

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI KANAT YAPILARINA VE FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMEYE
SAHİP BATARYALARIN ISIL PERFORMANSLARININ DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eyyüp TEKER
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yasin GÖKASLAN

VAN – 2025

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI KANAT YAPILARINA VE FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMEYE
SAHİP BATARYALARIN ISIL PERFORMANSLARININ DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Eyyüp TEKER

Tez Savunma Sınavı Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Mahmut Caner ACAR (Başkan)

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yasin GÖKASLAN (Danışman)

Doç. Dr. İrfan UÇKAN (Üye)

Bu çalışma Van YYÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon tarafından FYL-
2024-11308 No'lu proje ile desteklenmiştir.

VAN – 2025

KABUL VE ONAY

Eyyüp TEKER tarafından hazırlanan “ Farklı Kanat Yapılarına ve Faz Değiştiren Malzemeye Sahip Bataryaların Isıl Performanslarının Deneysel Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri tarafından OY BİRLİĞİ ile Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	İmza
Başkan : Doç. Dr. Mahmut Caner ACAR Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum	
Üye : Doç. Dr. İrfan UÇKAN Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum	
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yasin GÖKASLAN Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum	
Tez Savunma Tarihi:	25/12/2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini ve imzaların sahiplerine ait olduğunu onaylıyorum.

.....
Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

İmza

Eyyüp TEKER



ÖZET

FARKLI KANAT YAPILARINA VE FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMEYE SAHİP BATARYALARIN ISIL PERFORMANSLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

TEKER, Eyyüp

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yasin GÖKASLAN

Aralık 2025, 79 sayfa

Batarya günlük hayatımızda birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikler taşınabilir cihazlarda, savunma sanayisinde, medikal cihazlarda ve son zamanlarda ise araçlarda tercih edilmektedir. Bataryaların güç-güç yoğunluğu ve ömürlerini koruyabilmek için her bir pil çeşidi için uygulama alanları, çalışma koşullarına bağlı olarak ısı yönetimi yapılmalıdır. Isıl yönetimi sayesinde patlama ve yanma riskleri de önüne geçmek mümkündür. Bu tez çalışmasında bataryaların farklı deşarj oranlarında, hava akışının olduğu ve olmadığı durumlarda hem faz değiştiren malzeme hem de kanatçıklı yapılar olması durumunda ısı performansları deneysel olarak incelenmiştir.

Dört seri ve iki paralel bağlantıdan oluşan iki özdeş batarya modülü halkasal bir 1.25 mm FDM kalınlığında bakır boru ve kanatçiksiz ve farklı kanatçıklardan oluşan yapıda deşarj boyunca hücrelerin sıcaklık değişimleri incelenmiştir. En düşük deşarj oranı (1C) ve en yüksek deşarj oranı (5C) oranının gerilimlere bakıldığında test başlangıcında deşarj oranı arttıkça gerilimde ani düşüş artmaktadır. Doğal taşınım ile soğutmada en yüksek 4C deşarj oranında deneylere imkan sağlanmıştır. Bu dört deşarj oranında modül katman sıcaklıkları çok yakın değerdedir. En yüksek sıcaklık 75 °C'ye ulaşmıştır. 1C ve 2C deşarj oranında faz değiştiren malzeme katı fazda iken 3C ve 4C'de sıvı fazdadır. Hücreler arası sıcaklık farkı ise en yüksek 6 °C'dir.

Doğal taşınım ile soğutmada kanatçiksiz ve farklı kanatçık tiplerinde batarya soğutma üzerine açık bir fark elde edilmemiştir. Zorlanmış taşınım ile ise kanal içerisinde üç hava hızı 0.5 m/s, 1 m/s ve 2 m/s hızları incelenmiştir. 4C deşarj oranında doğal taşınım ile batarya modülü ortalama sıcaklığı yaklaşık 75 °C iken, zorlanmış taşınım ile 55 °C'dir. Doğal taşınım ile kıyaslandığında zorlanmış taşınım ile yaklaşık 20 °C sıcaklık düşüşü elde edilmiştir. Bu sıcaklık farkı kanatçık tipine bağlı olarak az da olsa değişim göstermiştir. Her ne kadar fan yardımı sayesinde ilave güç harcanmıştır. Fakat bu ilave güç harcanması olsa da 20 °C ciddi bir sıcaklık düşüşü sağlanmıştır. En fazla basınç düşüşü sıralaması düz, dallı, üçgen kanatçık ve kanatçiksiz batarya modülleridir. Fakat düşük hava hızlarında 0.5 m/s ve 1 m/s hava hızlarında basınç düşüşleri modülde hemen hemen aynıdır. Hava hızının ya da Reynolds sayısı 8592 değeri ve sonrasında bu modüller arasındaki basınç düşüşü farkı giderek açılması beklenmektedir.

Hava hızı arttıkça aynı oranda sıcaklık düşüşü gerçekleşmemiştir. Batarya modülündeki sıcaklık düşüşleri dikkate alındığında en iyi performans 0.5 m/s'de tespit edilmiştir. Zorlanmış taşınım ile kanatçık yapıları da önem kazanmış ve en yüksek sıcaklık düşüşü sırasıyla düz, dallı ve üçgen kanatçıklı batarya modüllerinde görülmüştür. FDM ile 4C deşarj akımına kadar katı fazda, 4C ve 5C deşarj akımında sıvı faza geçmiştir.

Zorlanmış taşınım etkisiyle modül içerisindeki katman sıcaklıkları daha belirgin hale gelmiştir. Ayrıca hücreler arası sıcaklık farkı ise en yüksek 5 °C olarak tespit edilmiştir. Üçgen ve dallı kanatçık tiplerindeki batarya modüllerinde hücreler arası sıcaklık farkı en düşüktür. Tez çalışmasında tasarlanan bu soğutma sistemi düşük deşarj oranlarında pasif soğutma, yüksek deşarj oranlarında ise hibrit soğutma sağlayarak batarya modülü için daha iyi ısıl performans sağlamıştır.

Anahtar kelimeler: Batarya, Faz değıştiren malzeme, Isı geçişi, Kanatçık, Soğutma



ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL PERFORMANCES OF BATTERIES WITH DIFFERENT FIN STRUCTURES AND PHASE CHANGE MATERIALS

TEKER, Eyyüp

MSc. Thesis Mechanical Engineering

Assist. Prof. Mustafa Yasin GÖKASLAN

December 2025, 79 pages

Batteries are used in many areas of our daily lives. They are especially preferred in portable devices, the defense industry, medical devices and recently in vehicles. To maintain the power density and lifespan of batteries, thermal management must be implemented for each type of battery, depending on their application area and operating conditions. Thermal management also helps prevent the risk of explosion and combustion. In this thesis, the thermal performance of batteries with phase change materials and finned structures was experimentally investigated at different discharge rates, with and without airflow.

Two identical battery modules, consisting of four series and two parallel connections, were designed using a circular 1.25 mm PCM copper tube with finless and different fins. Temperature changes in the cells during discharge were investigated. When examining the voltages at the lowest discharge rate (1 °C) and the highest discharge rate (5 °C), the sudden voltage drop increased as the discharge rate increased at the beginning of the test. Natural convection cooling enabled experiments at the highest discharge rate of 4 °C. At these four discharge rates, the module layer temperatures were very close. The highest temperature reached 75 °C. At the 1 °C and 2 °C discharge rates, the phase change material was in the solid phase, while at 3 °C and 4 °C it was in the liquid phase. The maximum temperature difference between the cells was 6 °C.

No significant difference was observed in coil cooling with natural convection cooling and with different fin types. In forced convection, three air velocities within the channel were investigated: 0.5 m/s, 1 m/s, and 2 m/s. At a 4 °C discharge rate, the average coil module temperature was approximately 75 °C with natural convection, while it was 55 °C with forced convection. Compared to natural convection, a temperature drop of approximately 20 °C was achieved with forced convection. This temperature difference varied slightly depending on the fin type. Although additional power was consumed by the fan, a significant temperature drop of 20 °C was achieved despite this additional power consumption. The highest pressure drops were observed in coil modules with flat, branched, triangular fins, and finless fins. However, at low air velocities of 0.5 m/s and 1 m/s, the pressure drops were almost the same across the module. It is expected that the pressure drop difference between these modules will gradually widen after the air speed or Reynolds number value of 8592.

As air velocity increased, the temperature drop did not decrease at the same rate. Considering the temperature drops in the battery module, the best performance was determined at 0.5 m/s. Fin structures also gained importance in forced convection, and the highest temperature drops were observed in battery modules with flat, branched, and triangular fins, respectively. PCM, on the other hand, remained in the solid phase up to a discharge current of 4 °C and transitioned to the liquid phase at 4 °C and 5 °C discharge

currents. The layer temperatures within the module became more pronounced due to the forced convection effect. Furthermore, the maximum temperature difference between cells was found to be 5 °C. The temperature difference between cells was lowest in battery modules with triangular and branched fins. This cooling system designed in this thesis provides passive cooling at low discharge rates and hybrid cooling at high discharge rates, providing better thermal performance for the battery module.

Keywords: Battery, Phase change material, Heat transfer, Fin structure, Cooling



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, her türlü ilgi ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Sayın Dr. Öğr. Ü. Mustafa Yasin GÖKASLAN'a teşekkür ederim. Ayrıca Yüksek lisans tezimin hazırlanması aşamasında ve tüm öğretim süreci boyunca manevi desteklerini sürekli yanımda hissettiğim kıymetli aileme ve eşime teşekkürlerimi sunarım.

2025

Eyyüp TEKER





İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Batarya Isıl Yönetim Sistemleri	2
1.1.1 Aktif Soğutma Sistemleri.....	3
1.1.1.1 Hava (Zorlanmış) ile Soğutma Sistemleri	3
1.1.1.2 Sıvı ile Soğutma Sistemleri	3
1.1.1.3 Termoelektrik ile Soğutma Sistemleri	4
1.1.2 Pasif Soğutma Sistemleri	4
1.1.2.1 Faz Değiştiren Malzeme ile Soğutma Sistemleri.....	4
1.1.2.2 Isı Boruları ile Soğutma Sistemleri	4
1.1.2.3 Hava (Doğal) ile Soğutma Sistemleri	5
1.1.3 Hibrit Soğutma Sistemleri.....	5
1.2 Faz Değiştiren Malzemeler (FDM)	5
1.2.1 Organik Faz Değişim Malzemeleri	6
1.2.1.1 Parafinler.....	6
1.2.1.2 Parafin Olmayan Malzemeler	7
1.2.2 İnorganik Faz Değişim Malzemeleri.....	7
1.2.3 Ötektik Faz Değişim Malzemeleri	7
1.3 Bataryalar	7
1.3.1 Kurşun Asit (Pb-Asit) Batarya	8
1.3.2 Nikel-Kadmiyum (Ni-Cd) Bataryalar	8
1.3.3 Nikel-Metal Hidrat (Ni-MH) Bataryalar	9
1.3.4 Lityum-Polimer (Li-Po) Bataryalar	10
1.3.5 Lityum-İyon (Li-Ion) Bataryalar.....	10
2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ	13
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	31
3.1 Pil Üzerine Termokupl Yerleştirilmesi	32
3.2 Batarya Modüllerinin Hazırlanması	34
3.3 Deney Düzeneği	38

3.4 Belirsizlik Analizi.....	39
3.5 Batarya Isı Üretimi ve Matematik Model.....	40
4. DENEY SONUÇLARI.....	43
4.1 Doğal Taşınım ile Soğutma Performansı	47
4.2 Zorlanmış Taşınım ile Soğutma Performansı.....	51
4.3 Batarya Modülündeki Kanatçıkların Isıl Performansa Etkisi.....	57
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	69
KAYNAKLAR.....	73
ÖZ GEÇMİŞ.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



ÇİZELGELER LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Aspilsan lityum iyon pilin özellikleri.....	31
Çizelge 3.2 Deneylerde kullanılan FDM'nin özellikleri	34
Çizelge 4.1 Farklı batarya modüllerinin deney kodları	44
Çizelge 4.2 Deneyde kullanılan batarya modülleri için basınç ve sıcaklık düşüşü	66





ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Alessandro Volta tarafından icat edilen voltaik pil.....	1
Şekil 1.2 Batarya ısııl yönetim sistemlerinin sınıflandırılması.....	3
Şekil 1.3 Faz değişim malzemelerinin sınıflandırılması	6
Şekil 1.4 Kurşun asit bataryanın içyapısı	8
Şekil 1.5 Nikel-Kadmiyum Bataryalar (Ni-Cd)	9
Şekil 1.6 Nikel-metal hidrat batarya.....	9
Şekil 1.7 Lityum-polimer batarya.....	10
Şekil 1.8 Lityum-iyon bataryası	11
Şekil 2.1 Choudhari vd. çalışmasının a) batarya modülü tasarımı b) çalışmaya ait sonuçları.....	13
Şekil 2.2 Liu vd. yaptıkları çalışmaya ait çalışma koşulları ve sonuçları	14
Şekil 2.3 Aydın'ın çalışmasına ait a) deney odası b) deney sonucu c) 1. deney d) 2. deney e) 3. deney	15
Şekil 2.4 Sezici'nin çalışmasına ait görüntüler a) deney odası b) bataryalar arasına termokupl yerleşimi c) arka taraf ve yanlar açık modeli d) arka taraf açık yanlar kapalı modeli e) arka taraf kapalı yanlar açık modeli.....	16
Şekil 2.5 Öztop vd. yaptıkları çalışmaya ait deney odası.....	17
Şekil 2.6 Mehryan ait çalışmanın deney odaları.....	18
Şekil 2.7 Chen vd. ait çalışmanın deney odası	19
Şekil 2.8 FDM'nin farklı sistemlerde faz geçiş süreci	20
Şekil 2.9 (a) Soğutma sistemi ve (b) bakır ağılı silika soğutma plakasının yapısı ve geometrisi	20
Şekil 2.10 Li vd. ait çalışmanın a) soğutma plakası, (b) Yan yüzünde bir fan bulunan soğutma plakası ve bakır örgü, (c) Arka yüzünde bir fan bulunan soğutma plakası ve bakır örgü ve (d) soğutma plakası ve iki fan bulunan bakır örgü şematik gösterimleri.....	21
Şekil 2.11 Wu vd. ait çalışmanın a) Üretim şeması, b) deneysel sistemin kurulumu, c) bakır örgü ve faz değişim malzeme plakası ve d) batarya paketi	22
Şekil 2.12 Deneysel sistem ve batarya ısııl yönetim sisteminin şeması.....	23
Şekil 2.13 Test sisteminin şeması ve deneysel sistem	24

Şekil 2.14 Farklı ortam sıcaklıklarında FDM modülünün ısı davranışlarını ölçmek için deneysel düzeneği	25
Şekil 2.15 a) Isıl yönetim modülünün şeması b) deneysel sistem	25
Şekil 2.16 Üçgen, dikdörtgen ve dairesel kanatçıklara entegreli FDM tabanlı BIYS'nin şematik ve deneysel sistemi	26
Şekil 2.17 Hibrit batarya ısı yönetim sisteminin şematik ve deneysel gösterimi	27
Şekil 2.18 Isıl yönetim modülünün ve ısı pompasının şeması	28
Şekil 2.19 Huang vd. çalışmasına ait a) Li-iyon batarya modülü b) deneysel çalışmanın şeması	28
Şekil 3.1 Aspilsan marka lityum iyon pil	32
Şekil 3.2 Deneysel çalışmada kullanılan pilin, (a) pil üzerine yerleştirilen termokupl (b) pilin yalıtım için kaplanması	32
Şekil 3.3 Deney odası ve termokupl yerleşimi	33
Şekil 3.4 Batarya modülünün hücresi; a) Kanatsız, b) Düz Kanat, c) Üçgen Kanat ve d) Dallı Kanat	34
Şekil 3.5 Batarya modülü kanatçık yapısı; a) Düz Kanat, b) Üçgen Kanat ve c) Dallı Kanat	35
Şekil 3.6 Tasarlanan kanatçıkların lazer kesimi	35
Şekil 3.7 Batarya modülü görünüşleri a) kanatsız, b) düz kanat, c) üçgen kanat, d) dallı kanat	36
Şekil 3.8 Termokupl yerleşim planı	37
Şekil 3.9 Deney düzeneği	38
Şekil 4.1 Batarya modülünün farklı deşarj oranlarında zamana bağlı gerilim düşüşü ...	45
Şekil 4.2 Batarya modülünün farklı deşarj oranlarında zamana bağlı kapasite kullanımı	46
Şekil 4.3 Pasif soğutmada batarya yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi	47
Şekil 4.4 3 hücrenin farklı katmanlarında sıcaklık ve deşarj süresi; a) kanatçıksız (WF), b) düz kanatçıklı (FF),	49
Şekil 4.5 Düşük deşarj oranlarında zorlanmış taşınımın etkisiyle batarya modülü ortalama sıcaklık değişimi	52
Şekil 4.6 Zorlanmış taşınımın etkisiyle batarya modülü ortalama sıcaklığının zamanla değişimi a) 3C, ve b) 4C	54

Şekil 4.7 Zorlanmış taşınımında Reynolds sayısı 2148 değerinde batarya modüllerinin katman sıcaklıkları a) düz kanatçık,	57
Şekil 4.8 Zorlanmış taşınımında Reynolds sayısı 4296 değerinde batarya modüllerinin katman sıcaklıkları.....	60
Şekil 4.9 Zorlanmış taşınımında Reynolds sayısı 8592 değerinde batarya modüllerinin katman sıcaklıkları.....	62
Şekil 4.10 Deşarj sonunda batarya modülündeki hücreler arası maksimum sıcaklık farkı.....	64
Şekil 4.11 Batarya modüllerinde Reynolds sayısına bağlı olarak basınç düşüşleri.....	65





SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamalarıyla aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
c_p	Özgül ısı (J/kgK)
d_h	Hidrolik çap (m)
H	Gizli ısı (J/kg)
h	Isı taşınım katsayısı (W/m ² K)
I	Akım (A)
k	Isı iletim katsayısı (W/mK)
L_2	Suyun birim-hacim kütlesi, g/cm ³
P	Basınç (Pa)
r_b	Pilin yarıçapı (mm)
R	İç direnç (Ω)
T	Sıcaklık ($^{\circ}$ C)
TC	Isıl iletkenlik (W/mK)
T_{amb}	Ortam sıcaklığı ($^{\circ}$ C)
T_{max}	Maksimum sıcaklık ($^{\circ}$ C)
t_l	Hidrojel tabakasının oranı
u_m	Ortalama hız (m/s)
U	Terminal voltaj (V)
U_{ocv}	Açık devre gerilimi (V)
V	Hacim (m ³)
Q	Isı üretimi (W/m ³)
Q_{pil}	Pil kapasitesi (Ah)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
μ	Dinamik vizkosite (kg/ms)
λ	Erime oranı
η	Verim

Kısaltmalar**Açıklama****BIYS**

Batarya ısııl yönetim sistemi

DR

Deşarj Oranı

EG

Genişletişmiş grafit

FDM

Faz değıştiren malzemesi

FAC

Zorlanmış hava konveksiyonu

HPE

Isı borusu elemanı

HP

Isı borusu

Re

Reynolds Sayısı

RH

Bağıl Nem (%)

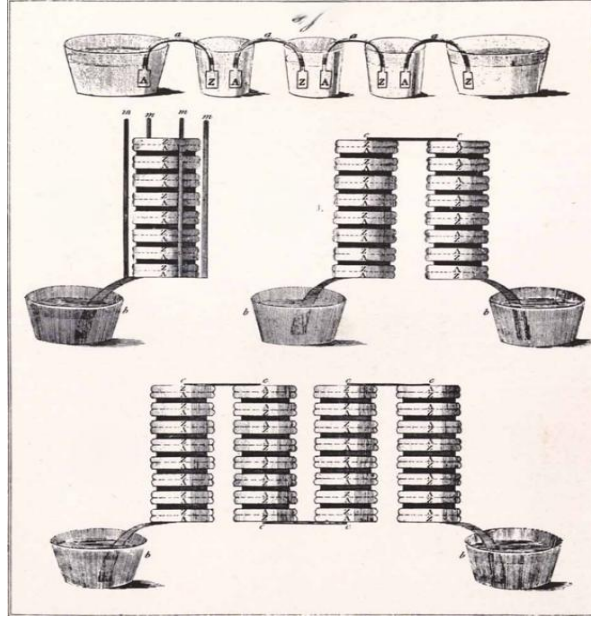
SOC

Sarj durumu



1. GİRİŞ

Enerji ve batarya teknolojilerinin gelişimi son yıllarda hızla artmaktadır. Günümüzde fosil kaynaklı enerji ihtiyaçlarının en aza indirilmesi ve enerji ihtiyacının karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynakları tercih edilmektedir. Tüm bu enerji ihtiyaçlarını karşılama çalışmaları devam ederken bir yandan da enerjiyi depolama tekniklerinin geliştirilmesine devam edilmektedir. Mekanik, kimyasal, ısı gibi birçok enerjiyi depolama yöntemleri söz konusudur. Bu çalışmada ise elektrik enerjisini depolamada hızla ve büyüyerek devam eden bataryalar kullanılmıştır. Bataryalar, elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depo eden, ihtiyaç halinde kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren bir depolama cihazıdır. Çoğunlukla elektrik enerjisi ile çalışan taşınabilir aygıtların enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılır. Günümüzde kullandığımız pil ilk olarak 1800 yılında Alessandro Volta tarafından icat edilmiştir (Milan, 1998). Şekil 1.1’de Alessandro Volta tarafından icat edilmiş ilk pil gösterilmiştir (Calborean vd., 2021). Alessandro Volta, alternatif iletken özelliklere sahip bir dizi hücreyi seri olarak bağlamış ve elektrik enerjisini depolayan ilk pili kullanıma sunmuştur. Şarj edilebilen ilk pil olan kurşun-asit (Pb-asit) ise 1859 yılında Fransız fizikçi Gaston Plante tarafından icat edilmiştir (Calborean vd., 2021).



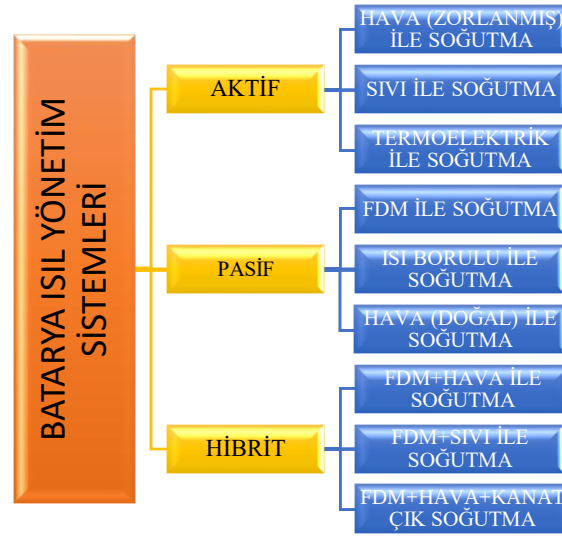
Şekil 1.1 Alessandro Volta tarafından icat edilen voltaik pil (Santillana, 1965).

Modern pil teknolojisi, 1800 yılında Alessandro Volta'nın volta pilini icat etmesiyle başlamıştır. Volta, çinko ve bakır diskleri tuzlu suya batırılmış bezlerle ayırarak, sürekli elektrik akımı üreten bir düzenek geliştirmiştir (Cecchini ve Pelosi, 1992). Bu buluş, elektrikli telgraf, elektroliz ve elektrikli aydınlatma gibi teknolojilerin gelişmesine zemin hazırlamıştır. 19. yüzyılda pil teknolojilerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir (Yuan vd., 2024). 1836'da John Frederic Daniell'in geliştirdiği Daniel pili, volta piline göre daha kararlı bir voltaj sağlamıştır (Yuan vd., 2024). 1859'da Gaston Plante, şarj edilebilir kuşun-asit pili icat etmiştir. Bu pil günümüzde otomotiv sektöründe kullanılmaya devam etmektedir. Ayrıca, Georges Leclanche'nin 1866'daki Leclanche pili ve Carl Gassner'in 1886'da geliştirdiği çinko-karbon pili de taşınabilir cihazların yaygınlaşmasına katkı sağlamıştır (Kordesch ve Taucher-Mautner, 2009). Bu gelişmeler pil teknolojisinin ilerlemesine ve elektriğin günlük hayatta daha yaygın kullanılmasına olanak tanımıştır.

Bataryaların karakteristik özellikleri, bataryalarda kullanılan hücrelerin türü, hücrelerin sayısı, hücrelerin seri-paralel bağlantı yapısı tarafından belirlenir. Bataryalar şarj edilebilen ve şarj edilemeyen olarak ikiye ayrılırlar. Şarj edilemeyen bataryalar deşarj olduktan sonra tekrar kullanılamazlar. Şarj edilebilen bataryalar ise deşarj olduktan sonra tekrar tam şarj edilerek kullanılan bataryalardır. Şarj edilen bataryalar yüksek güç yoğunluğu, yüksek deşarj oranı ve uygun düşük sıcaklık performansı ile karakterize edilirler (Çetin vd., 2021).

1.1 Batarya Isıl Yönetim Sistemleri

Lityum iyon pillerin çeşidine bağlı olarak belirli sıcaklıklarda çalışması istenmektedir. Bu durum da pillerin ömrünü, içyapısını ve kapasitesini doğrudan etkilemektedir. Lityum iyon pillerin kullanım alanları hem batarya yönetim sistemi (BMS) hem de batarya ısıl yönetim sistemi (BTMS) için oldukça önemlidir. Şekil 1.2'de batarya ısıl yönetim sistemlerinin sınıflandırılması gösterilmiştir. Batarya ısıl yönetim sistemini aktif, pasif ve hibrit olmak üzere üç ana başlıkta toplamak mümkündür.



Şekil 1.2 Batarya ısı yönetim sistemlerinin sınıflandırılması

1.1.1 Aktif Soğutma Sistemleri

Aktif soğutma sistemleri genelde yüksek deşarj oranlarında veya yüksek çalışma sıcaklığında uygulanmaktadır. Bu soğutma sisteminin en önemli avantajı yüksek ısı çekmedir. Dezavantajı ise ilave bir güç harcanmasıdır.

1.1.1.1 Hava (Zorlanmış) ile Soğutma Sistemleri

Soğutucu akışkan olarak hava kullanılan sistemlerdir. Hava batarya üzerine fan ile (zorlanmış) gönderilir. Fan ile yapılan işlemlerin verimli hale gelmesi, bataryaların geometrik şekliyle ve dizilimiyle ilişkilidir (Kütük, 2021). Batarya aktif soğutma sistemleri içerisinde bulunan bu sistem en basit, en düşük maliyetli, en hafif, sızıntı problemi olmayan ve kolay bakım fırsatı sunan sistemlerdendir. Dezavantaj olarak bataryalarda oluşan yüksek ısıyı dış ortama atamadıkları için şarj/deşarj hızları kullanıma uygun değildir (Wu vd., 2019).

1.1.1.2 Sıvı ile Soğutma Sistemleri

Sıvı ile soğutmalı sistemler pratik uygulamalarda en çok kullanılan sistemlerdir. Yüksek verimlilikleri ve kompaktlıkları nedeniyle sıvı, iyi bir ısı kapasitesine ve ısı transfer katsayısına sahiptir. Bu da elektrikli araçlarda BIYS için uygun bir çözüm sunar.

Dezavantajları arasında ise artan karmaşıklık, pompa ve gerekli diğer tesisat malzemeleri nedeniyle ek ağırlık, ekstra maliyetler ve yapının sertliği sayılabilir (Buidin ve Mariasiu, 2021).

1.1.1.3 Termoelektrik ile Soğutma Sistemleri

Termoelektrik soğutma sistemleri, sıcaklık dengelemesi veya ortam sıcaklığının altında bir soğutmanın gerektiği uygulamalarda kullanılan ısı pompası özelliği olan cihazlarda bulunur. Termoelektrik soğutma cihazları N ve P tipi yarı iletken metal çiftlerinden oluşan bir veya daha çok modülden bir doğru akımın geçmesi ile elde edilir. Akımın yönü değiştirilerek ısıtma ve soğutma elde edilir (Bulut, 2005). Termoelektrik modül ile soğutma yöntemi dışarıdan enerji gereksinimi olduğu için aktif bir soğutma yöntemidir.

1.1.2 Pasif Soğutma Sistemleri

Pasif soğutma sistemleri genelde düşük deşarj oranlarında ve oda sıcaklığında uygulanmaktadır. Bu soğutma sisteminin en önemli avantajı ilave güç tüketmemesidir.

1.1.2.1 Faz Değiştiren Malzeme ile Soğutma Sistemleri

Faz değiştiren malzemeler (FDM), batarya ısı yönetim sistemi uygulamalarında şarj ve deşarj sırasında batarya üzerinde oluşan ısıyı soğurup sistemin aşırı ısınmasını engellemek amacıyla kullanılan sistemlerdir (Karagöz, 2023). Pompa veya fan gerektirmeyen yapısı nedeniyle diğer soğutma sistemlerinden daha az maliyet ve tasarıma sahiptir (Luo vd., 2022).

1.1.2.2 Isı Boruları ile Soğutma Sistemleri

Isı borusu, içindeki akışkanın buharlaşma ve yoğuşma süreçleriyle çalışır. Sıcaklık farkı olduğu sürece enerji harcamadan ısı transferi yapar. Ancak ısının yoğuşma bölgesinde daha iyi dağılması için genellikle hava veya sıvı soğutma sistemleriyle desteklenir (Buidin ve Mariasiu, 2021).

1.1.2.3 Hava (Doğal) ile Soğutma Sistemleri

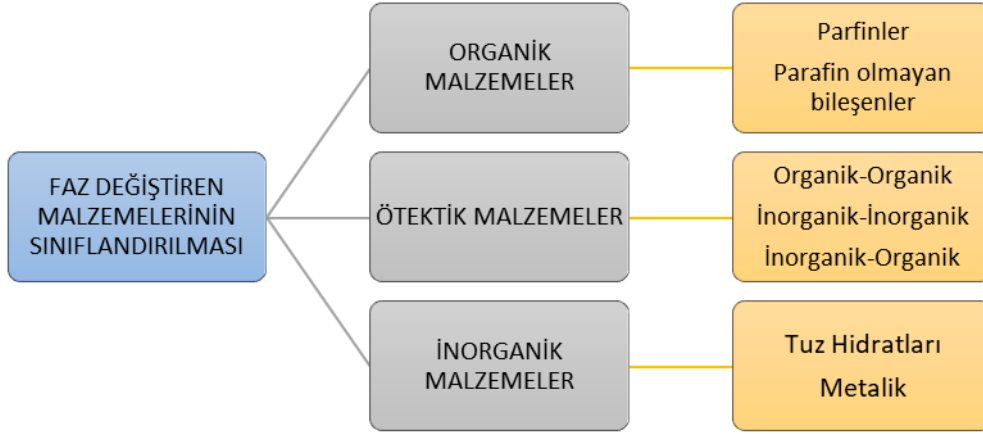
Basit yapıya sahip hava soğutma sistemlerinde soğutma döngülerine ihtiyaç yoktur ve paketlenmesi kolaydır. Düşük bakım maliyetine sahip hava soğutma sistemlerinde batarya kutusuna veya elektronik kısımlara sıvı sızması gibi risk yoktur. Daha az ağırlık ve daha düşük enerji tüketimi de en büyük avantajlarındandır (Jilte ve Kumar, 2018).

1.1.3 Hibrit Soğutma Sistemleri

Bu soğutma sistemi ile daha iyi bir soğutma için birden fazla soğutma sistemi bir arada kullanılabilir. Bunlar bünyesinde hem aktif hem de pasif sistemi barındıran sistemlerdir. Hibrit BIYS pil paketlerinde sıcaklık kontrolünü optimize etmek için hem aktif hem de pasif soğutma sistemlerinin bir arada kullanılmasıdır. Bu sistemler, genel verimliliği, güvenilirliği ve enerji tasarrufunu artırmak için avantajlıdır (Mehryan ve Jannesari, 2024).

1.2 Faz Değiştiren Malzemeler (FDM)

Faz değiştiren malzemeler (FDM) erime ve katılaşma sırasında ısı enerjisi depolayan veya serbest bırakan malzemelerdir. Faz değişimi sırasında bu maddeler, depoladığı gizli ısıyı, sıvı halden katı hale geçişi sırasında serbest bırakır. Katı fazdan sıvı faza geçiş süresince de ısıyı depolamaktadır (Peng vd., 2020). Faz değişim malzemelerinin sınıflandırılması, nihai uygulama, kimyasal bileşim, gizli ısı veya erime sıcaklığı değerleri aralığı ve maliyet gibi kategorizasyon kriterlerine bağlıdır. Ancak, belirli uygulamaya bağlı olarak, FDM'nin öncelikle erime sıcaklığına göre seçilmesi gerekir. Çalışılmak istenen sıcaklık aralıkları için birden fazla faz değiştiren malzeme bulunmaktadır. FDM'lerin özelliklerine göre sınıflandırılması Şekil 1.3'te gösterilmiştir (Mazzucco vd., 2016).



Şekil 1.3 Faz değişim malzemelerinin sınıflandırılması (Sharma vd., 2009).

FDM'ler faz geçişlerine göre sınıflandırılır. Katı-katı FDM'ler düşük gizli ısıya sahip oldukları için kullanım açısından uygun değildir. Katı-sıvı FDM'ler yüksek gizli ısıyı depolayabilirler. Katı-sıvı FDM'ler organik (parafin, yağ asitleri, polietilen glikoller) ve inorganik (tuz hidratlar, tuzlar, metaller) olarak iki gruba ayrılırlar (Shchukina vd., 2018).

1.2.1 Organik Faz Değişim Malzemeleri

Organik FDM'ler parafin ve parafin olmayan olarak ikiye ayrılır. Organik FDM'ler, tekrar tekrar eriyip donabilen, çok az veya hiç aşırı soğuma olmadan kristalleşen ve genellikle korozyona uğramayan maddeleri içerir (Sharma vd., 2009).

1.2.1.1 Parafinler

Parafinler çoğunlukla düz zincir n-alkanlar $CH_3 - (CH_2)_n - CH_3$ karışımından oluşmaktadır. CH_3 zincirinin kristalleşmesinden dolayı büyük miktarda gizli ısı ortaya çıkmaktadır. Hem erime noktası hem de erime gizli ısı zincir uzunluğuna göre farklılık gösterir. Parafinler geniş sıcaklık aralıklarında çalışabilmektedirler. Aynı zamanda 500 °C'nin altında kararlı yapıda bulunurlar. Parafinler erime sırasında hacimde çok az değişim gösterir ve erimiş halde düşük buhar basıncına sahiptirler (Sharma vd., 2009).

1.2.1.2 Parafin Olmayan Malzemeler

Parafin olmayan organik malzemeler, çok çeşitli özelliklere sahip faz değişim malzemeleri arasında en yaygın olanlarıdır. Bu malzemeler yanıcıdır ve aşırı yüksek sıcaklıklara, ateşe veya oksitleyicilere maruz bırakılmamalıdır. Bu organik malzemelerin bazı özellikleri vardır. Bunlar; yüksek erime ısısı, yanıcı, düşük ısıl iletkenliği, düşük alevlenme noktası ve yüksek sıcaklıklarda kararsızlıktır (Sharma vd., 2009).

1.2.2 İnorganik Faz Değişim Malzemeleri

İnorganik FDM'ler, su ile doğal tuzlardan yapılan çözeltilerdir. Doğada aşındırıcı olarak bulunmaktadır. Bu sebeplerden dolayı, kullanımlarında korozyona dayanıklı malzemeler kullanılmalıdır. Kullanılan malzeme yüksek yoğunluklu ve yüksek erime entalpisine sahip olduğu için geniş bir uygulama alanına sahiptir. Tuz hidrat ve metalik olarak ikiye ayrılırlar (Anusha, 2016).

1.2.3 Ötektik Faz Değişim Malzemeleri

Ötektik FDM'ler, en az iki FDM'nin karışımıdır. Organik-organik, organik-inorganik veya inorganik-inorganik olabilirler. Saf maddeler gibi, ötektik FDM'ler de erime ve katılaşma noktasına sahiptir. Ötektik FDM'lerin çoğu, herhangi bir faz ayrımı olmaksızın faz değiştirir ve depolama yoğunlukları da organik bileşiklerden biraz daha yüksektir. FDM'lerin bileşimleri sabit kalarak, sıvının tamamının donduğu sabit sıcaklığa ötektik sıcaklık denir. Ötektik FDM'lerin ısıl iletkenliği de tuz hidratlı FDM'lerden daha yüksek veya onlarla karşılaştırılabilir düzeydedir (Waqas vd., 2018).

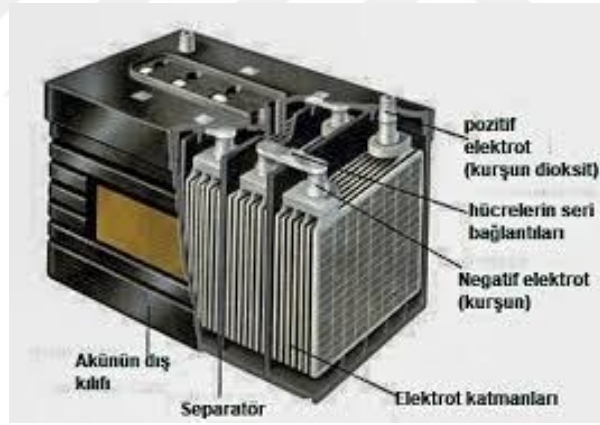
1.3 Bataryalar

Batarya, elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolayan ve daha sonra bu enerjiyi elektriksel olarak kullanma fırsatı sunan bir enerji depolama cihazıdır. Bataryalar hücrelerden oluşur ve bu hücreler seri ya da paralel bağlanarak bataryayı oluşturur. Paralel bağlantı kapasiteyi ve çekebilecek akımı artırırken seri bağlantılar gerilimi

arttırır. Bataryaların şarjdeşarj çevrimi yapıldıkça kapasiteleri zamanla azalmaktadır (Soylu, 2016). Bataryalar şarj edilebilir ve şarj edilemeyen olarak ikiye ayrılırlar. Şarj edilemeyen bataryalar (birincil bataryalar), şarj edilebilen bataryalar ise (ikincil bataryalar) olarak isimlendirilirler (Gül, 2018).

1.3.1 Kurşun Asit (Pb-Asit) Batarya

Kurşun-asit batarya, dünya çapında bütün batarya enerji depolama sektörüne liderlik etmeye devam etmektedir. Günümüz teknolojilerine kıyasla daha ucuz olma, sağlamlık, dayanıklılık, güç-ağırlık oranı, ve uzun ömür olma yönünden caziptir. Araç motorlarını çalıştırmak için gereken yüksek akımları sağlamak yeterlidir. Zamanla, özellikle otomotiv endüstrisinde köklü ve gelişmiş bir teknoloji tabanı oluşturarak, hala büyük bir avantaja sahiptirler. Şekil 1.4'te Kurşun-Asit Bataryanın iç yapısı gösterilmiştir (Calborean vd., 2021).

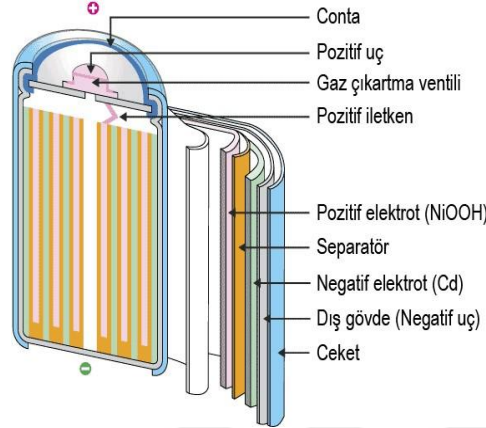


Şekil 1.4 Kurşun asit bataryanın iç yapısı (<https://poweron.com.tr>)

1.3.2 Nikel-Kadmiyum (Ni-Cd) Bataryalar

Nikel-kadmiyum (NiCd) batarya sistemleri, yüksek enerji yoğunlukları, uzun çevrim ömürleri ve düşük bakım gereksinimleri sayesinde günlük uygulamalarda kurşun-asit bataryalara göre kullanışlı bir alternatif olmuştur. Geçmişte elektrikli aletler ve taşınabilir cihazlar için tercih edilmiş ve 1990'ların ortalarında elektrikli araç sektöründe çeşitli uygulamalar kullanılmıştır. Ancak, özellikle kadmiyum toksik özellikleri ve geri

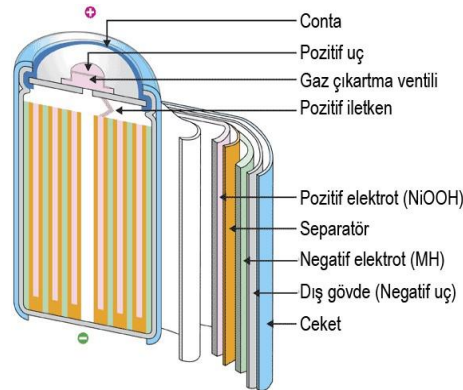
dönüşüm sorunları nedeniyle bu pazarlardan büyük ölçüde çekilmiştir. Şekil 1.5'te nikel kadmiyum bataryanın içyapısı gösterilmiştir (Baker, 2008).



Şekil 1.5 Nikel-Kadmiyum Bataryalar (Ni-Cd) (Sezer ve BasmacıI, 2022)

1.3.3 Nikel-Metal Hidrat (Ni-MH) Bataryalar

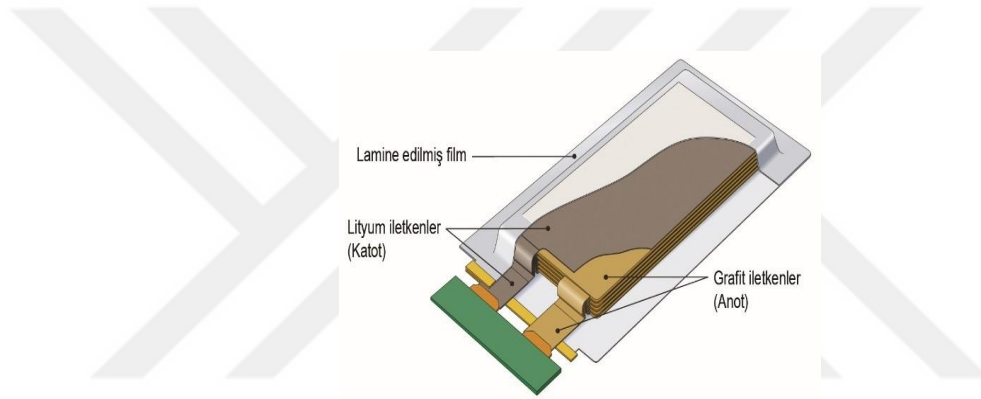
Nikel-metal hidrit (NiMH) piller, günümüzde tüketici elektroniği ve elektrikli araçlar alanında başarıyla kullanılmakta olup NiCd ve Li-ion pillere göre birçok avantaja sahiptir. NiMH piller yüksek enerji depolama yoğunluğuna sahiptir. Yüksek akım yoğunluklarında ve düşük sıcaklıklarda çalıştırılabilirler. Kimyasal elementleri toksik değildir. NiMH pilin teorik açık devre potansiyeli yaklaşık 1,3 V olup, NiCd pilinkine çok benzerdir. Şekil 1.6'da Nikel Metal Hidrit Bataryanın iç yapısı gösterilmiştir (Ledovskikh vd., 2003).



Şekil 1.6 Nikel-metal hidrat batarya (<https://tap.org.tr>)

1.3.4 Lityum-Polimer (Li-Po) Bataryalar

Lityum polimer (Li-Po) bataryalar, teknolojik olarak lityum iyon bataryaların devamı niteliğinde şarj edilebilir bataryalardır. Lityum polimer bataryalar, hacim ve ağırlıklarına göre çok yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler. Cep telefonları, uçan mekatronik sistemler temel kullanım alanlarıdır. Lityum polimer yapısında katı polimer elektrolit kullanılmaktadır. Katı polimer tasarımı imalatı kolaylık sağlar. Sağlamdır, güvenlidir ve ince geometrik şekle sahiptir. Lityum iyon pillere göre enerji yoğunluğu düşüktür ve çevrim sayısı daha azdır. Şekil 1.7’de Lityum-polimer bataryanın iç yapısı gösterilmiştir (Soylu, 2016).

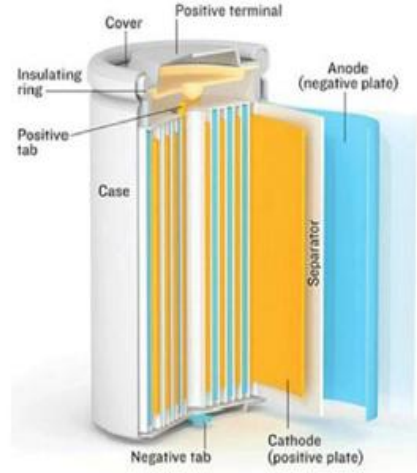


Şekil 1.7 Lityum-polimer batarya (<https://tap.org.tr>)

1.3.5 Lityum-İyon (Li-Ion) Bataryalar

Lityum iyon bataryalar, lityum iyonlarının anot ve katot arasında tersinir bir şekilde hareket etmesi prensibiyle çalışır. Şarj işlemi sırasında harici bir güç kaynağı tarafından sağlanan elektrik enerjisi lityum iyonlarının anottan ayrılıp elektrolit aracılığıyla katoda göç etmesine neden olur. Katotta lityum iyonları katot malzemesinin kristal yapısına yerleşir. Deşarj işlemi sırasında ise katotta depolanan lityum iyonları tekrar elektrolit aracılığıyla anota geri döner ve anot malzemesine yerleşir. Lityum iyon bataryaların bazı avantajları vardır. Lityum iyon bataryaların enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü hafıza etkisinden etkilenmez. Aynı ağırlıktaki kurşun asit bataryalara göre yaklaşık üç kat daha fazla enerji depolayabilir. Bu yüzden akıllı telefonlar ve dizüstü bilgisayarlar gibi cihazlar daha uzun süre şarj edilmeden kullanılabilir ve elektrikli

araçlarda daha uzun mesafeler kat edebilir. Dezavantajları ise; yüksek maliyet, güvenlik, çevresel etki, performansı sıcaklığa bağlı olarak değişebilir. Şekil 1.8’de lityum-iyon bataryasının içyapısı gösterilmiştir (Pehlivan, 2024).



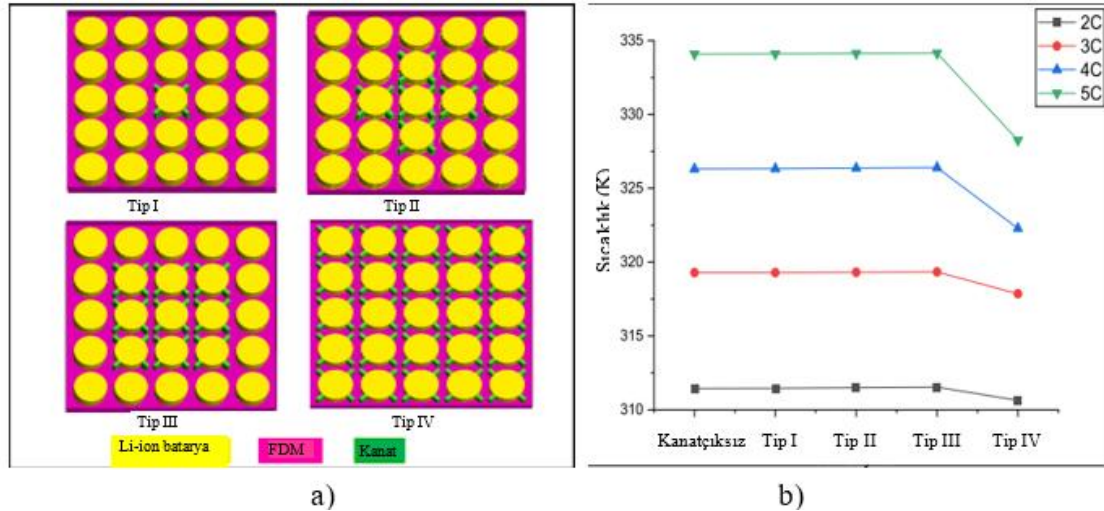
Şekil 1.8 Lityum-iyon bataryası (Zubi vd., 2018)



2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ

Bu tez çalışmasında bakır boru içerisinde bulunan lityum iyon batarya etrafındaki FDM ve bakır boruya kaynaklı farklı kanat geometrilerine sahip test odasının farklı hava hızlarındaki ısı performansını deneysel olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda kaynak araştırılmasında FDM, kanat geometrileri ve hava soğutmalarının ısı performansına etkisinin incelendiği çalışmalar araştırılmıştır.

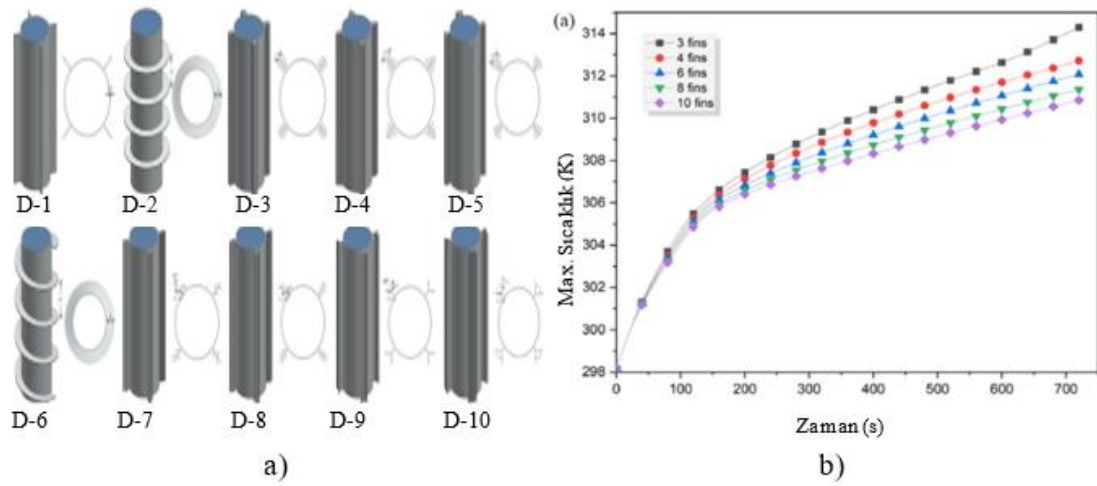
Choudhari vd. (2021) çalışmalarında farklı bir batarya modülü içerisinde farklı kanatçık sayısı ve FDM'nin bulunduğu test odasında ısı performansını sayısal olarak incelemiştir. Yaptıkları dört farklı tip batarya modülü için, çalışma şartlarına bağlı olarak şarj ve deşarj işleminde en iyi performansın tip-4 olan tasarım olduğunu ifade etmişlerdir. Tip 4, her bir pilin etrafında kanatçık bulunan tasarımdır. Şekil 2.1 a'da yazarlara ait çalışmanın tasarımı ve Şekil 2.1 b'de ise çalışmanın sonuçları verilmiştir (Choudhari vd., 2021).



Şekil 2.1 Choudhari vd. çalışmasının a) batarya modülü tasarımı b) çalışmaya ait sonuçları (Choudhari vd., 2021)

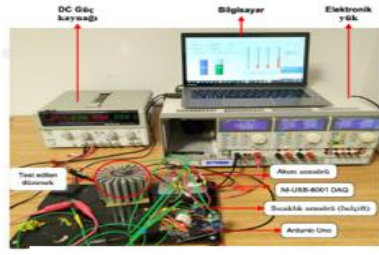
Liu vd (2023) yaptıkları çalışmada FDM içerisinde bulunan farklı alüminyum kanat geometrilerinin batarya ısı yönetimine etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Kanat geometrisinin değiştirilmesi durumunda yapılan deneylerde bataryanın en yüksek sıcaklığını daha da azaltabileceği ifade edilmiştir. Yapılan deneylerde durum-10 (D-10) ile gösterilen kanat yapısının az da olsa daha iyi performans gösterdiğini tespit

etmişlerdir. Ayrıca 5C deşarj oranında deşarj işlemi sürecince saf FDM'ye göre batarya en yüksek sıcaklığını 6.16 K azalttığı gösterilmiştir. Kanat sayısı ve kanat geometrisinin batarya ısı performans üzerinde önemli ölçüde etkilerinin olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca kanat sayısının artırılması durumunda ilave ağırlık olacağından kanat sayısı ile batarya modülünün ağırlığının uygulamalarda önemli olabileceğini ifade etmişlerdir. Şekil 2.2'de çalışmaya ait tasarım ve sonuçları verilmiştir (Liu vd., 2023).

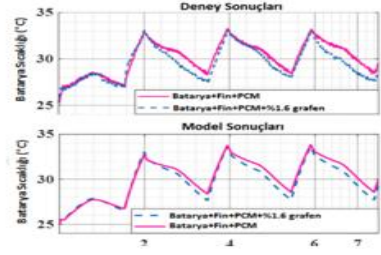


Şekil 2.2 Liu vd. yaptıkları çalışmaya ait çalışma koşulları ve sonuçları (Liu vd., 2023)

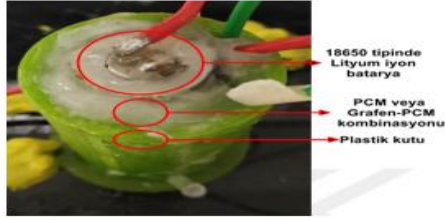
Aydın (2023) tarafından yapılan çalışmada tekli pil için sadece 1. deney batarya etrafına yerleştirilen %4 ve %1.6 grafen karışımlı FDM'nin olduğu, 2. deney batarya, alüminyum kanatçık ve alüminyum kanatçık içine yerleştirilen %1,6 grafen karışımlı FDM ve 3. deney batarya, alüminyum kanatçık, batarya ve alüminyum kanatçık arasına yerleştirilen %4 ve %1.6 grafen karışımlı FDM olmak üzere üç farklı durumda ısı performansını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmaya ait test odaları ve deney düzeneği Şekil 2.3'te verilmiştir. Yapılan bu üç tasarım için en iyi sonuç göz önünde bulundurulmuş ve iyi batarya ısı yönetim sistemi için en iyi yapının batarya, alüminyum kanatçık ve alüminyum kanatçık arasına yerleştirilen %1.6 grafen karışımlı FDM yapısının olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, bataryanın daha erken soğuması, batarya ömrünü uzatırken aynı zamanda bataryanın performansında da olumlu etki yaratacağını savunmuştur (Aydın, 2023).



a) Deney odası



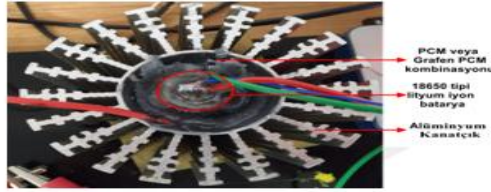
b) Deney sonucu



c) 1. Deney



d) 2. Deney

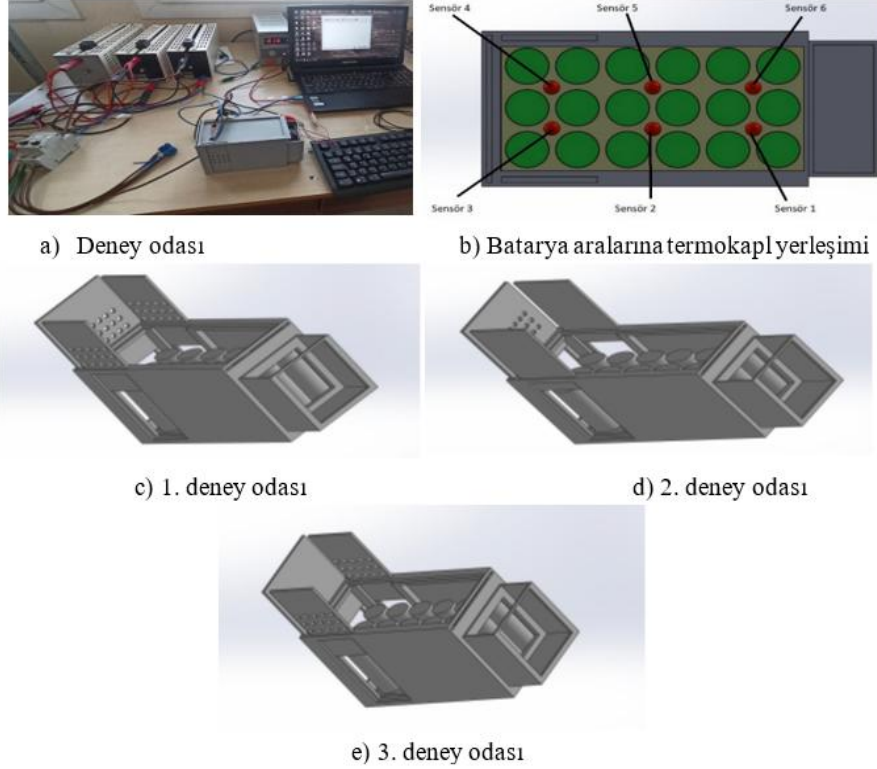


e) 3. Deney

Şekil 2.3 Aydın'ın çalışmasına ait a) deney odası b) deney sonucu c) 1. deney d) 2. deney e) 3. deney (Aydın, 2023)

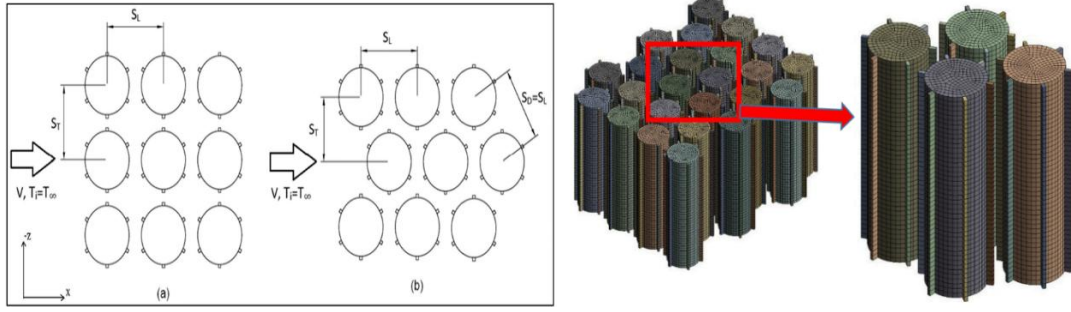
Sezici (2022) yaptığı çalışmada batarya pil paketinde yer alan lityum iyon pil hücrelerinin kimyasal yapılarını ve çalışma mekanizmasını incelemiştir. Şekil 2.4'te çalışmanın batarya kutusuna ait deney düzeneği görseli gösterilmiştir. Silindirik yapıdaki lityum pillerin çalışma esnasında en çok ısınan yerinin orta noktası olduğunu söylemiştir. Soğutma işleminde orta kısma yönelmenin daha iyi bir soğutma performansı sağlayacağını savunmuştur. Yapılan batarya kutusunda bu durum göz önüne alınmış ve hava giriş noktalarının pil hücrelerinin orta noktasına gelecek şekilde tasarımı yapılmıştır. Tek batarya kutusunda 3 farklı model (Arka taraf ve yanlar açık, arka taraf açık ve yanlar kapalı ve arka taraf kapalı yanlar açık) batarya paketinin tasarımından faydalanılmış ve bataryalar arasına yerleştirilen sıcaklık sensörlerinden ve tek fan kullanılarak iki farklı fan hız (1.98W ve 3.68W) değeriyle hava ile soğutma çalışması yapılmıştır. Yapılan deney sonucunda hava akış hızının artmasının soğuma işlemini hızlandırdığını, daha iyi soğuma performansı sağladığını ve havanın doğrusal

olarak aktığı, arka tarafın açık ve yan tarafların kapalı olduğu modelde pil hücreleri daha homojen sıcaklık dağılımına sahip olduğu savunulmuştur (Sezici, 2022).



Şekil 2.4 Sezici'nin çalışmasına ait görüntüler a) deney odası b) bataryalar arasında termokapl yerleşimi c) arka taraf ve yanlar açık modeli d) arka taraf açık yanlar kapalı modeli e) arka taraf kapalı yanlar açık modeli (Sezici, 2022)

Öztop vd (2022) yaptıkları çalışmada silindirik pillerin etrafındaki uzunlamasına kanatçıkların, kanatçık parametrelerine ve hava akış yönlerine göre, pilde üretilen ısıнын transferinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu sayısal olarak göstermişlerdir. Şekil 2.5'te sayısal çalışmanın test odası gösterilmiştir. Ancak kanatçıklar, pil güvenliği ve performansı için başka bir kriter olan tek tip bir termal dağılımı sürdürmek için yeterli değildir. Tabii ki, pratik vakaları ve sonuçları gözlemlemek için bu sonuç deneysel olarak da doğrulanmalıdır. Öte yandan, hava soğutması diğer soğutma tekniklerine göre çok basit ve ucuz olduğundan kanatlı pillerin, düşük güç kasaları göz önüne alındığında yeni ticari ürünler olabileceği savunulmuştur (Öztop ve Şahinaslan, 2022).

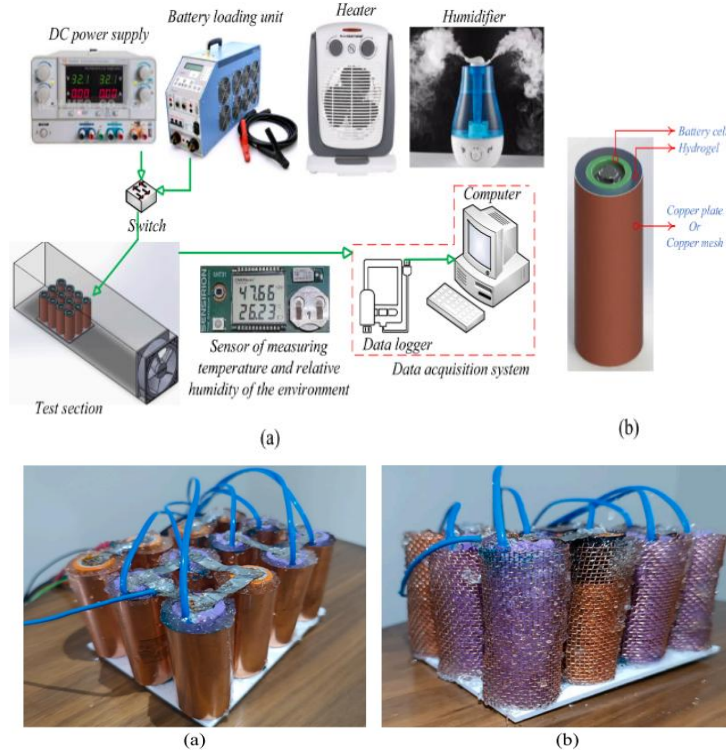


Şekil 2.5 Öztop vd. yaptıkları çalışmaya ait deney odası (Öztop ve Şahinaslan, 2022)

Termal kümelenmiş model ve sabit ısı kaynağı etkisinin benimsenmesi, pil özellikleri, voltaj, direnç ve akım içeren sayısal çözümlere kıyasla bazı hatalara neden olabilir. Bu daha ileri çalışmalarda incelenebilir. Farklı kanatçık geometrilerinin etkileri kanatlı akülerin üretim veya montaj teknolojileri ve maliyetleri daha sonraki çalışmaların diğer konuları olduğunu söylemişlerdir (Öztop ve Şahinaslan, 2022).

Mehryan vd (2024) yaptıkları çalışmalarında potasyum poliakrilat hidrojelinden su buharlaşmasını ve hidrojel tarafından duyulur ısı depolamasını kullanan bir BIYS'nin etkinliğini değerlendirmeye odaklanmışlar. Şekil 2.6'da deneysel çalışmanın batarya modülü ve deney düzeneği gösterilmiştir. Bu değerlendirmede doğal ve cebri hava konveksiyonlarını ve çeşitli çevresel koşulları dikkate alınmıştır. Paketin içindeki on iki adet 18650 pil hücresinin her biri hidrojel tarafından ayrı ayrı kapsüllenmiş ve ek olarak her bir pil hücrelerini çevreleyen hidrojel bir bakır plaka veya bir bakır ağ ile çevrelenmiştir. $Re=2537.5$, $DR=4C$, $RH= \%40$ ve $t_l= 0.5r_b$ olduğunda, hidrojel-bakır örgü stratejisinin kullanımı ortam sıcaklıkları sırasıyla $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ için $T_{max}= 30.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $39.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $50.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye düşürdüğünü ifade etmişlerdir. Doğal konveksiyon akışına maruz kaldığında ise hidrojel-bakır plaka, batarya paketi için en iyi sıcaklık homojenliğini sağladığı tespit etmişlerdir. $T_{amb}= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $DR= 4C$ ve $t_l= 0.5r_b$ olduğunda, $Re=2537.5$ ile zorlanmış hava konveksiyonuna maruz kalan hidrojel-bakır örgü durumunda, RH 'yi $\%40$ 'tan $\%90$ 'a yükseltmek ve DR 'leri sırasıyla $2C$ ve $4C$ için $T_{max}= 32.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den $39.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ve $34.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den $45.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkardığını, $Re=2537.5$ ve $RH= \%40$ olduğunda, $DR=3C$ ve $4C$ için ve zorlanmış hava konveksiyonu durumlarında, hidrojel kalınlığı $0.5r_b$ olarak ayarlandığında $T_{max}= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altında kaldığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca, $DR=3C$ ve $4C$ için, doğal konveksiyona maruz kalan hidrojel-bakır örgünün minimum kalınlıkları sırasıyla $0.5r_b$ ve $0.75r_b$ 'dir. Potasyum poliakrilat

hidrojel tabanlı evaporatif soğutma, $T_{amb} = 25$ °C'den düşük ve RH düşük olduğunda batarya paketinin uygun sıcaklığını korumada başarılı olabileceğini savunmuşlardır. Çalışmaya ait deney düzeneği aşağıdaki gibidir (Mehryan ve Jannesari, 2024)



Şekil 2.6 Mehryan ait çalışmanın deney odaları (Mehryan ve Jannesari, 2024)

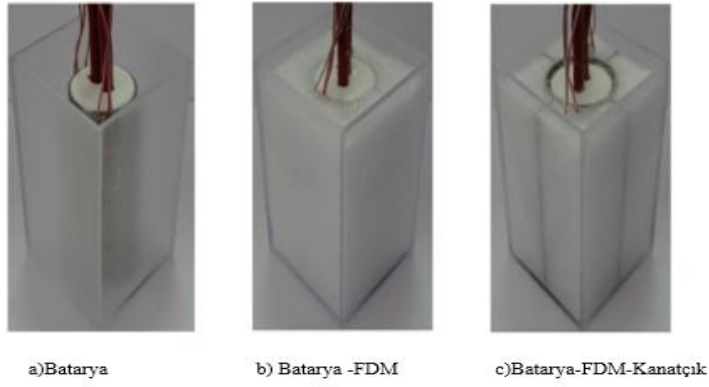
X Chen vd (2023), yaptıkları çalışmada FDM'nin düşük ısı iletkenliği ve hava soğutmanın düşük soğutma verimliliğinin eksikliğini telafi etmek için biyotik değişken kesitli kanatçıklar, FDM ve hava soğutmalı kompozit BIYS 'ne gömülü olarak yapılmıştır. Şekil 2.7'de çalışmaya ait test odası ve deney düzeneği gösterilmiştir. Yapısal parametrelerin ve kanat tipinin BIYS 'nin ısı yayma performansı ve güç tüketimi üzerindeki etkileri, yüksek 3C deşarj ve 4C deşarj oranlarında inceleme yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda, sadece pasif FDM soğutmalı batarya modülünün T_{max} 'ı biyotik değişken kesitli kanatçıklar eklenerek 2.2 °C azalttığı görülmüştür. Ayrıca, kanatçıklı hibrit BIYS'nin T_{max} 'ı 3 m/s hava hızıyla kanatçık olmayan BIYS'ne kıyasla 3.4 °C' ölçüde düşmüştür. Batarya modülünün neredeyse aynı T_{max} değeriyle, gaga kanatlı BIYS'nin güç tüketimi, dikdörtgen kanatlı ve kanatlı BIYS'ne kıyasla sırasıyla %23 ve %33 oranında azaltıldığı ayrıca, hava akış hızı 3 m/s'nin üzerinde olduğunda

batarya modülünün soğutma performansındaki iyileşme önemsiz kaldığı, BIYS'nin güç tüketimi önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir. α 'sı 75° ve L_2 'si 40 mm olan BIYS gömülü çatallı yüzgecin T_{max} , ΔT ve güç tüketimi sırasıyla 38.3°C , 2.9°C ve 2.6×10^{-3} W olup, gagalı kanatçık BIYS'ne kıyasla sırasıyla 0.4°C , 0.4°C ve %13'lük bir azalma göstermiştir. Gecikmeli hava soğutma sisteminin BIYS'nin güç tüketimi %59 oranında önemli ölçüde azalırken, T_{max} ve ΔT sırasıyla 40°C ve 3°C içerisinde tutulduğu savunmuşlardır (X. Chen vd., 2023).



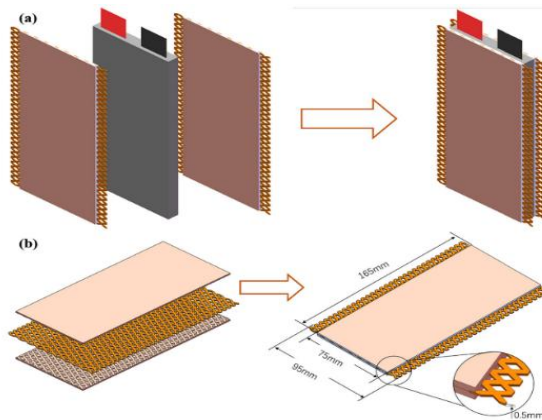
Şekil 2.7 Chen vd. ait çalışmanın deney odası (Chen vd., 2023).

Fan vd (2021), yaptıkları çalışmada deneysel doğrulamaya dayanarak, ısı yönetim sistemlerinin, kanatçık dağılımının, kanatçık uzunluğunun ve ortam sıcaklığının etkilerini değerlendirmek için sayısal simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, FDM'nin faz geçiş süreci görselleştirilmiş ve döngü testleri gerçekleştirilmiştir. Kanatçık uzunluğunun artırılması, ısı yönetim performansını artırmak için pratik bir yaklaşım yapılmıştır. Kanatçıkların 7.5 mm'den 13.5 mm'ye uzatılmasıyla çalışma süresi %8.3 oranında artırılmıştır. Batarya-FDM-kanatçık sistemi, yüksek ortam sıcaklığında bile verimli bir şekilde çalışabilmiştir. Optimize edilmiş sistemin güvenli çalışma süresi, Batarya-FDM sistemine kıyasla 20, 30 ve 40°C ortam sıcaklıklarında sırasıyla 1.48, 1.49 ve 1.81 kat arttığını savunmuşlar (Fan vd., 2021). Şekil 2.8, batarya modülleri için metal kanatçık yoğunlaştırılmış FDM tabanlı BIYS'leri verilmiştir.



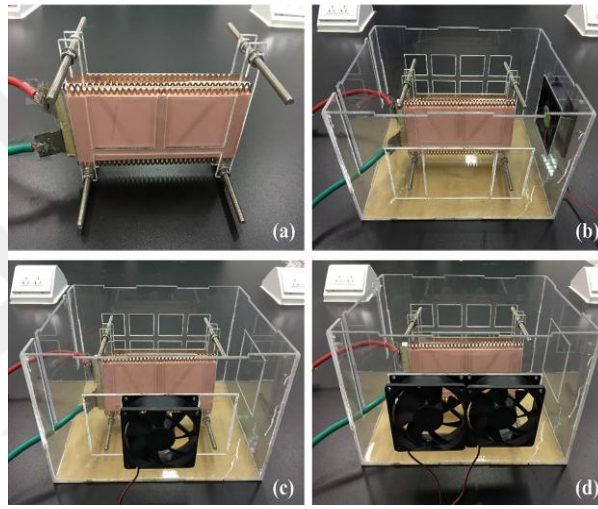
Şekil 2.8 FDM'nin farklı sistemlerde faz geçiş süreci (Fan vd., 2021)

Li vd (2019) tarafından yapılan çalışmada, 5C deşarj işlemi sırasında bataryanın maksimum sıcaklığı, hava hızı arttıkça düşmüştür. 3.5 m/s'lik hava hızı, sistemi soğutmak için en uygun seçim ve iki fanlı batarya, tek fanlı bataryaya göre daha iyi ısı dağıtma performansında olabileceğini söylemişlerdir. Şekil 2.9'da çalışmaya ait batarya modülü detayı gösterilmiştir.



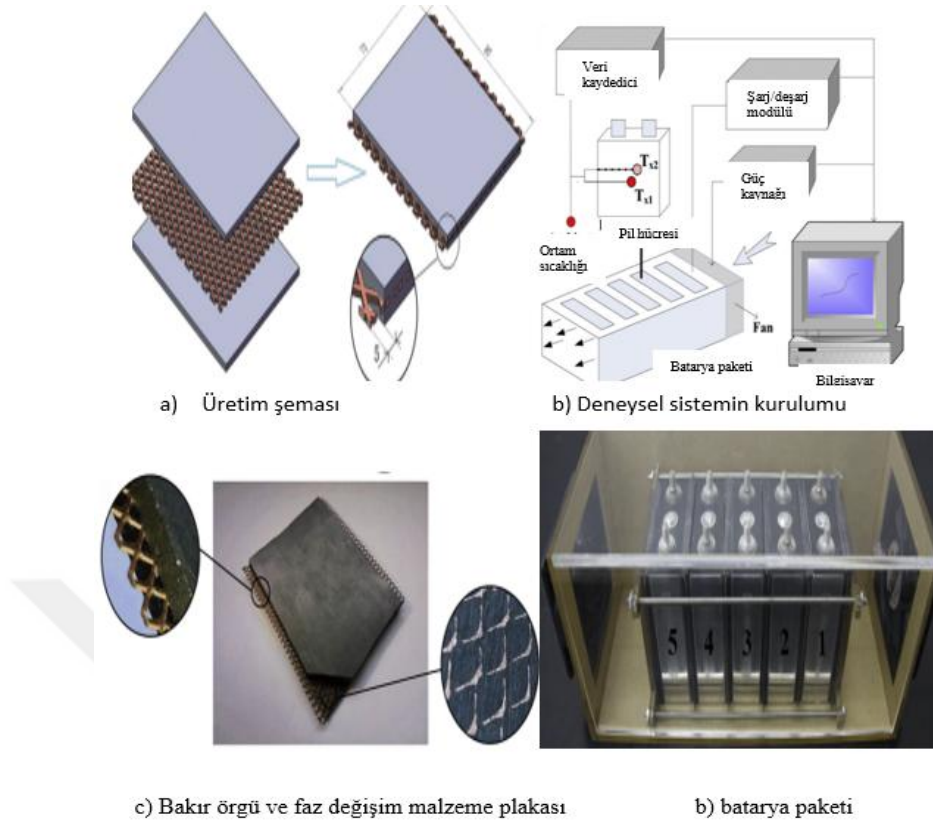
Şekil 2.9 (a) Soğutma sistemi ve (b) bakır ağırlı silika soğutma plakasının yapısı ve geometrisi (Li vd., 2019)

Ayrıca Şekil 2.10'da batarya modülü ve kutusunun detayı gösterilmiştir. Yine bataryanın ön tarafındaki fanın, bataryanın arka tarafındaki fana göre daha iyi ısı yönetim performansı gösterdiği görülmüştür. Bakır ağ ile birleştirilmiş çift silika soğutma plakasına dayalı hava soğutma sistemi, hava zorlamalı soğutma ile desteklenerek, mükemmel ısı dağılımı performansı ve sıcaklık dengesi sergileyen kese bataryalarının ısı yönetim için verimli bir çözüm sunulmuştur. Sistemin, yalnızca kese bataryalar için değil, prizmatik piller ve diğerleri için de önemli bir soğutma etkisi sağlaması beklenildiği savunulmuştur (Li vd., 2019).



Şekil 2.10 Li vd. ait çalışmanın a) soğutma plakası, (b) Yan yüzünde bir fan bulunan soğutma plakası ve bakır örgü, (c) Arka yüzünde bir fan bulunan soğutma plakası ve bakır örgü ve (d) soğutma plakası ve iki fan bulunan bakır örgü şematik gösterimleri (Li vd., 2019)

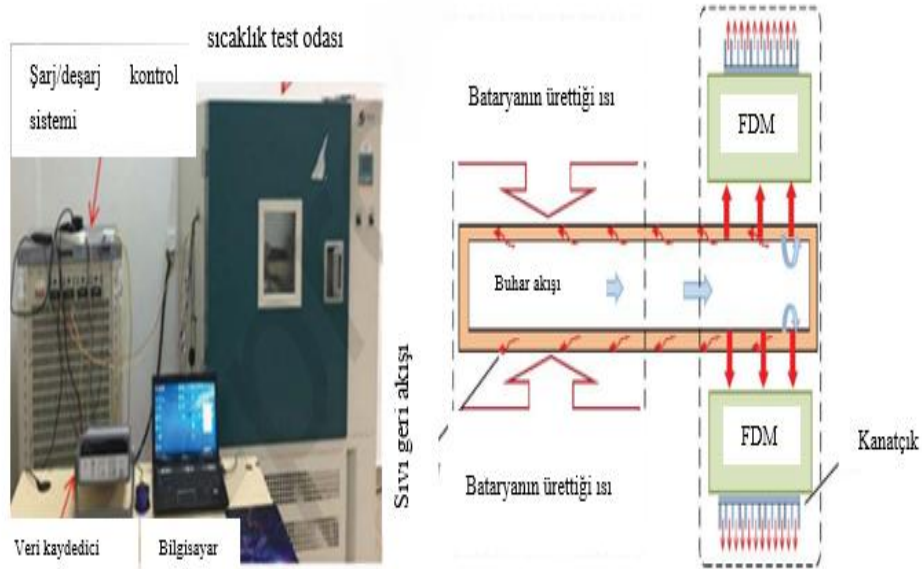
Wu vd (2016), yaptıkları Şekil 2.11'de gösterilen çalışmada zorlamalı hava konveksiyonu ve bakır ağ destekli parafin/genişletilmiş grafit kompozit plakayı birleştiren yeni bir hibrit soğutma sistemi önermişlerdir. Bakır ağın kompozit plakanın mekanik mukavemetini ve ısı iletkenliği artırılabilceğini iddia etmişlerdir. Sonuç olarak, bu geliştirme kompozit plakanın ısı dağılımı etkinliğinin artmasına ve sıcaklık düzgünlüğünün artmasına yol açacaktır. Deneysel bulgulara göre, 5C'lik bir çevrim oranında bakır ağ eklenerek önemli ölçüde daha düşük bir T_{max} elde edilebileceğini savunmuşlardır. Çalışmaya ait deney düzeneği Şekil 2.11'de verilmiştir (Wu vd., 2016).



Şekil 2.11 Wu vd. ait çalışmanın a) Üretim şeması, b) deneysel sistemin kurulumu, c) bakır örgü ve faz değişim malzeme plakası ve d) batarya paketi (Wu vd., 2016)

Zhang vd (2020) yaptıkları çalışmada ısı boruları (IP), bakır köpük ve parafin FDM içeren yeni bir hibrit BIYS türü tasarlanmış ve önermişlerdir. Şekil 2.12’de soğutma planı ve deney düzeneği gösterilmiştir. Bu BIYS’de, piller tarafından üretilen ısı boruları (HP) aracılığıyla iletilir ve parafinde depolanır. Bakır köpük, FDM’nin termal iletkenliğini (TC) artırmak için kullanılmıştır. Li-iyon batarya sıcaklığı ayarlanan değerin üzerine çıktığında, ısı dağılımını iyileştirmek için ekstra bir fan kullanılmıştır. Sonuçlar; fansız önerilen batarya takımının 1C, 3C ve 4C deşarj oranlarında T_{max} ’ı 45 °C’nin altında tuttuğunu göstermiştir. Paketin maksimum sıcaklığı, son derece yüksek bir deşarj oranı sırasında önerilen üst çalışma sıcaklığı olan 45 °C’den daha yüksek olsa da, tasarlanan BIYS diğer soğutma modlarına göre nispeten daha uygun bir sıcaklık sunmuştur. Ayrıca, sistem tek bir hücre içindeki sıcaklık dengesizliğini önemli ölçüde iyileştirebilir. Bu soğutma modları arasında, tasarlanan BIYS, paketteki sıcaklık dağılımının yanlış dağılımını sınırlamada en iyi performansı göstermiştir. 5C’lik son derece yüksek bir deşarj oranında bile, maksimum sıcaklık farkı 5 °C içinde kontrol edilebilir. Ayrıca, sistem tek bir hücre içindeki sıcaklık dengesizliğini büyük ölçüde

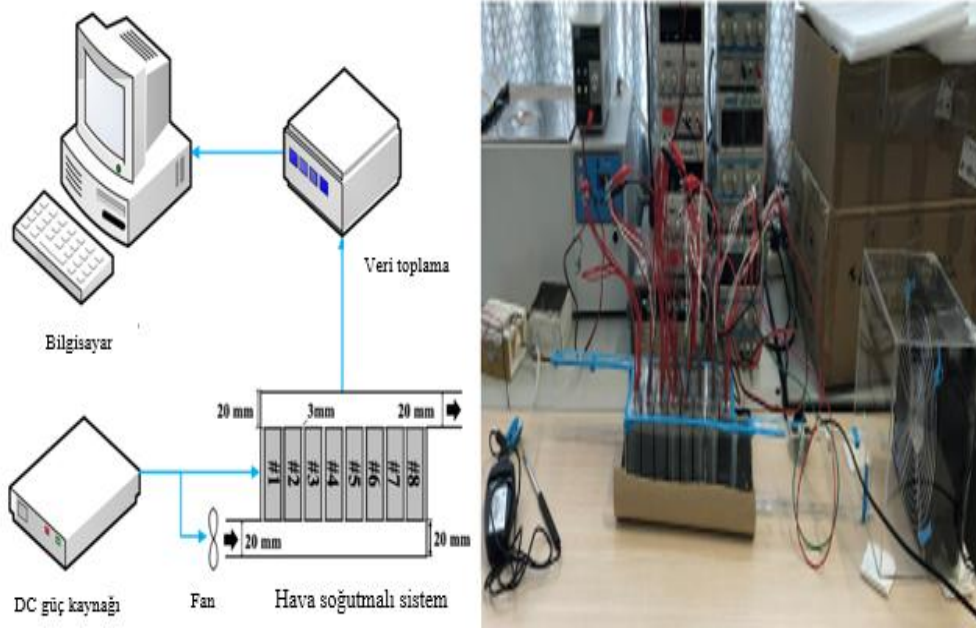
iyileştirebilmektedir. Yardımcı fanlı önerilen sistemin, BIYS'nin performansını daha da artırmak ve özellikle uzun süreli yüksek deşarj oranı koşulları altında bataryanın çalışma ortamlarını önemli ölçüde iyileştirmek için kullanılabilir olduğunu savunmuşlar (Zhang vd., 2020).



Şekil 2.12 DeneySEL sistem ve batarya ısıL yönetim sisteminin şeması (Zhang vd., 2020)

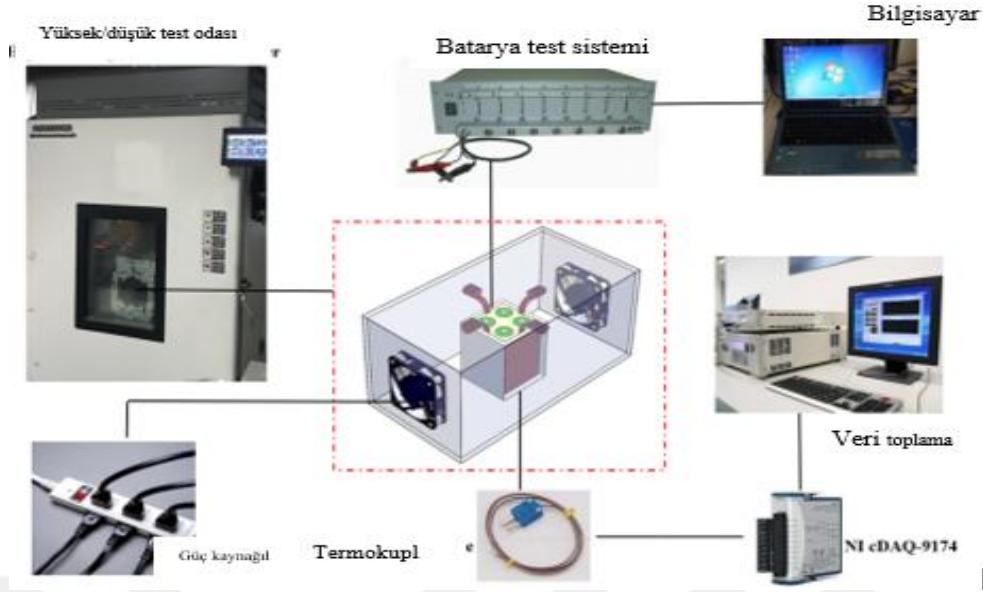
K. Chen vd (2019) yaptıkları çalışmada soğutma kanalları arasındaki hava akış hızı dağılımını ayarlamak ve optimize edilmiş BIYS'nin performansını artırmak için bir ayarlama katsayısı belirlemişlerdir. Şekil 2.13'de çalışmaya ait görsel verilmiştir. Optimizasyon sonucu, giriş ve çıkış yanındaki soğutma kanallarının hava akış hızlarının diğer kanallarinkilerin 0.7 katı olduğu durumlarda optimize edilmiş, BIYS'nin en iyi performansı gösterdiği görülmüştür. Sunulan hücre aralığı optimizasyon yönteminin, en iyi optimize edilmiş BIYS için soğutma verimliliğini dikkate değer şekilde artırdığını ve optimize edilmiş sistemin çeşitli giriş hava akış hızları için iyi performans gösterdiğini kaydetmişlerdir. Orijinal BIYS ile karşılaştırıldığında, en iyi optimize edilmiş BIYS'nin T_{max} değeri yaklaşık 4.0 K azalmakta ve ΔT_{max} çeşitli giriş hava akış hızları için %69'dan fazla azalmıştır. Önceki çalışmadaki optimize edilmiş BIYS ile karşılaştırıldığında, en iyi optimize edilmiş sistem için ΔT_{max} çeşitli giriş hava akış hızları için %25'ten fazla azalmaktadır. Ayrıca, mevcut optimize edilmiş BIYS, uniform aralık düşüş aralığına sahip sistemden de daha iyi performans göstermiştir. Hücre aralığı optimizasyonu için

sunulan stratejinin BIYS'nin akış alanına bağlı olduğunu ve sistemin farklı boyutları, pil hücrelerinin farklı özellikleri ve soğutma havası dâhil olmak üzere çeşitli durumlar için kolayca kullanılabileceği önerilmiştir. İyileştirilmiş akış direnci ağ modeliyle birleştirilen optimizasyon stratejisi, soğutma verimliliğinin iyileştirilmesi için paralel hava soğutmalı BIYS'nin hücre aralığı dağılımını optimize etmek için etkili bir yöntem olduğunu savunmuşlardır. Çalışmaya ait deney aşağıdaki gibidir (K. Chen vd., 2019).



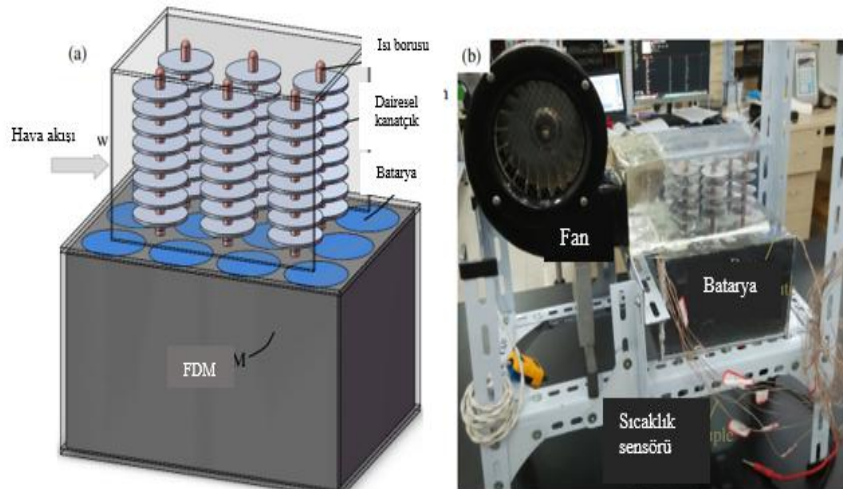
Şekil 2.13 Test sisteminin şeması ve deneysel sistem (K. Chen vd., 2019)

Weng vd (2021) çalışmalarında FDM modülünde tasarlandığı gibi HPE kullanımının, hızlı ısı üretimi olan zorlu çalışma ortamlarında tatmin edici olmayan bir performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Ancak, FAC ısı dağılımını önemli ölçüde iyileştirmiştir. 25 °C ortamda, soğutma verimliliği η %11.9–23.6 aralığında olup, η %15.98 olarak hesaplanmıştır. 35 ve 45 °C ortamda, η sırasıyla %23.9–26.3 ve %27.6–35.7 aralığında olup, η değerleri %25.40 ve %33.14 olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle, yüksek sıcaklık ortamında FAC daha tercih edildiğini savunmuşlardır. Çalışmaya ait deney düzeneği Şekil 2.14’de gösterildiği gibidir (Weng vd., 2021).



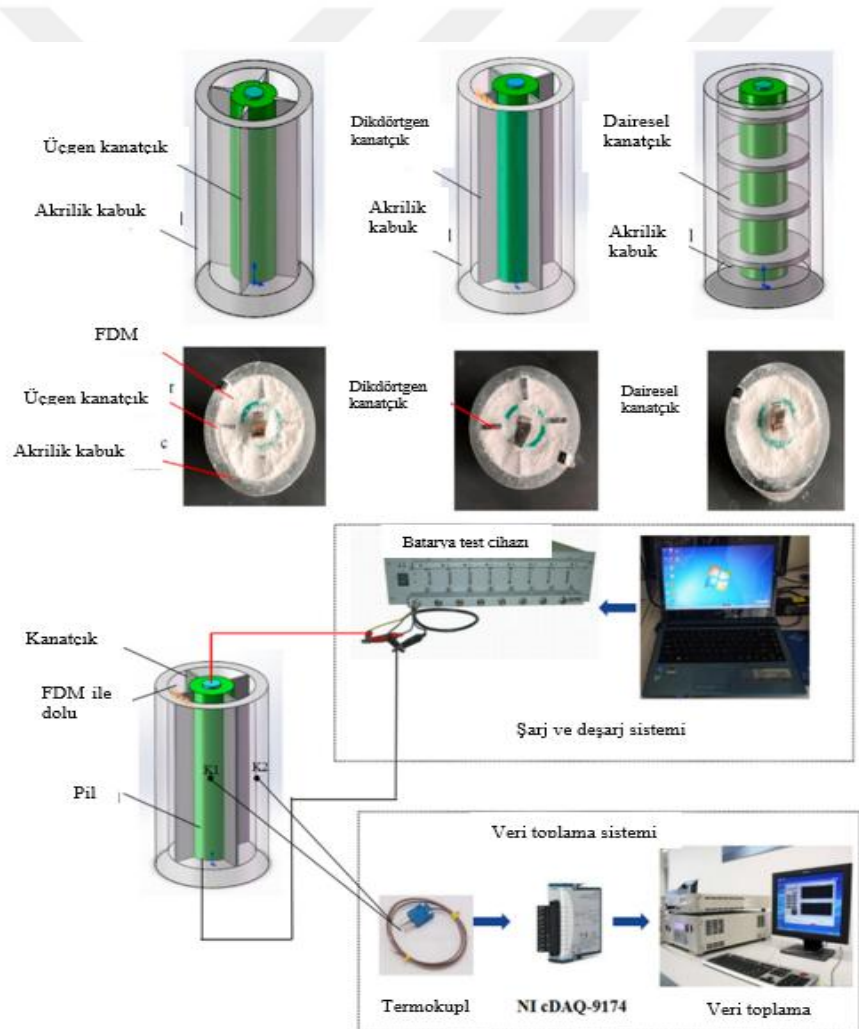
Şekil 2.14 Farklı ortam sıcaklıklarında FDM modülünün ısı davranışlarını ölçmek için deneysel düzeneği (Weng vd., 2021)

Zhao vd (2017) yaptıkları çalışmada Şekil 2.15'de sunulan BIYS'de, ısı borularının dinamik döngü sırasında FDM'nin erimesi için gereken süreyi uzattığını ve sıcaklık homojenliğini iyileştirebileceğini incelenmiştir. Maksimum sıcaklık farkı, modüle FDM doldurularak (%33.6) ve FDM'ye HP yerleştirilerek %28.9 bir düşüş sağlanabileceği belirtilmiştir. HP, ısı depolama ve salınımının dinamik sürecinde FDM için faz geçiş sürecini uzatabilir ve HP'nin işlevi, FDM'nin faz geçişi tamamlanmadan önce sıcaklık homojenliğini artırabileceğini savunmuşlardır. Çalışmaya ait deney düzeneği aşağıdaki gibidir (Zhao vd., 2017).



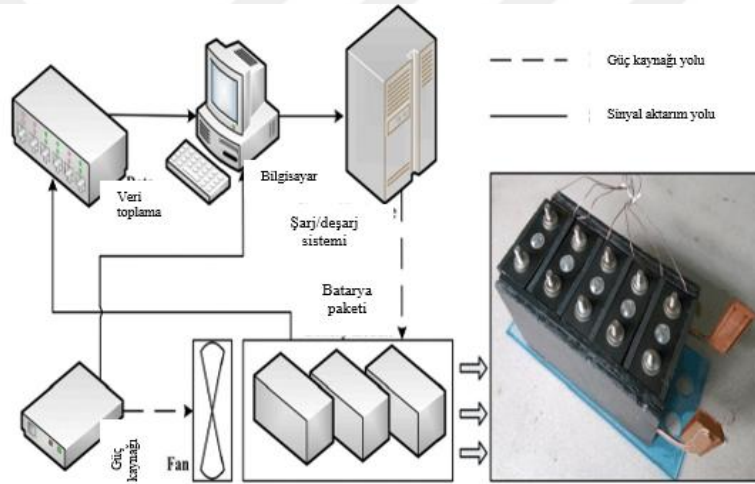
Şekil 2.15 a) Isıl yönetim modülünün şeması b) deneysel sistem (Zhao vd., 2017)

Weng vd (2020) çalışmalarında dikdörtgen ve üçgen şekilli iki tip uzunlamasına kanatçık ve dairesel kanatçıklar incelenmişlerdir. FDM'den gelen ısıyı dağıtmak için doğal konveksiyon yöntemi kullanıldığında, uzunlamasına kanatçıkların daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 2.16'da çalışmaya ait görseller verilmiştir. FDM'den gelen ısıyı dağıtmak için zorlamalı konveksiyon kullanıldığında ise dairesel kanatçıkların etkili olduğu bulunmuştur. Dairesel kanatçıkların alt kısma ve uzunlamasına kanatçıkların diğer kısımlara yerleştirildiği uzunlamasına ve dairesel kanatçıklarla optimize edilmiş bir tasarım da önerilmiştir. Bu optimize edilmiş yapının, dikdörtgen kanatçıklı yapıya kıyasla maksimum pil sıcaklığını %5.5 oranında düşürdüğü savunulmuştur. Çalışmaya ait deney düzeneği aşağıdaki gibidir (Weng vd., 2020).



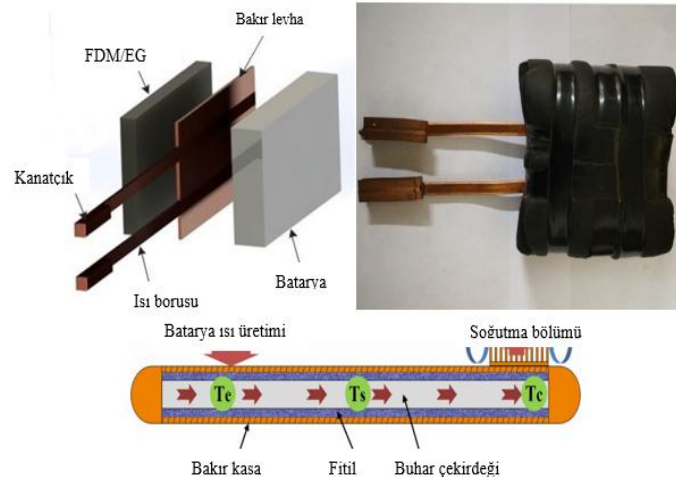
Şekil 2.16 Üçgen, dikdörtgen ve dairesel kanatçıklara entegreli FDM tabanlı BIYS'nin şematik ve deneysel sistemi (Weng vd., 2020)

Wu vd (2017) ise yaptıkları çalışmada ısı borusu tabanlı BIYS ile FDM'yi önermişlerdir. L şeklindeki ısı borusunun buharlaştırıcı bölümü, Şekil 2.17'de gösterildiği gibi FDM plakaları arasına sıkıştırılmış ve kondenser bölümü, pil takımının dışına uzatılmıştır. FDM tabanlı BIYS'ne ısı borusunun eklenmesi, maksimum pil sıcaklığını 53.2 °C'den 50.9 °C'ye düşürmüştür. Ayrıca, kondenser bölümünün 1, 2 ve 3 m/s hıza sahip fan kullanılarak zorlanmış hava ile yapıldığını ve maksimum pil sıcaklığının 50.9 °C – 47.2 °C'ye düştüğünü belirtmişlerdir. Ancak, hibrit BIYS kullanımıyla FDM tabanlı BIYS'ne kıyasla sıcaklık farkında önemli bir iyileşme gözlemlenmediğini savunmuşlardır. Çalışmaya ait deney düzeneği aşağıdaki gibidir (Wu vd., 2017).



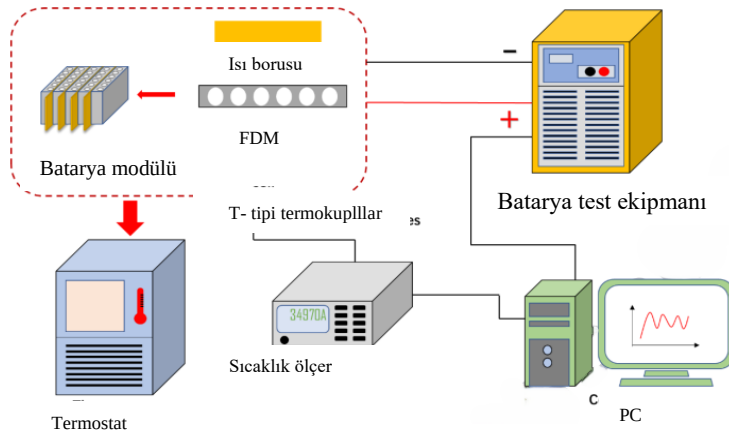
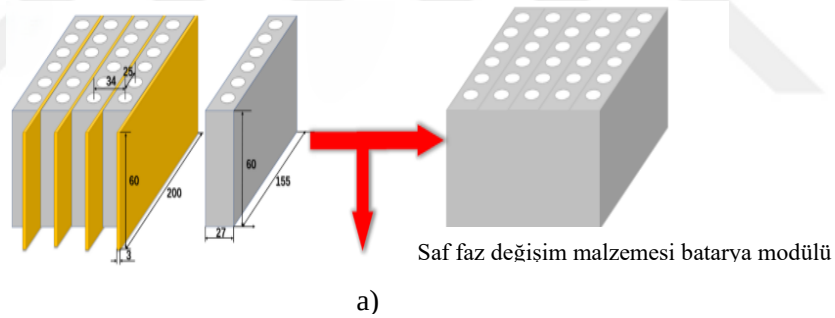
Şekil 2.17 Hibrit batarya ısıl yönetim sisteminin şematik ve deneysel gösterimi (Wu vd., 2017)

Jiang vd (2019) tarafından yapılan çalışmada pil, FDM/genişletilmiş grafit kompozit ve ısı borusu ile bir sandviç tip soğutma yapısının sıcaklığını incelemek için bir termal model önermişlerdir. Şekil 2.18'de çalışmaya ait modül gösterilmiştir. Yetersiz gizli ısı geri kazanımı nedeniyle yalnızca FDM'nin pilin sıcaklığını optimum çalışma aralığında tutamadığını iddia etmişlerdir. Buna karşılık, FDM ve bir ısı borusunun birleştirilmesinin, pil uzun süre çalışıyor olsa bile pilin sıcaklığını düzenlemek için daha iyi bir yöntem sağladığını keşfetmişlerdir. Ek olarak, pil güvenliği için FDM erime noktasının ortam sıcaklığının en az 3 °C üzerinde olması önerilmiştir. Çalışmaya ait deney düzeneği aşağıdaki gibidir (Jiang ve Qu, 2019).



Şekil 2.18 Isıl yönetim modülünün ve ısı pompasının şeması (Jiang ve Qu, 2019)

Huang vd (2018) tarafından yapılan çalışmada sırasıyla saf FDM, fan destekli FDM ile ısı borusu ve sıvı destekli FDM ile ısı borusundan oluşan li-iyon batarya modülleri için FDM tabanlı BIYS tasarlamışlardır. Şekil 2.19'da çalışmaya ait tasarımlar verilmiştir.



Şekil 2.19 Huang vd. çalışmasına ait a) Li-iyon batarya modülü b) deneysel çalışmanın şeması (Huang vd., 2018)

Saf FDM olarak parafin ve kompozit FDM olarak parafin ve grafitin fiziksel karışımlarını kullanmışlar. Çeşitli deşarj oranlarında yapılan deneylerin bulgularında, ısı borusunun ısının hızlı bir şekilde taşınmasında ve FDM tabanlı bir batarya modülü için sabit bir sıcaklığın korunmasında önemli bir rol oynadığını göstermişlerdir. Isı borusu-FDM ve sıvı soğutma sistemi ile T_{max} 44 °C'ye düşürülmüş ve bataryalar arasındaki sıcaklık farkı 3 °C'ye kadar düşürülmüştür. Çalışmaya ait deney düzeneği aşağıdaki gibidir (Huang vd., 2018).





3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmada kullanılan pil yerli üretim Aspilsan markasına ait INR1865A28 kodlu 2800 mAh kapasiteli silindirik tipte lityum iyon (Li-Ion) pildir. Aspilsan (INR18650A28) bataryanın (hücre, pil) teknik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Jon P. Christophersen vd. pillerdeki C-oranını Eşitlik (3.1)’de sunulduğu gibi hesaplanabileceğini ifade etmişlerdir.(Jon P. Christophersen vd., 2003)

$$C = \frac{I (A)}{Q_{pil}(Ah)} \quad (3.1)$$

Eşitlikte sunulan C, I, Q_{pil} terimleri sırasıyla şarj/deşarj oranı, akım, ve pil kapasitesini ifade etmektedir.

Çizelge 3.1 Aspilsan lityum iyon pilin özellikleri

Parametreler	Değerler
Nominal Voltaj (V)	3.65
Şarj kesme gerilimi (V)	4.2
Deşarj Kesme Gerilimi (V)	2.5
Maks. Sürekli C oranı	5
Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	230
Nominal Kapasite (mAh)	2800
İç direnç (mΩ)	≤20
Enerji Yoğunluğu (Wh/L)	605

Deneylerde kullanılan pilin çapı 18.30 ± 0.1 mm, yüksekliği 65 ± 0.2 mm ve ağırlığı 44.5 ± 0.7 g’dir. Şekil 3.1’de deneyde kullanılan pilin görseli verilmiştir. Pilin en yüksek çalışma sıcaklığı 60 °C olup, tehlikeli bölgeye girdiği sıcaklık ise 80 °C’dir.



Şekil 3.1 Aspilsan marka lityum iyon pil

3.1 Pil Üzerine Termokupl Yerleştirilmesi

Pil yüzey sıcaklığını ölçmek için Omega marka K tipi termoeleman kullanılmıştır. Pil etrafında bulunan koruyucu polimer esaslı sargı çıkarılmış ve termoeleman yüzeye termoeleman kaynak makinesi ile kaynatılmıştır. Aspilsan marka INR18650A28 model pilin sıcaklığını ölçmek için farklı pil yüksekliklerine yerleştirilen K tipi termokupllar Şekil 3.2 a’da gösterilmiştir. 1 numaralı termokupl pilin eksi (-) kutuptan 15 mm yüksekliğe, 2 numaralı termokupl ise pilin eksi (-) kutuptan 30 mm yukarıya yerleştirilmiş ve kaynatılmıştır. Daha sonra pilin etrafına elektriksel yalıtımı sağlamak için polimer bazlı shrink (daralan) makaron yerleştirilmiş ve sıcak hava tabancası yardımıyla yüksek sıcaklıkla pilin etrafına hava boşluğu kalmayacak şekilde sarılmıştır. Bu işleme ait görsel ise Şekil 3.2 b’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.2 Deneysel çalışmada kullanılan pilin, (a) pil üzerine yerleştirilen termokupl (b) pilin yalıtım için kaplanması

Daha sonra bu elde edilmiş termokupllı pil, bakır boru içerisine alınmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan bakır boru; 60 mm uzunluğunda, 22 mm çapında ve 1 mm et kalınlığındadır. Bakır boru ile pil arasına sızdırmazlık elemanı olan silikon conta yerleştirilmiştir. Bu conta sayesinde pil ile bakır boru arasındaki boşluk ayarlanmıştır. Böylece pil ile bakır boru arasına yerleştirilen FDM için sızdırmazlık da sağlanmıştır. Bu işleme ait görsel şekil 3.3’de verilmiştir.



şekil 3.3 Deney odası ve termokupl yerleşimi

Deneysel alışmada FDM olarak Merck marka 42-44 model parafin wax kullanılmış olup erime sıcaklığı 42 – 44 C arasındadır. FDM, 1 mm kalınlığında olacak şekilde halkasal olarak bakır boru ile pil arasına sıvı fazda dökülmüştür. FDM katmanının ağırlığı bütün bakır borulu test odalarında eşit olup 3.81 g olarak tartılmıştır. Batarya modülü içerisinde toplam 16 adet bakır borulu test odası bulunduğundan toplamda modül içerisine 60.96 g. FDM kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan FDM’nin teknik özellikleri izelge 3.2’de verilmiştir.

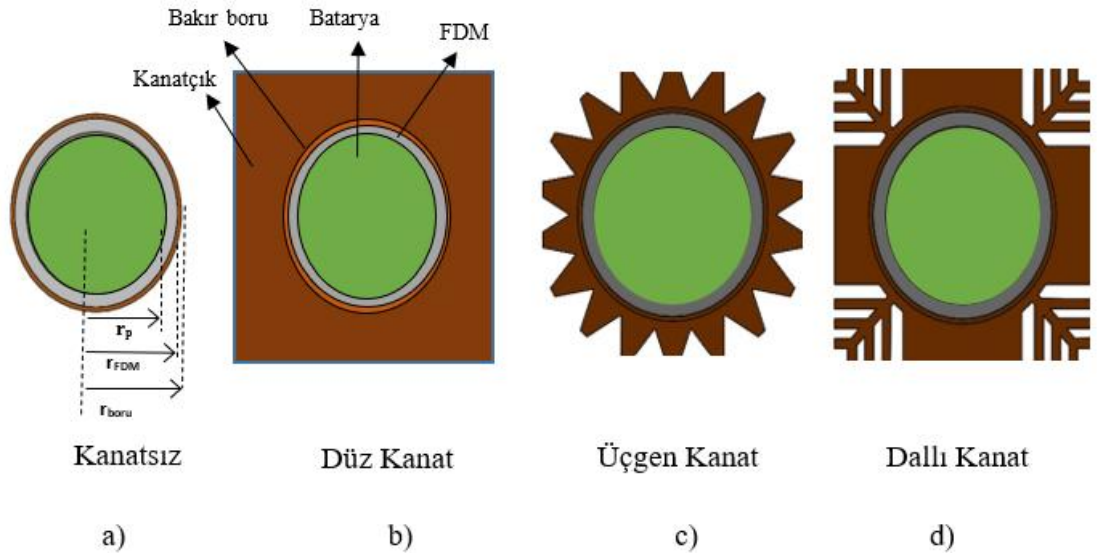
Çizelge 3.2 Deneylerde kullanılan FDM'nin özellikleri

Özellikler	FDM 42
Erime Sıcaklığı (°C)	42-44
Parlama Noktası (°C)	317
Gizli Isısı (kJ/kg)	242.35
Özgül Isı Kapasitesi (kJ/kg°C)	1.93(katı), 2.38 (sıvı)
Yoğunluğu (kg/m ³) (15°C)	940
Isıl İletkenliği (W/m°C)	0.317 (katı), 0.205 (sıvı)

FDM-42 için erime entalpileri ve yoğunlukları sırasıyla 242.35 kJ/kg ve 940 kg/m³'dür. Isıl iletkenliği katı ve sıvı fazda değişiklik gösterip sırasıyla 0.317 W/m°C ve 0.205 W/m°C'dir. FDM sıcaklığını ölçmek için FDM katmanının orta noktasına K tipi termokupl sabitlenmiştir. Ayrıca, bakır borunun dış yüzey sıcaklığını ölçmek için termokupl, bakır borunun dış yüzeyine kaynaklanmıştır.

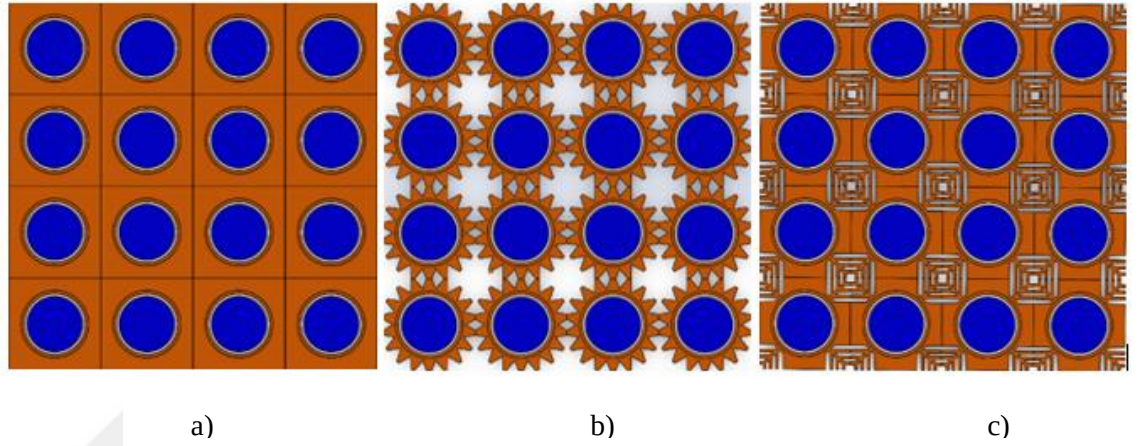
3.2 Batarya Modüllerinin Hazırlanması

Batarya modülleri kanatçiksiz ve 3 farklı tip kanatçıklı geometri olmak üzere dört farklı tip modül oluşturulmuştur. Tekli pilin etrafında bulunan kanatçıklı ve kanatçiksiz geometriler Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Batarya modülünün hücresi; a) Kanatsız, b) Düz Kanat, c) Üçgen Kanat ve d) Dallı Kanat

Batarya modülünün hücresi Şekil 3.4'te ayrıntılı olarak verilmiştir. Batarya modülünün bir hücresi lityum iyon pil, FDM, bakır boru ve kanatçiksız ve farklı tip kanatçık modelli yapıdan oluşmaktadır. Şekil 3.4 a, b, c ve d'de sırasıyla kanatsız, düz kanat, üçgen kanat ve dallı kanat geometrileri gösterilmiştir. Isı geçişini arttırmak için modülde bulunan hücrelerle bağlantılı kanatçık modelleri Solidworks katı model çizim programında çizilmiştir. Toplam on altı adet pilin bulunduğu modülde kullanılan kanatçıklar Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



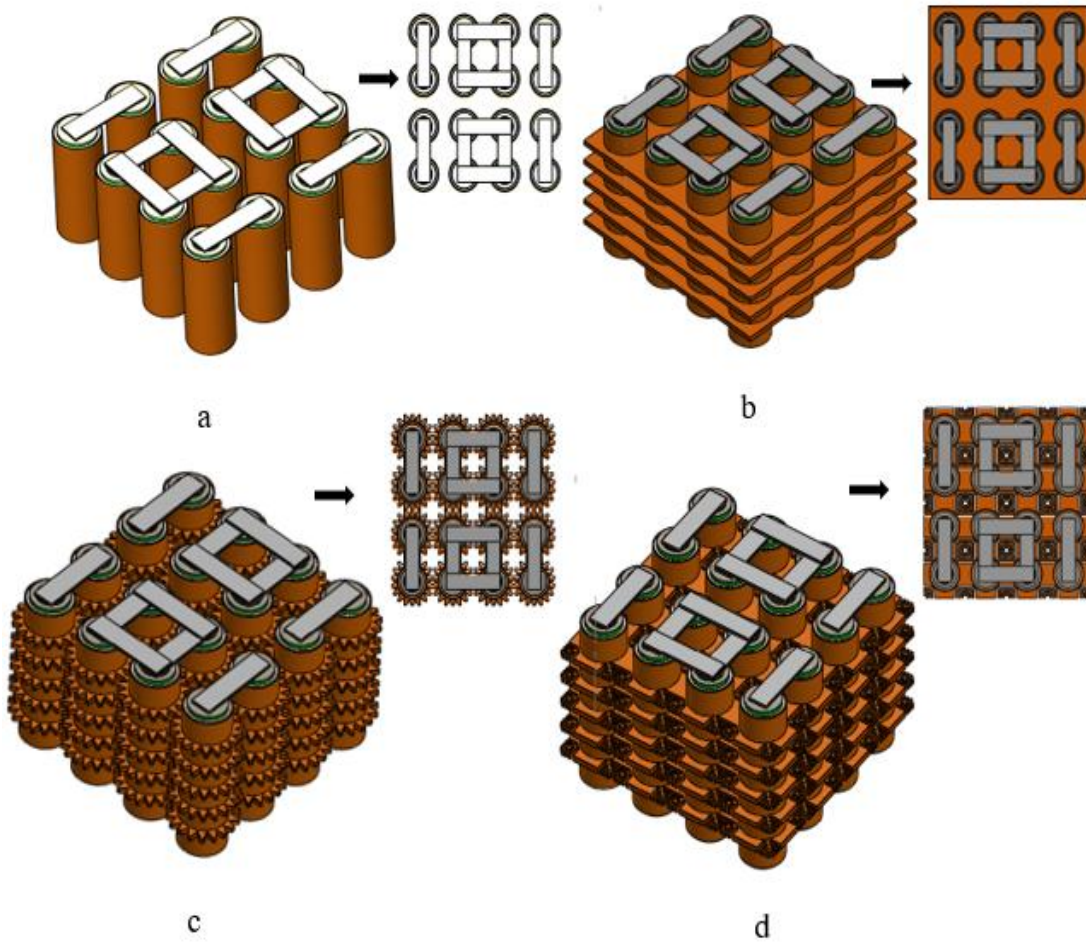
Şekil 3.5 Batarya modülü kanatçık yapısı; a) Düz Kanat, b) Üçgen Kanat ve c) Dallı Kanat

Çizimini yaptığımız kanatçıklar bakır plakadan lazer kesim makinesinde kestirilmiş olup bu işleme ait görüntü Şekil 3.6'da verilmiştir. Kanatçıklar 0.5 mm kalınlığındaki plakadan kestirilmiştir.



Şekil 3.6 Tasarlanan kanatçıkların lazer kesimi

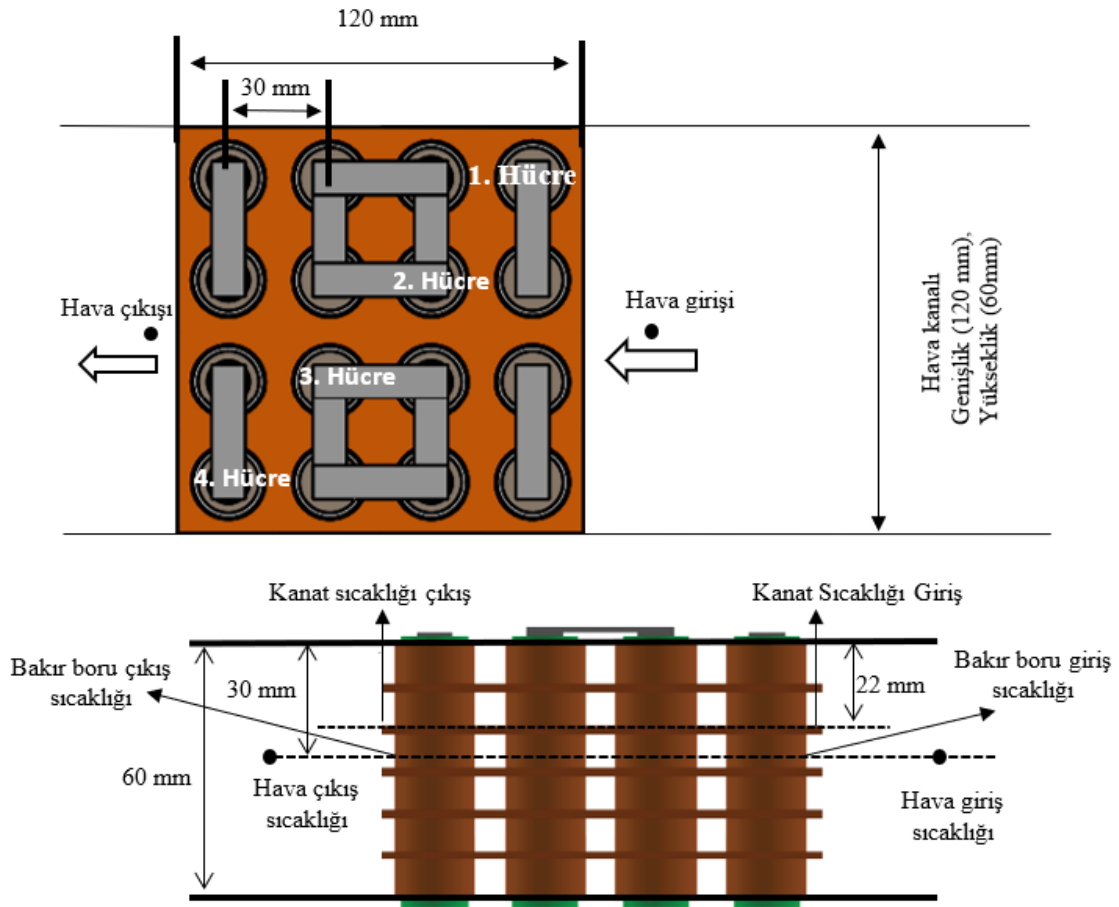
Bakır levhadan yapılmış kanatçıklar, bakır borunun en dış katmanına sıkıca oturtulmuştur. Kanatçıklar boruya sıkıca takılmış ve bazı noktalarında lehimle kaynatılmıştır. Her bir kanatçık modüle yerleştirilirken herhangi bir temas eksikliği olup olmadığı kontrol edilmiştir. Ayrıca K tipi termokupllar kanatçıkların ucuna ve kanat yüzeyine kaynak yapılarak kanat yüzey sıcaklığı ölçülmüştür. Test odasının üstten ve yandan görünüşleri de Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7 Batarya modülü görünüşleri a) kanatsız, b) düz kanat, c) üçgen kanat, d) dallı kanat

Şekil 3.7 a, b, c ve d’de batarya modüllerinin sırasıyla kanatsız, düz kanatçık, üçgen kanatçık ve dallı kanat modellerini göstermektedir. Kanatlı modellerde 5 adet bakır kanat plakası üst üste yerleştirilmiştir. Kanatçık plakalarının arasındaki mesafe yaklaşık

11 mm'dir. Kanatçıklar borulara sıkı sıkıya yerleştirilmiştir. Modülde bulunan pilleri birbirine bağlamak için nikel tel kullanılmıştır. Nikel teller belirli ölçülerde kesildikten sonra punta kaynak makinesi ile pil kutuplarına sabitlenmiştir. Modül 4 seri 2 paralel (4s2p) olmak üzere 2 özdeş modülden oluşmaktadır. Toplamda 16 adet lityum iyon pil kullanılmıştır. Şekil 3.8'de batarya modülü üzerinde bulunan sıcaklık sensörü yerleşim planı verilmiştir.



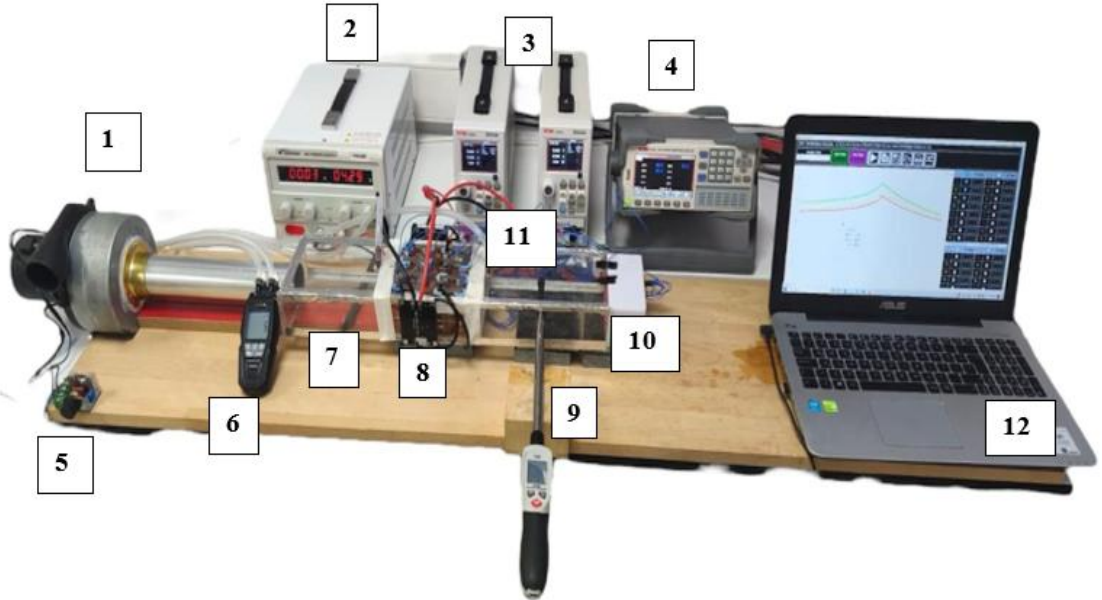
Şekil 3.8 Termokupl yerleşim planı

Sıcaklık, 1. Hücre, 2. Hücre, 3. Hücre ve 4. Hücre olmak üzere toplam 4 farklı hücrenin yüzey sıcaklığı, bu 4 hücrenin kenarında bulunan FDM sıcaklığı, 1. ve 4. Hücrelerin boru sıcaklığı, kanat giriş ve çıkış sıcaklığı, hava giriş ve çıkış sıcaklığı ve ortam sıcaklığı dahil olmak üzere 16 adet termokupldan ölçülmüştür. Ayrıca batarya modülünde voltaj ve akım güvenliğini sağlamak için BMS (Batarya Yönetim Sistemi)

kullanılmıştır. Her bir hücrenin gerilim değerini 2.5 ile 4.2 V arasında ve toplam akımın 40 A'ı geçmeyecek BMS seçilmiştir.

3.3 Deney Düzeneği

Şekil 3.9'da görüldüğü gibi hazırlanan batarya modülleri alt, üst ve yan kısımlarını kapatacak şekilde pleksiglas plakalar yerleştirilmiştir. Yine batarya modülünün girişine ve çıkışına pleksiglas malzemeden yapılmış hava kanalı yapılmış ve fan yardımıyla emilen havanın kanal içerisinden geçmesi sağlanmıştır. Kanatçiksız ve farklı kanatçıklı geometrilerle birlikte bulunan FDM etkilerinin ısı performansına etkisinin incelendiği deney düzeneği Şekil 3.9'da verilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan ekipmanlar şekil üzerinde numaralandırılmıştır. Deneyde kullanılan cihazlar fan (1), DC güç kaynağı (Twintex-TP30-50S) (2), elektronik yük (UNI-T, UTL 8211+) (3), sıcaklık kaydedici (UNI-T, UT3232) (4), frekans kontrol (5), fark basınçölçer (PCE-MPM 10) (6), pleksiglas hava kanalı (7), batarya modülü (8), anemometre (Cem DT-1880) (9), akış düzleştirici (10), K tipi termoeleman (11) ve bilgisayardan (12) oluşmaktadır.



Şekil 3.9 Deney düzeneği

Batarya modülü, dört seri ve iki paralel (4s2p) olmak üzere iki ayrı özdeş modülden oluşmaktadır. Batarya modülünün sağında (BMS taraflarında) 8 hücre ve solda 8 hücre bulunmaktadır.

8 hücre olmak üzere toplam 16 hücreden oluşur. İki eşit modülün yapılmasının nedeni, bataryaların daha yüksek deşarj akımlarında test edilebilmesi ve cihaz kapasitelerinin uygunluğundan dolayıdır.

Deneye başlamadan önce pil tam şarj olacak şekilde DC güç kaynağı ile şarj edilmiştir. Şarj işlemi, 4 seri bağlantıdan dolayı 16.8 V gerilim ve 3 A olacak şekilde ayarlanmış ve şarj işlemi başlatılmıştır. Batarya modülünün toplam gerilimi 16.8 V olana kadar 3 A akım çeker ve daha sonra 16.8 V değerine ulaştığında gerilim sabit kalır ve akım değeri düşmeye başlar. Şarj işlemi modülün 0.14 A akım çekene kadar devam eder ve bu şarj akımına ulaştığında şarj işlemi sona erer. Şarj işlemi sırasında düşük akım çekse de elektrokimyasal tepkimelerden kaynaklı modül içerisindeki hücrelerin sıcaklığı ortam sıcaklığının üzerine çıkmaktadır. Batarya modülündeki hücrelerin sıcaklığı ortam sıcaklığına düşene kadar bekletilmiştir. Hem pil sıcaklığı hem de FDM sıcaklığı termokupllar ile ölçülür ve ortam sıcaklığına düştüğünde deşarj işlemine geçilir. Deşarj işleminde iki özdeş batarya modülü kullanıldığı için iki adet elektronik yük kullanılmıştır. Burada her iki elektronik yük cihazının deneye başlama süresi aynıdır. Deşarj işlemi elektronik yük cihazının batarya modülünde bulunan sabit akım ara yüzünde yapılmıştır. Bu ara yüzde deşarj bitiş voltajı 10 V ve deşarj oranları 1C'den 5C'e kadar sırasıyla 5.6, 11.2, 16.8, 22.4 ve 28 A değerinde olmak üzere 5 farklı deşarj oranında deşarj işlemi yapılmıştır. Modül iki paralel bağlantıdan oluştuğu için 1C deşarj oranında akım batarya kapasitesi olan 2.8 Ah'in iki katı olan 5.6 A olarak belirlenmiştir. Deşarj işlemi sabit akımda kesme voltajına (10 V) ulaşana kadar yapılmıştır. Batarya modülü tekrar oda sıcaklığına düşene kadar beklenir ve sonra tekrar şarj işlemi başlatılır. Bu döngü bu şekilde devam etmektedir.

Hem şarj hem de deşarj işlemi esnasında, batarya modülündeki gerilim, akım, sıcaklık değerleri sıcaklık kaydedici aracılığıyla eş zamanlı olarak bilgisayara aktarılmış ve kaydedilmiştir.

3.4 Belirsizlik Analizi

Bu tez çalışmasında akım, voltaj ve sıcaklık değerleri cihazlardan ölçülmüştür. Deneysel verilerin belirsizlik analizlerinin yapılabilmesi için cihaz belirsizliklerinin bilinmesi gereklidir. Bu kapsamda, termokupl telinin belirsizliği 1.1 °C'dir. DC güç kaynağının $\pm(1\% \text{ tam ölçek} + 1 \text{ basamak})$. Elektronik yükün belirsizlikleri ise akım ve

gerilim için aynı olup $\pm (0.1\%+0.1\%$ tam ölçek)'dir. Uzunluk ölçümlerinde kullanılan kumpasın belirsizliği 1 mm'dir. PCE marka fark basınçölçerin belirsizliği ise ölçümün $\pm 0.3\%$ 'üdür. Cem marka, Dt 1880 model sıcak tel (Hotwire) anemometresinin belirsizliği, hızın 0.1 - 20 m/s olduğu durumlarda sabit $\pm(0,03 \text{ m/s} + \text{ölçülen değerin } \%5'i)$ 'dir.

$$\frac{\delta_{Re}}{Re} = \pm \sqrt{\left(\frac{\delta_u}{u}\right)^2 + \left(\frac{\delta d_h}{d_h}\right)^2} \quad (3.2)$$

Hesaplanan ve birkaç ölçümden kaynaklanan belirsizliği Eşitlik (3.2)'e göre hesaplamak mümkündür (Moffat, 1988). Termokupl belirsizliği sıcaklığa bağlı olarak $\%1.4 - \%5.8$ arasında değişmektedir. Gerilimdeki belirsizlik DC güç kaynağı için $\%1$ ve elektronik yük için $\%1.2$ 'dir. Akım değerlerinin belirsizliği ise DC güç kaynağı için $\%0.25$ ve elektronik yük için $\%1$ 'dir.

3.5 Batarya Isı Üretimi ve Matematik Model

Lityum iyon pillerin farklı iç kimyasal yapısı ve farklı çalışma koşulları nedeniyle, elektrokimyasal tepkimeler sonucunda ısı üretilir (Teker ve Gökaslan, 2025). Üretilen bu ısı pilden uzaklaştırılmazsa pilin iç yapısını etkiler ve kapasitesini, ömrünü ve güvenliğini doğrudan etkiler. Bu yüzden, batarya ısı yönetim sistemi tasarımı oldukça önemlidir (Teker ve Gökaslan, 2025). Her pilin iç yapısına bağlı olarak üretici firma tarafından tavsiye edilen çalışma sıcaklık aralığı söz konusudur. Açığa çıkan bu ısı bataryadan uzaklaştırılması gerekmekte olup farklı batarya ısı yönetim sistemleri mevcuttur. Bu çalışmada hibrit soğutma sistemi üzerinde deneysel çalışma yapılmıştır.

Bernardi vd (1985) lityum iyon pilde ısı üretimini akım, gerilim, sıcaklık ve entropi katsayısına bağlı olarak Eşitlik (3.3)'de sunulduğu gibi hesaplanabileceğini ifade etmişlerdir (Bernardi vd., 1985).

$$\dot{q} = \frac{I}{V} \left[(U_{OCV} - U) + T \frac{dU_{OCV}}{dT} \right] \quad (3.3)$$

Eşitlikte sunulan I , V , T , U_{OCV} , U ve dU_{OCV}/dT terimleri sırasıyla akım, batarya hacmi, sıcaklık, açık devre voltajını, terminal voltajı ve entropi katsayısını ifade etmektedir. Şarj ve deşarj işlemlerinde bataryada üretilen ısı, şarj/deşarj akımı etki

etmektedir. Bir pil enerji korunum denklemi Eşitlik (3.4)'te gösterildiği ifade etmek mümkündür.

$$\rho_b c_{p_b} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_b \nabla T_b) + \dot{q} \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte sunulan denklemde ise ρ_b , c_{p_b} , k_b sırasıyla pilin yoğunluğunu, özgül ısısını ve ısı iletkenliğini ifade etmektedir. Pil hücresinin etrafında ince bir halka şeklinde FDM tabakası bulunur ve pilde üretilen ısı ilk olarak bu katmana geçmektedir. FDM'deki enerji korunumu denklemini Eşitsizlik (3.5) gösterildiği gibi yazmak mümkündür. (Tekere ve Gökaslan, 2025),

$$\rho_{FDM} \frac{\partial H_{FDM}}{\partial t} = \nabla(k_{FDM} \nabla T_{FDM}) \quad (3.5)$$

Bu eşitlikte ise ρ_{FDM} ve k_{FDM} gösterilen ifadeler sırasıyla FDM'nin yoğunluğunu ve ısı iletkenliğini temsil etmektedir.

$$H = h_s + \Delta h = h_{ref} \int_{T_{ref}}^T c_p dT + \lambda L \quad (3.6)$$

H, FDM'nin özgül entalpisidir. Özgül entalpi, duyulur h_s ve gizli Δh ısıyı Eşitlik (3.6)'te gösterildiği hesaplanabilir. L, λ , h_{ref} , T_{ref} , ve c_p ifadeleri sırasıyla FDM'nin gizli ısısını, erime oranını, referans entalpisini, referans sıcaklığını ve özgül ısıyı temsil etmektedir. Erime oranı FDM'nin ısı depolamasında önemlidir ve bu değeri belirlemek için FDM'nin erime ve katılaşma sıcaklıklarının bilinmesi gerekir. FDM sıcaklığının, erime ve katılaşma sıcaklıklarının erime oranı belirlenmesinde Eşitlik (3.7) dikkate alınır.

$$\lambda = \begin{cases} 0 & T_{FDM} < T_k \\ \frac{T_{FDM} - T_k}{T_e - T_k} & T_e < T_{FDM} < T_k \\ 1 & T_{FDM} > T_e \end{cases} \quad (3.7)$$

Burada T_k ve T_e sırasıyla FDM'nin katılaşma ve erime sıcaklığıdır. Bu deneysel çalışma için, batarya modülünün duvardaki sınır ve başlangıç koşulları aşağıda sunulan Eşitliklerde (3.8)- (3.11) arasındaki gibidir.

$$-k_b \frac{\partial T_b}{\partial \eta} = -k_{FDM} \frac{\partial T_{FDM}}{\partial \eta} \quad (3.8)$$

Bu çalışmada, pil ve halka şeklindeki FDM katmanını temas halindedir ve pilde üretilen ısı FDM'ye aktarılır. Bu sınır koşulu, Eşitlik (3.8)'de verilmiştir. FDM katmanından sonra ısı, Eşitlik (3.9)'de gösterildiği gibi bakır boru katmanına aktarılır.

$$-k_{FDM} \frac{\partial T_{FDM}}{\partial \eta} = -k_{bakır, boru} \frac{\partial T_{bakır, boru}}{\partial \eta} \quad (3.9)$$

Bakır borunun ısı iletkenliği ($k_{bakır, boru}$) yüksektir. Isıyı kanatçıklara veya ortama daha iyi aktarır. Kanatçıksız olan borudan ortama (hava kanalına) atılan ısıyı Eşitlik (3.10)'da gösterildiği gibi hesaplamak mümkündür.

$$-k_{bakır, boru} \frac{\partial T_{bakır, boru}}{\partial \eta} = h(T_{bakır, boru} - T_{ort}) \quad (3.10)$$

Isı, bakır borudan ortama doğal ve zorlanmış taşınım yoluyla aktarılır. Deneylerde, en dış katmanın yalnızca bakır borudan yapılmış olması (kanatçıksız) ve 3 farklı kanatçık tipinin bulunmasıyla birlikte toplam 4 farklı durum söz konusudur. 3 farklı kanatçık tipinde yüzey alanları daha fazla olup, kanatçıksız modüle göre alan farklıdır. Deney başlangıcında pil, FDM, bakır boru ve ortam sıcaklığı hemen hemen aynı olup Eşitlik (3.11)'da verilmiştir.

$$T_b = T_{FDM} = T_{bakır, boru} = T_{ort} \quad (3.11)$$

Deneyler her bir kombinasyonda olmak üzere farklı farklı günlerde yapılmış olup yaklaşık 3 ay sürmüştür. Dolayısıyla ortam sıcaklığı sabit tutmak oldukça zor olup tüm deneylerde yakındır ve 18 – 21 °C arasında değişmektedir.

4. DENEY SONUÇLARI

Lityum iyon bataryalar farklı iç kimyasal yapıları ve farklı çalışma koşulları nedeniyle ısı üretirler. Üretilen bu ısı pilden uzaklaştırılmalıdır. Aksi takdirde pilin sıcaklığını arttırabilir ve kimyasal yapısını bozabilir. Bu nedenle, bataryalarda soğutma sistemi ve tasarımı oldukça önemlidir. Bu ısıl yönetimi tasarımında, bataryanın çalışma koşullarına ve ardından batarya ulaşabileceği en kötü çalışma koşullarına dikkat edilmelidir. Hibrit soğutma, bu durumla karşılaşılabilecek en iyi soğutma türü olabilir. Bu tez çalışmasında, batarya soğutma sistemi, batarya modülünün çalışma koşullarına bağlı olarak hem pasif hem de hibrit soğutma kullanılarak tasarlanmıştır. Bu, deşarj oranına veya batarya sıcaklığına bağlı olarak her iki soğutma sisteminin de kullanılmasına olanak tanır. Bu tasarımda, doğal ve zorlanmış taşınımın etkileri, bataryanın ısıl performansı, düşük deşarj oranlarından yüksek deşarj oranlarına kadar geniş bir aralıkta belirlenir. Ayrıca, batarya modülünde kanatsız ve üç farklı kanatçık tipinin batarya ısıl performansına etkisi araştırılmıştır. Aktif soğutmada gerekli olan fan gücünü belirlemede önemli bir parametre olan basınç düşüşü de her bir kanatçık yapısı boyunca ölçülmüştür.

Bu yüksek lisans tezi kapsamında lityum iyon pillerden oluşmuş batarya modülünde farklı deşarj akımlarda modülün ısıl performansları deneysel olarak araştırılmıştır. İlk olarak lityum iyon batarya modülleri ilk katmanında faz değiştiren malzeme ikinci katmanında bakır boru ve üçüncü katman kanatçıkların birleştirilmesiyle deney odaları oluşturulmuştur. Farklı deşarj akımlarında farklı yüzey sıcaklıklarında olan piller birinci katmanında bulunan faz değiştiren malzeme sayesinde pilin ısını depolayarak pilin sabit sıcaklıkta çalışmasını sağlayacaktır. Böylece pilin belli sıcaklıklarda çalışarak en iyi performansı sağlaması hedeflenmiştir. Yapılan literatür çalışmasında pilin farklı çalışma sıcaklıklarında farklı pil ömrü ve şarj/deşarj süresini değiştiği ifade edilmektedir. Pilin etrafında bulunan faz değiştiren malzeme sayesinde ve ek olarak bu faz değiştiren malzemenin dış katmanında bulunan bakır boru ve kanatçıklar sayesinde pilin sıcaklığının pil üzerinde homojen olarak dağılması beklenmektedir.

Deneyler, batarya modüllerinde hava akışının olduğu ve olmadığı iki farklı ortam şartlarında yapılmış olup hem doğal taşınım hem de zorlanmış taşınımın etkisi incelenmiştir. İlk olarak kanatçıklarının olmadığı durumlarda hem hava akışının olduğu hem de olmadığı durumlarda batarya modülünün ısıl performansı belirlenmiştir. Daha sonra ise düz, üçgen ve dallı kanatçık geometrilerinde farklı deşarj oranlarında batarya

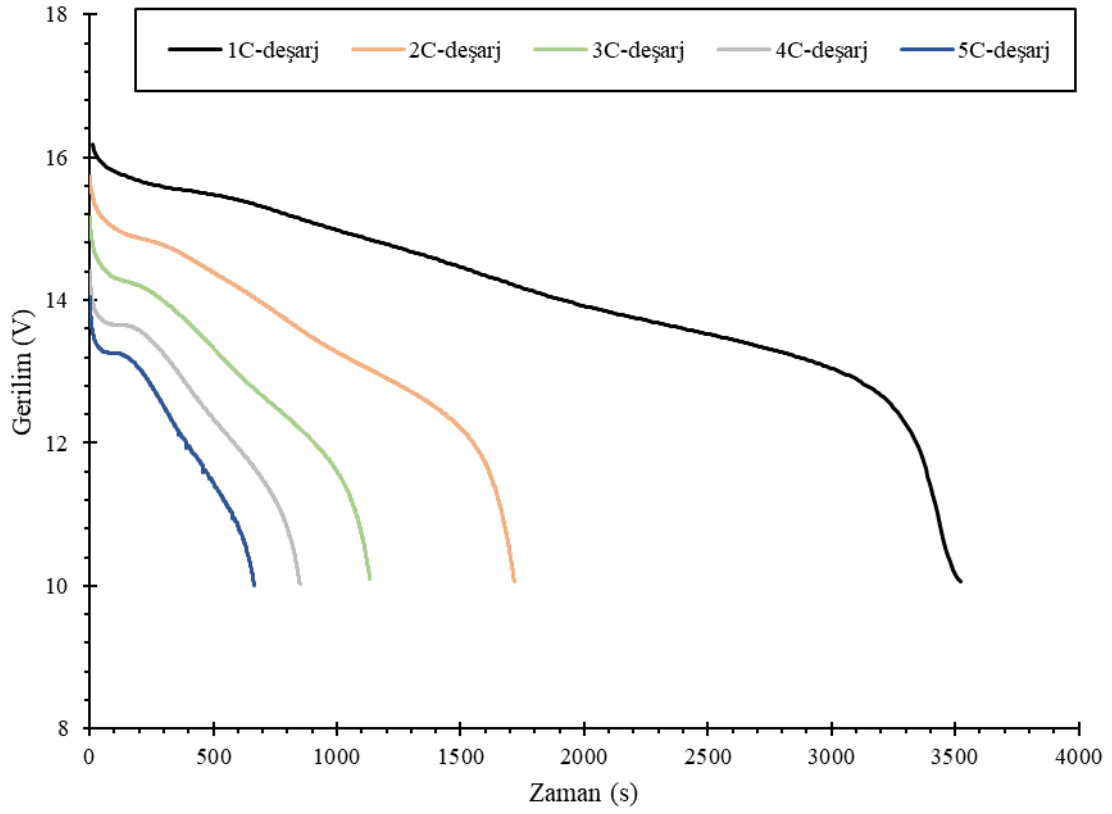
modülünün ısı performansları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre hem doğal taşınımında hem de zorlanmış taşınımında üç farklı kanatçık tipinin kanatçıksız modüle göre kıyaslamaları yapılmış ve ısı iyileşmeler ve basınç düşüşleri yorumlanmıştır.

Batarya modülünde kanatçıksız ve farklı tip kanatçıklı yapıların olma durumunda farklı deşarj oranlarında batarya modülünün ısı performansı deneysel olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda yapılan bütün batarya modülü deneylerin deney bilgileri aşağıdaki Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Farklı batarya modüllerinin deney kodları

Deney kodu	Açıklaması
WF-nC- Re	4s2p batarya modülünün kanatçıksız (Without fin), n deşarj oranında ve Reynolds sayısının değerinin ifadesi
FF-nC- Re	4s2p batarya modülünün düz kanatçıklı (Flate fin), n deşarj oranında ve Reynolds sayısının değerinin ifadesi
TF-nC- Re	4s2p batarya modülünün üçgen kanatçıklı (Triangular fin), n deşarj oranında ve Reynolds sayısının değerinin ifadesi
BF-nC- Re	4s2p batarya modülünün dallı kanatçıklı (Branched fin), n deşarj oranında ve Reynolds sayısının değerinin ifadesi

Şekil 4.1’de farklı deşarj oranlarında batarya modülünün gerilim düşüşünün zamana bağlı değişimi verilmiştir. Deney test odasında özdeş iki batarya modülü dört seri ve iki paralel (4s2p) olmak üzere iki adet kullanılmıştır. Batarya modülünde gerilim değerleri dört seri bağlantıdan dolayı her bir hücre 4.2 V gerilim değeri düşünüldüğünde modülün toplam gerilimi 16.8 V’dur. Deneyler sabit akımda (deşarj oranında) yapılmış olup deney boyunca bu akım değerleri sabittir. Batarya modülleri deneylere başlamadan önce tam kapasitesi dolu olmak üzere şarj edilmiştir.



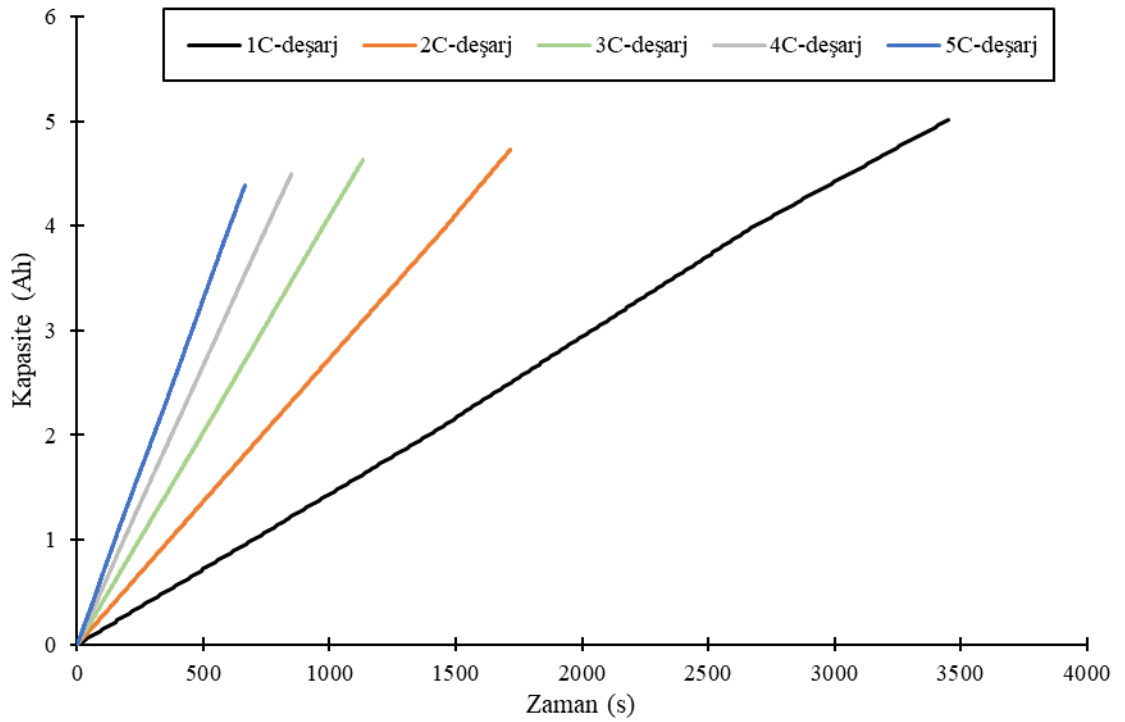
Şekil 4.1 Batarya modülünün farklı deşarj oranlarında zamana bağlı gerilim düşüşü

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere düşük deşarj oranlarında deneyin ilk aşamasında gerilim düşüşü daha azdır. Fakat deşarj oranı arttıkça deneyin ilk başlama gerilimi ani olarak 4C ve 5C deşarj oranının sırasıyla 14.4 V ve 14 V’a ani olarak düşmüştür. Bunun sebebi ise batarya modülü yüksek deşarj oranlarında istenilen akımı sağlayabilmek için gerilim değerlerini daha düşük voltaja ayarlamaktadır. Batarya modülünde deşarj akım oranı arttıkça ani voltaj düşüşü daha hızlı olmaktadır. Bunun sebebi iç direncinden kaynaklanmaktadır. İç direncinden kaynaklı olarak istenilen akımı sağlayabilmek için voltaj hızla düşmektedir. Fakat modülün nominal gerilim değerlerinde voltaj düşüşü azalır. 1C deşarj oranında daha yatay bir seyirde ilerlerken yüksek deşarjda nominal voltaj çok kısa kalmakta ve daha sonra hızla düşmektedir. Yüksek deşarj oranında nominal voltajda düşüşün bir sebebi de sıcaklığın etkisidir. Yüksek deşarj oranlarında batarya modülleri daha yüksek sıcaklıkta olduğu için gerilim düşüşünü olumsuz etkilemektedir. Son kısımlarda genellikle batarya doluluk oranının %20 olduğu kısımlardan sonra gerilim yine hızla düşer. Bu kısımda elektrokimyasal sınırlardan kaynaklanabilir. Batarya

modülünde kesme voltajı olan 2.5 V, dört seri bağlantıdan kaynaklı 10 V değerinde BMS tarafından deşarj işlemi sonlandırılır.

Farklı kanatçık modellerinde veya kanatçiksız modüllerde deney boyunca gerilim düşüşleri hemen hemen aynıdır. 1C, 2C, 3C, 4C ve 5C deşarj akımlarında deneyler yapıldığında ortalama deney süreleri sırasıyla 3540 s, 1720 s, 1140 s, 860 s ve 670 s'dir.

Şekil 4.2'de ise yine farklı deşarj oranlarında batarya modülünün kullanılan kapasitesinin zamanla değişimi verilmiştir. Batarya modülü iki özdeş modülden oluştuğu için bir batarya modülü iki paralel bağlantıdan oluşmaktadır. Dolayısıyla bir modülün kapasitesi 5.6 Ah'dir. Şekil 4.2'de görüldüğü üzere düşük deşarj oranlarında ise kapasite kullanımı bu değere çok yakındır. Fakat deşarj oranı arttıkça modülün kapasite kullanımı azalmaktadır.



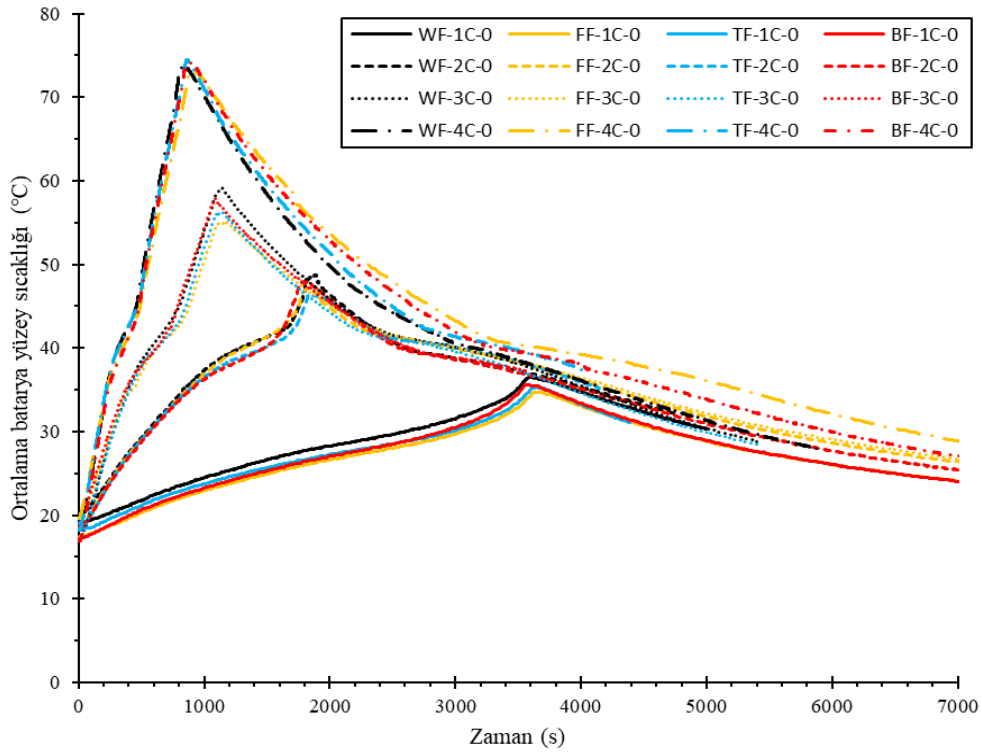
Şekil 4.2 Batarya modülünün farklı deşarj oranlarında zamana bağlı kapasite kullanımı

Düşük deşarj oranlarında 1C ve 2C deşarj oranında kapasite kullanımı sırasıyla 5.2 Ah ve 4.9 Ah'dir. Deşarj oranı arttıkça ise kapasite kullanımı azalmakta olup 5C deşarj oranı için bu değer 4.4 Ah'dir. Şekil 4.1'de görüldüğü üzere yüksek deşarj oranlarında gerilim düşüşü fazla olduğundan batarya modülünün kapasitesinin hepsi

kullanılamamıştır. Kapasite kullanımını arttırmak için düşük deşarj oranlarında modülün çalıştırılması daha uygun olabilir.

4.1 Doğal Taşınım ile Soğutma Performansı

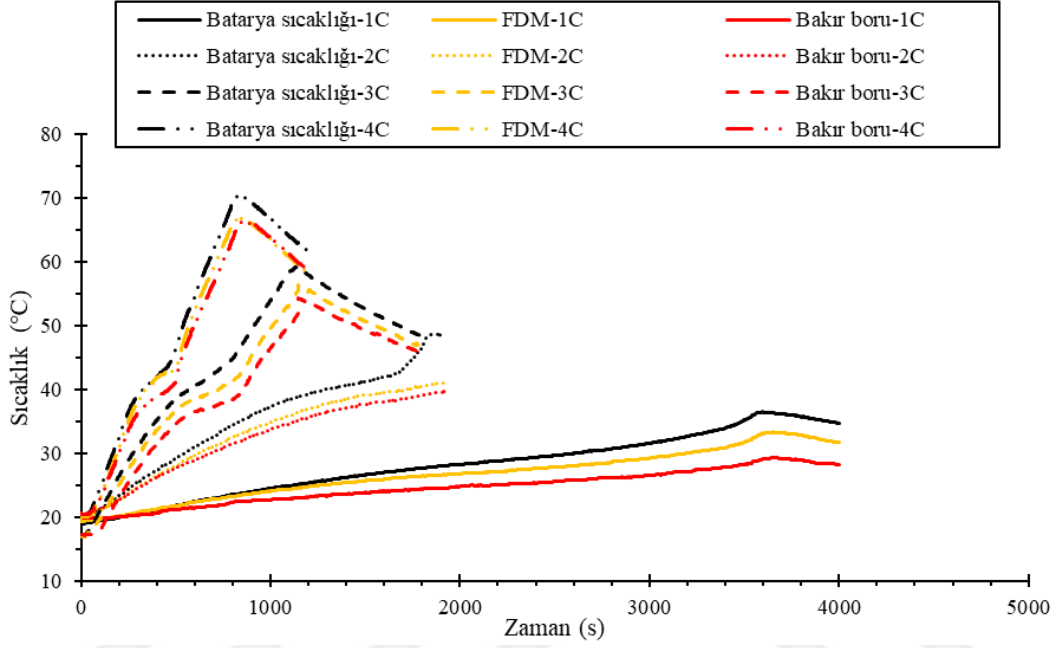
Deneylerde her bir kanatçiksız ve kanatçık tipinde hava kanalının içerisinde hava akışının olmadığı durumlarda batarya ısı yönetimi ele alınmıştır. Pillerin etrafındaki ince halkasal yapıdaki FDM tabakasının hava akışı olmadığı durumlarda ısı performans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hava kanalındaki batarya modülü, doğal taşınım ile ısı geçişi durumunda daha düşük ısı taşınım katsayısına sahiptir. Dolayısıyla modül içerisindeki pillerden ortama daha düşük hızda ısı geçişi söz konusudur. Bu hava akışı olmayan koşullarda yapılan deneyin amacı, kanatçıklı ve kanatçiksız yüzeylerdeki en kötü ısı performansını belirlemek ve modülün hava akışı olan diğer zorlanmış taşınım koşullarındaki termal performansını karşılaştırmaktır. Şekil 4.3'te kanal içerisinde hava akışının olmadığı doğal taşınım ve farklı deşarj oranlarında batarya yüzey sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi verilmiştir.



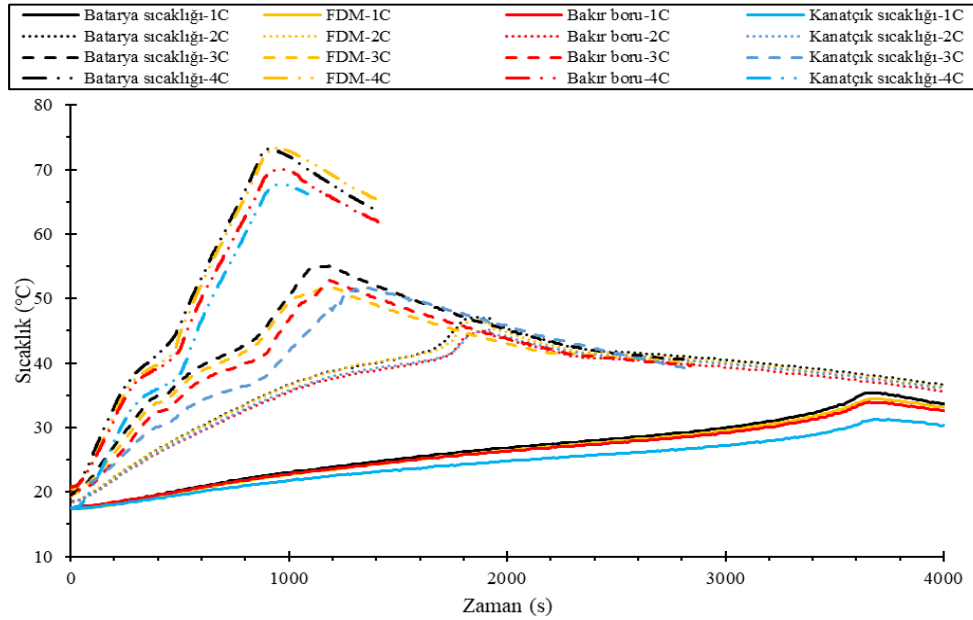
Şekil 4.3 Pasif soğutmada batarya yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi

Şekil 4.3'te kanatçıksız (WF), düz kanatçık (FF), üçgen kanatçık (TF) ve dallı kanatçıkta (BF) bulunan batarya modüllerinde bulunan pillerin ortalama yüzey sıcaklığı ve zamana göre değişimi verilmiştir. Deneyler 1C deşarj oranından 4C deşarj oranına kadar modülün şarj durumunun (SoC) tam doludan, tam boşalımına kadar test edilmiştir. Doğal taşınımında 5C deşarj oranında batarya modülünün sıcaklığının 80 °C'i (en yüksek pil kesme sıcaklığı) geçeceğinden ve tehlikeli bölgede olacağından test edilememiştir. 1C deşarj oranında ve deşarj işleminin sonunda, batarya ortalama yüzey sıcaklıkları kanatçıksız, düz kanatçık, üçgen kanatçık ve dallı kanatçıklarda sırasıyla 36.4 °C, 34.7 °C, 35.4 °C ve 35.5 °C olarak ölçülmüştür. En iyi ısı performans düz kanatçık tipinde sergilenirken en kötü ısı performans ise kanatçıksız modülde göstermiştir. Her ne kadar düşük sıcaklıkta deşarj sonunda modül ortalama pil sıcaklığı yakın değerlerde olsa da kanatçıklı tiplerde deşarj işleminden sonra batarya modülünün ortalama sıcaklığı ortam sıcaklığına daha hızlı düşmektedir. Doğal taşınımında, ısı taşınım katsayısı zorlanmış taşınımından daha düşüktür. Dolayısıyla pilde üretilen ısı daha geç ortama aktarılır. Eğer sadece doğal taşınım ile soğutma yapılacak ise FDM kalınlığını daha da arttırarak üretilen ısıyı gizli ısı olarak depolamak pilde ısıyı daha etkin olarak soğutmaya yarayacaktır. Doğal taşınımında en yüksek deşarj oranı olan 4C'de batarya ortalama yüzey sıcaklıklarına bakıldığında kanatçıklı ve kanatçıksız tipteki modüllerde pil ortalama sıcaklıkları oldukça yakın olup 73 °C ile 74.5 °C arasında değişmektedir. Yüksek sıcaklıklarda FDM kalınlığı yetersiz kalmakta ve pil sıcaklıkları yükselmektedir. Hem modülün iç sıcaklığı hem de yüzey sıcaklıklarının artmasıyla doğal taşınımındaki ısı taşınım katsayısını etkilemektedir. Yüksek deşarj oranlarında, doğal taşınımında kanatçık tipinin etkisinin olmadığı görülmektedir. Batarya modülünün ortalama pil yüzey sıcaklıklarının 1C deşarj oranında 35 °C'yi, 2C deşarj oranında ise 50 °C'yi ve 3C deşarj oranı için 60 °C'yi geçmediği görülmektedir. Dolayısıyla pasif soğutma bu deşarj oranları için yeterli olduğu görülmektedir. Ancak 4C deşarj oranlarında ortalama batarya modülün ortalama pil yüzey sıcaklıkları önerilen emniyet sıcaklığına (60 °C) göre daha yüksek olduğu ölçülmüştür. Mevcut uygulanan FDM katmanı modülü 3C için sınırdadır, 4C için ilave soğutma ya da daha kalın FDM katmanı gerekmektedir. Yüksek deşarj oranlarında doğal taşınımında kanatçıklı ve kanatçıksız tasarlanan batarya modüllerinin ortalama yüzey sıcaklıkları hemen hemen aynıdır. Pil ortalama yüzey sıcaklıklarında önemli bir kanatçık etkisi gözlenmemektedir. Fakat daha düşük deşarj oranlarında ise kanatçık etkisi

görülmekte olup, kanatçiksız tipteki batarya modülüne göre daha düşük sıcaklıktadır. Şekil 4.4'te farklı kanatçık tiplerinde ve kanatçiksız modüllerin farklı deşarj oranlarında batarya modüllerinde hücre katman sıcaklıklarındaki değişimler gösterilmektedir. Sırasıyla ortalama pil yüzey sıcaklığı, FDM, bakır boru ve ortalama kanatçık sıcaklıkları verilmiştir.

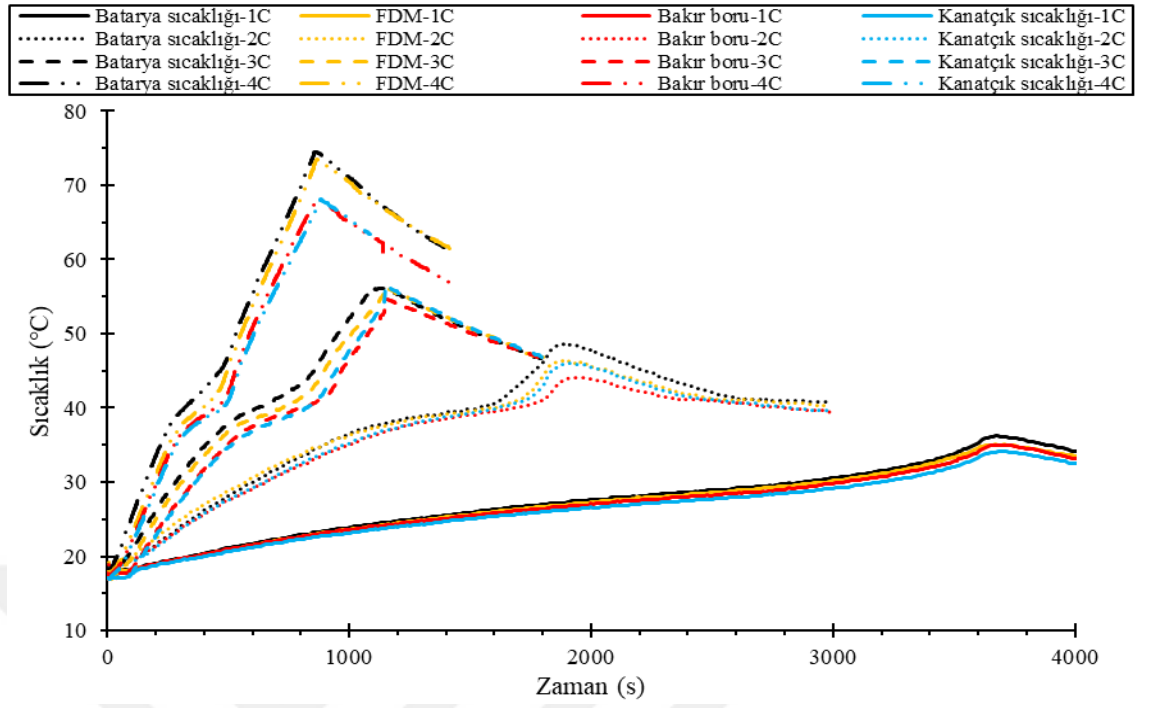


a)

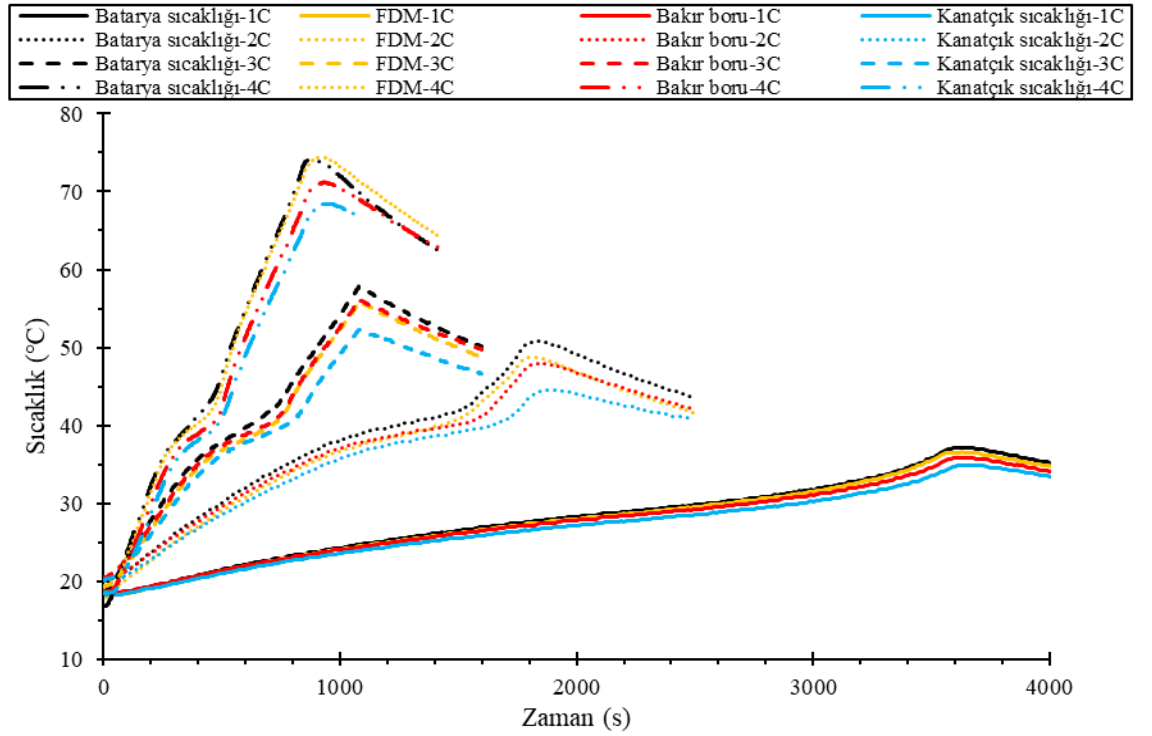


b)

Şekil 4.4 3 hücrenin farklı katmanlarında sıcaklık ve deşarj süresi; a) kanatçiksız (WF), b) düz kanatçıklı (FF),



c)



d)

Şekil 4.4 3. hücrenin farklı katmanlarında sıcaklık ve deşarj süresi; c) üçgen kanatçıklı (TF) ve d) Dallı kanatçıklı (BF) (devam)

Şekil 4.4 a’da kanatçıksız pil modülünde ısı performansını göstermektedir. Her bir katmanda sıcaklık farkı görülmektedir. Sıcaklıklar en yüksek pil, FDM ve bakır boru olmak üzere sıralanmaktadır. 1C ve 2C deşarj oranında FDM katı fazda olup erimemiştir. Fakat 3C ve 4C’de ise modülde üretilen ısı sayesinde pil, FDM ve bakır boru sıcaklıkları FDM’nin erime sıcaklığının üstüne çıkmış ve FDM sıvı faza geçmiştir. Şekil 4.4 b, c ve d’de ise modüle kanatçık eklenmesiyle elde edilen ısı performansları gösterilmiştir. Modüle kanatçıkların eklenmesiyle katmanlar arasında sıcaklık farkı biraz daha düşmüştür. Bütün kanatçık tiplerinde hemen hemen aynı ısı performans özelliği göstermektedir. Kanatçık eklenmesiyle ısı geçiş yüzey alanı artırılmış olup daha etkin bir soğutma performansı sergilemesi hedeflenmiştir. 4C deşarj oranında kanatçık modüllerin pil sıcaklığına çok fazla etkisi söz konusu değildir. Fakat deşarj oranı düştükçe kanat geometrilerinin etkisi ortaya çıkmakta ve pil sıcaklıkları daha düşük seviyelerdedir. En iyi pil performansı düz kanatçıklı batarya modülünde görülmekte olup, diğer katman sıcaklıkları da daha düşüktür. Üçgen kanatçıklı ve dallı kanatçıklı batarya modülünün ısı performansı ise neredeyse aynıdır.

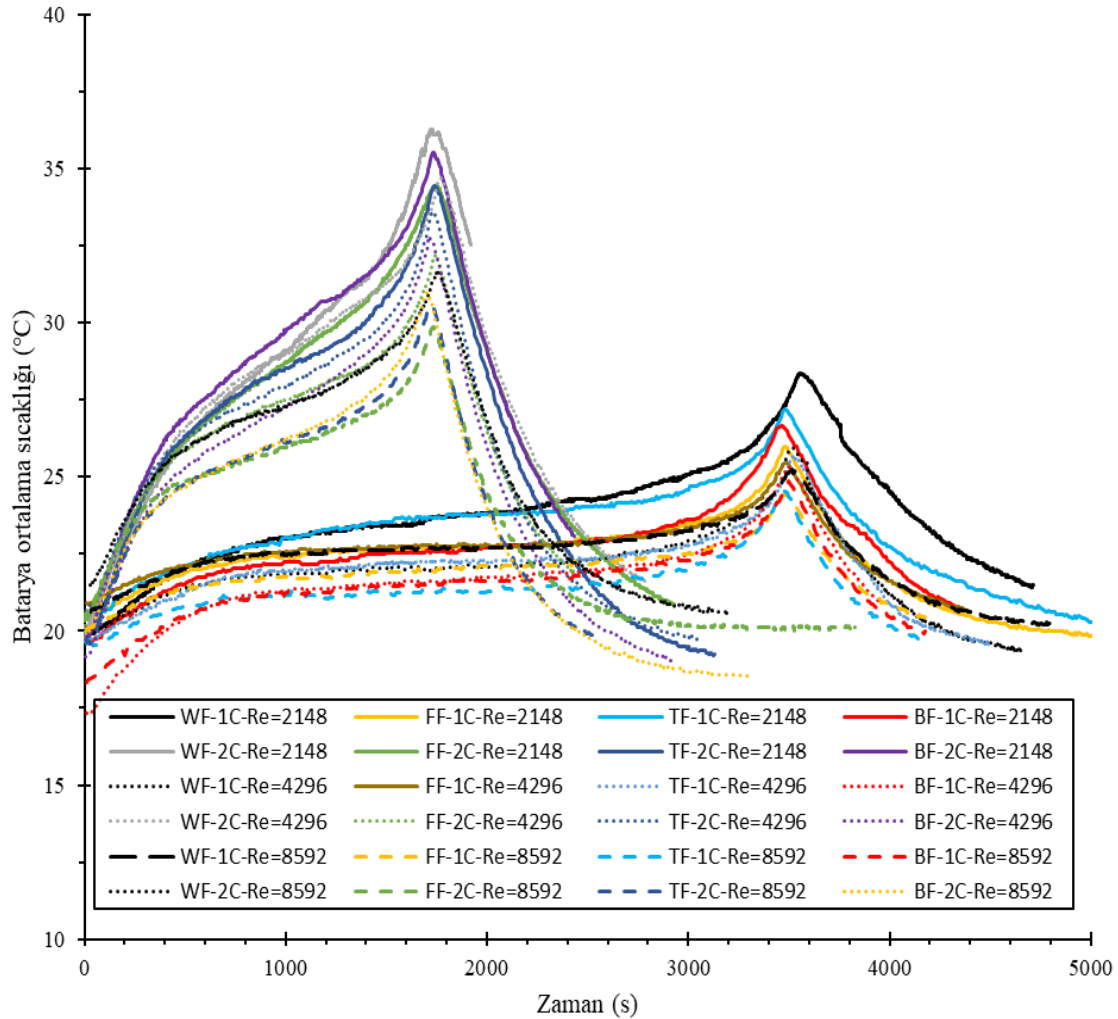
4.2 Zorlanmış Taşınım ile Soğutma Performansı

Batarya modülünde, zorlanmış taşınımın etkisini belirlemek için modül bir hava kanalının içerisine yerleştirilmiştir. Akışkan olarak hava kullanılmıştır. Hava ortam sıcaklığında yaklaşık 17 °C ile 21 °C arasında olup ortamdan fan yardımıyla emiş yaptırılmış ve batarya modülünün içerisinden geçirilmiştir. Modülün hemen girişi ve çıkışından basınç düşüşü de ölçülmüştür. Kanal içerinden hemen kanalın girişinden sıcak tel (hot wire) anemometre sayesinde ortalama hava hızları ölçülmüştür. Hava hızları 0.5 m/s, 1 m/s ve 2 m/s ortalama hızlarda deneyler yapılmıştır. Eşitlik 4.1’de verilen ifade de kanal içerisindeki Reynolds sayısını hesaplamak mümkündür.

$$Re = \frac{\rho u_m d_h}{\mu} \quad (4.1)$$

Burada; ρ , havanın yoğunluğunu, μ havanın viskozitesini, u_m hava ortalama hızı ve d_h ise kanal hidrolik çapını temsil etmektedir. Reynolds sayıları sırasıyla 2148, 4296 ve 8592 aralığında deneyler yapılmıştır. Bu değerler laminar ($Re=2148$), geçiş ($Re=4296$) ve

türbülans ($Re=8592$) akış bölgelerinde incelenmiştir. Şekil 4.5'te düşük deşarj oranlarında (1C ve 2C) modüldeki bulunan pillerin ortalama yüzey sıcaklıklarının zamana göre değişimi verilmiştir.



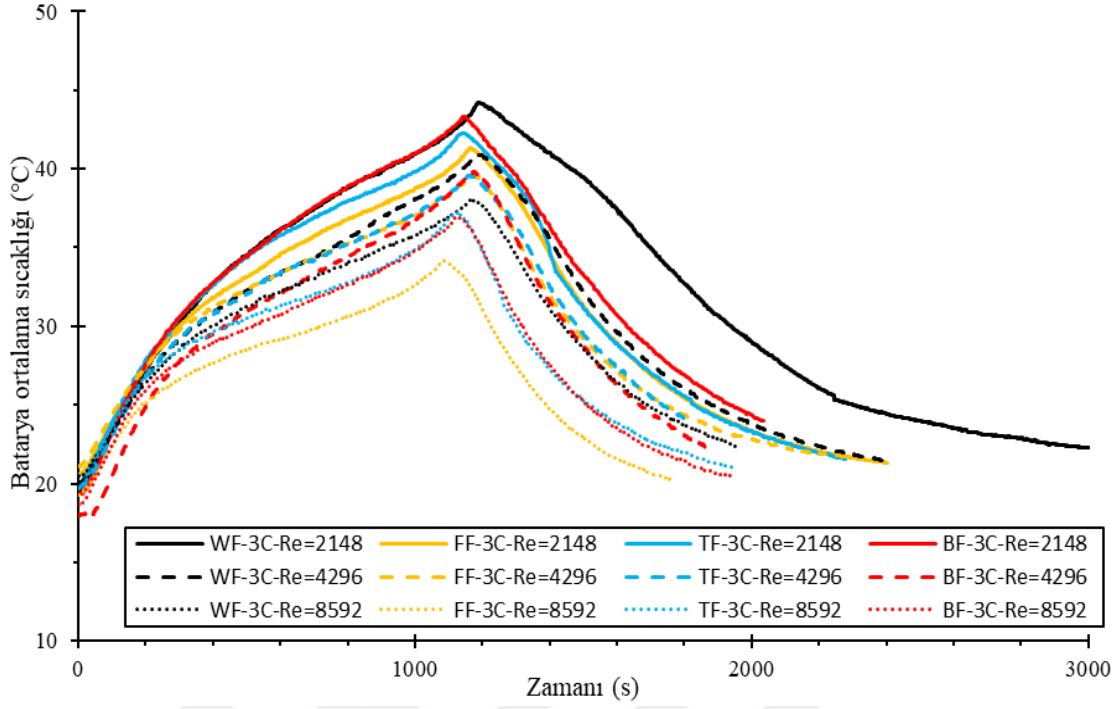
Şekil 4.5 Düşük deşarj oranlarında zorlanmış taşınımın etkisiyle batarya modülü ortalama sıcaklık değişimi

1C ve 2C deşarj oranında en yüksek sıcaklıkları sırasıyla 28.4°C ve 36.3°C 'ye çıkmıştır. Bu iki deşarj oranında (1C ve 2C) batarya modülünün ortalama sıcaklığı güvenli sıcaklık aralığında olup 60°C ' ulaşmamıştır. 1C deşarj oranında deneyler yaklaşık olarak 20°C 'de başlamış ve 25°C sıcaklıklarda sonlanmıştır. Düşük Reynolds sayısının 2148 olduğu laminar bölgede kanatçıksız modülde sıcaklık 28.4°C 'dir. Yine aynı deşarj ve Reynolds sayısında düz, üçgen ve dallı kanatçıklarda batarya modülünün

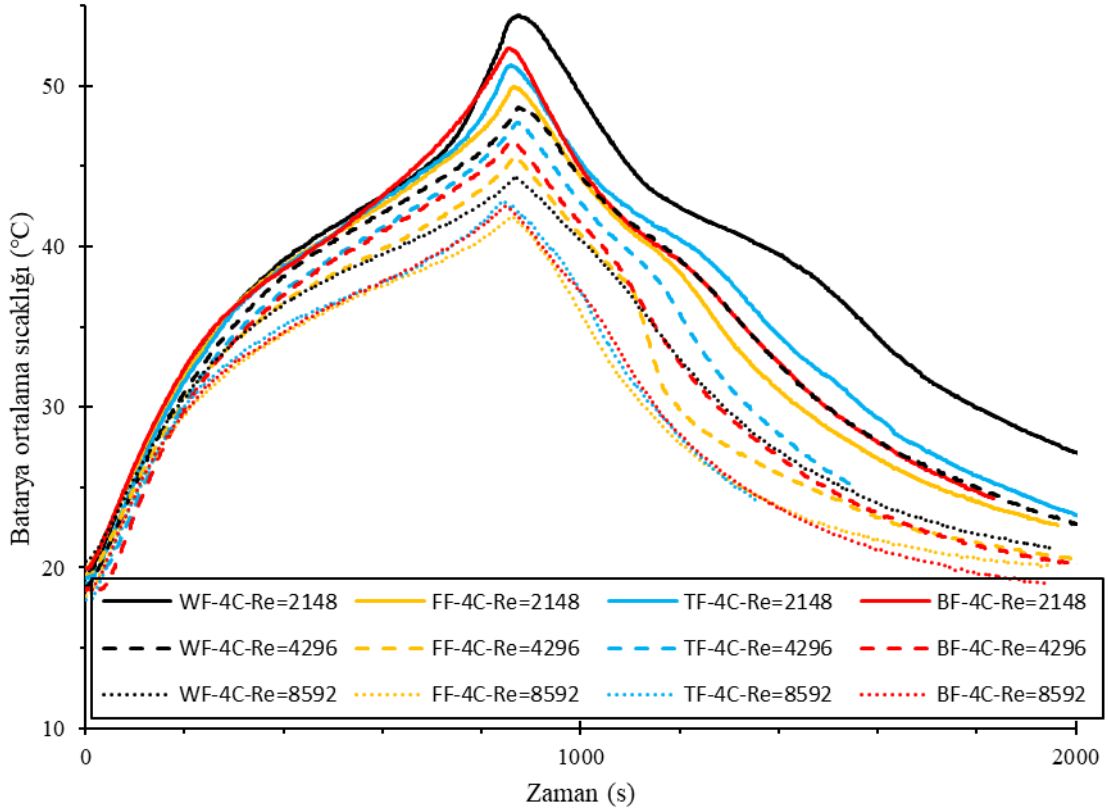
ortalama yüzey sıcaklıkları sırasıyla 25.7 °C, 27.2 °C ve 26.6 °C'dir. Reynolds sayısı 4296 değerine çıkıldığında kanatçiksız, düz, üçgen ve dallı kanatçıklı modüllerde batarya ortalama yüzey sıcaklıkları sırasıyla 25.9 °C, 25.3 °C, 25.7 °C ve 25.2 °C'dir. Reynolds sayısı 8592 değerinde ise bu sıcaklıklar yine sırasıyla 25.1 °C, 24.4 °C, 24.5 °C ve 24.7 °C olarak ölçülmüştür. Bu üç Reynolds sayısında en iyi ısıl performansı sırasıyla düz kanatçıklı, dallı kanatçıklı, üçgen kanatçıklı ve kanatçiksız modül olarak sıralamak mümkündür. Şekil 4.3'te görüldüğü üzere Reynolds sayıları arttıkça başka bir deyişle hava hızı arttıkça batarya ortalama yüzey sıcaklıkları azalmaktadır. Fakat bu azalış yaklaşık 4 °C düşürmektedir.

Deşarj oranı 2C'ye çıkarıldığında ise Reynolds sayısı 2148 değerinde kanatçiksız, düz, üçgen ve dallı kanatçıklı batarya modüllerinde ortalama batarya sıcaklıkları sırasıyla 36.2 °C, 34.2 °C, 34.3 °C ve 35.3 °C'dir. Reynolds sayısı 8592 değerinde ise bu sıcaklıklar sırasıyla 31.7 °C, 29.8 °C, 30.6 °C ve 31 °C'dir. Bu deşarj oranında yine en iyi ısıl performansı düz kanatçıklı modülde elde edilmiştir. Reynolds sayısı arttıkça 6.4 °C sıcaklık düşüşü meydana gelmiştir. Reynolds sayısı arttıkça tüketilen fan gücü de artmaktadır. Dolayısıyla batarya modülünü soğutmak için gereken ek güç de artar. Tüketilen ek soğutma gücü de dikkate alındığında düşük deşarj oranlarında düşük hava hızlarının ($Re=2148$) soğutma için daha uygun olduğu belirlenmiştir. Hatta pil hücrelerinin etrafına yerleştirilen FDM kalınlığı pili soğutma da yeterli olmaktadır.

Şekil 4.6'da zorlanmış taşınımın etkisiyle 3C, 4C ve 5C deşarj oranlarında batarya modülü ortalama sıcaklığının zamanla değişimi gösterilmiştir.

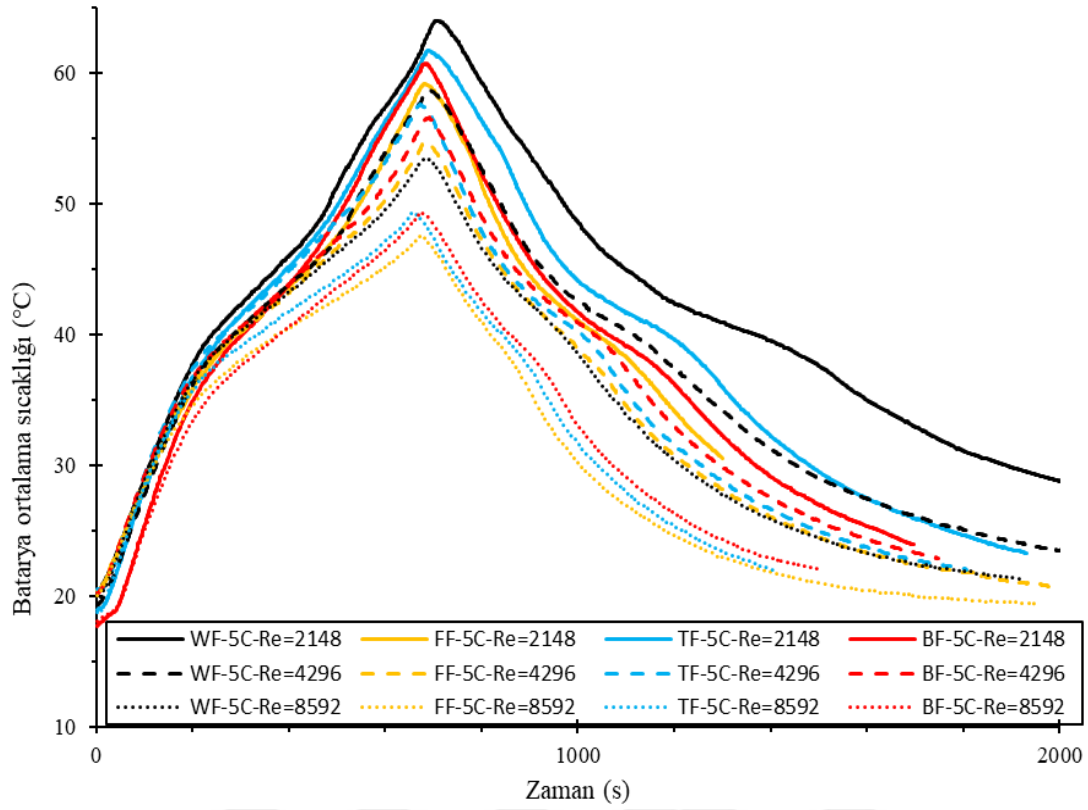


a)



b)

Şekil 4.6 Zorlanmış taşınımın etkisiyle batarya modülü ortalama sıcaklığının zamanla değişimi a) 3C, ve b) 4C



c)

Şekil 4.6 Zorlanmış taşınımın etkisiyle batarya modülü ortalama sıcaklığının zamanla değişimi c) 5C (devam)

Deşarj oranı arttıkça batarya modülünde üretilen ısı da artmaktadır. Dolayısıyla modül içerisindeki pil hücre sıcaklıkları da artmaktadır. Üretilen bu ısıyı modülden uzaklaştırmak için iyi bir soğutma tasarımı yapılması önemlidir. Şekil 4.6 a’da 3C deşarj oranında en düşük Reynolds sayısında ($Re=2148$) kanatçıksız, düz kanatçıklı, üçgen kanatçıklı ve dallı kanatçıklı batarya modüllerinin deşarj sonucunda en yüksek batarya sıcaklıkları sırasıyla 44.2°C , 40.4°C , 41.4°C ve 43.1°C olarak ölçülmüştür. Bu değerler Re sayısının 4296 ve 8592 değerleri için yine sırasıyla 40.9°C , 38.7°C , 39.4°C , 39.6°C ve 38°C , 33.4°C , 37.3°C , 37.2°C ’dir. Bu deşarj oranında ise en düşük ve en yüksek Reynolds sayısı arasındaki sıcaklık farkı 10.8°C ’dir. Bu deşarj oranında ise yine düşük deşarj oranlarında olduğu gibi batarya modülü içerisinde bulunan FDM katı fazda olup erime gerçekleşmemiştir. Ancak kanatçıksız ve dallı batarya modüllerinde pil sıcaklığı FDM erime sıcaklığına ulaşmıştır. Bu deneylerde FDM peltemsi bölgede olup erime tam gerçekleşmemiştir.

Şekil 4.6 b’de 4C deşarj oranında farklı batarya modüllerindeki ortalama sıcaklıklarının zamana göre değişimi verilmiştir. 4C deşarj oranında ise pil sıcaklıkları en düşük Reynolds sayısında kanatçıksız, düz kanatçıklı, üçgen kanatçıklı ve dallı kanatçıklı batarya modüllerindeki en yüksek deşarj sonu sıcaklığı sırasıyla 54.4 °C, 48.9 °C, 51.3 °C, 52.2 °C olarak kaydedilmiştir. En yüksek Reynolds sayısında ise bu sıcaklıklar sırasıyla 44.2 °C, 40.7 °C, 42.7 °C ve 42.5 °C’dir. En yüksek sıcaklık farkı ise bu deşarj oranında 13.7 °C’dir. Dolayısıyla kanal içerisinde hava hızının artırılmasıyla yaklaşık 14 °C’lik bir sıcaklık düşüşü meydana gelmiştir. Bu deşarj oranında ise FDM tamamen erimiş olup sıvı fazdadır. FDM’nin sıvı faza dönüşürken depoladığı gizli ısı sayesinde pil sıcaklık artış eğrisindeki eğimi azalmıştır. Sıcaklık artışı düşürülmüş ve hem FDM’nin hem de zorlanmış taşınımın etkisi belirgin şekilde ortaya çıkmıştır.

Şekil 4.6 c’de 5C deşarj oranında farklı batarya modüllerindeki ortalama sıcaklıklarının zamana göre değişimi verilmiştir. 5C deşarj hızında zorlanmış taşınımın etkisi ise açıkça görülmektedir. Doğal taşınımında güvenli sıcaklık aralığında olmadığı için, 5C deşarj oranında deneyler yapılamamıştır. Ancak, zorlanmış taşınım sayesinde bu deşarj oranında deneyler yapılabilen ve pil modülünün ortalama yüzey sıcaklığı yaklaşık 55.6 °C olduğu görülmektedir. En düşük Reynolds sayısında kanatçıksız, düz kanatçıklı, üçgen kanatçıklı ve dallı kanatçıklı batarya modüllerindeki ortalama en yüksek yüzey sıcaklıkları sırasıyla 64 °C, 59 °C, 61.6 °C ve 60.4 °C’dir. En yüksek Reynolds sayısında ise bu sıcaklıkları yine sırasıyla 53.4 °C, 45.3 °C, 49.2 °C ve 48.6 °C olarak ölçülmüştür. Bu deşarj oranında ise en yüksek ve en düşük Reynolds sayılarındaki en yüksek sıcaklık farkı 18.7 °C olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.6 c’de de görüldüğü üzere 300 s. sonra FDM’nin erime bölgesine geçilmiş olup batarya sıcaklıklarındaki artış eğilimini azalmıştır. FDM’nin kalınlığının artmasıyla bu sıcaklık eğiliminin azalışı daha da artabilir. Hem 4C hem de 5C deşarj oranındaki batarya sıcaklıkları detaylı incelendiğinde bir üst Reynolds sayısındaki kanatçıksız modüldeki sıcaklık bir alt seviyedeki Reynolds sayısındaki düz kanatçıklı batarya modülündeki ortalama pil sıcaklığına yaklaşık olarak eşit olmaktadır. Başka bir deyişle düz kanatçıklı modül sayesinde daha düşük hava hızlarında kanatçıksız batarya modülündeki sıcaklıklarla aynı olmaktadır.

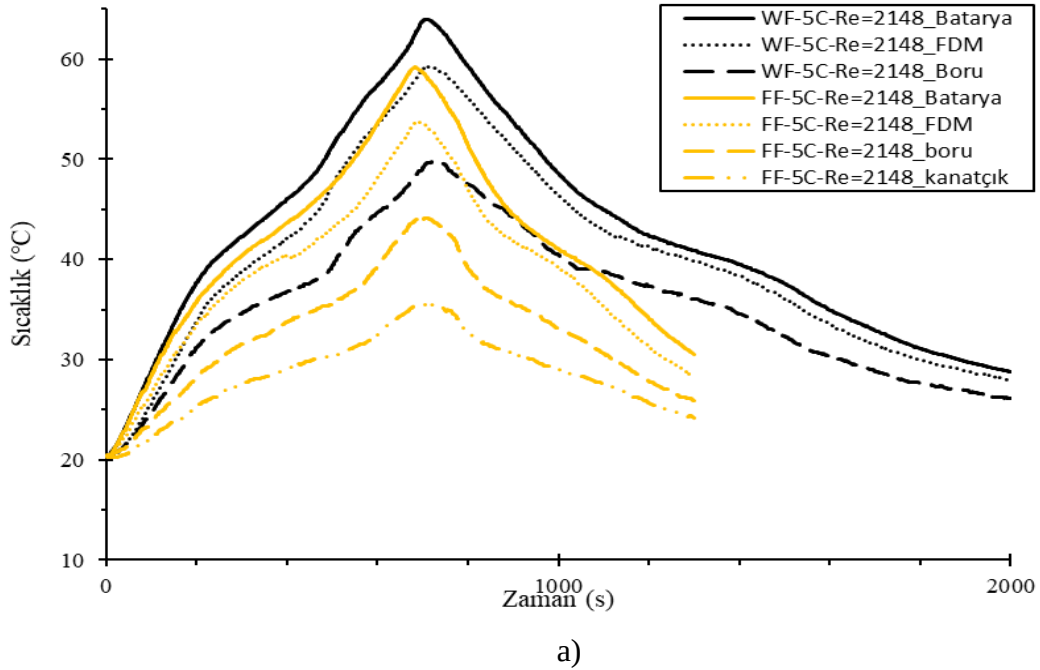
Her kanatçık tipinde batarya modülünde az da olsa sıcaklık farkı görülmüştür. Düz kanatçıklı batarya modülü diğer kanatçık tipindeki batarya modülleri ile kıyaslandığında

yaklaşık 2 °C – 3 °C sıcaklık farkı görülmektedir. Deşarj işleminin başlangıcında ve bitişine yakın süreçte pil yüzey sıcaklıkları hızla artarken, nominal gerilim değerlerinde FDM ve kanatçıklarında etkisiyle batarya modül sıcaklık eğimindeki artış azalmaktadır.

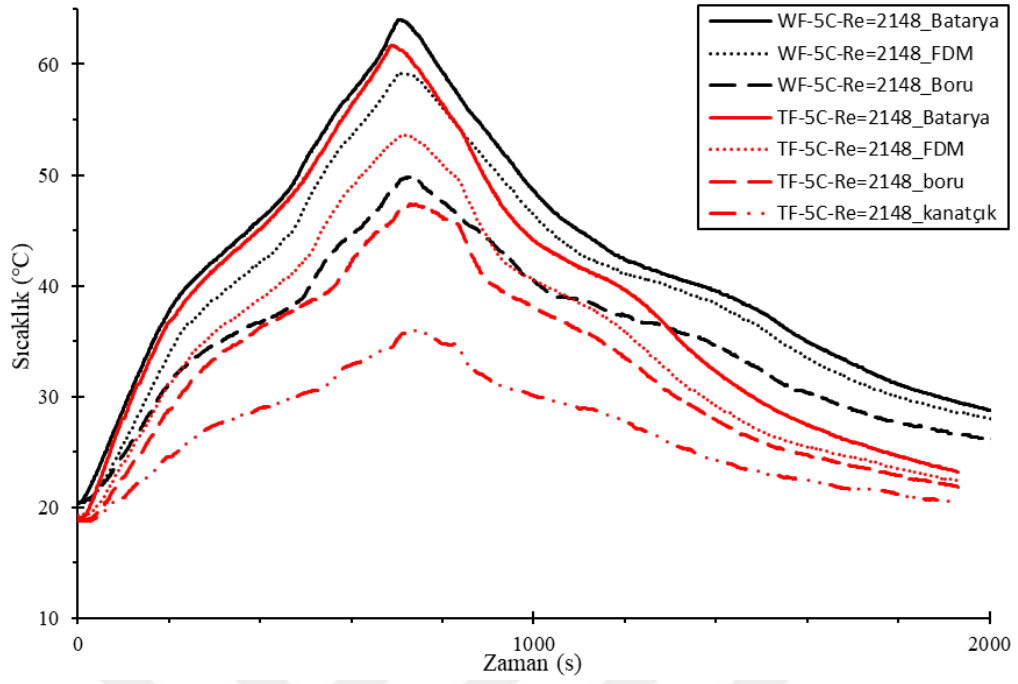
4.3 Batarya Modülündeki Kanatçıkların Isıl Performansa Etkisi

Batarya modülüne yerleştirilen farklı tip kanatçıklar ısı geçiş alanını ve akış profilini etkilemektedir. Ayrıca her bir kanatçık tipindeki batarya modüllerinde farklı basınç düşüşleri gözlemlenmiştir. Şekil 4.1’de görüldüğü üzere doğal taşınım da batarya modülü kapalı bir batarya kutusunda bulunduğu için kanatçık etkisi çok net görülmemiştir.

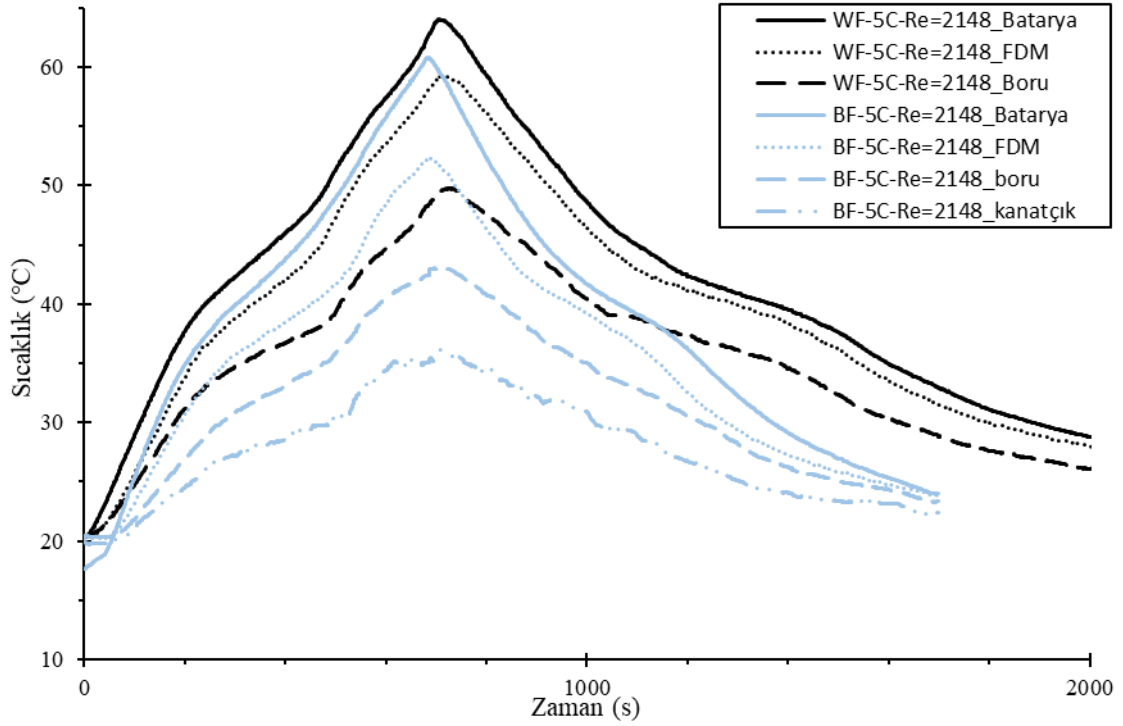
Fakat kanatçısız modülde, katman sıcaklıklarına bakıldığında batarya yüzey sıcaklığı, FDM sıcaklığı ve bakır boru sıcaklığı birbirine yakın olsa da arada az bir fark vardır. Fakat her bir kanatçık modülünde batarya yüzey sıcaklığı, FDM sıcaklığı ve bakır boru sıcaklığı hemen hemen birbirine yakın değerdedir. Bu da katmanlardaki sıcaklık profilinin daha homojen olduğunu göstermektedir. Bu durum batarya ömrü için de olumlu bir sonuç olabilir.



Şekil 4.7 Zorlanmış taşınımda Reynolds sayısı 2148 değerinde batarya modüllerinin katman sıcaklıkları a) düz kanatçık,



b)

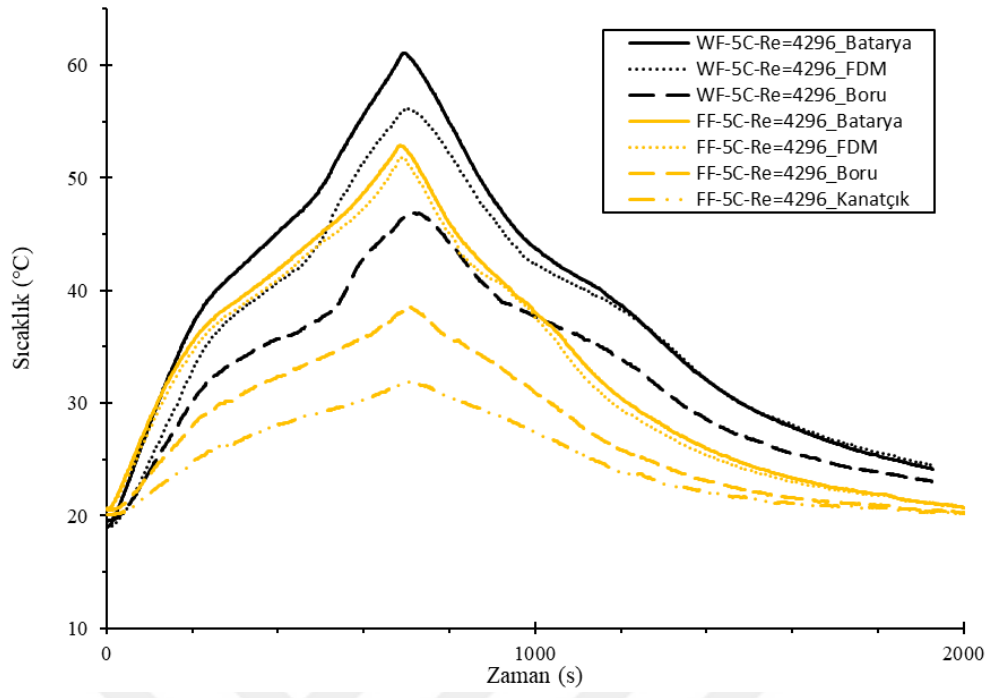


c)

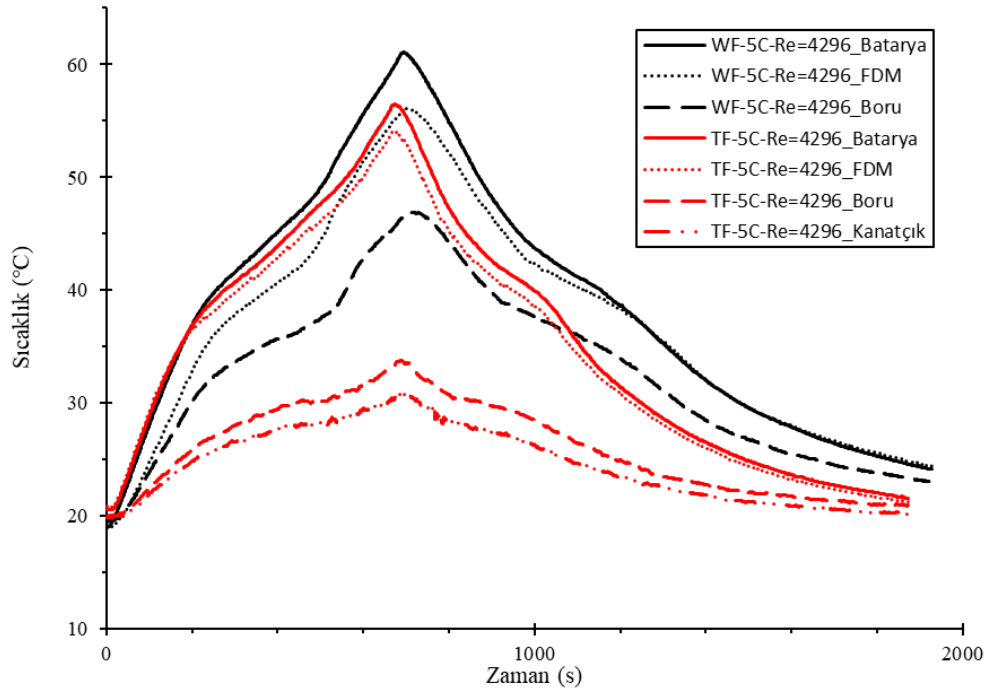
Şekil 4.7 Zorlanmış taşınımda Reynolds sayısı 2148 değerinde batarya modüllerinin katman sıcaklıkları b) üçgen kanatçık ve c) dallı kanatçık (devam)

Şekil 4.7’de 5C deşarj oranında zorlanmış taşınımında Reynolds sayısı 2148 değerinde batarya modüllerinin katman sıcaklıkları değerleri verilmiştir. Zorlanmış taşınımında, özellikle yüksek debilerdeki akış için kanatçık etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Kanal içerisindeki hava hızı arttıkça kanatçıkların etkisiyle pil hücre sıcaklıkları daha düşük ve hücreler arası sıcaklık farkı da daha az inmektedir. Kanatçıksız modülde pil sıcaklığı 63.5 °C iken düz, üçgen ve dallı kanatçıklarda sırasıyla batarya sıcaklıkları 58.4 °C, 61.2 °C ve 60.1 °C’dir. Hava akışı sayesinde ortalama pil yüzey sıcaklıklarında yaklaşık 5 °C düşüş sağlanmıştır. FDM sıcaklıkları ise kanatçıksız, düz, üçgen ve dallı kanatçıklı batarya modüllerinde sırasıyla 58 °C, 53 °C, 53.6 °C ve 52.6 °C olarak ölçülmüştür. FDM sıcaklıklarında ise kanatçıksız modülde kıyaslandığında kanatçıklı modüllerinde yaklaşık yine 5 °C daha düşük olarak ölçülmüştür. Kanatçık ortalama sıcaklıkları ise düz, üçgen ve dallı kanatçıklı modüllerde sırasıyla 35.6 °C, 36 °C ve 35.7 °C olarak ölçülmüştür. Kanatçık sıcaklıkları ise hemen hemen tüm test odalarında bu Reynolds sayısında aynı ölçülmüştür. Ayrıca kanal içerisindeki akış sayesinde batarya modülleri ortam sıcaklığına daha erken süre de ulaşmaktadır. Kanatçıksız modülde 30 °C’ye 2000 s.’de ulaşırken düz, üçgen ve dallı kanatçıklarda sırasıyla yaklaşık 1380 s, 1420 s. ve 1420 s.’de ulaşmıştır.

Kanal içerisindeki akış hızı arttıkça bu sıcaklık değerleri daha da düşmüştür. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de sırasıyla Reynolds sayısının 4296 ve 8592 olduğu durumlarda batarya modülü katman sıcaklıkları detaylı olarak verilmiştir. Şekil 4.7 a, b ve c’de sırasıyla düz kanatçık, üçgen kanatçık ve dallı kanatçıklı batarya modüllerindeki ısı performans ile kanatçıksız batarya modülü arasındaki fark detaylı olarak gösterilmiştir. Bu şekildeki sıcaklık profilleri 5C deşarj akımına ait olup, Reynolds sayısı 4296’dır.

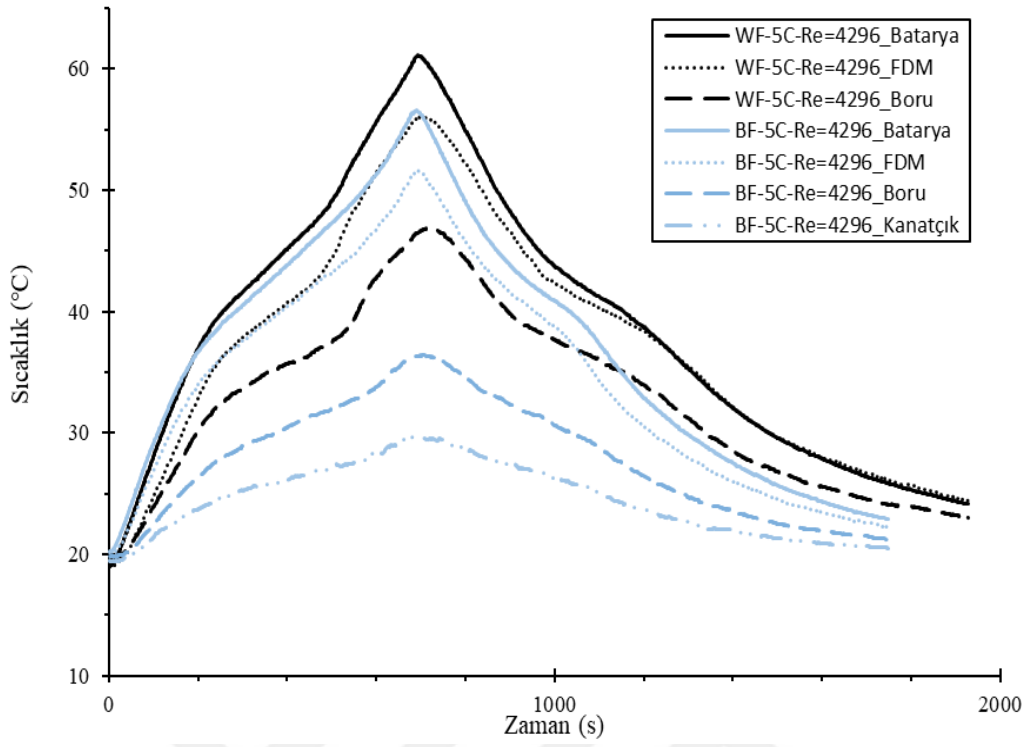


a)



b)

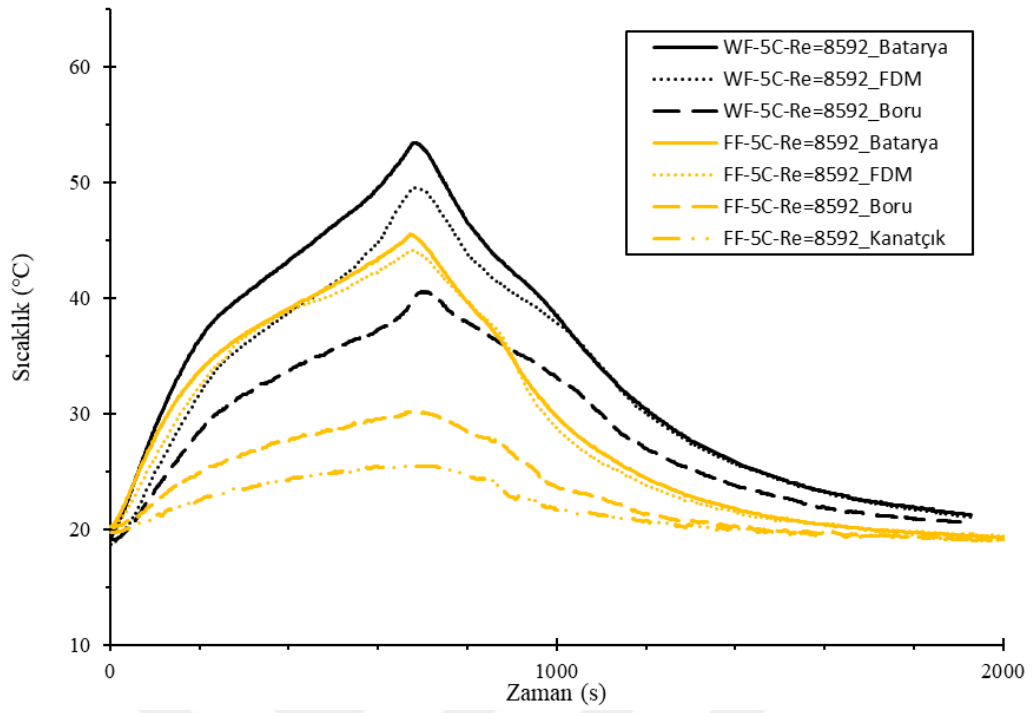
Şekil 4.8 Zorlanmış taşınımda Reynolds sayısı 4296 değerinde batarya modüllerinin katman sıcaklıkları



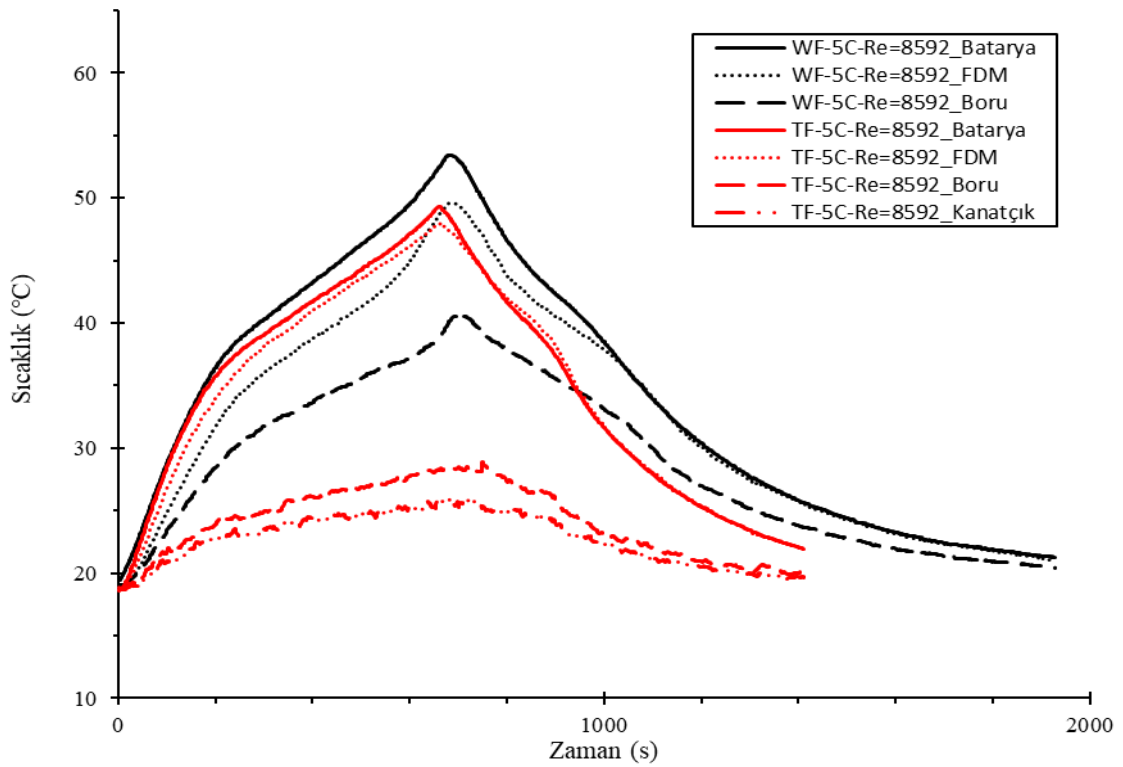
c)

Şekil 4.8 Zorlanmış taşınımında Reynolds sayısı 4296 değerinde batarya modüllerinin katman sıcaklıkları (devam)

Şekil 4.8 a’da düz kanatçık modülü kanatçıksız modül ile kıyaslandığında 10 °C sıcaklık düşüşü görülmüştür. FDM sıcaklıklarında ise 6 °C düz kanatçıklı model daha düşük sıcaklıktadır. Şekil 4.8 b’de üçgen kanatçık modülü ve kanatçıksız modüldeki katman sıcaklıkları verilmiştir. Batarya yüzey sıcaklıkları kıyaslandığında 6 °C sıcaklık düşüşü görülmüştür. FDM sıcaklıklarında ise 2.5 °C’lik sıcaklık farkı ölçülmüştür. Şekil 4.8 c’de ise dallı kanatçık modülü kanatçıksız modül ile kıyaslandığında 5 °C sıcaklık düşüşü görülmüştür. FDM sıcaklıklarında ise 4 °C dallı kanatçıklı model daha düşük sıcaklıktadır.

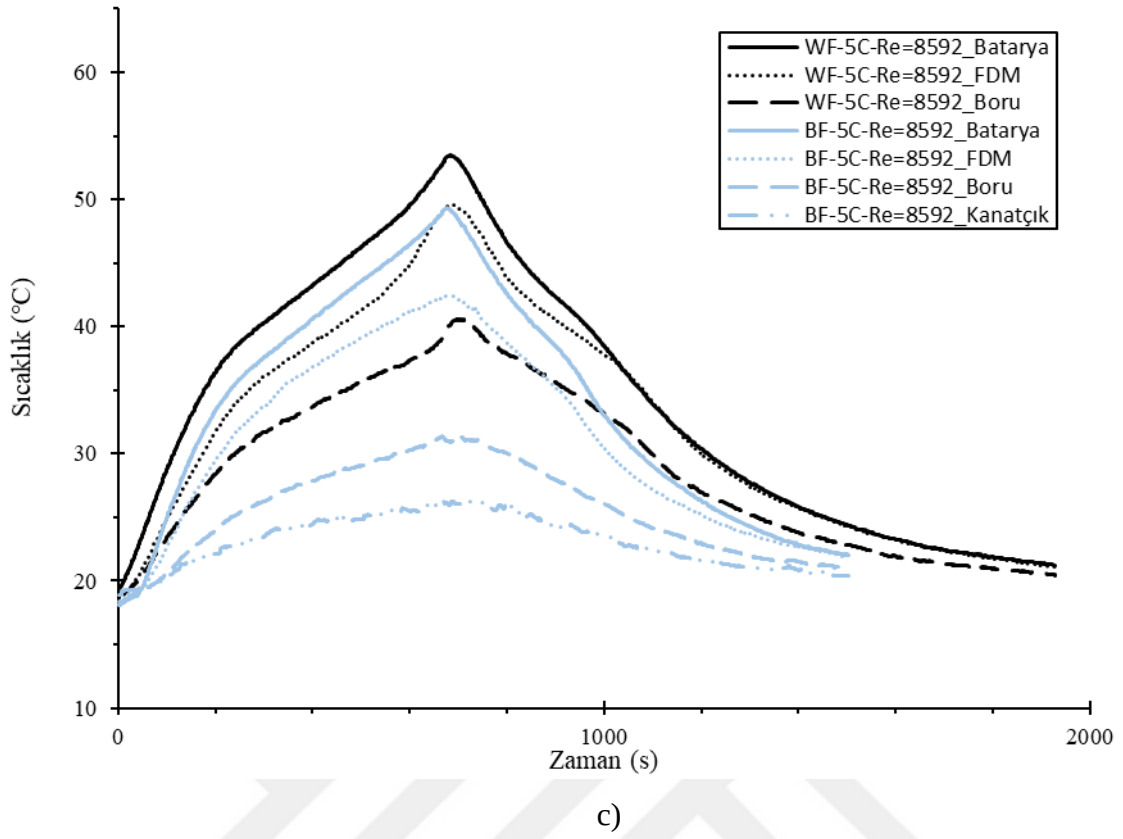


a)



b)

Şekil 4.9 Zorlanmış taşınımda Reynolds sayısı 8592 değerinde batarya modüllerinin katman sıcaklıkları



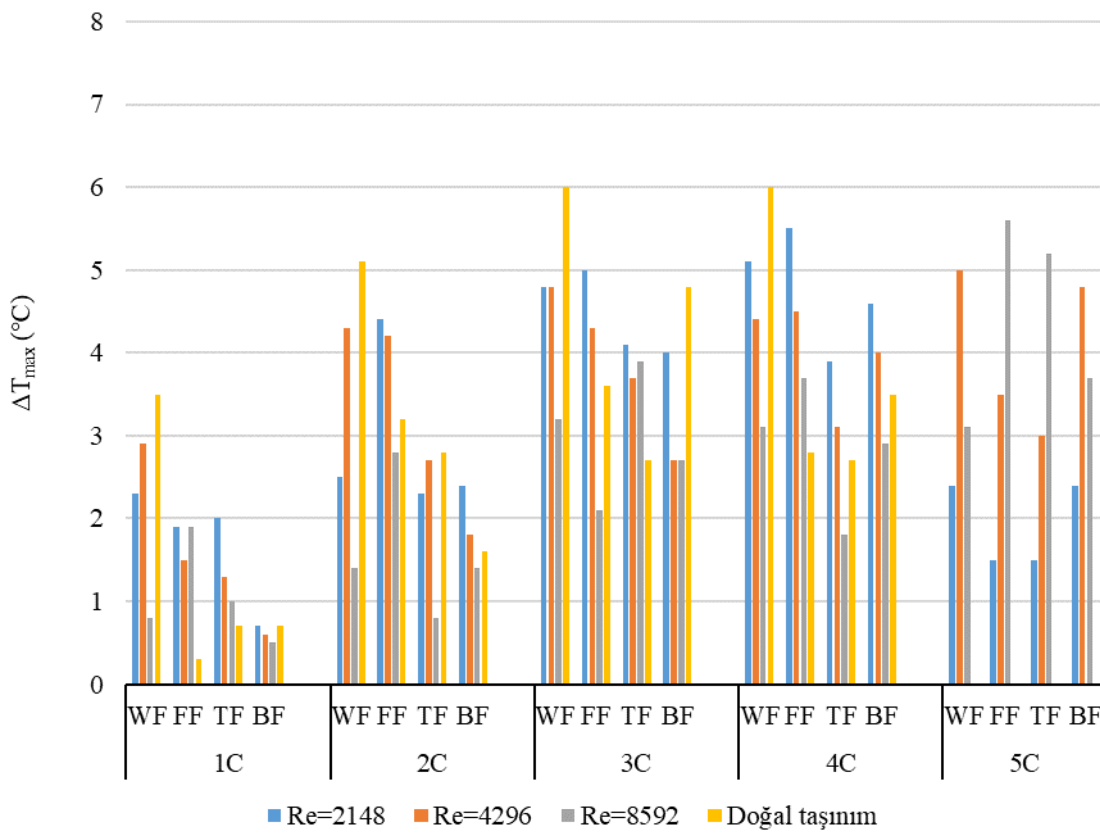
Şekil 4.9 Zorlanmış taşınımında Reynolds sayısı 8592 değerinde batarya modüllerinin katman sıcaklıkları (devam)

Şekil 4.9’de 5C deşarj oranında ve Reynolds sayısının 8592 değerinde kanatçıksız ve farklı kanatçıklı batarya modüllerinde katman sıcaklıkları arasındaki değişim detaylı olarak verilmiştir. Şekil 4.9 a’da düz kanatçık modülü kanatçıksız modül ile kıyaslandığında 8 °C sıcaklık düşüşü görülmüştür. FDM sıcaklıklarında ise 5.5 °C düz kanatçıklı model daha düşük sıcaklıktadır. Şekil 4.9 b’de üçgen kanatçık modülü ve kanatçıksız modüldeki katman sıcaklıkları verilmiştir. Batarya yüzey sıcaklıkları kıyaslandığında 4.3 °C sıcaklık düşüşü görülmüştür. FDM sıcaklıklarında ise 1.6 °C’lik sıcaklık farkı ölçülmüştür. Şekil 4.9 c’de ise dallı kanatçık modülü kanatçıksız modül ile kıyaslandığında 4.2 °C sıcaklık düşüşü görülmüştür. FDM sıcaklıklarında ise 7 °C dallı kanatçıklı model FDM daha düşük sıcaklıktadır.

Batarya modüllerinde en iyi ısıl performans Şekil 4.9’da görüldüğü üzere düz kanatçıklı batarya modülünde gerçekleşmiştir. Daha sonra dallı kanatçıklı batarya modülünde ve üçgen kanatçıklı batarya modülü olarak sıralamak mümkündür. Reynolds sayısının artmasıyla batarya ortalama yüzey sıcaklıkları daha düşük değerlerdir. Fakat ısı

performans sıralaması her bir Reynolds sayısında aynı olup, düz, dallı ve üçgen kanatçıklı batarya modüllerinde tespit edilmiştir.

Batarya modüllerinde, modül içerisindeki hücre sıcaklıklarının düşük olmasının yanında hücreler arası sıcaklık farkının da en az olması istenmektedir. Hücreler arası sıcaklık farkı modülde bulunan hücrelerin de ömrünün aynı olması için önemli bir faktördür. Aksi halde modüldeki hücrelerin sıcaklık farkı, pillerin yenisi ile değişimi sırasında kapasite farkı gibi ciddi problemlere sebep olabilir. Şekil 4.10'da hem doğal taşınım hem de zorlanmış taşınımında hücreler arasındaki sıcaklık farkı gösterilmiştir.



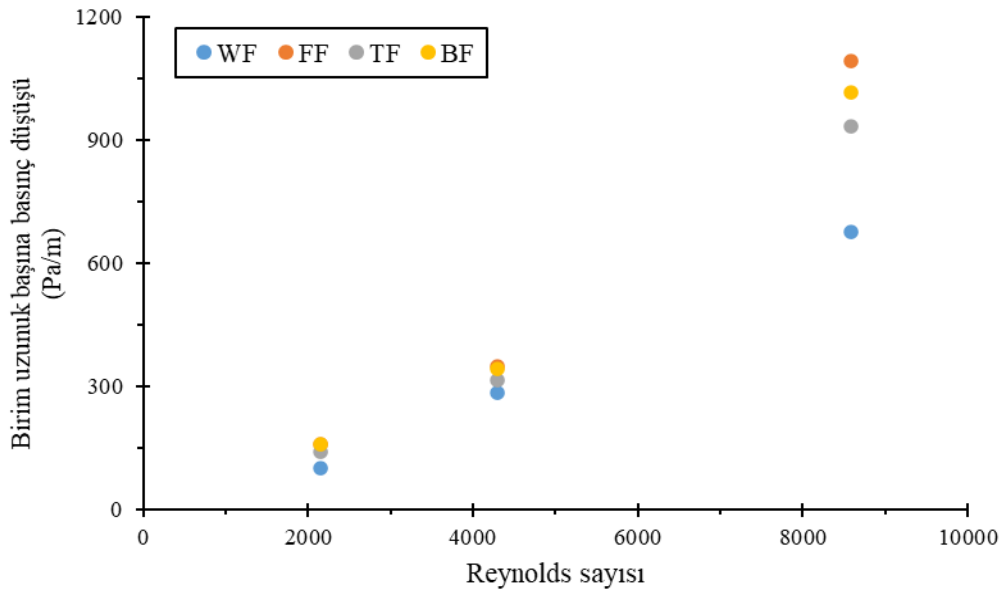
Şekil 4.10 Deşarj sonunda batarya modülündeki hücreler arası maksimum sıcaklık farkı

Şekil 4.10'da deşarj işlemi sonunda kanatçıklı ve kanatçıksız batarya modülündeki hücreler arasındaki maksimum sıcaklık farklarını göstermektedir. Doğal taşınım ile soğutmada hücreler arası sıcaklık farkı en fazla 6 °C'dir. Bu batarya modülünde kanatçıksız modeldir. Deşarj oranı arttıkça hücreler arası sıcaklık farkı da fazladır. Düşük deşarj oranlarında doğal taşınım ile soğutmada, 1C deşarj akımında sıcaklık farkı 3.5 °C

iken 2C deşarj oranı için ise 5.1 °C'dir. Bu değerler kanatçısız batarya modülleri için tespit edilmiştir. Batarya modülüne kanatçık eklenmesiyle doğal taşınım için hücreler arası sıcaklık farkı en fazla 4.8 °C'dir. Kanal içerisinde hava akışı olması durumunda ise hücreler arası sıcaklık farkı daha düşmektedir. Zorlanmış taşınımında en yüksek sıcaklık farkı 5.5 °C'dir. Fakat kanatçık tipine bağlı olarak belirgin bir fark ya da üstünlük yoktur. Düşük deşarj oranlarında zorlanmış taşınımında etkisiyle hücreler arası sıcaklık farkı çok düşüktür. Deşarj oranı arttıkça hücreler arası sıcaklık farkı 0.3 °C ile 5.5 °C arasında değişkenlik göstermekte olup ortalama 3 °C - 4 °C'dir.

Bu durum daha çok deney tesisatı tasarımı ile alakalı olup, ilk sıradaki hücreler daha düşük sıcaklıktadır. Hava akışı sayesinde arka hücrelerdeki ortalama sıcaklık arka sıralara doğru gidildikçe artar. Bu durum, modül içindeki hücre sıcaklık farkını etkiler. Ancak, toplam 4 hücre sıra ve homojen olması batarya modülünde çok fazla sıcaklık farkına neden olmaz. Fakat modüldeki sıra sayısı arttıkça mevcut soğutma dizaynıyla bu sıcaklık farkı daha da artabilir. Bu yüzden daha çok sıralı hücrelerde hava akışı farklı noktalardan sağlanabilir.

Reynolds sayısı arttıkça, batarya modülünün bulunduğu test odasının da basınç düşüşü de artmaktadır. Batarya modülünün kanatçıklı veya kanatçısız olma durumunda hatta kanatçık tipine bağlı olarak da test odasındaki basınç düşüşü değişmektedir.



Şekil 4.11 Batarya modüllerinde Reynolds sayısına bağlı olarak basınç düşüşleri

Deneylerde kullanılan farklı Reynolds sayıları aralığında ve kanatçık tipleri için basınç düşüşleri Şekil 4.11’de verilmiştir. Batarya modülünün içine kanatçıklar yerleştirildiğinde, havanın geçtiği alan azalır ve katı modelin alanı artar. Dolayısıyla kanal içindeki basınç düşüşü artmaktadır. Batarya modülüne yerleştirilen üç farklı tipteki kanatçıkların yüzey alanına bakıldığında; düz, üçgen ve dallı kanatçıklı modellerdir. Bu nedenle, batarya modülündeki en yüksek basınç düşüşü düz kanatçık geometrisinde meydana gelmiştir. Reynolds sayısına bağlı olarak değişen basınç düşüşü en yüksek Reynolds sayısında 1091 Pa/m olarak ölçülmüştür. Daha sonra 1016 Pa/m ile dallı kanatçık, 933 Pa/m üçgen kanatçık ve 675 Pa/m kanatçıksız batarya modülünde ölçülmüştür. Bu Reynolds sayısında modüller arası basınç düşüşü farkı daha çok artmaktadır. Reynolds sayısının 2148 ve 4296 değerlerinde farklı modüllerinde basınç düşüşü farkı daha düşüktür. Ayrıca modüller arası basınç düşüşü de birbirine oldukça yakındır. Kanatçıksız modülle kıyaslama yapıldığında, düz, üçgen ve dallı kanatçıklardaki basınç düşüşleri en yüksek Reynolds sayısında sırasıyla %38, %28 ve %34 artmıştır. Modüller arasındaki basınç düşüşlerindeki farkın, daha yüksek Reynolds sayılarında daha da artması beklenmektedir.

Çizelge 4.2 Deneyde kullanılan batarya modülleri için basınç ve sıcaklık düşüşü

Reynolds sayısı		2148		4296		8592	
		Sıcaklık düşüşü (°C)	ΔP (Pa)	Sıcaklık düşüşü (°C)	ΔP (Pa)	Sıcaklık düşüşü (°C)	ΔP (Pa)
1C	FF	2.4	19	1.5	42	1.2	131
	TF	1.2	17	0.6	38	1	112
	BF	1.6	19	1,3	41	1	122
2C	FF	1.9	19	2.2	42	2.3	131
	TF	1.8	17	1.3	38	1.4	112
	BF	1.1	19	1.8	41	1.6	122
3C	FF	3.9	19	1.9	42	4.7	131
	TF	2.8	17	1.4	38	1.6	112
	BF	1.2	19	1.5	41	1.5	122
4C	FF	5.1	19	4	42	7.6	131
	TF	2.8	17	1.6	38	5.7	112
	BF	2.1	19	2.4	41	5.9	122
5C	FF	5	19	5.2	42	7.9	131
	TF	2.3	17	3.5	38	4.1	112
	BF	3.2	19	3.7	41	4.4	122

Çizelge 4.2’de tezde kullanılan batarya modüllerindeki basınç ve sıcaklık düşüşleri verilmiştir. Bu çizelgede verilen sıcaklık düşüşleri kanatçıksız modele kıyaslanmış ve aradaki fark sunulmuştur. Basınç düşüşleri ise test odasındaki kanatçık modeline ait ölçülen basınç düşüşüdür. Modül içerisinde sıcaklık düşüşü istenen ve hatta amaçlanan bir durumdur. Fakat modül girişinde ve çıkışında basınç düşüşünün artması istenmemektedir. Çünkü istenilen hava akışını sağlamak için ilave fan gücüne ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat genişletilmiş yüzeyler, kanatçıklı ve gözenekli yapılar modül içerisindeki katı hacmini arttırdığı için basınç farkını da arttıracakları kesindir. Bu kapsamda, sıcaklık düşüşü basınç düşüşüne bölündüğünde basınç düşüşüne karşılık gelen sıcaklık düşüşünü elde etmek mümkündür. Deneylerden elde edilen veriler incelendiğinde Çizelge 4.2’de verilen sıcaklık ve basınç düşüşlerinin elde edildiği görülmektedir. Burada en etkili durum düşük Reynolds sayılarında elde edilmiştir. Kanatçık tipi incelendiğinde ise en iyi kanatçık modülünün düz kanatçık olduğu, daha sonra dallı ve son olarak üçgen kanatçık modeli olarak sıralamak mümkündür. Fakat düşük Reynolds sayılarında hem basınç düşüşü az hem de sıcaklık düşüşü söz konusudur. Reynolds sayısı arttıkça sıcaklık düşüşü daha da artar, ancak basınç düşüşü de artmaktadır.

Fan gücü arttıkça başka bir deyişle modül içerisindeki hava hızı arttıkça, batarya modülünde zorlanmış taşınım etkisiyle daha fazla ısı çekilir ve hücrelerin ortalama sıcaklığı düşer. Hava hızı arttıkça ortalama batarya sıcaklığı düşer ancak hava hızı artmaya devam ettikçe sıcaklık düşüşü aynı oranda düşmez ve yavaşlar. Hava hızı arttıkça fan gücü artar, bu da enerji maliyetlerini artırır. Bu nedenle batarya soğutmalarında bulunan hava soğutma uygulamalarında fan gücünü artırmak etkili bir çözüm olmayabilir.



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında batarya modülünde bulunan hücrelerin arasına ince bir halkasal şekilde FDM, bakır boru ve kanatçıkların olduğu ve olmadığı durumlarda batarya modülünün ısıl performansı deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler laboratuvar şartlarında 19 °C - 21 °C sıcaklık arasında değişen ortam sıcaklığında yapılmıştır. Farklı deşarj oranlarında ısıl performansın incelendiği batarya modülünde doğal ve zorlanmış taşınımın modül sıcaklığına etkisi araştırılmıştır.

Deneyler ilk önce batarya modülünün bir hava kanalı içerisinde olduğunda ve içerisinde hava akışının olmadığı durumlarda ele alınmıştır. Batarya modüllerinde elektriksel değerler incelendiğinde, batarya modülünde deşarj akım oranı arttıkça ani gerilim düşüşü daha hızlı olmaktadır. Deney başlangıcında tam dolu olan batarya modülleri, deneyin ilk aşamasında, 1C deşarj oranında 16.8 V değerinden 16 V. değerine, 5C deşarj oranında ise 14 V'a düşmüştür. Düşük deşarj oranlarında nominal gerilim bölgesinde daha uzun sürede dururken, yüksek deşarj oranında bu süre azalmaktadır.

Kanal içerisinde hava akışının olmadığı pasif soğutmada kanatçıklı ve kanatçıksız batarya modüllerinde modül ortalama yüzey sıcaklıkları oldukça yakındır. Dolayısıyla doğal taşınımla soğutmada kanatçık tipi hatta modüle kanatçık yerleştirilmesi belirgin bir sıcaklık düşüşüne neden olmamaktadır. Ayrıca modül içerisinde bulunan hücrelerin katman sıcaklıkları pil, FDM, bakır boru ve kanatçık sıcaklıkları arasında da ciddi bir sıcaklık farkı söz konusu değildir. Deşarj sonrası dinlenme bölgesine bakıldığında da kanatçıklı modüllerin ortam sıcaklığına daha hızlı düşmesi beklenirken bu tüm modellerde ve deşarj oranlarında farklılık göstermiştir. Bu durum batarya modülünün bir hava kanalı içerisine olmasından kaynaklanabilir. 1C deşarj oranında FDM faz değiştirmemiş ve deşarj işlemi esnasında katı fazdadır. 2C deşarj akımının son aşamalarında ve 3C ile 4C deşarj akımlarının tamamında FDM sıvı faza geçmiş olup gizli ısı depolamıştır. FDM'nin erime sıcaklığı olan 42 °C - 44 °C arasında FDM erimesiyle batarya sıcaklığındaki artış hızı azalmıştır. Bu sıcaklıkta bir kırılma yaşanmış ve batarya hücrelerinin daha yüksek sıcaklıklara çıkılması önlenmiştir. Batarya modülü içerisindeki FDM kalınlığı doğal taşınımla soğutmada yetersiz kalmış olabilir. Daha kalın bir FDM katmanı ile daha iyi bir ısıl performans sağlanabilir.

Kanal içerisindeki hava akışının olması durumunda ise batarya ısıl performansı Reynolds sayısına bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Batarya güvenli sıcaklık limiti

dikkat edildiğinde doğal taşınımında 4C deşarj oranında deneylere imkan sağlamıştır. Fakat hava akışının olmasıyla birlikte 5C deşarj oranına kadar yapılmıştır. Sıcaklık en yüksek yaklaşık 60 °C'ye kadar ulaşmıştır. Kesme sıcaklığı olan 80 °C'ye kadar daha yüksek deşarj oranında deneyler yapılabilirdi. Fakat pil teknik özelliklerinde en yüksek 5C deşarj oranına imkan sunmaktadır. Kanal içerisinde hava hızının artmasıyla Reynolds sayısı artar ve pil ortalama yüzey sıcaklıkları daha düşer. Zorlanmış taşınımında kanatçık etkisi görülmeye başlar. Kanatçıksız batarya modülü ile kıyaslandığında kanatçıklı modüllerde deşarj akımına bağlı olarak 10 °C sıcaklık düşüşü tespit edilmiştir. Hatta kanatçık tiplerinin de ısıl performans etkisi görülmüştür. En iyi performansın başka bir deyişle en fazla sıcaklık düşüşü düz, dallı ve üçgen kanatçık olarak sıralamak mümkündür.

Zorlanmış taşınımında, batarya modülündeki FDM sıcaklıklarına bakıldığında, 1C, 2C ve 3C deşarj oranında FDM tamamen erimemiştir. 4C ve 5C deşarj oranında FDM erimiş ve tamamen sıvı faza geçmiştir. Bu yüzden yüksek deşarj oranlarında batarya modülünün sürekli kullanılması durumunda daha kalın bir FDM katmanı ya da erime sıcaklığı daha yüksek bir FDM seçilmesi daha uygun olabilir.

4C deşarj oranında doğal taşınımında batarya modülü ortalama sıcaklığı yaklaşık 75 °C iken, zorlanmış taşınımında 55 °C'dir. Zorlanmış taşınımında etkisiyle yaklaşık 20 °C sıcaklık düşmüştür. Bu sıcaklık farkı kanatçık tipine bağlı olarak az da olsa değişim göstermiştir. Bu sebeple fan yardımı sayesinde ilave güç harcanmıştır. Fakat bu ilave güç harcanması olsa da 20 °C ciddi bir sıcaklık düşüşü sağlanmıştır.

Batarya modülüne kanatçık eklemek modülde zorlanmış taşınım ile soğutmada basınç düşüşünün de artmasına sebep olacaktır. En fazla basınç düşüşü sıralaması düz, dallı, üçgen kanatçık ve kanatçıksız batarya modülleridir. Fakat düşük hava hızlarında 0.5 m/s ve 1 m/s hava hızlarında basınç düşüşleri modülde hemen hemen aynıdır. Hava hızının ya da Reynolds sayısı 8592 değeri ve sonrasında bu modüller arasındaki basınç düşüşü farkı giderek açılması beklenmektedir.

Kanal içerisinde hava akışının olması batarya ortalama yüzey sıcaklığını düşürmektedir. Fakat kanal içerisindeki hava hızının artması aynı oranda sıcaklık düşüşünü arttırmamıştır. Dolayısıyla basınç düşüşleri de dikkate alındığında birim basınç düşüşü başına sıcaklık düşüşü değerlerinde iyi ısıl performans kanal içerisinde hava hızının 0.5 m/s olduğu durumda Reynolds sayısının 2148 değerinde olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca hücreler arası mesafe pil yüzey sıcaklığına etki etmektedir. Bu tez çalışmasında hücreler arası mesafe 12 mm'dir. Hem batarya kutusu tasarımında hem de ısı performans tasarımlarında modül ölçüleri önemli olup, hücreler arası mesafe değiştirilerek hem ısı performansına hem de tasarım parametrelerine etkisi araştırılabilir.

Batarya yüzey sıcaklıklarına bakıldığında FDM kalınlığı zorlanmış taşınım için yeterli gözükse de farklı kalınlıklardaki FDM'de de deneyler yapılarak bu Reynolds sayıları ve daha geniş Reynolds sayısı aralığında optimizasyonu yapılabilir.

Sadece faz değiştiren malzeme ile soğutulan batarya modüllerinde, pilin sıcaklık değişimine bağlı olarak farklı pil yüksekliklerinde farklı sıcaklık değerlerine sahip olabilirler. Daha farklı bir ifadeyle pile temas eden kısımlarda ve pilin yükselti boyunca farklı sıcaklıklarda olması faz değiştiren malzemelerin farklı noktalarda erimeye başlayacağı gösterebilir. Hücreler arası sıcaklık farklarına bakıldığında faz değiştiren malzemenin dış kısmında bulunan kanatçık sayesinde sıcaklığın faz değiştiren malzeme içerisinde homojen ve sabit kaldığı görülmüştür. Batarya modüllerinde hücreler arası sıcaklık farkı oldukça önemlidir. Bu sıcaklık farkının en az olması istenmektedir. Hem FDM, hem de bakır boru ve kanatçık sayesinde etkin bir hibrit soğutma yapılarak batarya modülünün de yüksek sıcaklığa çıkmaması hedeflenmiştir.

Tasarlanan bu soğutma sisteminde, modüldeki hücreler arasındaki sıcaklık farkı en fazla 6 °C'dir. Sıcaklık farkının doğal taşınım soğutmasında en yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, deşarj oranı arttıkça sıcaklık farkının da arttığı belirlenmiştir. Zorlanmış taşınımında ise hücreler arası sıcaklık farkı en yüksek 5 °C'dir. Kanatçık tipinin hücreler arası sıcaklık farkına etkisi vardır. Üçgen ve dallı kanatçık tiplerindeki batarya modüllerinde hücreler arası sıcaklık farkı en düşüktür.

Kanatçıklar 0.5 mm kalınlığında bakır plakadan üretilmiştir. 0.5 mm bakır kalınlığında farklı bakır kalınlıkları da kullanılarak kanatçık kalınlığının etkisi de ortaya çıkarılabilir. Ayrıca ısı iletim katsayısı yüksek olmasında kaynaklı olarak bakır seçilen malzeme tipi ekonomik ve yine yüksek ısı iletkenliğe sahip alüminyum malzemesinde de test edilerek ısı performans farkları ortaya koyulabilir.

Batarya modülünün kanatçıkları etrafında pleksiglas malzemedan yapılmış bir kutu söz konusudur. Her ne kadar kanatçık malzemesi bakırdan olsa da pleksiglas malzemenin düşük ısı iletim katsayısı nedeniyle modül dışına ısı geçişi azdır. Batarya

modülün dışını kaplayan kutunun yüksek ısı iletkenliğı olan malzemedan tercih edilmesi ortama aktarılan ısı geğışini arttıracaktır.

Batarya modülünde bulunan hücrelerin daha yüksek veya düşük kapasitelere sahip lityum iyon silindirik piller tercih edilmesiyle bu hibrit soğıtmanın batarya ısı ıyönetime etkisi kapsamlı bir şekilde ortaya çıkarılabilir. Pil tipinin sıcaklığına etkisi dolayısıyla hibrit soğıtmadaki FDM kalınlığı, kanatçık etkisi, tipi gibi parametrelerin etkisi daha net bir şekilde ilerleyen deneysel ve sayısal çalışmalarda belirlenebilir. Ayrıca piller arası mesafenin optimum mesafesi oldukça önemli olup yine ilerleyen çalışmalarda farklı mesafe ve geometrik dizayn şekillerinde etkisi ortaya çıkarılabilir.

Tez çalışmasında tasarlanan bu soğıtma sistemi düşük deşarj oranlarında pasif soğıtma, yüksek deşarj oranlarında ise hibrit soğıtma sağlayarak batarya modülü için daha iyi ısı ıy performans sağlayacaktır. Mevcut deneysel çalışma, hem pasif hem de hibrit soğıtma sağlayarak daha verimli batarya ısı ıy yönetim sistemi tasarlamaya yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

- A. S. Anusha. (2016). Phase Change Materials. *International Journal of Engineering Research and General Science* Volume 4, Issue 2, March-April, 2016 ISSN 2091-2730, 0-7.
- Aydın, Y. (2023). *Batarya soğutma performansını iyileştirmek için alüminyum fin yapı içerisinde grafen katkılı PCM malzemesinin değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi. Bursa Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bursa, Türkiye.
- Baker, J. (2008). New technology and possible advances in energy storage. *Energy Policy*, 36(12), 4368-4373. doi:10.1016/j.enpol.2008.09.040
- Bernardi, D., Pawlikowski, E., Newman, J. (1985). A General Energy Balance for Battery Systems. *Journal of The Electrochemical Society*, 132(1), 5-12. doi:10.1149/1.2113792
- Buidin, T. I. C., Mariasiu, F. (2021). Battery Thermal Management Systems: Current Status and Design Approach of Cooling Technologies. *Energies*, 14(16), 4879. doi:10.3390/en14164879
- Bulut, H. (2005). Termoelektrik soğutma sistemleri., 1-12.
- Calborean, A., Murariu, T., Morari, C. (2021). Optimized lead-acid grid architectures for automotive lead-acid batteries: An electrochemical analysis. *Electrochimica Acta*, 372, 137880. doi:10.1016/j.electacta.2021.137880
- Cecchini, R., Pelosi, G. (1992). Alessandro Volta and his battery. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 34(2), 30-37. doi:10.1109/74.134307
- Chen, K., Song, M., Wei, W., Wang, S. (2019). Design of the structure of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system for cooling efficiency improvement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 132, 309-321. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.024
- Chen, X., Yang, W., Shen, J., Xu, X., Zhou, F. (2023). Thermal performance of hybrid battery thermal management system with air cooling and phase change material embedding biomimetic variable section fins. *Applied Thermal Engineering*, 231, 120985. doi:10.1016/j.applthermaleng.2023.120985
- Choudhari, V. G., Dhoble, A. S., Panchal, S., Fowler, M., Fraser, R. (2021). Numerical investigation on thermal behaviour of 5 × 5 cell configured battery pack using phase change material and fin structure layout. *Journal of Energy Storage*, 43, 103234. doi:10.1016/j.est.2021.103234
- Çetin, M. S., Karakaya, B., Gençoğlu, M. (2021). Elektrikli araçlar için lityum iyon bataryaların modellenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(2), 755-763. doi:10.35234/fumbd.953296
- Soylu, E. (2016). *Bataryaların koşullarını izleyerek yapay sinir ağları ile batarya türü ve şarj durumu tahmini*, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Fan, R., Zheng, N., Sun, Z. (2021). Evaluation of fin intensified phase change material systems for thermal management of Li-ion battery modules. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 166, 120753. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120753
- Giorgio de Santillana. (1965). Alessandro Voltae I-lis "pile," or battery, opened the age of electric power and settled his celebrated arguement with Luigi Galvani. Curiously he then played no part in the epochal developments that his invention made possible., 1-11.

- Gül, H. S. (2018). *Elektrikli araçlar için batarya Yönetim sistemi tasarımı*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Huang, Q., Li, X., Zhang, G., Zhang, J., He, F., Li, Y. (2018). Experimental investigation of the thermal performance of heat pipe assisted phase change material for battery thermal management system. *Applied Thermal Engineering*, 141, 1092-1100. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.06.048
- Jiang, Z. Y., Qu, Z. G. (2019). Lithium-ion battery thermal management using heat pipe and phase change material during discharge-charge cycle: A comprehensive numerical study. *Applied Energy*, 242, 378-392. doi:10.1016/j.apenergy.2019.03.043
- Jilte, R. D., Kumar, R. (2018). Numerical investigation on cooling performance of Li-ion battery thermal management system at high galvanostatic discharge. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(5), 957-969. doi:10.1016/j.jestch.2018.07.015
- Jon P. Christophersen, Chet Motloch, Ira D. Bloom, Vince Battaglia, Ganesan Nagasubramanian, Tien Q. Duong. (2003). *U.S. DOE FreedomCAR and Vehicle Technologies Advanced Technology Development Program for Lithium-Ion Batteries: Gen 2 Performance Evaluation Interim Report*. doi:10.2172/910717
- Karagöz, M. E. (2023). *FDM (Faz değıştiren malzeme) esaslı bir batarya ısııl yönetim sisteminin modellenmesi ve farklı parametrelere göre sayısal analizi*, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sivas.
- Kordesch, K., Taucher-Mautner, W. (2009). Primary batteries – aqueous systems | Leclanché and Zinc-Carbon. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* (pp. 43-54). Elsevier. doi:10.1016/B978-044452745-5.00097-6
- Ledovskikh, A., Verbitskiy, E., Ayeb, A., Notten, P. H. L. (2003). Modelling of rechargeable NiMH batteries. *Journal of Alloys and Compounds*, 356-357, 742-745. doi:10.1016/S0925-8388(03)00082-3
- Li, X., He, F., Zhang, G., Huang, Q., Zhou, D. (2019). Experiment and simulation for pouch battery with silica cooling plates and copper mesh based air cooling thermal management system. *Applied Thermal Engineering*, 146, 866-880. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.10.061
- Liu, H., Jin, C., Li, H., Ji, Y. (2023). A numerical study of PCM battery thermal management performance enhancement with fin structures. *Energy Reports*, 9, 1793-1802. doi:10.1016/j.egy.2023.04.214
- Luo, J., Zou, D., Wang, Y., Wang, S., Huang, L. (2022). Battery thermal management systems (BTMs) based on phase change material (PCM): A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, 430, 132741. doi:10.1016/j.cej.2021.132741
- Mazzucco, A., Rothuizen, E., Jørgensen, J.-E., Jensen, T. R., Rokni, M. (2016). Integration of phase change materials in compressed hydrogen gas systems: Modelling and parametric analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(2), 1060-1073. doi:10.1016/j.ijhydene.2015.09.034
- Mehryan, S. A. M., Jannesari, H. (2024). Improving Li-ion battery thermal management via hydrogel evaporative cooling. *Applied Thermal Engineering*, 248, 123173. doi:10.1016/j.applthermaleng.2024.123173
- Moffat, R. J. (1988). Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1(1), 3-17. doi:10.1016/0894-1777(88)90043-X

- Kütük, O. T. (2021). *Elektrikli araçlarda kullanılan 18650 li-iyon pillerin soğutma analizi ve kontrolü*, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Öztop, M., Şahinaslan, A. (2022). Control of temperature distribution for Li-ion battery modules via longitudinal fins. *Journal of Energy Storage*, 52, 104760. doi:10.1016/j.est.2022.104760
- Pehlivan, H. (2024). Lityum iyon pillerin tarihten bugüne gelişimi ve son teknolojiye geline nokta. *Journal of Anatolian Physics and Astronomy* , 0-12.
- Peng, G., Dou, G., Hu, Y., Sun, Y., Chen, Z. (2020). Phase Change Material (PCM) Microcapsules for Thermal Energy Storage. *Advances in Polymer Technology*, 2020, 1-20. doi:10.1155/2020/9490873
- Sergio Trasatti Milan. (1998). 1799±1999: Alessandro Volta's 'Electric Pile' Two hundred years, but it doesn't seem like it. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 460 (1999) 1±4, 1-4.
- Sezer, K. C., BasmacıI, G. (2022). Şarj edilebilir pillere genel bakış. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(1), 297-309. doi:10.21923/jesd.946769
- Sezici, E. (2022). *Elektrikli araçlar için hava soğutmalı batarya termal yönetim sisteminin tasarımı ve deneysel incelenmesi*, Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Düzce, Türkiye.
- 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. doi:10.1016/j.rser.2007.10.005
- Shchukina, E. M., Graham, M., Zheng, Z., Shchukin, D. G. (2018). Nanoencapsulation of phase change materials for advanced thermal energy storage systems. *Chemical Society Reviews*, 47(11), 4156-4175. doi:10.1039/C8CS00099A
- Teker, E., Gökaslan, M. Y. (2025). Experimental investigation of the effect of hybrid cooling on battery module with phase change material and different fin structure. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 168, 109431. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109431
- Waqas, A., Ji, J., Ali, M., Alvi, J. Z. (2018). Effectiveness of the phase change material-based thermal energy storage integrated with the conventional cooling systems of the buildings – A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 232(6), 735-766. doi:10.1177/0957650917754033
- Weng, J., Ouyang, D., Yang, X., Chen, M., Zhang, G., Wang, J. (2020). Optimization of the internal fin in a phase-change-material module for battery thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 167, 114698. doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.114698
- Weng, J., Ouyang, D., Yang, X., Chen, M., Zhang, G., Wang, J. (2021). Experimental study on thermal behavior of PCM-module coupled with various cooling strategies under different temperatures and protocols. *Applied Thermal Engineering*, 197, 117376. doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.117376
- Wu, W., Wang, S., Wu, W., Chen, K., Hong, S., Lai, Y. (2019). A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. *Energy Conversion and Management*, 182, 262-281. doi:10.1016/j.enconman.2018.12.051
- Wu, W., Yang, X., Zhang, G., Chen, K., Wang, S. (2017). Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material based battery

- thermal management system. *Energy Conversion and Management*, 138, 486-492. doi:10.1016/j.enconman.2017.02.022
- Wu, W., Yang, X., Zhang, G., Ke, X., Wang, Z., Situ, W., ... Zhang, J. (2016). An experimental study of thermal management system using copper mesh-enhanced composite phase change materials for power battery pack. *Energy*, 113, 909-916. doi:10.1016/j.energy.2016.07.119
- Yuan, H., Luan, J., Liu, J., Zhong, C. (2024). Hail to Daniell Cell: From Electrometallurgy to Electrochemical Energy Storage. *Advanced Functional Materials*, 34(33). doi:10.1002/adfm.202400289
- Zhang, W., Qiu, J., Yin, X., Wang, D. (2020). A novel heat pipe assisted separation type battery thermal management system based on phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 165, 114571. doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.114571
- Zhao, J., Lv, P., Rao, Z. (2017). Experimental study on the thermal management performance of phase change material coupled with heat pipe for cylindrical power battery pack. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 82, 182-188. doi:10.1016/j.expthermflusci.2016.11.017
- Zubi, G., Dufo-López, R., Carvalho, M., Pasaoglu, G. (2018). The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 292-308. doi:10.1016/j.rser.2018.03.002



T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Tez Orijinallik Raporu

Tez Başlığı : Farklı Kanat Yapılarına ve Faz Değiştiren Malzemeye Sahip Bataryaların Isıl Performanslarının Deneysel Olarak İncelenmesi

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışmamın, kapak sayfası, giriş, ana bölümler ve sonuç bölümlerinden oluşan toplam 72 (yetmiş iki) sayfalık kısmına ilişkin, 05/01/2026 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre tezimin benzerlik oranı %7 (yüzde yedi) dir.

Orijinallik raporu, aşağıdaki filtreler kullanılarak oluşturulmuştur:

- Kabul ve onay sayfası hariç,
- Teşekkür hariç,
- İçindekiler hariç,
- Simge ve kısaltmalar hariç,
- Gereç ve yöntemler hariç,
- Kaynakça hariç,
- Alıntılar hariç,
- Tezden çıkan yayınlar hariç,
- 7 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç (Limit match size to 7 words)

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Lisansüstü Tez Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılmasına İlişkin Yönergeyi inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim.

05 / 01 / 2026

İmza

Eyyüp Teker

Öğrenci No 23910012002

Anabilim Dalı Makine Mühendisliği

Programı ☒ Yüksek Lisans

UYGUNDUR
imza

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yasin GÖKASLAN

UYGUNDUR
imza

Enstitü Onayı

(Enstitü Müdür/Müdür Yrd)

