ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BATARYA PAKETİ SOĞUTMA SİSTEMLERİ PERFORMANS ANALİZİ VE İYİLEŞTİRME YÖNETEMLERİNİN İNCELENMESİ

Sevgül GAMSIZ

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BATARYA PAKETİ SOĞUTMA SİSTEMLERİ PERFORMANS ANALİZİ VE İYİLEŞTİRME YÖNETEMLERİNİN İNCELENMESİ

Sevgül GAMSIZ
0000-0003-2017-7906

Prof. Dr. Muhsin KILIÇ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2026
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA BATARYA PAKETİ SOĞUTMA SİSTEMLERİ PERFORMANS ANALİZİ VE İYİLEŞTİRME YÖNETEMLERİNİN İNCELENMESİ

Sevgül GAMSIZ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

Bu tez çalışmasında, elektrikli araç bataryalarında kullanılmak üzere tasarlanan soğutucu plakaların tasarımının termal ve hidrolik performansı aşamalı ve sistematik bir yaklaşımla incelenmiştir. İlk aşamada, literatürde yaygın olarak kullanılan ölçüler esas alınarak tasarlanan referans bir soğutucu plaka üzerinde yalnızca sıvı soğutma analizleri ile kanal yüksekliği ve toplam plaka kalınlığı gibi geometrik parametrelerin maksimum yüzey sıcaklığı, sıcaklık homojenliği ve basınç kaybı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Referans geometriye ait sıvı soğutma davranışı belirlendikten sonra, aynı yapı üzerine faz değiştiren malzemeler entegre edilerek hibrit soğutma sistemleri analiz edilmiştir. Bu aşamada, FDM kullanımının maksimum sıcaklık ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmanın bir sonraki aşamasında, daha gerçekçi bir soğutucu plaka tasarımı elde edebilmek amacıyla prizmatik bir $LiFePO_4$ pilin geometrik ölçüleri esas alınarak soğutucu plaka yeniden düzenlenmiştir. Bu geometri üzerinde geniş bir Reynolds sayısı aralığında yalnızca sıvı soğutma analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, Reynolds ve Nusselt sayıları kullanılarak soğutucu plakanın ısı transferi davranışı boyutsuz parametreler üzerinden incelenmiş ve tasarımın farklı akış koşulları için genelleştirilebilir bir çerçevede değerlendirilmesi sağlanmıştır. Son aşamada ise, gerçek pil boyutlarına göre düzenlenen soğutucu plaka tasarımına faz değiştiren malzemeler entegre edilerek hibrit soğutma sistemi analiz edilmiştir. Bu analizler ile sıvı soğutmanın yetersiz kaldığı düşük Reynolds sayısı bölgelerinde FDM katkısıyla hibrit soğutma sisteminin termal performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, soğutucu plaka tasarımında kanal geometrisi, akış koşulları ve FDM kullanımının batarya ısıl yönetimi üzerindeki etkilerini sistematik ve genelleştirilebilir bir bakış açısıyla ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: LFP, Batarya termal yönetimi, HAD, Hibrit soğutma, Faz değiştiren malzeme (FDM)
2026, xvi + 81 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

PERFORMANCE ANALYSIS AND IMPROVEMENT METHODS FOR BATTERY PACK COOLING SYSTEMS IN ELECTRIC VEHICLES

Sevgül GAMSIZ

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

Supervisor: Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

In this thesis study, the thermal and hydraulic performance of the design of cooling plates intended for use in electric vehicle batteries has been investigated through a staged and systematic approach. In the first stage, only liquid cooling analyses were performed on a reference cooling plate designed based on dimensions commonly used in the literature, and the effects of geometric parameters such as channel height and total plate thickness on the maximum surface temperature, temperature uniformity, and pressure drop were examined. After determining the liquid cooling behavior of the reference geometry, hybrid cooling systems were analyzed by integrating phase change materials into the same structure. At this stage, the effects of PCM usage on the maximum temperature and temperature distribution were evaluated.
In the next stage of the study, in order to obtain a more realistic cooling plate design, the cooling plate was rearranged based on the geometric dimensions of a prismatic $LiFePO_4$ battery. On this geometry, only liquid cooling analyses were carried out over a wide range of Reynolds numbers. For this reason, the heat transfer behavior of the cooling plate was examined through dimensionless parameters using Reynolds and Nusselt numbers, and the design was evaluated within a generalizable framework for different flow conditions. In the final stage, phase change materials were integrated into the cooling plate design arranged according to the actual battery dimensions, and the hybrid cooling system was analyzed. Through these analyses, the thermal performance of the hybrid cooling system with PCM contribution was evaluated in low Reynolds number regions where liquid cooling is insufficient. The obtained results present the effects of channel geometry, flow conditions, and PCM usage on battery thermal management from a systematic and generalizable perspective.

Key words: LFP, Battery thermal management, CFD, Hybrid cooling, Phase change material(PCM)
2026, xvi + 81 pages.

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmam süresince bilgi birikimi, yönlendirmeleri ve her aşamadaki destekleriyle bana rehberlik eden değerli danışmanım Prof. Dr. Muhsin Kılıç'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Akademik gelişimimde büyük rol oynayan hocam, yüksek lisans dönemimde beni projesine kabul ederek burs almamı sağlamış; doktora sürecinde ise beni önererek BATEG projesinde yer almama vesile olmuştur. Lisans bitirme projemden itibaren bana gösterdiği güven, sağladığı akademik vizyon ve yol gösterici yaklaşımı, bu tezin ortaya çıkmasında büyük rol oynamıştır.

BATEG projesine kabul edilmemi sağlayarak burs ve laboratuvar imkanları sunan, akademik gelişimime önemli katkılarda bulunan Prof. Dr. Gökhan Sevilgen'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecimi finansal olarak destekleyen TÜBİTAK 1004 Mükemmeliyet Merkezi Destek Programı kapsamında desteklenen 22AG001 numaralı Elektrikli Taşıtlar İçin Batarya Teknolojileri Araştırma ve Geliştirme Platformu'na (BATEG) ve TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Yaşamım boyunca yanımda olup karakterim ile akademik duruşumun şekillenmesinde rol oynayıp, bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Nilgün Ümmügül Şentürk'e, abim Serhan Şentürk'e ve merhum babam Seven Şentürk'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her döneminde koşulsuz desteğini hissettiğim, sabrı ve anlayışıyla beni ayakta tutan "Hayallerinin peşinden git" diyerek bana güç vererek doktora sürecini sürdürebilmem için en önemli motivasyonu sağlayan eşim Furkan Gamsız'a teşekkürlerimi sunarım.

Yoğun ve zaman zaman yıpratıcı olabilen bu akademik süreçte sevgisiyle, neşesiyle ve varlığıyla moral kaynağım olan can dostum Alice'e de teşekkürlerimi sunarım.

Akademik yolculuğum boyunca gerek idari gerek teknik konularda yardımcı olan Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Fakültesi Bölümündeki ve Fen Bilimleri Enstitüsündeki çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Sevgül GAMSIZ
20/01/2026

İÇİNDEKİLER

Sayfa
ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xiii
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLERİ ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
2.1. Li-iyon Bataryaların Yapısı 4
2.1.1. Lityum İyon Batarya Çeşitleri 6
2.2. Batarya Soğutma Sistemleri 8
2.2.1. Hava ile soğutma yöntemleri 9
2.2.2. Sıvı ile soğutma yöntemleri 10
2.2.3. Faz değiştiren malzemeler ile soğutma yöntemleri 14
3. MATERYAL ve YÖNTEM 18
3.1. Referans Soğutucu Plaka Geometrisinin Tanımlanması 19
3.2. Sayısal Modelleme 20
3.2.1. Ağdan bağımsızlık çalışması 21
3.2.2. Model doğrulaması 22
3.2.3. Malzemeler ve termofiziksel özellikler 23
3.2.4. Korunum denklemleri 24
3.3. Taguchi Tabanlı Gri İlişki Analizi 27
3.4. $LiFePO_4$ (LFP) Batarya Hücresi ve Deney Düzeneği 30
3.4.1. Isıl çiftlerin pil üzerine yerleştirilmesi 32
3.4.2. Termal test kabininin kullanımı ve sıcaklık kontrolü 33
3.4.3. Veri toplama sistemi 34
3.5. Lityum İyon Pilin Modellenmesi 35
3.5.1. ECM modeli 36
3.5.2. Newman P2D modeli 36
3.5.3. NTGK Modeli 36
3.6. Pilin Sayısal Modelinin Parametreleri 38
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 40
4.1. Referans Geometriye Ait Sıvı Soğutma Bulguları 40
4.2. Referans Geometriye Ait Hibrit Soğutucu Plaka Bulguları 44
4.2.1. Akışkan Debisinin 0,001 kg/s Olduğu Durumun Değerlendirilmesi 45
4.2.2. Akışkan Debisinin 0,005 kg/s Olduğu Durumun Değerlendirilmesi 47
4.2.3. Akışkan Debisinin 0,01 kg/s Olduğu Durumun Değerlendirilmesi 48
4.3. Pilin Deneysel Test Bulguları 51
4.3.1 Gerçek Prizmatik LFP Pilin Deneysel Bulguları ve Sayısal Doğrulaması 51
4.3.2. Deneysel Sıcaklık–Zaman Sonuçlarının İncelenmesi 52
4.3.3. NTGK Tabanlı Pil Modelinin Deneysel Verilerle Doğrulanması 54
4.4. Pil Boyutlarındaki Soğutucu Plakada Geniş Reynolds Sayısı Aralığında Sıvı Soğutma Bulguları 55
4.5. Pil Modellemesi Dahil Edilen Hibrit Soğutma Bulguları 61
4.5.1. Reynolds Sayısının Hibrit Sistem Üzerindeki Etkisi 63
4.5.2. Kanal Yüksekliğinin Hibrit Soğutma Sistemi Performansı Üzerindeki Etkisi 65
4.5.3. FDM Türü ve Hacminin Hibrit Soğutma Sistemi Performansı Üzerindeki Etkisi 66
4.5.4. Pil Modellemesi Dahil Edilen Sistemde Sadece Su Soğutma Bulguları 68

5. SONUÇ 71
KAYNAKLAR 73
ÖZGEÇMİŞ 81

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
cp	Özgül ısısı [J/(kg·K)]
f	Sürtünme katsayısı
h_s	Duyulur ısı
g	Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
k	Isı iletim katsayısı [W/(m·K)]
k_{FDM}	Faz değiştiren malzemenin ısıl iletkenliği [W/(m·K)]
μ	Viskozite [Pa·s]
Nu	Nusselt Sayısı
Pr	Prandtl Sayısı
Re	Reynolds Sayısı
T	Sıcaklık [K]
V	Voltaj [V]
β	Sıvı fraksiyonu
$\vec{v}$	Hız (m/s)
Δ	Fark

Kısaltmalar	Açıklama
BIYS	Batarya Isılyönetim Sistemi
CFD	Computational Fluid Dynamics
EGS	Etilen Glikol Su
FDM	Faz Değiştiren Malzeme
GİA	Gri İlişki Analizi
LCO	Lityum Kobalt Oksit
LFP	Lityum Demir Fosfat
LMO	Lityum Manganez Oksit
LTO	Lityum Titanat Oksit
NCA	Nikel Kobalt Alüminyum Oksit
NMC	Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit
MSMD	Multi-Scale Multi-Domain
ECM	Equivalent Circuit Model
NTGK	Newman, Tiedemann, Gu Ve Kim

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Lityum iyon pillerin yapısı A) Silindirik B) Prizmatik C) Kese tipi.....	4
Şekil 2.2.	Lityum iyon pilin çalışma mekanizması.....	5
Şekil 2.3.	Farklı tipteki Lityum iyon pillerin karşılaştırılması.....	7
Şekil 2.4.	Kanal tasarımı A) Mini kanallı soğutucu B) Sayısal analiz modeli.....	11
Şekil 2.5.	Bakır malzeme kullanılan mini kanalda giriş kesitine paralel alanlardaki sıcaklık değişimi (K) A) z=0 mm B) z=5 mm C) z=10mm D) z= 15 mm E) z=20 mm.....	12
Şekil 2.6.	Farklı soğutma plakası yapıları A) Dışbükey yapı B) Bal peteği yapısı C) Kanatçık yapısı D) U-şekilli yapı.....	13
Şekil 3.1.	Tez kapsamında izlenen sayısal ve deneysel çalışmaların akış şeması.....	19
Şekil 3.2.	Soğutucu plaka tasarımı ve boyutsal tanımlar A) Üç boyutlu genel görünüm B) Kanal giriş-çıkışı.....	20
Şekil 3.3.	Referans geometrili soğutucu plaka kanal geometrisi ve sabit ısı akısı uygulaması.....	21
Şekil 3.4.	Referans geometri için ağdan bağımsızlık çalışması.....	22
Şekil 3.5.	Deneylerde kullanılan pil A) EVE LF105 prizmatik hücre B) Deneylerde kullanılan pil hücresi.....	31
Şekil 3.6.	Isıl çift bağlanmış LFP hücresi.....	32
Şekil 3.7.	Termal test kabini içinde bataryanın konumlandırılması.....	33
Şekil 3.8.	Batarya test cihazı ve veri toplama sistemi.....	34
Şekil 3.9.	Pil geometrisinin oluşturulması A) Pilin 3B geometrisinin oluşturulmuş hali B) Pil için oluşturulan üç boyutlu ağ yapısı	38
Şekil 4.1.	Optimum tasarıma göre dağılımlar A) Alt yüzeydeki sıcaklık dağılımı B) Akışkan bölgesindeki hız dağılımı.....	44
Şekil 4.2	Faz değiştiren malzeme eklenmiş referans geometri A) Akışkan ve FDM bölgeleri B) Radyus verilmesi sonucu hız dağılımı.....	45
Şekil 4.3	Akışkan debisinin 0.001 kg/s değeri için sıcaklık homojenliği.....	46
Şekil 4.4	Akışkan debisinin 0,001 kg/s değeri için üst yüzeydeki maksimum sıcaklık.....	46
Şekil 4.5	Akışkan debisinin 0,005 kg/s değeri için sıcaklık homojenliği.....	47
Şekil 4.6.	Akışkan debisinin 0,005 kg/s değeri için üst yüzeydeki maksimum sıcaklık.....	48
Şekil 4.7.	Akışkan debisinin 0,01 kg/s değeri için sıcaklık homojenliği.	49
Şekil 4.8.	Akışkan debisinin 0,01 kg/s değeri için üst yüzeydeki maksimum sıcaklık.....	49
Şekil 4.9.	Referans Geometrili hibrit soğutucu plakada sıcaklık dağılımları A) Orta yüzey B) Üst yüzey.....	50
Şekil 4.10.	20°C ve 25°C sıcaklıklarında 1C ve 2C deşarj testlerinden elde edilen deneysel gerilim–zaman eğrileri.....	52

Şekil 4.11. 20˚C'de 1C ve 2C deşarj sonucunda elde edilen sıcaklık-zaman eğrileri..... 53
Şekil 4.12. 25˚C'de 1C ve 2C deşarj sonucunda elde edilen sıcaklık-zaman eğrileri..... 53
Şekil 4.13. Her kanal yüksekliği için Reynolds sayına göre maksimum sıcaklık ve basınç kaybı değişimi..... 56
Şekil 4.14. Re = 4000 için soğutucu plakanın alt yüzeyindeki sıcaklık dağılımları A) H_c=8mm B) H_c=12 mm C) H_c=16 mm..... 57
Şekil 4.15. Re = 4000 için soğutucu plakada akışkan basınç dağılımları A) H_c=8mm B) H_c=12 mm C) H_c=16 mm..... 58
Şekil 4.16. Her kanal yüksekliği için Reynolds sayına göre Nusselt sayısı ve ısı taşınım katsayısı..... 60
Şekil 4.17. Hibrit sistemde Reynolds sayısının maksimum sıcaklık üzerindeki etkisi (RT25HC, 7.5–5, 8 mm) 63
Şekil 4.18. RT25HC faz değiştiren malzemesi ile büyük FDM hacmi için farklı kanal yüksekliklerinde pil dış yüzeyinde elde edilen sıcaklık dağılımları A) H_c=4mm B) H_c=8mm C) H_c= 12 mm D) H_c=16 mm..... 67

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Faz değiştiren malzemelerin avantaj ve dezavantajları.....	15
Çizelge 3.1	Kim ve Jarrett (2011) çalışması ile yapılan model doğrulaması sonuçlarının karşılaştırılması.....	23
Çizelge 3.2	Soğutucu akışkanlar ve alüminyumun termofiziksel özellikleri..	23
Çizelge 3.3.	Faz değiştiren malzemelerin termofiziksel özellikleri.....	24
Çizelge 3.4.	Sıvı soğutmalı referans geometriye ait Taguchi L9 matrisi.....	28
Çizelge 3.5.	LFP bataryanın genel özellikleri.....	31
Çizelge 3.6.	LFP pilin malzeme özellikleri.....	39
Çizelge 4.1.	Referans geometriye ait sıvı soğutma analizi sonuçları.....	40
Çizelge 4.2.	Referans geometriye ait sonuçların sinyal gürültü oranları.....	42
Çizelge 4.3.	Normalizasyon ve gri ilişki derecesi sonuçları.....	43
Çizelge 4.4.	Her kanal yüksekliği için Reynolds sayına göre değişen hız, ısı taşınım katsayısı ve Nusselt sayısı değerleri.....	59
Çizelge 4.5.	Pil modelinin dahil olduğu hibrit soğutma sonuçları.....	62
Çizelge 4.6.	Pil modelinin dahil edildiği sıvı soğutma sonuçları.....	69

1. GİRİŞ

Sanayi devrimi sonrasında gelişen teknolojilerle birlikte enerjiye duyulan ihtiyaç giderek artmış ve bu talep fosil yakıtlarla uzun yıllar karşılanmıştır. Ancak fosil yakıtların sınırlı ömürlerinin yanında sera gazı oluşturarak küresel ısınmaya ve hava kirliliğine neden olmalarından dolayı alternatif temiz ve sürdürülebilir enerjiye yönelim olmuştur.
Bu yönelimden en fazla etkilenen alanlar petrolün en çok kullanıldığı ulaşım sektörü olmuştur. Özellikle elektrikli araçlar teknolojileri ile son yıllarda önemli gelişmeler gözlenmiştir.

Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların sahip oldukları yüksek enerji yoğunluğu aracın menzilini ve performansını etkilemektedir. Ancak bataryalarda şarj ve deşarj süreçleri sırasında gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda ısı açığa çıkmaktadır ve bu ısı ortamdan uzaklaştırılmazsa bataryanın performansı ve ömrü olumsuz yönde etkilenmektedir. Oluşan yüksek sıcaklıklar bataryanın ömrünü kısaltmaktadır. Batarya yüzeyi boyunca sıcaklığın homojen dağılım göstermemesi de yerel sıcaklık artışlarına ve istenmeyen güvenlik sorunlarına yol açabilmektedir. Bu nedenle elektrikli araçlarda batarya ısıl yönetim sistemlerinin bulunması büyük önem arz etmektedir ve görevi sadece ısıyı uzaklaştırırken oluşan maksimum sıcaklığı düşürmek değil aynı zamanda sıcaklığın batarya boyunca homojen bir dağılım göstermesini de sağlamaktır.

Bataryalarda oluşan ısının uzaklaştırılması ve sıcaklıkların kontrol altında tutulması için hava, sıvı ve faz değiştiren malzemelerin kullanıldığı çeşitli soğutma yöntemleri geliştirilmiştir. Hava soğutma sistemleri basit yapıları ve düşük maliyetleri ile faz değiştiren malzemeler ise sahip oldukları gizli ısı kapasiteleri nedeniyle tercih edilmektedir. Yüksek ısı üretiminin olduğu durumlarda en çok tercih edilen soğutma sıvı soğutma yöntemleridir. Sıvı soğutmada boru ve kanallara sahip olan soğutucu plakalar elektrikli araçlarda yaygın olarak tercih edilmektedir ve literatürde de birçok araştırmacı tarafından kanal geometrisi ile kullanılan akışkan türlerinin termal performans üzerindeki etkileri araştırılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, bataryanın ısıl yönetimi için kullanılan soğutucu plaka tasarımının performansı aşamalı olarak incelenmiştir. İlk aşamada, temel ölçüleri literatürden alınarak tasarlanan referans geometride farklı akışkanlar kullanılarak kanal geometrisi ve akış koşullarının maksimum yüzey sıcaklığı, sıcaklık homojenliği ve basınç kaybı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ardından bu tasarım sonuçlara uyum sağlayacak şekilde düzenlenmiş ve faz değiştiren malzeme de geometriye eklenerek hibrit soğutma analizleri gerçekleştirilerek hibrit sistemin soğutma performansına olan katkısı incelenmiştir. Yapılan tasarımlarda yaygın kullanıma sahip prizmatik $LiFePO_4$ pil boyutları esas alınmış ve soğutucu plaka geometrisi pilin ölçülerine göre düzenlenmiştir. Bu tasarım için geniş bir Reynolds sayısı aralığında sıvı akışkanla soğutma analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, ısı transferi ve akışkanlar mekaniğinde kullanılan boyutsuz parametreler olan Reynolds ve Nusselt sayıları ile parametrik bir çalışma yürütülerek tasarımın genelleştirilebilir bir çerçevede incelenmesi sağlanmıştır. Son aşamada ise, prizmatik pil çalışma karakteristikleri deneysel verilerle doğrulanmış ve daha sonra da doğrulanan pil modeli soğutucu plaka sistemine dâhil edilerek hibrit soğutma analizleri gerçek çalışma koşulları altında tamamlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLERİ ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Elektrikli araçlarda yaygın olarak kurşun-asit (Pb-asit), nikel-kadmiyum (Ni-Cd), nikel-metal hidrit (Ni-MH) ve lityum-iyon bataryalar kullanılmaktadır (Kim, 2019). Bu batarya türleri; enerji yoğunluğu, çevrim ömrü, maliyet ve çevresel etkiler açısından birbirlerinden farklı özellikler göstermektedir.

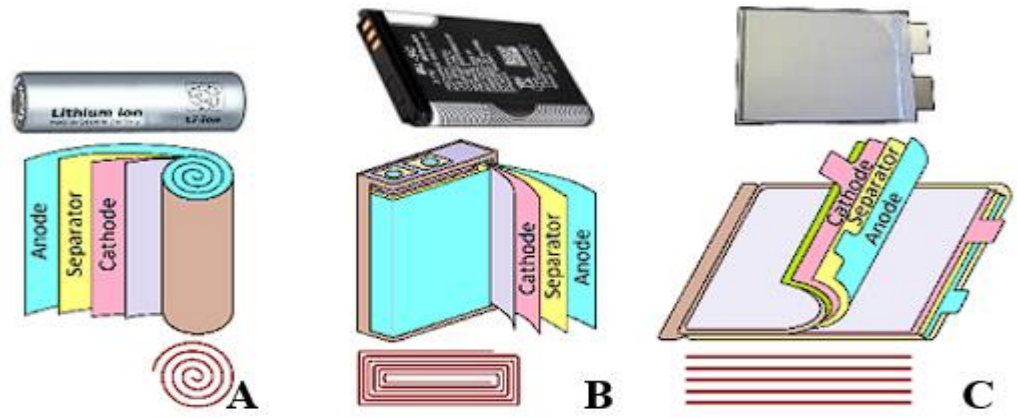
İlk olarak kurşun-asit bataryalar kendi kendine deşarj oranlarının düşüklüğü, uzun yaşam döngüsü ve geniş çalışma sıcaklığı aralığıyla öne çıkmaktayken (Lach vd., 2021; Dong vd., 2021; Mandal vd., 2021), sınırlı enerji yoğunluğu, uzun şarj süresi ve çevresel kirliliğe neden olmaları gibi önemli dezavantajlara da sahiptir (Nazghelichi vd., 2021; Bulut ve Özcan, 2021; Samanta ve Chowdhuri, 2021). Nikel-kadmiyum bataryaların da çalışma sıcaklığı aralığı geniş olmasına rağmen ağır metal içermeleri nedeniyle çevresel risk taşımaktadır ve hafıza etkisine sahip olmaları, maliyetlerinin yüksek olması ayrıca yüksek kendi kendine deşarj oranının yüksek olması sebebiyle kullanım alanları sınırlandırılmaktadır (Martinez-Bolanos vd., 2020). Nikel-metal hidrit bataryalar ise toksik olmamaları ve güvenilir yapılarıyla dikkat çekerken yüksek sıcaklıklarda kendi kendine deşarj oranları artmakta ve enerji yoğunlukları da diğer türlere kıyasla nispeten daha düşük olduğu için performansları sınırlıdır. (Ouyang vd., 2017; Silvestri vd., 2020).

Bu batarya türleri arasında lityum-iyon bataryalar, yüksek özgül enerji ve güç değerleri, uzun çevrim ömürleri ve kararlı ısıl davranışları sayesinde elektrikli araç uygulamaları için en uygun seçenek olarak öne çıkmaktadır (Polat ve Keleş, 2012; Celen ve Kaba, 2021; Wang vd., 2016; Miao vd., 2019). Ancak lityum-iyon bataryalarda şarj ve deşarj süreçleri sırasında gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle ısı oluşmaktadır ve bu ısının etkin biçimde uzaklaştırılamaması durumunda performans kayıpları, termal kaçaklar ve güvenlik riskleri ortaya çıkabilmektedir (Chen vd., 2005; Smith ve Wang, 2006; Wang vd., 2012).

Bu nedenle lityum-iyon bataryaların ısıl davranışlarının anlaşılması ve oluşan fazla ısının etkin biçimde uzaklaştırılmasına yönelik ısıl yönetim yöntemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu bölümde, öncelikle lityum-iyon bataryaların özellikleri ele alındıktan sonra bataryalarda kullanılan soğutma yöntemleri ve bu alandaki literatürde yer alan çalışmalar incelenmektedir.

2.1. Li-iyon Bataryaların Yapısı

Lityum-iyon bataryalar, depoladıkları kimyasal enerjiyi elektrokimyasal reaksiyonlar aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştüren enerji depolama sistemleridir (Tie ve Tan, 2013) ve hücrelerin yapılarına göre silindirik, prizmatik ve kese (pouch) tipinde olacak şekilde sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.1). Lityum-iyon bataryalar anot, katot, elektrolit ve ayırıcıdan oluşmaktadır. (Handjipaschalis, 2009; Lukic, 2008)



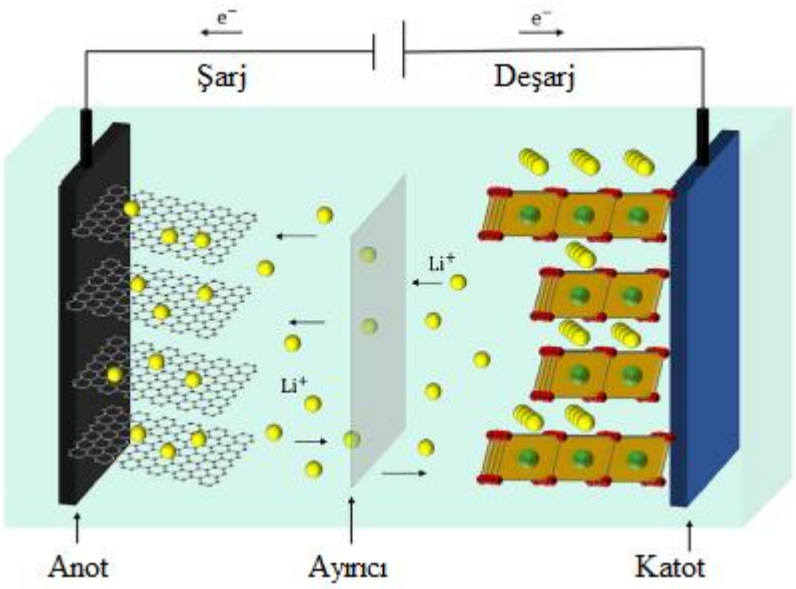
Şekil 2. 1. Lityum iyon pillerin yapısı **A)** Silindirik **B)** Prizmatik **C)** Kese tipi

Li-iyon bataryalarda katot yani pozitif elektrot çoğunlukla metal oksit veya fosfat esaslı bileşiklerden ($LiCoO_2$, $LiNiO_2$, $LiFePO_4$ gibi) oluşurken, anot olarak adlandırılan negatif elektrotta ise yüksek güvenilirliği nedeniyle grafit tercih edilmektedir. Elektrolit, lityum iyonlarının anot ve katot arasında taşınmasını sağlarken, ayırıcı ise iki elektrodun doğrudan temasını önleyecek şekilde elektriksel yalıtım görevini üstlenmektedir.

Lityum iyon bataryaların çalışması (Şekil 2.2) şu şekilde gerçekleşir: Şarj cihazı pile bağlandığı zaman katot (+) elektrotunda Li atomları metal oksit ya da fosfattan ayrılır

ancak Li atomu çok kararsız yapıda olduğu için hemen Li iyonuna (Li^+) ve bir elektrona (e-) ayrışmaktadır. Oluşan Li^+ iyonları elektrolit boyunca akarak anoda doğru çekilir ve grafit katmanlarında depolanmaktadır.

Elektronlar ise negatif yüklerinden dolayı elektrolitten geçemez bu nedenle şarj cihazını kullanarak harici devre üzerinden anota doğru akmaktadır. Li^+ iyonlarının önemli bir kısmının anotta depolanmasıyla pil şarjlı hale gelmektedir (Vidyanandan, 2019). Deşarj işlemi yani pilin bir yüke bağlanması durumunda da bu olayın tersi gerçekleşmektedir (Stan, 2014). Anottaki Li^+ iyonları yine elektrolit aracılığıyla katoda doğru hareket ederken, elektronlar da harici devre üzerinden katoda akarak elektrik enerjisi üretmektedir. Li^+ iyonlarının katota geri dönmesiyle pil deşarj olmuştur ve tekrar şarj edilmek durumundadır (Vidyanandan, 2019).



Şekil 2. 2. Li-iyon pilin çalışma mekanizması (Cheng 2021)

Lityum demir fosfat ($LiFePO_4$) kimyası için şarj ve deşarj süreçlerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonların denklemleri aşağıda (Denklem 1.1a–1.1c) gösterilmektedir.

$$FePO_4 + Li^+ + e^- \leftrightarrow LiFePO_4 \qquad (1.1\ a)$$

$$LiC_6 \leftrightarrow C_6 + Li^+ + e^- \quad (1.1\ b)$$

$$LiC_6 + FePO_4 \leftrightarrow C_6 + LiFePO_4 \quad (1.1\ c)$$

Katotta meydana gelen indirgenme reaksiyonunda $FePO_4$ yapısı, lityum iyonu (Li^+) ve bir elektron (e^-) alarak $LiFePO_4$ fazına dönüşmektedir (Denklem 1.1 a). Anotta ise grafit yapısındaki LiC_6 bileşiği oksidasyona uğrayarak C_6 yapısına geri dönmekte, lityum iyonu ve elektron açığa çıkarmaktadır (Denklem 1.1b). Bu iki yarı reaksiyonun birleşimi sonucunda elde edilen toplam hücre reaksiyonu (Denklem 1.1c), lityum iyonlarının anot ve katot arasında geri dönüşümlü hareketine dayanmaktadır.

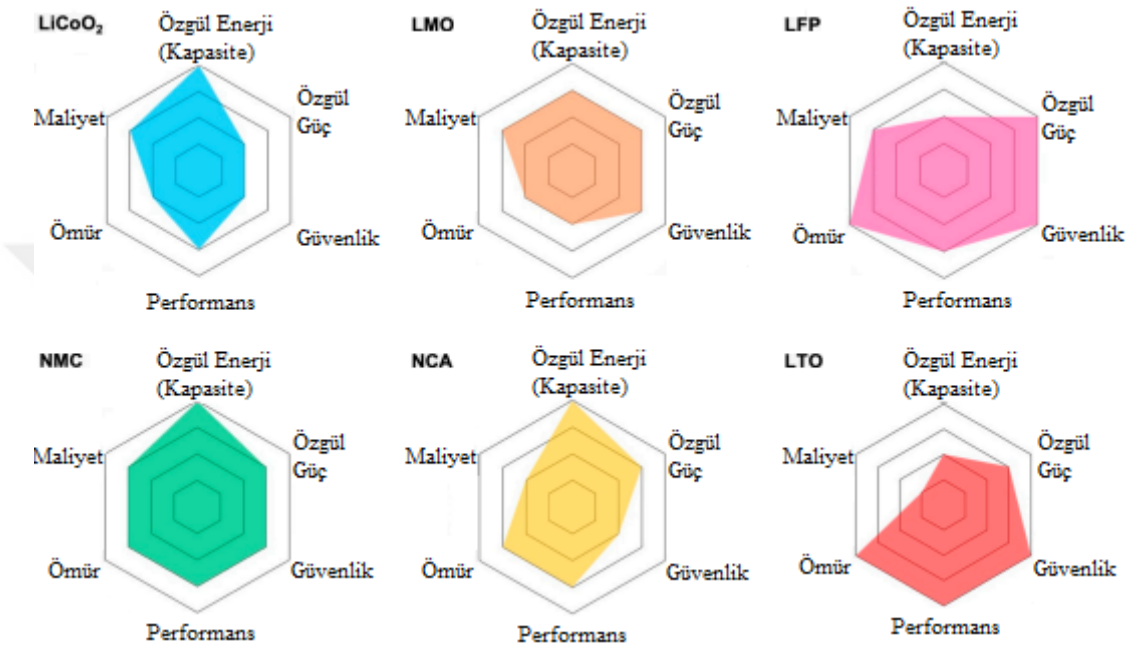
Böylelikle $LiFePO_4$ tabanlı hücreler, yüksek çevrim ömrü ve güvenlik düzeyleriyle öne çıkmaktadır (Padhi vd., 1997; Goodenough ve Kim, 2010).
Şarj ve deşarj süreçleri sırasında lityum iyonlarının anot ve katot arasında hareketiyle grafit yapının hacminde değişimler meydana gelmektedir. Bu hacimsel değişim, özellikle pil hücresinin kalınlığında fark edilebilir bir değişme olarak ortaya çıkarak literatürde "hücre solunumu" olarak adlandırılmaktadır. Hücre solunumu, modül tasarımında mekanik gerilmelere neden olduğu içi dikkate alınmalıdır. (Gerlitz, 2021).

2.1.1. Lityum İyon Batarya Çeşitleri

Lityum-iyon bataryalar, hücre geometrisine ek olarak katot elektrotunda kullanılan aktif malzemeye göre de sınıflandırılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan başlıca Li-iyon batarya kimyaları sınıflandırma şu şekilde özetlenmektedir.

- Lityum Kobalt Oksit ($LiCoO_2$) ya da LCO
- Lityum Manganez Oksit ($LiMn_2O_4$) ya da LMO
- Lityum Titanat ($Li_4Ti_5O_{12}$) ya da LTO
- Lityum Demir Fosfat ($LiFePO_4$) ya da LFP
- Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit ($LiNiMnCoO_2$) ya da NMC
- Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit ($LiNiCoAlO_2$) ya da NCA

Li-iyon bataryalar farklı katot malzemeleri kullanılarak üretilmekte ve bu malzeme seçimi, bataryaların özgül enerji, özgül güç, güvenlik, çevrim ömrü, maliyet ve performans gibi temel kriterlerdeki başarımını doğrudan etkilemektedir. Şekil 2.3'te görüldüğü üzere, her bir batarya kimyası bu parametreler açısından farklı avantajlar ve sınırlılıklar sunmaktadır.



Şekil 2. 3. Farklı tipteki Li-iyon pillerin karşılaştırılması (Koech vd., 2024)

Şekil 2.3'te verilen veriler göz önünde bulundurulduğunda LCO bataryalar yüksek özgül enerjiye sahip olmaları nedeniyle taşınabilir elektroniklerde yaygın olarak kullanılırken, güvenlik ve maliyet açısından daha zayıftır.

LMO bataryalar maliyet ve güvenlik avantajı sunmasına rağmen performans ve ömürleri görece daha kısadır. NMC bataryalar dengeli performansları ile elektrikli araç sektöründe en çok tercih edilen tipler arasında yer almaktadır. NCA bataryalar yüksek enerji yoğunluklarına rağmen güvenlik açısından zayıf oldukları için ek tedbirler gerektirmektedir. LTO bataryalar yüksek güvenlik ve uzun çevrim ömrü sunmaktadır ancak düşük özgül enerji ve yüksek maliyet dezavantajına sahiptir (Nagaura ve Tozawa, 1990; Scrosati ve Garche, 2010).

Bu batarya kimyaları arasında lityum demir fosfat (LFP) bataryalar ise ısıl ve kimyasal kararlılığa sahip olmaları, uzun çevrim ömürleri ve güvenlik avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Termal kaçak riskinin düşük olması sayesinde yüksek güvenlik gerektiren uygulamalarda kullanım açısından öne çıkmaktadır. LFP hücreler, NMC ve NCA gibi nikel ve kobalt içeren pillere kıyasla daha düşük özgül enerjiye sahip olmalarına karşın uzun çevrim ömürleri ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılıkları sayesinde enerji depolama sistemleri ve ağır hizmet araçlarında tercih edilmektedir (Scrosati ve Garche, 2010; Wang vd., 2016; Wang vd., 2012).

2.2. Batarya Soğutma Sistemleri

Lityum-iyon bataryaların verimli ve güvenli çalışabilmesi, belirli sıcaklık aralıklarının korunmasına bağlıdır. Literatürde, bu bataryaların ideal çalışma sıcaklık aralığının yaklaşık 15 °C ile 50 °C arasında olduğu ve bu sınırların dışına çıkıldığında bataryaların çevrim ömrü önemli ölçüde kısaldığı belirtilmektedir (Rezvanizaniani vd., 2014). Özellikle 60 °C'nin üzerinde güvenlik açısından ciddi riskler ortaya çıkmaktadır bu nedenle, bataryaların optimum performans ve güvenlikle çalışabilmesi için sıcaklıklarının 15 °C ile 35 °C arasında tutulması önerilmekte (Tie ve Tan, 2013) ve modüller arasındaki sıcaklık farkının ise 5 °C'yi aşmaması gerekmektedir (Pesaran, 2002).

Bataryaların bu belirtilen güvenli sıcaklık koşulları altında çalışabilmesi için bataryadan açığa çıkan fazla ısının uzaklaştırılması aynı zamanda da batarya yüzeyinde sıcaklığın da homojen bir dağılım göstermesi gerekmektedir. Öte yandan, düşük sıcaklık koşullarında bataryaların performans kaybına uğramaması için belirli sıcaklık seviyelerine kadar ısıtılması da sağlanmalıdır. Tüm bu gereklilikleri karşılamak amacıyla, bataryalarda ısıl yönetim sistemleri (BIYS) kullanılmaktadır. Elektrikli araçlarda BIYS kapsamında hava, sıvı ve faz değiştiren malzemeler tek başına ya da birlikte kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında bataryanın soğutulması için kullanılan çalışmalara odaklanılmıştır.

2.2.1. Hava ile soğutma yöntemleri

Soğutma sistemleri arasında en yaygın ve düşük maliyetli yöntem, hava soğutma sistemleridir. Hava ile soğutma doğal taşınıma dayalı olan pasif soğutma ve fan veya üfleyicilerin eklenmesiyle oluşturulan aktif soğutma olmak üzere iki grupta ele alınmaktadır. Pasif hava soğutma yöntemi hafif, basit ve düşük maliyetli olmasına karşın yalnızca düşük enerji yoğunluklu pillerde etkili olabilmektedir. Buna karşın aktif hava soğutma yönteminde ise fan ve üfleyiciler sayesinde ısı transfer katsayısı artırılabilmekte ancak sistem karmaşıklaşmakta enerji tüketimi de artmaktadır.

Literatürde hava soğutma yöntemlerine yönelik birçok sayısal ve deneysel çalışma bulunmaktadır. Fan vd. (2013) prizmatik lityum-iyon hücreleri içeren hava soğutmalı bir modülün üç boyutlu geçici termal analizini sayısal yöntemlerle incelemişlerdir. Her bir hücrenin her iki yanında eşit aralıklı hava kanalları kullanarak boşluk aralığının etkisini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, boşluk aralığının daraltılması ve/veya fan debisinin artırılması maksimum sıcaklık artışını azaltmakta, ancak sıcaklık homojenliğinin sağlanabilmesi için aralığın orta büyüklükte tutulması gerektiğini vurgulamışlardır.

Wang vd. (2014) farklı hücre düzenlemelerinin ve fan konumunun soğutma performansı üzerindeki etkilerini sayısal olarak inceleyip çalışmalarında, fanın modülün üst kısmına yerleştirildiği durumda en iyi soğutma performansının elde edildiğini göstermişlerdir. Ayrıca, zorlanmış hava soğutmalı sistemde soğutma etkisi ve maliyet açısından kübik düzenlemenin en uygun seçenek olduğunu, ancak modülün alan kullanımı dikkate alındığında altıgen düzenlemenin daha avantajlı olduğu belirtilmektedir.

Yang vd. (2015) bir $LiFePO_4$ pil paketi için farklı silindirik hücre düzenlemelerinin soğutma performansı üzerindeki etkilerini analiz edip, boyuna ve enine aralık değişimlerinin yanı sıra hizalanmış ve kademeli dizileri karşılaştırmıştır. Analiz sonuçlarına göre, sıcaklık artışı, sıcaklık homojenliği, güç gereksinimi ve soğutma performansı açısından boyuna aralığın 34 mm, enine aralığın ise 32 mm olduğu hizalı pil takımı düzeninin makul bir soğutma sistemi tasarımı sunduğu belirtilmiştir.

Choi ve Kang (2014) ise uygun bir termal yönetim sistemi geliştirmek amacıyla, hava soğutmalı bir lityum-iyon pil sisteminin termal davranışını açıklayan basit bir modelleme metodolojisi önermiş ve yaptıkları testlerle sonuçları doğrulamışlardır.

2.2.2. Sıvı ile soğutma yöntemleri

Hava ile soğutmada sınırlı kapasitede ısı uzaklaştırıldığı için özellikle yüksek güç yoğunluğuna sahip elektrikli araçlarda sıvı ile soğutma yöntemleri tercih edilmektedir. Sıvı soğutma sistemleri, doğrudan soğutma ve dolaylı soğutma olarak iki ana grupta sınıflandırılmaktadır.

Doğrudan temaslı sıvı soğutma yöntemlerinde kullanılan soğutucu akışkan hücre yüzeyiyle doğrudan temas etmektedir. Bu yöntemde kısa devre riskini önlemek amacıyla soğutucu akışkanın yalıtkan özellik (örneğin mineral yağlar) göstermesi gerekmektedir. Ancak bu tip akışkanların yüksek viskoziteye sahip olmaları pompalama gücünün dolayısıyla da enerji tüketiminin de yüksek olmasına neden olmaktadır (Berber, 2019).

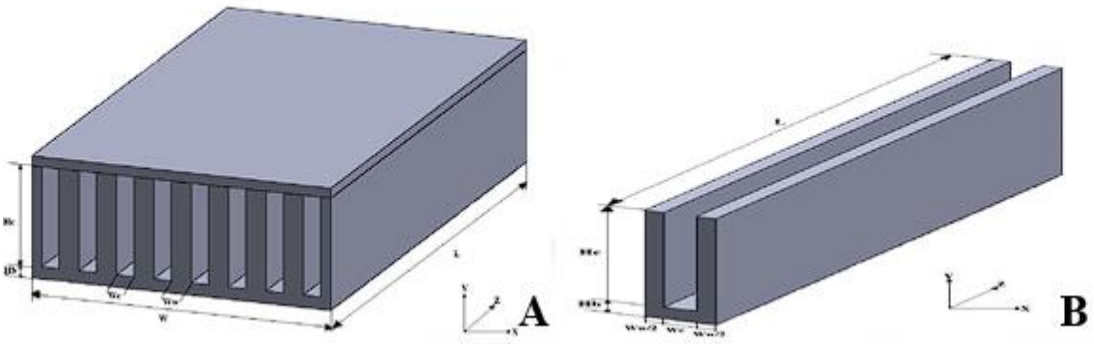
Dolaylı sıvı soğutma yöntemin daha yaygın kullanılmakta olup bu yöntemde soğutucu akışkan, hücreler arasında veya batarya etrafında bulunan boru ve kanallar içinde dolaşmaktadır. En sık tercih edilen su ve glikol bazlı akışkanlar, doğrudan temasta kullanılan yağlara kıyasla daha düşük viskoziteye sahip olmalarının yanı sıra daha yüksek ısıl iletkenlik göstermektedir. Ayrıca farklı tip soğutucu akışkanların kullanıldığı çalışmalar da bulunmaktadır.

Wang vd. (2017) yaptıkları çalışmada prizmatik lityum-iyon piller için termal silikon plakalara dayalı yeni bir pil soğutma sistemi tasarlayıp deneysel ve sayısal olarak farklı sayıda soğutma kanalıyla, akış hızlarıyla ve farklı deşarj oranlarındayken akış yönleriyle ilişkili soğutma kapasitesini analiz etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, termal silikon plakaların ve sıvı kanalların sayısı arttıkça pil içerisinde ulaşılan maksimum sıcaklığın azaldığını, akış yönünün ise soğutma kapasitesi üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Ayrıca giriş akış hızındaki artışın belirli bir eşik değerine kadar

performansı önemli ölçüde iyileştirdiği, ancak bu değerin üzerinde performansın hızlı bir şekilde azaldığı ortaya konmuştur.

Du vd. (2018) 18 silindirik hücre içeren iki özdeş gerçek pil modülü üretip mini kanallı soğutma sistemli ve soğutma sistemsiz durumun sıcaklığını, akışkan olarak 25 °C'de su kullanıp 1C ve 1,5C deşarj hızlarında deneysel olarak araştırmıştır. Soğutma uygulanmadığında sıcaklığın 69,5 °C'ye kadar yükseldiğini, mini kanallı soğutma sistemi kullanıldığında ise 1C deşarj oranında ortalama sıcaklığın %43,7 ve sıcaklık farkının da %65,9 azalırken 1,5C durumunda ise sıcaklığın %47,3 ve sıcaklık farkının %63,6 oranında azaldığını gösterilmiştir.

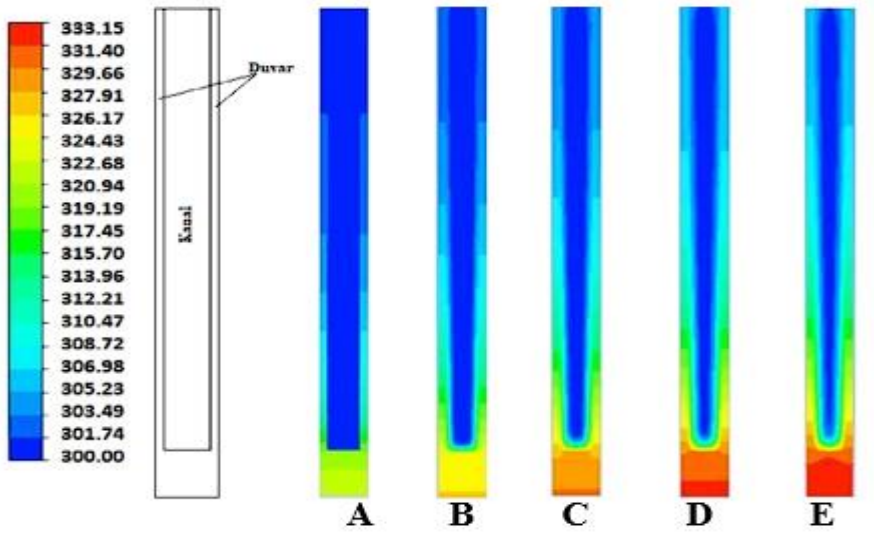
Kılıç ve Şentürk (2019) yaptıkları sayısal çalışmada 100W/cm^2 ısı akısı üreten bir yonganın soğutulması için 20 mm x 20 mm taban yüzey alanına (Şekil 2.4) sahip mini kanallı su soğutmalı bloğun tasarımında üç farklı malzeme (bakır, alüminyum ve silikon) ve kanal boyutlarının optimizasyonunu gerçekleştirmiştir.



Şekil 2. 4. Kanal tasarımı **A)** Mini kanallı soğutucu **B)** Sayısal analiz modeli

Değerlendirmede maksimum yüzey sıcaklığı ve basınç kaybı dikkate alınmış, analizlerde Çok Yanıtlı Taguchi Yöntemi uygulanmıştır. Laminer akış koşulunda sıcaklık ve basınç kaybı açısından en uygun performansı gösteren tasarımın kanal yüksekliği, kanal genişliği, duvar kalınlığı ve alt taban kalınlığı değerleri sırasıyla 9 mm, 0,6 mm, 0,3 mm ve 0,3 mm değerlerinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca soğutma bloğunun malzeme seçiminin ısıl performans üzerinde belirleyici olduğu (Şekil 2.5) ve ısıl iletim katsayısına

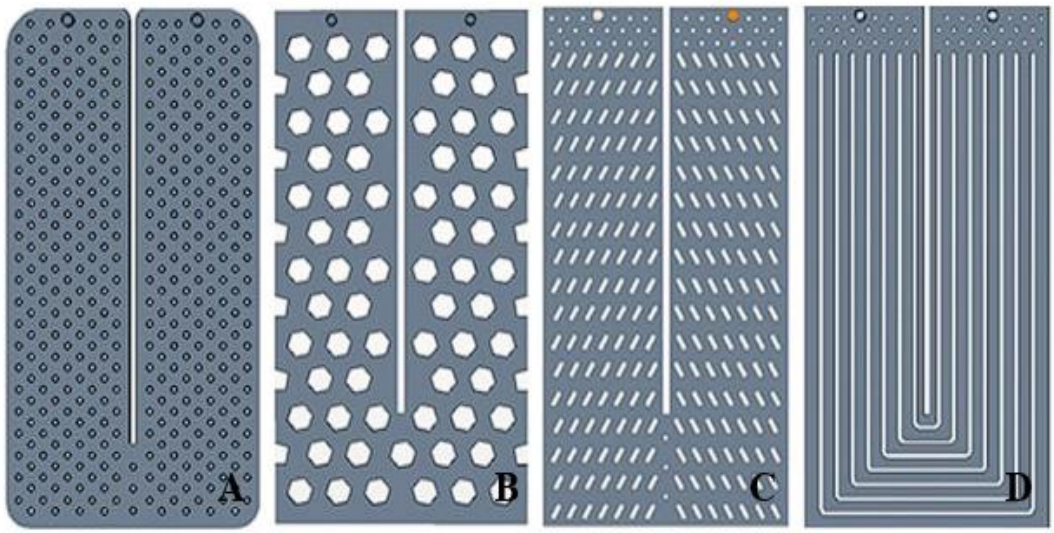
bağlı olarak en iyi sonuçların sırasıyla bakır, alüminyum ve silikon için elde edildiği ortaya konmuştur.



Şekil 2. 5. Bakır malzeme kullanılan mini kanalda giriş kesitine paralel alanlardaki sıcaklık değişimi (K) **A)** z=0 mm **B)** z=5 mm **C)** z=10 mm **D)** z= 15 mm **E)** z=20 mm

Hong vd. (2020) gerçek araç koşullarında geleneksel sıvı soğutma modülüyle aynı dış boyuta sahip sistemde iki fazlı soğutucu akışkan ile geleneksel sıvı soğutmayı deneysel olarak kıyaslamıştır. Çalışmada iki fazlı akışkan olarak R134a ve sıvı soğutma için de %50:50 oranında etilen glikol-su karışımını seçip, sıcaklık değişimlerinin soğutma kanalları üzerindeki etkilerini, hücre sıcaklığını ve pil hücreleri arasındaki sıcaklık farkını şarj hızı ve çevre koşulları değiştirilerek analiz edilmiştir. İki fazlı soğutucu akışkanlı soğutmada, pil hücrelerinde düşük sıcaklık ve üniform sıcaklık dağılımı elde etmek için maksimum soğutma performansının 0,85 buhar kalitesinde olduğu ve sıvı soğutucunun duyulur ısı transferinden çok daha yüksek bir ısı transfer katsayısı gösterdiği ayrıca iki fazlı soğutucu akışkan soğutmanın, zorlu çevre koşullarında bile maksimum hücre sıcaklığı limitini (45°C) karşılarken, sıvı soğutmada ise bu limitin aşıldığını gözlenmiştir. Araştırmacılar, bu nedenle iki fazlı akışkanlı soğutmanın elektrikli araçlarda geleneksel sıvı soğutmanın yerine tercih edilebileceğini önermektedir.

Li vd. (2020), dikdörtgen piller için daha verimli bir soğutma plakası geliştirmek amacıyla dört farklı iç yapıya (petek yapılı, U biçimli, kanatçıklı ve dışbükey yapılı) sahip plakanın üç boyutlu modellerini oluşturmuştur (Şekil 2.6). Çalışmada soğutucu akışkan olarak %50:50 oranında etilen glikol-su karışımı kullanılmış, farklı kütlesel debilerin etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Dışbükey yapılı soğutma plakasının diğer üç yapıya kıyasla daha iyi bir soğutma performansına sahip olduğunun ve kütlesel debinin artmasıyla pillerin kısa sürede soğutulmasında etkili olduğunun sonucuna varılmıştır.



Şekil 2. 6. Farklı soğutma plakası yapıları **A)** Dışbükey yapı **B)** Bal peteği yapısı **C)** Kanatçık yapısı **D)** U-şekilli yapı Li ve ark. (2020)

Sarchami vd. (2022), silindirik lityum-iyon pillerin sıcaklık kontrolü için dalgalı/merdiven kanallı sıvı soğutma ve bakır kılıf içeren bir termal yönetim sistemi geliştirmiştir. Çalışmada deşarj oranı, alümina nanoparçacık (Al_2O_3) konsantrasyonun, giriş akış hızının ve merdiven kanalı geometrisinin soğutma performansına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. %1 ve %2'lik hacimsel fraksiyonlarda gerçekleştirilen deneylerde, alüminyum nanoparçacık konsantrasyonunun artmasıyla maksimum sıcaklık ve sıcaklık farkının azaldığı, ayrıca akış hızındaki artışın da sıcaklık dağılımını daha homojen hale getirdiği bulunmuştur. Merdiven kanallı soğutmanın, düz kanallı yapıya kıyasla 5C deşarj altında maksimum sıcaklığı 3,59 K ve sıcaklık homojenliğini 0,65 K daha iyi hale getirdiği belirlenmiştir.

Feinauer vd. (2022) mevcut bir batarya modülü için alüminyum malzemeden yapılma soğutma plakalı su bazlı sıvı soğutma sistemi kurup, soğutma verimliliğini ve sıcaklık homojenliğini optimize etmek için sayısal bir çalışma yürüterek simülasyonda, pil takımı 3 C'ye kadar sürekli deşarj olurken, iki kese hücre başına yalnızca bir soğutma plakası kullanarak pillerin yeterli soğutulduğunu ortaya koymuştur.

Kılıç vd. (2023) hafif ticari bir elektrikli araçta kullanılan prizmatik lityum-iyon batarya paketi için yeni bir soğuk plaka tasarımı yaparak soğutma performansını çok yanıtlı optimizasyon yaklaşımıyla değerlendirmiştir. Çalışmada Taguchi deney tasarımı ile Gri İlişki Analizi (GİA) bir arada kullanılarak, kanal sayısı, kanal yüksekliği ve kütlesel debinin batarya yüzey sıcaklığı, sıcaklık dağılımının homojenliği ve basınç kaybı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Soğutucu akışkan olarak saf suya ek olarak %25 ve %50 etilen glikol-su karışımları kullanılmıştır. Sonuçlar, kanal sayısının sıcaklık homojenliği üzerinde en etkili parametre olduğunu, ancak etilen glikol oranının artmasıyla ısıl performansın azaldığını göstermiştir. Ayrıca çalışma kapsamında, farklı soğutucu akışkanlar ve geometrik koşullar için Nusselt sayısını öngörebilecek yeni bir ampirik korelasyon da önerilmiştir.

2.2.3. Faz değiştiren malzemeler ile soğutma yöntemleri

Belirli sıcaklıklarda faz değişimi sırasında (katı–sıvı veya sıvı–katı dönüşümleri) ısıl enerjiyi gizli ısı yoluyla depolayabilen veya yayabilen bu sayede de sıcaklık dalgalanmalarının bastırılması ve pik sıcaklıkların sınırlandırılmasında etkili olan malzemeler, faz değiştiren malzemeler (FDM) olarak tanımlanmaktadır. FDM'lerin batarya uygulamalarında etkin biçimde kullanılabilmesi için yüksek gizli ısı kapasitesi, yanıcı olmama, güvenilirlik, düşük maliyet, kolay temin edilebilirlik ve faz değişimi sırasında düşük hacim değişimi gibi özelliklere sahip olması gerekmektedir (Tütüncü, 2017). FDM'lerin faz değişimi sırasında çevresel etkileşimlerinin sınırlandırılması ve şekil kararlılığının sağlanabilmesi amacıyla, makro, mikro veya nano ölçeklerde kapsüllenmesi yaygın olarak tercih edilmektedir. Kapsülleme yöntemleri, malzemenin

sızıntı riskini azaltmakta ve uygulama güvenliğini artırmaktadır (Mert ve Mert, 2020; Zhao ve Zhang, 2011; Liu vd., 2016).

FDM'ler organik, inorganik ve ötektik olmak üzere üç temel sınıfta incelenmektedir (Sharma vd., 2009). Organik FDM'ler arasında parafin ve yağ asitleri yer alırken, inorganik FDM'lere metaller, alaşımlar ve tuz hidratlar, ötektik FDM'lere ise organik ve inorganik bileşenlerin belirli oranlardaki karışımları örnek olarak verilebilmektedir. Bu farklı sınıfların avantaj ve dezavantajları aşağıdaki Çizelge 2.1 ile özetlenmektedir.

Çizelge 2. 1. Faz değiştiren malzemelerin avantaj ve dezavantajları

FDM Türü	Avantajlar	Dezavantajlar
Organik	Kararlı kimyasal yapı, düşük aşırı soğuma eğilimi, yüksek gizli ısı kapasitesi, toksik ve tahriş edici olmamaları, düşük hacim değişikliği	Yanıcı olmaları, düşük ısıl iletkenlik
İnorganik	Yüksek gizli ısı depolama kapasitesi, yüksek ısıl iletkenlik, ucuz ve bulunabilirlik, yanıcı olmamaları	Aşırı soğuma eğilimi, faz bozulması, korozif yapı
Ötektik	Net faz değişim sıcaklığı	Belirtilmemiş

FDM'ler, sahip oldukları yüksek gizli ısı depolama kapasiteleri sayesinde lityum-iyon pillerin ısıl yönetiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kızılel vd. (2009), bir hücrede meydana gelen katastrofik arızanın bitişik hücrelere yayılmasını önlemek amacıyla FDM ve hava soğutmalı sistemleri karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Yapılan testlerde, yüksek termal iletkenliğe ve 185 J/g gizli ısı depolama kapasitesine sahip parafin mumunun, termal kaçak yayılımını %60 oranında azalttığı gösterilmiştir. Sonuç olarak tek bir hücrede kazara meydana gelen termal kaçağın, soğutma için bir FDM matrisi kullanılarak yayılmasının önlenebileceği gösterilmiştir.

Wilke vd. (2017), FDM içeren ve içermeyen elektrikli bisiklet pillerini çivi ile delerek termal kaçağın yayılımını incelemiştir. Çalışma sonucunda, faz değişimi olmayan pil

modüllerinde hücre sıcaklıklarının 189°C'ye ulaştığı, FDM kullanılan durumda ise bu sıcaklığın 109°C'nin altına düştüğü ve yangın riskinin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, FDM kullanılmayan testlerde ısı kaynaklı patlama meydana gelirken, FDM'li sistemlerde patlama önlenmiştir.

Zhao vd. (2017), FDM çekirdeklerini 18650 silindirik Li-iyon pillere yerleştirerek bir dahili soğutma tasarımını sayısal olarak inceleyip çalışmalarında, FDM çekirdek boyutunun optimum olarak 10 mm olması gerektiğini ve bu boyutta pil sıcaklığının 24°C civarında kontrol altında tutulabileceğini göstermişlerdir.

Li vd. (2014), metal köpük destekli FDM'lerin yüksek enerjili pillerdeki etkisini araştırarak, gözeneklilik ve gözenek yoğunluğunun termal performans üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. 1C deşarj oranında, metal köpük eklenmiş FDM'lerin en düşük pil yüzey sıcaklığına ulaştığı ve doğal taşınım sistemlerine kıyasla sıcaklığı daha iyi yönettiği belirlenmiştir.

Samimi vd. (2016), FDM içerisine farklı kütle fraksiyonlarında karbon fiber eklenerek yapılan deneylerde, karbon liflerinin ısıl iletkenliği artırdığını ve sıcaklık dağılımını daha homojen hale getirdiğini belirtmektedir.

Tek başına FDM uygulaması lityum-iyon pillerin soğutulmasında yeterli olmamaktadır. FDM malzeme katı fazdan sıvı faza geçerken pilde oluşan atık ısıyı önemli ölçüde absorbe eder ancak tamamen eridikten sonra etkisi sınırlanmaktadır. Bu nedenle FDM'lerin diğer soğutma yöntemleri ile kullanıldığı hibrit çalışmalar büyük önem taşımaktadır.

Rao vd. (2016), FDM ile mini kanallı soğutma sistemini birleştirerek üç boyutlu bir pil termal modeli tasarlayarak sayısal analizlerde, kanal sayısının 8'e çıkarılmasıyla maksimum pil sıcaklığının 308,15 K'ye (35°C) düştüğü ve sıcaklık farkının %30 oranında azaldığı tespit etmiştir.

Zhang vd. (2019), büyük boyutlu lityum iyon pil modülleri için FDM ve sıvı soğutmayı entegre eden bir termal yönetim sistemini deneysel olarak araştırarak hibrit sistemin, tek başına sıvı soğutmaya kıyasla maksimum pil sıcaklığını 10,6°C düşürdüğü ve sıcaklık farkını 1,7°C azalttığı gözlemlemiştir.

Yang vd. (2023), yeni bir gecikmeli soğutma stratejisiyle Z-tipi paralel soğutma kanalı ve FDM/alüminyum köpük kompozit içeren bir hibrit sıvı soğutucu plaka tasarımını sayısal olarak incelemiştir. Küçük FDM kompozit blokları içeren sistemin, yüksek deşarj hızlarında bile pil sıcaklığını 50°C'nin altında tuttuğu belirlenmiştir.

Mousavi vd. (2023), prizmatik pil paketleri için FDM ve sıvı soğutmayı birleştiren yeni bir hibrit soğutma sistemi önermiştir. 3 FDM plakalı sistemde, maksimum pil sıcaklığı 16,2 K daha düşük tutulduğu, sıcaklık farkı %33 azaltıldığı ve güç tüketiminin ise %68 oranında azaldığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak, FDM'ler, özellikle lityum iyon pil termal yönetiminde büyük potansiyel taşımaktadır. Ancak düşük ısıl iletkenlikleri nedeniyle tek başına yeterli olmayıp, metal köpükler, karbon fiberler veya sıvı soğutma sistemleri ile hibrit yapılar oluşturarak performansları artmaktadır. Günümüzde yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar, hibrit soğutma sistemlerinin pillerin termal yönetimini iyileştirdiğini ve güvenliklerini artırdığını ortaya koymaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

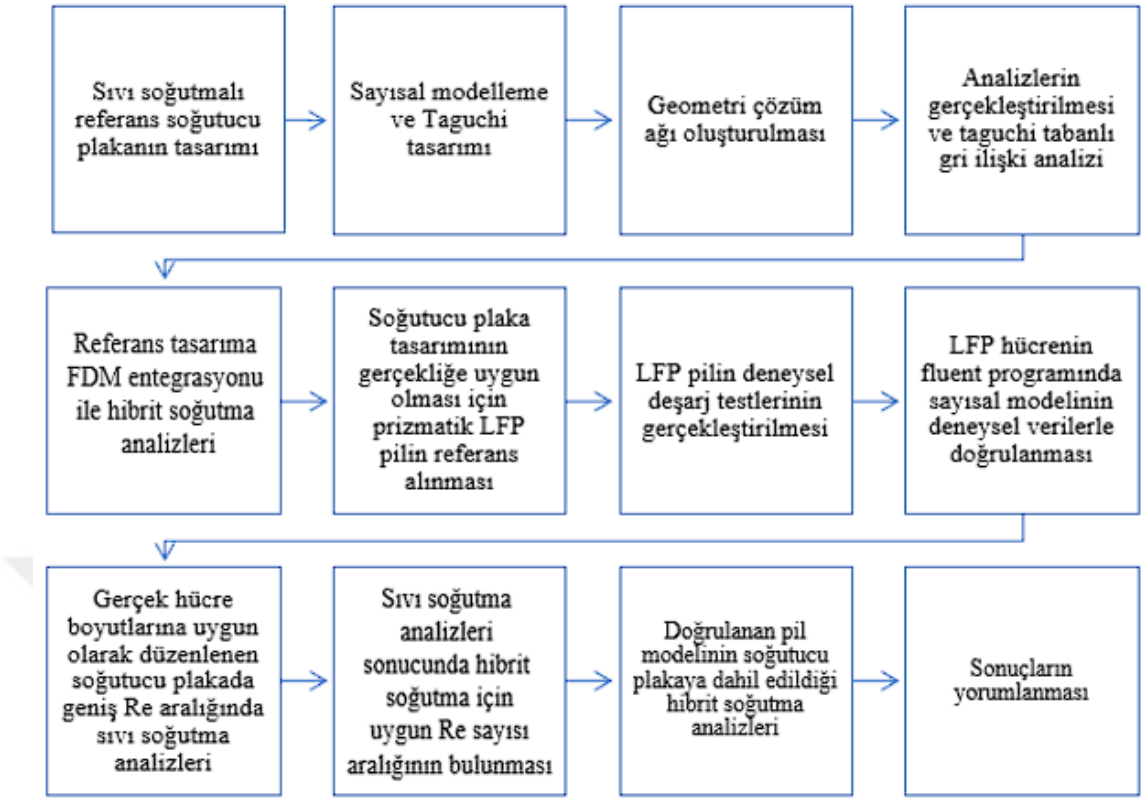
Bu tez çalışmasının temel amacı, batarya ısıl yönetiminde kullanılabilecek soğutucu plaka tasarımının ısıl ve hidrolik performansının farklı çalışma koşulları altında sayısal olarak incelenmesidir. Bu kapsamda çalışma, aşamalı ve sistematik bir yaklaşımla yürütülmüştür.

İlk aşamada, literatürde yaygın olarak kullanılan geometrik ölçüler esas alınarak sabit ısı akısına maruz kalan referans bir sıvı soğutmalı soğutucu plaka tasarımı oluşturularak kanal yüksekliği ile toplam plaka yüksekliğinin etkisini incelemek amacıyla Taguchi deney tasarımı yönteminden faydalanarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, maksimum yüzey sıcaklığı, sıcaklık homojenliği ve basınç kaybı kriterleri esas alınarak Taguchi tabanlı gri ilişki analizi ile değerlendirilmiştir.

Sıvı soğutma sonucunda soğutucu plakada yüksekliklerin soğutma performansına etkisi belirlendikten sonra aynı geometriye faz değiştiren malzemeler entegre edilerek hibrit soğutma analizleri gerçekleştirilerek faz değiştiren malzemelerin çalışma prensipleri ve soğutma performansına olan etkileri incelenmiştir.

Çalışmanın bir sonraki aşamasında soğutucu plaka tasarımının daha gerçekçi bir zemine oturtulması için prizmatik bir $LiFePO_4$ pil temin edilerek soğutucu plakanın geometrik ölçüleri geçek pilin ölçülerinde tekrar düzenlenmiştir. Düzenlenen geometride geniş bir Reynolds sayısı aralığında yalnızca sıvı soğutma analizleri gerçekleştirilerek soğutucu plaka tasarımı genelleştirilmiştir. Ardından pil farklı deşarj koşulları altında deneysel olarak test edilmiş ve elde edilen sıcaklık ile gerilim verileri kullanılarak pilin elektro-termal davranışı sayısal ortamda modellenmiş ve doğrulanmıştır.

Doğrulanan pil modeli de soğutucu plakaya dahil edilerek ve sıvı soğutmaya ek olarak faz değiştiren malzemenin de eklenmesiyle hibrit soğutma sistemi analiz edilmiştir. Böylece ısı akısı yerine gerçek pil davranışı altında hibrit bir soğutmanın soğutma performansı analiz edilip yorumlanmıştır.



Şekil 3. 1. Tez kapsamında izlenen sayısal ve deneysel çalışmaların akış şeması

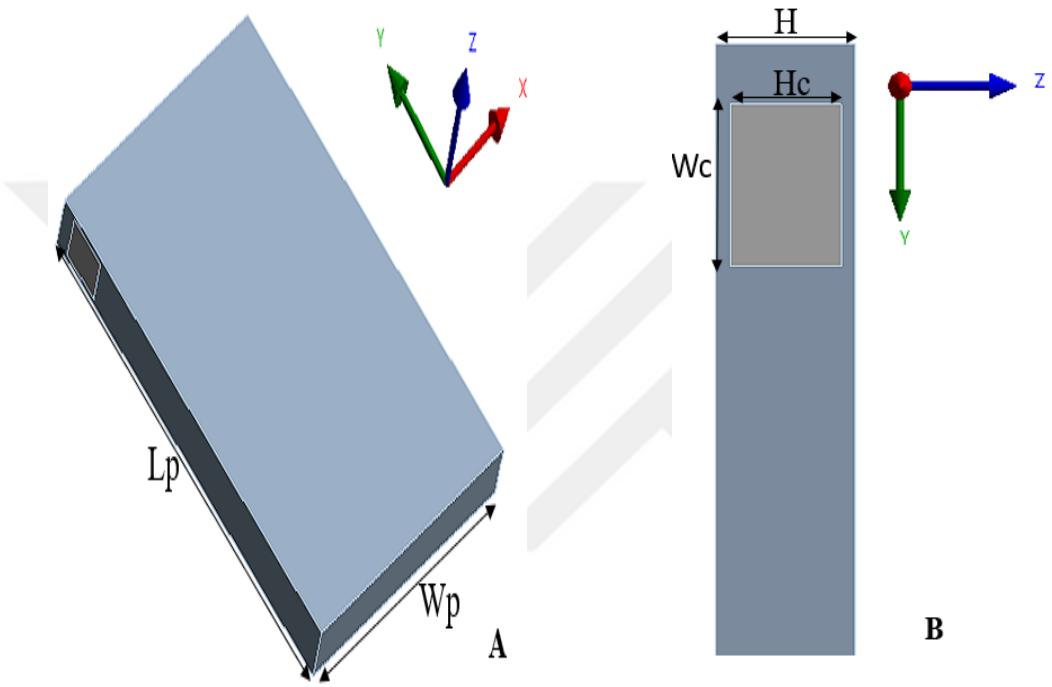
3.1. Referans Soğutucu Plaka Geometrisinin Tanımlanması

Bu tez çalışmasının ilk aşamalarında, elektrikli araç bataryaları için kullanılan sıvı soğutmalı bir soğutucu plakanın termal ve hidrolik davranışı incelenmiştir. Çalışmanın amacı, soğutucu plaka geometrisinde yer alan kanal ve plaka boyutlarının maksimum yüzey sıcaklığı, yüzey sıcaklık homojenliği ve basınç kaybı üzerindeki etkilerini belirlemek ve ilerleyen aşamalarda geliştirilecek hibrit soğutma sistemleri için referans bir tasarım oluşturmaktır.

Sayısal modelde kullanılan soğutucu plaka genişliği (W_p) 160 mm, uzunluğu (L_p) 200 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 3.2.a). Kanal genişliği (W_c) 20 mm değerinde sabit tutulurken, kanal yüksekliği (H_c) 3, 4 ve 6 mm değerlerindedir ve plakanın tam ortasında yer almaktadır (Şekil 3.2.b).

Buna karşılık olarak da toplam plaka yüksekliği (H) ise 8, 10 ve 12 mm olacak şekilde tasarım yapılmıştır. İlk çalışmada kanal dönüşleri özellikle keskin köşeli olarak

modellenerek akış ayrılmaları, ölü bölgelerin basınç kaybı üzerindeki etkilerinin gözlemlenmesi hedeflenmiştir (Şekil 3.2). İlerleyen çalışmalarda ise keskin köşelerin basınç kaybına ve dolayısıyla soğutma performansında da olumsuz etkilerinin azaltılması için köşelere radyus verilerek akışın daha düzgün ilerlemesi sağlanmıştır. Geometri ana hatlarıyla aynı kalmaktadır ancak gerçek pil temini ile boyutlar güncellenmiş olup bir sonraki bölümde değerleri verilecektir.



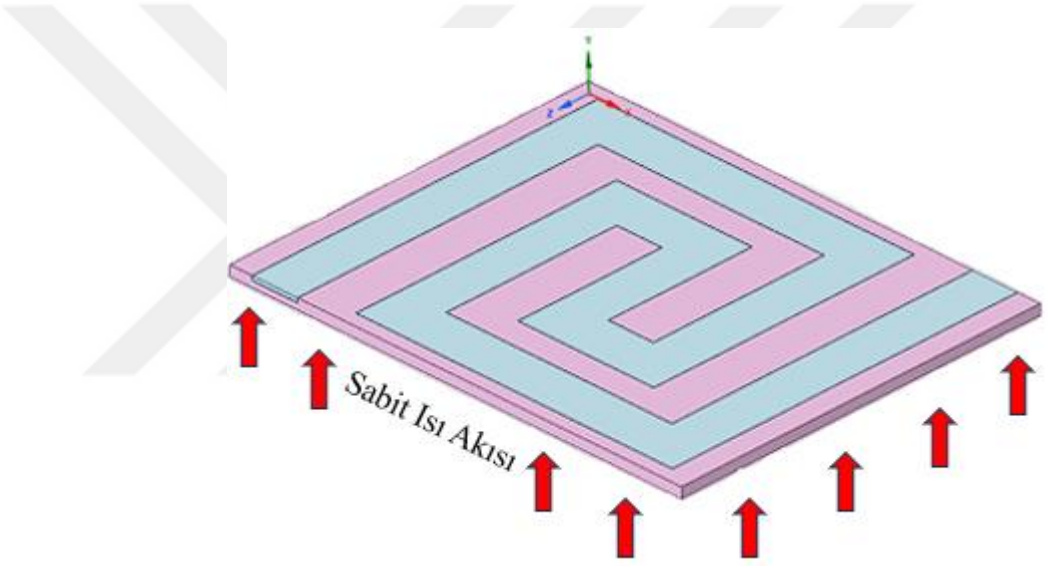
Şekil 3. 2. Soğutucu plaka tasarımı ve boyutsal tanımlar **A)** Üç boyutlu genel görünüm **B)** Kanal giriş-çıkışı

3.2. Sayısal Modelleme

Öncelikle pil modellenmediği için ve süreden tasarruf edilmek için bataryadan yayılan ısıyı temsil etmek üzere, soğutucu plakaya ısı akısı uygulanmıştır ve değeri analizin amacına göre değiştirilmiştir. Referans geometrinin kullanıldığı sıvı soğutma analizinde model yarım geometri olacak analiz edilmiş ve alt yüzeye 500 W/m² ısı akısı uygulanmıştır.

Burada alt yüzeyin soğutulması için kullanılan soğutucu akışkan kanala 300 K sıcaklığında ve 0,01 kg/s kütlesel debi ile giriş yapmaktadır ancak simetri şartı nedeniyle

debi 0,005 kg/s olarak analizlerde uygulanmıştır (Şekil 3.3). Analizler zamandan bağımsız olarak sürekli rejimde laminer akış koşullarında çözülmüştür. Daha sonra sıvı soğutmaya faz değiştiren malzeme eklendiği analizlerde FDM'nin etkisinin ortaya çıkması için analizler zamana bağlı ve tam geometri kullanılarak alt ve üst yüzeye ısı akısı 4000 W/m² değerinde uygulanmıştır ve sonraki çalışmalarda da bu mantık çerçevesinde aynı yüzeyler ve tam geometri modellenmiştir. Gerçek pil geometrisi tanımlandıktan sonra soğutucu plakanın geometrik ölçüleri de güncellenmiş olup geniş bir Reynolds sayısına göre sıvı soğutma analizleri yürütüleceği için farklı akış koşullarının etkilerinin gözlenebilmesi amacıyla ısı akısı değeri 5000 W/m^2 olarak seçilmiştir.

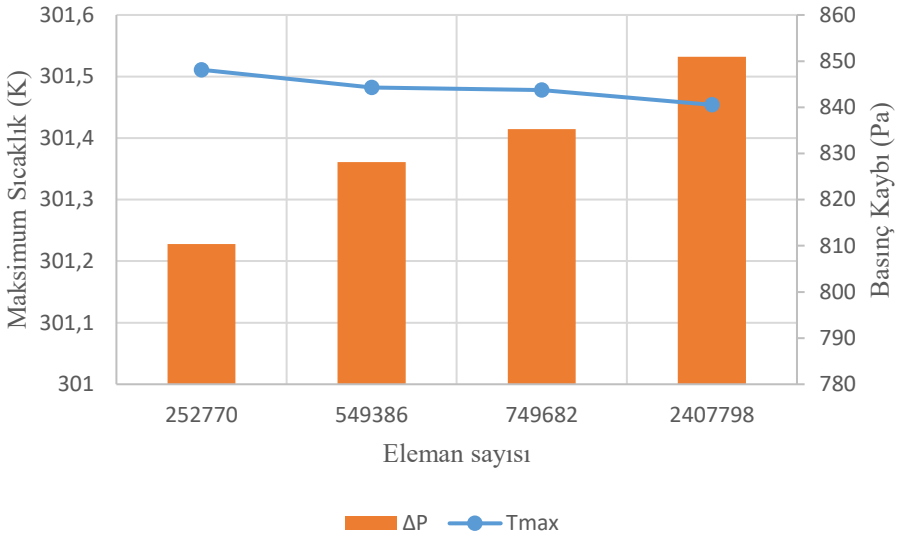


Şekil 3. 3. Referans geometrili soğutucu plaka kanal geometrisi ve sabit ısı akısı uygulaması

3.2.1. Ağdan bağımsızlık çalışması

Sayısal analizlerde sonuçların ağ yapısından bağımsız olduğunun gösterilebilmesi amacıyla her aşamada ağdan bağımsızlık çalışması yapılmış olup bu bölümde sadece referans geometri için olan çalışmaya yer verilmiştir. Ağdan bağımsızlık çalışması için kanal yüksekliğinin 3 mm toplam plaka yüksekliğinin ise 8 mm olduğu düşük seviyelerin kullanıldığı tasarım tercih edilmiştir. Bu amaçla farklı eleman sayılarına sahip ağ yapıları oluşturulmuş ve her ağ için üst yüzey maksimum sıcaklığı (T_{max}) ve toplam basınç kaybı

(ΔP) değerleri karşılaştırılmıştır. Eleman sayısının artırılmasıyla bu büyüklüklerdeki değişimin ihmal edilebilir seviyeye düştüğü ağ yapısı, tüm analizlerde kullanılmak üzere seçilmiştir.



Şekil 3. 4. Referans geometri için ağdan bağımsızlık çalışması

Yapılan ağdan bağımsızlık çalışması sonucunda, Şekil 3.4'teki verilere göre, 549386 eleman numaralı ağ yapısından sonraki sonuç değerlerinde değişim miktarı düşük olduğundan, bu ağ yapısı çalışma için en uygun ağ olarak seçilmiş ve diğer analizler bu ağ yapısına göre yapılmıştır.

3.2.2. Model doğrulaması

Bu çalışmada geliştirilen sayısal model, serpantin kanallı soğutucu plaka için sayısal analiz gerçekleştiren Kim ve Jarrett (2011) çalışması esas alınarak doğrulanmıştır. Validasyon kapsamında maksimum sıcaklık (T_{max}), sıcaklık standart sapması (T_{σ}) ve basınç kaybı (ΔP) metrikleri kullanılmıştır. Validasyon çalışması sonucunda T_{max} için %0,02, T_{σ} için %7,20 ve ΔP için %23,62 olarak hesaplanmıştır. Özellikle T_{max} değerindeki çok düşük fark, ısıl modelin yüksek doğrulukla çalıştığını göstermektedir. ΔP'de gözlenen farkın ise sayısal modelleme varsayımları ve çözüm ayrıntılarından kaynaklandığı değerlendirilmiştir (Çizelge 3.1). Elde edilen sonuçlar, geliştirilen sayısal

modelin literatürde raporlanan sonuçlarla uyumlu olduğunu ve güvenilir biçimde kullanılabileceğini göstermektedir.

Çizelge 3. 1. Kim ve Jarrett (2011) çalışması ile yapılan model doğrulaması sonuçlarının karşılaştırılması

	T_{max}	T_{σ}	ΔP
Referans çalışma	306,09	2,64	2948
Validasyon çalışması	306,15	2,45	2251,81

3.2.3. Malzemeler ve termofiziksel özellikler

Tez kapsamında kullanılan tüm akışkan, katı ve faz değiştiren malzemeler ve malzemelere ait termofiziksel özellikler ortak olarak verilmiştir. Sonraki bölümde hangi malzemelerin hangi analizlerde kullanıldığı elde edilen bulgularla birlikte verilmektedir. Soğutucu plaka malzemesi alüminyumdur. Öncelikle soğutucu akışkan olarak kullanılan su, %25 etilen glikol–su (EGS25) ve %50 etilen glikol–su (EGS50) karışımları ve soğutucu plakanın özellikleri verilmiştir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3. 2. Soğutucu akışkanlar ve alüminyumun termofiziksel özellikleri (Klein, 2015)

Özellikler	Soğutucu akışkan			Soğutucu plaka
	Su	EGS25	EGS50	Alüminyum
Yoğunluk (kg/m^3)	998,2	1028	1061	2719
Özgül ısı (J/kgK)	4182	3827	3348	871
Isı iletim katsayısı (W/mK)	0,6	0,493	0,3935	202,4
Viskozite (Ns/m^2)	0,001003	0,001564	0,002974	

Çalışmanın ilgili aşamalarında faz değiştiren malzemelerin etkisini inceleyebilmek amacıyla farklı erime sıcaklıklarına sahip FDM'ler kullanılmıştır. Bu malzemelere ait temel termofiziksel özellikler Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3. 3. Faz değiştiren malzemelerin termofiziksel özellikleri

Özellikler	Malzemeler				
	RT35	SP31	RT44HCEG67	RT25HC	RT28HC
Yoğunluk (ρ) [kg/m^3]	815	1350	585	825	825
Özgül ısı (c_p) [j/kgK]	2000	2000	2500	2000	2000
Isı iletim kats. (k) [W/mK]	0.2	0.5	10.8	0,2	0,2
Gizli ısı (L) [j/kg]	170000	210000	120100	230000	25000
Erime sıcaklığı [K]	309	306	317	299,15	302,15
Katılaşma sıcaklığı [K]	302	304	313	295,15	300,15

3.2.4. Korunum denklemleri

Soğutucu plaka içerisindeki katı ve akışkanın olduğu bölgelerdeki ısı transferi davranışının doğru modellenebilmesi için birleşik ısı transferi analizi gerçekleştirilmiştir. Akış alanında süreklilik, momentum ve enerji denklemleri, katı alanında ise yalnızca enerji denklemi çözülmüştür. Hesaplamalar sonlu hacimler yöntemi kullanılarak ANSYS Fluent yazılımında basınç–hız bağlaşımı SIMPLE algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizde kullanılan korunum denklemleri aşağıda verilmiştir.

Süreklilik denklemi:

$$\nabla . \vec{v} = 0 \tag{3.11}$$

x, y ve z yönlerindeki momentum korunum denklemleri:

$$\rho_w \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}.\nabla)\vec{v}\right] = -\nabla P + \mu\nabla^2\vec{v} \tag{3.12}$$

Enerji korunum denklemi:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \left(\rho \vec{v} c_p T\right) = \nabla(\mathrm{k}\nabla\mathrm{T}) + S_c \tag{3.13}$$

Burada, ρ akışkanın yoğunluğu (kg/m³), $\vec{v}$ hız bileşeni (m/s), c_p akışkanın özgül ısısı (J/kgK), μ dinamik viskozite (Ns/m²), μ_t türbülanslı viskozite (Ns/m²), P basınç (Pa), g yerçekimi ivmesi (m/s²), k akışkanın ısı iletim katsayısını (W/mK), T sıcaklık (K), S_c hacimsel kaynak terimleri olarak tanımlanmıştır.

İlerleyen çalışmalarda türbülanslı analizlerde kullanılacaktır. O analizlerde kullanılan türbülans viskozitesi şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \tag{3.14}$$

Burada; k türbülans kinetik enerjisi, ω spesifik enerji dağılma oranıdır.

Akışın karakteristiğini yani laminer ya da türbülanslı olduğunu gösteren boyutsuz Reynolds sayısı (Re) aşağıda denklem 3.15 ile hesaplanmaktadır. Denklemdeki u akışkanın hızını (m/s) ve D_h ile de akışkanın girdiği kanalın hidrolik çapı temsil etmektedir. Kanal içi akışlarda Reynolds sayının iki bin üç yüzden düşük durumlarda akış laminer, iki bin üç yüz ve üzeri durumlarda ise akış rejimi türbülanslı kabul olarak edilmektedir (Kılıç ve Yiğit 2024).

$$Re = \frac{uD_h\rho}{\mu} \tag{3.15}$$

Reynolds sayısındaki hidrolik çapın hesaplanması için aşağıdaki denklem 3.16 kullanılmıştır.

$$D_h = \frac{4A}{Ç} = \frac{4(H_c W_c)}{2(H_c + W_c)} \tag{3.16}$$

Basınç kaybının (ΔP) hesaplanabilmesi için akışkanın hızına, yoğunluğuna, akış yolunun uzunluğuna ve hidrolik çapa ihtiyaç vardır (Denklem 3.17).

$$\Delta P = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho u^2}{2} \tag{3.17}$$

Burada f sürtünme katsayısını, L akış yolu uzunluğunu (m) temsil etmektedir.

Nusselt sayısı (Nu), bir yüzeyde gerçekleşen taşınımla ısı transferinin, iletimle olan ısı transferine oranını ifade eden boyutsuz bir parametredir. Nu değeri arttıkça sistemin konveksiyon(taşınım) yoluyla ısıyı taşıma kapasitesi artar ve yüzey daha etkin bir şekilde soğutulmaktadır. Isı taşınım katsayısı hesaplandıktan sonra Nusselt sayısı aşağıda verilen Denklem 3.18 ile hesaplanmaktadır (Kılıç ve Yiğit 2024).

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \tag{3.18}$$

Faz değiştiren malzemelerin içindeki ısı transferi duyulur ve gizli ısı olarak ikiye ayrılmaktadır ve enerji denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$\rho_{FDM} \frac{\partial H}{\partial T} = k_{FDM} \nabla^2 T \tag{3.20}$$

$$H = hs + \Delta H \tag{3.21}$$

Toplam entalpi H, duyulur ısı h_s ve faz değişimi sırasında açığa çıkan gizli ısı ΔH'ın toplamıdır. FDM'in duyulur ısı bileşeni h_s, referans sıcaklık T_0'dan mevcut sıcaklığa

kadar özgül ısının integrali ile hesaplanmaktadır ve gizli ısı terimi ise sıvı fraksiyonu (β) ile faz değişim entalpisinin (γ) çarpımıdır.

$$hs = \int_{T_0}^{T} c_{p,FDM}\, dT \tag{3.22}$$

$$\Delta H = \beta\gamma \tag{3.23}$$

Sıvı fraksiyonu olan β sıcaklığa bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\beta = \begin{cases} 0, & T < T_k \\ \dfrac{T - T_k}{T_s - T_k}, & T_k \leq T \leq T_s \\ 1, & T > T_s \end{cases} \tag{3.24}$$

Burada verilen ρ_{FDM}, FDM'lerin yoğunluğunu, k_{FDM} termal iletkenliğini, T_k katılaşma başlangıç sıcaklığı, T_s ise erime bitiş sıcaklığı temsil etmektedir. (Ling vd., 2014).

3.3. Taguchi Tabanlı Gri İlişki Analizi

Bu tez çalışmasının ilk aşaması olan referans geometri kullanılarak gerçekleştirilen sıvı soğutma analizlerinde Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılmıştır. Taguchi yöntemi kullanılan parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkisini klasik yöntemlere kıyasla daha az deneyle zamandan tasarruf ederek incelenmesini sağladığı için optimizasyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Öncelikle deney tasarımı için faktörler ve seviyelerine uygun olacak şekilde ortogonal dizi seçilmelidir. Çalışmada kanal yüksekliği ve toplam soğutucu plaka yüksekliği olmak üzere iki faktör ve bu faktörlerin her birine ait üç seviye bulunduğu L9 (3^2) dizisi seçilmiştir (Çizelge 3.4). Soğutucu akışkan da diğer bir faktördür ancak etkilerinin net bir şekilde ortaya çıkması için Taguchi matrisinden ayrı tutulmuş ve her akışkan için analizler tekrarlanmıştır.

Çizelge 3. 4. Sıvı soğutmalı referans geometriye ait Taguchi L9 matrisi

Faktör/ Sıra numarası	Kanal yüksekliği (H_c)	Soğutucu plaka yüksekliği (H)
1	3	8
2	4	8
3	6	8
4	3	10
5	4	10
6	6	10
7	3	12
8	4	12
9	6	12

Analiz sayısı ve dizilimler belirlendikten sonra her bir sonuç için sinyal gürültü oranı (SGO) hesaplanmalıdır. Sinyal gürültü oranında sinyal ile sistemin istenen performansı gürültü ile ise sonuçlar üzerinde istenmeyen etkiler temsil edilmektedir. SGO en küçük en iyi, en büyük en iyi ve nominal daha iyi olmak üzere istenen performans sonucuna göre hesaplanmaktadır (Taguchi, 1986, Şahin 2007).

Bu çalışmada da batarya yüzey sıcaklığı, sıcaklık homojenliği ve basınç kaybı değerlerinin en az olması istendiği için SGO en küçük en iyi olan seçilmiştir ve aşağıda verilen denklem 3.25 ile hesaplanmaktadır.

$$S/_N = -10 \log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} {y_i}^2\right) \tag{3.25}$$

Burada y_i her bir sonucun değerini, n ise analiz sayısını temsil etmektedir. Daha yüksek S/N oranı, daha iyi ve daha kararlı bir tasarım performansını ifade etmektedir.

Taguchi yöntemi tek bir sonuç değerini optimize eder birden fazla sonuç için aynı anda optimizasyon yapamamaktadır. Tüm sonuçlara göre bir optimizasyon çalışması için çok

kriterli karar verme yöntemlerinden biri ve hibrit bir çalışma olan Taguchi tabanlı Gri İlişki Analizi (GİA) kullanılmaktadır.

GİA'nın ilk adımında, sonuç değerleri 1 ve 0 arasında bir değer olacak şekilde istenen duruma göre normalize edilir. En küçük en iyi durumu için normalizasyon işlemi aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir.

$$y_i(k) = \frac{maxx_i(k) - x_i(k)}{maxx_i(k) - minx_i(k)} \tag{3.26}$$

Burada $y_i(k)$ ile normalize edilmiş sonuç değerini, max ve min ile de $x_i(k)$ sonucu için en yüksek ve en düşük sonuç değerleri temsil edilmektedir (Chamoli vd., 2016). Normalize işleminden sonra her bir sonuç için gri ilişki katsayısı ideal değerler ile normalize edilmiş değerlerin farkına göre hesaplanmaktadır.

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta min + \zeta \Delta max}{\Delta i(k) + \zeta \Delta max} \tag{3.27}$$

ζ simgesi ayırt edicilik katsayısını temsil etmektir ve çalışma için literatürde de yaygın olarak kullanıldığı üzere 0,5 olarak alınmıştır (Bademlioglu vd., 2020).
Her analiz için tüm sonuçların gri ilişki katsayıları hesaplandıktan sonra ağırlık katsayıları da dahil edilerek gri ilişki derecesi (GİD) hesaplanmaktır.

$$\gamma_i = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} w_i \xi_i(k) \tag{3.28}$$

Burada gri ilişki derecesini, m değerlendirilen toplam performans ölçütü sayısını (maksimum yüzey sıcaklığı, sıcaklık homojenliği ve basınç kaybı) sayısını temsil etmektedir. w_k ağırlık katsayıları, her bir sonuç değerinin faktörlere göre duyarlılığını temsil eden Taguchi SGO tablosu Delta değerleri kullanılarak belirlenmiştir.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^{p} Delta_{i,j}}{\sum_{i=1}^{t}\sum_{j=1}^{p} Delta_{i,j}} \tag{3.29}$$

Gri ilişki derecesinin yüksek olması, ilgili tasarımın çoklu performans kriterleri açısından ideal duruma daha yakın olduğunu ve genel sistem performansının daha iyi olduğunu göstermektedir.

3.4. $LiFePO_4$ (LFP) Batarya Hücresi ve Deney Düzeneği

$LiFePO_4$ (LFP) kimyası, lityum iyon batarya sistemlerinde grafit anot ve lityum demir fosfat katot yapıları sayesinde yüksek güvenlik seviyesi, uzun çevrim ömrü, düşük maliyet ve çevre dostu özellikleri sayesinde son yıllarda ön plana çıkan alternatif batarya seçeneklerinden biri haline gelmiştir. (Gültek ve Altın, 2022). Katot malzemesinin yapısal kararlılığı ile pilin yüksek sıcaklık durumlarında dayanıklı olması sağlanıp bataryaların termal kaçak gibi riskleri azaltmaktadır (Lu ve Zhu, 2024). Ayrıca NMC veya NCA gibi nikel/kobalt bazlı diğer pil kimyaları ile karşılaştırıldığında LFP bataryaların, yangın ve patlama riskine karşı daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Prizmatik şekilde üretilen LFP hücrelerin geniş yüzey alanları sayesinde termal yönetim sistemleriyle özellikle sıvı soğutma plakalarıyla kolaylıkla entegre edilebilmekte ve pil yüzeyindeki sıcaklık dağılımının daha homojen hale getirilmesine yardımcı olmaktadır (Güngör, Göçmen ve Çetkin, 2023).

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen hem sayısal simülasyonlarda hem de deneysel testlerde, EVE firmasına ait LF105 modeli 3,2V nominal geriliminde, 105Ah kapasiteli (Şekil 3.5a) prizmatik LFP tipi batarya hücresi kullanılmıştır. Şekil 3.5.b ile deney düzeneğine bağlanmış olan gerçek pil hücresi görülmektedir.



Şekil 3. 5. Deneylerde kullanılan pil **A)** EVE LF105 prizmatik hücre (SetaPower, 2024) **B)** Deneylerde kullanılan pil hücresi

İlgili pilin temel teknik özellikleri üretici firmanın sunmuş olduğu verilerden alınarak aşağıda Çizelge 3.5'te ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Çizelge 3. 5. LFP bataryanın genel özellikleri (EVE Energy Co. Ltd., 2023)

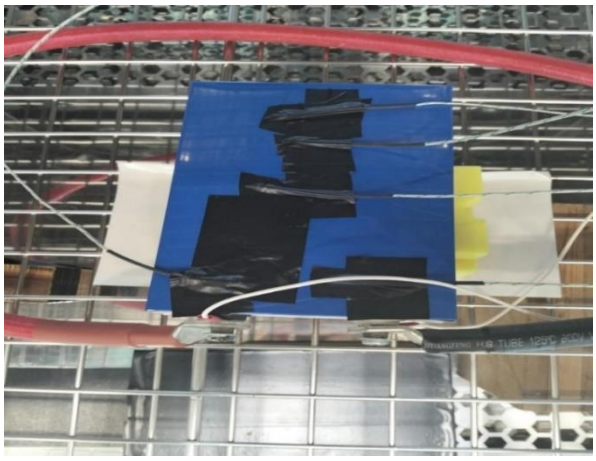
Özellik	Değeri
Nominal voltaj	3.2 V
Kapasite	105 Ah
Nominal enerji	336 Wh
Alt kesme voltajı	2.0 V
Üst voltaj limiti	3.65 V
Çalışma sıcaklığı	-35 °C / 65 °C
Boyutlar	130.3 x 36.35 x 200.5 mm^3
Dış cidar malzemesi	Alüminyum
Enerji yoğunluğu	≈169.7 Wh/kg

Çalışmada batarya hücresinin termal ve elektriksel davranışlarını belirlemek amacıyla kontrollü laboratuvar koşulları altında farklı akımlar verilerek deşarj testleri gerçekleştirilmiştir Deney düzeneği, batarya test cihazı, veri toplama sistemi, sıcaklık kontrolünü sağlayan termal test kabini ve test edilen bataryadan oluşmaktadır.

3.4.1. Isıl çiftlerin pil üzerine yerleştirilmesi

Deşarj testleri için pil ilk olarak anot ve katot kutup başlarından sırasıyla siyah ve kırmızı kablolar ile sisteme bağlanmış olup ardından bataryanın yüzey sıcaklıklarını ölçmek amacıyla hücre üzerine ısıl çiftler (termokupllar) yerleştirilmiştir. Isıl çiftler (termokupl), iki farklı metal telin birleşim noktasında sıcaklığa bağlı bir gerilim oluşturan Seebeck etkisine dayanan sıcaklık sensörleridir (Bentley, 1998). Isıl çiftler anot ve katot bölgesine yakın noktalara ve pilin merkezine ısıya dayanıklı bant ile sabitlenmiştir (Şekil 3.6). Tüm kablolar test kabini üzerindeki geçiş deliğinden dışarı çıkarılarak veri toplama sistemine bağlanıp deşarj süresince sıcaklık ve voltaj değerleri ölçülmüştür.

En yüksek sıcaklık değerine beklenildiği gibi pozitif kutba yakın ısıl çiftten alınan veri ile ulaşılmıştır. Bunun nedeni ise LFP hücrelerinde katot bölgesinde temas direncinin daha yüksek olması ve katodun daha ohmik ısıyı daha fazla üretmesidir (Kim vd., 2011; Wang vd., 2012).



Şekil 3. 6. Isıl çift bağlanmış LFP hücresi

3.4.2. Termal test kabininin kullanımı ve sıcaklık kontrolü

Pilin deşarj işlemi boyunca sıcaklık ölçümlerinin doğruluğunun dış ortam sıcaklığından etkilenmemesi amacıyla deneyler, sıcaklık kontrollü bir termal test kabini içerisinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan test kabininde (Şekil 3.7), batarya yükseltilmiş bir ızgara platformu üstüne konumlandırılarak hem alt yüzeyden hava sirkülasyonu sağlanmış hem de kabin içi doğal taşınımın oluşturulmasıyla sıcaklık dağılımının homojen olması amaçlanmıştır.



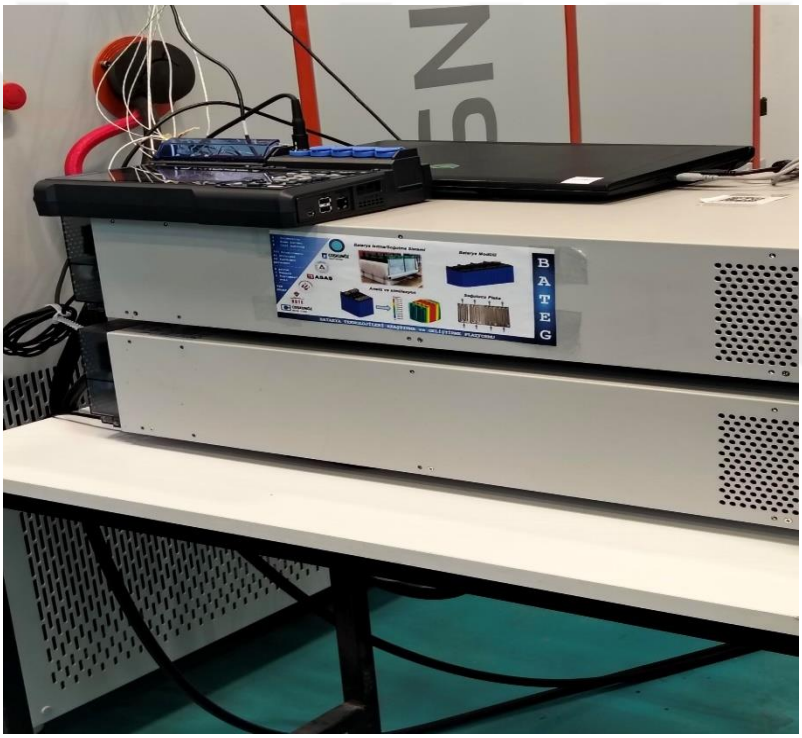
Şekil 3. 7. Termal test kabini içinde bataryanın konumlandırılması

Deney sürecinde kabin içi sıcaklığı 20°C ve 25°C değerlerine ayarlanarak 1C ve 2C deşarj testleri gerçekleştirilmiştir.

3.4.3. Veri toplama sistemi

Deşarj testleri sırasında bataryanın elektriksel ve termal davranış verilerinin kaydedilmesi için programlanabilir batarya test cihazı (battery cycler) ile veri toplama sistemi (datalogger) birlikte kullanılmıştır (Şekil 3.8).

Bu işlemin yapılabilmesi için bataryanın pozitif ve negatif kutuplarına bağlanan test kabloları, termal test kabininin üzerindeki geçiş deliğinden dışarı alınarak batarya test cihazına bağlanmış daha sonra da 1C ve 2C deşarjı için sabit akım deşarj profilleri hassas şekilde uygulanmıştır.



Şekil 3. 8. Batarya test cihazı ve veri toplama sistemi

Aynı zamanda batarya yüzeyine yerleştirilmiş olan ısıl çiftlerden gelen sıcaklık verileri de anlık olarak kaydedilmiştir. Böylece sayısal model ile doğrulama için gerekli olan akım-gerilim ve sıcaklık-zaman verileri elde edilmiştir.

3.5. Lityum İyon Pilin Modellenmesi

Lityum-iyon bataryaların sayısal modellenmesi, hücrelerin elektriksel ve termal davranışlarının tahmin edilebilmesi amacıyla farklı karmaşıklık seviyelerinde çeşitli yaklaşımlar sunmaktadır. Sayısal modelinin seçiminde parametre sayısı, hesaplama maliyeti ve model karmaşıklığı gibi farklı faktörler dikkate alınmaktadır. Tüm modeller için temel amaç batarya hücresinin kritik davranışlarını yakalayarak yüksek doğrulukta tahmin yapabilmektir.

Literatürde yaygın olarak kullanılan modeller çoğunlukla Çift Potansiyel Çok Ölçekli Çoklu Etki Alanı (Dual Potential Multi Scale Multi-Domain; MSMD) yaklaşımı altında sınıflandırılmaktadır. MSMD yaklaşımı, farklı elektrokimyasal çözümlere ait alt modeller olan Newman, Tiedemann, Gu ve Kim tarafından geliştirilen NTGK ampirik modeli, Eşdeğer Devre Modeli (Equivalent Circuit Model; ECM) ve Newman Pseudo-2D (P2D) modelini kapsamaktadır. Lityum-iyon bataryaların enerji ve elektrik alanlarına ilişkin temel denklemler Denklem 3.30 ile 3.33arasında verilmiştir (ANSYS, 2019).

$$\frac{\partial(\rho_b c_{p,b} T_b)}{\partial t} = \nabla(k_b \nabla T) + \dot{q}_{gen} \tag{3.30}$$

$$\dot{q}_{gen} = S_p \left|\nabla V_p\right|^2 + S_n |\nabla V_n|^2 + \dot{q}_{ECh} \tag{3.31}$$

$$\nabla\left(S_p \nabla V_p\right) = -j_{ECh} \qquad ((\nabla\sigma_+ \nabla\varphi_+) = -j) \tag{3.32}$$

$$\nabla(S_n \nabla V_n) = -j_{ECh} \qquad ((\nabla\sigma_- \nabla\varphi_-) = j) \tag{3.33}$$

Burada denklem 3.1'de gösterilen, ρ_b [kg/m^3] bataryanın özgül ağırlığını, $c_{p,b}$ [J/(kgK)] bataryanın özgül ısısını, T [K] bataryanın sıcaklığını ve k_b [W/(mK)] bataryanın ısıl iletim katsayısını temsil etmektedir. S_n $(\sigma-)$ ve S_p $(\sigma+)$ [S/m] ise sırasıyla negatif ve pozitif elektrotların elektrik iletkenliğidir. V_n (φ_-) ve V_p (φ_+) [V] ise sırasıyla negatif ve pozitif elektrotların potansiyel farklarıdır.

$\dot{q}_{gen}$ [W/m^3] ise direnç elektrokimyasal reaksiyonlar kaynaklı toplam ısınmayı, $\dot{q}_{ECh}$ [W/m^3] elektrokimyasal reaksiyonlardan kaynaklanan ısı üretimini ve j_{ECh} [A/m^3] ise hacimsel akım yoğunluğunu temsil etmektedir (Kim vd., 2011).

3.5.1. ECM modeli

ECM, yarı ampirik yaklaşım ile bataryanın elektriksel davranışını direnç ve kapasitör elemanlarından oluşan elektrik devresi üzerinden hesaplamaktadır. Modelde pilin dinamik davranışını tahmin etme yeteneği sınırlı olmasına rağmen düşük hesaplama maliyetiyle tercih edilmektedir. (ANSYS, 2019).

3.5.2. Newman P2D modeli

Newman'ın Gözenekli Elektrot Teorisi (P2D) modeli, lityum-iyon pillerin elektrokimyasal davranışlarını anlamak ve simüle etmek anot ve katot elektrotlarının yanı sıra elektrolit fazındaki iyon ve elektron taşınımı ve elektrotların gözenekli yapısını detaylı şekilde çözen modeldir. Yüksek doğrulukta sonuçlar sunmasına karşın hesaplama maliyetinin yüksekliğinden dolayı pratikte NTGK veya ECM modelleri daha çok tercih edilmektedir (ANSYS, 2019, Bizeray vd., 2015).

3.5.3. NTGK Modeli

Bu çalışmada batarya hücresinin termal davranışını modellemek için Newman–Tiedemann–Gu–Kim (NTGK) ampirik pil modeli kullanılmıştır. NTGK modeli, farklı C-oranlarında deşarj sonucunda elde edilen akım-gerilim (I-V) eğrilerinin deneysel verilerle olan uyumunu ampirik bir yaklaşımdır. Basit yapısı, düşük hesaplama maliyeti ve az sayıda parametre bilgisi ihtiyacı nedeniyle tercih edilmektedir. Model ilk olarak, Kwon ve ark. (2006) tarafından önerilmiş olup daha sonra da Kim ve ark. (2008) ile Yi ve ark. (2013) gibi araştırmacılar tarafından da benimsenmiştir. Modelde, belirli bir batarya hücresi için polarizasyon eğrileri deneysel olarak elde edilmekte ve iki parametre, bu veriler üzerine eğri uydurma yapılarak belirlenmektedir.

Bu özellikleri dolayısıyla NTGK modeli, prizmatik Lityum iyon batarya hücrelerinin ısıl modellemesi için yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhang vd., 2020).

Yukarıda denklem 3.32 ve 3.33 ile verilen hacimsel akım yoğunluğu ve potansiyel alan aşağıda denklem 3.34'te cebirsel olarak ifade edilmiştir.

$$j_{ECh} = \alpha Y\,[U - (V_p - V_n)] \tag{3.34}$$

Burada α bataryanın elektrot levhasının spesifik alanını temsil eder. U ve Y bataryanın deşarj derinliğine (DOD) bağlı fonksiyonlardır ve aşağıda verilen Denklem 3.35 ve 3.36'dan elde edilmektedir.

$$U = \left(\sum_{n=0}^{5} a_n (DOD)^n\right) - c_2 (T - T_{ref}) \tag{3.35}$$

$$Y = \left(\sum_{n=0}^{5} a_n (DOD)^n\right) exp\left[\, -c_1 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right] \tag{3.36}$$

$$DOD = \frac{Vol}{3600 Q_{Ah}} \left(\int_0^t j\, dt\right) \tag{3.37}$$

$$\dot{q}_{ECh} = j_{ECh}\left[U - \left(V_p - V_n\right) - t\, dU/dT\right] \tag{3.38}$$

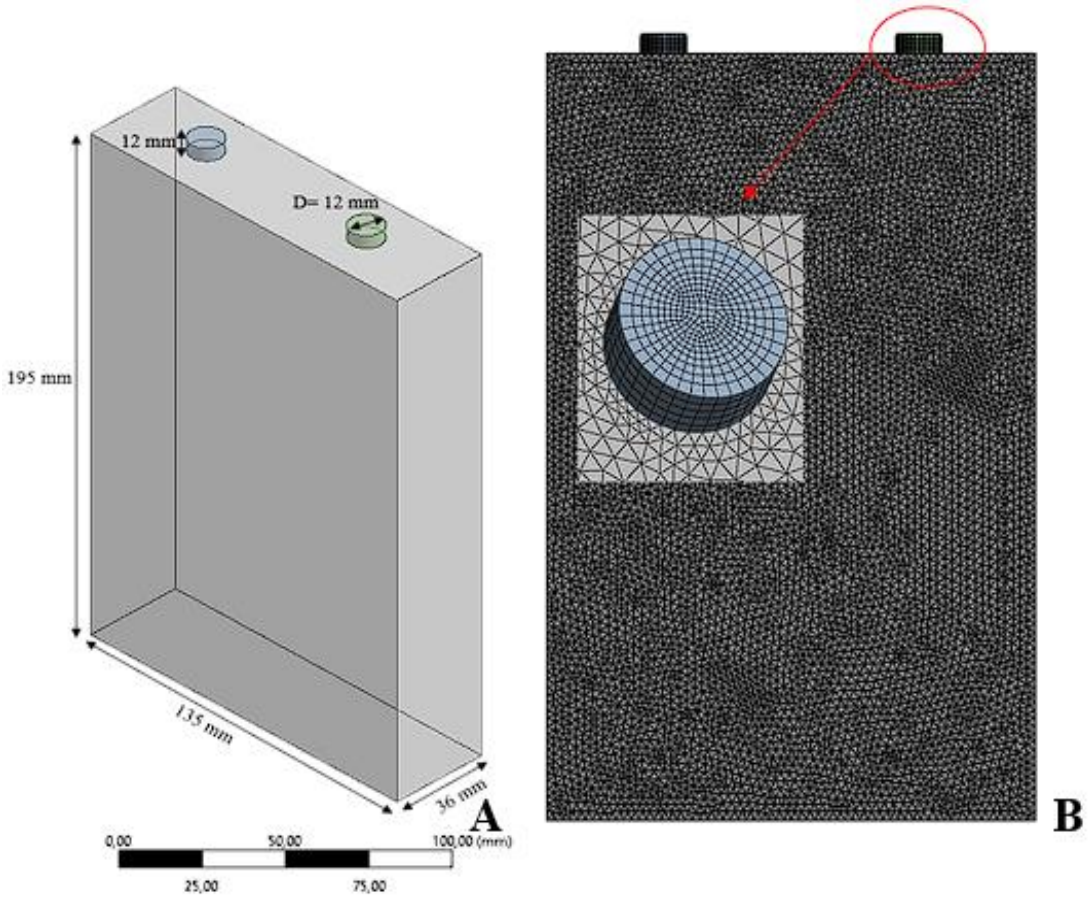
Burada gösterilen c_1 ve c_2 NTGK modeline ait sabitlerdir. Denklem 3.37'de ise bataryanın boşalma derinliği (DoD) fonksiyonu gösterilmiştir. V_{ol}, batarya hacmi ve Q_{Ah} akü toplam elektrik kapasitesidir. U ve Y fonksiyonları kullanılarak elde edilen elektrokimyasal reaksiyonlardan dolayı oluşan ısı üretimi ise Denklem 3.38'de verilmiştir. Isı üretimi denklemindeki ilk terim aşırı gerilime bağlı Joule ısısını, ikinci terim ise entropik ısı bileşenini temsil etmektedir.

3.6. Pilin Sayısal Modelinin Parametreleri

Gerçek pil davranışının simülasyonlarda ve soğutma analizlerinde doğru şekilde temsil edilebilmesi için, pil modelinin önce deneysel verilerle doğrulanması gerekmektedir.

Öncelikle pil geometrisi üretici katalog bilgilerindeki ölçüler baz alınarak ancak sadeleştirmeler yapılarak 130 × 195 × 36 mm ölçülerinde Fluent/SpaceClaim ortamında oluşturulmuştur.

Pilin üst yüzeyinde 6 mm yarıçapında ve 5 mm yüksekliğinde silindirik hacimler oluşturularak kutup başları da eklendikten sonra (Şekil 3.9.a) oluşan modele üç boyutlu ağ yapısı uygulanmıştır (Şekil 3.9.b).



Şekil 3. 9. Pil geometrisinin oluşturulması **A)** Pilin 3B geometrisinin oluşturulmuş hali **B)** Pil için oluşturulan üç boyutlu ağ yapısı

Batarya hücresinin sayısal olarak modellenebilmesi ve deneysel sonuçlarla uyumlu sonuç verebilmesi için hücreye ait temel termo-fiziksel özelliklerin doğru şekilde tanımlanması gerekmektedir. Bu kapsamda, prizmatik pile ait malzeme özellikleri literatürde benzer çalışmalardaki verilerden yararlanılarak belirlenmiştir (Çizelge 3.6).

Çizelge 3. 6. LFP pilin malzeme özellikleri (Panchal vd., 2017)

Bölüm / Özellikler	Hücre	Pozitif kutup	Negatif kutup
Yoğunluk (kg/m^3)	2092	2719	8978
Özgül ısı (J/kgK)	678	871	381
Isı iletim katsayısı (W/mK)	18,2	202	387,6
Elektriksel iletkenlik (S/m)		3,8e7	1e7

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, tez kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda elde edilen bulgular, soğutucu plaka geometrisi, akış koşulları ve faz değiştiren malzeme entegrasyonunun batarya termal performansı üzerindeki etkilerini ortaya koyacak şekilde alt başlıklar altında değerlendirilmiştir.

4.1. Referans Geometriye Ait Sıvı Soğutma Bulguları

Bu aşamada, literatürde yaygın olarak kullanılan ölçülere sahip S-kanallı bir soğutucu plakanın termal ve hidrolik davranışı incelenmiştir. Amaç, kanal geometrisi ve akışkan özelliklerinin soğutma performansı üzerindeki etkilerini ortaya koyarak hibrit sistemler için bir referans tasarım oluşturmaktır.

Soğutma performansı değerlendirme kriterleri olan maksimum yüzey sıcaklığı (T_{max}), yüzey sıcaklıklarının standart sapması (T_{σ}) ve kanal boyunca oluşan basınç kaybı (ΔP) her bir analiz için hesaplanarak aşağıda Çizelge 4.1'de verilmiştir ve iyi bir soğutmanın sağlaması ayrıca maliyetin de düşük olması için de bu değerlerden düşük olanların seçilmesi gerekmektedir.

Çizelge 4. 1. Referans geometriye ait sıvı soğutma analizi sonuçları

Sıra	T_{max}			T_{σ}			ΔP		
	EGS25	EGS50	Su	EGS25	EGS50	Su	EGS25	EGS50	Su
L1	301,45	301,74	301,30	0,15	0,17	0,14	845,54	635,47	652,87
L2	301,64	301,99	301,41	0,14	0,15	0,14	753,19	279,51	303,78
L3	301,68	302,06	301,46	0,18	0,20	0,16	172,34	117,38	144,77
L4	301,56	301,89	301,36	0,16	0,17	0,15	723,70	559,58	568,74
L5	301,43	301,74	301,29	0,14	0,15	0,11	443,47	315,97	360,29
L6	301,63	302,00	301,41	0,15	0,17	0,14	156,15	110,13	129,85
L7	301,59	301,92	301,39	0,14	0,16	0,14	675,20	523,32	534,70
L8	301,64	302,01	301,42	0,15	0,16	0,14	353,14	262,58	287,04
L9	301,62	301,96	301,41	0,14	0,15	0,13	160,92	113,53	131,85

Çizelge 4.1'e göre kanal yüksekliğinin daha düşük olduğu durumlarda akış kesiti de daralmaktadır bu nedenle akış hızı ve duvar yakınındaki hız gradyenleri artmakta böylece oluşan sürtünmeden dolayı basınç kaybı yükselmektedir. Kanal yüksekliği arttığında ise tüm akışkanlar için basınç kaybı değeri düşüş göstermektedir. Etilen glikol oranının artmasıyla birlikte viskozite değeri ve dolayısıyla basınç kaybı artırmaktadır.

Karışımdaki etilen glikol oranı arttıkça akışkanın ısıl iletkenliğinin azalmasından dolayı alt yüzeydeki maksimum sıcaklık ve sıcaklık homojenliği değerleri artmaktadır. En düşük sıcaklık değerleri ısı iletim katsayısı en yüksek akışkan olan suyun kullanıldığı durumlarda elde edilmiştir. Kanal yüksekliği açısından kıyaslandığında da en düşük sıcaklık değeri kanal yüksekliğinin 4 mm toplam plaka yüksekliğinin 10 mm durumda gözlenmiştir. Kanalın altındaki hacimde alüminyum malzeme miktarının artması daha düzgün bir sıcaklık dağılımını sağlamıştır.

Genel olarak alt yüzeydeki maksimum sıcaklık ve sıcaklık homojenliği sonuçları birbirine yakın değerlerde sonuç vermekte ve kanal geometrisindeki değişimlerden basınç kaybına kıyasla daha az etkilenmektedir. Tüm sonuçların aynı anda analiz edilip optimum soğutma performansının bulunabilmesi için çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan, Taguchi tabanlı Gri İlişki Analizi kullanılmıştır.

Taguchi tabanlı Gri ilişki analizinde öncelikle her bir sonuç parametresi için Taguchi analizinde "küçük olan daha iyidir" yaklaşımı benimsenerek sinyal/gürültü oranları hesaplanmıştır (Çizelge 4.2). Çizelge 4.2'nin son satırda ise Taguchi analizi sonrasında hesaplanan ağırlık oranları yer almaktadır.

Çizelge 4. 2. Referans geometriye ait sonuçların sinyal gürültü oranları

Sıra	T_{max}			T_{σ}			ΔP		
	EGS25	EGS50	Su	EGS25	EGS50	Su	EGS25	EGS50	Su
L1	-49,58	-49,59	-49,58	16,28	15,54	17,07	-58,54	-56,06	-56,30
L2	-49,59	-49,60	-49,58	17,32	16,29	17,35	-57,54	-48,93	-49,65
L3	-49,59	-49,60	-49,58	15,03	14,17	15,68	-44,73	-41,39	-43,21
L4	-49,59	-49,60	-49,58	16,14	15,31	16,63	-57,19	-54,96	-55,10
L5	-49,58	-49,59	-49,58	17,42	16,66	18,86	-52,94	-49,99	-51,13
L6	-49,59	-49,60	-49,58	16,67	15,62	17,25	-43,87	-40,84	-42,27
L7	-49,59	-49,60	-49,58	16,86	16,14	17,26	-56,59	-54,38	-54,56
L8	-49,59	-49,60	-49,58	16,54	15,69	17,00	-50,96	-48,39	-49,16
L9	-49,59	-49,60	-49,58	17,34	16,71	17,68	-44,13	-41,10	-42,40
Ağırlık Katsayısı w (%)	0,03	0,04	0,02	8,19	9,52	11,32	91,78	90,44	88,65

İkinci adımda S/G oranları normalize edilerek gri ilişki katsayıları elde edilmiştir. Taguchi analizi sonucunda basınç kaybının ağırlık oranı, maksimum sıcaklığa ve sıcaklık homojenliğine göre oldukça yüksek çıkmaktadır. Bu çıkan yüksek değere göre soğutma performansı analizinde basınç kaybının daha baskın bir rol oynadığı sonucuna ulaşılmaktadır.

En son adım olarak Gri ilişki derecelerine göre yapılan sıralamanın sonucunda (Çizelge 4.3), tüm akışkan türleri için en uygun tasarımın kanal yüksekliği 6mm ve toplam plaka yüksekliğinin ise 12 mm değerleri olduğuna ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, kanal kesit alanının artırılmasının hidrolik kayıpları azaltarak genel sistem performansını iyileştirdiğini göstermektedir.

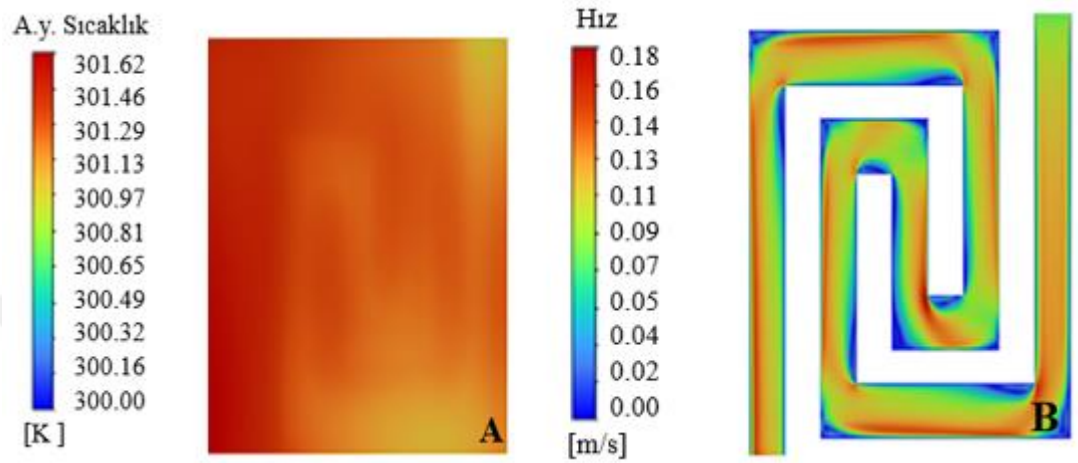
Çizelge 4. 3. Normalizasyon ve gri ilişki derecesi sonuçları

Sıra	Normalizasyon			Gri ilişki katsayısı			GRD	Sıralama
	T_{max}	T_{σ}	ΔP	T_{max}	T_{σ}	ΔP		
1	0,920	0,560	0,000	0,862	0,532	0,333	34,975	9
2	0,160	0,963	0,134	0,373	0,930	0,366	41,224	7
3	0,000	0,000	0,977	0,333	0,333	0,955	90,400	3
4	0,480	0,501	0,177	0,490	0,501	0,378	38,794	8
5	1,000	1,000	0,583	1,000	1,000	0,545	58,276	5
6	0,200	0,717	1,000	0,385	0,638	1,000	97,019	2
7	0,348	0,792	0,247	0,434	0,706	0,399	42,420	6
8	0,148	0,663	0,714	0,370	0,597	0,636	63,305	4
9	0,252	0,972	0,993	0,401	0,947	0,986	98,293	1

Taguchi analizindeki ağırlık oranları ve gri ilişki analizi sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, basınç kaybının sistem performansını belirlemede baskın bir parametre olduğu ortaya çıkmıştır. Maksimum yüzey sıcaklığı ve sıcaklık homojenliği değerleri dar bir aralıkta değişirken, basınç kaybı değerlerinin daha geniş bir aralıkta değişmesi bu durumu desteklemiştir. Kanal yüksekliğinin, özellikle basınç kaybı üzerinde en etkili geometrik parametre olduğu belirlenmiştir.

Optimum tasarım için elde edilen sıcaklık ve hız dağılımları incelendiğinde, akışkan giriş bölgesinde daha etkin bir soğutma sağlandığı, kanal geometrisine bağlı olarak bazı bölgelerde akış ayrılmaları ve ölü hacimlerin oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.1). Elde edilen sıcaklık dağılımları incelendiğinde, akışkan giriş bölgesinde daha düşük sıcaklıkların oluştuğu, akışkanın çıkış bölgesine doğru ilerledikçe yüzey sıcaklığının arttığı görülmüştür. Hız dağılımları ise özellikle keskin köşeli kanal dönüşlerinde akış ayrılmalarının ve ölü bölgelerin oluştuğunu göstermiştir. Bu bölgelerde akış hızının düşmesi, basınç kaybının artmasına ve ısı transferinin zayıflamasına neden olmuştur.

Basınç kaybı sonuçlarının, sıcaklık kriterlerine kıyasla daha geniş bir aralıkta değişim göstermesi, basınç kaybının sistem performansını belirlemede daha baskın bir parametre olduğunu ortaya koymuştur. Gri ilişki analizinde basınç kaybına ait ağırlık katsayılarının yüksek çıkması da bu durumu desteklemiştir.



Şekil 4. 1. Optimum tasarıma göre dağılımlar **A)** Alt yüzeydeki sıcaklık dağılımı **B)** Akışkan bölgesindeki hız dağılımı

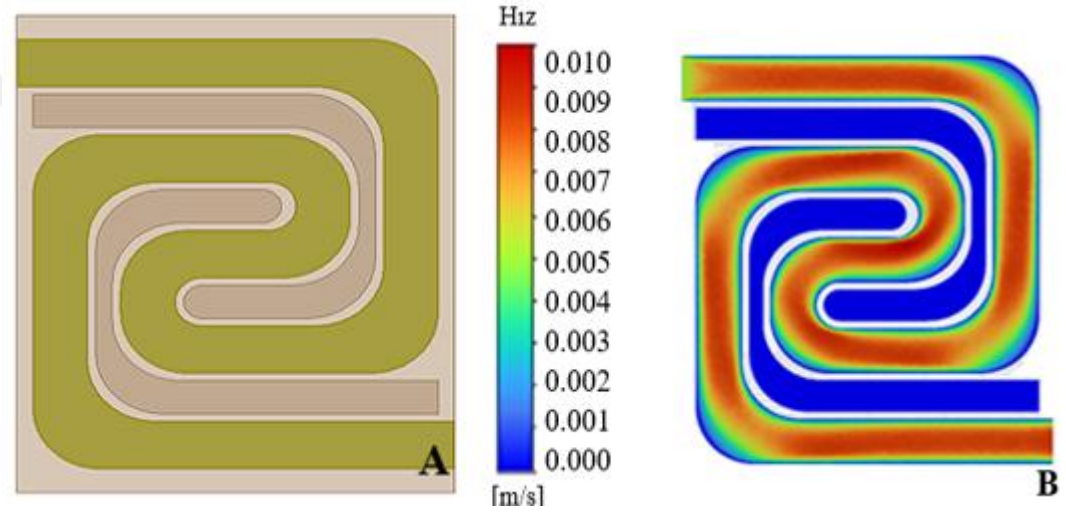
Bu aşamada elde edilen bulgular, soğutucu plaka yüksekliğinin ve kanal yüksekliğinin soğutma performansı üzerinde belirleyici olduğunu, ancak keskin köşeli kanal geometrisinin akış ayrılmalarına neden olarak hidrolik kayıpları artırdığını açıkça göstermiştir. Bu nedenle, bir sonraki aşamada kanal dönüşlerinin radyus verilerek yumuşatılması ve ani ısı yüklerinin etkisini azaltmak amacıyla soğutucu plaka yapısına faz değiştiren malzemenin entegre edilmesi kararlaştırılmıştır. Böylece bu ilk çalışma, tez kapsamında geliştirilecek hibrit (sıvı + FDM) soğutma sistemleri için temel ve yönlendirici bir referans oluşturmuştur.

4.2. Referans Geometriye Ait Hibrit Soğutucu Plaka Bulguları

İkinci aşamada farklı debilerdeki suyun soğutmasına ek olarak farklı tür faz değiştiren malzemeler kullanılarak faz değiştiren malzemelerin çalışma teknikleri ve soğutma performansına etkileri incelenmek istenmiştir (Şekil 4.2a). Bunun için simetrik çözüm

değil tüm tasarım analiz edilmiştir. İlk çalışmada kanal yüksekliğinin en fazla olduğu değer iyi sonuçlar vermiştir.

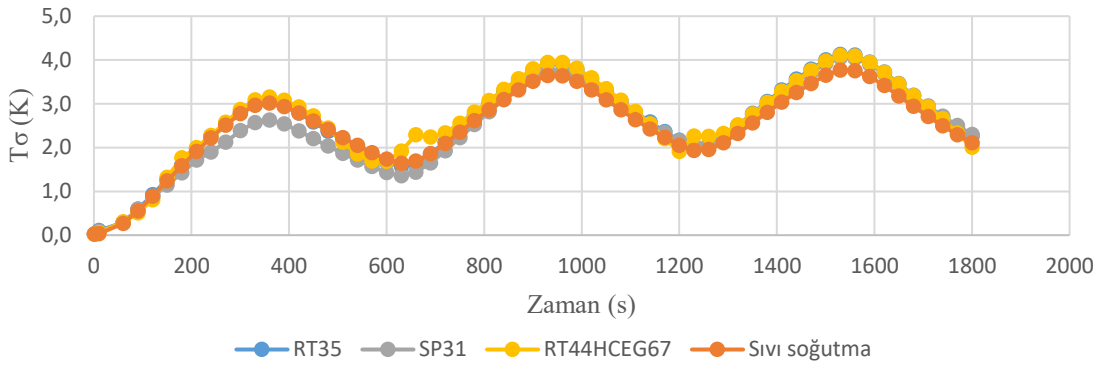
Faz değiştiren malzeme kanallar arasındaki hacme doldurulacaktır ve etkili olabilmesi hacmini arttıracak tek parametre kanal yüksekliğidir. Bu nedenle de kanal yüksekliği önceki çalışmaya göre daha da yüksek bir değer olan 10 mm seçilmiştir. Toplam soğutucu plaka yüksekliği de 15 mm değerindedir ve kanal plakanın tam ortasındadır. İlk aşamadaki keskin dönüşlere radyus verilerek geometri yumuşatılmış ve akışın daha düzgün ilerlemesi sağlanmıştır (Şekil 4.2b).



Şekil 4. 2. Faz değiştiren malzeme eklenmiş referans geometri **A)** Akışkan ve FDM bölgeleri **B)** Radyus verilmesi sonucu hız dağılımı

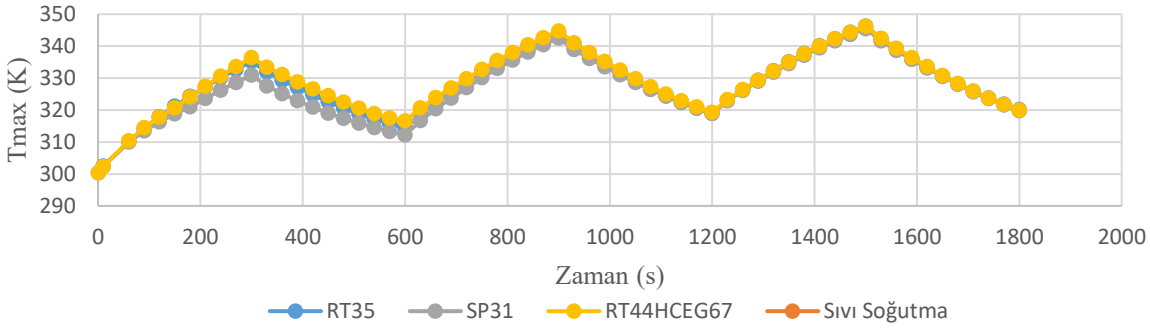
4.2.1. Akışkan Debisinin 0,001 kg/s Olduğu Durumun Değerlendirilmesi

Akışkan debisinin 0,001 kg/s olarak seçildiği durumda, yalnızca sıvı soğutma ve faz değiştiren malzemeleri de içeren hibrit sistemlerin tamamında soğutma performansının yetersiz kalmıştır. Bu düşük debi değerinde, suyun taşıyabildiği duyulur ısı miktarı da düşük olduğundan sistemde biriken ısı uzaklaştırılamamıştır. Bu durum, sıcaklığın standart sapması ve maksimum sıcaklık değerlerinin her bir ısıtma–soğutma döngüsünde artış göstermesine yol açmıştır. (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4).



Şekil 4. 3. Akışkan debisinin 0,001 kg/s değeri için sıcaklık homojenliği

FDM türleri karşılaştırıldığında ise inorganik faz değiştiren malzeme olan SP31'in kullanıldığı ilk döngü diğer malzemelere ve sadece suyun olduğu soğutmaya durumuna kıyasla daha düşük maksimum sıcaklık ve daha iyi sıcaklık homojenliği sağlamaktadır. SP31'in erime sıcaklığı diğer malzemelere göre daha düşük olduğu için ilk döngüde erimeye başlayarak etkisini göstermiştir ancak ikinci ve üçüncü döngülere geçildiğinde, tüm faz değiştiren malzemeler tamamen eriyerek gizli ısı depolama kapasitelerini kaybetmişlerdir. Bu durum sonucunda da soğutma performansına etkileri kaybolmuştur.



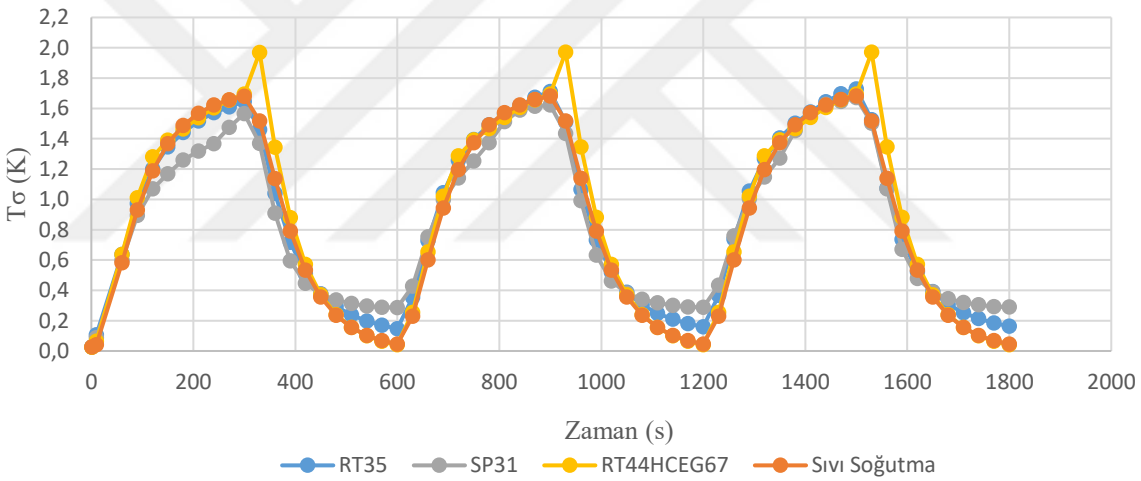
Şekil 4. 4. Akışkan debisinin 0,001 kg/s değeri için üst yüzeydeki maksimum sıcaklık

Bu akışkan debisi kullanılan analizlerde sonuç olarak üst yüzeydeki hem maksimum sıcaklık hem de sıcaklık homojenliği sürekli artış göstermiştir. Bataryanın güvenli çalışma sıcaklığı sınırları aşılmış sıcaklığın standart sapması da 4 K değerinin üzerine

çıkmıştır. Bu yorumlardan hareketle akışkan debisinin 0,001 kg/s ve altındaki değerlerin hibrit soğutma sistemi için yetersiz olduğuna ve FDM kullanımının etkisinin gösterilemediği sonucuna ulaşılmıştır.

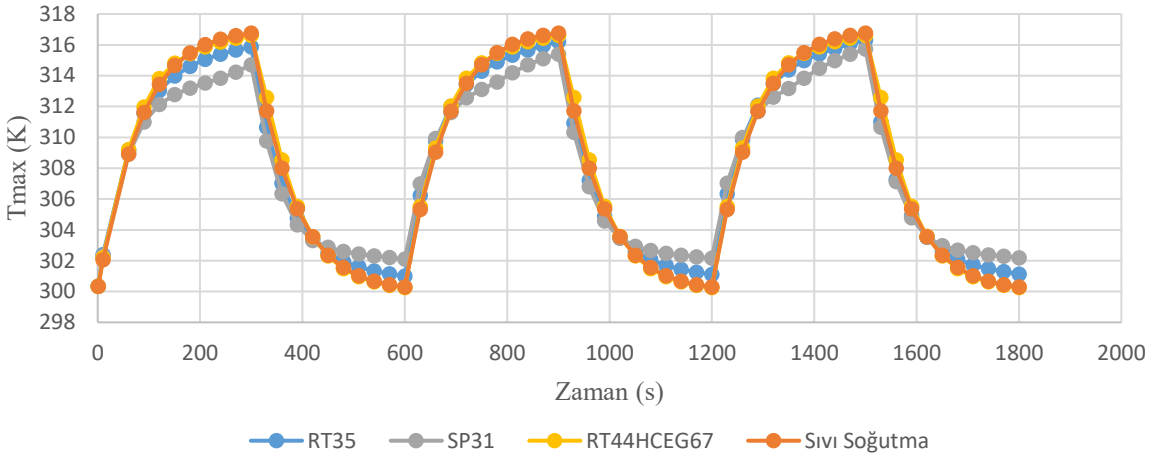
4.2.2. Akışkan Debisinin 0,005 kg/s Olduğu Durumun Değerlendirilmesi

Akışkan debisinin 0,005 kg/s değerine artırılmasıyla birlikte, hibrit soğutma sisteminin davranışında belirgin bir iyileşme gözlenmiştir. Bu debi değerinde, soğutucu akışkanın taşıdığı duyulur ısı miktarı artmış ve faz değiştiren malzemelerin erime–katılaşma süreçleri daha dengeli bir şekilde gerçekleşmiştir. Düşük debi kullanılan durumda gözlenen hızlı ve tamamen erime durumu ortadan kalkmıştır.



Şekil 4. 5. Akışkan debisinin 0,005 kg/s değeri için sıcaklık homojenliği

Isıtma döngüleri sırasında sıcaklık homojenliği ve maksimum sıcaklık açısından en iyi performans, erime sıcaklığı düşük ancak yüksek ısı kapasitesine sahip olan SP31'in kullanıldığı hibrit sistemde elde edilmiştir (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6).
Buna karşılık, soğutma evrelerinde RT35'in, SP31'e kıyasla daha düşük sıcaklık standart sapması değerleri verdiği gözlenmiştir.

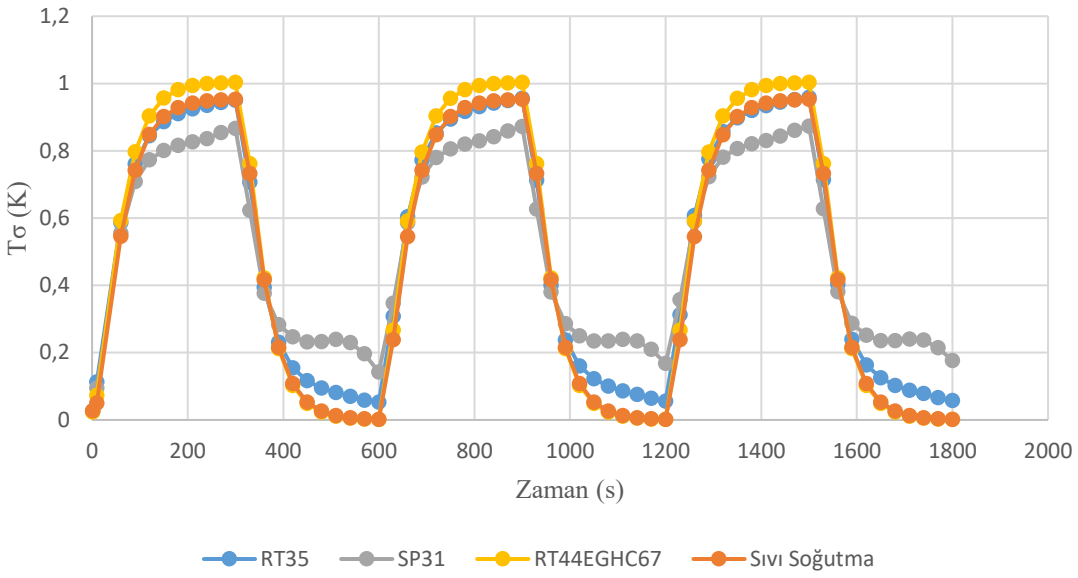


Şekil 4. 6. Akışkan debisinin 0,005 kg/s değeri için üst yüzeydeki maksimum sıcaklık

Bu debi değerinde ulaşılan en önemli sonuç sıcaklıkların döngüler boyunca kararlı bir davranış sergilemesi olmuştur. Maksimum sıcaklık ve sıcaklık homojenliği değerleri her döngüde benzer seviyelerde kalmıştır. Elde edilen maksimum sıcaklık değerlerinin bataryanın güvenli çalışma aralığı içerisindedir ayrıca sıcaklığın standart sapması değeri de 1.6 K seviyelerine düşmüştür. Bu bulgularla 0,005 kg/s debi değeri, hibrit soğutma sistemi için kritik bir eşiktir ve faz değiştiren malzemelerin etkisi bu aralıkta ortaya çıkmaktadır.

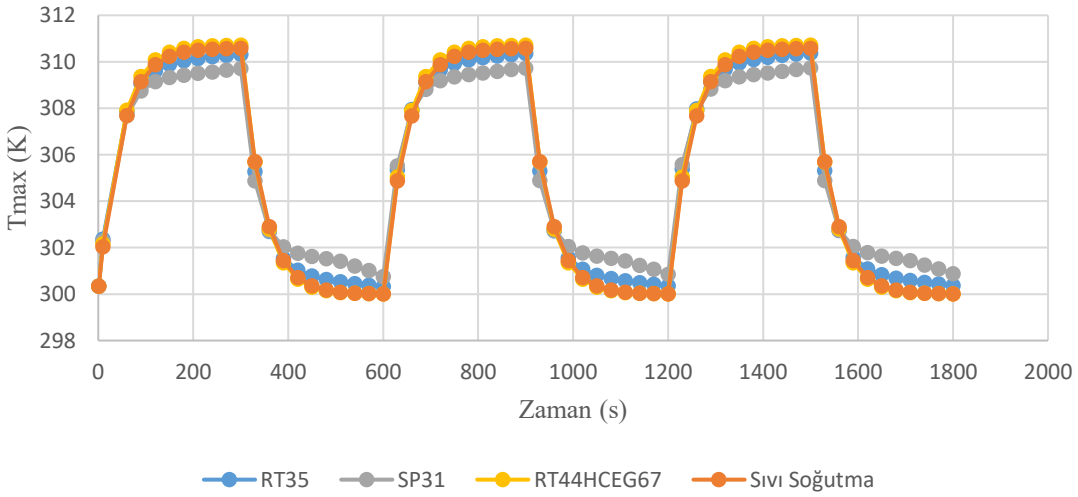
4.2.3. Akışkan Debisinin 0,01 kg/s Olduğu Durumun Değerlendirilmesi

Akışkan debisinin 0,01 kg/s olduğu en yüksek debi durumunda, sıvı soğutma daha baskın hale gelerek faz değiştiren malzemelerin etkisini azaltmıştır. Akışkanın taşıdığı duyulur ısı arttığı için üst yüzeydeki maksimum sıcaklıklar düşük seviyelerde kalmıştır.



Şekil 4. 7. Akışkan debisinin 0,01 kg/s değeri için sıcaklık homojenliği

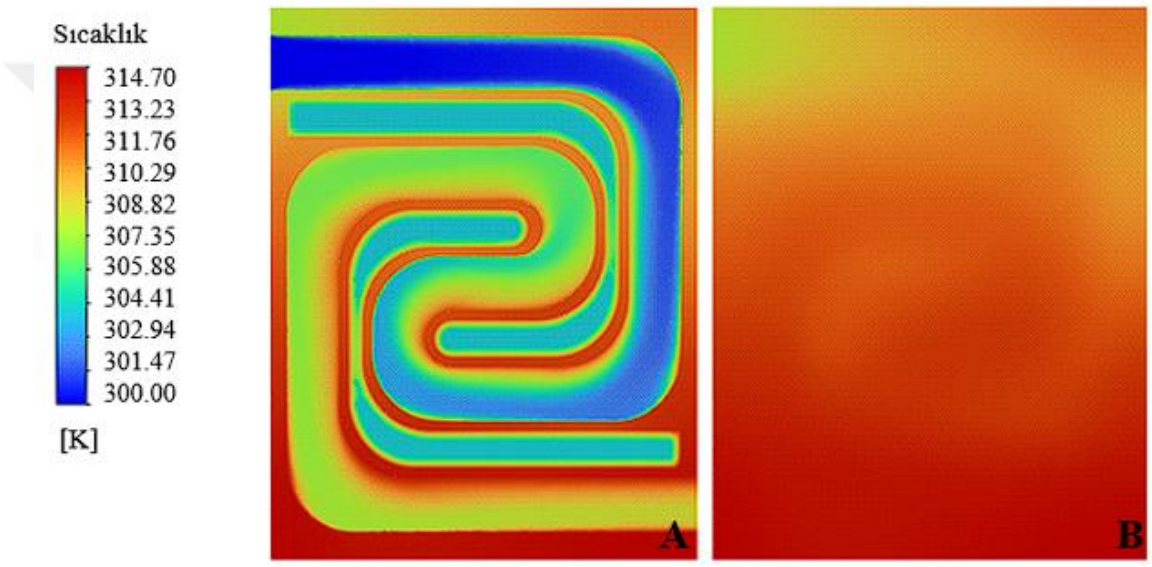
Sıcaklık homojenliği açısından değerlendirildiğinde en iyi sonuçların inorganik faz değiştiren malzeme SP31 ile elde edildiği, en kötü performansın ise kompozit faz değiştiren malzeme RT44HCEG67'de gözlendiği görülmektedir (Şekil 4.7). Bunun nedeni RT44HCEG67'nin erime sıcaklığının yüzeyde oluşan maksimum sıcaklık değerinden oldukça yüksek olması ve dolayısıyla bu malzemede faz değişimi gözlenmediği için etkisiz kalmasıdır.



Şekil 4. 8. Akışkan debisinin 0,01 kg/s değeri için üst yüzeydeki maksimum sıcaklık

Maksimum sıcaklık değerleri incelendiğinde, RT35 ile yalnızca sıvı soğutma durumu arasındaki farkın 1 °C'den daha az olduğu gözlenirken SP31 kullanıldığında maksimum sıcaklıkta daha belirgin bir azalma elde edilmiştir (Şekil 4.8).

Sıcaklık dağılımları incelendiğinde, tüm faz değiştiren malzemeler için alt bölgede yer alan FDM hacminin daha hızlı erimiştir ve bu bölgelerde sıcaklıkların daha yüksek olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.9). Orta ve üst yüzeylerdeki elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 4.9'da sunulmuştur.



Şekil 4. 9. Referans Geometrili hibrit soğutucu plakada sıcaklık dağılımları **A)** Orta yüzey **B)** Üst yüzey

Genel olarak en düşük debi değerinde faz değiştiren malzemelerin tamamının kısa sürede eriyerek işlevlerini kaybettiği, en yüksek debi değerinde ise sıvı soğutmanın baskın hale gelmesi nedeniyle faz değiştiren malzemelerin katkısının düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. En dengeli ve kararlı sonuçlar, orta debinin kullanıldığı çözümlerde elde edilmiştir.

Faz değiştiren malzemeler kıyaslandığında, inorganik faz değiştiren malzeme olan SP31, uygun erime sıcaklığı ve yüksek gizli ısı kapasitesi daha iyi bir soğutma yardımcı elemanı olmuştur. Kompozit faz değiştiren malzeme RT44HCEG67 ise yüksek ısıl iletkenliğine

rağmen, erime sıcaklığın yüksek olmasından dolayı en zayıf performansı göstermiştir. Bu çalışmadan çıkarılan en önemli sonuç, hibrit soğutma sistemlerinde faz değiştiren malzemenin seçiminde erime sıcaklığının, kullanılan soğutucu akışkanın giriş sıcaklığına ve sistemin gerçek çalışma koşullarına yakın olacak şekilde belirlenmesinin kritik öneme sahip olduğudur.

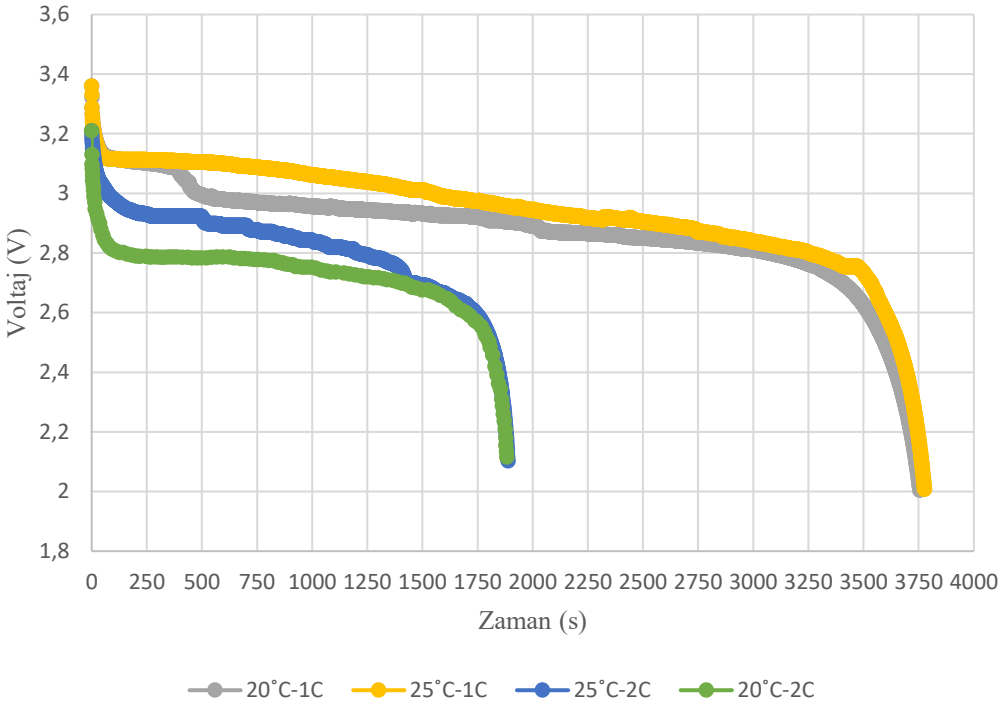
4.3. Pilin Deneysel Test Bulguları

Soğutucu plaka performansının daha gerçekçi şekilde değerlendirilebilmesi için, çalışmanın bu aşamasında gerçek bir prizmatik $LiFePO_4$ (LFP) pilin deşarj işlemi süresince oluşan gerilim ve sıcaklık davranışlarının verileri deneysel olarak elde edilmiştir. Bu veriler, hem pilin güvenli çalışma aralığının belirlenmesi hem de sayısal modelleme için güvenilir bir referans oluşturması açısından kritik öneme sahiptir.
Elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde, pilin deşarj süresince gerilim değerlerinin kararlı bir şekilde azaldığı ve sıcaklık artışının deşarj koşullarına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Bu davranış, pilin elektriksel ve termal tepkilerinin birbiriyle doğrudan ilişkili olduğunu ve bu ilişkinin sayısal modelleme aşamasında birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle, pilin yalnızca ısıl bir kaynak olarak değil, elektro-termal bir sistem olarak modellenmesi gerekli görülmüştür.
Bu doğrultuda, bir sonraki adımda gerçek pilin deneysel olarak elde edilen gerilim ve sıcaklık verilerine dayalı bir sayısal pil modeli oluşturulmuş ve bu modelin doğruluğu değerlendirilmiştir

4.3.1 Gerçek Prizmatik LFP Pilin Deneysel Bulguları ve Sayısal Doğrulaması

Gerçek prizmatik LFP pil üzerinde gerçekleştirilen 1C ve 2C deşarj testleri sonucunda elde edilen gerilim–zaman eğrileri, pilin tipik LFP karakteristiğini sergilediğini göstermektedir (Şekil 4.10). Hem 20 °C hem de 25 °C ortam sıcaklıklarında, deşarj süresi boyunca gerilim değerlerinin düzgün ve kararlı bir şekilde azaldığı, ani gerilim düşüşleri veya dalgalanmaların oluşmadığı gözlenmiştir.

Bu durum, deneysel verilerin pilin gerçek elektriksel davranışını temsil ettiğini ve sayısal modelleme için güvenilir bir temel oluşturduğunu göstermektedir.

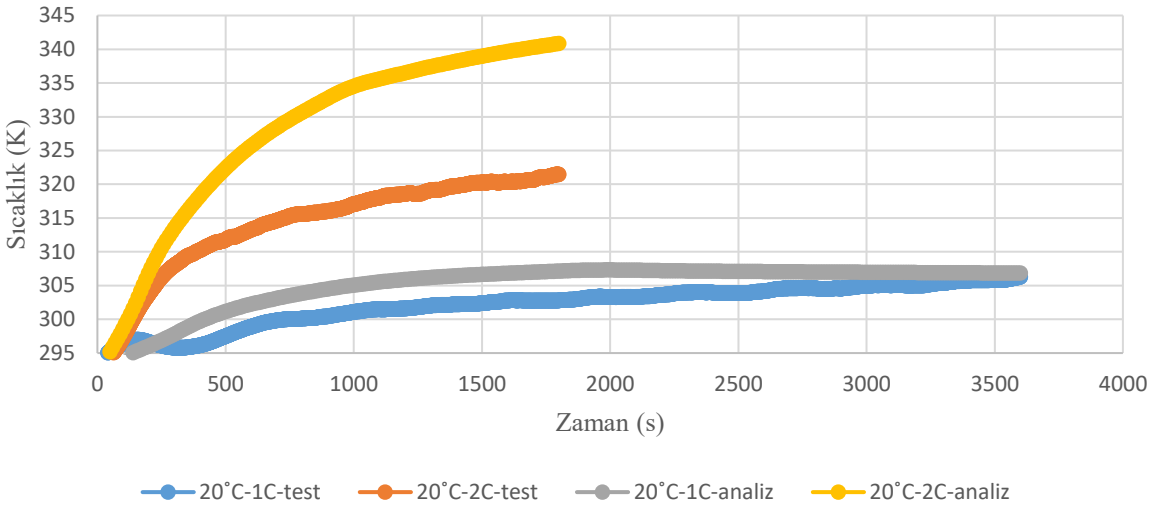


Şekil 4. 10. 20°C ve 25°C sıcaklıklarında 1C ve 2C deşarj testlerinden elde edilen deneysel gerilim–zaman eğrileri

Pilin modellenmesinde kullanılan NTGK modelinde gerekli olan U ve Y katsayıları için deneysel olarak 20°C ve 25°C sıcaklıklar altında 1C ve 2C deşarj testlerinden elde edilen zaman–gerilim verilerinden (Şekil 4.10) uygun bir aralık seçilerek Fluent'e yüklenip burada parametre tahmin aracı (parameter estimation) ile otomatik olarak hesaplanmıştır.

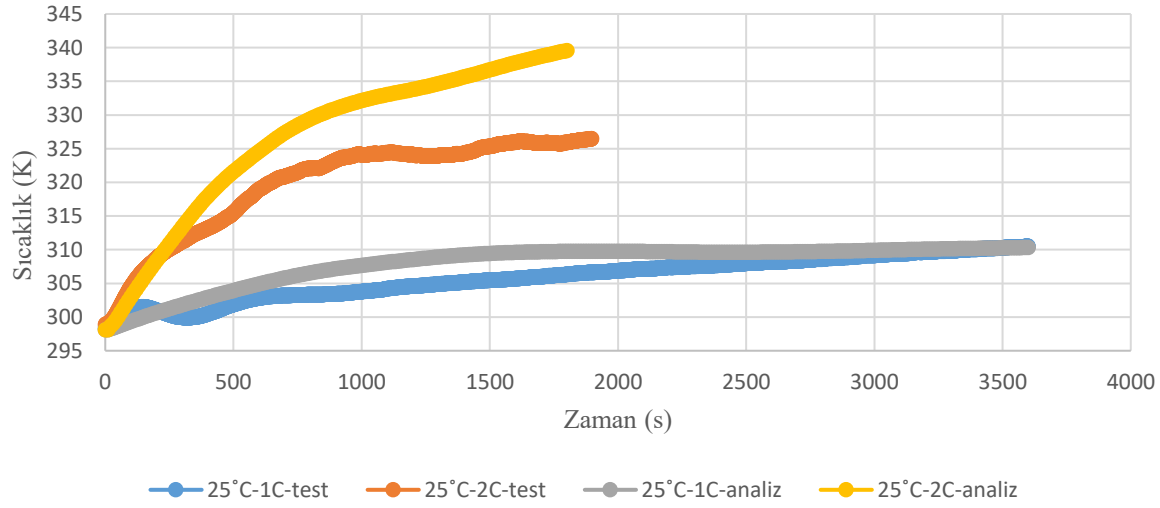
4.3.2. Deneysel Sıcaklık–Zaman Sonuçlarının İncelenmesi

Pil yüzeyine yerleştirilen ısıl çiftlerden elde edilen sıcaklık–zaman verileri incelendiğinde, sıcaklıkların deşarj akımı ve ortam sıcaklığına bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. 1C deşarj koşullarında, hem 20 °C (Şekil 4.11) hem de 25 °C (Şekil 4.12) ortam sıcaklıklarında pil sıcaklığının sınırlı bir artış gösterdiği ve güvenli çalışma aralığında kaldığı belirlenmiştir.



Şekil 4. 11. 20˚C'de 1C ve 2C deşarj sonucunda elde edilen sıcaklık- zaman eğrileri

Şekil 4.11'e göre 20˚C'de 1C ve 2C deşarj sonucunda elde edilen sıcaklık - zaman eğrileri 2C deşarj koşullarında ise pilin ürettiği ısı arttığı için yüksek sıcaklık değerlerine hızla ulaşılmıştır.



Şekil 4. 12. 25˚C'de 1C ve 2C deşarj sonucunda elde edilen sıcaklık- zaman eğrileri

25°C ortam sıcaklığında yürütülen deşarj testlerinde de aynı sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 4.12). En yüksek sıcaklık değerleri, pozitif kutba (katot bölgesine) en yakın olan ısıl çift üzerinden okunmuştur.

Bu durumun nedeni LFP hücrelerde katot bölgesindeki temas direncinin ve ohmik ısı üretiminin daha yüksek olmasıdır. Bu nedenle, sayısal doğrulama çalışmalarında da karşılaştırmalar aynı noktadan alınan sıcaklık değerleri üzerinden yapılmıştır.

4.3.3. NTGK Tabanlı Pil Modelinin Deneysel Verilerle Doğrulanması

Deneysel sıcaklık–zaman verileri ile NTGK modeli kullanılarak Fluent ortamında elde edilen sayısal sonuçlar karşılaştırıldığında, 20 °C ve 1C koşullarında yapılan deneysel testte pilin maksimum sıcaklığı 306,28 K iken Fluent tarafından hesaplanan maksimum sıcaklık 306,837 K değerine ulaşmıştır. 2C deşarj altında ise deneyde 321,44 K analize ise 340,8321 değeri elde edilmiştir (Şekil 4.11).

25°C ve 1C koşullarında yapılan deneysel testte pilin maksimum sıcaklığı 310,56 K iken Fluent tarafından hesaplanan maksimum sıcaklık 310,338 K değerindedir ayrıca 2C deşarjda deneysel veri 326,5 K iken analiz sonucunda sıcaklık değeri 339, 5849 K olarak ölçülmüştür (Şekil 4.12).

Deneysel verilerle ile analiz sonucunda ulaşılan sıcaklık verileri arasında fark denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\%Fark = \left|\frac{T_{analiz} - T_{deney}}{T_{deney}}\right| \times 100 \qquad (4.1)$$

1C deşarj sonucunda 20°C ve 25°C'de deney ve analiz sonuçları mükemmel bir örtüşme sağlarken 2C deşarjda sapmalar yaşanmıştır. 20°C, 2C deşarj sonucundaki sıcaklık verilerinde sapma değeri % 6,03 iken 25°C, 2C deşarjında oluşan sapma % 4 olarak hesaplanmıştır. Literatürde simülasyon modellerinin deneysel sonuçlarla

karşılaştırılmasında, yaklaşık %10 - %15 civarındaki yüzdesel hataların kabul edilebilir olduğu ve doğrulama için yeterli uyum sağladığı belirtilmiştir (Chen vd., 2020). Bu sonuç, NTGK tabanlı pil modelinin termal davranış açısından başarıyla doğrulandığını göstermektedir.

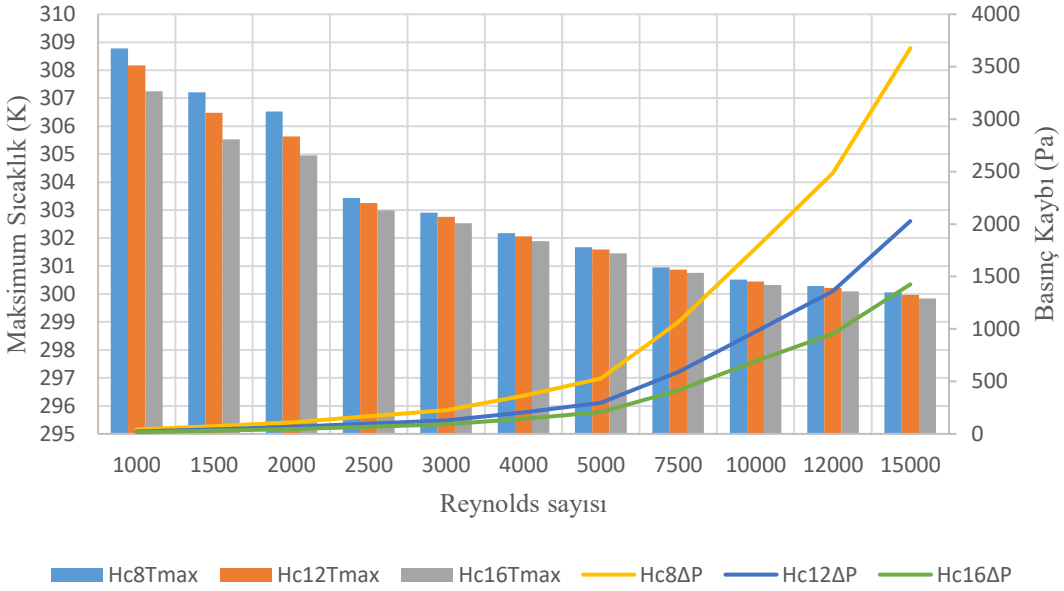
Gerilim–zaman ve sıcaklık–zaman eğrilerinden elde edilen sonuçlar, NTGK model parametrelerinin doğru şekilde belirlendiğini ve oluşturulan sayısal pil modelinin hem elektro-kimyasal hem de termal açıdan deneysel verilerle yüksek uyum sağladığını göstermektedir.

Bu nedenle doğrulanmış pil modeli, çalışmanın sonraki aşamalarında 25°C ve 2C deşarjda gerçekleştirilen soğutma analizlerinde güvenilir şekilde kullanılmıştır.

4.4. Pil Boyutlarındaki Soğutucu Plakada Geniş Reynolds Sayısı Aralığında Sıvı Soğutma Bulguları

Pilin temini birlikte soğutucu plakanın ölçüleri de alınan pile göre düzenlenerek analizler daha gerçekçi bir zeminde değerlendirilmiştir. Sadece sıvı soğutmada akışkan olan suyun yalnızca belirli debi veya hız değerleriyle sınırlı kalmadan daha kapsamlı biçimde incelenebilmesi amacıyla, Reynolds sayısının 1000–15000 aralığında değiştiği toplam 11 farklı akış koşulunda sıvı soğutmanın etkili olduğu ve sıvı soğutmanın yetersiz kalarak FDM'nin eklenebileceği aralıklar değerlendirilmiştir. Pil sayısal ortamda doğrulanmasına karşın bu analizlerde süreden tasarruf edebilmek amacıyla Pilden yayılan ısının temsili amacıyla soğutucu plakanın alt ve üst yüzeylerine 5000 W/m² sabit ısı akısı uygulanmıştır.

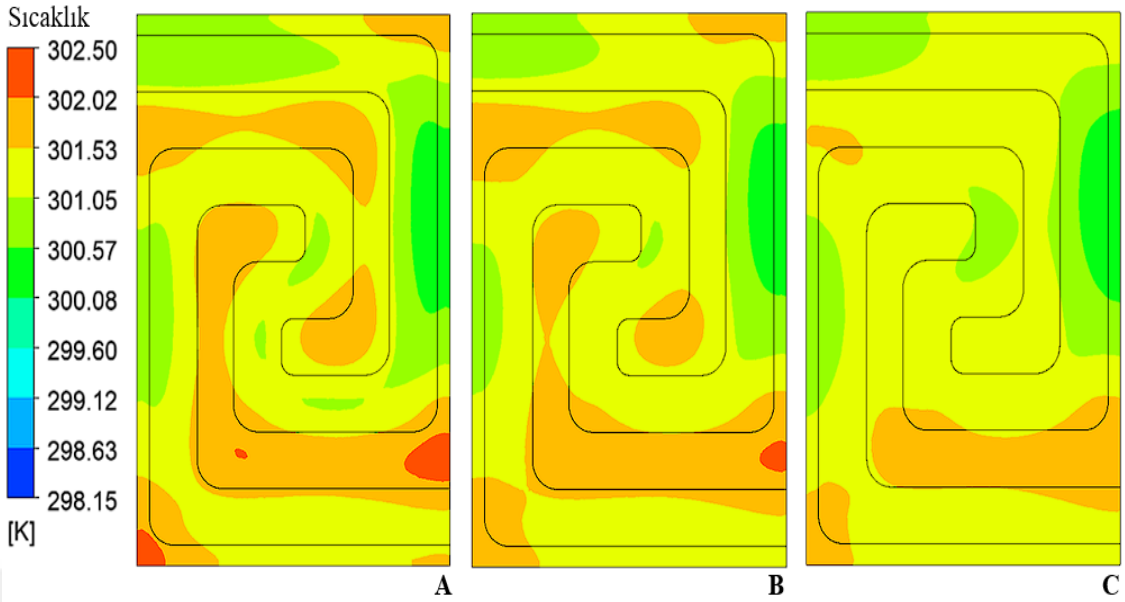
Bu kapsamda, kanal yüksekliğinin 8, 12 ve 16 mm değerleri için 11 farklı Re sayısı kullanıldığında oluşan soğutma performansının göstergesi olarak soğutucu plaka yüzeylerinde oluşan maksimum sıcaklık (T_{max}), sıcaklık homojenliği (T_σ) (Şekil 4.13) ve akışkanın oluşturduğu basınç kaybı (ΔP) birlikte değerlendirilmiştir.



Şekil 4. 13. Her kanal yüksekliği için Reynolds sayına göre maksimum sıcaklık ve basınç kaybı değişimi

Reynolds sayısının artmasıyla birlikte akış hızının yükselmesine bağlı olarak maksimum sıcaklık (T_{max}) değerleri tüm kanal yüksekliklerinde azalmıştır. Bununla birlikte, basınç kaybı (ΔP) akış hızına son derece duyarlı olup, özellikle düşük kanal yüksekliğinde önemli ölçüde artış göstermiştir.

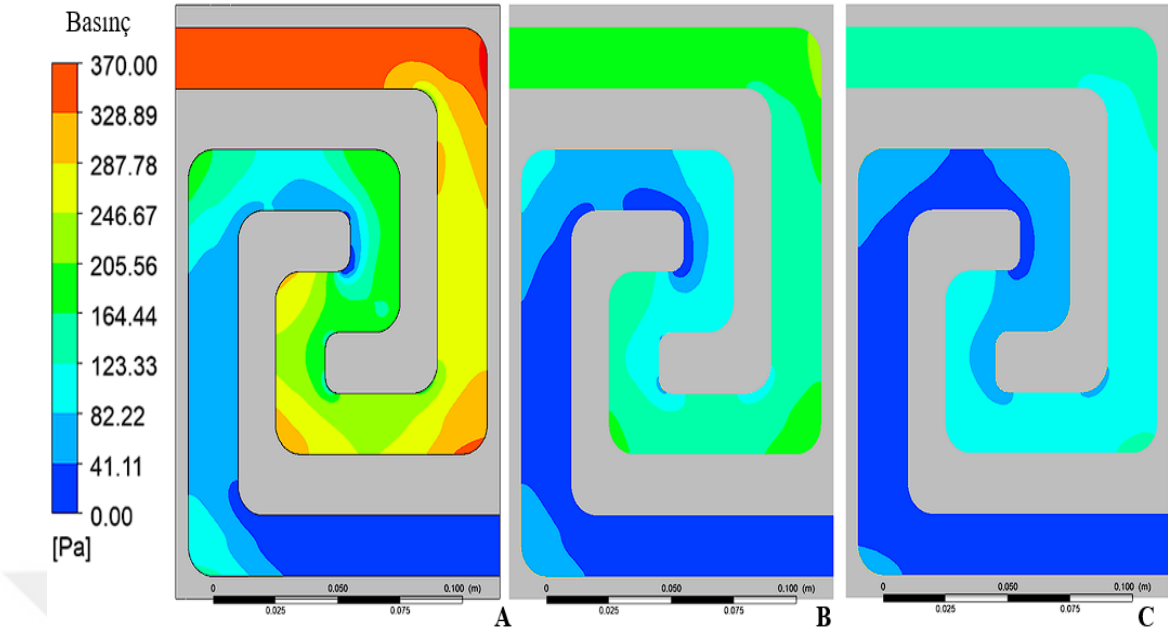
Re sayısının 4000 olduğu durumda hem maksimum sıcaklığın belirgin şekilde azalmış hem de basınç kaybı değerlerinde aşırı bir artış gözlenmemiştir. Şekil 4.14'te, Re sayısının 4000 olduğu durum için farklı kanal yüksekliklerinde elde edilen alt yüzeydeki sıcaklık dağılımları sunulmaktadır ve. Kanal yüksekliği arttıkça sıcaklık dağılımının da yüzey genelinde daha homojen hale geldiği görülmektedir.



Şekil 4. 14. Re = 4000 için soğutucu plakanın alt yüzeyindeki sıcaklık dağılımları **A)** H_c=8mm **B)** H_c=12 mm **C)** H_c=16 mm

8 mm kanal yüksekliğinde, özellikle kanal dönüş bölgelerinde lokal sıcaklık yığılmaları oluşurken, 12 mm ve 16 mm kanal yüksekliklerinde bu bölgelerdeki sıcaklık gradiyentlerinin azaldığı dikkat çekmektedir.

Reynolds sayısının artması sonucunda akışkanın hızı doğru orantılı olarak artmaktadır (Denklem 3.15). Basınç kaybı (ΔP) değeri de akışkan hızından etkilenerek her kanal yüksekliğinde Reynolds sayının artması sonucunda akış rejiminin de değişmesiyle artan bir eğilim göstermiştir. Kanal yüksekliğinin 8 mm olduğu durumda basınç kaybı değeri Re = 1000'de 42 Pa'dan, Re = 15 000'de 3676 Pa değerine yükselmiştir. Re = 15 000 değerinde iken kanal yüksekliğinin 8 mm'den 12 mm'ye çıkarılmasıyla basınç kaybı yaklaşık % 45, 16 mm'ye çıkarılmasıyla ise % 60 oranında azalmıştır.



Şekil 4. 15. Re = 4000 için soğutucu plakada akışkan basınç dağılımları **A)** H_c=8mm **B)** H_c=12 mm **C)** H_c=16 mm

Şekil 4.15'te farklı kanal yüksekliklerinde ve 4000 Reynolds sayısında elde edilen basınç dağılımları sunulmaktadır. Tüm kanal yüksekliklerinde en yüksek basınç değerlerinin giriş bölgesinde ve keskin kanal dönüşlerinde oluştuğu görülmektedir. Kanal yüksekliğinin 8 mm olduğu durumda, akış kesitinin daralmasına bağlı olarak basınç gradiyentlerinin belirgin şekilde arttığı ve özellikle dönüş bölgelerinde yüksek basınç yığılmalarının oluştuğu dikkat çekmektedir. Kanal yüksekliği 12 mm ve 16 mm'ye çıkarıldığında, akış kesitinin genişlemesiyle birlikte basınç düşüşü daha düzgün bir dağılım göstermektedir.

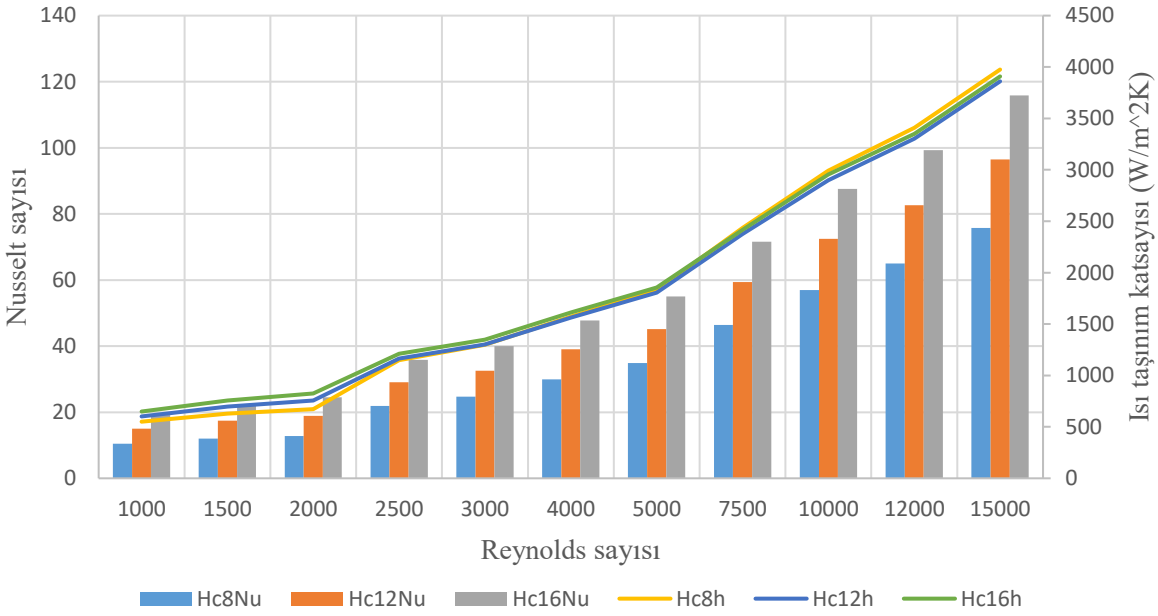
Yukarıda sunulan sıcaklık ve basınç kaybı sonuçları soğutma performansının genel eğilimini ortaya koymaktadır. Bu eğilimlerin altında yatan ısı transfer mekanizmasını daha detaylı inceleyebilmek amacıyla, sabit ısı akısı altında hesaplanan ısı taşınım katsayısı (h) ve bu değer kullanılarak elde edilen Nusselt sayısı (Nu) değerlerinin Reynolds sayısı ve kanal yüksekliği ile değişimleri ayrıca değerlendirilmiştir (Çizelge 4.4).

Çizelge 4. 4. Her kanal yüksekliği için Reynolds sayına göre değişen hız, ısı taşınım katsayısı ve Nusselt sayısı değerleri

	8 mm			12 mm			16 mm		
Re	u	h	Nu	u	h	Nu	u	h	Nu
1000	0,088	550,689	10,489	0,067	601,757	15,044	0,057	649,489	19,244
1500	0,132	630,641	12,012	0,100	697,852	17,446	0,085	757,193	22,435
2000	0,176	672,816	12,816	0,134	756,712	18,918	0,113	826,038	24,475
2500	0,220	1149,716	21,899	0,419	1164,079	29,102	0,353	1210,299	35,861
3000	0,264	1297,458	24,713	0,201	1302,589	32,565	0,170	1349,710	39,991
4000	0,352	1572,456	29,952	0,268	1562,808	39,070	0,226	1611,978	47,762
5000	0,440	1831,421	34,884	0,335	1807,266	45,182	0,283	1856,176	54,998
7500	0,659	2433,658	46,355	0,502	2376,652	59,416	0,424	2417,175	71,620
10000	0,879	2991,576	56,982	0,670	2898,904	72,473	0,565	2955,537	87,571
12000	1,055	3409,990	64,952	0,804	3303,819	82,595	0,678	3350,892	99,286
15000	1,319	3975,290	75,720	1,005	3860,646	96,516	0,848	3908,326	115,802

Reynolds sayısı arttıkça akışkanın hızı da artmıştır. Taşınımla ısı transferinde akışkan hızının artması, termal sınır tabakanın incelmesine ve dolayısıyla da ısı taşınım katsayısının (h) yükselmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak Reynolds sayısındaki artışla birlikte h ve Nu değerlerinde de belirgin bir artış gözlenmiştir.

8 mm kanal yüksekliğinde h değeri Re = 1000'de yaklaşık 550 W/m²K seviyesindeyken, Re = 15 000'de 3975 W/m²K'a yükselmiştir. Benzer şekilde 12 mm ve 16 mm kanal yüksekliklerinde h değerleri sırasıyla yaklaşık olarak 600 değerinden 3860 W/m²K ve 650'den 3908 W/m²K değerine değişim göstermiştir (Şekil 4.16).



Şekil 4. 16. Her kanal yüksekliği için Reynolds sayına göre Nusselt sayısı ve ısı taşınım katsayısı

Hesaplanan ısı taşınım katsayısı değerlerinden elde edilen Nusselt sayıları, akış rejiminin ve kanal yüksekliğinin ısıl taşınıma etkisini açıkça göstermektedir. 8 mm kanalda Re = 1000'de Nu = 10,5, Re = 15 000'de Nu = 75,7 olarak belirlenmiştir. Aynı aralıkta 12 mm ve 16 mm kanallar için Nusselt sayısı sırasıyla 15'ten 96,5'e ve 19'dan 115,8'e değişmektedir. Kanal yüksekliği arttıkça Nu değerlerindeki artış oranı h'ye göre daha belirgin olmuştur (Çizelge 4.4).

Bu sonuçlar, ısı transferinin hem akış koşullarına hem de geometrik parametrelere duyarlı olduğunu; akış rejiminin türbülans karakterine geçtikçe taşınımla ısı taşınımının daha etkin hale geldiğini göstermektedir.

Sonuç olarak Reynolds sayısı arttıkça ısı taşınım katsayısı hızla yükselmiş buna karşılık olarak maksimum sıcaklık değerleri de belirgin şekilde düşmüştür. Bu oluşan duruma göre yüksek Reynolds sayılarında türbülansın da etkisiyle sıvı soğutmanın tek başına yeterli olabildiği görülmektedir. Bu yüksek Reynolds sayılı bölgelerde (Re > 2500)

sıcaklıklar düşük olduğundan FDM uygulanması ek bir fayda sağlamayacaktır. Hatta gereksiz malzeme ve ağırlık artışı oluşturacaktır.

FDM'in ekleneceği çalışma aralığı sıvı soğutmanın tek başına yetersiz kaldığı laminer akış rejiminde ve daha düşük Reynolds sayılarında (Re < 1000) olmasına karar verilmiştir. Bu aralıkta yüzeydeki sıcaklıklar hem yüksektir hem de dengesiz dağılım göstermiştir.

4.5. Pil Modellemesi Dahil Edilen Hibrit Soğutma Bulguları

Pilin boyutlarına göre düzenlenmiş geometride yapılan sıvı soğutma analizi sonuçlarına göre Reynolds sayısının düşük değerlerinde FDM eklenmesinin sıvı soğutmaya etkileri gerçek pil de aynı anda deşarj edilerek ısı akısı yerine pilin gerçek koşulları altında analiz edilmiştir. Önceki çalışmaya ek olarak en düşük kanal yüksekliği olan 4mm değerinde de analizler yapılmıştır. Faz değiştiren malzemelerin etkisinin gözlenebilmesi için iki farklı FDM kullanılmış ayrıca kanalların soğutucu plakaya olan mesafelerinin başlangıç halinde olan küçük hacim (7,5-5 mm) ve bu uzaklıklar kısaltılarak elde edilen büyük hacimli FDM (5,5-3 mm) ile iki farklı FDM hacmi elde edilmiştir. Elde edilen bulgular tüm bu parametrelerin değişimine göre değerlendirilmiştir. Ayrıca bu Re sayaları için sadece su soğutmanın olduğu analizlerde yapılarak hibrit soğutma ile kıyaslanmıştır. Böylece FDM'nin tüm etkileri gözlenebilmektedir.

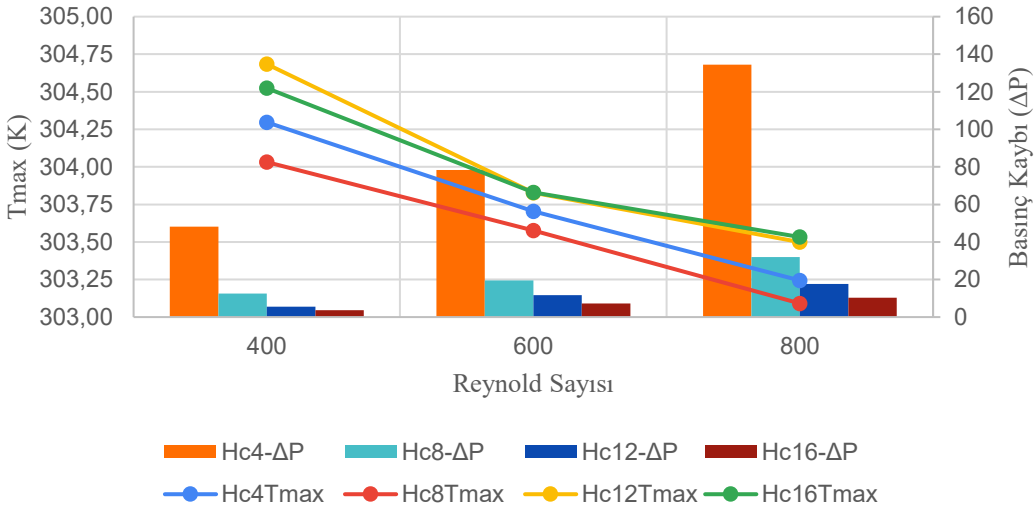
Tüm parametrelerin birbiriyle etkileşimi değerlendirilmek istenip, hiçbir kombinasyon analiz dışında bırakılmayacak şekilde hibrit soğutma performansı için üç Reynolds sayısı, üç kanal yüksekliği, iki faz değiştiren malzeme ve iki faz değiştiren malzeme hacmi olmak üzere toplam 48 adet analiz yapılmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4. 5. Pil modelinin dahil olduğu hibrit soğutma sonuçları

T_{max}												
	7,5-5			5,5-3			7,5-5			5,5-3		
	RT25HC						RT28HC					
	400	600	800	400	600	800	400	600	800	400	600	800
4mm	304,297	303,705	303,244	304,268	303,68	303,222	304,248	303,701	303,256	304,212	303,675	303,234
8mm	304,032	303,576	303,091	304,511	303,97	303,523	303,985	303,585	303,126	304,449	303,979	303,562
12mm	304,684	303,828	303,499	304,656	303,811	303,494	304,652	303,872	303,558	304,626	303,861	303,541
16mm	304,524	303,829	303,533	304,52	303,784	303,53	304,523	303,882	303,584	304,524	303,844	303,587
Tσ												
	7,5-5			5,5-3			7,5-5			5,5-3		
	RT25HC						RT28HC					
	400	600	800	400	600	800	400	600	800	400	600	800
4mm	0,157	0,197	0,234	0,147	0,189	0,221	0,160	0,197	0,233	0,151	0,190	0,219
8mm	0,137	0,177	0,184	0,197	0,231	0,259	0,135	0,177	0,186	0,192	0,230	0,262
12mm	0,234	0,281	0,288	0,236	0,277	0,29	0,236	0,278	0,284	0,237	0,274	0,278
16mm	0,242	0,282	0,289	0,234	0,299	0,287	0,244	0,279	0,285	0,235	0,294	0,282
h												
	7,5-5			5,5-3			7,5-5			5,5-3		
	RT25HC						RT28HC					
	400	600	800	400	600	800	400	600	800	400	600	800
4mm	126,56	133	138,161	124,099	130,385	135,273	125,2	133,403	139,546	122,53	130,728	136,76
8mm	106,629	110,553	114,969	106,348	110,444	114,038	105,29	111,175	116,183	104,653	110,999	117,138
12mm	93,365	99,786	102,396	91,269	97,648	100,682	93,027	102,364	105,027	91,048	100,399	102,857
16mm	84,002	88,88	91,385	81,844	87,258	90,074	84,545	92,022	93,297	82,531	90,226	92,937
Nu												
	7,5-5			5,5-3			7,5-5			5,5-3		
	RT25HC						RT28HC					
	400	600	800	400	600	800	400	600	800	400	600	800
4mm	1,406	1,478	1,535	1,379	1,449	1,503	1,391	1,482	1,55	1,361	1,452	1,519
8mm	2,031	2,106	2,19	2,026	2,104	2,172	2,006	2,118	2,213	1,994	2,115	2,231
12mm	2,334	2,495	2,56	2,282	2,441	2,517	2,326	2,559	2,626	2,276	2,51	2,571
16mm	2,489	2,633	2,708	2,425	2,585	2,669	2,505	2,726	2,764	2,445	2,673	2,754
ΔP												
	7,5-5			5,5-3			7,5-5			5,5-3		
	RT25HC						RT28HC					
	400	600	800	400	600	800	400	600	800	400	600	800
4mm	48,132	78,32	134,422	49,099	79,934	136,941	48,132	78,32	134,422	49,131	79,728	136,936
8mm	12,565	19,527	31,992	12,709	19,836	32,268	12,565	19,535	32,174	12,197	19,836	32,419
12mm	5,626	11,747	17,67	5,738	11,942	18,395	5,626	11,747	17,67	5,738	11,942	17,495
16mm	3,645	7,289	10,336	3,652	7,691	10,945	3,645	7,237	10,437	3,652	7,691	10,876

4.5.1. Reynolds Sayısının Hibrit Sistem Üzerindeki Etkisi

Reynolds sayısının 400, 600 ve 800 değerleri için hibrit sistemin soğutma performansı incelenmiştir. Reynolds sayısının atması ile akışkanın debisi de doğru orantılı olarak artış göstermiştir ve bunun sonucunda tüm kanal geometrileri ve FDM türlerinde maksimum sıcaklık değeri azalan bir eğilim göstermiştir. Özellikle RT25HC faz değiştiren malzemenin kullanıldığı ve FDM hacminin daha düşük olduğu (7.5–5) kanal geometrisi ile 8 mm kanal yüksekliği koşulunda, Reynolds sayısının 400'den 800'e çıkarılması ile maksimum sıcaklık 304,032 K'den 303,091 K'ye düşmüş ve analizler kapsamında elde edilen en düşük T_{max} değerine bu kombinasyonda ulaşılmıştır (Şekil 4.17). Benzer şekilde RT28HC faz değiştiren malzemesi ve her iki FDM hacminde de Reynolds sayısı arttıkça maksimum sıcaklık değeri azalmıştır.



Şekil 4. 17. Hibrit sistemde Reynolds sayısının maksimum sıcaklık üzerindeki etkisi (RT25HC, 7.5–5, 8 mm)

Reynolds sayısının artmasıyla maksimum sıcaklık azalmıştır ancak sıcaklığı homojenliği (T_σ) değeri artış göstermiştir. Akışkanın yüksek hızı bazı bölgelerde daha etkin ısı transferi sağlamıştır ancak diğer bölgelerde sıcaklık farkları artış göstermiş olup yüzey sıcaklığının heterojen dağılım göstermesine neden olmuştur.

Basınç kaybında da Reynolds sayısı ve dolayısıyla akışkan hızı artışına bağlı olarak her durumda belirgin bir yükseliş gözlenmiştir (Şekil 4.17). Özellikle dar kanalda bu sonuç daha net gözlenmektedir. Şekil 4.17 incelendiğinde kanal yüksekliğinin 4 mm olduğu durumlarda Reynolds sayısı 400'den 800'e arttırıldığında basınç kaybı değerinin de yaklaşık olarak 48 Pa'dan 134 Pa'a yükseldiği net bir şekilde görülmektedir. Kanal yüksekliği arttıkça basınç kayıpları azalmaktadır ancak Reynolds sayısındaki artış hidrolik kayıpları arttırmaktadır.

Isı taşınım katsayısı (h) analiz edildiğinde ise tüm kombinasyonlarda artan Reynolds sayısı ile ısı taşınım katsayısı değeri de artış göstermiştir. Örneğin RT28HC faz değiştiren malzeme ve küçük FDM alanında, kanal yüksekliğinin 4mm olduğu durumda Reynolds sayısının 400 ve 800 olduğu durumlarda ısı taşınım katsayısı değeri sırasıyla 125,2 ve 139,55 W/m^2K olarak elde edilmiştir. Reynolds sayısındaki artışa bağlı olarak akış hızının yükselmesiyle birlikte hız sınır tabaka incelmektedir bu da ısıl sınır tabanın incelmesine yol açmaktadır. Bu durum duvar yakınındaki alanlarda sıcaklık gradyanını artırarak taşınım mekanizmasının güçlenmesini sağlamıştır. Aynı zamanda Nusselt sayısı analiz edildiğinde de paralel şeklide bir artış gözlenmiştir.

Bu sonuç, Reynolds sayısının seçiminin yalnızca termal performans değil, aynı zamanda pompalama gücü gereksinimi açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Genel olarak Reynolds sayısının artırılması hibrit soğutma sisteminde maksimum sıcaklığın düşürülmesi ve taşınımla olan ısı transferinin artmasında olumlu bir etki yaratmıştır. Ancak sıcaklık homojenliği nispeten olumsuz etkilenmiştir tabi bu etkinin sadece Reynolds sayısına bağlanması mantıklı bir yöntem değildir. Ayrıca basınç kaybında belirgin bir artış gözlenmiştir. Bu sonuçlara bakılarak Reynolds sayısının seçiminin sadece termal performans için değil aynı zamanda pompalama gücü açısından da önemli bir parametre olduğunu gözler önüne sermektedir.

4.5.2. Kanal Yüksekliğinin Hibrit Soğutma Sistemi Performansı Üzerindeki Etkisi

Reynolds sayısı ile FDM türü ve hacmi sabit tutulup kanal yüksekliğinin maksimum sıcaklık, sıcaklık homojenliği, Nusselt sayısı ve basınç kaybı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kanal yüksekliği hibrit sistemde hem termal hem de hidrolik davranışı belirleyen en baskın parametrelerden biri olduğu gözlenmiştir.

Maksimum sıcaklık (T_{max}) açısından değerlendirildiğinde artan kanal yüksekliği ile düşüş gözlenmiştir. Genel olarak bakıldığında en düşük maksimum sıcaklık değerleri 8 mm kanal yüksekliğinde elde edilmiştir. Örneğin RT25HC ve küçük FDM hacmi olan durumda Reynolds sayısı 800 iken T_{max} değeri 4 mm kanal yüksekliğinde 303,244 K, 8 mm'de 303,091 K, 12 mm'de 303,499 K ve 16 mm'de 303,533 K olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlarla kanal yüksekliğinin belirli bir değerde optimum performans sağladığını göstermektedir.

Isı taşınım performansı için Nusselt sayısı incelendiğinde kanal yüksekliği arttıkça Nusselt sayısının düzenli olarak yükseldiği görülmektedir. Örneğin RT25HC ve küçük FDM kombinasyonunda Reynolds sayısı 800 için Nusselt sayısı kanal yüksekliği 4 mm'de 1,535, 8 mm'de 2,190, 12 mm'de 2,560 ve 16 mm'de 2,708 olarak hesaplanmıştır. Kanal yüksekliğiyle birlikte hidrolik çapta arttığı için Nusselt sayısı da etkilenmektedir. Sıcaklık homojenliği açısından bakıldığında ise durum Reynolds sayısı artışı ile aynı sonucu vermektedir yani homojenlik değeri azalarak sıcaklık heterojen dağılım göstermiştir. Bu sonucu faz değiştiren malzemenin varlığı da çok etkilemektedir.

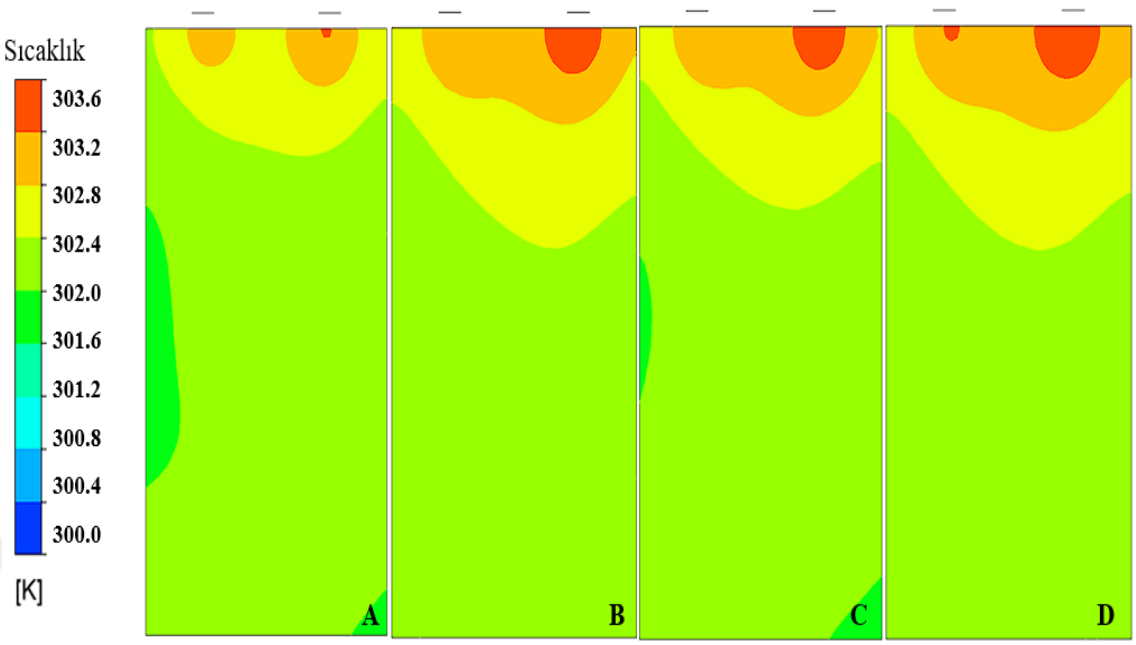
Basınç kaybı (ΔP) sonuçlarına göre de kanal yüksekliği arttıkça basınç kaybının belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Böylece artan kanal yüksekliği ile pompalama gücü gereksinimi önemli ölçüde azalmaktadır.

Genel olarak kanal yüksekliği maksimum sıcaklık, ısı taşınımı ve basınç kaybı sonuçlarında önemli bir etkiye sahiptir. Kanal yüksekliğinin 8 mm olduğu durumların düşük maksimum sıcaklık ve kabul edilebilir derecede sıcaklık homojenliği ve uygun bir basınç kaybı oluşturduğu için hibrit soğutma sisteminde en uygun değer olduğuna ulaşılmıştır.

4.5.3. FDM Türü ve Hacminin Hibrit Soğutma Sistemi Performansı Üzerindeki Etkisi

Faz değiştiren malzeme türü ve hacminin hibrit soğutma sistemindeki etkisi, yalnızca maksimum sıcaklık değerlerine bakılarak değil aynı zamanda FDM'nin zamana bağlı faz değişim davranışı dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Genel olarak faz değiştiren malzemenin erime oranları %90 erimeye ulaşma süreleri incelenmiştir.

RT25HC kullanılan tüm kombinasyonlarda erime sıcaklığının düşük olması nedeniyle erime oranı diğer FDM türüne göre çok yüksektir. Örneğin kanal yüksekliğinin 4 mm olduğu durumda her iki FDM hacminde RT25HC faz değiştiren malzemesi tüm Reynolds sayılarında %90 erime seviyesine erken sürelerde (yaklaşık 140–180 s aralığında) ulaşmış olup sonrasında da tamamıyla erimiştir. Kanal yüksekliğinin artırılmasıyla birlikte %90 erimeye ulaşma süresi de uzamıştır. Bunun nedeni kanal yüksekliği FDM daha geç faz değişimine uğramaktadır (Şekil 4.18).



Şekil 4. 18. RT25HC faz değiştiren malzemesi ile büyük FDM hacmi için farklı kanal yüksekliklerinde pil dış yüzeyinde elde edilen sıcaklık dağılımları **A)** H_c=4mm **B)** H_c=8mm **C)** H_c= 12 mm **D)** H_c=16 mm

Şekil 4.18 incelendiğinde kanal yüksekliğinin 4 mm olduğu durumda, sınırlı akış kesiti ve düşük FDM etkinliği nedeniyle pil yüzeyinde daha belirgin sıcaklık gradyenleri oluşmuştur. Kanal yüksekliği 8 mm ve 12 mm'ye çıkarıldığında hem akışkan dolaşımının iyileşmesi hem de FDM hacminin artmasıyla birlikte sıcaklık dağılımının daha homojen hale geldiği gözlemlenmiştir. En yüksek kanal yüksekliği olan 16 mm durumunda ise sıcaklık dağılımı yüzey genelinde daha dengeli bir yapı sergilemiş, ancak maksimum sıcaklıktaki azalma sınırlı kalmıştır.

Reynolds sayısının RT25HC malzemesi üzerindeki etkisine bakıldığında Reynolds sayısı arttıkça %90 erimeye ulaşma süresi de uzamıştır ve ortalama erime oranları da azalmıştır. Bu durum, artan akış hızı ile ısıl taşınımda artmakta olup soğutma etkisi için FDM'nin varlığına olan ihtiyacın azalmasıdır.

RT28HC kullanılan kombinasyonlarda ise RT25HC'ye kıyasla faz değişimi davranışı belirgin şekilde farklılık göstermiştir. RT28HC'nin erime oranı tüm kanal yüksekliklerinde ve FDM hacimlerinde düşük seviyelerde kalmıştır. Özellikle Reynolds

sayısının 600 ve 800 olduğu durumlarda ortalama erime oranları genellikle %5'in altında bir değerdedir. En yüksek erime oranlarına (%25-30) ise Reynolds sayısı 400 olduğu ve kanal yüksekliğinin de 4 ve 8 mm olduğu durumlarda ulaşılmıştır. Kanal yüksekliği ve Reynolds sayısı arttıkça RT28HC'nin büyük ölçüde katı fazda kaldığı ve soğutmaya nerdeyse etki etmediği görülmektedir.

FDM hacminin FDM erime davranışı üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde düşük FDM hacminde ve özellikle RT25HC kullanılan kombinasyonlarda ortalama erime oranlarının daha yüksek olduğu ve %90 erimeye ulaşma süresinin de daha erken gerçekleştiği görülmüştür. Buna karşılık FDM hacminin daha fazla olduğu durumlarda ise %90 erime derecesine nispeten daha geç sürelerde ulaşılmıştır.

4.5.4. Pil Modellemesi Dahil Edilen Sistemde Sadece Su Soğutma Bulguları

Bu bölümde, pil modelinin dahil edildiği soğutucu plaka sisteminde faz değiştiren malzeme kullanılmadan sadece su soğutma yapılarak sonuçlar incelenmiştir. Faz değiştiren malzemelerin bulunduğu hacimlerde soğutucu plaka malzemesi olan alüminyum bulunmaktadır. Elde edilen bulgular, aynı pil ve geometrik koşullar altında değerlendirilen hibrit (su + FDM) soğutma sonuçları ile karşılaştırmalı olarak yorumlanmak üzere sunulmuştur (Çizelge 4.6).

Çizelge 4. 6. Pil modelinin dahil edildiği sıvı soğutma sonuçları

	T_{max}					
	7,5-5			5,5-3		
	400	600	800	400	600	800
4mm	304,270	303,667	303,197	304,249	303,645	303,182
8mm	304,469	303,941	303,469	304,443	303,911	303,447
12mm	304,668	303,760	303,386	304,614	303,708	303,381
16mm	304,454	303,667	303,408	304,423	303,653	303,347
	T_{σ}					
	7,5-5			5,5-3		
4mm	0,158	0,198	0,234	0,150	0,191	0,232
8mm	0,201	0,240	0,270	0,196	0,230	0,263
12mm	0,217	0,275	0,279	0,209	0,259	0,274
16mm	0,228	0,284	0,278	0,220	0,286	0,263
	h					
	7,5-5			5,5-3		
4mm	126,337	132,831	138,039	123,888	130,191	135,287
8mm	109,137	113,651	117,685	106,907	111,376	115,663
12mm	95,180	101,951	104,552	93,399	99,814	102,254
16mm	86,408	91,752	94,197	84,656	89,879	91,932
	Nu					
	7,5-5			5,5-3		
4mm	1,404	1,476	1,534	1,376	1,446	1,503
8mm	2,079	2,165	2,242	2,037	2,122	2,203
12mm	2,379	2,549	2,614	2,335	2,495	2,556
16mm	2,560	2,718	2,791	2,508	2,663	2,754
	ΔP					
	7,5-5			5,5-3		
4mm	48,106	78,374	134,795	48,954	79,711	136,379
8mm	12,573	19,534	32,497	12,786	19,980	32,554
12mm	5,584	11,835	17,880	5,701	11,899	18,065
16mm	3,631	7,431	10,885	3,659	7,632	11,109

Sadece sıvı soğutmanın olduğu durumlar da incelendiğinde artan Re sayısı ile genellikle azalma eğilimi göstermiştir. Ancak hibrit soğutma ile karşılaştırıldığında FDM'nin katkısı T_{max} değerli üzerinde çok sınırlı bir etki göstererek kimi durumlarda iyileştirme kimi durumda ise daha kötüleştirme yönünde olmuştur. Başka bir deyişle FDM eklenmesi T_{max} değerleri üzerinde tutarlı bir sonuç vermemiştir.

Sıcaklık homojenliği değerleri kıyaslandığında yalnız sıvı soğutmalı durumda kanal yüksekliği arttıkça değerler düşmektedir. Ancak düşük kanal yüksekliklerinde her iki faz değiştiren için de geçerli olacak şekilde FDM varlığı sadece sıvı soğutmaya göre daha homojen bir sıcaklık dağılımı vermektedir.

Sadece sıvı soğutma olan durumlara kıyasla FDM eklendiğinde akışkanın ısı taşınım katsayısı değerleri düşmektedir bunun nedeni faz değişimi sırasında oluşan gizli ısının ortaya çıkarak taşınımın yükünü azaltmasıdır.

Genel bir değerlendirme yapılırsa pil dahil edilen sistemde hibrit sistem yaklaşımında özellikle de küçük FDM hacminde (7,5–5) kanal yüksekliğinin 8 mm olduğu koşullarda T_{max} ve T_{σ} sonuçlarında bir iyileşme gözlenmiştir. Diğer durumlarda FDM'nin etkisi çok düşük veya olumsuz yönde olmuştur.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında hibrit bir soğutucu plakanın soğutma performansı sistematik bir şekilde ilerlenerek incelenmiştir. Soğutma performansı için maksimum sıcaklık, sıcaklık homojenliği ve basınç kaybı kriterleri değerlendirilmiştir. Öncelikle referans seçilen geometri üzerinden sıvı soğutma sonrasında da hibrit soğutma analizleri ile faz değiştiren malzemeler hakkında bilgi edinilmiştir ardından elde edilen çıkarımlar gerçek prizmatik LFP pil modeliyle birleştirilerek daha gerçekçi bir tasarım oluşturulmuştur. Pil modeli kullanılarak hibrit ve yalnız sıvı soğutma karşılaştırılarak hibrit soğutmanın hangi koşullarda anlamlı olduğu ve hangi koşullarda gereksiz kaldığı net biçimde ortaya konmuştur. Bu hibrit çalışmaya ek olarak geniş Reynolds sayısı aralığında yalnızca sıvı soğutma yapılarak kapsamlı bilgiler elde edilmiştir.

Çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan Taguchi tabanlı gri ilişki analizinde basınç kaybı değerinin, maksimum sıcaklık ve sıcaklık homojenliğine kıyasla ağırlık katsayısı daha yüksektir bu nedenle referans geometrili sıvı soğutmada soğutma performansı değerlendirildiğinde optimum tasarım en yüksek değerler olan 6 mm kanal yüksekliği ve 12 mm toplam plaka yüksekliğinin olduğu kombinasyondur.

Hibrit soğutmada düşük debilerde sıvı soğutma yetersiz kalmakta ve FDM'nin tamamı da eriyerek etkisini yitirmektedir. Yüksek debilerde de sıvı soğutma tüm soğutma ihtiyacını tek başına karşılamaktadır. Hibrit sistem için anlamlı katkı yalnızca belirli bir akış aralığında (≈0,005 kg/s) gözlenmiştir.

Pil boyutlarına göre tekrar düzenlenen tasarımda sıvı soğutmanın etkinliği Reynolds sayısına göre değişmektedir. Reynolds sayısı arttıkça maksimum sıcaklık azalmakta, sıcaklık dağılımları homojen hale gelmekte ancak artan hızla birlikte akış rejime türbülanslıya döndüğü için basınç kaybı değeri de yükselmektedir. Re > 2500 bölgesinde sıcaklık değerleri pillerin güvenli çalışma sıcaklığı değerleri olduğundan bu bölgelerde sıvı soğutmaya ek olarak faz değiştiren malzeme eklenmesi ilave bir fayda sağlamamaktadır.

Pil modeli de soğutucu plaka tasarımına dahil edilip hibrit soğutma sistemi incelendiğinde FDM'nin en belirgin katkısı, düşük Reynolds ve dar kanal koşullarında sıcaklık homojenliğinin iyileştirilmesidir. Özellikle düşük kanal yüksekliklerinde FDM, yalnız sıvı soğutmaya kıyasla yüzey sıcaklıklarının daha dengeli dağılmasını sağlayabilmiştir.

FDM eklenmesiyle ısı taşınım katsayısının (h) düşmesi, soğutmanın zayıfladığı anlamına gelmemektedir. Bu durum, faz değişimi sırasında devreye giren gizli ısının taşınım yükünü azaltmasıyla açıklanmaktadır. Isının bir kısmı FDM içinde depolanarak sıcaklık artışları bastırılmaktadır.

FDM türü ve hacmi, hibrit soğutmanın başarısını belirleyen kritik parametrelerdir. RT25HC, çalışma sıcaklık aralığıyla daha iyi örtüştüğü koşullarda daha aktif davranırken; RT28HC birçok durumda katı kalarak soğutmaya sınırlı katkı sağlamıştır. Etkin FDM seçimi, yalnızca malzeme özelliklerine değil çalışma koşullarına bağlıdır.

Bu tez, hibrit soğutmanın her koşulda üstün bir çözüm olmadığını ancak doğru geometri, uygun Reynolds aralığı ve doğru FDM seçimi altında sıcaklık homojenliğini iyileştiren tamamlayıcı bir yaklaşım olarak anlam kazandığını ortaya koymuştur.

KAYNAKLAR

ANSYS Ansys Fluent 19.0 Theory Guide; Release 19.; ANSYS Inc.: Canonsburg, PA, USA, 2021.

Bademlioglu, A.H., Canbolat, A.S., & Kaynakli, O. (2020). Multi-objective optimization of parameters affecting ORganic Rankine Cycle performance charecteristics with Taguchi-Grey Relational Analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 117, 1-13.

Bentley, R. E. (1998). *Handbook of temperature measurement, Vol. 3: The theory and practice of thermoelectric thermometry*. Springer.

Berber, C. (2019). Bataryalarin isil analizlerinin yapilmasi ve isil yönetim sistemleri için soğutma yöntemlerinin incelenmesi yüksek lisans tezi.

Bizeray, A. M., Zhao, S., Duncan, S. R., & Howey, D. A. (2015). Lithium-ion battery thermal-electrochemical model-based state estimation using orthogonal collocation and a modified extended Kalman filter. Journal of Power Sources, 296, 400-412.

Bulut, M., & Özcan, E. (2021). A novel approach towards evaluation of joint technology performances of battery energy storage system in a fuzzy environment. *Journal of Energy Storage*, *36*, 102361.

Celen, A., & Kaba, M. Y. (2021). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Silindirik Lityum İyon Bataryaların Soğutulmasının Parametrik İncelenmesi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 33(1), 49-61.

Chamoli, S., Yu, P., & Kumar, A. (2016). Multi-response optimization of geometric and flow parameters in a heat exchanger tube with perforated disk inserts by Taguchi grey relational analysis. Applied Thermal Engineering, 103, 1339-1350.

Chen, S. C., Wan, C. C., & Wang, Y. Y. (2005). Thermal analysis of lithium-ion batteries. Journal of power sources, 140(1), 111-124.

Chen, L., Tong, Y., & Dong, Z. (2020). Li-ion battery performance degradation modeling for the optimal design and energy management of electrified propulsion systems. *Energies*, *13*(7), 1629.

Cheng, H., Shapter, J. G., Li, Y., & Gao, G. (2021). Recent progress of advanced anode materials of lithiumion batteries. Journal of Energy Chemistry, 57, 451-468.

Choi, Y. S., & Kang, D. M. (2014). Prediction of thermal behaviors of an air-cooled lithium-ion battery system for hybrid electric vehicles. Journal of Power Sources, 270, 273-280.

Dong, L., Chen, C., Wang, J., Li, H., Zheng, H., Yan, W., ... & Zhang, J. (2021). Acid-treated multi-walled carbon nanotubes as additives for negative active materials to improve high-rate-partial-state-of-charge cycle-life of lead-acid batteries. *RSC advances*, *11*(25), 15273-15283.

Du, X., Qian, Z., Chen, Z., & Rao, Z. (2018). Experimental investigation on mini - channel cooling – based thermal management for Li - ion battery module under different cooling schemes. (February), 2781–2788. https://doi.org/10.1002/er.4067

EVE Energy Co. Ltd. (2023). *LF105 3.2V 105Ah LiFePO₄ Prismatic Battery Cell Specification*. Retrieved from https://www.setapower.com/eve-3.2v-105ah-lifepo4-prizmatik-hucre

Fan, L., Khodadadi, J. M., & Pesaran, A. A. (2013). A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles. Journal of Power Sources, 238, 301–312. https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2013.03.050

Feinauer, M., Uhlmann, N., Ziebert, C., & Blank, T. (2022). Simulation, Set-Up, and Thermal Characterization of a Water-Cooled Li-Ion Battery System. Batteries 2022, Vol. 8, Page 177, 8(10), 177. https://doi.org/10.3390/BATTERIES8100177.

Gerlitz, E., Greifenstein, M., Hofmann, J., & Fleischer, J. (2021). Analysis of the Variety of Lithium-Ion Battery Modules and the Challenges for an Agile Automated Disassembly System. Proceedings of the 8th CIRP Global Web Conference, Procedia CIRP, 96, 175-180.

Goodenough, J. B., & Kim, Y. (2010). Challenges for rechargeable Li batteries. *Chemistry of materials*, *22*(3), 587-603.

Gökçe, B., & Taşgetiren, S. (2009). Kalite Đcin Deney Tasarımı. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, *6*(1), 71-83.

Gungor, S., Gocmen, S., & Cetkın, E. (2023). A review on battery thermal management strategies in lithium-ion and post-lithium batteries for electric vehicles. *Journal of Thermal Engineering*, *9*(4), 1078-1099.

Gültek, E., & Altın, S. (2022). LiFePO4 Bataryalarda Güncel Çalışmalar. *Turkish Journal of Engineering Research and Education*, *1*(2).

Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., & Efthimiou, V. (2009). Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(6-7), 1513-1522.

Hong, S. H., Jang, D. S., Park, S., Yun, S., & Kim, Y. (2020). Thermal performance of direct two-phase refrigerant cooling for lithium-ion batteries in electric vehicles. Applied Thermal Engineering, 173, 115213.

Jarrett, A., & Kim, I. Y. (2011). Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance. *Journal of Power Sources*, *196*(23), 10359-10368.

KILIÇ, M., & ŞENTÜRK, S. (2019). Gelişmekte olan laminer akışta mini kanallı soğutucu bloğun çok yanıtlı taguchı yöntemi kullanılarak optimizasyonu. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 24(3), 433–450. https://doi.org/10.17482/uumfd.632964

Kılıç, M., Gamsız, S., & Alınca, Z. N. (2023). Comparative evaluation and multi-objective optimization of cold plate designed for the lithium-ion battery pack of an electrical pickup by using Taguchi–grey relational analysis. *Sustainability*, *15*(16), 12391.

Kılıç, M., & Yiğit, A. (2024). Isı transferi (7. bs.). Dora Yayıncılık.

Kim, G.-H., Smith, K., Lee, K.-J., Santhanagopalan, S., & Pesaran, A. (2011). Multi Domain Modeling of Lithium-Ion Batteries Encompassing Multi-Physics in Varied Length Scales. Journal of The Electrochemical Society, 158(8), A955. https://doi.org/10.1149/1.3597614

Kim, J., Oh, J., & Lee, H. (2019). Review on battery thermal management system for electric vehicles. Applied thermal engineering, 149, 192-212.

Kim, U.-S., Yi, J., Shin, C.-B., Han, T., & Park, S. (2011). Modelling the thermal behaviour of a lithium-ion battery during charge. *Journal of Power Sources, 196*(11), 5115–5121.

Kizilel, R., Sabbah, R., Selman, J. R., & Al-Hallaj, S. (2009). An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs. Journal of Power Sources, 194(2), 1105–1112. https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2009.06.074

Klein, S. (2015). *EES-Engineering Equation Solver, V10. 259-3D (2017-06-07), F-chart Software, Madison, WI 53744*.

Koech, A. K., Mwandila, G., Mulolani, F., & Mwaanga, P. (2024). Lithium-ion batteryfundamentals and exploration of cathode materials: A review. In South African Journal of Chemical Engineering (Vol. 50, pp. 321–339). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.09.008

Kwon, K. H., Shin, C. B., Kang, T. H., & Kim, C. S. (2006). A two-dimensional modeling of a lithium-polymer battery. Journal of Power Sources, 163(1 SPEC. ISS.), 151–157. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.03.012

Lach, J., Wróbel, K., Wróbel, J., & Czerwiński, A. (2021). Applications of carbon in rechargeable electrochemical power sources: A review. *Energies*, *14*(9), 2649.

Li, M., Wang, J., Guo, Q., Li, Y., Xue, Q., & Qin, G. (2020). Numerical Analysis of Cooling Plates with Different Structures for Electric Vehicle Battery Thermal Management Systems. Journal of Energy Engineering, 146(4). https://doi.org/10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000648

Li, W. Q., Qu, Z. G., He, Y. L., & Tao, Y. B. (2014). Experimental study of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using porous metal foam saturated with phase change materials. *Journal of power sources*, *255*, 9-15.

Liu, L., Alva, G., Huang, X., & Fang, G. (2016). Preparation, heat transfer and flow properties of microencapsulated phase change materials for thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *66*, 399-414.

Lu, Y., & Zhu, T. (2024). Status and prospects of lithium iron phosphate manufacturing in the lithium battery industry. *MRS communications*, *14*(5), 888-899.

Lukic, S. M., Cao, J., Bansal, R. C., Rodriguez, F., & Emadi, A. (2008). Energy storage systems for automotive applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(6), 2258-2267.

Mandal, S., Thangarasu, S., Thong, P. T., Kim, S. C., Shim, J. Y., & Jung, H. Y. (2021). Positive electrode active material development opportunities through carbon addition in the lead-acid batteries: A recent progress. *Journal of Power Sources*, *485*, 229336.

Martinez-Bolanos, J. R., Udaeta, M. E. M., Gimenes, A. L. V., & da Silva, V. O. (2020). Economic feasibility of battery energy storage systems for replacing peak power plants for commercial consumers under energy time of use tariffs. *Journal of Energy Storage*, *29*, 101373.

Mert, H. H., & Mert, M. S. (2020). Faz Değiştiren Madde Olarak n-Hekzadekan Esaslı Mikrokapsüllerin Hazırlanması, Karakterizasyonu ve Isıl Performansının T-Kayıt Yöntemiyle Belirlenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (18), 148-161.

Miao, Y., Hynan, P., Von Jouanne, A., & Yokochi, A. (2019). Current Li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. Energies, 12(6), 1074.

Mousavi, S., Zadehkabir, A., Siavashi, M., & Yang, X. (2023). An improved hybrid thermal management system for prismatic Li-ion batteries integrated with mini-channel and phase change materials. Applied Energy, 334(October 2021), 120643. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120643

Nagaura, T., & Tozawa, K. (1990). Lithium ion rechargeable battery. *Progress in Batteries & Battery Materials, 9*(8), 209–217.

Nazghelichi, T., Torabi, F., & Esfahanian, V. (2021). Reducing the charging time of a lead–acid cell in the sense of linear stability analysis. *Journal of Energy Storage*, *36*, 102369.

Ouyang, L., Huang, J., Wang, H., Liu, J., & Zhu, M. (2017). Progress of hydrogen storage alloys for Ni-MH rechargeable power batteries in electric vehicles: A review. *Materials Chemistry and Physics*, *200*, 164-178.

Padhi, A. K., Nanjundaswamy, K. S., & Goodenough, J. B. (1997). Phospho-olivines as positive-electrode materials for rechargeable lithium batteries. *Journal of the electrochemical society*, *144*(4), 1188.

Panchal, S., Khasow, R., Dincer, I., Agelin-chaab, M., Fraser, R., & Fowler, M. (2017). Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water cooled large sized prismatic lithium-ion battery. Applied Thermal Engineering, 122, 80–90. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.010

Pesaran, A. A. (2002). Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. Journal of power sources, 110(2), 377-382.

Polat, B. D., & Keleş, Ö. (2012). Lityum iyon pil teknolojisi. Metalurji Dergisi, 162, 42-48.

Rao, Z., Wang, Q., & Huang, C. (2016). Investigation of the thermal performance of phase change material/mini-channel coupled battery thermal management system. Applied Energy, 164, 659–669. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.021

Rezvanizaniani, S. M., Liu, Z., Chen, Y., & Lee, J. (2014). Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility. Journal of power sources, 256, 110-124.

Rubitherm. (t.y.). Organik faz değiştiren malzemeler (RT serisi). Erişim tarihi: 15 Ocak 2026, https://www.rubitherm.eu/en/productcategory/organische-pcm-rt

Sahin, B. (2007). A Taguchi approach for determination of optimum design parameters for a heat exchanger having circular-cross sectional pin fins. Heat Mass Transfer, 43, 493-502.

Samanta, A., & Chowdhuri, S. (2021). Active cell balancing of lithium-ion battery pack using dual DC-DC converter and auxiliary lead-acid battery. *Journal of Energy Storage*, *33*, 102109.

Samimi, F., Babapoor, A., Azizi, M., & Karimi, G. (2016). Thermal management analysis of a Li-ion battery cell using phase change material loaded with carbon fibers. *Energy*, *96*, 355-371.

Sarchami, A., Najafi, M., Imam, A., & Houshfar, E. (2022). Experimental study of thermal management system for cylindrical Li-ion battery pack based on nanofluid cooling and copper sheath. International Journal of Thermal Sciences, 171. https://doi.org/10.1016/J.IJTHERMALSCI.2021.107244

Scrosati, B., & Garche, J. (2010). Lithium batteries: Status, prospects and future. *Journal of power sources*, *195*(9), 2419-2430.

SetaPower. (2024). *EVE 3.2V 105Ah $LiFePO_4$ prizmatik hücre*. https://www.setapower.com/eve-3.2v-105ah-lifepo4-prizmatik-hucre

Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, *13*(2), 318-345.

Silvestri, L., Forcina, A., Arcese, G., & Bella, G. (2020). Recycling technologies of nickel–metal hydride batteries: an LCA based analysis. *Journal of cleaner production*, *273*, 123083.

Smith, K., & Wang, C. Y. (2006). Power and thermal characterization of a lithium-ion battery pack for hybrid-electric vehicles. Journal of power sources, 160(1), 662-673.

Stan, A. I., Swierczynski, M., Stroe, D. I., Teodorescu, R., & Andreasen, S. J. (2014). Lithium ion battery chemistries from renewable energy storage to automotive and back-up power applications - An overview. 2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2014, 713-720, 22- 24 May, Bran, Romania.

Taguchi, G. (1986). *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes*.

Tie, S. F., & Tan, C. W. (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20, 82-102.

Tütüncü, E. (2017). Nanopartikül katkılı faz değiştiren malzemelerin erime ve katılaşmasının sayısal olarak incelenmesi (Master's thesis, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Vidyanandan, K. V. (2019). Batteries for electric vehicles. *Power Management Institute*, *7*.

Wang, C., Zhang, G., Meng, L., & Li, X. (2017). Liquid cooling based on thermal silica plate for battery thermal management system. (May), 2468–2479. https://doi.org/10.1002/er.3801

Wang, Q., Jiang, B., Li, B., & Yan, Y. (2016). A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 64, 106-128.

Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., & Chen, C. (2012). Thermal runaway caused fire and explosion of lithium-ion battery. Journal of power sources, 208, 210-224.

Wang, T., Tseng, K. J., Zhao, J., & Wei, Z. (2014). Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies. Applied energy, 134, 229-238.

Whittingham M. S. (2012). History, Evolution, and Future Status of Energy Storage, Proceedings of the IEEE 100, Special Centennial Issue, 1518–1534.

Wilke, S., Schweitzer, B., Khateeb, S., & Al-Hallaj, S. (2017). Preventing thermal runaway propagation in lithium ion battery packs using a phase change composite material: An experimental study. Journal of Power Sources, 340, 51–59. https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2016.11.018

Yang, H., Li, M., Wang, Z., & Ma, B. (2023). A compact and lightweight hybrid liquid cooling system coupling with Z-type cold plates and PCM composite for battery thermal management. *Energy*, *263*, 126026.

Yang, N., Zhang, X., Li, G., & Hua, D. (2015). Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements. Applied thermal engineering, 80, 55-65.

Yi, J., Kim, U. S., Shin, C. B., Han, T., & Park, S. (2013). Modeling the temperature dependence of the discharge behavior of a lithium-ion battery in low environmental temperature. Journal of Power https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.02.085

Zhang, H., Li, C., Zhang, R., Lin, Y., & Fang, H. (2020). Thermal analysis of a 6s4p Lithium-ion battery pack cooled by cold plates based on a multi-domain modeling framework. Applied Thermal Engineering, 173, 115216.

Zhang, H., Wu, X., Wu, Q., & Xu, S. (2019). Experimental investigation of thermal performance of large-sized battery module using hybrid PCM and bottom liquid cooling configuration. *Applied Thermal Engineering*, *159*, 113968.

Zhao, C. Y., & Zhang, G. H. (2011). Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs): fabrication, characterization and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(8), 3813-3832.

Zhao, R., Gu, J., & Liu, J. (2017). Optimization of a phase change material based internal cooling system for cylindrical Li-ion battery pack and a hybrid cooling design. Energy, 135, 811–822. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.06.168