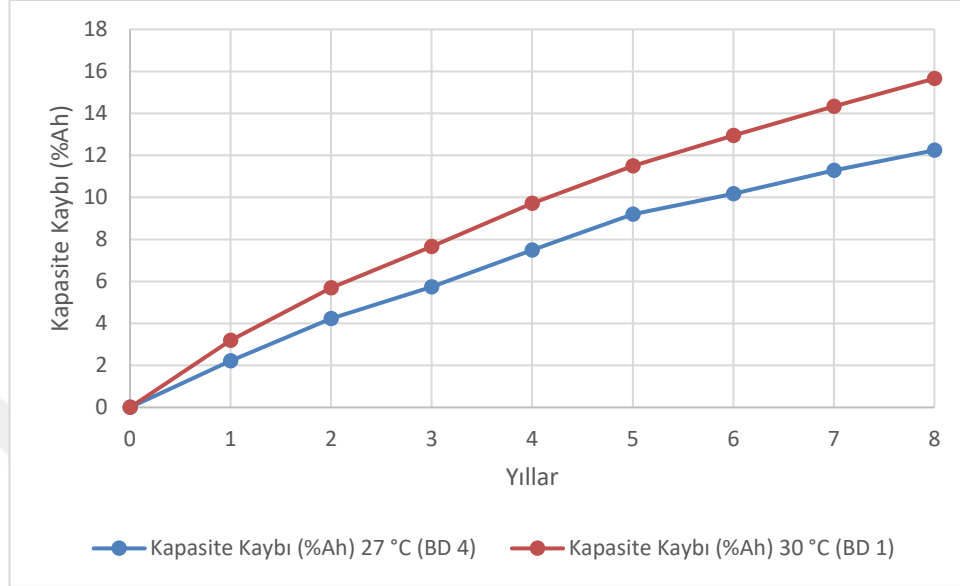
Şekil 4.12. Hücre Sıcaklığına Göre Direnç Değişimi

Grafikte görüleceği gibi 27 °C’de çalışan hücrenin 8 yıl sonra iç direncinde %20,6 artış yaşanırken, 30 °C’de çalışan hücrenin ise %33 iç direnç artışı gerçekleşmiştir.

Lityum iyon hücrelerin kapasitesi, sıcaklıkla ters orantılıdır. Sıcaklık arttıkça, hücrelerin kapasitesi de azalır. Bunun nedeni, pil içindeki kimyasal reaksiyonların sıcaklıkla yavaşlaması ve bu da daha az enerji üretilmesidir. Batarya kapasitesi, pilin

performansını etkileyen önemli bir faktördür. Düşük kapasiteli hücreler, daha kısa süre dayanabilir ve cihazların performansını düşürebilir.

Şekil 4.13'de analiz çalışmaları yapılmış BD 1 ve BD 4'ün yüksek sıcaklıklarının yıllara göre hücrenin kapasite kayıpları verilmiştir.



Şekil 4.13. Hücre Sıcaklığına Göre Kapasite Değişimi

Grafikte görüleceği gibi 27 °C'de çalışan hücrenin 8 yıl sonra kapasitesinde %12,2 kayıp yaşanırken, 30 °C'de çalışan hücrenin ise %15,65 kayıp gerçekleşmektedir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sıvı tabanlı termal yönetim sistemleri, özellikle elektrikli araç uygulamalarında yüksek ısı transfer verimliliği ve kompakt yapıları ile tercih edilmektedir. Doğrudan sıvı temaslı soğutma yöntemleri, dolaylı olanlara kıyasla daha yüksek verimlilik sunsa da, soğutma ortamının kimyasal ve fiziksel özellikleri ile elektriksel izolasyon gereksinimleri bu yöntemin yaygınlaşmasını sınırlamaktadır. Lityum-iyon modüllerinden oluşan batarya paketinin, çalışma şartlarındaki sıcaklık dağılımı 3 boyutlu olarak modellenmiş ve batarya paketi üzerinde homojen bir sıcaklık dağılımı elde etmek için soğutma plakalarındaki boru yerleşimi HAD analizleri ile çalışılmıştır. HAD analizlerinden elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile iyi bir uyum göstermiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular aşağıdaki gibidir.

- Farklı boru dizilimleri ile soğutma plakası optimizasyonu sonucunda batarya hücrelerinde 8 °C olan sıcaklık farkı 3,3 °C'ye kadar düşürülerek daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Hücre sıcaklık değerleri, 30-22 °C aralığından 27-23,7 °C aralığına optimize edilerek tüm hücrelerde, literatürde de belirtilmiş olan optimum 25 °C çalışma sıcaklığına yaklaştırılmış ve homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Bunun sonucunda, soğutma plakalarının tasarım ve uygulamasıyla elde edilen %11'lik verim artışı, batarya ömrünün ve performansının %10 ila %20 arasında iyileşmesine önemli bir katkı sağlamaktadır.
- Optimum boru dizilimine sahip soğutma plakasında, soğutucu akışkan debisinin modül sıcaklık değeri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Debi iki katına çıkarıldığında, maksimum sıcaklık değeri 30 °C'den 25,8 °C'ye düşürülerek, soğutma performansında %16'lık bir iyileşmenin gerçekleştiği tespit edilmiştir.
- Formlu soğutma plakaları ile gerçekleştirilen HAD analizlerinde, maksimum sıcaklık değeri 30 °C'den 25,6 °C'ye düşürülerek, soğutma performansında %17'lik bir iyileşmenin gerçekleştiği tespit edilmiştir. Aynı sınır şartlarında yapılan HAD analizlerinde, optimize edilmiş boru dizilimine sahip soğutma

plakalarına göre %6 daha iyi soğutma performansının elde edildiği tespit edilmiştir. Bunun en önemli nedeni soğutma sıvısının daha fazla yüzey alanı ile modüllere temasından kaynaklanmaktadır.

- Borulu soğutma plakaları ve form verilmiş soğutma plakaları ile gerçekleştirilen HAD analizlerinde, soğutma sıvısının hareket ettiği geometrinin soğutma verimine doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, soğutma plakalarının kanal yapısının ısı transferini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.
- Yapılan optimizasyon çalışması ile hücre iç direnci %12,6 oranında azaltılmış ve batarya kapasite kaybı %3,45 oranında iyileştirilmiştir. Böylelikle, gerçekleştirilen çalışma ile sıcaklığın pil ömrü üzerindeki doğrudan etkisi ortaya koyularak, doğal kaynakların daha verimli kullanılması ve pil performansının sürdürülebilirliğinin artırılması sağlanmaktadır.

Soğutma plakalarının ve batarya termal yönetim sistemlerinin optimizasyonu üzerine yapılan detaylı analizlerle, optimum tasarıma sahip dolaylı sıvı temaslı soğutma yöntemiyle, elektrikli araç bataryalarının ömrünün ve performansının artırılacağı ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

- Ansys. (2023). Ansys Fluent User's Guide. <https://courses.ansys.com/>
- Aris, A. M., & Shabani, B. (2017). An Experimental Study of a Lithium Ion Cell Operation at Low Temperature Conditions. *Energy Procedia*, 110(December 2016), 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.117>
- Avcı, B., Yerlikaya, S., & Kardeş, Y. (2020). *Batarya Yenilikçi Enerji Teknolojileri Çalışma Grubu Raporu*. https://tusside.tubitak.gov.tr/sites/images/Tusside/batarya_ve_yenilikci_enerji_teknolojileri_calisma_grubu_raporu.pdf
- Chen, S., Zhang, G., Zhu, J., Feng, X., Wei, X., Ouyang, M., & Dai, H. (2022). Multi-objective optimization design and experimental investigation for a parallel liquid cooling-based Lithium-ion battery module under fast charging. *Applied Thermal Engineering*, 211(December 2021), 118503. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118503>
- Chen, Y., & Evans, J. W. (1993). Heat Transfer Phenomena in Lithium/Polymer-Electrolyte Batteries for Electric Vehicle Application. *Journal of The Electrochemical Society*, 140(7), 1833–1838. <https://doi.org/10.1149/1.2220724>
- Citi. (2021). Electric Vehicle Transition: EVs Shifting From Regulatory to Supply Chain Driven Disruption (Issue February).
- Deng, Y., Feng, C., E, J., Zhu, H., Chen, J., Wen, M., & Yin, H. (2018). Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review. *Applied Thermal Engineering*, 142(April), 10–29. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.06.043>
- Duan, J., Tang, X., Dai, H., Yang, Y., Wu, W., Wei, X., & Huang, Y. (2020). Building Safe Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles: A Review. In *Electrochemical Energy Reviews* (Vol. 3, Issue 1). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/s41918-019-00060-4>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.06.111>
- He, L., Jing, H., Zhang, Y., Li, P., & Gu, Z. (2023). Review of thermal management system for battery electric vehicle. *Journal of Energy Storage*, 59(November 2022), 106443. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106443>
- He, W., Ye, F., Lin, J., Wang, Q., Xie, Q., Pei, F., Zhang, C., Liu, P., Li, X., Wang, L., Qu, B., & Peng, D. L. (2021). Boosting the Electrochemical Performance of Li- and Mn-Rich Cathodes by a Three-in-One Strategy. *Nano-Micro Letters*, 13(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s40820-021-00725-0>

- Helms, H., Kämper, C., & Lambrecht, U. (2015). Carbon dioxide and consumption reduction through electric vehicles. In *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-377-5.00002-9>
- Henke, M., & Hailu, G. (2020). Thermal management of stationary battery systems: A literature review. *Energies*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/en13164194>
- Hu, Y., Choe, S. Y., & Garrick, T. R. (2021). Measurement of heat generation rate and heat sources of pouch type Li-ion cells. *Applied Thermal Engineering*, 189(August 2020), 116709. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116709>
- Huber, C., & Kuhn, R. (2015). Thermal management of batteries for electric vehicles. In *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-377-5.00013-3>
- Huo, Y., Rao, Z., Liu, X., & Zhao, J. (2015). Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate. *Energy Conversion and Management*, 89, 387–395. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.015>
- International Energy Agency. (2023). Global EV Outlook 2023. *Geo, Geo*, 9–10.
- Jaguemont, J., Boulon, L., & Dubé, Y. (2016). A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures. *Applied Energy*, 164, 99–114. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.034>
- Jaguemont, J., & Van Mierlo, J. (2020). A comprehensive review of future thermal management systems for battery-electrified vehicles. *Journal of Energy Storage*, 31(May), 101551. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101551>
- Jiang, Z. Y., Li, H. B., Qu, Z. G., & Zhang, J. F. (2022). Recent progress in lithium-ion battery thermal management for a wide range of temperature and abuse conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(15), 9428–9459. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.008>
- Jiyuan Tu, Guan-Heng Yeoh, Chaoqun Liu, K. (2020). *Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Temelleri ve Uygulamaları* (3rd ed.). Palme Kitapevi.
- Li, H., Kong, X., Liu, C., & Zhao, J. (2019). Study on thermal stability of nickel-rich/silicon-graphite large capacity lithium ion battery. *Applied Thermal Engineering*, 161(May), 114144. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114144>
- Li, J., & Zhu, Z. (2014). *Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles*. 1–67.
- Li, L., Xu, C., Chang, R., Yang, C., Jia, C., Wang, L., Song, J., Li, Z., Zhang, F., Fang, B., Wei, X., Wang, H., Wu, Q., Chen, Z., He, X., Feng, X., Wu, H., & Ouyang, M. (2021). Thermal-responsive, super-strong, ultrathin firewalls for quenching thermal runaway in high-energy battery modules. *Energy Storage Materials*, 40(April), 329–336. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.05.018>
- Liu, C., Xu, D., Weng, J., Zhou, S., Li, W., Wan, Y., Jiang, S., Zhou, D., Wang, J., & Huang, Q. (2020). Phase change materials application in battery thermal management system: A review. *Materials*, 13(20), 1–37. <https://doi.org/10.3390/ma13204622>

- Ma, S., Jiang, M., Tao, P., Song, C., Wu, J., Wang, J., Deng, T., & Shang, W. (2018). Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review. *Progress in Natural Science: Materials International*, 28(6), 653–666. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002>
- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- Monika, K., & Datta, S. P. (2022). Comparative assessment among several channel designs with constant volume for cooling of pouch-type battery module. *Energy Conversion and Management*, 251(July 2021), 114936. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114936>
- Nascimento, M., Novais, S., Ding, M. S., Ferreira, M. S., Koch, S., Passerini, S., & Pinto, J. L. (2019). Internal strain and temperature discrimination with optical fiber hybrid sensors in Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 410–411(October 2018), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.10.096>
- Niu, J., Xie, N., Zhong, Y., gao, X., Fang, Y., & Zhang, Z. (2021). Numerical analysis of battery thermal management system coupling with low-thermal-conductive phase change material and liquid cooling. *Journal of Energy Storage*, 39(January), 102605. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102605>
- Olabi, A. G., Maghrabie, H. M., Adhari, O. H. K., Sayed, E. T., Yousef, B. A. A., Salameh, T., Kamil, M., & Abdelkareem, M. A. (2022). Battery thermal management systems: Recent progress and challenges. In *International Journal of Thermofluids* (Vol. 15, Issue June). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100171>
- Omar, N., Van den Bossche, P., Mulder, G., Daowd, M., Timmermans, J. M., Mierlo, J. V., & Pauwels, S. (2011). Assessment of performance of lithium iron phosphate oxide, nickel manganese cobalt oxide and nickel cobalt aluminum oxide based cells for using in plug-in battery electric vehicle applications. <https://doi.org/10.1109/VPCC.2011.6043017>
- Ouyang, M., Feng, X., Han, X., Lu, L., Li, Z., & He, X. (2016). A dynamic capacity degradation model and its applications considering varying load for a large format Li-ion battery. *Applied Energy*, 165, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.063>
- Pakrouh, R., Hosseini, M. J., Bahrampoury, R., Ranjbar, A. A., & Borhani, S. M. (2021). Cylindrical battery thermal management based on microencapsulated phase change slurry. *Journal of Energy Storage*, 40(January), 102602. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102602>
- Patil, S. R., Lokavarapu, B. R., & Thaliyanveedu, H. K. (2023). Optimization of battery cooling system used in electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 58(May 2022), 106299. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106299>
- Pesaran, A. A. (2001). Battery Thermal Management in EVs and HEVs : Issues and Solutions. *Advanced Automotive Battery Conference, January*, 10.

- Pesaran, A. A., Burch, S., & Keyser, M. (1999). An Approach for Designing Thermal Management Systems for Electric and Hybrid Vehicle Battery Packs Preprint. *The Fourth Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition 24-27, January*, 1–18.
- Polat, D. Keles, Ö. (2012). Lityum İyon Pil Teknolojisi. *Türk Mühendis ve Mimarlar Odalar Birliği METALURJİ MÜHENDİSLERİ ODASI*, 42–48. https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi162/d162_4248.pdf
- Qian, Z., Li, Y., & Rao, Z. (2016). Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling. *Energy Conversion and Management*, 126, 622–631. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.063>
- Quintiere, J. G. (2020). On methods to measure the energetics of a lithium ion battery in thermal runaway. *Fire Safety Journal*, 111(September 2019), 102911. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102911>
- Rao, Z., & Wang, S. (2011). A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4554–4571. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.096>
- Ren, D., Hsu, H., Li, R., Feng, X., Guo, D., Han, X., Lu, L., He, X., Gao, S., Hou, J., Li, Y., Wang, Y., & Ouyang, M. (2019). A comparative investigation of aging effects on thermal runaway behavior of lithium-ion batteries. *ETransportation*, 2, 100034. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100034>
- Roe, C., Feng, X., White, G., Li, R., Wang, H., Rui, X., Li, C., Zhang, F., Null, V., Parkes, M., Patel, Y., Wang, Y., Wang, H., Ouyang, M., Offer, G., & Wu, B. (2022). Immersion cooling for lithium-ion batteries – A review. *Journal of Power Sources*, 525(August 2021), 231094. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231094>
- Rothgang, S., Rogge, M., Becker, J., & Sauer, D. U. (2015). Battery design for successful electrification in public transport. *Energies*, 8(7), 6715–6737. <https://doi.org/10.3390/en8076715>
- Schott, B., Püttner, A., & Müller, M. (2015). The market for battery electric vehicles. *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*, 35–54. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-377-5.00003-0>
- Shirazi, A. H. N., Mohebbi, F., Azadi Kakavand, M. R., He, B., & Rabczuk, T. (2016). Paraffin Nanocomposites for Heat Management of Lithium-Ion Batteries: A Computational Investigation. *Journal of Nanomaterials*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/2131946>
- Shura. (2019). *Enerji ve Ulaştırma Sektörleri Dönüşümünde Batarya Teknolojilerinin Rolü: Eğilimler, Fırsatlar ve Yenilikçi Uygulamalar*. www.shura.org.tr
- Smith, J., Hinterberger, M., Hable, P., & Koehler, J. (2014). Simulative method for determining the optimal operating conditions for a cooling plate for lithium-ion battery cell modules. *Journal of Power Sources*, 267, 784–792. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.06.001>
- Suresh Patil, M., Seo, J. H., & Lee, M. Y. (2021). A novel dielectric fluid immersion cooling technology for Li-ion battery thermal management. *Energy Conversion and Management*, 229(September 2020), 113715. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113715>

- Tan, J., Cannon, A., & Ryan, E. (2020). Simulating dendrite growth in lithium batteries under cycling conditions. *Journal of Power Sources*, 463(April), 228187. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228187>
- Tang, X., Zhang, G., Wang, X., Wei, G., Han, G., Zhu, J., Wei, X., & Dai, H. (2021). Investigating the critical characteristics of thermal runaway process for LiFePO₄/graphite batteries by a ceased segmented method. *IScience*, 24(10), 103088. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103088>
- Wang, N., Li, C., Li, W., Chen, X., Li, Y., & Qi, D. (2021). Heat dissipation optimization for a serpentine liquid cooling battery thermal management system: An application of surrogate assisted approach. *Journal of Energy Storage*, 40(May), 102771. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102771>
- Warner, J. (2015). *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design Chemistry, Components, Types and Terminology*. Elsevier.
- Wu, C., Zhao, J., Liu, C., & Rao, Z. (2023). Performance and prediction of baffled cold plate based battery thermal management system. *Applied Thermal Engineering*, 219(PA), 119466. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119466>
- Wu, W., Wang, S., Wu, W., Chen, K., Hong, S., & Lai, Y. (2019). A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. *Energy Conversion and Management*, 182(December 2018), 262–281. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.051>
- Wu, W., Yang, X., Zhang, G., Ke, X., Wang, Z., Situ, W., Li, X., & Zhang, J. (2016). An experimental study of thermal management system using copper mesh-enhanced composite phase change materials for power battery pack. *Energy*, 113, 909–916. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.119>
- Yin, B., Zuo, S., Xu, Y., & Chen, S. (2022). Performance of liquid cooling battery thermal management system in vibration environment. *Journal of Energy Storage*, 53(July), 105232. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105232>
- Zhang, Q., Cao, G., & Zhang, X. (2023). Study of wet cooling flat heat pipe for battery thermal management application. *Applied Thermal Engineering*, 219(PA), 119407. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119407>
- Zhang, X., Li, Z., Luo, L., Fan, Y., & Du, Z. (2022). A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Energy*, 238, 121652. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121652>
- Zhao, Y., Zou, B., Zhang, T., Jiang, Z., Ding, J., & Ding, Y. (2022). A comprehensive review of composite phase change material based thermal management system for lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167(June), 112667. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112667>
- Zore, K. Parkhi, G., & Sasanapuri, B. Varghese, A. (2019). *ANSYS MOSAIC POLY-HEXCORE MESH FOR HIGH-LIFT AIRCRAFT CONFIGURATION*. 1–11.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ziyaettin ATILGAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : Devam ediyor, Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Programı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2021 yılı itibari ile Elektrikli Araç Batarya sektöründe Tasarım Mühendisi olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

Atılğan Z., Yiğit C., (2023, 01-03, Haziran). Investigation Of The Effect Of Pipe Arrangement On Cooling Performance Of Lithium-Ion Battery Used In Electric Vehicles By Computational Fluid Dynamics Method. 5.*International Young Researchers Student Congress*, 5.1, (422-433), Antalya, Turkey.