



**T.C.
HİTİT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DALGALI KANALDA SIVI SOĞUTMALI LİTYUM-İYON
BATARYA PAKETİNİN ISIL YÖNETİMİNİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Birol İPEK

Çorum - 2023

**DALGALI KANALDA SIVI SOĞUTMALI LİTYUM-İYON BATARYA
PAKETİNİN ISIL YÖNETİMİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Birol İPEK

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Yüksek Lisans Tezi

TEZ DANIŞMANI

Prof. Dr. Sinan ÇALIŞKAN

Çorum 2023

Birol İPEK tarafından hazırlanan “Dalgalı Kanalda Sıvı Soğutmalı Lityum-İyon Batarya Paketinin Isıl Yönetiminin Sayısal Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması .../.../..... tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İrfan KURTBAŞ (Başkan)

.....

Prof. Dr. Sinan ÇALIŞKAN

.....

Prof. Dr. Ayla DOĞAN

.....

Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun .../ .../..... tarih ve sayılı kararı ile Birol İpek’in Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Prof. Dr. Muhammed Asif YOLDAŞ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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 beyan ederim.



Birol İPEK

DALGALI KANALDA SIVI SOĞUTMALI LİTYUM-İYON BATARYA PAKETİNİN ISIL YÖNETİMİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Birol İPEK

ORCID: 0000-0001-9001-3291

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Yüksek Lisans Tezi

Nisan 2023

ÖZET

Son yıllarda, enerji ve çevre sorunları giderek daha fazla öne çıkmaya başlıyor. Lityum-iyon pil ile çalışan elektrikli araçlar bu sorunları hafifletmede büyük bir potansiyel avantaj sağlamaktadır. Lityum-iyon piller, diğer pillerle karşılaştırıldığında yüksek özgül enerji, yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömür, düşük kendi kendine deşarj oranı ve uzun raf ömrü gibi avantajlara sahiptir. Elektrikli araçlarda güç kaynağı olarak kullanılan lityum-iyon pillerin sıcaklık kontrolü, batarya performansı açısından oldukça önemlidir.

Çalışmada, Lityum NCA 18650 tipi 22 adet pil paralel olarak birbirine bağlanmıştır. Piller 4 sıra halinde 6-5-6-5 grup biçiminde yerleştirilerek bir batarya termal yönetim sistemi tasarlanmıştır. Bu batarya termal yönetim sistemi için, 3 farklı kanal U, 2-U ve 4-U bükümlü kanal yapıları modellenerek, kanallarda akışkan bölme sayıları ve soğutucu akışkanın kanallara giriş yönleri değiştirilerek modeller incelenmiştir. Parametrik çalışmalar için ele alınan, FloEFD programı ile oluşturulan 4-U bükümlü 4 bölmeli dalgali kanal için bataryanın soğuma etkileri incelenmiştir. Soğutucu akışkan olarak kullanılan suyun sıcaklığı ile çevre sıcaklığı 25°C, çalışma basıncı ise 1 atm olarak ele alınmıştır. Farklı C-oranları (1C-2C-3C) ve farklı Reynolds sayılarında (800-1200-1600-2000) FloEFD programı ile sayısal analizler yapılmıştır.

U, 2-U ve 4-U bükümlü kanal analizleri sonucunda, 4-U bükümlü kanal yapısına sahip modelinin, U bükümlü kanala göre T_{mak} değerinin %1,3 azaldığını ve 2-U bükümlü kanala göre de T_{mak} değerinin %2,9 azaldığı belirlenmiştir. 4 bölmeli kanalın 1-2-3 bölmeli kanala göre daha iyi bir performans gösterdiğini ve batarya üzerinde oluşan ısıyı daha fazla düşürdüğünü

bulunmuştur. Ayrıca seçilen kanal yapısında (4-U, 4 bölmeli) yapılan parametrik çalışmalar da lityum-iyon batarya paketinin 1C ve 2C deşarj oranı için farklı Reynolds sayılarında, ideal çalışma sıcaklık aralığında (20°C-40°C) tutulabildiği görölmüştür.

Anahtar Kelimeler: Lityum-iyon batarya, Batarya termal performans, Sıvı soğutma, FLoEFD

Bilim Kodu: 91412, 91408, 91411



NUMERICAL INVESTIGATION OF THE THERMAL MANAGEMENT OF LIQUID COOLED LITHIUM-ION BATTERY PACK IN WAVED CHANNEL

BIROL İPEK

ORCID: 0000-0001-9001-3291

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL

Master of Science

April 2023

ABSTRACT

In recent years, energy and environmental issues are starting to come to the fore more and more. Electric vehicles powered by lithium-ion batteries offer a great potential advantage in alleviating these problems. Compared with other batteries, lithium-ion batteries have advantages such as high specific energy, high energy density, long life, low self-discharge rate and long shelf life. Temperature control of lithium-ion batteries used as a power source in electric vehicles is very important in terms of battery performance.

In the study, 22 lithium NCA 18650 type batteries were connected in parallel. A battery thermal management system was designed by placing the batteries in 4 rows in 6-5-6-5 groups. For this battery thermal management system, 3 different channel U, 2-U and 4-U twisted channel structures were modeled and the models were examined by changing the number of fluid divisions in the channels and the inlet directions of the refrigerant to the channels. The cooling effects of the battery were investigated for the 4-U twisted 4-split wavy channel created with the FloEFD program, which was considered for parametric studies. The temperature of the water used as the refrigerant and the ambient temperature is 25°C, and the working pressure is 1 atm. Numerical analyzes were performed with the FloEFD program at different C-ratios (1C-2C-3C) and different Reynolds numbers (800-1200-1600-2000).

As a result of U, 2-U and 4-U twisted duct analysis, it was determined that the T_{max} value of the model with 4-U twisted duct structure decreased by 1.3% compared to the U-bent duct and the T_{max} value decreased by 2.9% compared to the 2-U twisted duct. It has been found that the 4-

chamber channel performs better than 1-2-3 and reduces the heat generated on the battery more. In addition, parametric studies performed on the selected channel structure (4-U, 4-chamber) have shown that the Lithium-ion battery pack can be kept in the ideal operating temperature range (20°C-40°C) at different Reynolds numbers for 1C and 2C discharge rates.

Key Terms: Lithium-ion battery, Battery thermal performance, Liquid cooling, FLoEFD

Science Code: 91412, 91408, 91411



TEŞEKKÜR

Tez alıőmamda bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, her trl sorunda yanımda olan, benimle çalıőıp bana yol gösteren tez danıőmanım Sayın Prof. Dr. Sinan ÇALIŞKAN' a teşekkür ederim.

Uzaktanda olsa vakit ayırıp yardımcı olan, fikir ve destekleri ile her zaman yanımda olan manevi kardeőlerim Arő. Gör. Osman Bedrettin KARATAŐ, Mak. Yük. Müh. Yunus Emre BAYDAK, Mak. Müh. Burak CENGİZ ve Mak. Müh. Yunus ŐAHBENDEROĐLU' na yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

Ayrıca yaőamım boyunca her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan, tüm eğitim sreerim boyunca yanımda olup kendimi güçlü hissetmemi sağlayan, bana değer veren annem Ayten İPEK, babam Hamdi İPEK ve abim Őenol İPEK'e sevgi ve teőekkürlerimi sunarım.

Saygılarımla

Birol İPEK

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
TABLolar DİZİNİ.....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
RESİMLER DİZİNİ.....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xix
GİRİŞ.....	1

1. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2. BÖLÜM

ELEKTRİKLİ ARAÇ TÜRLERİ

2.1. Tamamen Elektrikli Araçlar (TEA)	19
2.2. Yarı (Mild) Hibrit Elektrikli Araç (YHEA).....	20
2.3. Şarjlı (Plug-in) Hibrit Elektrikli Araçlar (ŞHEA).....	20
2.4. Hidrojen Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (HYHEA)	21

3. BÖLÜM

BATARYALAR VE TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ

3.1. Bataryalar	22
3.2. Elektrikli Araç Sistemlerinde Kullanılan/Kullanılacak Batarya Türleri.....	25
3.2.1. Kurşun-asit bataryalar (Pb-asit)	27
3.2.2. Nikel-kadmiyum bataryalar (Ni-Cd).....	28
3.2.3. Nikel-Metal Hidrat bataryalar (Ni-MH).....	29

3.2.4. Zebra bataryalar.....	29
3.2.5. Çinko-hava bataryalar (Zn-air).....	30
3.2.6. Lityum-kükürt bataryalar (Li-S).....	31
3.2.7. Lityum-hava bataryalar (Li-air)	32
3.2.8. Lityum-iyon bataryalar (Li-ion)	32
3.3. Lityum iyon bataryaların termal karakteristikleri	37
3.3.1. Lityum iyon bataryaların termal sorunları	38
3.3.2. Lityum iyon bataryaların termal davranışları.....	39
3.4. Bataryaların Termal Yönetim Sistemleri.....	41
3.4.1. Bataryaların Termal Soğutma Sistemleri	41

4. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyal Metot.....	48
4.1.1. Seçilen materyallerin karakteristik ve fiziksel özellikleri	48
4.2. Matematiksel Yöntem.....	50
4.3. Sınır ve Başlangıç Koşulları.....	53
4.3.1. Sınır koşulları	53
4.3.2. Başlangıç koşulları	54
4.4. Sayısal Yöntem	54
4.5. Tasarlanan Batarya Termal Yönetim Sisteminin Oluşturulma Basamakları.....	57
4.5.1. Kanal yapısı seçimi (I)	58
4.5.2. Kanal yapısına bağlı bölme sayısının seçimi (II)	62
4.5.3. Bölme sayısına bağlı akışkan akış yönü seçimi (III)	63
4.6. Belirlenmiş Batarya Termal Yönetim Sistemi	65
4.6.1. Belirlenmiş batarya termal yönetim sistemi için parametrik çalışma	67

5. BÖLÜM

BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Kanal Yapısı Seçiminin Bulguları (I).....	69
5.2. Kanal Yapısına Bağlı Bölme Sayısı Seçiminin Bulguları (II)	71
5.3. Bölme Sayısına Bağlı Akışkan Akış Yönü Seçiminin Bulguları (III).....	73
5.4. Parametrik Çalışma Bulguları.....	76
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	101
KAYNAKÇA.....	103



TABLolar DİZİNİ

Tablo	Sayfa
Tablo 3.1. Elektrikli araçlarda kullanılan veya kullanılması planlanan batarya türleri	25
Tablo 3.2. Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların özellikleri.....	26
Tablo 3.3. Lityum iyon batarya tiplerinin karşılaştırılması	37
Tablo 3.4. Lityum iyon bataryaların, ikincil bataryalara karşı avantaj ve dezavantajı	37
Tablo 3.5. Pillerin termal yönetim sistemleri.....	41
Tablo 3.6. Elektrikli araçlarda kullanılan termal yönetim sistemleri.....	42
Tablo 4.1. Lityum NCA 18650 pilin karakteristik özellikleri.....	49
Tablo 4.2. Lityum NCA pilin fiziksel parametreleri.....	49
Tablo 4.3. Suyun fiziksel özellikleri	50
Tablo 4.4. Naylon-66' nın fiziksel özellikleri	50
Tablo 4.5. Kanal bölmelerinin fiziksel parametreleri	62
Tablo 4.6. Parametrik çalışma verileri	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Prizmatik bir pilin şematik diyagramı (a) düz kanallı soğuk plaka (b) eğim kanallı soğuk plaka.....	4
Şekil 1.2. Altı farklı soğutma plakası tasarım modeli	5
Şekil 1.3. Silindirik batarya sisteminde, (a) pillerin dizilim şeması, (b) sisteme giren akışkanın yolu, (c) pil etrafını saran kanalın giriş ve çıkış noktaları.....	6
Şekil 1.4. Temel tasarım hariç, 7 farklı kanal tasarım modeli.....	7
Şekil 1.5. Çift katmanlı mini kanallı soğutucu sayacın, şematik gösterimi	8
Şekil 1.6. Isı emici tasarımı (a) düz kanallı, (b) dalgalı kanallı, (c) dallanmış dalga kanallı.....	10
Şekil 1.7. Serpantin mini kanallı ısı emicinin (a), (b), (c), (d) için konfigürasyonları.....	12
Şekil 2.1. Tamamen elektrikli bir aracın iç yapısı	20
Şekil 2.2. Yarı hibrit bir aracın iç yapısı	20
Şekil 2.3. Şarjlı (plug-in) hibrit elektrikli bir aracın iç yapısı	21
Şekil 2.4. Hidrojen yakıt hücreli elektrikli bir aracın iç yapısı.....	21
Şekil 3.1. Elektrikli araçlarda SOC göstergesi.....	23
Şekil 3.2. Şarj edilebilen bataryaların karşılaştırılması	27
Şekil 3.3. Bir lityum iyon pilin deşarj sürecinin gösterimi	35
Şekil 3.4. Bazı lityum iyon bataryaların, önemli özelliklerinin karşılaştırılması.....	35
Şekil 3.5. 10 A sabit akımda, farklı sıcaklıklarda şarj kapasitesi ve şarj voltaj eğrisi.....	38
Şekil 3.6. Lityum iyon batarya için güvenli sıcaklık ve güvenli gerilim alanı	39
Şekil 3.7. Lityum iyon bataryanın sıcaklığa karşı güç dağılımı	40
Şekil 3.8. Lityum iyon pilin çalışma sıcaklığına göre çevrim ömrü	40
Şekil 3.9. Farklı giriş ve çıkış konumlarında z akışlı hava soğutması	43
Şekil 3.10. Sıvı soğutma sisteminin çalışma prensibi	44
Şekil 3.11. Faz değıştiren malzemelerin sıcaklık ve enerji depolama ilişkisi	45
Şekil 3.12. Faz değıştiren malzemenin, farklı kanat tiplerinde batarya modellemesi	45

Şekil 3.13. Termoelektrik bir sistemin soğutma ve ısıtma prensibi	46
Şekil 3.14. Isı borusu çalışma mantığı	47
Şekil 4.1. Lityum NCA 18650 pilin varsayılan fiziksel görüntüsü.....	49
Şekil 4.2. FLoEFD' de CFD arayüzü.....	55
Şekil 4.3. FloEFD' de pil seçimi arayüzü.....	56
Şekil 4.4. Batarya paketi yapısı... ..	57
Şekil 4.5. Bara montajlı batarya paketi	57
Şekil 4.6. U büküm kanal tasarımı (a) kanal gösterimi, (b) kanalın bataryalı gösterimi	58
Şekil 4.7. 2-U bükümlü kanal tasarımı (a) kanal gösterimi, (b) kanalın bataryalı gösterimi...58	
Şekil 4.8. 4-U bükümlü kanal tasarımı (a) kanal gösterimi, (b) kanalın bataryalı gösterimi...59	
Şekil 4.9. Sayısal çalışmalar arasındaki karşılaştırma	60
Şekil 4.10. Suyun T_{mak} değerinin element sayısına göre değişimi.....	61
Şekil 4.11. Pil üzerine uygulanan mesh yapısı	61
Şekil 4.12. Kanal giriş/çıkış bölme sayıları (a) 1 bölmeli, (b) 2 bölmeli, (c) 3 bölmeli, (d) 4 bölmeli.....	62
Şekil 4.13. Kanal içi akışkan akış yönleri (1. ve 2. durum)	63
Şekil 4.14. Kanal içi akışkan akış yönleri (3. ve 4. durum).....	64
Şekil 4.15. Kanal içi akışkan akış yönleri (5. durum)	64
Şekil 4.16. Kanal yapısı ve bölmelerin fiziksel özellikleri.....	65
Şekil 4.17. Dört bölmeli kanalda akışkanın akış yolu.....	66
Şekil 4.18. Batarya termal yönetim sistemi tasarımı	66
Şekil 5.1. U ve 2-U bükümlü dalgalı kanalın bataryada oluşturduğu sıcaklık dağılımları.....	69
Şekil 5.2. 4-U bükümlü dalgalı kanalın bataryada oluşturduğu sıcaklık dağılımı	69
Şekil 5.3. U, 2-U ve 4-U bükümlü dalgalı kanalın, T_{mak} ve T_{min} değerlerinin karşılaştırılması .70	
Şekil 5.4. Bir bölmeli kanalın batarya üzerindeki sıcaklık dağılımı.....	71
Şekil 5.5. İki bölmeli kanalın batarya üzerindeki sıcaklık dağılımı	71
Şekil 5.6. Üç bölmeli kanalın batarya üzerindeki sıcaklık dağılımı	72

Şekil 5.7. Dört bölmeli kanalın batarya üzerindeki sıcaklık dağılımı	72
Şekil 5.8. Kanal bölme sayılarının T_{max} ve T_{min} değerlerinin karşılaştırılması.....	73
Şekil 5.9. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (1. ve 2. durum)	74
Şekil 5.10. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (3. ve 4. durum)	74
Şekil 5.11. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (5. durum).....	75
Şekil 5.12. Akışkan akış yönlerinin 5 farklı durum için T_{mak} ve T_{min} değerlerinin karşılaştırılması.....	75
Şekil 5.13. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (Analiz-1, $1C_{T_{su}}=25^{\circ}C$, $T_{\zeta}=25^{\circ}C$, $Re=800$).....	76
Şekil 5.14. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-1).....	77
Şekil 5.15. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-1)	77
Şekil 5.16. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (Analiz-2, $1C_{T_{su}}=25^{\circ}C$, $T_{\zeta}=25^{\circ}C$, $Re=1200$)	78
Şekil 5.17. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-2).....	78
Şekil 5.18. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-2)	79
Şekil 5.19. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (Analiz-3, $1C_{T_{su}}=25^{\circ}C$, $T_{\zeta}=25^{\circ}C$, $Re=1600$)	79
Şekil 5.20. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-3).....	80
Şekil 5.21. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-3)	80
Şekil 5.22. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (Analiz-4, $1C_{T_{su}}=25^{\circ}C$, $T_{\zeta}=25^{\circ}C$, $Re=2000$).....	81
Şekil 5.23. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-4).....	81
Şekil 5.24. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-4)	82
Şekil 5.25. T_{mak} ve T_{min} değerlerinin karşılaştırılması (Analiz 1-2-3-4).....	82
Şekil 5.26. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (Analiz-5, $2C_{T_{su}}=25^{\circ}C$, $T_{\zeta}=25^{\circ}C$, $Re=800$).....	83
Şekil 5.27. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-5).....	83
Şekil 5.28. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-5)	84

Şekil 5.29. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (Analiz-6, 2C_T _{su} =25°C_T _ç =25°C_Re=1200).....	84
Şekil 5.30. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-6).....	85
Şekil 5.31. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-6)	85
Şekil 5.32. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (Analiz-7, 2C_T _{su} =25°C_T _ç =25°C_Re=1600).....	86
Şekil 5.33. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-7).....	86
Şekil 5.34. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-7)	87
Şekil 5.35. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (Analiz-8, 2C_T _{su} =25°C_T _ç =25°C_Re=2000).....	87
Şekil 5.36. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-8).....	88
Şekil 5.37. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-8)	88
Şekil 5.38. T _{mak} ve T _{min} değerlerinin karşılaştırılması (Analiz 5-6-7-8).....	89
Şekil 5.39. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (Analiz-9, 3C_T _{su} =25°C_T _ç =25°C_Re=800).....	89
Şekil 5.40. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-9).....	90
Şekil 5.41. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-9)	90
Şekil 5.42. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (Analiz-10, 3C_T _{su} =25°C_T _ç =25°C_Re=1200).....	91
Şekil 5.43. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-10).....	91
Şekil 5.44. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-10).....	92
Şekil 5.45. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (Analiz-11, 3C_T _{su} =25°C_T _ç =25°C_Re=1600).....	92
Şekil 5.46. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-11).....	93
Şekil 5.47. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-11).....	93
Şekil 5.48. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (Analiz-12, 3C_T _{su} =25°C_T _ç =25°C_Re=2000).....	94
Şekil 5.49. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-12).....	94
Şekil 5.50. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-12).....	95

Şekil 5.51. T_{\max} ve T_{\min} değerlerinin karşılaştırılması (Analiz 9-10-11-12).....	95
Şekil 5.52. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-9, $T_{\text{su,g}}=20^{\circ}\text{C}$).....	96
Şekil 5.53. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-9, $T_{\text{su,g}}=20^{\circ}\text{C}$).....	96
Şekil 5.54. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-9, $T_{\text{su,g}}=14^{\circ}\text{C}$).....	97
Şekil 5.55. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-9, $T_{\text{su,g}}=14^{\circ}\text{C}$).....	97
Şekil 5.56. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-9, $T_{\text{su,g}}=15^{\circ}\text{C}$).....	98
Şekil 5.57. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-9, $T_{\text{su,g}}=15^{\circ}\text{C}$).....	98
Şekil 5.58. Deşarj oranlarının zamana bağlı sıcaklık değişimi	99
Şekil 5.59. 1C-2C-3C' de batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi	100
Şekil 5.60. Batarya paketinin üstten görünüşü.....	102

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Kurşun asit bir bataryanın iç yapısı	28
Resim 3.2. Nikel-Kadmiyum pilin iç yapısı	28
Resim 3.3. Ni-MH pil türleri	29
Resim 3.4. Zebra batarya yapısı	30
Resim 3.5. Çinko-Hava batarya.....	31
Resim 3.6. Lityum-kükürt batarya	31
Resim 3.7. Prototip bir lityum-hava bataryanın çalışma mantığı	32
Resim 3.8. Lityum iyon polimer batarya	33
Resim 3.9. Lityum-demir-fosfat (LiFePO ₄) batarya	34
Resim 3.10. Lityum-İyon pillerin iç yapısı (a) silindirik hücre, (b) prizmatik hücre, (c) zarf tipi hücre.....	36

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklamalar ve Birimler
A	Amper
Ah	Amper-saat
C	Akım oranı
C_{act}	Mevcut kapasite
C_n	Nominal kapasite
C_p	Isı kapasitesi [J/kgK]
D	Çap [m]
E	Exponential (Üstel)
E_f	Basınç düşüşü ceza faktörü
E_{hn}	Isı transferi iyileştirme faktörü
f	Sürtünme faktörü
g	Yerçekimi ivmesi [m/s^2]
Gr	Grashof sayısı
h	Konvektif ısı transfer katsayısı [W/m^2K]
I	Akım [A]
K	Kelvin sıcaklık parametresi
k	Termal iletkenlik [W/mK]
kPa	Kilopaskal
kW	Kilowatt
L	Litre
MPa	Megapaskal
ms	Milisaniye
N	Kanal sayısı

N_{cc}	Su soğutmalı bileşen miktarı
Nu	Nusselt sayısı
Pr	Prandtl sayısı
Re	Reynolds sayısı
Q_a	Birikmiş ısı [W]
Q_b	Batarya kapasitesi
Q_e	Isı alışverişi [W]
Q_p	Üretilen ısı [W]
sn	Saniye
T_{avg}	Ortalama sıcaklık [°C]
T_{in}	Giriş sıcaklığı [°C]
T_{max}	Maksimum sıcaklık [°C]
$T_{w,in}$	Soğutucu giriş sıcaklığı [°C]
V	Volt
V_{ef}	Her girişin akış hızı [m/s]
W	Watt
Wh	Waat-Saat
α	Kanal açısı [°]
β	Hacim genleşme katsayısı [1/K]
ΔT_{max}	Ortalama maksimum sıcaklık [°C]
ε	Yüzey pürüzlülüğü [μm]
η_e	Batarya coulomb verimliliği
μ	Dinamik viskozite [Pa.s]
μm	Mikrometre
ρ	Yoğunluk [kg/m^3]
ν	Sıvının kinematik viskozitesi [m^2/s]

Kısaltmalar	Açıklamalar
CFD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
CMCHS	Cylindrical Micro Channel Heat Sink (Silindirik mikro kanallı ısı emici)
DOD	(Dept of Discharge) (Deşarj derinliği)
EDR	Entransy Dissipation Rate (Giriş dağılım oranı)
GWP	Global Warming Potential (Küresel ısınma potansiyeli)
HFE	Hidrofloroeter
HTC	Heat Transfer Coefficient (Isı transfer katsayısı)
HYHEA	Hidrojen Yakıt Hücreli Elektrikli Araç
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Yalıtımlı iki kutuplu kapı transistörü)
MAE	Mean Absolute Error (Ortalama mutlak hata)
MCDM	Multi Criteria Decision Making (Çok kriterli karar verme)
NSGA	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (Baskın olmayan genetik algoritmayı sıralama)
PEC	(Public Evaluation Coefficient) (Evrensel Değerlendirme Katsayısı)
PCS	Phase Change Slurry (Faz değişim bulamacı)
SOC	(State of Charge) (Şarj durumu)
SOH	(State of Healt) (Sağlık durumu)
ŞHEA (PHEV)	Şarjlı Hibrit Elektrikli Araç

TEA (BEV)	Tamamen Elektrikli Araç
YHEA	Yarı Hibrit Elektrikli Araç
Zebra	Zero Emission Battery Research Activity (Sıfır emisyonlu batarya araştırma etkinliği)
3D	Three Dimensional (3 Boyutlu)



GİRİŞ

Her geçen gün dünya nüfusundaki artış, beraberinde motorlu taşıt kullanımını da arttırıyor. Fosil yakıt kullanan bu motorlu taşıtlar zaman içerisinde yüksek miktarda çevre ve gürültü kirliliğine ayrıca sera gazı oluşumuna sebep olmaya başladılar. Fosil yakıtlara duyulan yüksek ihtiyaç, dünya üzerinde fosil yakıtların çok hızlı bir şekilde azalmasına yol açtı. Bu durum için yeni çözüm arayışları başladı, hem fosil yakıt kullanımını azaltmak hem de çevre ve gürültü kirliliğini minimum seviyeye düşürmek için yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan, Elektrikli ve Hibrit Elektrikli taşıtlar geliştirilmeye başlandı. Bu geliştirilen araçlar fosil yakıtlı araçlara göre, bakım ve tamir ihtiyaçlarının az olması, ulaşım maliyetlerinin daha ucuz olması gibi avantajlara sahiptirler. Genellikle bu taşıtların ana enerji kaynakları, bataryalardır. Bataryalar enerjinin üretilmesi, depolanması ve dönüşümü için çok önemli bir yere sahiptir. Genel olarak lityum iyon pil takımı (batarya) kullanan taşıtlar bu pil takımı sayesinde tekrar şarj edilebilmektedirler. Lityum iyon piller yüksek enerji ve akım yoğunluğu, uzun kullanım ömrü, bakım kolaylığı gibi birçok sebepten en çok tercih edilen pil türüdür. Kuşkusuz, yüksek bir performans gösteren lityum iyon piller, döngü (şarj/deşarj) sırasında çok fazla ısı üretirler. Lityum iyon pillerdeki bu yüksek ısı, batarya içerisinde dengesiz bir ısı dağılımına sebebiyet vererek pillerin kullanım ömrünün kısalmasına, kapasite kaybı yaşamasına, performans kaybına ve hatta güvenlik sorunları (yanma ve patlama) yaşamasına yol açabilir. Bu gibi sorunların yaşanmaması için batarya ısıl yönetim sistemleri geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, Lityum NCA (nikel-kobalt-alüminyum) 18650 tipi pillerden bir batarya termal modeli oluşturulmuştur. Batarya için sıvı soğutma sistemi tasarımı yapılarak, Lityum-iyon pillerin ısıl homejenliğini sağlamak ve ideal çalışma sıcaklığına getirilmesi üzerine parametrik bir sayısal çalışma yapılmıştır. Çalışmada kullanılacak olan batarya ısıl yönetim sisteminin, literatüre önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

1. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürdeki bazı kaynaklar incelendiğinde, batarya ısı yönetim sistemleri için soğutma yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar ve bu konuda bize temel hazırlayan mini kanallarda akış ve ısı transferi üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. İncelenen kaynaklarda, yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar hakkında kısa bilgiler verilmiştir.

Choi ve ark. (2023), bir batarya ısı yönetim sisteminin ısı ve hidrolik performansının, soğutma plakası üzerindeki durumu incelenmiştir. Isı transferi verimliliği, soğutma akışkan hızı için düz kanaldan farklı olarak, genişleyen kanal aralarına, eğik kanatlı yeni bir soğutma plakası önerilmiştir. CFD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) analizi yapılarak şu sonuçlar elde edilmiştir; pil hücreesindeki sıcaklık farkı %19,07 ve sıcaklık normal sapması %27,14 olarak geliştirilmiştir. Düz kanala göre kütle akış hızı %33,3 azaltıldığı ayrıca soğutma pompasının güç tüketiminin ise %67,8 oranında azalarak, geliştirildiği görülmüştür.

Liu ve ark. (2023), yapmış oldukları çalışma da kese tipi lityum iyon pil için biyonomik yaprak damar dalı modeli tasarlanmıştır. Soğutma plakası için giriş debisi $M=10$ m/s, kanal genişliği $D=2,6$ mm, kanal sayısı $N=15$, kanal açısı $\alpha=159^\circ$ olarak alınmıştır. CFD analiz kullanılarak yapılan simülasyon çalışmasında, α 'nın artması ya da N 'nin azalması plaka çıkışında geri akış ve girdapların çoğalmasına sebebiyet verdiğinden T_{max} (maksimum sıcaklık) ve ΔT_{max} (ortalama maksimum sıcaklığın) azalmasını sağlamıştır. Sonuç olarak yeni tasarlanan biyonomik yaprak damar dalı modeli, geleneksel paralel düz kanal ile karşılaştırıldığında $M=0,10$ m/s olduğunda T_{max} 'ın $0,23^\circ\text{C}$ ile $1,12^\circ\text{C}$ aralığında azaltılabileceği ve ΔT_{max} 'ın ise $0,28^\circ\text{C}$ ile $1,64^\circ\text{C}$ aralığında azaltılabileceği görülmüştür.

An ve ark. (2023), yapılan bu çalışma da, silindirik lityum iyon pil için sıvı soğutma ve bileşik faz değişim malzemesi kombinasyonuna sahip yeni bir petek termal yönetim sistemi geliştirilmiştir. Ortam sıcaklığı 40°C 'de, deşarj hızı 4C 'de ve akışkan hızı 0.06 m/s olarak sabit tutulmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda, batarya termal yönetim sisteminin (BTYS) en yüksek sıcaklığının 46.21°C olduğu ve piller arasındaki sıcaklık farkının 3.5°C 'de kontrol edilebileceği bulunmuştur, ayrıca geliştirilen termal yönetim sisteminin, kompozit faz değiştiren malzemeye oranla daha iyi bir performans sergilediği bulunmuştur.

Li ve ark. (2023), silindirik lityum iyon pil bataryası için hızlı şarj koşulları altında soğutulması için, FS49 (özel bir akışkan kodu) tabanlı yeni bir sıvı daldırılmalı termal yönetim sistemi test edilmiştir. Bataryada toplam da 21 pil kullanılmıştır. Bu piller, 3 paralel kola ayrılarak her bir kol içerisinde seri bağlı şekilde 7 pilden oluşturulmuştur. Sonuç olarak, 2C ve 3C oranlarında

önerilen sıvı daldırma termal yönetim sisteminin en yüksek sıcaklığı, cebri hava soğutma ile kıyaslandığında 7,7°C ve 19,6°C azaltıldığı görülmüştür.

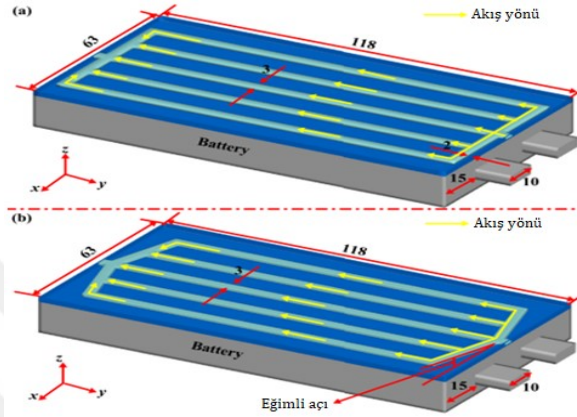
Shun-Bo ve ark. (2023), bu çalışmada geleneksel Z tipi ve U tipi batarya termal modellerinin çıkış konumları değiştirilerek yeni batarya termal yönetim sistemi modeli geliştirilmiştir. Batarya paketi dokuzar olarak 4 sıra halinde toplam da 36 adet, 21700 tipi silindirik lityum iyon pilden oluşturulmuştur. Sonuç olarak, çıkış noktası batarya modülünün üst kısmında olduğunda ya da girişe daha yakın bir çıkış noktası ele alındığında daha iyi bir soğutma performansı sağladığı bulunmuştur. Ayrıca giriş rüzgâr hızı 5 m/s alındığında, geleneksel Z tipi termal yönetim sistemine göre sıcaklığın yaklaşık 3°C düştüğü görülmüştür.

Guo ve ark. (2022), kese tipi lityum iyon pillerin termal yönetimi için 5 farklı pim kanat dizilimine sahip mini soğuk plaka tasarlanmıştır. Bunlar; 4x3, 3x4 aşamalı, 4x4 sıralı, 4x3 dikey ve 4x3 kanala yatay olarak tasarlanmış pim kanatlarıdır. Çalışmalar CDF simülasyon kullanılarak yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, tasarlanan dairesel pimler ile pil paketi içindeki sıcaklığın sırası ile 1,01-1,51-1,71-1,8-1,85K azaltılabileceği görülmüştür. Pim kanatçıkları olan soğut plakalar pim kanatı olmayanlara göre 1 den büyük verimlilik indeksi sağlanmıştır, ayrıca yatay olarak düzenlenmiş pim kanatlarına sahip tasarım dikey olarak düzenlenmiş pim kanatlarına göre %4,54 daha düşük bir verimlilik indeksi olduğu bulunmuştur. 4x4 sıralı pim kanatçıklarının tüm tasarımlardan daha iyi bir termal davranışa sahip olduğu belirlenmiştir.

Thomas ve ark. (2022), prizmatik lityum iyon pillerin arasına, alüminyum soğutma kanalı konularak ve bu kanallardan 3 farklı akışkanın su, therminol VP-1 ve etilen glikol geçirilerek pilin termal özellikleri sayısal bir simülasyon olan, COMSOL Multiphysics 5.6 ile incelenmiştir. Optimize edilmiş koşullar altında giriş akış hızları etilen glikol için 3,25 cm³, therminol VP-1 için 5,5 cm³ ve su için 2,25 cm³ olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, 4 cm³/s giriş debisi altında ısı transfer akışkanları için kanatçık başına soğutma debisinin 0,8 cm³/s ile suyun prizmatik pilleri soğutmada daha verimli olduğu sonrasında etilen glikol' ün ve en düşük verimli olarak therminol VP-1 olduğu bulunmuştur.

Zhang ve ark. (2022), yapılan bu çalışma da 20 Ah kapasiteli kese tipi prizmatik lityum demir fosfat (LiFePO₄) pili soğutmak için 2 farklı mini soğuk plaka karşılaştırılmıştır. 5 kanallı düz bir kanala sahip soğuk plaka ile giriş ve çıkış açısı 15° eğimli olan 5 kanallı düz plaka karşılaştırılmıştır (Şekil 1.1). Çalışmada 3 farklı soğutucu akışkan kullanılmıştır bunlar; su, mineral yağ ve su-glikol karışımıdır. Ortam sıcaklığı ve soğutucu akışkan sıcaklığı 25°C' de, Re (Reynolds sayısı) 2300 den az, soğuk levha ve pilin yan yüzeyi ısı transfer kat sayısı 5W/m²K ile sabit tutulmuştur. Çalışma ANSYS Fluent 19.2 programı ile yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda şu bilgilere ulaşılmıştır. 15° eğimli kanalın basınç kaybı, düz olan kanala göre %4,42 oranında azalmıştır, ayrıca en fazla basınç kaybının mineral yağ akışkanının da sonrasında su-

glikol karışımın da en az basınç kaybının ise su da olduğu görülmüştür. Eğim açısı 15° ve kütle akış hızı $0,6 \text{ g/s}$ alındığında, düz kanalı soğuk plakaya göre %79,64 oranında daha iyi bir performans sağlandığı görülmüştür.



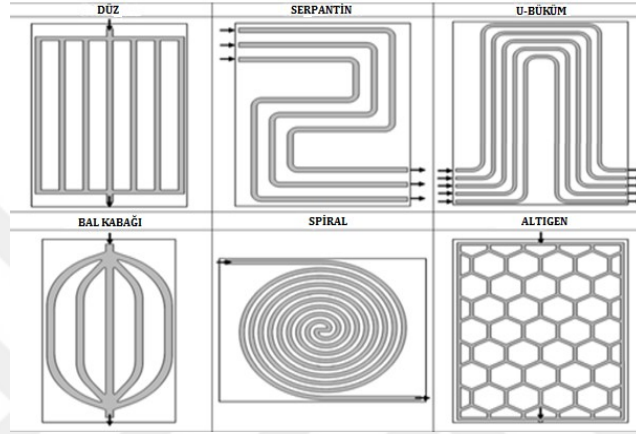
Şekil 1.1. Prizmatik bir pilin şematik diyagramı (a) düz kanallı, (b) eğim kanallı (Zhang ve ark. 2022)

Salimi ve ark. (2022), kese tipi lityum iyon piller için daha iyi bir termal yönetim sağlamayı amaçlamışlardır. Yeni farklı dalga genliklerine sahip, mini kanallı birlikte akış ve karşı akış modelleri için soğutucu plakalar tasarlanmıştır. Çalışma CFD analiz kullanılarak yapılmıştır. Sonuç olarak, farklı genliklere sahip yeni dalgalı soğuk plakanın geleneksel dalgalı soğuk plakaya oranla %38,7 oranında sıcaklık homojenliğini iyileştirebileceğine ulaşılmıştır. İkinci sonuç olarak, karşı akış modelinin birlikte akış modeline göre sıcaklık homojenliğini $0,54 \text{ K}$ ' den $0,14 \text{ K}$ ' e düşürülebileceği bu da geleneksel dalgalı mini kanallarda soğutucu plakanın maksimum sıcaklık farkını, ortalama %73,1 azaltılabileceği görülmüştür.

Gua ve ark. (2022), yapmış oldukları bu çalışma da 3C deşarj hızı altındaki lityum iyon piller için topoloji optimizasyonu ile oluşturulan yeni soğuk plakalar tasarlanmıştır. Çalışmalar COMSOL Muliphysics 5.4 sayısal simülasyon programı ile yapılmıştır. Sonuç olarak, 20 Ah kese tipi LiFePO_4 pili soğutmak için 4 kademeli girişi olan, giriş genişliği 6 mm, akış derinliği 4 mm ve kütle akış hızı $3 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ olan topoloji mini kanalın, düz mini kanala göre %61,82 oranında iyileştirilebileceği görülmüştür.

Monika ve Datta (2022), lityum iyon pillerin sıcaklık değişimini düzenlemek için daha önceden tasarlanmış 6 farklı mini soğuk plaka karşılaştırılmıştır (Şekil 1.2). Bunlar; düz, serpantin, bal kabağı, spiral, altıgen ve u-büküm tasarımlardır. Tüm kanal tasarımları T_{avg} (ortalama sıcaklığı) 40°C ' in altında, $T_{w,in}$ (soğutucu giriş sıcaklığı) 25°C ' de ve m_w (suyun kütle akış hızı) 3×10^{-3}

kg/s olarak alınmıştır. 3C deşarj hızına sahip pil modülünü soğutmak için sayısal analiz yöntemi olan CFD' den yararlanılmıştır. Sonuç olarak, akış ayırma kanalları olan tasarımların spiral tasarımdan daha iyi bir ısı transferi sağladığı bulunmuş ve bal kabağı kanal tasarımının en iyi soğutma verimliliği ardından altıgen ve serpantin kanalın geldiği görülmüştür. En düşük soğutma verimliliğini ise spiral tasarım olduğu bulunmuştur.

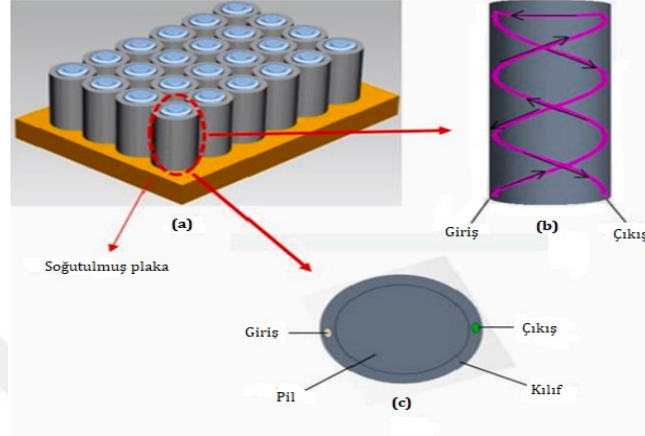


Şekil 1.2. Altı farklı soğutma plakası tasarım modeli (Monika ve Datta, 2022)

Liang ve ark. (2022), silindirik lityum iyon pilleri soğutmak için birleştirme tabanlı su soğutmalı yeni bir mini kanal modellenmiştir. COMSOL yazılımı ile yapılan bu çalışma da 35°C yüksek ortam sıcaklığında, 3C büyük deşarj oranında olumsuz koşulların 3 önemli parametre üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Bu parametreler; V_{ef} (her girişin akış hızı), N_{cc} (su soğutmalı bileşen miktarı) ve T_{in} (giriş suyu sıcaklığı) dir. Sonuç olarak, giriş akış hızı $9 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, su soğutmalı bileşen miktarı 4 ve giriş suyu sıcaklığı 34°C olarak optimize edilmiştir, böylece pil hücreleri arasındaki performans tutarlılığı ile pil ömrünün uzatılabileceği kanısına varılmıştır.

Dong ve ark. (2021), yapmış oldukları çalışma da 18650 silindirik lityum iyon piller için ısı transfer kapasitesini arttırmaya yönelik çift sarmal soğutma yapısı önerilmiştir (Şekil 1.3). Çalışmada kütle akış hızı (M), sarmal oluk aralığı (P) ve akış çapı (D) alınarak soğutma performansı üzerindeki etkileri NSGA II (çok amaçlı genetik algoritma) ile bu 3 faktör optimize edilmiş ve optimum tasarım parametrelerini bulmak için MCDM (çok kriterli karar verme algoritması) kullanılmıştır. Algoritmanın tek faktörlü analizinden kütle akış hızı $2 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ ' den büyük olduğunda pil sıcaklığının 40°C' nin altına düşebileceği fakat kütle akış hızını arttırmanın da soğutma etkisi üzerinde bir sınırı olduğu bulunmuştur. Yapılan çalışmalar

sonucunda en iyi soğutma performansını veren değerlerin, kütle akış hızı $1,94 \times 10^{-3}$ kg/s, sarmal oluk aralığı 100 mm ve akış çapının 0,4 mm olduğu aralık belirlenmiştir.



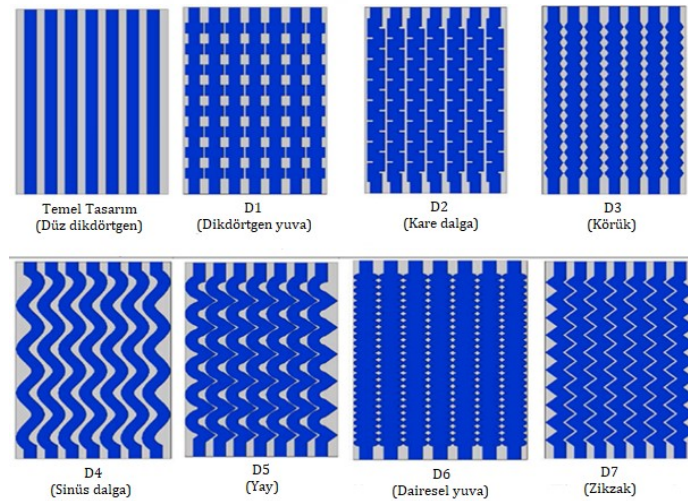
Şekil 1.3. Silindirik batarya sisteminde, (a) pillerin dizilim şeması, (b) sisteme giren akışkanın yolu, (c) kanalın giriş ve çıkış noktaları (Dong ve ark. 2021)

Yates ve ark. (2021), yapmış oldukları bu çalışmada 5C deşarj hızında silindirik 18650 lityum iyon pil için iki sıvı su soğutma tasarımı sayısal olarak modellenmiştir. Ortam hava sıcaklığı 298K ve Reynolds sayısı 2300' den küçük alınmıştır. ANSYS Fluent 18.1 ile yapılan bu çalışmada, mini kanal soğutmalı silindir ve kanal soğutucu üzerinde kanal sayısı, kütle akış hızı ve soğutucu akışkan giriş konumlarının etkileri incelenmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda, kanal sayısının artması hücrenin maksimum sıcaklığını düşürdüğü ve optimum kanal sayısının 8 olduğu, kütle akış hızı arttıkça maksimum sıcaklığın azaldığı, soğutucu girişi pil ucuna en yakın yerleştirildiğinde optimum soğutma performansı sağladığı bulunmuştur. Kütle akış hızları $5E-05$ kg/s' nin üzerinde olan her iki tasarım için maksimum sıcaklığın 313 K' nin altında tutulabileceğine ve maksimum sıcaklık değişiminin 3,15K' den daha az şekilde kontrol edebileceği görülmüştür.

Kalkan ve ark. (2021), kese tipi lityum iyon piller için yeni bir su soğutmalı mini kanal önerilmiştir. 1C' den 5C' ye kadar deşarj oranında, akışkanın kanala giriş sıcaklıkları 15-35°C aralığında ve su akış hızları 0,1-1,1 L/dak arasında olacak şekilde termal performans, CFD simülasyon kullanılarak incelenmiştir. Sonuç olarak, 15°C de soğutucu akışkan girişi yapıldığında, pil sıcaklığının ortam sıcaklığının altına düştüğü görülüyor. Pil sıcaklığındaki en yüksek azalma, 5C deşarj oranında, 15°C' de ve 1,1 L/dak akış hızında 5,7°C olarak ölçülüyor. Aynı koşullar (5C, 15°C, 1,1 L/dak) altında geleneksel kıvrımlı kanala göre, ısı transfer hızında %22 bir iyileşme, basınçta ise %44 oranında azalma olduğu sonucuna varılıyor.

Celen ve Kaba (2021), elektrikli araçlar için kullanılan silindirik tip lityum iyon bataryadan meydana gelen 10x10 kare şeklindeki pil grubunun, havayla ve sıvı Novec 7200 ile soğutulması incelenmiştir. Giriş sıcaklığı 15-35°C arasında ve değişken deşarj hızlarında bataryada ortaya çıkan ısı üretimi 2-6W arasında, ayrıca Reynolds sayısı 22559-67678 ile ortalama batarya sıcaklığı ve basınç kaybına tesiri ele alınmıştır. Sonuç olarak, hava sıcaklığının 15°C ve üzerinde olan havalarda, hava soğutmanın yeterli olmadığı onun yerine sıvı soğutmanın kullanılması gerektiği belirlenmiştir.

Amalesh ve Lakshmi Narasimhan (2020), yapmış oldukları çalışma da 5 adet 45 Ah lityum iyon pilden oluşan 3C deşarj hızına sahip prizmatik lityum iyon pil modülünü soğutmak için, 7 farklı mini kanallı dikdörtgen soğuk plakalar modellenmiştir (Şekil 1.4). Bunlar; dikdörtgen yuva (D1), kare dalga (D2), körük (D3), sinüs dalga (D4), yay (D5), dairesel yuva (D6) ve zikzak (D7) dir. Sonuç olarak, önerilen tüm kanallar, geleneksel düz dikdörtgen mini kanallardan daha iyi bir performans sağlamıştır ve yüksek deşarj koşullarında pilleri 40°C' nin altına soğutabilmektedir. Pil modülünü soğutmak için seçilebilecek en iyi kanalların D6 ve D7 kanalının olduğu belirlenmiş ve her iki kanal da pilin maksimum sıcaklığını <13°C ile sınırlandırabileceği bulunmuştur. D6 kanalının ise D7 kanalına oranla daha düşük basınç kayıpları olması nedeniyle daha iyi bir performans sunduğu görülmüştür.

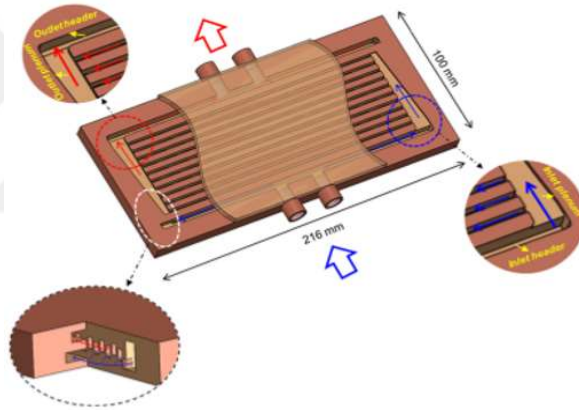


Şekil 1.4. Temel tasarım hariç, 7 farklı kanal tasarım modeli (Amalesh ve Lakshmi, 2020)

Huang ve ark. (2019), lityum iyon akü termal yönetimi için genel soğutma performansını iyileştirmek amacıyla, çok kanallı soğutma plakasına yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Tipik ve düz çizgi şeklindeki kanalların dağılım özellikleri incelenmiştir. Dikdörtgen yapıdaki mini kanalın eni 63 mm, boyu 118 mm, kanal yüksekliği 1 mm, kanallar arası mesafe de 3 mm olacak

şekilde tasarlanmıştır. Akış direncinin, aerodinamik şekil tasarımı uygulandığında en aza indirildiği görülmüştür. Aerodinamik şekil tasarımı ile ısı eşanjörü verimliliğinin maksimum %44,52 kadar iyileştirilebileceği bulunmuştur. Sıcaklık homojenliğinin de etkili bir şekilde geliştirilebileceğini göstermiştir. Bununla beraber sonuç olarak, mini kanal soğutma plakası lityum iyon pil termal yönetimi için umut verici bir çözüm olabileceği düşünülmüştür.

Lim ve Lee (2019), sıcaklık gradyanının artmasını hafifletmek ve soğutma performansını iyileştirmek için, birbirine kenetlenen çift katmanlı yapıya sahip 2 fazlı ters akışlı mini-kanallı ısı emici önermişlerdir (Şekil 1.5). Önerilen mini-kanallı ısı emici eni 100 mm, boyu 216 mm olarak dikdörtgen biçiminde, ticari IGBT modül boyutuna göre tasarlanmış ve her bir sayaç akış yönünde 1-D (1-boyutlu) iki fazlı akış uygulanarak sayısal olarak analiz edilmiştir. Analizin sonuçlarına göre, zıt akışlı ısı emicinin geleneksel tek yönlü ısı emiciden daha düzgün bir sıcaklık dağılımı sağlayabildiği doğrulanmıştır.



Şekil 1.5. Çift katmanlı mini kanallı soğutucu sayacın, şematik gösterimi (Lim ve Lee, 2019)

Tikadar ve ark. (2019), paralel kanallar arasındaki çapraz akışın ara bağlantılarla sağlandığı, paralel ve karşı akışlı mini kanallı ısı alıcıların akışkan akışı ve ısı transfer performansının üç boyutlu şeklini sayısal olarak incelenmiştir. İncelenen mini kanalın en boy oranı ve hidrolik çapı sırasıyla 0,33 mm ve 750 µm olarak tasarlanmıştır. Mini kanal da soğutucu akışkan olarak su kullanılmıştır. Sonuç olarak, ara bağlantı parçasının, paralel akışlı mini kanala kıyasla ters akışlı mini kanallı soğutucu üzerinde önemli ölçüde büyük bir etkiye sahip olduğu çıkarılmıştır.

Pu ve ark. (2019), süper kritik basınçlarda hidrokarbon yakıt RP-3' ün yatay dikdörtgen bir mini kanalda, konvektif ısı transferi ve akış direnci özellikleri üzerine deneysel bir araştırma yapılmıştır. Adyabatik sürtünme basıncı düşüşü 3-5 MPa, akışkan sıcaklıkları 350-750K arasında incelenmiştir. Dikdörtgen kanaldaki Reynolds geçiş sayısı aralığı 1700-3200 olarak

belirlenmiştir. Sonuç olarak adyabatik sürtünme basıncı düşüşünün arttığı, laminer ve geçiş akış rejimi için Nu (Nusselt) korelasyonları geliştirilmiştir.

Li ve ark. (2019), yapmış oldukları çalışma da tek bir lityum iyon pil hücresinin ve 14 prizmatik pilden oluşan 50V lityum iyon pil paketinin 3D termal modellemesi yapılmıştır. Soğuk plaka soğutmalı lityum iyon batarya üzerindeki sıcaklık şekilleri üzerinde çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, mini soğutucu akü modülünün ortasına sıvı soğutuculu soğuk plaka, lityum iyon akü paketi için sıcaklık artışını ve sıcaklık derecesini kontrol eden çok etkili bir soğutma yöntemi olduğu bulunmuştur.

Chu ve ark. (2019), yapmış oldukları çalışma da, dielektrik akışkan HFE-7100 (Hidrofloroeter-7100) ve 1,21 mm hidrolik çaplı bir mikro kanallı soğutucuda yoğunlaşmasını deneysel olarak incelenmiştir. Testler 110 kPa'lık sabit bir basınçta, kütle akışları 150-250 kg/m²s ve -90° - +90° arasında değişen açılarda yapılmıştır. Temel olarak drenaj tasarımını düşük kütle rejimlerinde uygulamanın daha etkili olabileceği bulunmuştur.

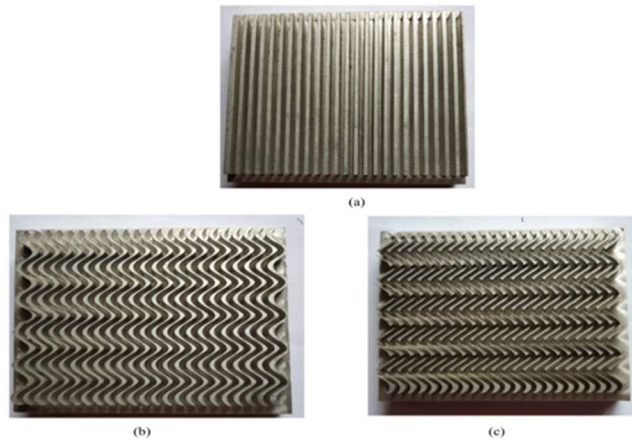
Zhang ve ark. (2019), yapmış oldukları çalışma da yüksek ısı akısı ve büyük ısı gücü termal yönetimi için sıvı galinstan bazlı mini kanal soğutmanın deneysel olarak incelemesi yapılmıştır. Mini kanal soğutucunun kanal genişliği 1 mm, yüksekliği 5 mm olarak tasarlanmıştır. 1500 W ısı gücü ile soğutma sıvısı olarak galinstan kullanılarak mini kanal soğutucusunun ısıl performansı ve hidrodinamik özelliği elde edilmiştir. Sonuçlar, su bazlı mini kanal soğutması ile karşılaştırıldığında, galinstan bazlı mini kanal soğutmasının çok daha büyük bir ısı transfer artışı sağlayabildiğini ve galinstan bazlı mini kanal soğutma havuzunun basınç kayıplarının, su bazlı mini kanal soğutmadan çok daha düşük olduğunu anlaşılmıştır. Ayrıca, galinstan esaslı mini kanalın soğutma sistemi, hareketli parçası olmayan elektromanyetik pompa kullanarak sessiz, sabit ve sorunsuz bir şekilde çalıştırılabileceği bulunmuştur.

Deng ve ark. (2019), dikdörtgen lityum iyon piller için, yapısal teoriye göre yaprak benzeri soğuk levhanın ısı dağılımını optimize etmişlerdir. Simetrik/asimetrik bifurkasyonun ayrılma noktası, simetrik bifurkasyonun genişlik oranı, giriş kütle akış hızı, besleme kanallarının sayısı ve ana kanalın soğutma plakasının ısıl performansı üzerindeki etkileri sayısal olarak simüle edilmiştir. Sonuçlar, ana kanal genişliğinin optimizasyonu, basınç düşüşünü azaltmada en büyük etkiye sahip olması ve ayrılma noktası dış kanalın sınır konumuna yakın olduğunda ısı dağılımının daha iyi olduğunu göstermiştir.

Bai ve ark. (2019), yapmış oldukları çalışma da lityum iyon kese batarya modülü için faz değişim malzeme bulamacına (PCS) ve mini kanal soğutma plakasına dayalı termal yöntem önerilmiştir. Üç boyutlu termik modeli kurulmuş ve mini kanal ile soğutma plakasına uygun yapı ile dizayn edilmiştir. Sonuçlar, yöntem pili etkili bir şekilde soğutmuştur ve su soğutmalıdan daha iyi bir performans gösterdiği bulunmuş, ayrıca boyutsuz ampirik formüller elde edilmiştir.

Kumar ve Singh (2019), yapmış oldukları çalışma da daha iyi akış dağılımı ve ısı aktarımı performansı için $\theta=90^\circ$, $\theta=105^\circ$ ve $\theta=120^\circ$ gibi farklı akış giriş açısına sahip, giriş ve çıkış düzenlemeli bir mini kanallı ısı emici önerilmiştir. Toplam da 28 adet paralel mini kanal kullanılmıştır. Çalışma sıvısı olarak su kullanılmıştır ve malzeme olarak alüminyum seçilmiştir. Önerilen bu mini kanal ısı emicisi, Ansys-Fluent yardımı ile sayısal olarak analiz edilmiştir. Sonuç olarak, $\theta=105^\circ$ olduğunda önerilen giriş ve çıkış düzeneğine sahip bir mini kanallı ısı emici, ısı emicinin paralel kanallarında homojen bir akış dağılımına sahip olmuştur bu da geleneksel giriş ve çıkış düzenlemesine kıyasla daha az düzensiz akış dağılımı oluşmuştur.

Kumar ve ark. (2019), hava soğutmalı mini kanal soğutucuların termal ve hidrolik performanslarının yeni geometrilerde incelenmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır (Şekil 1.6). Mini kanal ısı emici de soğutma için hava kullanılmıştır. 3 boyutlu sayısal hesaplama için Ansys Fluent programı kullanılmıştır. Reynolds sayısı 300 ile 1900 arasında değişen farklı hava debileri kullanılmıştır. Soğutucu tabanına 20 W ve 30 W ısıtma gücü uygulanmıştır. Sonuç olarak dalgalı mini kanal tasarımı ısı transfer hızını arttırmada ümit verici bir faktör oluşturmıştır.



Şekil 1.6. Isı emici tasarımı (a) düz kanallı, (b) dalgalı kanallı, (c) dallanmış dalga kanallı (Kumar ve ark. 2019)

Belchi (2019), yapmış olduğu çalışma da R513A ve R1234yf' nin R134a için yedek soğutucu akışkan olma potansiyelini deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. R134a' nın küresel ısınma potansiyeli (GWP) 1300 olarak bulunmuştur. Bu düşük GWP değeri nedeniyle, çevresel hususlara göre R134a' nın yerini almaya teşvik edilebileceği bulunmuştur. Yüksek yoğuşma sıcaklıklarında mini kanallı bir tüp içindeki diyabetik faz değiştirme işlemlerinin performanslarına odaklanılmaktadır. Sonuç olarak bu geometrinin kullanımı, mini kanallı ısı

değiştiricilerinin soğutucu akışkan şarjının azalmasına ve dolayısıyla doğrudan emisyonlara izin vermiştir. Tasarladıkları geometriler de elde edilen yüksek ısı transfer katsayıları (HTC) nedeninden dolayı emisyonların da azaltıldığı bulunmuştur.

Khalifa ve Jaffal (2019), silindirik mini kanallı ısı alıcılarının (CMCHS), termal ve hidrolik performanslarının yapısal teori ve bütünlük prensibine dayanan sayısal ve deneysel çalışmaları sunulmuştur. Düz, helisel ve dalgalı kanalın en, boy oranı 0,467-4, katı boşluk oranı %80, %85, %90, adım oranı 1,5-1,8-2,1-2,4-2,7 ve dalga genlik oranı 0,032-0,048-0,062-0,080-0,095 olarak tasarlanmıştır. Sonuçlar sayısal simülasyon ve deneysel test sonuçlarının karşılaştırılmasında Nu sayısı için, maksimum %16 sapma görülmüştür. Helisel kanalı olan bir silindirik mini-kanallı ısı emicilerin performansı diğer kanal konfigürasyonlarından daha yüksek olduğu bulunmuştur. Helisel kanal, tercihen en düşük toplam EDR (giriş dağılım oranı) ile optimal bir kanal konfigürasyonu sunmuştur.

Xiang ve ark. (2018), bu çalışma da mikro kanallı ısı alıcılarının toplam termal dirençleri açısından sıvı galyum ve su arasındaki soğutma performansları karşılaştırılmıştır. Tek değişkenli çalışma ilk kez yapılmıştır ve elde edilen mikro kanal parametrelerinin kritik değerleri, mikro kanallı ısı alıcılarının soğutucu olarak su veya sıvı galyum kullananlarla aynı toplam ısı direncine sahip olduğu elde edilmiştir. Ardından 3 boyutlu uygulanabilir bölgelerin içinde sıvı galyumun sudan daha iyi bir soğutma performansına sahip olduğu çok değişkenli bir çalışma yapılmıştır. Sonuç olarak galyum bazlı ısı emicisinin su bazlı olanından daha küçük bir termal direnç sağlayabildiği bulunmuştur, ayrıca soğutucu olarak sıvı metaller kullanan mikro kanallı ısı alıcılarının tasarımında rehberlik sağlayabileceği görülmüştür.

Chen ve ark. (2018), yapmış oldukları çalışma da yatay mini kanallar da akış kaynama kararsızlığı, sıvı azotun akış beslemesiyle, akış kaynağını birleştiren sayısal bir model geliştirilerek incelenmiştir. Ledinegg kararsızlığı kullanılarak, basınç düşüşü ve yoğunluk dalgası salınımı incelenmiştir. Sonuç olarak, ısı akışı ve giriş alt soğutmasının sabit durum karakteristik eğrilerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

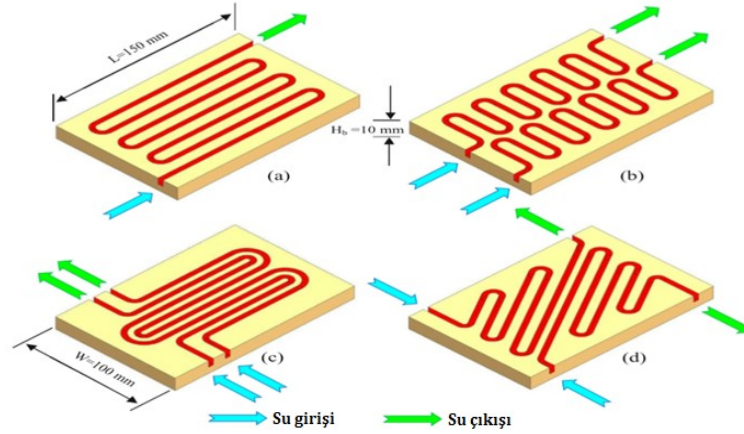
Kim ve Go (2018), yaptıkları çalışma da R-134a' nın yatay bir düzlem içinde dört yassı tüpe dağılımı araştırılmıştır. Bir elektrikli aracın aküsünü simüle etmek için testlerinde 600W' lık bir güç kaynağı kullanılmıştır. Testler 280 ila 480 kg/m²s arasında değişen kütle akıları ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ısı eşanjörü eğiminin akış dağılımı üzerindeki etkilerinin, giriş portu oryantasyonundan daha yaygın olduğunu göstermiştir ve ısı eşanjörünün eğimi arttıkça da akış dağılımının kötüleştiği bulunmuştur.

Najim ve ark. (2018), soğutma amacıyla su-etanol ve su-metanol sıvı film karışımlarının art arda buharlaşması ve yoğunlaşmasını incelenmiştir. Simülasyonlar, ısı ve kütle transferini tanımlamak için sonlu bir fark modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışılan işlem, buharlaştırıcıdaki enerjinin emilimine ve daha sonra bu enerjinin yoğunlaştırıcıda salınmasına

dayanır. Sonuç olarak, alkollerdeki kütle fraksiyonunun karışımlardaki ısı ve kütle transferi üzerindeki etkisi bulunmuştur. Ayrıca saf suyun, enerji kaybının azalttığını ve iyi bir enerji dengesi oluşturduğu görülmüştür.

Wen ve ark. (2018), yapmış oldukları çalışma da kaynama ısı transferi ve soğutucu akışkan R134a' nın mini kanalda yeni korelasyonunun araştırılması üzerine yapılmıştır. Hidrolik çapları, 23 dikdörtgen kanal için 0,63 mm, 14 dikdörtgen kanal için 0,72 mm olarak alınmıştır. Deneyde 2 çeşit kanal incelenmiştir. Kanal yapımı için alüminyum alaşım kullanılmıştır. Sonuç olarak R134a' nın mini kanalda akış kaynama ısı transferi için yeni bir korelasyon önerilmiştir.

Imran ve ark. (2018), 3D serpantin mini kanallı ısı emicinin, 4 farklı geometrik konfigürasyonunu incelenmiştir (Şekil 1.7). Bu konfigürasyonlar daha sonra nümerik olarak simüle edilmiş ve deneysel olarak test edilmiştir. Sonuçlar, önerilen konfigürasyonların performansının karşılaştırmasında, iki girişli ve iki çıkışlı serpantinlerin, bir giriş ve bir çıkışa sahip geleneksel serpantin ile karşılaştırıldığında etkili bir şekilde arttığını incelenmiştir. Konvansiyonel serpantin (a), maksimum basınç düşüşü ile en kötü sıcaklık dağılımını sergilemiştir. Konfigürasyon (b), minimum termal dirençle birlikte ısı transferinde maksimum gelişme göstermiştir.



Şekil 1.7. Serpantin mini kanallı ısı emicinin (a), (b), (c), (d) için konfigürasyonları (Imran ve ark. 2018)

Saeed ve Kim (2018), nanoakışkan kullanan mini kanal soğutucularının termal ve hidrolik performansı incelenmiştir. Mini kanal da soğutucu madde olarak $Al_2O_3-H_2O$ (alüminyum oksit-su) kullanılmıştır. Üç farklı kanal konfigürasyonuna sahip soğutucu ve iki farklı hacim konsantrasyonuna ve damıtılmış suya sahip nano-akışkanlar kullanılarak ısı transfer karakteristikleri test edilmiştir. Sonuç olarak, konvektif ısı transfer katsayısının, damıtılmış su

ile karşılaştırıldığında, nano-sıvıların kullanılmasıyla önemli ölçüde arttığını ortaya koyulmuştur.

Malhotra ve ark. (2017), yapmış oldukları çalışma da tek bir serpantinli mini kanal boyunca hava-su akışı sırasında akış düzenleri ve basınç düşüşü özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak halka akışı ve sümüklü böcek akışının baskın akış düzenleri olduğu gözlenmiştir. Dikey yöndeki basınç düşüşünün yataydan daha yüksek olduğu bulunmuştur. Yatay yönelim, akış rejimlerinin düzgün olmayan dağılımına daha yatkın olduğu bulunmuştur.

Lu ve ark. (2017), farklı iç çaplara sahip dikey kanallardaki akış kaynama ısı transfer mekanizmasını incelemek için deneysel bir araştırma yapılmıştır. Test bölümünün ısıtma bölümü paslanmaz çelik borudan yapılmıştır. Ek olarak bu çalışma da, farklı iç çaplar, giriş suyu sıcaklıkları, kütle akışları ve ısı akışları ile akış kaynama ısı transferinin özellikleri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Sonuç olarak, dikey kanallardaki ısı transfer katsayılarını tahmin etmek için Chen korelasyonunda modifiye edilmiş ve yeni bir korelasyon sunulmuştur.

Saeed ve Kim (2017), yapmış oldukları çalışma da dağıtıcı ve toplayıcı başlık boyutlarını minimum da tutarken soğutucu akışkanın soğutucu kanalların da eşit akış dağılımını sağlamak için sayısal olarak analitik bir model geliştirilmiş ve test edilmiştir. Matematiksel model Matlab' da kodlanarak, farklı geometrik parametrelerin başlıktaki basınç düşüşü ve başlık büyüklüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Farklı kanal geometrisi konfigürasyonları için önerilen başlık şekilleri, ticari bir Ansys-CFX kodu kullanılarak sayısal olarak test edilmiştir. Sonuç olarak verimli başlık tasarımı, soğutucuların performansını önemli ölçüde arttırdığı bulunmuştur.

Yang ve ark. (2017), mikro ve mini kanallı ısı emicilerin akış ve termal modellemesi hakkında kapsamlı bir karşılaştırma ve tartışma sunmak için araştırma yapılmıştır. Mikro ve mini kanallı soğutucuların akış ve ısıl performansı için, hem mikro ölçekte hem de milimetre ölçekte, su soğutması ve sıvı metal soğutması için genel bir optimizasyon süreci geliştirilmiştir. Sonuç, modellenen tasarım da sıvı metal soğutma, su soğutmadan çok daha üstün akış ve termal performans sergilemiştir.

Zhang ve ark. (2017), yapmış oldukları çalışma da basınç düşüşü dalgalanma haritaları üç mini kanalda sunulmuştur. Gazı alınmış su, 1,2-1,6 mm ve 2,0 mm çaplar da dairesel yatay mini kanalda test edilmiştir. Sıvı kütle akıları 21,2-42,4 ve 84,8 kg/m²s alınmıştır. Isı akısı da 0-216 kW/m² aralığında alınmıştır. İki fazlı akışta üç temel tip basınç düşüşü dalgalanması tespit edilmiştir. Sonuçlar, basınç düşüşü dalgalanma bölgesi, ısı akısının ve kütle akısının oranına ve kanal çapına bağlı olduğu bulunmuştur. Ayrıca basınç düşüşünün ve duvar sıcaklığının, periyodik buhar atılımı süreci ile yaklaşık aynı dalgalanma süresine sahip olduğu bulunmuştur.

Vasileiadou ve ark. (2017), yaptıkları çalışma da iki fazlı akışlı ısı transferi, 5 mm iç hidrolik çaplı kare kanal da dikey yönde incelenmiştir. Deneyler, çevresindeki havanın 40°C' de tutulduğu kontrollü bir sıcaklık ortamında gerçekleştirilmiştir. Kızılötesi termografi, kanalın dış duvar sıcaklığını belirlemek için kullanılmıştır ve yerel ısı transfer katsayısı, yerel duvar sıcaklığından ve sıvının doyma sıcaklığından tahmin edilmiştir. Çalışma sıvıları olarak etanol ile birlikte deiyonize su kullanılmıştır. Kütle akıları 0,33-0,66 ve 1,00 kg/m²s olarak, su akısı da 2,8-4,2 ve 6,1 kW/m alınarak test edilmiştir. Sonuç olarak, etanolün suya %5 oranında eklenmesi her iki saf bileşenden daha yüksek bir ısı transfer katsayısı elde edilmiştir bu da ısı transferini arttırmıştır.

Panchal ve ark. (2017), yapmış oldukları çalışma da deneysel ve sayısal teknikler kullanılarak, prizmatik bir lityum-iyon pil hücrelerine yerleştirilen mini-kanal soğuk plakası içindeki sıcaklık ve hız dağılımlarının karşılaştırmalı bir çalışmasını yapmışlardır. Çalışma, 1C ve 2C deşarj oranlarında ve 5°C, 15°C ve 25°C' de farklı çalışma sıcaklıklarında su soğutma yöntemleri için yapılmıştır. Hesaplama ve modelleme Ansys Fluent programı ile yapılmıştır. Sonuçlar, artan tahliye oranlarının ve artan çalışma sıcaklığının, soğuk plakaların sıcaklığının artmasına neden olduğunu gösterilmiştir, ayrıca lityum iyon pillerinin ısıl güvenliğine katkıda bulunabileceği çıkarılmıştır.

Li ve Hibiki (2017), mini ve mikro çoklu kanallar da iki fazlı akış için sürtünme basıncı düşüşü için yeni bir korelasyon araştırılmıştır. 11 literatürden, mini ve mikro çok kanallı iki fazlı akışın 1029 sürtünme basıncı düşme verisi toplanmıştır. Bu veri tabanında 8 çalışma sıvısı bulunmuş: R134a, R22, R404a, FC-72, H₂O, CO₂, R236fa ve R245fa dır. Kanal boyutu 0,109 ile 2,13 mm arasında değişmiştir. Toplanan veri tabanından sürtünme basıncı düşme aralığının 5 kPa ile 150 kPa olduğu bulunmuştur. Mini ve mikro tek kanallar için geliştirilen mevcut 11 korelasyonun, mini ve mikro çok kanallara uygulanabilirliği, çok kanallı veri tabanı ile değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, yeni korelasyon geliştirme sürecinde mini ve mikro çok kanallı iki fazlı akış sürtünmeli basınç düşüşü tahmininde mükemmel bir performans göstermiştir.

Shibahara ve ark. (2017), yapmış oldukları çalışma da üssel olarak artan ısı girişlerine sahip, küçük bir tüp içerisindeki soğutulmuş su için, sabit ve geçici kritik ısı deneysel olarak incelenmiştir. Deneyde, dik olarak monte edilmiş, iç çapı 1 mm ve uzunluğu 47,4 mm olan paslanmaz çelik boru kullanılmıştır. Yukarı akış hızı 9,4 m/s ile 13,4 m/s arasında değişmiştir. Giriş alt soğutması 85 K ile 145 K arasında ve ısı üretim hızının süresi 82 ms ile 30 sn arasında değişmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, kritik ısı akışları, ısı üretim hızlarının azalması ve akış hızının arttığını göstermiştir.

Attalla ve ark. (2016), dikdörtgen kesitli kaba mini kanalların akışkan akışı ve ısı aktarımı üzerine deneysel araştırma yapılmıştır. Tasarlanan mini kanal 4 mm genişliğinde, 8 mm

yüksekliğinde ve 80 mm uzunluğunda on iki adet dikdörtgen kanaldan oluşmuştur. Re 1500 ile 5000 arasında değiştirilmiş ve çalışma sıvısı olarakta hava kullanılmıştır. ϵ (göreceli yüzey pürüzlülüğü) $1,6 \times 10^{-4}$, $3,45 \times 10^{-4}$, $6,15 \times 10^{-4}$ ve $10,5 \times 10^{-4}$ olarak alınmıştır. Sürtünme faktörü (f), Nusselt sayısı (Nu), basınç düşüşü faktörü (E_f), ısı transferi geliştirme faktörü (E_{hn}) ve evrensel değerlendirme parametresi (PEC), dikdörtgen kesitli kaba mini kanalların akışkan akışını ve ısı transferini incelemek için değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, ϵ ve PEC arasında bir korelasyon elde edilmiştir.

Qian ve ark. (2016), yapmış oldukları çalışma da lityum iyon akü paketinin ısı performansını araştırmak için mini kanallı soğuk plakaya dayanan bir tür sıvı soğutma yöntemi kullanılmış. Çalışma da üç boyutlu sayısal model oluşturulmuştur. Kanal sayısının, giriş kütle akış hızının, akış yönünün ve kanal genişliğinin pil takımının ısı davranışları üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Soğutma verimliliğini ölçmek için maksimum sıcaklık ve sıcaklık homojenliği kullanılmıştır. Sonuçlar, mini-kanallı soğuk plakalı termal yönetim sistemi, akü paketi sıcaklığını kontrol etmede iyi soğutma verimliliği sağladığı görülmüştür, ayrıca 2 kanallı soğuk bir plaka, boşaltma süresinin yarısından fazlasında maksimum sıcaklığı 40°C ' nin altında tutabildiği görülmüştür. Kanal sayısı arttıkça soğutma verimliliği de artmıştır. Bununla birlikte, kanal sayısı 5' i aşan soğuk plakanın belirgin avantajlarının olmadığı tespit edilmiştir.

Pistoresi ve ark. (2015), bir dizi paralel mini kanal arasında düzgün bir akış dağılımı elde etmek için dağıtıcı ve toplayıcı boruların şekilleri optimize edilmeye çalışılmıştır. Z tipi bir merdiven ağında 10 adet mini kanalın akım dağılımı incelenmiştir. Bir merdiven şekli ve bir konik şekil, dağıtıcı ve toplayıcı olarak test edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Çalışma, Ansys Fluent programı kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar, çok düşük akış hızı koşullarında düzgün akış dağılımına ulaşılmıştır ayrıca daha büyük eğimli açılı veya daha az kanal seçimi düzgün dağılım için daha uygun olduğu görülmüştür.

Oyinola ve ark. (2015), yapmış oldukları çalışma da kompakt (ince ve hafif) güneş enerjisi toplayıcıları için mikro kanal geometrisinin, emme plakalarının ısı ve hidrolik performansları üzerindeki etkilerini araştırmak için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Kanal derinliği 0,25 mm, 0,5 mm ve 1 mm olan üç plaka üzerinde çalışılmıştır. Her plaka, 270 mm uzunluğunda ve 2 mm genişliğinde 60 kanaldan oluşmuştur. Deneysel çalışmalar sonucunda ısı transfer katsayısının akışkan hızı ile arttığı, Nu sayısının en boy oranıyla arttığı ve 0,25 mm derinliğe sahip mini kanalın en iyi termo-hidrolik performansa sahip olduğu bulunmuştur.

Yu ve ark. (2015), yuvarlanma hareketi altında, mini dikdörtgen bir kanaldaki sıcaklık dalgalanma özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deney farklı yuvarlanma açıları, periyotları ve Re sayıları altında gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, yuvarlanma hareketinin akış hızının, çıkış suyunun sıcaklığının ve dış duvar yüzeyinin periyodik olarak dalgalanmasına neden olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, ortalama Re sayısı ile sıcaklık

değişiminin genleşmesinin değişmesi, akış hızı artışının önde gelen faktörüne ve ısı transferi artışına bağlı olduğu bulunmuştur.

Zhao ve ark. (2015), yapmış oldukları çalışma da mini kanal sıvı soğutmalı silindire dayalı silindirik piller için yeni bir tür soğutma yöntemi önerilmiştir. Kanal miktarı, kütle debisi, akış yönü ve giriş büyüklüğünün, ısı yayma performansı üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, mini kanal sayısı dörtten az olmadığında ve giriş kütle akış hızı 1×10^{-3} kg/s olduğunda, 42110 silindirik pil için maksimum sıcaklığın 40 °C' nin altında kontrol edilebileceğini göstermiştir.

Anwar ve ark. (2015), yaptıkları çalışma da yukarı akış koşulları altında küçük, tek dikey tüplerde yedi soğutucunun (R134a, R1234yf, R152a, R22, R245fa, R290 ve R600a) kuruması üzerine deneysel sonuçlar bildirilmiştir. Deneyler, paslanmaz çelik borularda 0,64-1,70 mm ve 213-245 mm uzunluğunda çok çeşitli çalışma koşullarında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar kurutma ısı akışı, kütle akışının artmasıyla ve tüp çapının artmasıyla artmıştır. Değişken doyma sıcaklığının etkisi gözlenmemiştir. Kurulama koşullarında ısı akışının öngörülmesi için yeni bir korelasyon önerilmiştir.

Kozłowska ve ark. (2015), soğutma sıvısı taşıyan mikro kanal soğutucu, sayısal olarak modellenmiş ve deneysel olarak çalışılmıştır. Cam mikro borulardan oluşan, prototip bakır mikro-kanal soğutucu oluşturulmuş ve test edilmiştir. Soğutucuya monte edilmiş yüksek güçlü lazer çubuk ile sıcaklık profili için bir kızılötesi görüntüleme yöntemi kullanılmıştır. Sonuç olarak, 3 boyutlu sayısal mikro ısı alıcılı bir model geliştirilmiştir. Önerilen bu soğutucu modelin yüksek güçlü lazer diyot dizileri için ilginç bir çözüm olduğu bulunmuştur.

Deng ve ark. (2014), yapmış oldukları çalışma da yoğuşma ısı ve mini kanalların içindeki ikili karışımların kütle transfer özelliklerini incelemek için bir model sunulmuştur. Buhar fazındaki kütle ve ısı transfer dirençleri göz önüne alınarak, kütle, tür, momentum ve enerjinin korunum denklemleri, yüksek dereceli sonlu elemanlar metodu kullanılarak çözülmüştür. Simülasyon sonuçları sonucunda farklı kütle karışımları, duvar ısı karışımları ve giriş basınçları için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Buhar fazındaki ısı ve kütle transferi dirençlerinin, özellikle yüksek niteliklerde, yoğuşma işlemi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gösterilmiştir.

Wang ve Wang (2014), mini-mikro kanallarda faz değişimi, akış ve ısı transferi incelenmiştir. Buhar dinamiği, akış kararsızlıkları, ısı transfer özellikleri ve korelasyonlar özetlenmiştir. Sonuç olarak, en boy oranlı enine kesit geometriye sahip mikro kanalların, ısı transferini geliştirmede ümit verici faydalar gösterdiği anlaşılmıştır.

Belchi ve ark. (2014), yapmış oldukları çalışma da R1634yf, R134a ve R32 hidrolik çapı 1,16 mm olan mini kanallı bir tüp içinde iki fazlı akış basınç düşüşü rapor edilmiştir. Deneysel veriler, basınç düşüşündeki doyma sıcaklığının, kütle hızlarının, buhar kalitesinin ve akışkan

özelliklerinin etkisini göstermek için analiz edilmiştir. Analiz sonucu olarak, %8,32' lik bir ortalama mutlak bağıl sapma değeri ile yeni bir korelasyon modeli sunulmuştur ve yapılan çalışmada en iyi korelasyonda ortalama mutlak bağıl sapma değeri %34' ten daha fazla azaltabilmiştir.

Ho ve ark. (2014), faz değiştirmeli nano kapsüllerin su bazlı süspansiyonlarının ısı transfer özellikleri, mini kanallı bir soğutucu ve ısı kaynağı ile doğal bir dolaşım döngüsünde incelenmiştir. Her biri 0,8 mm genişliğe, 1,2 mm derinliğe, 50 mm uzunluğa ve 0,96 mm hidrolik çapa sahip toplam 34 dikdörtgen mini kanal, bakır bloklara eşit olarak yerleştirilmiştir. Sistemde saf su kullanılmıştır. Sonuçlar, duvar sıcaklığının azalmasında %0,5' lik süspansiyon en belirgin olarak etki ettiği bulunmuştur, ayrıca düşük sıcaklıkta süspansiyonun yüksek viskozitesi, ısı transferini etkilediği görülmüştür. Son olarak faz değişimi, nano kapsüllerin dikkate alınan doğal dolaşım döngüsünün ısı transfer performansını belirgin şekilde arttırabileceği gösterilmiştir.

Wang ve ark. (2013), yapmış oldukları çalışma da çok kanallı termik modüllerin basınç düşümü ve ısı transfer özellikleri kantitatif olarak incelenmiştir. Üç adet mini kanal model tasarlanmıştır ve basınç düşüşü ve ısı transfer karakteristikleri üzerinde deneyler yapılmıştır. Düzenli düz kanallı modeli ile dikdörtgen ve u-biçim kesitli iki genişleme kanallı model arasında karşılaştırmalar yapılmıştır, ayrıca mini kanalların tasarımı için bakır kullanılmıştır. İlk model, 1 mm x 3 mm dikdörtgen kesite sahip 14 adet düz ve paralel kanaldan yapılmıştır. İkinci model, 0,5 mm x 3 mm' lik bir giriş bölümünden başlayan ve 1 mm x 3 mm' lik bir çıkış bölümüne yükselen ve U şeklinde bir enine kesiti olan 14 kademeli genişletme kanalından oluşur. Üçüncü model, dikdörtgen kesiti haricinde ikinci modelin aynısıdır. Sonuç olarak, görsel gözlemler ve ölçülen kaynama eğrilerine bakıldığında düz kanallarda, bazı baloncukların kanallardan yeterince hızlı bir şekilde atlamadığı görülmüştür, bu yüzden geri akış girişte birikme eğilimi göstermişlerdir. Bunların etkisiyle kanal çıkışında benzer bir sıcaklık artışı altında, genişleyen kanalların maksimum ısı uzaklaştırma oranı 27 W/cm' ye ulaşmıştır, bu oranda düz kanallara oranla iki kat fark yaratmıştır.

Bi ve ark. (2013), yaptıkları çalışma da çukurlu, silindirik oluklu ve alçak kanatlı mini kanallarda konvektif soğutma ısı transferi, saha sinerji prensibi kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Değerlendirme katsayısı olarak PEC parametresi, gelişmiş yüzeylerin kapsamlı performansını incelemek için kullanılmıştır. Sonuç olarak, çukurlu mini kanal yüzeyinin en yüksek ısı transferi katsayısına sahip olduğu bulunmuştur.

Derby ve ark (2012), mini kanallardaki yoğuşma ısı, transfer katsayıları, özel olarak tasarlanmış üç bakır test bölümü kullanılarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, kütle akısının ve kalitesinin, düşük kütleli akılarda bile yoğunlaşma prosesinde önemli etkiye sahip olduğu, doyma basıncı, ısı akısı ve kanal şeklinin önemli bir etkisi olmadığı belirlenmiştir.

Wang ve ark. (2012), yapmış oldukları çalışma da akışın kaynama noktasındaki ısı transferi içinde, yüksek en-boy oranlı, mikro-kanalda incelenmiştir. Şeffaf ısıtma tekniği ve termografik araçlar kullanılmıştır. Hidrolik çapları 571 μm , 762 μm ve 1454 μm olan dikdörtgen mikro kanallar kullanılmıştır. Kütle akıları, 11,2 $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$, 22,4 $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ve 44,8 $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ seçilmiş ve çok çeşitli ısı akıları kullanılmıştır. Deneysel ölçümlerde şeffaf ısıtma tekniği ve termografik araçlar kullanılmıştır. Sonuç olarak, 10 ısı transferi korelasyonu değerlendirilip, en iyi %23,6 MAE (Ortalama Mutlak Hata) değerini elde ettikleri korelasyon önerilmiştir.

Guo ve ark. (2011), dar kanallarda kaynama kabarcığı dinamiği mekanizmasını araştırmak için, I ve Z şeklinde genişlikleri 2 mm olan iki tür mini kanal araştırılmıştır. Akış alanı, su ve etanol gibi iki farklı ortam türüyle simüle edilmiştir. Simülasyon için Ansys Fluent programı kullanılmıştır. Sonuçlar, Z-şekilli kanallar daha yüksek bir ısı transfer katsayısına sahiptir ancak daha büyük bir basınç düşüşü göstermişlerdir, ayrıca su aynı kanallarda etanolden daha yüksek bir ısı transfer katsayısını yansıtmıştır.

Qi ve ark. (2009), yapmış oldukları çalışma da deneysel olarak yeni tip bir mini kanal buharlaştırıcı önerilmiş ve incelenmiştir. Evaporatör, bir geri dönüş tankı ile bağlanmış, iki paralel akışlı mini-kanallı ısı eşanjöründen yapılmıştır. Deneyler, psikrometrik kalorimetre test tezgahı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Geleneksel lamine evaporatör test verileriyle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, yeni mini kanalın evaporatörün hacminin %17,2 daha küçük, %2,8 daha hafif ve ısı transfer katsayısının %4,3 daha yüksek olduğunu, ancak basınç düşüşü konusunda biraz geride kaldıklarını göstermiştir.

Huai ve ark. (2005), soğutma koşullarında yatay çok portlu mini kanallarda süper kritik karbon dioksitin hem yerel hem de ortalama basınç düşüşü ve ısı transfer özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deney olarak süper-kritik CO_2 ' nin akışkan ve ısı transfer özelliklerini, iç çapı 1,31 mm olan 10 adet dairesel kanaldan oluşan yatay çok portlu ekstrüzyonlu alüminyum da test edilmiştir. Hem lokal hem de ortalama basınç düşüşü 7,4 ile 8,5 MPa arasında değişmiştir. Sonuçlar, çalışma basıncının, kütle hızının ve CO_2 sıcaklığının, akışkan ve ısı transfer özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada toplanan deneysel verilere dayanarak, soğutma koşullarında yatay çok portlu mini kanallarda süper kritik CO_2 ' nin zorla taşınımı için yeni bir korelasyon geliştirilmiştir.

2. BÖLÜM

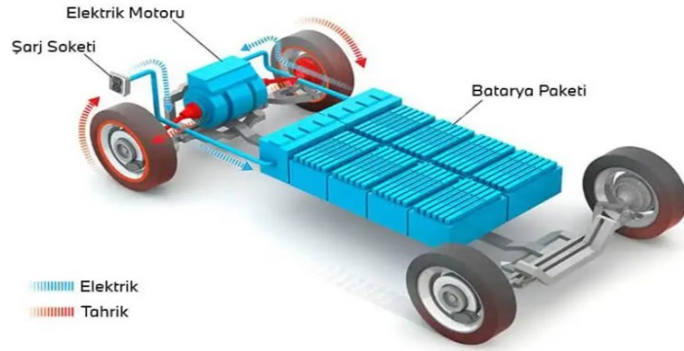
ELEKTRİKLİ ARAÇ TÜRLERİ

Elektrikli araç türleri ana başlık altında, tamamen elektrikli araçlar, hibrit elektrikli araçlar ve hidrojen yakıt hücresel elektrikli araçlar olmak üzere üç sınıfa ayrılmıştır. Hibrit elektrikli araçlar kendi içlerinde hibritleşme oranları, konfigürasyon ve güç aktarma topolojisine göre ekstra dallara ayrılmıştır. Aşağıdaki bölümde, piyasada en çok bulunan dört araç türüne değinilmiştir.

- * Tamamen Elektrikli Araçlar (TEA)
- * Yarı (Mild) Hibrit Elektrikli Araçlar (YHEA)
- * Şarjlı (Plug-in) Hibrit Elektrikli Araçlar (ŞHEA)
- * Hidrojen Yakıt Hücresel Elektrikli Araçlar (HYHEA)

2.1. Tamamen Elektrikli Araçlar (TEA)

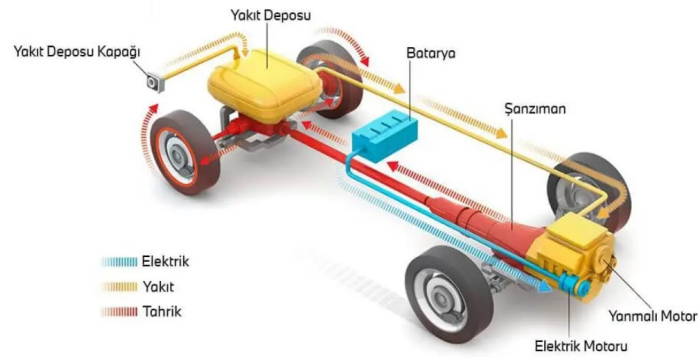
Bu tür araçlarda içten yanmalı motor bulunmayıp sadece elektrik motoru kullanılır. Bu da TEA'nın en iyi özelliklerinden biri, emisyon olmamasıdır. Bu sayede CO₂ salınımı ve sera gazı etkilerini ortadan kaldırır. Elektrik motorunun çalışması için gerekli olan enerji, bataryadan alınan elektrik ile sağlanır. TEA için batarya kapasitesi çok önemlidir, batarya kapasitesi aracın gideceği maksimum mesafeyi belirlemede en önemli etkenlerden biridir. Maksimum mesafe, araç bataryasının tek şarj ile gideceği en uzak mesafe olarak belirlenir. Bataryalar hem şarj istasyonlarında hem de ev tipi şarj kurulumu ile evlerde de doldurulabiliyor. İstenirse araç içine menzil arttırıcı konularak, bataryanın sürüş esnasında bitmemesi için benzinle çalışan jeneratörün bataryaya sağladığı elektrik enerjisi sayesinde bataryanın boşalması engellenir (BMW, t.y.). Şekil 2.1' de tamamen elektrikli aracın batarya, elektrik motoru ve şarj soket yerinin içyapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Tamamen elektrikli bir aracın içyapısı (BMW, t.y.)

2.2. Yarı (Mild) Hibrit Elektrikli Araç (YHEA)

İçten yanmalı motoru olan araçların, hem yakıt tüketimlerine hem de araç motoruna destek olan elektrik motoru tasarımına sahiptirler. Araçta bulunan elektrik motoru, arabaların kalkışlarda yakıt ateşlemesine gerek duymadan hareketini sağlarlar. Hareket halinde daha fazla güce ihtiyaç duyulduğunda elektrik motoru devreye girerek aracın performansını artırır. Batarya şarjı sadece, aracın frenlemesiyle ortaya çıkan enerjiyi depolamasıyla kendini şarj eder (BMW, t.y.). Bu tür araçlar şarj istasyonlarını kullanmaz. Şekil 2.2’ de batarya, yakıt ve tahrik elemanlarının araç içerisindeki konumlanma yerleri gösterilmiştir.

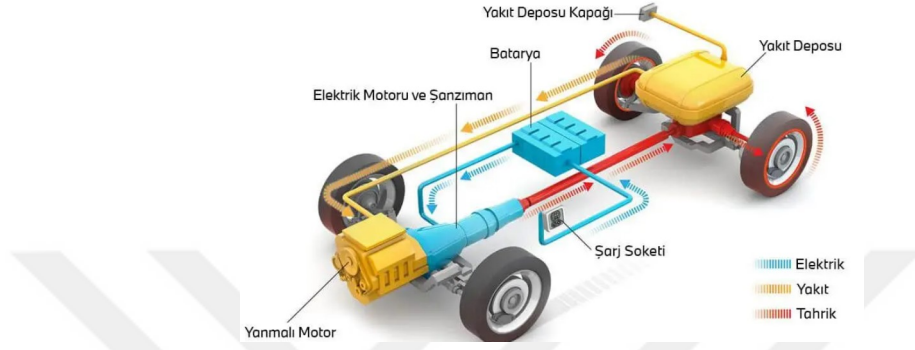


Şekil 2.2. Yarı hibrit bir aracın içyapısı (BMW, t.y.)

2.3. Şarjlı (Plug-in) Hibrit Elektrikli Araçlar (ŞHEA)

Hem içten yanmalı motora hem de elektrikli motora sahiptirler (Şekil 2.3). Yanmalı motor ve elektrik motoru birlikte kullanılır. Gücünün çoğunu elektrik motorundan alan bu araç, batarya

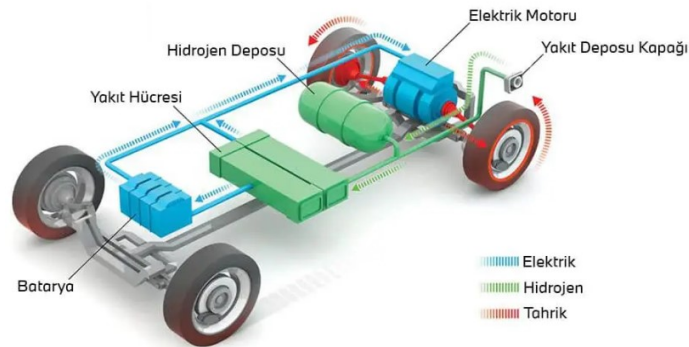
boşalmadıkça yanmalı moturu kullanmaz. ŞHEA' da bataryanın şarjı, sürüş sırasında yapılan frenlemeden elde edilen enerjinin depolanmasıyla ve bir prize bağlanmasıyla doldurulabilmektedir.



Şekil 2.3. Şarjlı (Plug-in) hibrit elektrikli bir aracın iç yapısı (BMW, t.y.)

2.4. Hidrojen Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (HYHEA)

Hidrojen yakıt hücreli araçlarda elektrik motorunun çalışması için gerekli enerji, hidrojen deposundan alınan gaz formuna yakın hidrojenin, dış ortamda bulunan oksijenle yakıt hücresinin içinde kimyasal tepkimesi sonucu çıkan elektrik enerjisinin, elektrik motoruna iletilmesi elde edilir. Bu sayede araç hem hareket etmesi sağlanırken hem de bataryanın şarjının dolması sağlanıyor. HYHEA' da batarya dışarıdan şarj edilememektedir. Oldukça çevre dostu olan bu araçların şuan için en büyük sorunu, diğer elektrikli araçlara göre daha pahalı olması ve hidrojen dolum tesislerinin çok az olmasıdır. Şekil 2.4' de yakıt hücreli bir aracın iç yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Hidrojen yakıt hücreli elektrikli bir aracın iç yapısı (BMW, t.y.)

3. BÖLÜM

BATARYALAR VE TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ

3.1. Bataryalar

Bataryalar, elektrik enerjisini kimyasal enerji çevirerek depo eden ve gerektiğinde kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren kimyasal cihazlardır. Bataryaların yapısı, pilin sistemde oluşan gerilimin üstesinden gelmek için seri halde bağlanarak pil gruplarını oluşturduğu, bu pil gruplarının da birbirleri ile seri ya da paralel birleştirilerek pil modüllerini ve bu modüllerin de seri ya da paralel birleşerek oluşturduğu yapıdır. Bataryaları oluşturan piller iki sınıfa ayrılır, bunlar; şarj edilebilen ve şarj edilemeyen pillerdir.

Şarj edilemeyen piller, deşarj olduklarında tekrar doldurulamayan pillerdir. Bu pillerin enerji yoğunlukları oldukça azdır ama ekonomik oldukları için çokça tercih edilmektedir.

Şarj edilebilen piller, deşarj olduklarında tekrar tekrar doldurulabilen pillerdir. Ekonomik açıdan, şarj olmayan pillere göre oldukça pahalı olsalar da tekrar şarj edilebilme durumları ve yüksek enerji yoğunlukları onları öne çıkartıyor. Tabii ki de şunu unutmamak gerekir, şarj edilebilen pillerin de kendilere özgü bir döngü sayısı (şarj/deşarj) ve zamanı vardır. Şarj edilebilen pilleri, en iyi muhafaza etme koşullarında bile ister kullanın, ister kullanmayın zaman içerisinde kapasitelerini kaybedip bitecekleri unutulmamalıdır.

Lityum iyon bataryalar %40 şarj seviyesinde 0°C' de saklanırsa ya da depolanırsa yılda %2' lik bir kayıp, 25°C' de %4' lük bir kayıp, 40°C' de ise %15' lik bir kapasite kaybı yaşar. Lityum iyon pil, %100 şarj ile oda sıcaklığında (25°C) kaldığında 1 yıl içerisinde %20 kapasite kaybına uğrar (Vikipedi, 2022a). Genellikle %100 şarjda kalma durumu dizüstü bilgisayar bataryalarında meydana gelmektedir.

Bataryalar, Ah (amper-saat) veya mAh (miliamper-saat) olarak farklı kapasite değerlerine sahiptirler. Bataryalar kendilerine özgü değerlere uygun olarak, en iyi çalışma koşullarında tutulmalıdırlar. Bu değerlere (yüksek/düşük sıcaklık, aşırı şarj/deşarj yapılması, vb.) uyum sağlanmadığında, batarya ömürlerinde kısalma, kapasite azalmasına, performans düşüklüğüne, zehirli gazların ortaya çıkmasına ve ek olarak yanıp, patlamasına kadar yol açabilmektedir.

Bataryalar en yaygın kullanılan enerji depolama cihazlarından biridir. Birçok alanda kullanım alanına sahip olan bataryalar günümüzde; elektrikli araçlarda, elektrikli bisikletlerde, elektronik test cihazlarında, elektrikli el aletlerinde, televizyonlarda, cep telefonlarında, bilgisayarlarda, tıbbi cihazlar vb. birçok alanda işlev görmektedir.

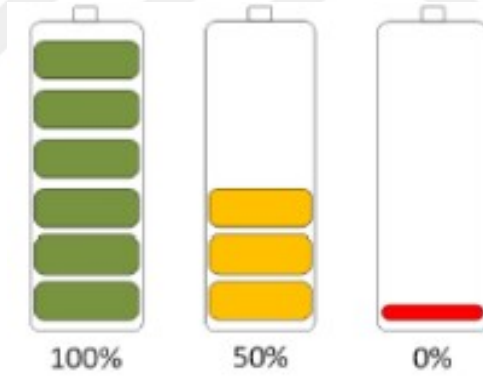
Bataryalarda kullanılan bazı terimlerin tanımlanması;

* C-oranı: Bir hücrenin yani pilin, kapasitesine göre akım değerini veren ayrıca %100' den 0' a şarj olma veya %0 dan %100' e deşarj olma hızını belirleyen faktördür. Denklem 3.1' de C-oranı formülü verilmiştir.

$$C = \frac{I}{Q_b} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1' de kullanılan I değeri amper cinsinden akımı verirken, Q_b değeri ise batarya kapasitesini vermektedir.

* SOC (Şarj durum göstergesi): Bataryada kalan mevcut enerjinin yüzdellik dilim halinde göstergede gösterilmesidir. Elektrikli araçlarda bulunan bu gösterge, içten yanmalı motorlu araçlardaki yakıt göstergesine benzemektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Elektrikli araçlarda SOC göstergesi (Chiasson ve Vairamohan, 2003)

SOC değerinin hesaplanması için gereken formül Denklem 3.2' de verilmiştir.

$$SOC(t)\% = \left(1 + \frac{\int_0^t \eta_e I(t) dt}{C_n}\right) \times 100 \quad (3.2)$$

Denklem 3.2' de η_e bize Coulomb verimini, $I(t)$ batarya akımını, C_n nominal kapasiteyi ifade etmektedir.

* DOD (Deşarj derinliği): Tam dolu bir bataryanın %0' a kadar olan deşarj oranına denmektedir. Bataryadan bataryaya değişen DoD değeri, bataryada uygun görülen deşarj derinliği kapasitesine ulaşılınca tekrar şarj edilmesi gerekliliğidir (Bakton, t.y.). Örneğin, %50 deşarj derinliğine sahip olan bir bataryanın, batarya kapasitesi %50 ye düştüğünde tekrar şarj edilmesi DoD değerine uyulduğunu gösterir. Deşarj derinliği oranı, bataryanın hem en verimli şekil de hem de uzun ömürlü olması için dikkat edilmesi gereken en önemli ölçütlerinden biridir. DOD değerinin hesaplanması için gereken formül verilmiştir (Denklem 3.3).

$$DOD(\%) = 100 - SOC(\%) \quad (3.3)$$

* SOH (Sağlık durumu): Bataryaların normal çalışma durumunun zaman içinde mevcut çalışma oranına göre karşılaştırılması denilebilir. Bataryalar kullandıkça kapasitelerini zaman içerisinde kaybederler bu durum bataryaların kullanılabilirlik seviyelerini düşürür, SOH değerinde düşen batarya kapasitesinin bize bataryanın değiştirilmesini ya da değiştirilmeden ne kadar süre ile kullanılabileceğini gösteren en önemli etkenlerden biridir. SOH oranı % 80' e düşen lityum iyon batarya modülü, verimliliğini tamamlamış diye düşünölmektedir (Lipu ve ark., 2018). SOH hesaplaması Denklem 3.4' de verilmiştir.

$$SOH = \frac{C_{act}}{C_n} \quad (3.4)$$

SOH denklemindeki C_{act} mevcut kapasiteyi, C_n nominal kapasiteyi göstermektedir.

* Çevrim ömrü: Batarya kapasitesinin genellikle %80 oranına düşünceye kadar şarj/deşarj çevrimi sayısıdır.

* Kesme gerilimi: Bataryaların belirli bir kesme voltaj aralıkları vardır. Düşük kesme voltajının altında bir değerde deşarj ya da yüksek kesme voltajının üstünde şarj edilmemesi gerekliliğini kapsar. Bu aralıklar dışında verilen voltaj değerleri batarya içerisinde istenmeyen kimyasal reaksiyon sebebiyet vererek bataryanın kullanım ömrünü kısaltabilir.

* Hücre: Batarya içerisinde bulunan her bir pile hücre denmektedir.

* Enerji yoğunluğu (Wh/l): Batarya içerisinde birim hacim başına biriken enerji miktarıdır.

* Güç yoğunluğu (W/l): Bataryada birim hacim başına güç toplama yoğunluğudur.

* Özgül enerji (Wh/kg): Batarya içerisinde birim kütle başına düşen enerji miktarı olarak bilinmektedir.

* Özgül güç (W/kg): Bataryada birim kütle başına düşen güç yoğunluğudur.

3.2. Elektrikli Araç Sistemlerinde Kullanılan/Kullanılacak Batarya Türleri

Elektrikli araçların bataryaları, ikincil pilde denen şarj edilebilen pillerin bir araya gelmesi ile oluşmaktadır. Elektrikli araçlarda birçok batarya türü kullanılmaktadır bunlardan en çok kullanılanları Tablo 3.1' de vermiştir.

Tablo 3.1. Elektrikli araçlarda kullanılan veya kullanılması planlanan batarya türleri

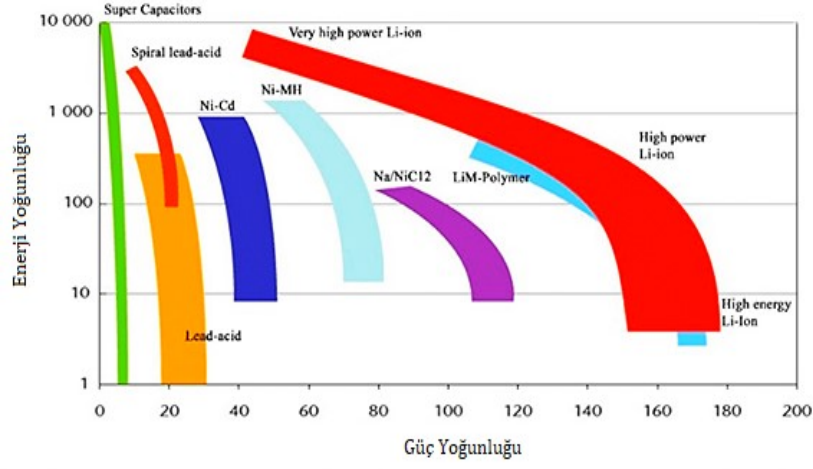
Elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar	
* Kurşun-Asit (Pb-asit)	* Lityum-iyon-Polimer (LiPo)
* Nikel-Kadmium (Ni-Cd)	* Lityum-Demir-Fosfat (LiFePO ₄)
* Nikel-Metal-Hidrat (Ni-MH)	* Çinko-Hava (Zn-air)
* ZEBRA	* Lityum-Sülfür (Li-S)
* Lityum-iyon (Li-ion)	* Lityum-Hava (Li-air)
* Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum (NCA)	

Bataryalar kendi aralarında farklı özelliklere sahiptirler. Bu özellikler onların kullanım alanlarını sınıflandırmıştır. Elektrikli araçların tasarımı yapılırken, batarya özellikleri dikkate alınır. Bu seçimin yapılabilmesi içinde bataryaların özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Tablo 3.2' de, Tablo 3.1' de verilen bataryaların özellikleri ele alınmış olup, nominal gerilimleri, enerji yoğunlukları, hacimsel enerji yoğunlukları, özgül güçleri, çevrim ömürleri, kendiliğinden deşarj oranları (her ay % kayıp oranı), hafıza etkisi, çalışma sıcaklıkları ve üretim maliyetleri verilmiştir.

Tablo 3.2. Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların özellikleri (Yong ve ark. 2015)

Batarya Tipi	Nominal Gerilim (V)	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Hacimsel Enerji Yoğunluğu (Wh/L)	Özgül Güçleri (W/kg)	Çevrim Ömrü	Kendiliğinden Deşarj (Her ay % kayıp oranı)	Hafıza Etkisi	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Üretim Maliyeti (\$/kWh)
Kurşun asit (Pb-asit)	2	35	100	180	1000	< 5	Yok	-15 ile +50	60
Nikel kadmiyum (Ni-Cd)	1,2	50-80	300	200	2000	10	Var	-20 ile +50	250-300
Nikel metal hidrat (Ni-MH)	1,2	70-95	180-220	200-300	< 3000	20	Seyrek	-20 ile +60	200-250
Zebra	2,6	90-120	160	155	> 1200	< 5	Yok	+245 ile +350	230-345
Lityum iyon (Li-ion)	3,6	118-250	200-400	200-430	2000	< 5	Yok	-20 ile +60	150
Lityum nikel kobalt alüminyum (NCA)	3,6	200-260	-	-	500	< 5	Yok	-	-
Lityum iyon polimer (LiPo)	3,7	130-225	200-250	260-450	> 1200	< 5	Yok	-20 ile +60	150
Lityum demir fosfat (LiFePO ₄)	3,2	120	220	2000-4500	> 2000	< 5	Yok	-45 ile +70	350
Çinko hava (Zn-air)	1,65	460	1400	80-140	200	< 5	Yok	-10 ile +55	90-120
Lityum sülfür (Li-S)	2,5	350-650	350	-	300	8 - 15	Yok	-60 ile +60	100-150
Lityum hava (Li-air)	2,9	1300-2000	1520-2000	-	100	< 5	Yok	-10 ile +70	-

Lityum iyon pillerin gravimetrik ve volumetrik enerji yoğunlukları diğer şarj edilebilen pillere göre çok daha yüksektir. Bu durum, araştırmacıların lityum iyon piller üzerinde çalışmalar yapmasındaki en önemli etkenlerden biridir. Pillerin enerji yoğunluğunu iki şekilde ifade etmek mümkündür, bunlar; birim kütle başına düşen enerji (Wh/kg) ya da birim hacim başına düşen enerji (Wh/L) miktarıdır. Şekil 3.2' de bataryaların enerji ve güç yoğunlukları karşılaştırılmıştır ve lityum iyon pillerin diğer batarya türlerinden daha üstün olduğu görülmektedir.

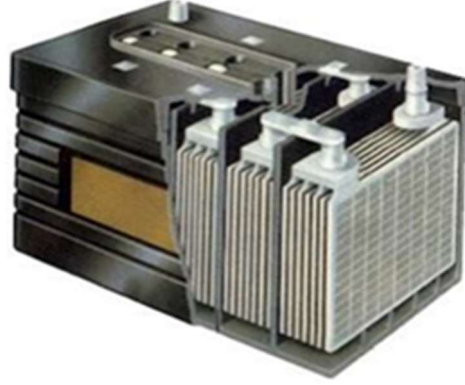


Şekil 3.2. Şarj edilebilir bataryaların karşılaştırılması (Silva ve Junior, 2019)

3.2.1. Kurşun-asit bataryalar (Pb-asit)

Bu batarya türü, en eski elektrik enerjisi depolama cihazlarıdır. Yani şarj edilebilir ilk batarya örneğidir. İlk örneğini, Gaston Plante 1859 yılında icat etmiştir (Wikipedia, 2022b). Kurşun asit bataryalara, eskiden günümüze kadar birçok iyileştirme çalışması yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, günümüzde kurşun asit bataryalardan en iyi şekilde yararlanabilme seviyesine gelmeye başlanmıştır. Çağımızda motorlu araçların marş motorlarında ve araçta bulunan elektronik ekipmanların enerjisini sağlamada kullanılıyor. Sınırlı çevrim ömrü, düşük özgül enerji sebebi ile günümüz elektrikli araçlarında sadece içten yanmalı motor kullanan türlerin bazılarında kullanılmaktadır.

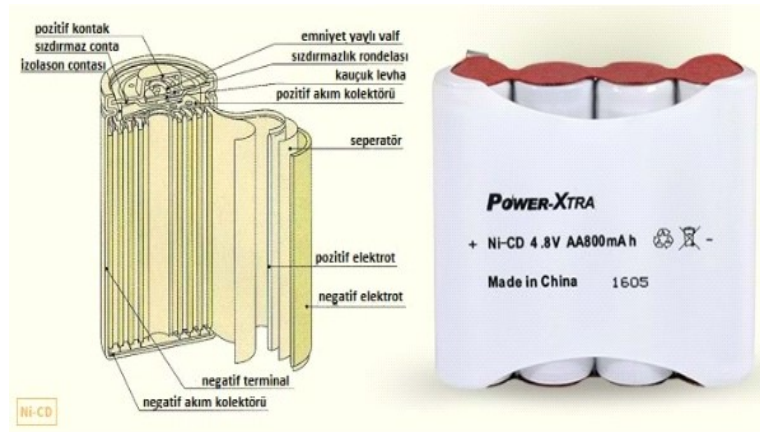
Avantaj olarak; diğer batarya türlerine kıyasla ucuz maliyetli olması, güvenilir olması, yüksek hücre voltajı olmasıdır. Dezavantaj olarak; enerji yoğunluğundaki düşüklük, düşük özgül enerji, sıcaklık değişimlerinde performans sorunu, çevrim ömrü, doğaya karşı zararlı bileşenler (kurşun ve asit) içermesi ve önemlisi kendi kendine deşarj derecesinin fazla olmasıdır. Resim 3.1' de kurşun asit batarya örneği gösterilmiştir.



Resim 3.1. Kurşun-asit bir bataryanın içyapısı (Birikim Pilleri, 2018)

3.2.2. Nikel-kadmiyum bataryalar (Ni-Cd)

Nikel-kadmiyum pillere içerik olarak bakıldığında, elektrotunun nikel oksit hidroksit metalinin de kadmiyum olduğu, ikincil pil türüdür. İlk defa 1899 yılında Waldemar Jungner tarafından icat edilmiştir (Wikipedia, 2022c). Bu pil türü, kurşun-asit pil türüne göre enerji yoğunluğu daha fazladır. Avantajları; ortalama 8-10 yıl kullanım ömürleri, yüksek sıcaklık kapasiteleri, 30-80°C aralığında çalışabilme yetenekleridir. Dezavantajları; kendi kendine deşarj oranının yüksek olması, hafıza etkisinin olmaması, kurşun-asit pillere göre pahalı olmasıdır. Elektrikli araçlar için gerekli gereksinimleri (hafıza etkisi, yüksek enerji yoğunluğu, yüksek şarj/deşarj oranı, vb.) karşılayamadığı için elektrikli araçlar için uygun değildir. Diğer ikincil pillerde elde edilen büyük gelişme, bu pil türünün kullanımını oldukça azaltsada halen elektrikli el aletleri, medikal ve askeri cihazlarda vb. alanlarda kullanılmaya devam edilmektedir. Resim 3.2' de bir Ni-Cd pilin içyapısının bölümleri gösterilmiştir.



Resim 3.2. Nikel-Kadmiyum pilin içyapısı (Procyon Elektrik, 2022)

3.2.3. Nikel-Metal Hidrat bataryalar (Ni-MH)

Ni-MH bataryayı Ni-Cd bataryadan ayıran özelliği, negatif elektrotlarında kadmiyum yerine hidrojen emici bir alaşım kullanmasıdır (Wikipedia, 2022d). Nikel-metal hidrat bataryalar, kurşun-asit ve nikel-kadmiyum bataryalara göre daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler. Bu enerji yoğunluğu sayesinde, Ni-HM batarya aynı ölçülerdeki Ni-Cd' a göre 2-3 kat fazla kapasiteye sahip olabilir (Wikipedia, 2022d). Nikel-kadmiyum' a alternatif olarak icat edilen bu batarya daha ucuz maliyetli ve çevre için daha az zararlıdır. Dezavantaj olarak, kendi kendilerine deşarj oranlarının Ni-Cd bataryalara göre daha fazla olması ve hafıza etkisinden dolayı tam deşarj olmadan bataryaların şarj olması, kapasite kayıplarına yol açmaktadır. Resim 3.3' de nikel-metal hidrat pillerin türleri gösterilmiştir.



Resim 3.3. Ni-MH pil türleri (Darboğaz, 2018)

3.2.4. Zebra bataryalar

Sodyum-nikel-klorür bataryası veya sodyum-metal-halojenür bataryası da denmektedir. Zebra ismi İngilizceden gelen cümlenin (Zero Emission Battery Research Activity) baş harflerini almıştır ve anlamı "Sıfır Emisyonlu Batarya Araştırma Etkinliği" dir. Bu batarya türü başta nikel metali ve sodyum-klorürün birleşmesinden oluşan erimiş tuz bataryasıdır (Wikipedia, 2022e). Yüksek çalışma sıcaklığına sahip olan bu batarya türü bir zamanlar elektrikli araçlar için önemli bir yere sahipti. Zebra bataryalar, 90 Wh/kg ile 150 Wh/kg arasında enerji yoğunluğu sunabilirler (Doğan, 2018). Lityum iyon bataryaların icadıyla bu batarya türünün kullanımı git gide azalmıştır. Çalışma esnasında bataryanın 350°C' yi bulan sıcaklığını muafaza etmek için kullanılan materyal, elektrikli araçlar için oldukça ciddi bir ağırlık demektir (Resim 3.4). Bu ağırlık, aracın uzun mesafe kat etmesini oldukça kısıtlamıştır. Bundan dolayı elektrikli araçlarda kullanımı oldukça azalmıştır.



Resim 3.4. Zebra batarya yapısı (Doğan, 2018)

3.2.5. Çinko-hava bataryalar (Zn-air)

Çinko-hava batarya, ortamda bulunan oksijen ile çinko metalinin reaksiyona girmesi sonucu enerji elde edilmesine dayanan bir batarya türüdür. Yapısı, elektrolit bir sıvı (su), anot olarak çinko ve gözenekli bir katotdan oluşur. Reaksiyon sonucu oksitlenen çinko tozunu, kimyasal ya da fiziksel yöntemler kullanarak tekrar kullanılabilme durumu onu şarj edilebilen batarya grubuna dolaylı yoldan sokmuş oluyor. Her ne kadar bir batarya olarak değil de yakıt hücreleri olarak anılırsa bu durum böyledir. Resim 3.5' de çinko-hava bataryanın bir rneği gösterilmiştir. Çinko-hava bataryası üzerinde yapılan çalışmalarda, su itici iyonların katoda yapışması sağlanarak, elektrolit olarak bulunan suyun katot üzerinde O₂ ile reaksiyona girmesi engellenmiş, bu sayede anotta olan çinko iyonları katoda giderek doğrudan oksijenle reaksiyona girmesi sağlanmıştır (Doğan, 2022). Bu da pilin tekrar şarj edilebilmesi için geriye doğru çalışmasını sağlanmıştır. Çinko-hava bataryalar birçok bataryadan daha üstün özelliklere sahiptir, bunlar; ucuz olması, güvenli olması, yüksek enerji ve g sağlamaları, hızlı şarj edilebilmeleridir. Dezavantajları ise, elektrot üzerinde dendrit oluşması sonucu kısa devrelere sebebiyet vermesi, düşük ömür döngüleri ve düşük güç yoğunluğu diyebiliriz.



Resim 3.5. Çinko-Hava batarya (Yeşer enerji, 2021)

3.2.6. Lityum-kükürt bataryalar (Li-S)

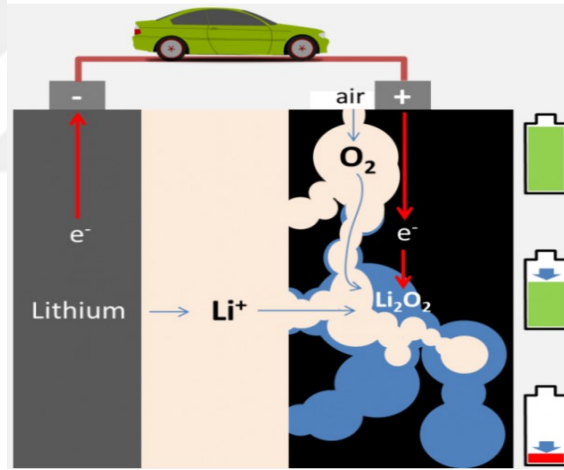
Lityum kükürt bataryalar aynı boyutlardaki diğer ikincil batarya türlerine göre daha uzun bir süre enerji sunabiliyor. Lityum iyon bataryalar 150-200 Wh/kg özgül enerji sunarken, Li-S bataryalar 500-550 Wh/kg değerine kadar özgül enerji sunmaları, uzun süre şarj edilmeden dayanabilmesine olanak sağlıyor (Özdemir, 2021). Yüksek enerji yoğunlukları, ucuz maliyetli olmaları tüm gözleri üzerine çekmiştir. Resim 3.6' da lityum kükürt bir batarya gösterilmiştir. Dezavantaj olarak; mekik etkisi, Li_2S oluşumu sırasında katot da oluşan hacim genişlemesi, elektrolit sorunlarıdır. En önemli sorunu mekik etkisidir. Mekik etkisi, aktif malzemenin katottan aşamalı olarak sızmasını sağlayan ve çok az şarj döngüsüne sebep olan polisülfid etkiye denir (Wikipedia, 2022f).



Resim 3.6. Lityum-kükürt batarya (Aktan, 2020)

3.2.7. Lityum-hava bataryalar (Li-air)

Bu batarya türü halen prototip aşamada bulunmaktadır (Resim 3.7). Lityum iyon bataryaya oldukça benzer bir yapıdadırlar. Lityumun doğrudan havadaki oksijen ile reaksiyonu sonucu oluşan enerjiyi elde etme üzerine bir çalışma mantığı bulunmaktadır. Katot ve oksijenin ortamda serbest halde bulunması bataryanın depolama ihtiyacının olmadığı anlamına gelmektedir ve bu çok yüksek bir enerji yoğunluğu demektir. Lityum iyon bataryalar ortalama 585 Wh/kg elektrik iletim potansiyeline sahipken, lityum-hava bataryalar 5000 Wh/kg üstüne çıkabiliyor (Wikipedia, 2015). Bu durumda bir içten yanmalı motora sahip aracın bir depo benzinle ya da motorinle yol aldığı kadar uzun bir menzil katedebileceklerini göstermektedir. Fakat bu bataryanın halen prototip aşamasında olmasının sebepleri; bataryanın çalışma esnasında elektroliti parlayabilme durumu, şarj sırasında oluşan aşırı gelirlimin elektrik verimini azaltması, lityum-hava bataryasında havayı kullanıma hazırlamak gibi ciddi sorunlar vardır (Wilcke ve Kim, 2016).



Resim 3.7. Prototip bir Lityum-Hava bataryanın çalışma mantığı (Atmaca, 2015)

3.2.8. Lityum-iyon bataryalar (Li-ion)

Lityum iyon piller tekrardan şarj edilebilme özelliği olan pillerdir. Bu piller şarj edilebildikleri için ikincil pil sınıfına girmektedir. Bu pillerin üç farklı çeşiti vardır; silindirik, prizmatik ve zarf tipi lityum iyon pildir.

Pillerde lityum metalinin kullanılmasının en önemli nedenleri yüksek elektrokimyasal potansiyel değeri ve metallerde en düşük atom ağırlığından kaynaklanan gravimetrik ve volumetrik enerji yoğunluğudur (Taracson ve Armand, 2001). Kısacası, pillerde elektron

verme eğilimi ve artı yükleme formu davranışları lityum kullanılmasının en önemli sebeplerinden biridir.

Lityum iyon piller enerji üretmek ve depolamak için üç ana bölümden oluşmaktadır; anot, katot ve elektrolitdir. Elektrolit için katı, sıvı ve jel kullanılmaktadır ve en yaygını ise lityum tuzudur. Lityum iyon piller de negatif elektrot malzemeleri için karbon kullanılırken pozitif elektrot malzemesi için bir metal oksit (LiFePO_4 , LiNiO_2 , vb.) kullanılır. En çok tercih edilen birkaç lityum tabanlı oksit çeşitleri; LiPo, NCA, LiFePO_4 dır.

* Lityum-İyon-Polimer (LiPo)

Lityum iyon batarya türü ile oldukça benzeyen bu batarya türünü farklı kılan şey elektrolitidir. Elektrolit olarak polimer malzemesi kullanılması, farklı çeşitlerde LiPo batarya türünün isteğe göre özel olarak üretilmesini sağlamaktadır. Lityum iyon polimer batarya Resim 3.8' de gösterilmiştir. Enerji yoğunlukları ve çevrim ömürleri lityum iyon bataryalar hariç diğer şarj edilebilen batarya türlerine (Ni-Cd, Ni-MH) göre oldukça fazladır. Kendi kendine deşarj oranı diğer birçok ikincil bataryaya göre daha azdır. LiPo bataryanın aşırı şarj yapılma durumunda güvenlik riskleri oluşmaktadır.



Resim 3.8. Lityum iyon polimer batarya (Zen Elektronik, t.y.)

* Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum (NCA)

NCA' lar voltaj benzerlikleri, güç kapasiteleri ve çevrim ömürleri bakımıyla LCO (lityum-kobalt-oksit)' lere oldukça benzemektedir. Bu pillerin güç yoğunlukları ve enerji yoğunlukları birçok pile göre performans açısından üstündür. Çevresel etki açısından oldukça başarılı pillerdir fakat ana dezavantajları güvenlik sorunları ve yüksek maliyetli oluşlarıdır. Birçok başarılı firma

tarafından tercih edilen bu piller zaman içerisinde daha çok geliştirilerek kullanımını arttıracaktır.

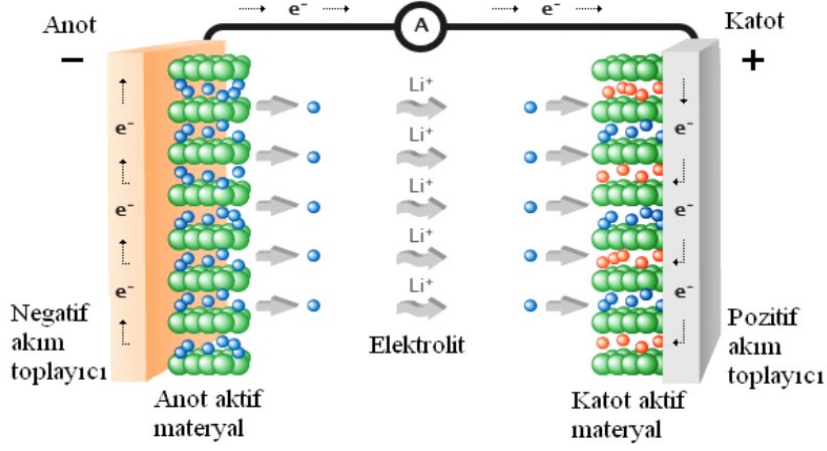
* Lityum-Demir-Fosfat (LiFePO₄)

Bu pil türünün katot malzemesi LiFePO₄, anot olarak da grafit karbon elektrot kullanan şarj edilebilen bir lityum iyon batarya çeşitidir. Resim 3.9' da LiFePO₄ batarya örneği verilmiştir. Lityum demir fosfat batarya içeriği bakımından kobalt bulunmaması ve sabit deşarj oranı ile diğer lityum iyon pillerden onu ayırmıştır. Kapasite oranı diğer lityum iyon bataryalara oranla %25 az olsada, nikel-hidrojen bataryalardan %70 daha fazladır (Wikipedia, 2022g). Avantaj olarak; güvenli olması, hafıza etkisinin olmaması, hafifliği, uzun çevrim ömürleri (2000' den fazla), yüksek güç yoğunlukları ve çalışma sıcaklık aralığının geniş olması ve çevre dostu olmasıdır. Elektrikli araçlar için halen büyük talep olan LiFePO₄ batarya, gün geçtikçe geliştirilmeye devam ediliyor.



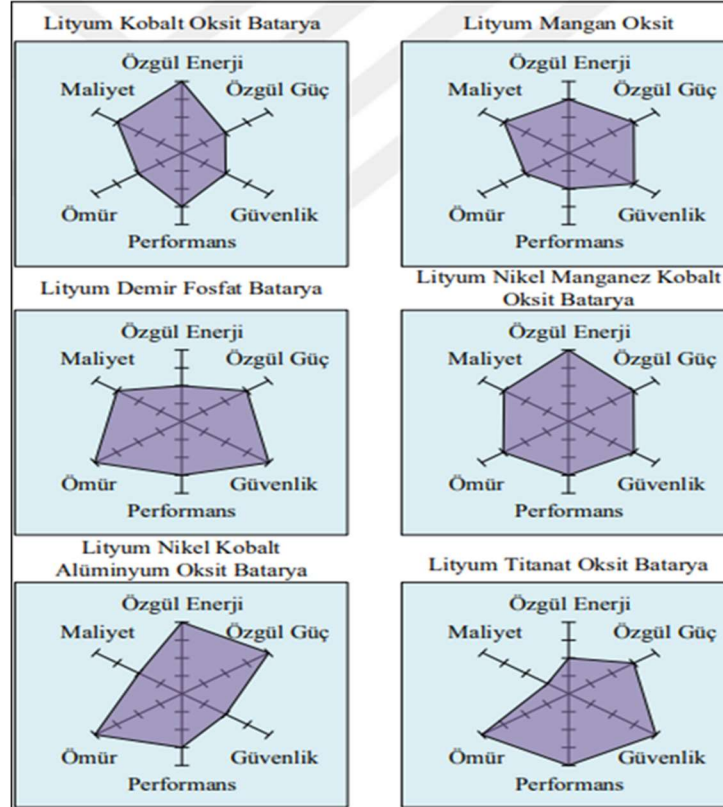
Resim 3.9. Lityum-demir-fosfat (LiFePO₄) batarya (CTECHİ, t.y.)

Şekil 3.3' de şarj esnasında lityum iyonları ve elektronlar katot bölgesinden anot bölgesine doğru, deşarjda ise anotan bölgesinden katota geçerler. Bu işlem sırasında lityum iyonları elektrolit bölgesinde, elektronlarda dış devre üzerinde anot ile katot arasında çift taraflı hareket sağlarlar (Wakihara, 2001).



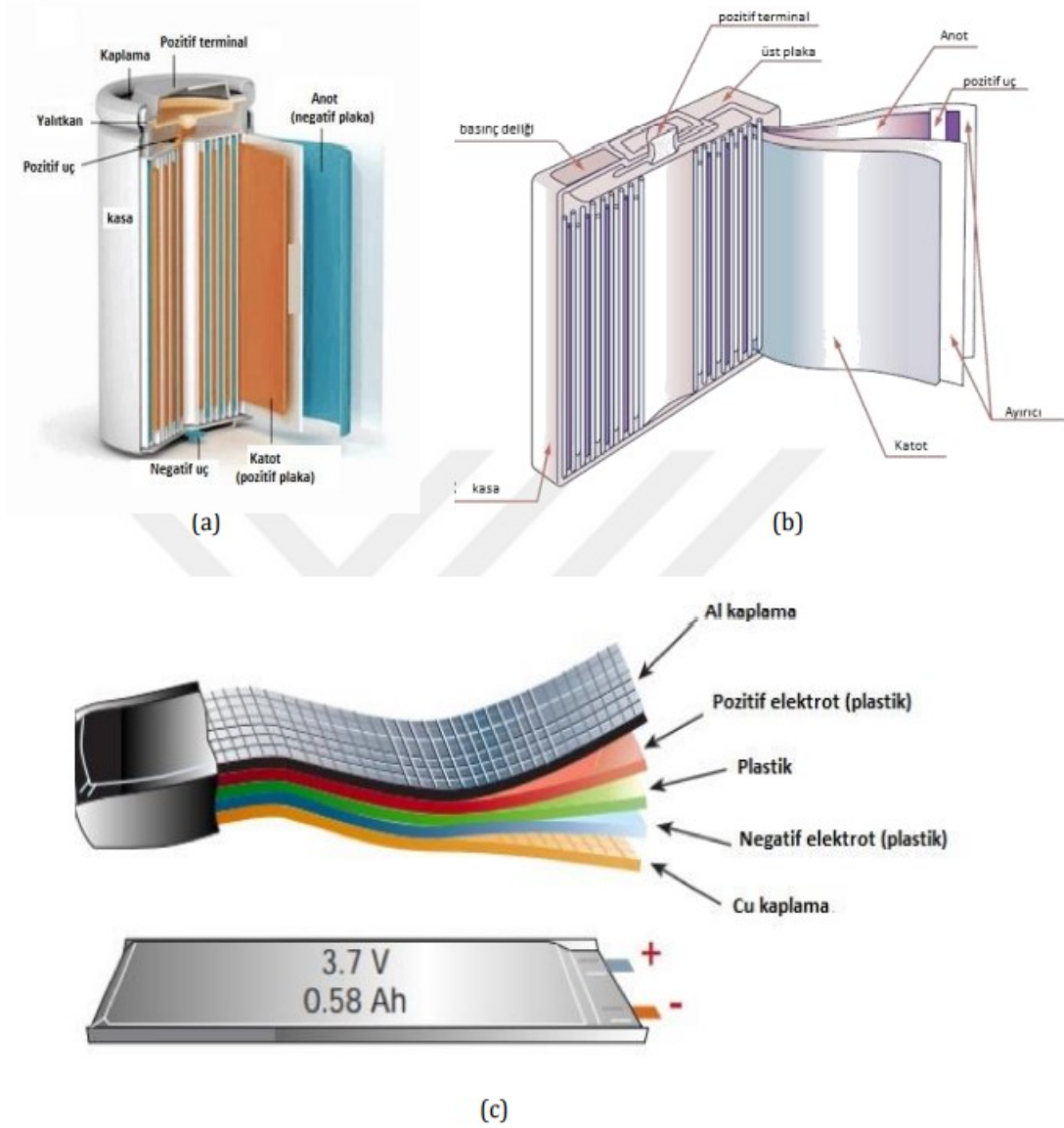
Şekil 3.3. Bir lityum iyon pilin deşarj sürecinin gösterimi (Nexeon, t.y.)

Şekil 3.4' de farklı katot ve anot malzemelerinden yapılmış olan bazı lityum iyon bataryaların elektrikli araçlar için önemli olan özgül enerjileri, özgül güçleri, performansları, ömürleri, maliyet ve güvenlik özelliklerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Bazı lityum iyon bataryaların, önemli özelliklerinin karşılaştırılması (Turğut, 2018)

Resim 3.10' da farklı yapı tiplerine sahip lityum iyon pillerin, iç yapısı gösterilmiştir.



Resim 3.10. Lityum-iyon pillerin iç yapısı (a) Silindirik hücre, (b) Prizmatik hücre, (c) Zarf tipi hücre (Taracson ve Armand, 2001)

Lityum iyon pillerin performanslarını etkileyen en önemli unsurlardan biride pil geometrileridir. Her geometrinin kendine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Uygulama alanlarına göre en iyi geometrik hücre seçilmektedir. Tablo 3.3' de silindirik, prizmatik ve zarf tipi lityum iyon pillerin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 3.3. Lityum iyon batarya tiplerinin karşılaştırılması (Andrea, 2010)

Ölçüt	Silindirik batarya	Prizmatik batarya	Zarf tipi batarya
Kaplama	Metal	Yarı sert plastik veya metal	Alüminyum
Bağlantı	Cıvata için dişli saplama veya dişli delik	Cıvata için dişli delik	Kelepçeli, kaynaklı veya lehimlenmiş tırnaklar
Genişlemeye karşı tutma	Silindirik şekle özgü	Akü ucunda tutma plakaları gerekir	Akü ucunda tutma plakaları gerekir
Yerel gerilme	Yok	Yok	Var
Isıyla daralma, genişleme	Yok	Metale göre değişkenlik	Yok
Üretim çalışmalarına uygunluk	İyi	Süper	Süper
Basınç kuvvetine karşı direnç	Süper	Zayıf	Çok zayıf
Güvenlik	İyi	İyi	İyi

3.2.8.1. Lityum İyon Bataryaların Avantajları ve Dezavantajları

Bu bölümde lityum iyon bataryaların diğer ikincil batarya (kurşun-asit, nikel kadmiyum, nikel metal hidrat, vb.) türleri ile karşılaştırılması incelenmiştir (Tablo 3.4). Farklı avantaj ve dezavantajlara sahip olan bu bataryalar günümüzde en çok tercih edilen batarya türüdür.

Tablo 3.4. Lityum iyon bataryaların, ikincil bataryalara karşı avantaj ve dezavantajı (Linden ve Reddy, 2002)

Avantajlar	Dezavantaj
<ul style="list-style-type: none">* Kapalı hücreden bakım gerektirmemesi* Uzun raf ömrünün olması* Geniş çalışma sıcaklık aralığının olması* Hızlı şarj olabilme* Yüksek enerji verimi* Yüksek enerji yoğunluğu* Hafıza etkisinin olmaması* Uzun ömürlü olması* Güçlü deşarj kapasitesi	<ul style="list-style-type: none">* Fiyatının pahalı olması* Yüksek sıcaklıklarda bozulması* Aşırı şarj sonucu kapasite kaybı* Aşırı şarj sonucu termal bozulma

3.3. Lityum iyon bataryaların termal karakteristikleri

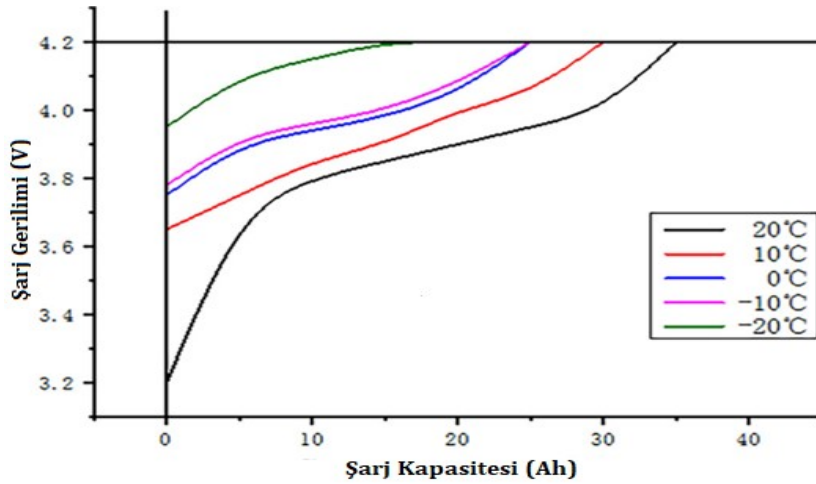
Bu bölüm Lityum-iyon bataryaların termal sorunları ve termal davranışları üzerine 2 alt başlık altında incelenmiştir.

3.3.1. Lityum iyon bataryaların termal sorunları

Lityum iyon pillerin en önemli karakteristik özelliği performansıdır. Lityum iyon pillerin performansını etkileyen 2 ana faktör bulunmaktadır bunlar; voltaj ve sıcaklıktır. Belirli bir voltaj aralığında ve homojen sıcaklık dağılımında pillerin bozulması ve zarar görmesi engellenebilir. Yüksek voltaj ve homojen olmayan sıcaklık pillerin kapasitesinin azalmasına, kullanım ömrünün kısalmasına neden olmaktadır.

Düşük sıcaklıklarda (<15°C), pilin elektrolit viskozitesi artmasından dolayı lityum iyonlarının yayılma hızı düşeceğinden pilin iç direncini önemli derecede arttıracaktır. Elektrokimyasal reaksiyon normal olarak gerçekleştirilemediğinden hem şarj hem de deşarj performansı etkileyecektir (Zhang ve ark., 2017). Reaksiyona katılan lityum iyonlarının sayısı azalır, bu da elektriğin depolanmasını ve serbest bırakılmasını doğrudan etkileyerek pil kapasitesinin ve güç özelliklerinin zayıflamasına neden olur (Jaguemont ve ark., 2016).

Çok düşük sıcaklıklarda elektrolit donabilir bu da pillerin çalışmasını engeller. Farklı sıcaklık değerlerinde şarj kapasitesi ve şarj voltajı arasındaki ilişki aşağıda Şekil 3.5’ de gösterilmiştir. 10 A sabit akımda bir lityum iyon pilin, -10°C’ de nominal kapasitesinin yalnızca %60’ ını şarj edebileceği bulunmuştur (Lei ve ark., 2013). Pil içerisinde homojen olmayan sıcaklık dağılımları pili olumsuz etkileyerek pilin hızlı yaşlanmasına ve ömrünün azalmasına yol açacaktır.

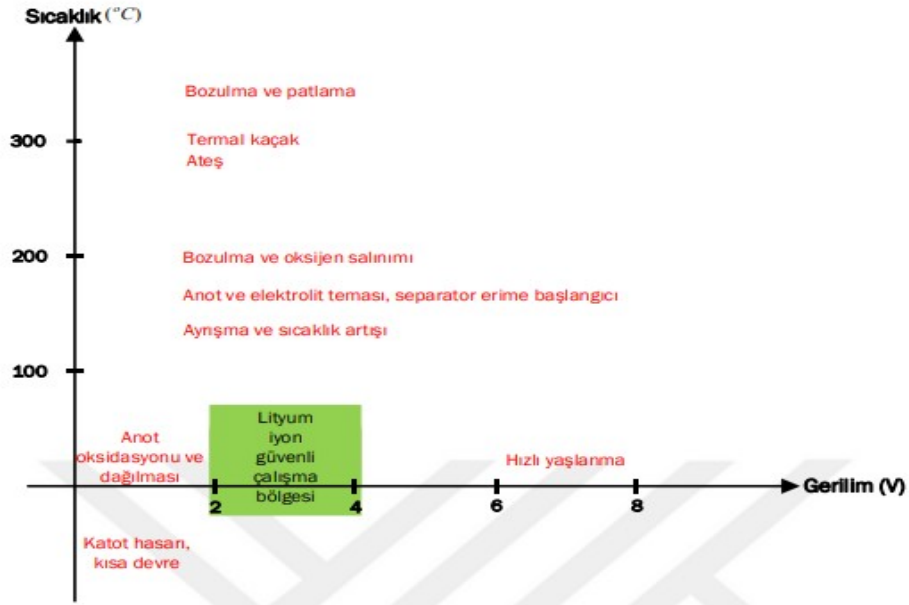


Şekil 3.5. 10 A sabit akımda, farklı sıcaklıklarda şarj kapasitesi ve şarj voltaj eğrisi (Lei ve ark., 2013)

Yüksek sıcaklıklar (>40°C), lityum iyon pil paketleri için ciddi sorunlara yol açmaktadır. Lityum iyon piller çok reaktif bir yapıya sahip oldukları için şarj ve deşarj sırasında kısa sürede

ısırlar. Lityum iyon pil paketlerindeki piller aşırı ısınarak yanma, patlama ya da karbon monoksit (CO), etilen (C₂H₄), hidrojen sülfür (H₂S), hidrojen florür (HF) gibi zararlı gazların çıkmasına neden olabilir (Ouyang ve ark., 2019). Yüksek sıcaklıklar lityum iyon pillerin kapasitesinde olumsuz yönde etkilemektedir. Lityum iyon pillerin, 55°C' de 500 döngü sonrasında kapasitelerinin yaklaşık olarak %70' ini kaybettikleri sonucu bulunmuştur (Al-Zareer ve ark., 2019). Bu sıcaklık durumunun devam etmesi, lityum iyon pillerin kullanım ömrünün kısalmasına neden olmaktadır. Lityum iyon pil paketlerinin karmaşık güç devre yapısı nedeniyle yüksek sıcaklıkta kısa devre oluşturabilmektedir (De Santoli ve ark., 2017).

Şekil 3.6' da lityum iyon pillerin güvenli çalışma sıcaklıkları ve güvenli gerilim aralığı alanı gösterilmiştir, ayrıca bu alan dışarısında oluşabilecek sorunlara değinilmiştir.

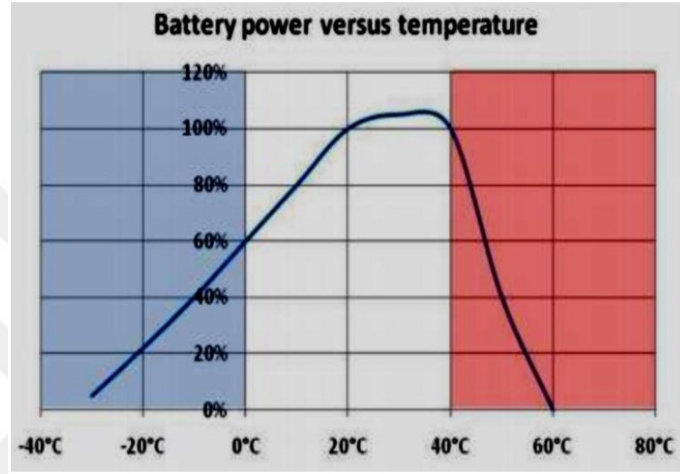


Şekil 3.6. Lityum iyon batarya için güvenli sıcaklık ve güvenli gerilim alanı (Rigan, 2020)

3.3.2. Lityum iyon bataryaların termal davranışları

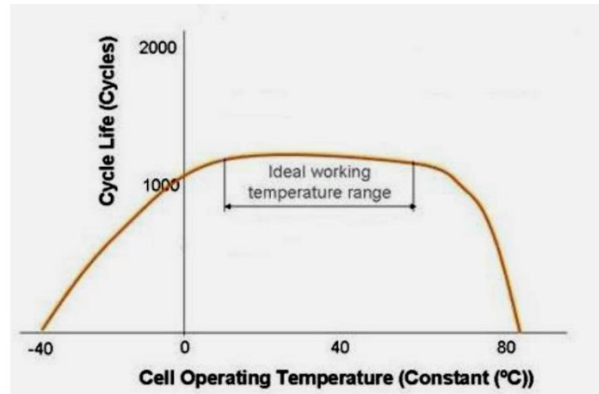
Lityum iyon bataryaların verimli çalışması için belirli bir sıcaklık aralığı olduğu bilinmektedir. Bataryaların soğutulması kadar ısıtılmasında önemlidir. Her ne kadar bataryalar şarj ile deşarj sırasında iç dirençlerinden dolayı ısınmaya başlasa da, soğuk havalarda ya da farklı çalışma ortamlarında bu olay tam tersine dönerek bataryaların performanslı çalışması için, belirli bir sıcaklık seviyesine çıkarılması gerekmektedir.

Birçok araştırmacı lityum iyon bataryaların en iyi çalışma sıcaklığı aralığı üzerine detaylı çalışmalar yapmışlardır. Yapılan araştırmalarda genellikle bataryaların 15°C ile 40°C aralığında en iyi performansı sergilediği görülmüştür. Lityum iyon bataryaların en iyi çalışma sıcaklığının 293 K ile 313 K aralığı olduğu bulunmuştur (Liu ve ark., 2017). Şekil 3.7' de yapılan bu çalışmaları doğrular niteliktedir.



Şekil 3.7. Lityum iyon bataryanın sıcaklığa karşı güç dağılımı (Matthe ve ark., 2011)

Şekil 3.8' de göründüğü gibi 20°C ile ortalama 40°C arası, lityum iyon bataryaların maksimum verimli olduğu sıcaklık aralığıdır.



Şekil 3.8. Lityum iyon pilin çalışma sıcaklığına göre çevrim mr (Electropaedia, 2014)

Şekil 3.8' de ise pil 10°C sıcaklığın altına düştüğünde anot kaplamadan kaynaklı ya da 65°C' nin üstüne çıktığında elektrot malzemelerin bozulmasından kaynaklı çevrim ömrünün azaldığını görülmektedir. En iyi çevrim ömrü aralığının ortalama 15°C ile 60°C arası olduğu gözlenmektedir.

3.4. Bataryaların Termal Yönetim Sistemleri

Bataryaların performansı için, sıcaklık dağılımlarının homojen olmasına ve en uygun çalışma sıcaklık aralığına dikkat edilmesi gerekmektedir. Bataryaların homojen sıcaklık dağılımları ve uygun çalışma sıcaklıkları için batarya termal yönetim sistemleri önemli bir yer taşımaktadır. Her yıl termal yönetim sistemleri üzerine binlerce araştırma yapılmaktadır. Bir bataryaya termal yönetim sistemleri uygulanırken ağırlık maliyeti, karmaşıklık, genel maliyet, montaj durumu ve güvenilirlik durumu değerlendirilmelidir (Pesaran ve ark., 2003).

Batarya termal yönetim sistemi ana başlık altında 2 ye ayrılır. Bunlar ısıtma ve soğutma sistemleridir. En çok kullanılan ısıtma ve soğutma sistemleri aşağıdaki Tablo 3.5' de verilmiştir.

Tablo 3.5. Pillerin termal yönetim sistemleri

Isıtma Sistemleri	Soğutma Sistemleri
* Hava ile ısıtma	* Hava ile soğutma
* Sıvı ile ısıtma	* Sıvı ile soğutma
* Faz değiştiren malzeme ile ısıtma	* Faz değiştiren malzeme ile soğutma
* Elektrik ile ısıtma	* Termoelektrik ile soğutma
* Termoelektrik ile ısıtma	* Isı borusu

3.4.1. Bataryaların Termal Soğutma Sistemleri

Lityum iyon bataryaların soğutulması, bataryanın verimi için çok önemlidir. Örneğin; elektrikli araçlarda bulunan lityum iyon bataryalar çok ısınmaktadır ve araçların performansını olumsuz etkilemektedir.

Genel olarak batarya sistemlerini soğutmak için farklı termal yöntemler bulunmuştur. Bunlar başlıca; hava ile soğutma, sıvı ile soğutma, faz değiştiren malzeme ile soğutma, termoelektrik ile soğutma ve ısı borusu ile soğutmadır.

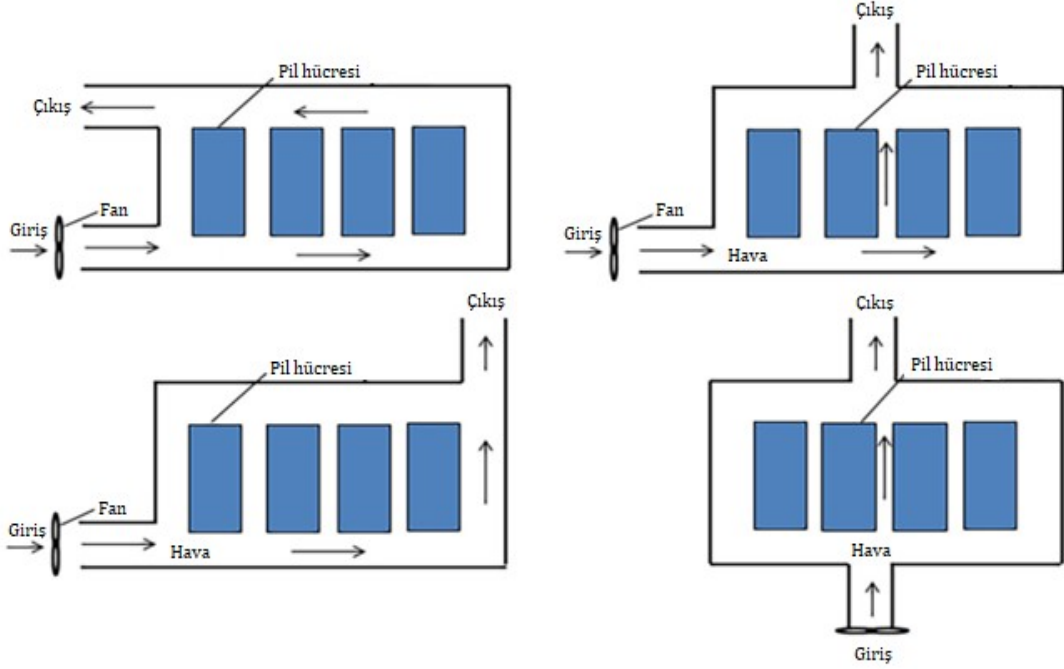
Tablo 3.6' da bazı elektrikli araçların kullandığı termal yönetim sistemleri verilmiştir, ayrıca PHEV (Şarjlı hibrit elektrikli araç), BEV (Tam elektrikli araç) anlamına gelmektedir.

Tablo 3.6. Elektrikli araçlarda kullanılan termal yönetim sistemleri
(Yenigün ve Utlü, 2018' den değiştirilerek)

Araç ve Modeli	Araç Türü	Batarya Biçimi	Termal Yöntem
Azure - Balance	PHEV	Silindirik	Sıvı Soğutma
BMW - i8	PHEV	Prizmatik	Sıvı Soğutma
BMW - i3	BEV - PHEV	Prizmatik	Sıvı Soğutma
BMW - ActiveE	BEV	Prizmatik	Sıvı Soğutma
Chevy (GM) - Volt	PHEV	Prizmatik	Sıvı Soğutma
Chevy (GM) - Spark EV	BEV	Prizmatik	Sıvı Soğutma
Coda Automotive - CODA	BEV	Prizmatik	Sıvı Soğutma
Fisker - Karma	PHEV	Silindirik	Sıvı Soğutma
Ford - Transit Connect	BEV	Silindirik	Sıvı Soğutma
Ford - C Max Enerji	PHEV	Prizmatik	Sıvı Soğutma
Ford - C Max Hybrid	PHEV	Prizmatik	Hava Soğutma
Ford - Focus	BEV	Prizmatik	Sıvı Soğutma
Honda - Fit EV	BEV	Prizmatik	Sıvı Soğutma
Honda - Accord	PHEV	Prizmatik	Sıvı Soğutma
Mitsubishi - i MiEV	BEV	Prizmatik	Hava Soğutma
Nissan - LEAF	BEV	Prizmatik	Hava Soğutma
Tesla - Roadster	BEV	Silindirik	Sıvı Soğutma
Tesla - Model S	BEV	Silindirik	Sıvı Soğutma
Tesla - Model X	BEV	Silindirik	Sıvı Soğutma
Toyota Prius - PHEV	PHEV	Prizmatik	Sıvı Soğutma
Toyota Scion - IQ-EV	BEV	Prizmatik	Sıvı Soğutma
Toyota - Rav4 EV	BEV	Silindirik	Sıvı Soğutma
Volvo - C30 EV	BEV	Prizmatik	Hava Soğutma

3.4.1.1. Hava ile soğutma sistemleri

Elektrikli araçlarda çokça kullanılan bu sistemler doğal taşınım ya da zorlanmış taşınım olarak ele alınmıştır. Burada ana amaç, hareket halindeki araca gelen havayı doğrudan ya da fan yardımı ile batarya yüzeyine aktarmak ve batarya yüzeyinde oluşan yüksek ısıyı soğuk hava ile uzaklaştırmaktır. Doğal taşınım katsayısı, zorlanmış taşınım katsayısından oldukça küçüktür. Sadece doğal taşınım kullanmak bataryanın soğutulması için genel olarak yeterli olmamaktadır. Araçlarda çoğu zaman hava ile soğutma, doğal taşınım ve zorlanmış taşınım olarak birlikte kullanılır. Şekil 3.9' da hava soğutma sistem tasarımları ele alınmıştır.



Şekil 3.9. Farklı giriş ve çıkış konumlarında Z akışlı hava soğutması (Chen ve ark. 2019)

Hava ile soğutma sistemleri, malzeme ağırlığı, uygulanabilirlik, karmaşıklığın az olması, bakımı, düşük maliyet gibi birçok açıdan avantajlı gibi gözüksede çoğu araba firması bu sistemi kullanmayı tercih etmemektedir. Bunun en büyük sebebi yeterli termal iletkenlik sağlanamaması ve ortam sıcaklığındaki farklılıktır. Son yıllarda termal iletkenliği yeterli seviyelere çıkarılması için birçok termal model geliştirildi. Hem pil takımının geometrisi hem de farklı kanal geometrilerinin modellenmesiyle bu sorunların git gide iyileştirildiği görülmüştür.

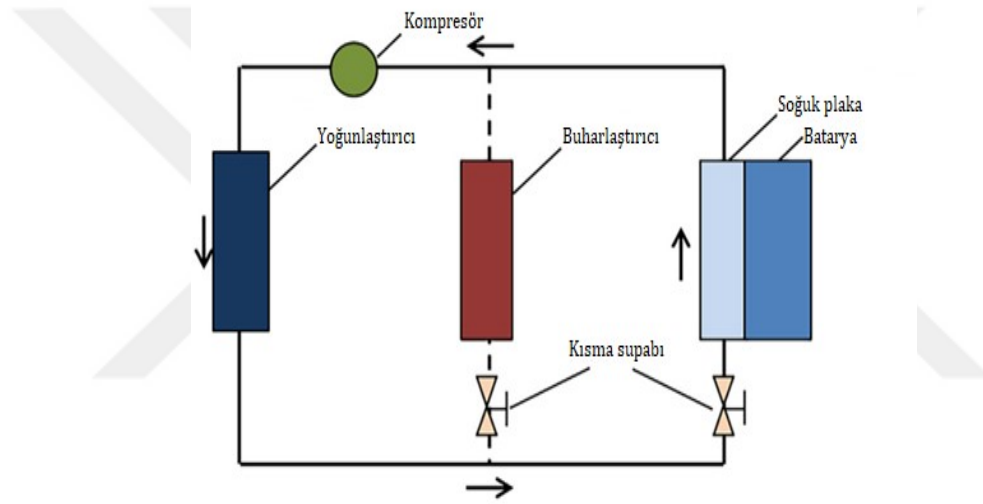
3.4.1.2. Sıvı ile soğutma sistemleri

Isı transferlerinde en çok tercih edilen diğer bir yöntem de sıvı ile soğutma sistemleridir. Sıvı ile soğutma sistemleri genel olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Bunlar; direk temaslı ve dolaylı temaslıdır. Şekil 3.10' da çalışma prensibi ele alınmıştır.

Direk temaslı soğutma sistemlerinde, bataryanın komple dielektrik (mineral yağlar vb.) bir sıvıya batırıldığı sistemlerdir. Bu sistemler tüm batarya yüzeyini soğutarak, pillerin homojen sıcaklık dağılımına büyük ölçüde etkisi olur. Fakat bu soğutma sistemleri günümüzde araçlarında çok tercih edilmemektedir. Sebep olarak şunlar söylenebilir; dielektrik akışkanların diğer soğutma sistemlerinde kullanılan suya göre daha yüksek viskoziteli olması,

yüksek viskoziteli bir akışkanın istenilen akış hızına çıkması için yüksek enerji gerektirmesi ve bundan dolayı büyük boyutlu ve maliyetli pompa kullanılmasını zorunlu kılmasıdır. Ayrıca sıvı geçirmez bir sistemde oluşacak bir kaçağın meydana getirebilecek elektriksel kısa devre ve elektrokimyasal reaksiyon sorunları bu sistemlerin kullanılmasını oldukça düşürmüştür.

Dolaylı temaslı soğutma sistemlerinde pillerin yüzey kısımlarına pillerin tipine göre farklı geometrilere sahip mini ve mikro kanallı plakalar, tüp soğutmalar vb. yerleştirilerek, içerisinden geçen soğutucu akışkanın (su, glikol etilen vb.) pillin temas yüzeyinden ısı çekmesi olayıdır.



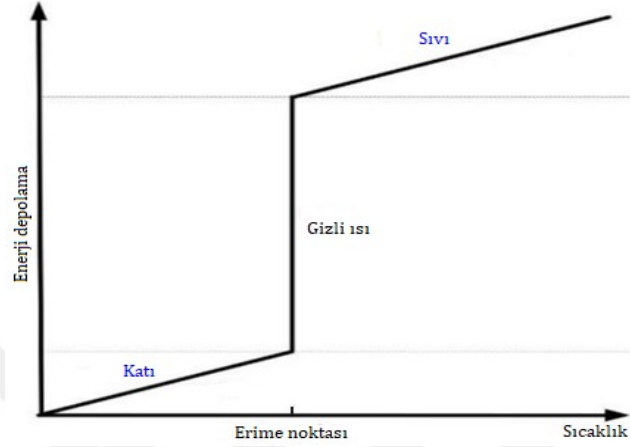
Şekil 3.10. Sıvı soğutma sisteminin çalışma prensibi (Zhang ve ark. 2022)

3.4.1.3. Faz değiştiren malzemeler ile soğutma sistemleri

Bu soğutma sisteminde faz değiştiren maddeler, katı halden sıvıya ya da sıvı halden gaza faz değiştirebilmesi için enerjiye ihtiyaçları vardır. Bu maddeler, batarya tarafından üretilen ısı enerjisini emerek faz değiştirme sırasına gelir ve çektikleri ısıyı gizli ısı olarak depolarlar. Bu sayede batarya yüzeyinde oluşan yüksek ısı uzaklaştırılmış olur. Şekil 3.11' de sıcaklık ve enerji depolama ilişkisi gösterilmiştir.

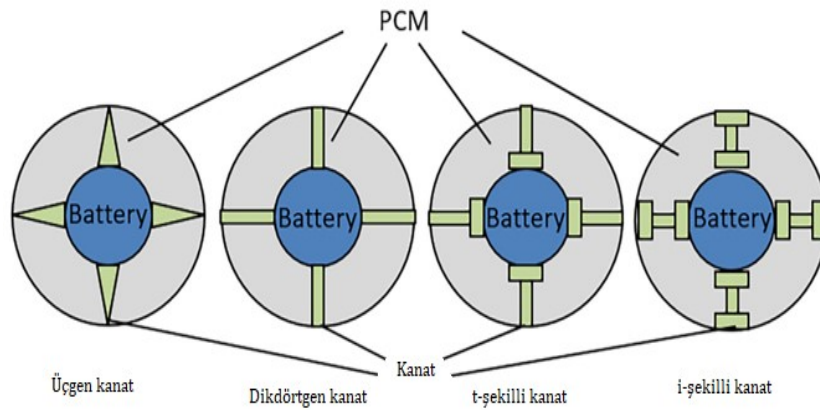
Bu sistemin en önemli avantajları, diğer soğutma sistemlerinde sıvının ya da havanın sirkülasyonu için güç harcayan cihazlara (fanlar, pompalar vb.) ihtiyaç duyulmasıdır ayrıca bunların hem boyutları hem de maliyetleri ciddi bir sorundur. Bundan dolayı pasif soğutmalarından biri olan faz değiştiren malzeme ile soğutma, son yıllarda oldukça önem verilen bir konu haline gelmiştir.

Dezavantaj olarak, ortam sıcaklığının yüksek olduğu zamanlarda ya da birkaç döngü sonrasında faz değiştiren malzemenin erimesiyle, düşük termal iletkenliğe sahip olmasıdır.



Şekil 3.11. Faz değiştiren malzemelerin sıcaklık ve enerji depolama ilişkisi (Li ve Zhu, 2014)

Choudhari ve ark. 2020 yılında faz değiştiren malzeme ile kaplı silindirik lityum iyon pillerin, farklı kanat modellerinde sıcaklık homojenliği incelenmiştir ve i-şekilli kanat yapısına sahip modellemenin daha iyi bir ısı transferi sağladığı görülmüştür (Şekil 3.12).

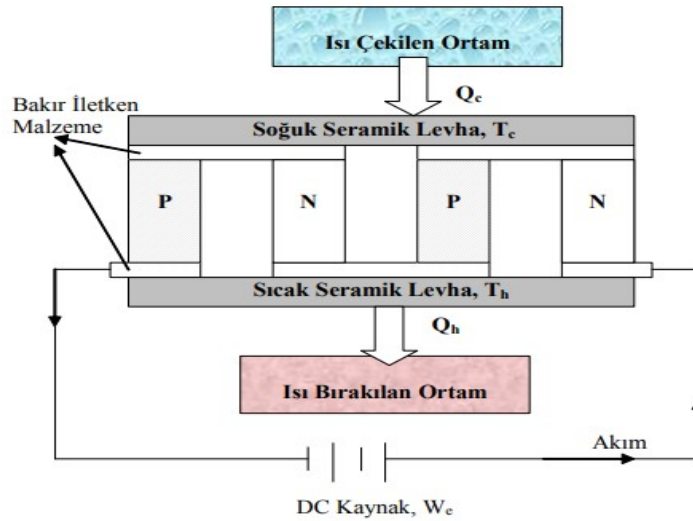


Şekil 3.12. Faz değiştiren malzemenin, farklı kanat tiplerinde batarya modellemesi (Choudhari ve ark. 2020)

3.4.1.4. Termoelektrik ile soğutma sistemleri

Termoelektrik soğutucular farklı isimlerle de bilinmektedir; termoelektrik modülü ya da peltier soğutucu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sistemlerin kurucusu niteliğinde olan kişi Jean Charles Athanese Peltier dir. Jean Charles, 1834 yılında farklı cins iki telin birleşme noktasından doğru akım geçirildiğinde, birleşme noktasının sıcaklığının düşüp, soğudunu görmüştür (Britannica, 2022). Bu sayede termoelektrik soğutma sistemlerinin ilk adımlarını atmasına öncü olmuştur.

Şekil 3.13' de termoelektrik soğutma sistemi, N ve P cinsi yarı iletken metal modüllerinden doğru akım geçmesi ile oluşan bir sistemdir. Akım N cinsi yarı iletken metalden P cinsi metale geçerken düşük enerji seviyesinde bulunan P cinsi iletken metal, yüksek enerji seviyesine geçtiğinde soğutulacak ortamdan ısı çekerek ortamın soğuması sağlanır. Soğuk ortamdan alınan ısı, elektronlar yardımıyla yüksek sıcaklıktaki ortama aktarılır (Bulut, 2005). Akım tersine çevrilecek ısıtma işlemi içinde kullanılabilir.

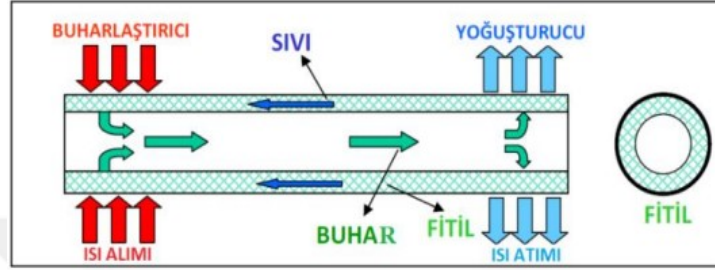


Şekil 3.13. Termoelektrik bir sistemin soğutma ve ısıtma prensibi (Bulut, 2005)

3.4.1.5. Isı Borusu ile Soğutma Sistemleri

Konveksiyon ısı geçişi ve faz değişiminden (sıvı-buhar) yararlanılarak ısının bir yerden başka bir yere aktarılması olayıdır. Bu sistemin amacı, homojen sıcaklık dağılımları sağlamak ve yüzeylerden ısı çekme temeline dayanır. Avantajları; ısı geçiş kapasiteleri, basit yapısı, kapalı bir kutu olması, hareketli bir parçasının olmaması, dış pompa gücüne ihtiyaç duymamasıdır. Dezavantaj olarak; yapısal düzeninin batarya ısıtmasına uygun olmaması, alçak basınçlı

gazların kullanılması gereklidir. Şekil 3.14' de sıvı fazdaki akışkan, buharlaştırıcı bölgesinden aldığı ısı ile buhar fazına dönüşür. Boru boyunca hareket eden buhar, yoğuşturucu bölgesinden dış ortama çıkar ve buhar halde bulunan akışkan tekrar sıvı faza döner. Bu şekilde sıcak yüzeylerden alınan ısı, soğuk bir alana aktarılır.



Şekil 3.14. Isı borusu çalışma mantığı (Markal ve Aksoy, 2018)

4. BÖLÜM

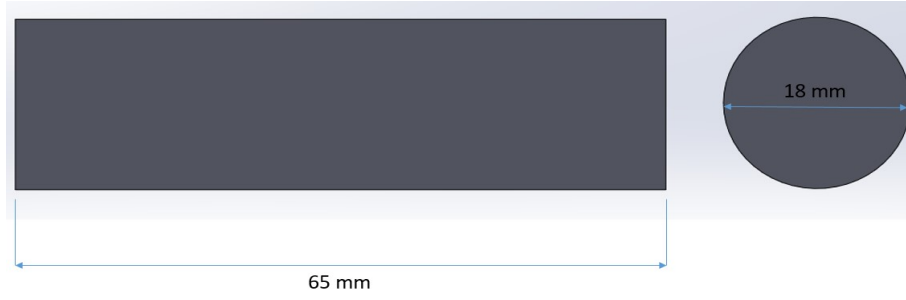
MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyal Metot

Lityum NCA 18650 tipinden oluşan 22 pil, paralel olarak birbirine bağlanmıştır. Piller silindirik biçiminde 18 mm çapında ve 65 mm yüksekliğinde ve 4 sıra halinde 6-5-6-5 grup biçiminde yerleştirilmiştir. Pil takımının sıcaklığını etkili bir biçimde azaltmak için 4-U bükümlü, 4 bölmeli dalgalı bir kanal önerilmiştir. Piller ve kanallar arasında maksimum temas yüzeyi oluşturmak ve minimum alan kullanımı için 3 model tasarlanmıştır. Yapılan modellemelerde belirli açılar ve uzaklıklar sabit tutulmuştur, bunun sebebi piller arasındaki boşluğun artmaması, kanalların piller üzerindeki temas yüzeyinin azalmaması ve kullanım alanının artması için söylenebilir. Batarya termal sisteminin modellenmesi için, FloEFD CAD programı kullanılmış ve çizim sonrasında CFD analizi yapılmıştır. FloEFD ile yapılan simülasyonlarda pil, yalıtım malzemesi ile sarılmıştır ve adyabatik koşullarda basitleştirilmiştir. Ele alınan pilin parametreleri tabloda gösterilmiştir (Tablo 4.1). Soğutucu akışkan olarak kullanılan suyun sıcaklığı ile çevre sıcaklığı 25°C alınıp, çalışma basıncı ise 1 atm olarak ele alınmıştır. Farklı Re sayısı 800-1200-1600-2000' de laminer akış türünde ve 1C-2C-3C' de deşarj işlemine tabi tutulup, sıcaklık eğrileri karşılaştırılmıştır.

4.1.1. Seçilen materyallerin karakteristik ve fiziksel özellikleri

FloEFD üzerinden seçilen Lityum NCA iyon 18650 tipi pilin karakteristik özellikleri verilmiştir (Tablo 4.1). Lityum iyon pillerin başlarında bulunan sayı kodları onların fiziksel özelliklerini anlatmak için kullanılmaktadır. Çalışma yapacağımız NCA 18650 lityum iyon pil aslında 18-65-0 olarak adlandırılmaktadır. 18 sayısı pilin çapını mm cinsinden, 65 kısmı bize yüksekliğini mm cinsinden, 0 kısmı ise bize pilin silindirik şekilde olduğunu anlatmaktadır. Pilin varsayılan görüntüsü Şekil 4.1' de verilmiştir.



Şekil 4.1. Lityum NCA iyon 18650 tipi pilin varsayılan fiziksel görüntüsü

Batarya soğutma sistemi için kullanılacak pilin, soğutucu akışkan olan suyun ve kanal malzemesi Naylon-66'ın verileri FloEFD alt yapısında bulunan Mühendislik veri tabından (Engineering Database) alınmıştır.

Tablo 4.1. Lityum NCA 18650 pilin karakteristik özellikleri (FloEFD)

Kapasite	2800 mAh (Normal) 2700 mAh (Minimum)	
Normal Gerilim	3,65 V	
Pilin İç Direnci	$\leq 20 \text{ m}\Omega$	
Şarj Olurken	Standart Şarj Akımı	1400 mA
	Maksimum Sürekli Şarj Akımı	2800 mA
	Son gerilim	4,2 V
	Kesme Akımı	140 mA
Deşarj Olurken	Standart Deşarj Akımı	560 mA
	Maksimum Sürekli Deşarj Akımı	14000 mA
	Kesme Akımı	2,5 V
Çalışma Sıcaklığı (Pil Yüzey Sıcaklığı)	Şarjda Deşarjda	0°C / 50°C -30°C / 60°C

Seçilen pilin fiziksel parametreleri Tablo 4.2' de verilmiştir.

Tablo 4.2. Lityum NCA pilin fiziksel parametreleri (FloEFD)

Yoğunluk (kg/m ³)	Özısı (kgK)	Eksenel termal iletkenlik W/(mK)	Radyal termal iletkenlik W/(mK)
2750	823	3.4	38.05

Soğutucu akışkan olarak seçilen suyun fiziksel özellikleri, Tablo 4.3' de verilmektedir.

Tablo 4.3. Suyun fiziksel özellikleri (FloEFD)

Termal iletkenlik (W/(m.K))	Özısı kapasitesi (J/(kg.K))	Yoğunluk (kg/m ³)	Dinamik viskozite (Pa.s)
0.6	4182	998.2	0.001003

Kanal yapısı için tercih edilen Naylon-66 (Nylon-66)'nın fiziksel özellikleri Tablo 4.4' de verilmiştir.

Tablo 4.4. Naylon-66' nın fiziksel özellikleri (FloEFD)

Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül ısı kapasitesi (J/(kg.K))	Termal iletkenlik (W/(m.K))
1150	2200	0.27

4.2. Matematiksel Yöntem

Piller genel olarak döngü (şarj/deşarj) esnasında, pilin çekirdek kısmı olan orta kısımdan başlayarak pilin dış yüzeyine doğru ısı enerjisi üretirler. Üretilen enerjisinin bir bölümü pilin çekirdek kısmında depolanırken, büyük bir bölümü de oluşturulan termal yönetim sistemine aktarılır. Batarya termal yönetim sisteminin oluşturulabilmesi için de, ısı üretim, enerji, sınır koşullar denklemlerine ihtiyaç duyulur (Karatat ve Sokmen, 2022).

Çalışmada kullanılan lityum iyon pilin ısı denge denklemi verilmiştir (Denklem 4.1).

$$Q_p = Q_e + Q_a \quad (4.1)$$

Denklem 4.1' de verilen Q_p üretilen ısı miktarını, Q_e ortama aktarılan ısıyı verirken Q_a ise birikmiş ısıyı sembolize etmektedir.

Ortam sıcaklığı ile batarya arasındaki ısı geçişi taşınım, ışıma ve iletim ile sağlanmaktadır. Taşınım ve ışıma ile geçen ısı, iletimle geçen ısıya göre oldukça küçük olduğundan onlar yok sayılabilir ve ısı denge denklemini basitleştirmiş oluruz (Denklem 4.2).

$$\rho_k C_{p,k} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_k \nabla T) + q \quad (4.2)$$

Denklem 4.2' de verilen ρ_k batarya yoğunluğunu, $C_{p,k}$ özgül ısısını, k_k ısı iletim katsayısını verirken q değeri ise bize ısı üretim hızını vermektedir.

Pil içerisindeki elektrolit sıvılarının belirli bir hareket sınırı vardır bu sınırlı hareket durumu piller içerisindeki konvektif ısı transferinin ihmal edilebilecek seviyede olduğunu gösterir. Lityum iyon piller, doğal koşullar altında kapalı bir sistem olduklarından ve şeffaf olmadıkları için radyasyon yoluyla ısı transferi oldukça düşüktür, bu düşük oran ihmal edilebilecek seviyededir (Karatas ve Sokmen, 2022).

Kartezyen koordinat sisteminde 3 boyutlu ısı transferinde sıcaklık alanı hesaplamak için kullanılan denklem verilmiştir (Denklem 4.3).

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \quad (4.3)$$

Yapılan bu çalışma da silindirik lityum iyon piller için, silindirik koordinatlarda ısı transferi denklemini ele alınmıştır (Denklem 4.4).

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k_\phi \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (4.4)$$

Bu çalışmada zorlanmış akış kullanılmaktadır ve akış karakteristiğinin belirlenebilmesi için Reynolds sayısının hesaplanması gerekmektedir (Denklem 4.5).

$$Re = \frac{\rho v d_h}{\mu} \quad (4.5)$$

Denklem 4.5' de bulunan ρ akışkan yoğunluğunu (kg/m^3), v akışkan hızını (m/s), d_h hidrolik çapını ve μ dinamik viskoziteyi (Pa.s) vermektedir.

Hidrolik çap formülü Denklem 4.6' de verilmiştir.

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (4.6)$$

Denklem 4.3' de verilen A kesit alanını ifade ederken, P ise kesit alanında ıslatılan çevreyi ifade etmektedir.

Dikdörtgen kesite sahip bir kanalın hidrolik çapı, Denklem 4.7' de gösterildiği gibidir.

$$D_h = \frac{4ab}{2a + 2b} \quad (4.7)$$

Denklem 4.7 düzenlenirse, hidrolik çap Denklem 4.8 elde edilir.

$$D_h = \frac{2ab}{a + b} \quad (4.8)$$

Kanallarda ısı transferi çözümlerken gerekli olan ısı taşınım katsayısını boyutsuzlaştırmak için Nu sayısının bulunması gerekir (Denklem 4.9).

$$Nu = \frac{\dot{q}_{taşınım}}{\dot{q}_{iletim}} = \frac{hL}{k} \quad (4.9)$$

Denklem 4.9' da verilen h(W/m²K) ısı taşınım katsayısını, L (m) karakteristik uzunluğu veririrken, k (W/mK) ise akışkanın ısı iletkenliğini göstermektedir.

Denklem 4.9' daki L karakteristik uzunluğu dikdörtgen kesitli kanal için hidrolik çap olarak düzenlenir (Denklem 4.10).

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (4.10)$$

Kütlesel debi için,

$$\dot{m} = \rho v A_k \quad (4.11)$$

Burada A_k bize kesit alanını vermektedir.

Hacimsel debi için,

$$\dot{V} = v \cdot A_k \quad (4.12)$$

4.3. Sınır ve Başlangıç Koşulları

4.3.1. Sınır koşulları

Bir pilde oluşan ısı enerjisi genel olarak 3 farklı şekilde çevresindeki ortama aktarılır, bunlar; iletim, taşınım ve radyasyon yoluyla. Pilin çekirdek bölgesinde oluşmaya başlayan ısı, ilk önce iletimle pilin dış yüzeyine doğru aktarılır sonrasında doğal taşınım ve radyasyon yoluyla ortama ısı enerjisi olarak verilir. Seçilen Lityum NCA 18650 iyon tipi pili için bazı faktör kabulleri yapılması gerekmektedir. Çünkü pillerin genel olarak ısı üretim süreçleri çok karmaşıktır ve birçok etkenden etkilenirler. FloEFD CFD analizi ile pilin 3 boyutlu simülasyonunu yapmak için aşağıdaki varsayımlar ele alınmıştır.

- Pilin ısı üretiminin tamamen pilin çekirdek gövdesinden kaynaklandığı varsayılar, diğer malzemelerin ısı üretimi yok sayılmıştır.
- Pilin özgül ısı kapasitesinin ve yoğunluğunun düzgün dağıldığı ve şarj, deşarj sırasında değişmediği varsayılmıştır.
- Pil için ısı gücün sabit olduğu ve her parçanın ısı gücünün özdeş olduğu varsayılmıştır.
- Şarj ve deşarj sırasında, pilin sarım yapısından dolayı termal iletkenlik anizotropik olduğu ve değişmeden kaldığı varsayılmıştır.
- Radyasyon (ışınım) ısı transferi ihmal edilmiştir.
- Zorlanmış taşınım kabulü yapılmıştır.
- Tam gelişmiş akış uygulanmıştır.

4.3.2. Başlangıç koşulları

Batarya termal yönetim sisteminde, t_0 anında analizler yapılmadan önce başlangıç koşullarının girilmesi gerekmektedir. Aşağıda maddeler halinde verilmiş koşullar, analiz veri girdilerini göstermektedir ve analizler bu şartlar altında başlatılmıştır.

- Soğutucu akışkan olarak su seçilmiştir ve suyun giriş sıcaklığı ($T_{su,g}$) 25°C dir.
- Çevre sıcaklığı ($T_{çevre}$) 25°C olarak alınmıştır.
- T_0 anında pilin ve kanalın başlangıç sıcaklıkları, 20°C olarak alınmıştır.
- Atmosfer basıncı (P_{atm}) 101325 Pa olarak alınmıştır.
- Pil kapasitesi 2,8 Ah, voltajı 3,65 V dur ve pil gücü 10,22 Wh dir.
- Analizler 1C' de %100 dolu olan pilleri %0,1' e deşarj edilmiştir.
- Reynolds sayısı 800 alınarak, laminer akış türü seçilmiştir.
- Analizler zamana bağlı yapılmıştır.
- Analizlerde yerçekimi kuvveti etkisi dahil edilmiştir ve -y yönünde 9,81 kg/m² dir.
- Isı taşınım katsayısı 10 W/m²K olarak alınmıştır.

4.4. Sayısal Yöntem

Bu çalışmada kullanılan FLOEFD programı, içerisinde CAD (bilgisayar destekli tasarım) bulunduran üç boyutlu CFD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) programıdır.

*Korunum Denklemleri

FloEFD programında CFD analizi yapılırken kendi altyapısında çözümlendiği denklemler verilmiştir (Denklem 4.9-4.10-4.11-4.12-4.13).

Sıkıştırılmaz akışkan için süreklilik denklemi (Denklem 4.9).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.9)$$

Enerji denklemi (Denklem 4.10).

$$\rho c_p \left(\frac{\partial E}{\partial t} + u_x \frac{\partial E}{\partial x} + u_y \frac{\partial E}{\partial y} + u_z \frac{\partial E}{\partial z} \right) = \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} \right) \quad (4.10)$$

Momentum denklemleri (Denklem 4.11-4.12-4.13).

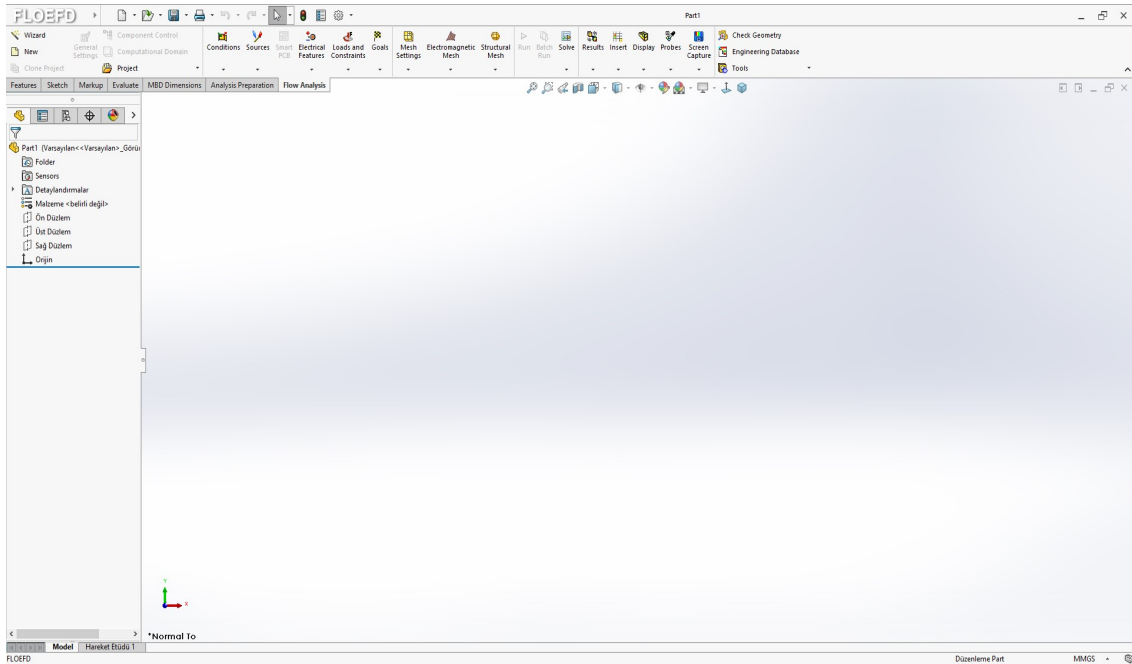
$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4.11)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho f_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (4.12)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4.13)$$

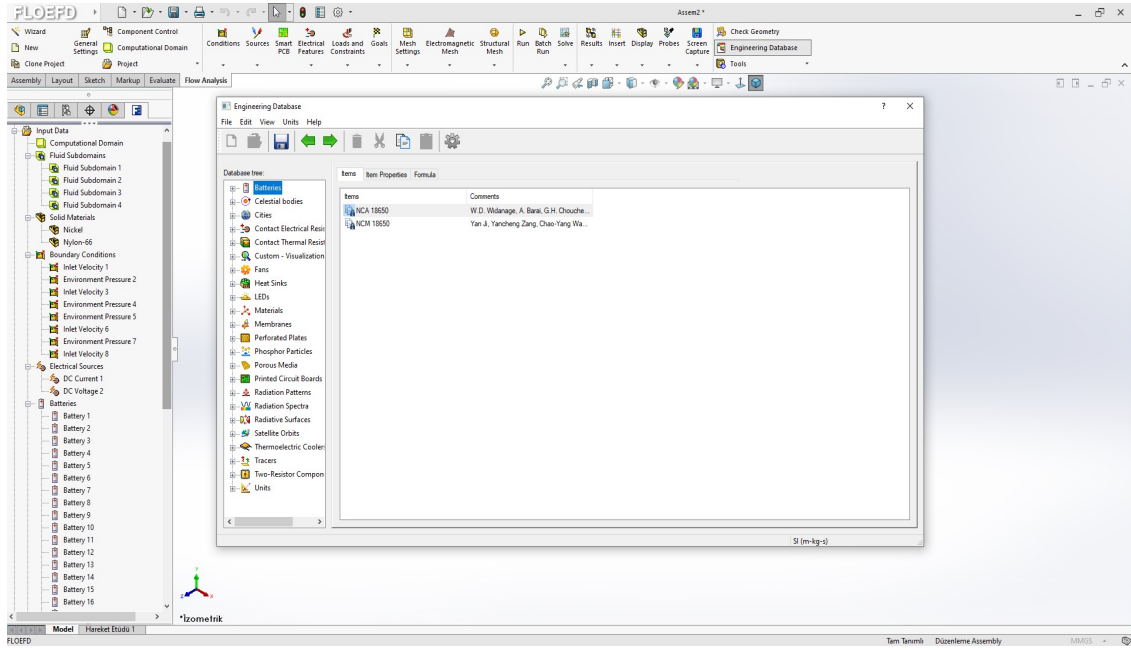
Verilen momentum denklemlerinde u, v, w simgeleri akışkanın hız bileşenlerini gösterirken, koordinat sistemindeki yönleri ise x, y, z göstermektedir. Momentum denklemlerindeki f_x, f_y, f_z ise, birim sıvı başına hacim kuvveti olarak ele alınmıştır.

Eşzamanlı çizimlere destek veren FLOEFD programının arayüzü Şekil 4.2' de verilmiştir.



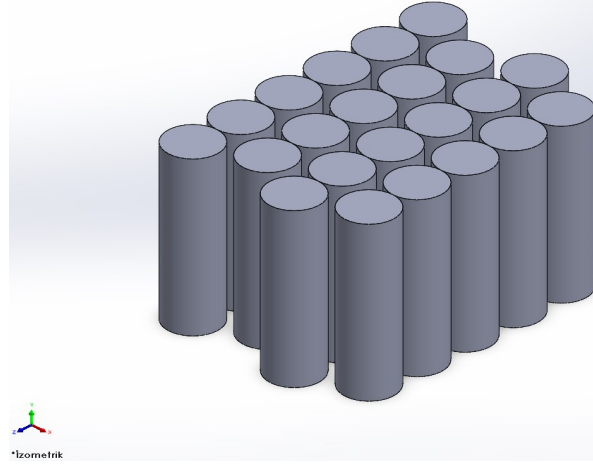
Şekil 4.2. FLOEFD'de CFD arayüzü

FloEFD içerisinde tanımlı bazı lityum iyon pil çeşitleri vardır. Bu pil çeşitlerine, FloEFD içerisinde bulunan mühendislik veritabanı sekmesi altında piller seçeneği seçilerek ulaşılabilir (Şekil 4.3). Kayıtlı olan kimyasal pil yapıları NCA (nikel-kobalt-alüminyum) 18650 ve NCM (nikel-kobalt-manganez) 18650 dir. Bu çalışmada kayıtlı kimyasal pil yapısı NCA 18650 seçilmiştir. Seçilen bu pilde tasarlanan modele göre (seri/paralel) akım ve voltaj değerleri verilmiştir.



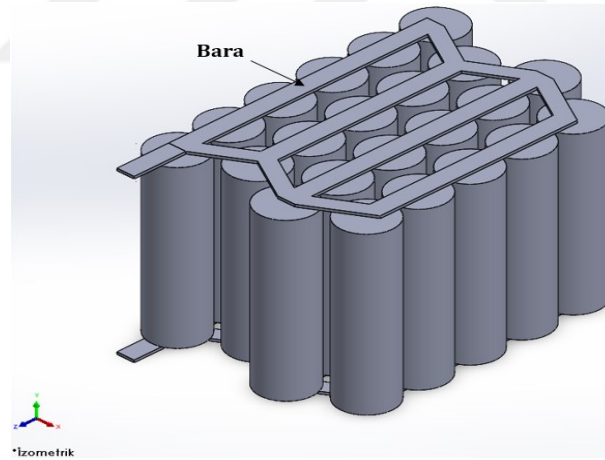
Şekil 4.3. FloEFD' de pil seçimi arayüzü

FloEFD üzerinde bulunan CAD yazılımı ile batarya paketi tasarımı geliştirilmiştir. Bu çalışma da oluşturulan batarya paketinde toplam 22 adet, Lityum NCA iyon 18650 tipi pil kullanılmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Batarya paketi yapısı

Oluşturulan batarya paketindeki piller bara ile birbirlerine paralel bir şekilde bağlanılmıştır (Şekil 4.5). Bara yapımı için seçilen materyal nikel olarak alınmıştır.



Şekil 4.5. Bara montajlı batarya paketi

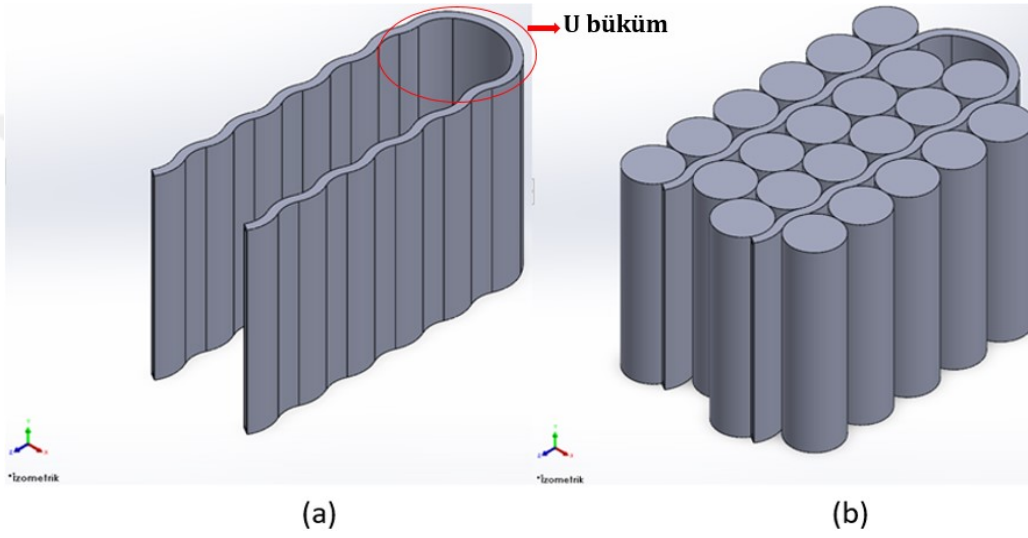
4.5. Tasarlanan Batarya Termal Yönetim Sisteminin Oluşturulma Basamakları

Batarya termal yönetim sisteminin (BTYS) oluşumu 3 başlık altında incelenmiştir. Bunlar; kanal yapısı seçimi, kanal yapısına bağlı bölme sayısının seçimi ve bölme sayısına bağlı akışkan akış yönü seçimidir. Bu üç başlık altında seçilen ve oluşturulan batarya termal yönetim sistemi üzerinde daha sonrasında parametrik çalışmalara başlanmıştır.

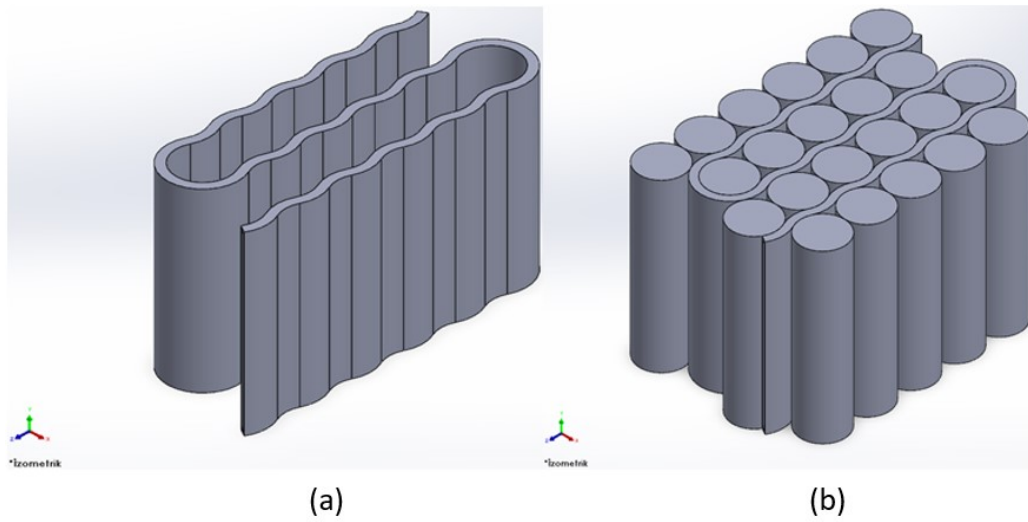
4.5.1. Kanal yapısı seçimi (I)

Çalışma yapılacak kanal yapısının belirlenebilmesi için U, 2-U ve 4-U bükümlü kanal tasarımı yapılmıştır (Şekil 4.6-4.7 ve 4.8). Bu yapılan 3 farklı kanal tasarımını, kendi aralarında sıcaklık performansları karşılaştırılarak en iyi batarya termal yönetim sistemi seçilmiştir.

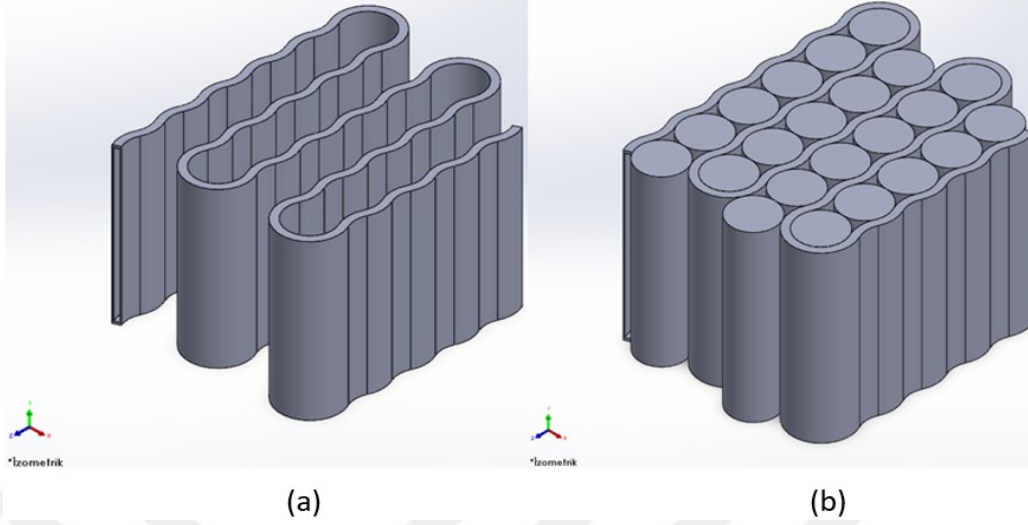
Karşılaştırma yapılırken, 3 kanal tasarımının analizleri de sınır ve başlangıç koşulları ele alınarak yapılmıştır.



Şekil 4.6. U bükümlü kanal tasarımı (a) kanal gösterimi, (b) kanalın bataryalı gösterimi



Şekil 4.7. 2-U bükümlü kanal tasarımı (a) kanal gösterimi, (b) kanalın bataryalı gösterimi



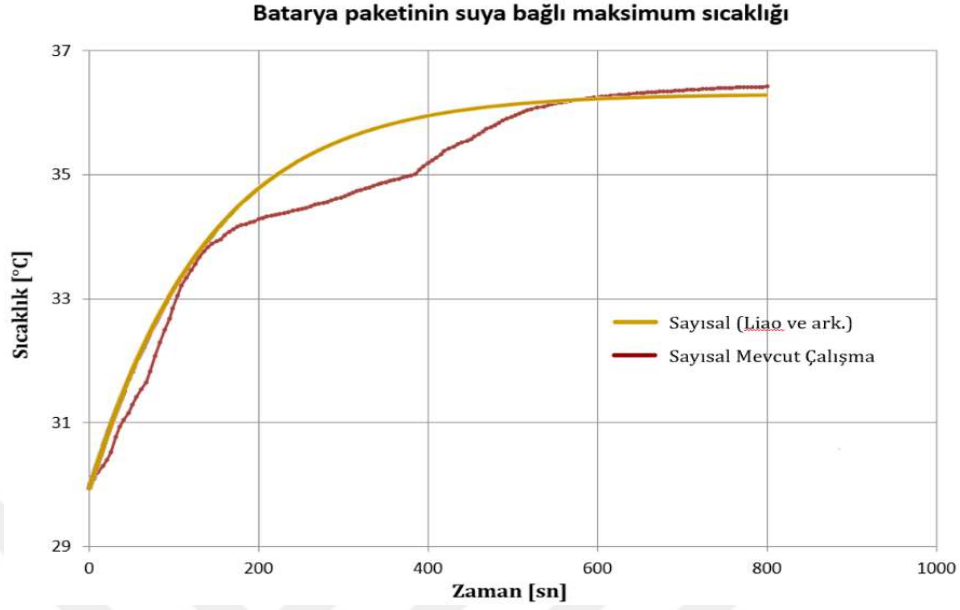
Şekil 4.8. 4-U bükümlü kanal tasarımı (a) kanal gösterimi, (b) kanalın bataryalı gösterimi

Karşılaştırma sonrasında 4-U bükümlü kanal yapının daha iyi bir ısıl performans gösterdiği belirlenmiştir. Bölüm 5’ de “Bulguların Değerlendirilmesi” adlı bölümde karşılaştırma sonuçları ve değerlendirme bilgileri verilmiştir.

- Seçilen kanal yapısının doğruluğunun belirlenebilmesi için doğrulama çalışmasının, analiz sonuçlarının daha doğru sonuçlar vermesi için de mesh bağımsızlığının yapılması gerekmektedir.

4.5.1.1. Kanal Yapısının Doğrulama Çalışması

Liao ve ark. 2022’ de ANSYS SpaceClaim analiz programıyla yaptıkları çalışma ile FloEFD CFD analizi ile yapılan sayısal mevcut çalışma, model doğrulaması için karşılaştırılmıştır. Benzer kanal yapılarına ve bataryaya sahip iki tasarım, benzer veri girdileri girilerek karşılaştırılmıştır. İki model tasarımında da suyun giriş sıcaklığı ve ortam sıcaklığı 30°C alınmış ve Reynolds sayısı 500 olarak sabit tutulmuştur. Kanal kesitleri aynı olan iki tasarımın da kanal eşdeğer çapları aynı olduğu için soğutucu akışkan giriş hızları da aynıdır ve suyun giriş hızı 0,129 m/s olarak alınmıştır. %100 şarj halinde bulunan batarya, 1C deşarj oranında %0,1’ e kadar deşarj edilerek, batarya paketinin suya bağlı maksimum sıcaklığı karşılaştırılmıştır (Şekil 4.9).

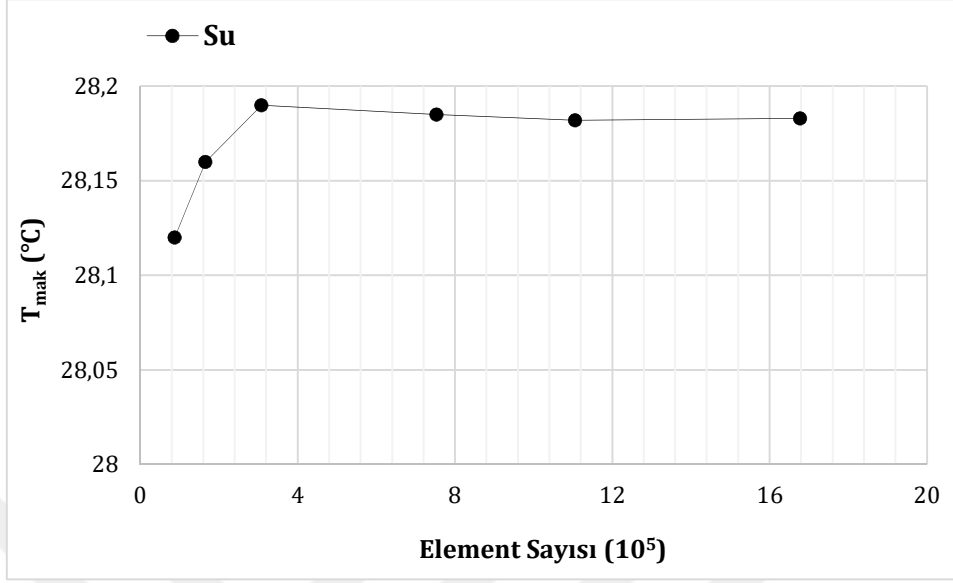


Şekil 4.9. Sayısal çalışmalar arasındaki karşılaştırma

Şekil 4.9’ de görüldüğü gibi yapmış olduğumuz çalışmanın literatürde yapılmış olan çalışma ile karşılaştırıldığı zaman büyük bir oranda benzerlik gösterdiği görülmektedir. 700 sn deşarjdan sonra sıcaklık farkı $0,12^{\circ}\text{C}$ dir. Sıcaklık eğrilerinin orta deşarj kısmında küçük bir sapma görülmektedir, maksimum sapma oranı %3,63 dür. İki çalışmada oluşan sapmanın nedeni olarak; iki farklı sayısal analiz programında bulunan pillerin türü aynı olsa da karakteristikleri arasındaki küçük farklılıkların olması, batarya paketinin basitleştirilmesinden meydana gelen iki program arasındaki farklılıklar olabilmektedir.

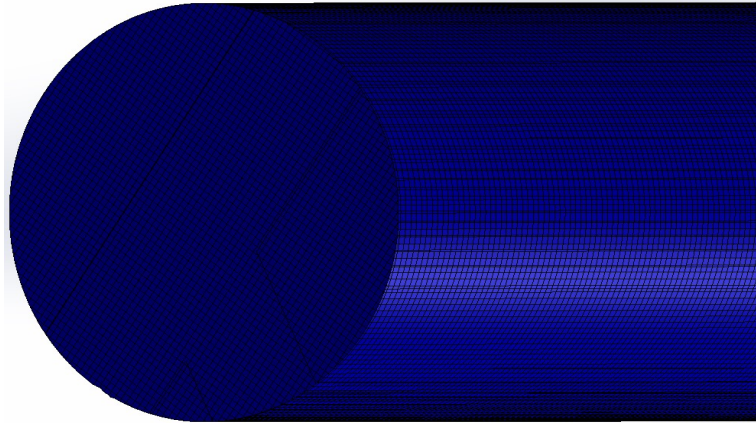
4.5.1.2. Mesh Bağımsızlığı ve Çözüm Yakınsaması

Mesh (ağ) sayısının belirlenmesi yapılacak olan analizlerin doğruluğu için oldukça önemlidir. Sayısal analizlerden önce belirlenmesi gereken mesh sayısı bize analizlerde kullanmamız gereken ağ sayısını vermektedir. Şekil 4.10’ da soğutucu akışkan olarak seçilen suyun T_{mak} (maksimum sıcaklık) değerinin, 87.104 ile 1.677.620 arasında yapılan element sayısı analizi verilmiştir. Element sayısı, ideal çalışma aralığını bulmamız için yeterli olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.10. Suyun T_{mak} değerinin element sayısına göre değişimi

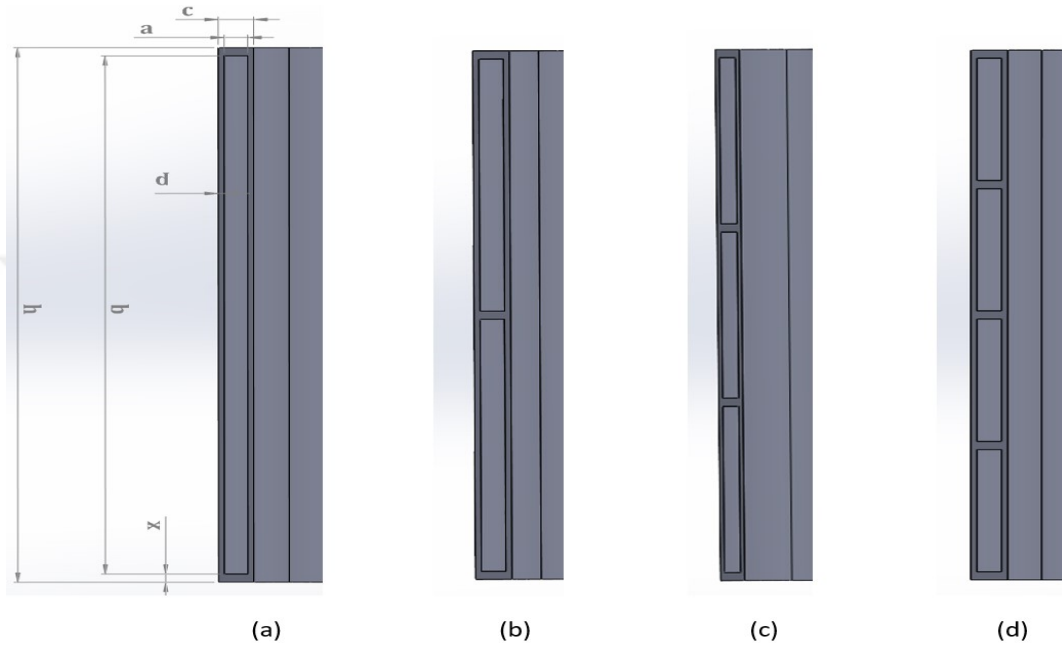
Şekil 4.10' da soğutucu akışkan olan suyun, 6 farklı element sayısı girdisinde değer 0,752 milyon seviyesine ulaştıktan sonra suyun T_{mak} değerinin sabit olduğunu ve sıcaklık dalgalanmasının 0,002 °C' yi geçmediği gözlenmiştir. Bu nedenle mesh sayısı 0,752 milyon olarak alınmış ve sayısal analizlere bu mesh sayısı ile devam edilmiştir. Pil üzerine uygulanan mesh görseli verilmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Pil üzerine uygulanan mesh yapısı

4.5.2. Kanal yapısına bağı bölme sayısının seçimi (II)

Şekil 4.8' deki (a) ve (b) görselinde verilen 4-U bükümlü kanal yapısı ve batarya modülü tasarımı ele alınıp, kanal bölme sayısının belirlenmesi çalışmaları yapılmıştır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Kanal giriş/çıkış bölme sayıları (a) 1 bölmeli, (b) 2 bölmeli, (c) 3 bölmeli, (d) 4 bölmeli

Şekil 4.12' de (a) görselinde verilen h, a, b, c, d ve x parametreleri (b), (c), (d) kanal yapıları içinde geçerli olup, kanalın ve bölmenin boyutlarını göstermektedir (Tablo 4.5). Tüm bölmeli kanallar bu parametrik değerlere göre tasarlanmıştır. Bölmeli kanalların b değeri hariç diğer parametreleri sabit tutulmuştur. Bu parametrelerin belirlenmesi hidrolik çapların bulunabilmesi için oldukça önemlidir.

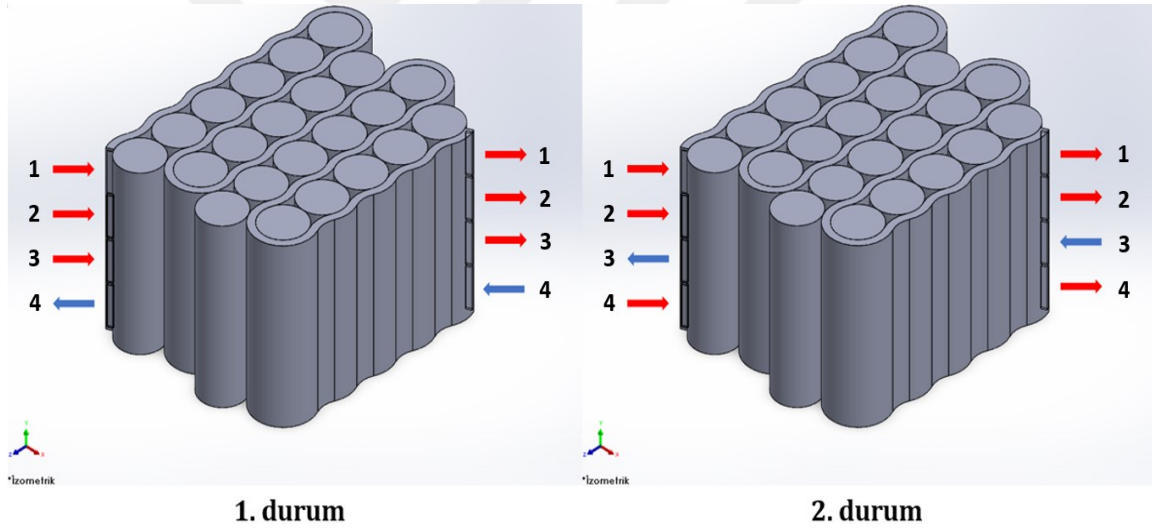
Tablo 4.5. Kanal bölmelerinin fiziksel parametreleri

Bölme Sayısı	Kanal dış yükseklik h (mm)	Kanal içi genişlik a (mm)	Kanal içi yükseklik b (mm)	Kanal dış genişlik c (mm)	Genişlik et kalınlığı d (mm)	Yükseklik et kalınlığı x (mm)
1	65	2	63	3	0,5	1
2	65	2	31	3	0,5	1
3	65	2	20,33	3	0,5	1
4	65	2	15	3	0,5	1

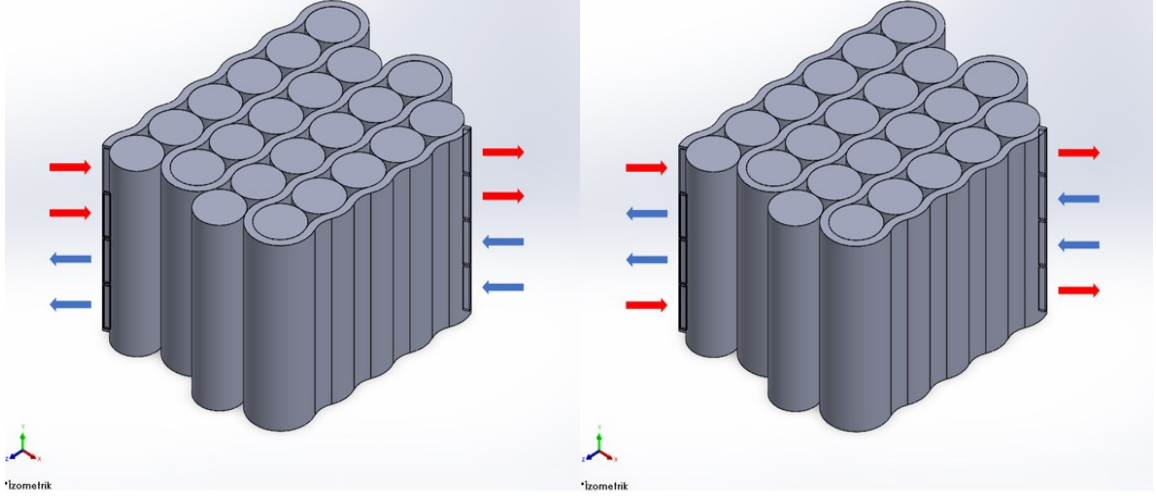
Bölme sayısının belirlenmesi yapılırken, 4 kanal bölme tasarımının analizi de sınır ve başlangıç koşulları ele alınarak yapılmıştır. Karşılaştırma sonrasında 4 bölmeli kanal yapısının daha iyi bir ısı performans gösterdiği belirlenmiştir. Bölüm 5’ de “Bulguların Değerlendirilmesi” adlı bölümde karşılaştırma sonuçları ve değerlendirme bilgileri verilmiştir.

4.5.3. Bölme sayısına bağlı akışkan akış yönü seçimi (III)

Bölme sayısı belirlenen kanalın, akışkan akış yönünü bulmak için 5 farklı modele indirgenmiştir ve bu 5 farklı akışkan akış yönü aşağıda verilmiştir (Şekil 4.13-4.14-4.15). Şekil 4.13’ de görüldüğü gibi her kanal bölmeye bir numara (1-2-3-4) verilmiş ve kanal bölmelerine verilen numaralar sayesinde akışkanın akış yönleri daha kolay bir şekilde ifade edilmiştir.



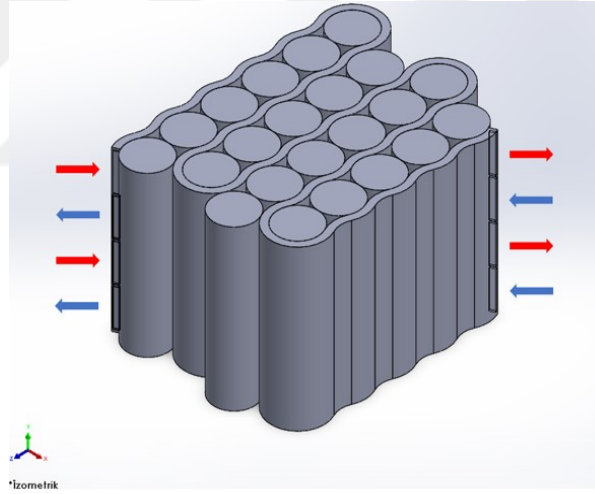
Şekil 4.13. Kanal içi akışkan akış yönleri (1. ve 2. durum)



3. durum

4. durum

Şekil 4.14. Kanal içi akışkan akış yönleri (3. ve 4. durum)



5. durum

Şekil 4.15. Kanal içi akışkan akış yönleri (5. durum)

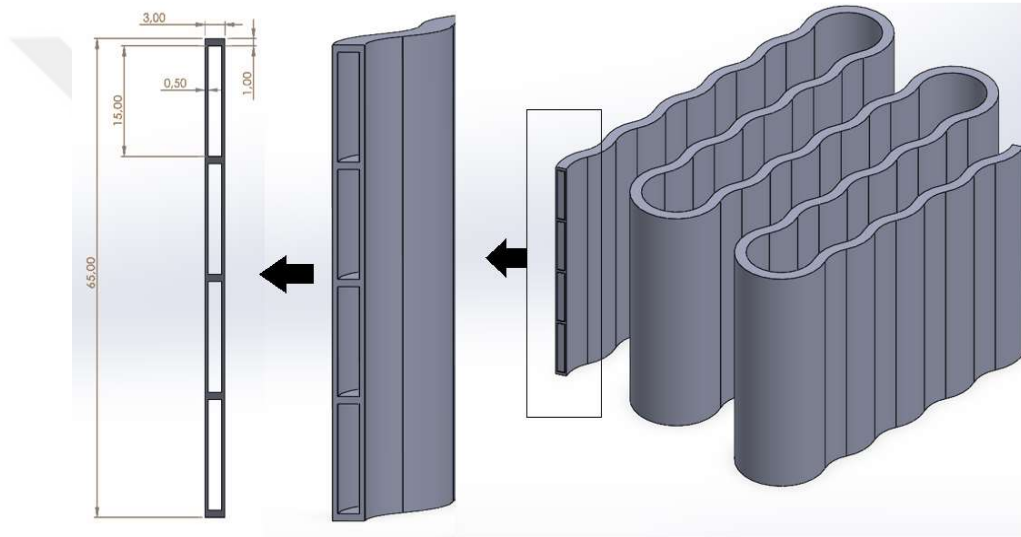
Karşılaştırma çalışmalarında akış yönünün bulunması için, Şekil 4.13-4.14-4.15' deki 1. 2. 3. 4. ve 5. durumları için analizler sınır ve başlangıç koşulları ele alınarak yapılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda Şekil 4.15' deki 5. durum, batarya üzerinden ısı çekilmesinde en iyi ısıl performans gösterdiği görülmüştür. Bölüm 5' de "Bulguların Değerlendirilmesi" adlı bölümde karşılaştırma sonuçları ve değerlendirme bilgileri verilmiştir.

4.6. Belirlenmiş Batarya Termal Yönetim Sistemi

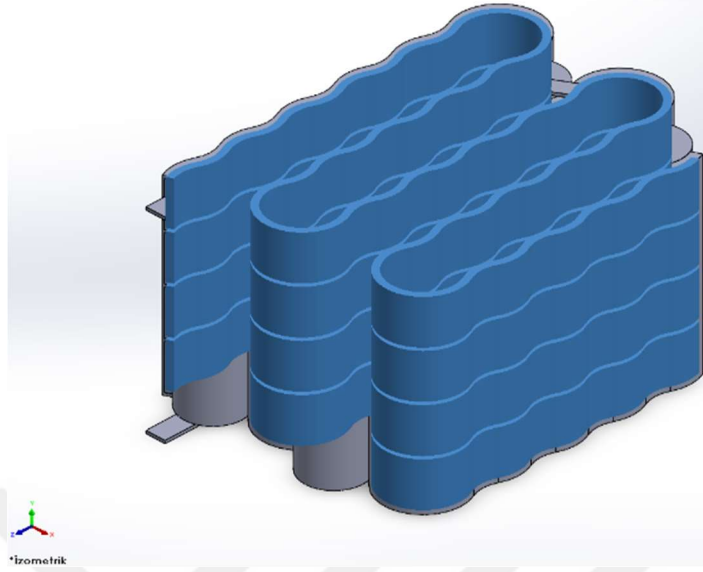
Kanal seçiminin yapılması, kanal bölme sayısının belirlenmesi ve akışkan akış yönünün bulunmasından sonra parametrik çalışma yapılacak olan batarya termal yönetim sistemi belirlenmiştir.

Oluşturulan batarya termal modülü 4-U bükümlü, 4 bölmeli dalgalı kanaldır. Ele alınan tasarımın da kanalın akışkan giriş ve çıkış bölmelerinin mm (milimetre) cinsinden değerleri verilmiştir (Şekil 4.16). Kanal yapımı için seçilen materyal Nylon-66 (Naylon-66) dır.



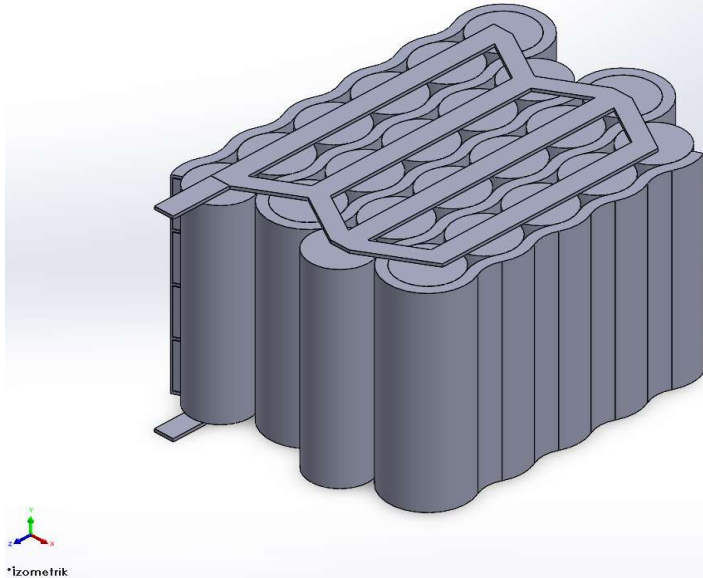
Şekil 4.16. Kanal yapısı ve bölmelerin fiziksel özellikleri

Soğutucu akışkanın akış yolu, kanalın tamamı için gösterilmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Dört bölmeli kanalda akışkanın akış yolu

Genel olarak, FloEFD CAD programı ile yapılan ve montajlanan batarya termal yönetim sistemi tasarımı verilmiştir ve parametrik çalışmalar bu tasarlanan model üzerinden yapılmıştır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. Batarya termal yönetim sistemi tasarımı

4.6.1. Belirlenmiş batarya termal yönetim sistemi için parametrik çalışma

Kanal seçiminin yapılması, kanal bölme sayısının belirlenmesi ve akışkan akış yönünün bulunmasından sonra Şekil 4.18' de elde ettiğimiz batarya termal yönetim sistemi modeli için parametrik çalışma yapılmıştır. Parametrik veriler birçok sayısal çalışmada elde edilen bilgilerin ortak karması ile mevcut sayısal çalışma öncesinde yapılan deneme çalışmalarından elde edilen bilgilerden derlenmiştir. Yapılacak olan parametrik çalışmanın değişkenleri ve analiz numaraları verilmiştir (Tablo 4.6). C-oranı pilin deşarj edilme oranını, T_{su} soğutucu akışkan olarak seçilen suyun sıcaklığını, T_c çevre sıcaklığını ve Re ise Reynolds sayısını vermekte olup, akışkanın giriş hızını belirlememizi sağlıyor.

Tablo 4.6. Parametrik çalışma verileri

Analiz no	C-oranı	T_{su}	$T_{çevre}$	Re
1	1	25	25	800
2	1	25	25	1200
3	1	25	25	1600
4	1	25	25	2000
5	2	25	25	800
6	2	25	25	1200
7	2	25	25	1600
8	2	25	25	2000
9	3	25	25	800
10	3	25	25	1200
11	3	25	25	1600
12	3	25	25	2000

Parametrik çalışmada verilen Reynolds sayıları için, soğutucu akışkan olan suyun kanala giriş hızlarının hesaplanması gerekmektedir. Bunun içinde önce hidrolik çap hesabının yapılması sonrasında akışkan giriş hızı hesaplanmalıdır.

Denklem 4.8' e göre kanal hidrolik çapı;

$$D_h = \frac{2(0,002 \times 0,015)}{0,002 + 0,015} = 0,00353 \text{ m} \quad (4.14)$$

Belirlenen hidrolik çap sayısına göre, Denklem 4.5' de yerine yazılırsa;

$$800 = \frac{(998,2)(v)(0,00353)}{0,001003} \quad (4.15)$$

$$v = 0,227 \text{ m/s}$$

Hesaplamalar diğerk Reynolds sayıları 1200, 1600 ve 2000' e göre Denklem 4.15' e yazılır çözümlenirse;

$$\text{Re}=1200 \text{ için } v=0,341 \text{ m/s}$$

$$\text{Re}=1600 \text{ için } v=0,455 \text{ m/s}$$

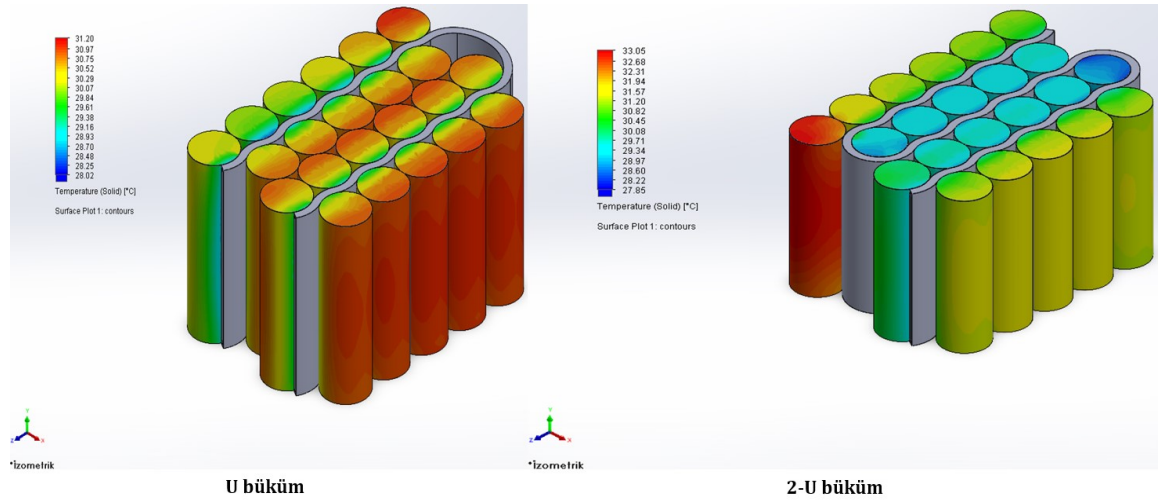
$$\text{Re}=2000 \text{ için } v=0,569 \text{ m/s dir.}$$

5. BÖLÜM

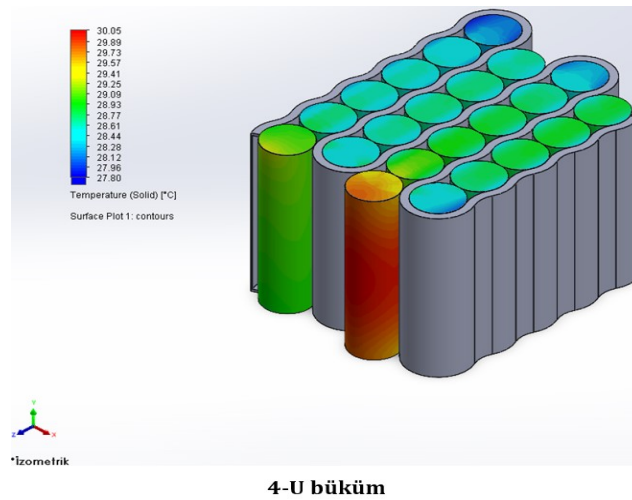
BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Kanal Yapısı Seçiminin Bulguları (I)

Üç farklı kanal yapısı olan U büküm, 2-U büküm ve 4-U bükümde batarya paketinin sıcaklık dağılımları gösterilmiştir (Şekil 5.1-5.2).

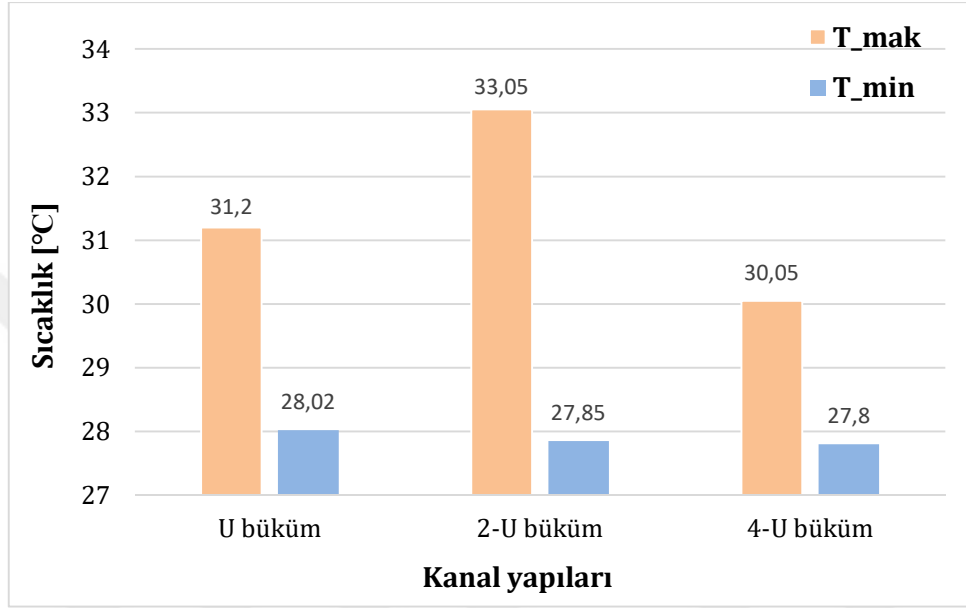


Şekil 5.1. U ve 2-U bükümlü dalgalı kanalın bataryada oluşturduğu sıcaklık dağılımları



Şekil 5.2. 4-U bükümlü dalgalı kanalın bataryada oluşturduğu sıcaklık dağılımı

U büküm dalgalı kanal batarya paketinin $T_{\text{mak}}=31,20^{\circ}\text{C}$ ' de $T_{\text{min}}=28,02$ iken, 2-U bükümlü dalgalı kanalın $T_{\text{mak}}=33,05^{\circ}\text{C}$ ' de $T_{\text{min}}=27,85$ ve 4-U bükümlü dalgalı kanalın $T_{\text{mak}}=30,05^{\circ}\text{C}$ ' de $T_{\text{min}}=27,80^{\circ}\text{C}$ olarak bulunmuştur (Şekil 5.3).



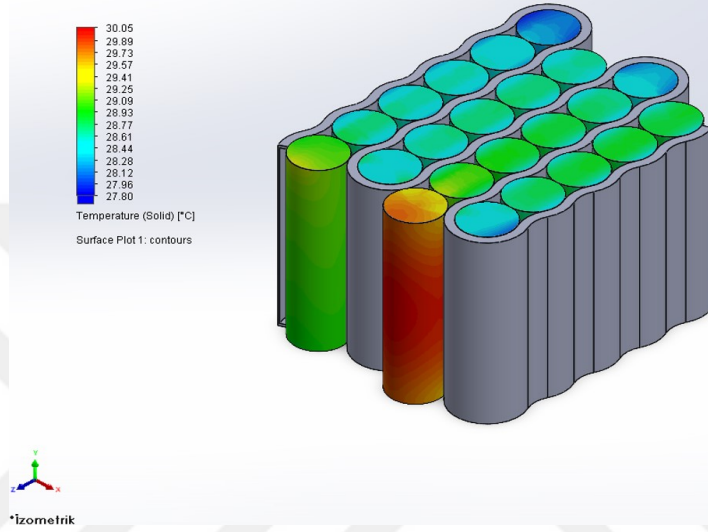
Şekil 5.3. U, 2-U ve 4-U bükümlü dalgalı kanalın, T_{mak} ve T_{min} değerlerinin karşılaştırılması

3 kanal tasarımı içinde sabit tutulan veri girdileri sonucunda, 4-U bükümlü dalgalı kanalın, U bükümlü dalgalı kanala göre T_{mak} değerinin %3,69 azaldığını ve 2-U bükümlü dalgalı kanala göre de T_{mak} değerinin %9,08 azaldığı görülmüştür. Yine 4-U bükümlü dalgalı kanalın U ve 2-U bükümlü dalgalı kanala göre, T_{min} değerinin azalma oranı sırasıyla %0,79 ve %0,18 dir. Sonuç olarak, 4-U bükümlü dalgalı kanalın, U ve 2-U bükümlü dalgalı kanala göre daha iyi bir ısıl performans gösterdiği görülmektedir.

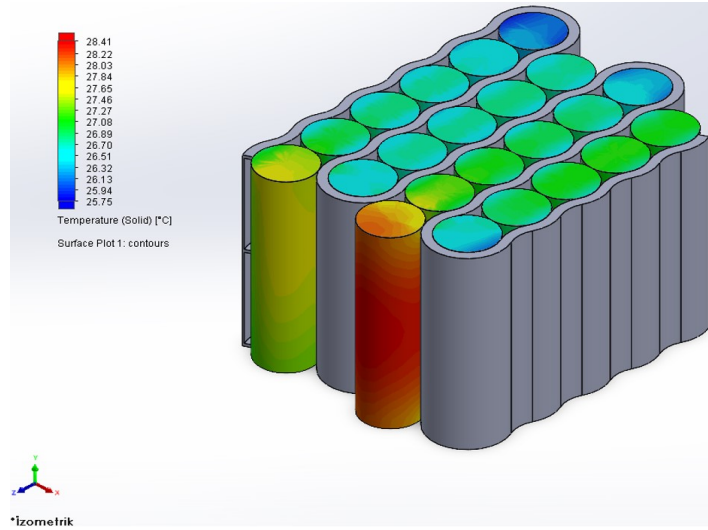
Her ne kadar 2-U bükümlü dalgalı kanalın T_{mak} değeri, U bükümlü dalgalı kanala göre yüksek ölçülse de bunun tek bir pil hücresinden kaynaklandığını ve 2-U bükümlü dalgalı kanalda $T_{\text{min}}=27,85^{\circ}\text{C}$ iken U bükümlü dalgalı kanal da $T_{\text{min}}=28,02^{\circ}\text{C}$ olduğu görülmektedir. Ayrıca, 2-U bükümlü dalgalı kanalın ortalama batarya sıcaklık dağılımının, U bükümlü dalgalı kanala göre oldukça iyi olduğu görülmekte ve ölçülmektedir.

5.2. Kanal Yapısına Bağlı Bölme Sayısı Seçiminin Bulguları (II)

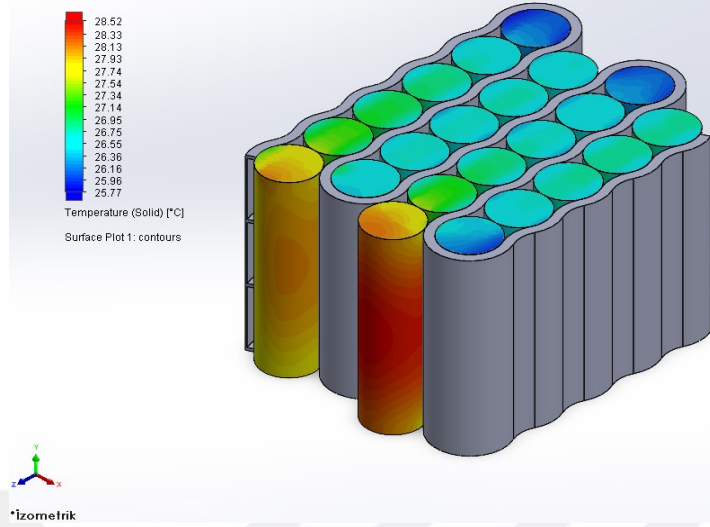
Kanal bölme sayısı, 1-2-3-4 bölmeli olarak ele alınmıştır ve çalışma bu 4 model üzerinden çalışma yapılmıştır. Bölme sayılarının batarya paketi üzerindeki sıcaklık konturları verilmiştir (Şekil 5.4-5.5-5.6-5.7).



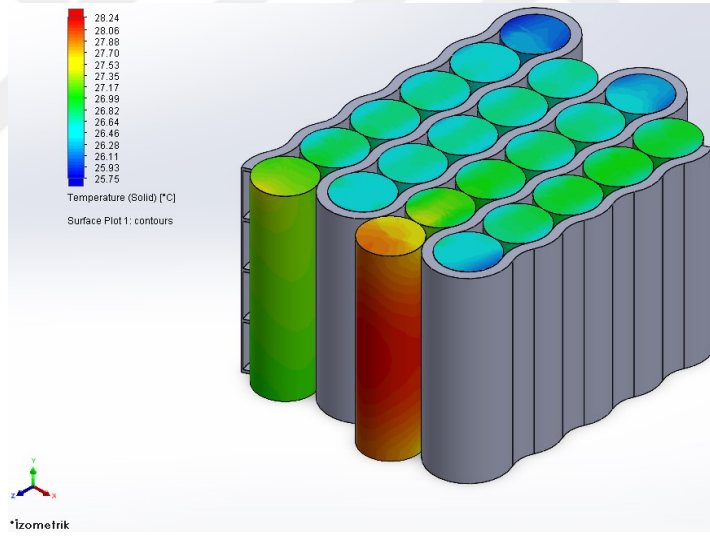
Şekil 5.4. Bir bölmeli kanalın batarya üzerindeki sıcaklık dağılımı



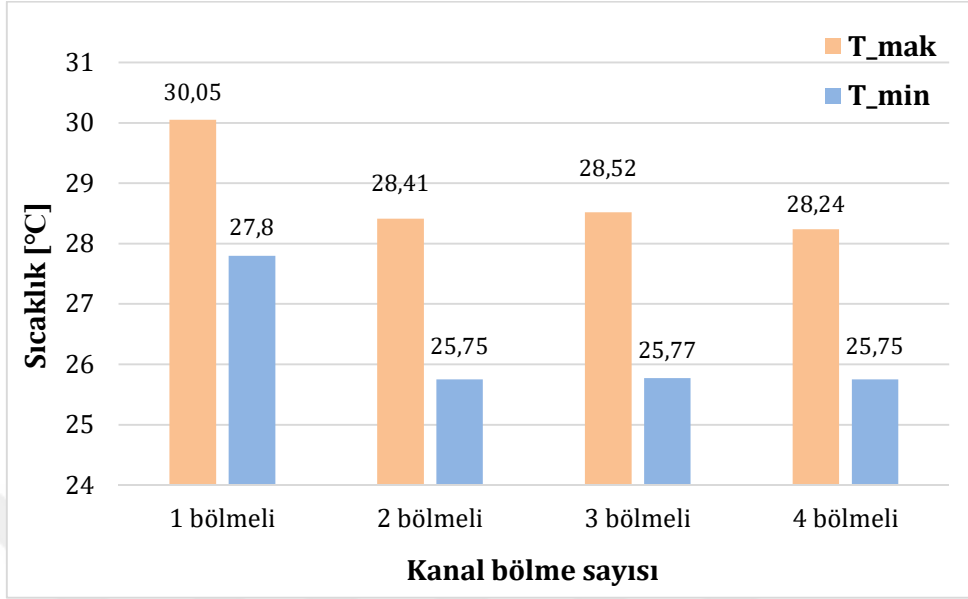
Şekil 5.5. İki bölmeli kanalın batarya üzerindeki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.6. Üç bölmeli kanalın batarya üzerindeki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.7. Dört bölmeli kanalın batarya üzerindeki sıcaklık dağılımı

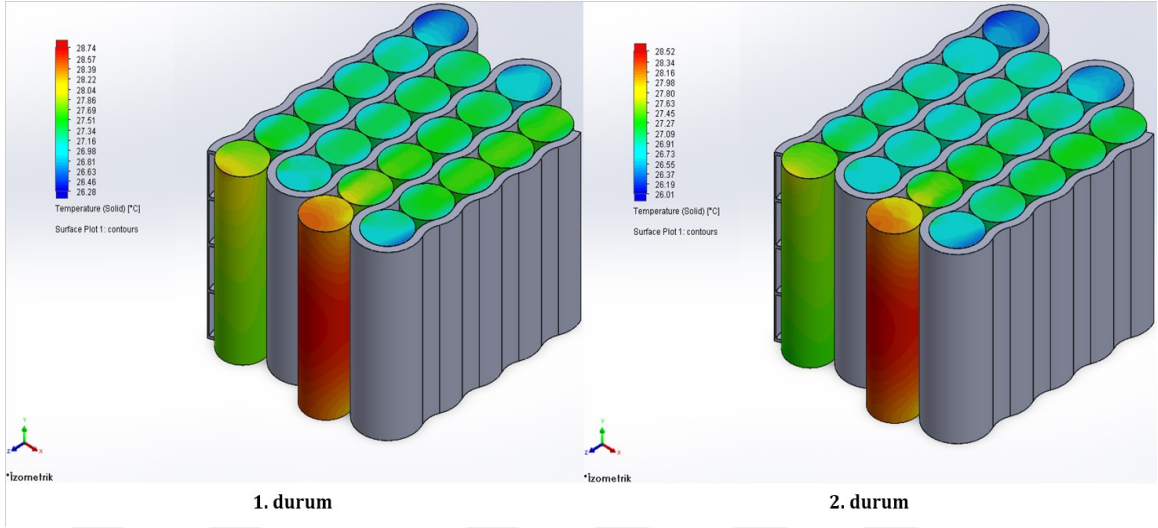


Şekil 5.8. Kanal bölme sayılarının T_{\max} ve T_{\min} değerlerinin karşılaştırılması

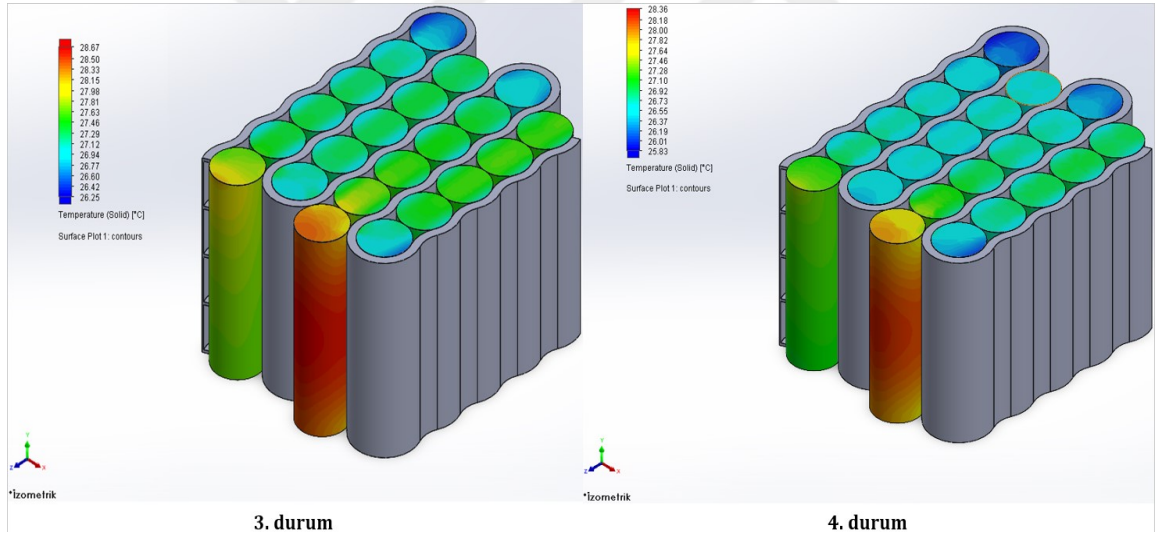
Şekil 5.8 görüldüğü gibi, kanal bölme sayılarındaki artışın batarya üzerindeki sıcaklığı stabil bir şekilde azalttığı görülmemiştir, aksine 3 bölmeli dalgalı kanal yapısının 2 bölmeli kanala göre T_{\max} ve T_{\min} değerleri artmıştır. Şekil 5.7' de bataryanın T_{\max} sıcaklığı 28,24°C iken Şekil 5.6' da 28,52°C olup arasındaki fark % 0,98 oranda sıcaklıkta bir düşüş olduğu hesaplanmıştır. Şekil 5.8' de 4 bölmeli dalgalı kanalın, 1 bölmeli ve 2 bölmeli kanala göre T_{\max} sıcaklıklarındaki düşüş farkları sırası ile 1,81°C ile 0,17°C olduğu hesaplanmıştır.

5.3. Bölme Sayısına Bağlı Akışkan Akış Yönü Seçiminin Bulguları (III)

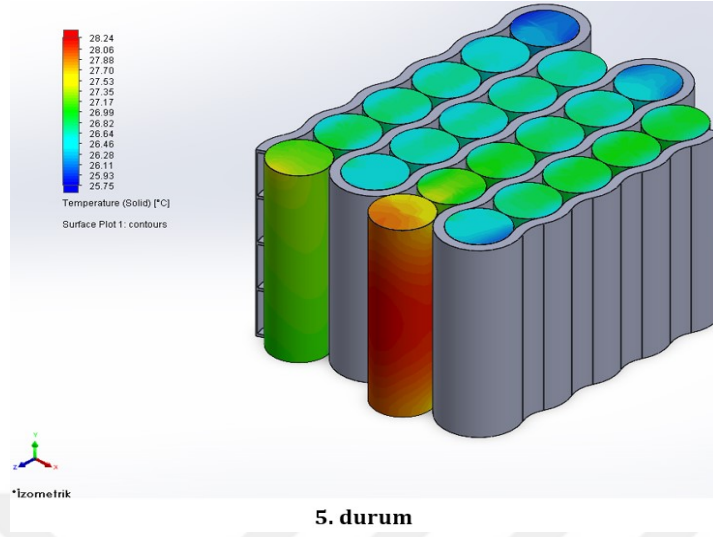
4-U bükümlü 4 bölmeli dalgalı kanal için, önceden belirlenmiş olan akışkan akış yönlerinin 5 durum içinde sayısal analizleri yapıp, sonuçları verilmiştir (Şekil 5.9-5.10-5.11).



Şekil 5.9. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (1. ve 2. durum)

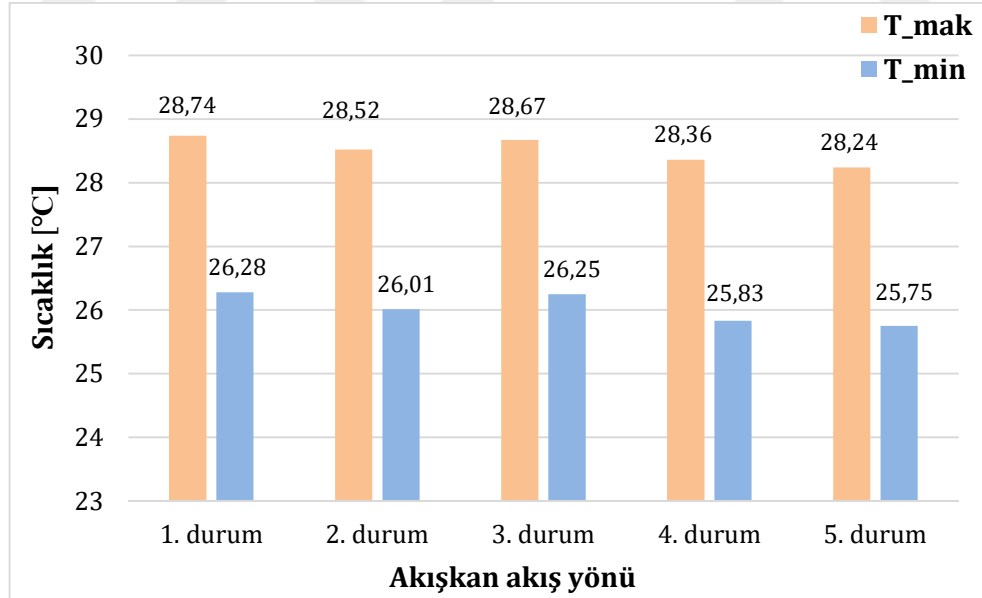


Şekil 5.10. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (3. ve 4. durum)



Şekil 5.11. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (5. durum)

Her bir durum için farklı akışkan akış yönleri, batarya üzerinde değişik sıcaklık değerleri oluşturmuştur.



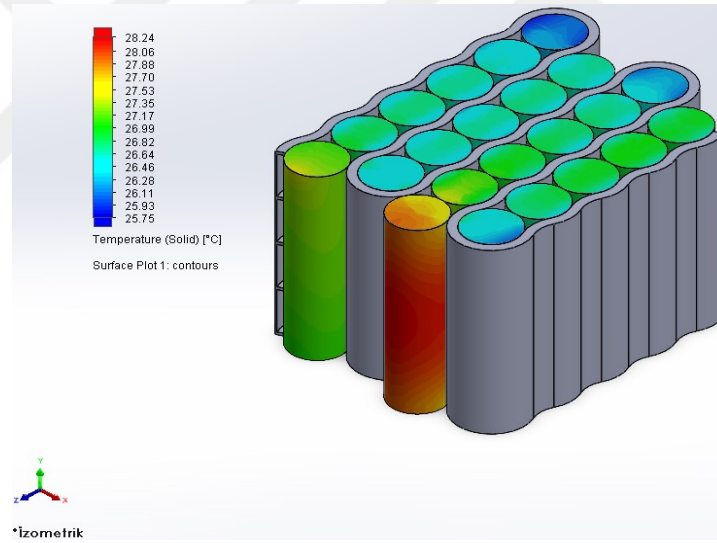
Şekil 5.12. Akışkan akış yönlerinin 5 farklı durum için T_{mak} ve T_{min} değerlerinin karşılaştırılması

5 farklı durum için Şekil 5.12’de T_{\max} değerleri ve T_{\min} değerleri göz önüne alınmıştır. En düşük T_{\max} değeriyle T_{\min} değerine sahip olan 5. durumdaki akışkan akış yönüdür. 5. durumda T_{\max} değeri 28.24°C, T_{\min} ise 25.75°C dir.

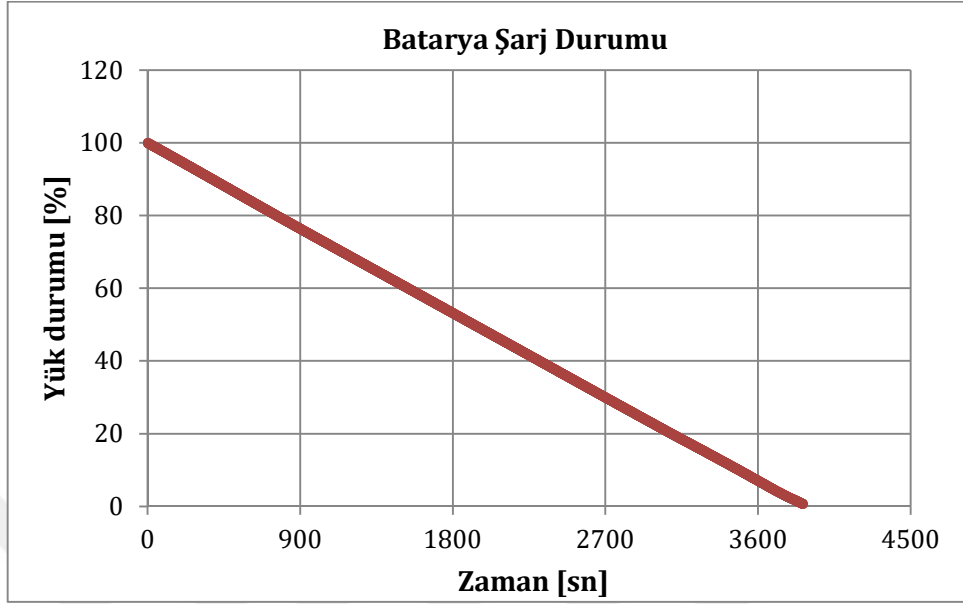
5. durumun, 1. 2. 3. 4. durumlara göre sırasıyla T_{\max} değerlerindeki azalma oranı %1,74 - %0,98 - %1,5 ve %0,42 olurken, T_{\min} için sırasıyla artış oranı %2,06 - %1,01 - %1,95 ve %0,32 olarak bulunmuştur. Buna göre en iyi akışkan akış yolu durumundan, en kötü akışkan akış yolu durumu sıralarsak 5. 4. 3. 2. ve 1. durumda elde edilmiştir.

5.4. Parametrik Çalışma Bulguları

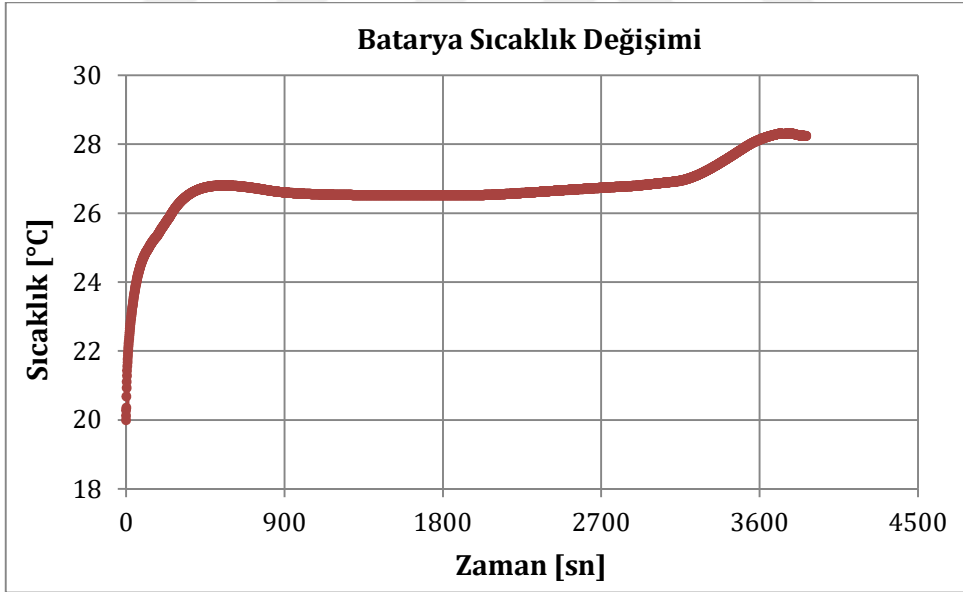
Parametrik verilere göre, sırası ile yapılan sayısal çalışmalar da elde edilen bulgular, analiz numarasına göre değerlendirilmiştir.



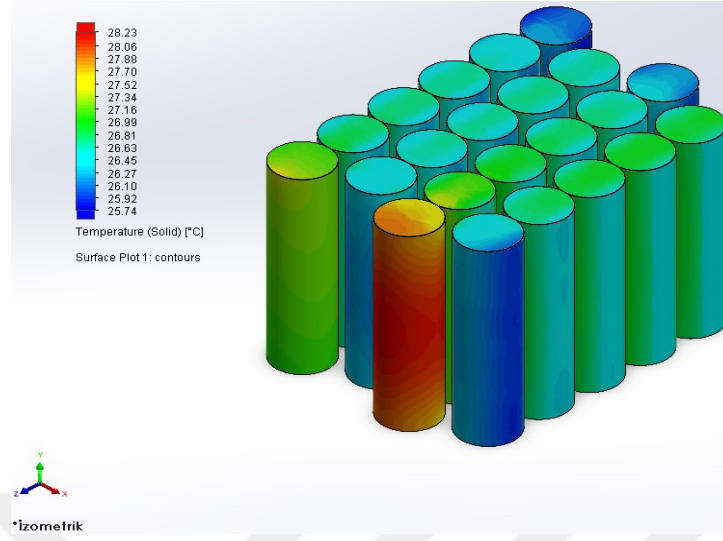
Şekil 5.13. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı
(Analiz-1, $1C_{T_{su}}=25^{\circ}C$ $_T_c=25^{\circ}C$ $Re=800$)



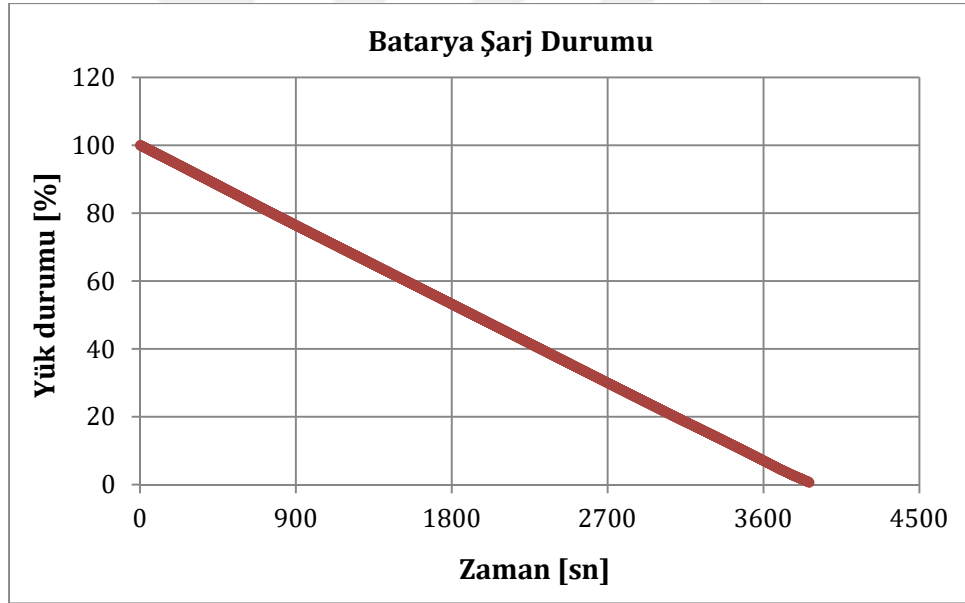
Şekil 5.14. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-1)



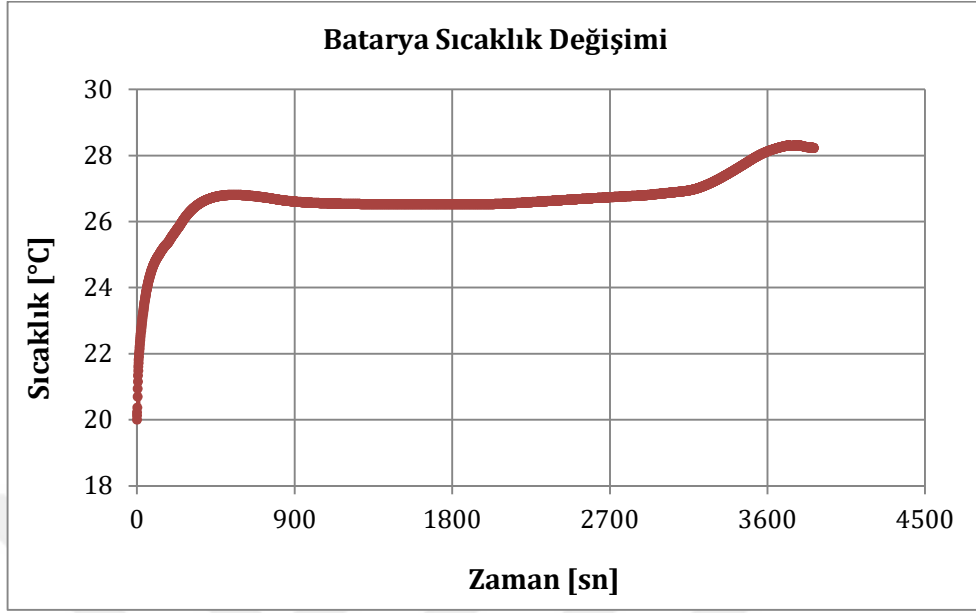
Şekil 5.15. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-1)



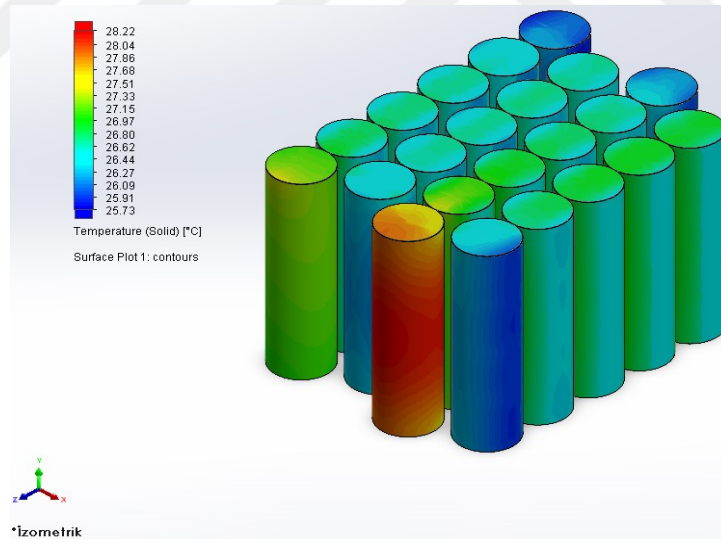
Şekil 5.16. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı
(Analiz-2, $1C_{T_{su}}=25^{\circ}C_{T_c}=25^{\circ}C_{Re}=1200$)



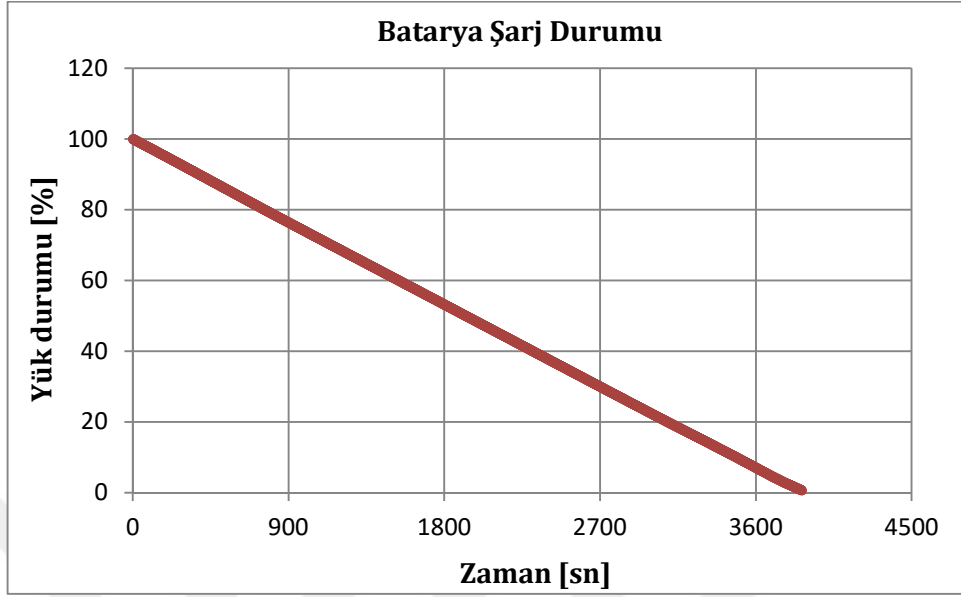
Şekil 5.17. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-2)



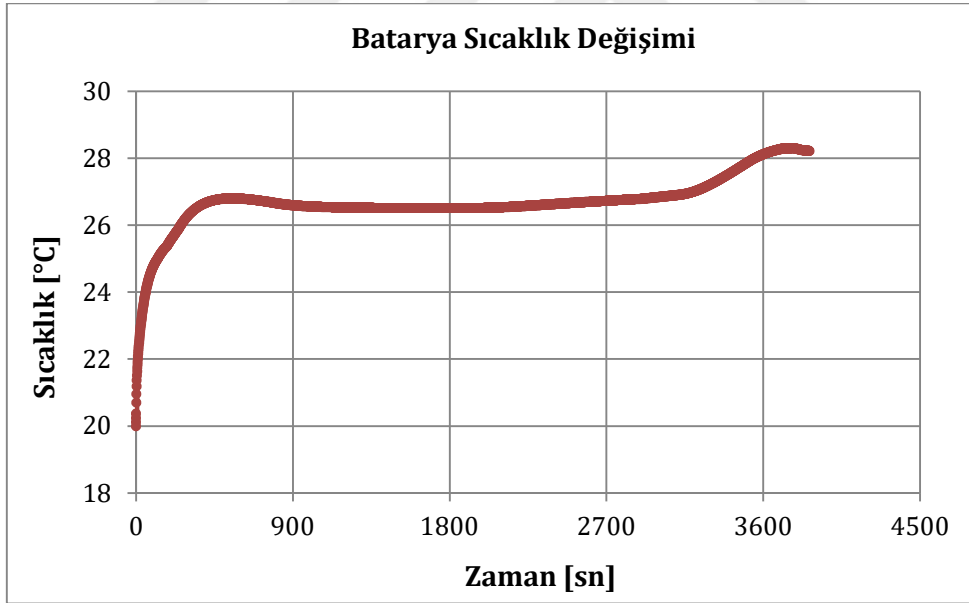
Şekil 5.18. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-2)



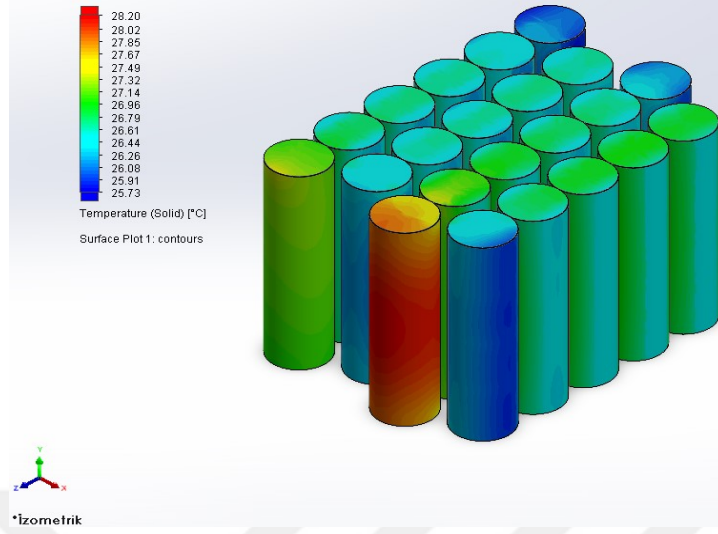
Şekil 5.19. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (Analiz-3, $1C_{T_{su}}=25^{\circ}C$ $_T_{\phi}=25^{\circ}C$ $_Re=1600$)



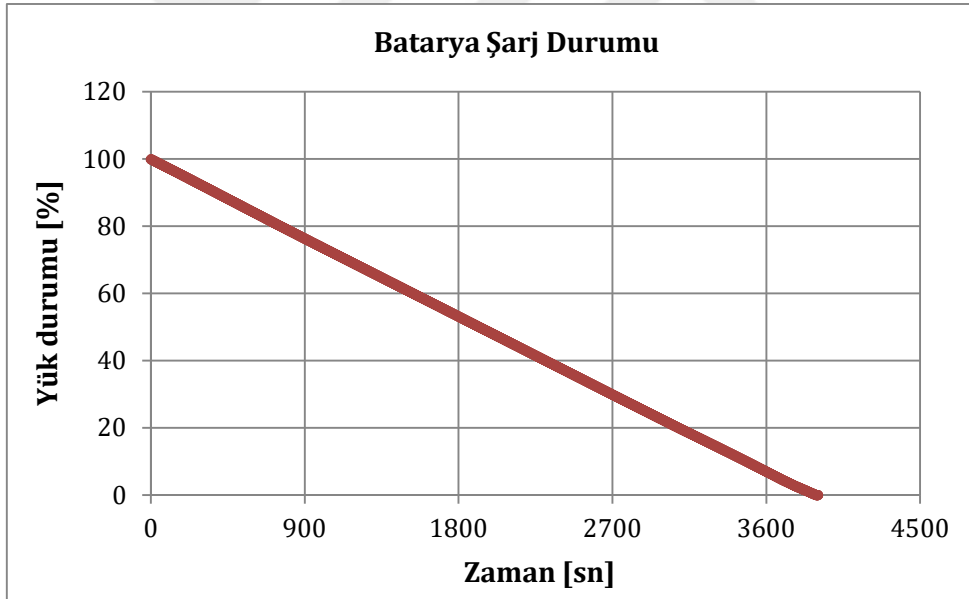
Şekil 5.20. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-3)



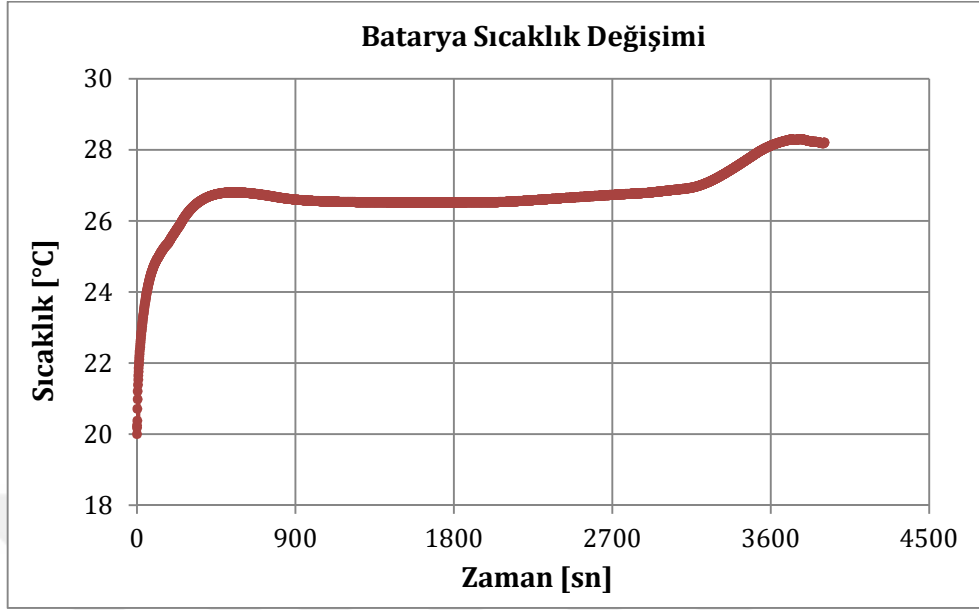
Şekil 5.21. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-3)



Şekil 5.22. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı
(Analiz-4, $1C$, $T_{su}=25^{\circ}C$, $T_{\check{c}}=25^{\circ}C$, $Re=2000$)

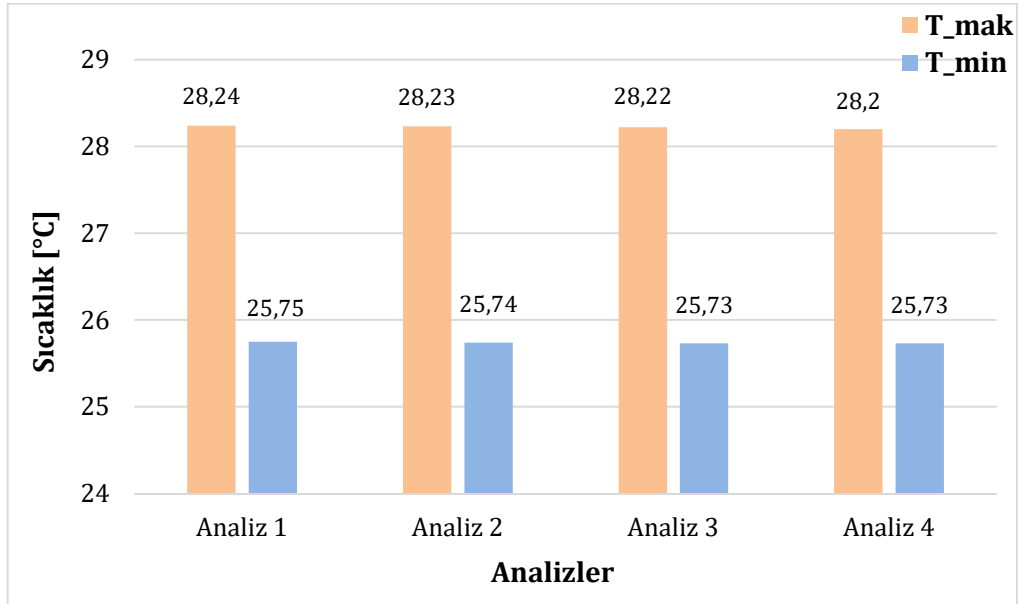


Şekil 5.23. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-4)



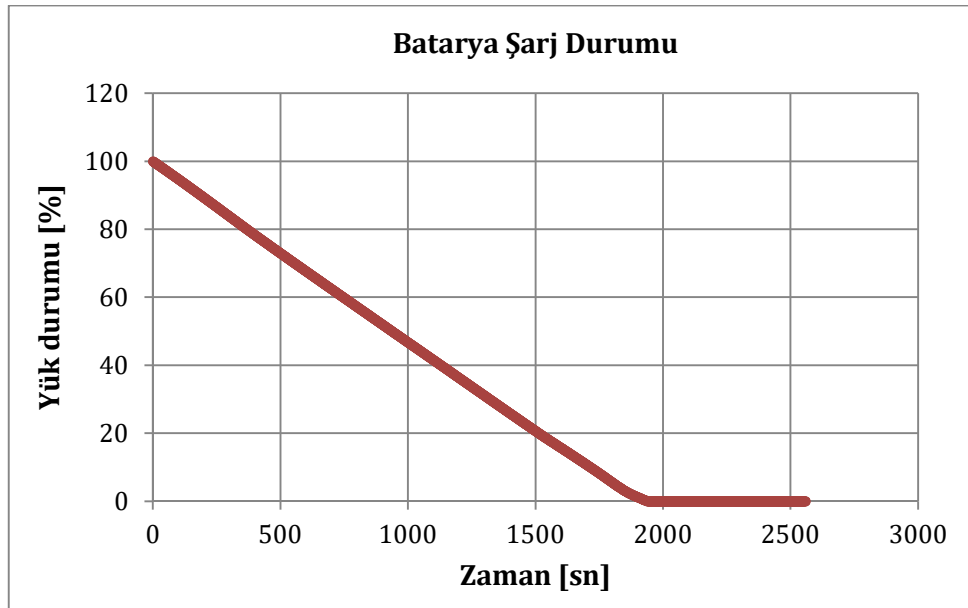
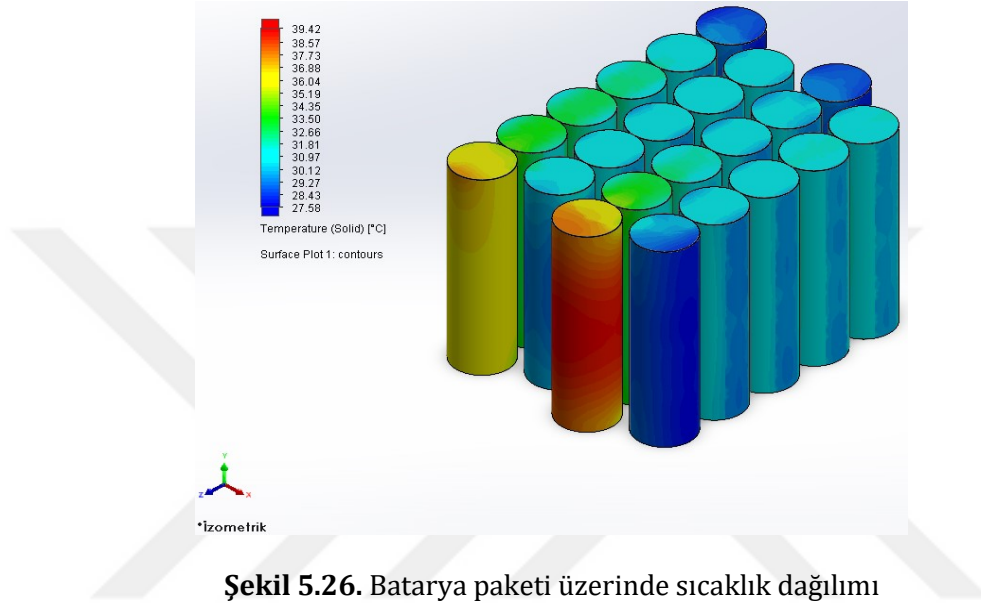
Şekil 5.24. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-4)

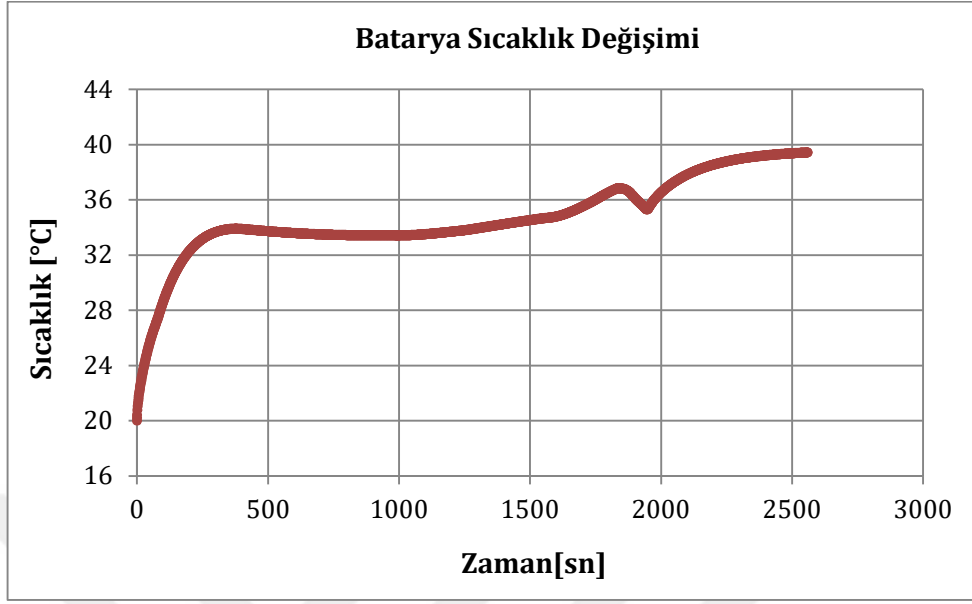
İlk 4 analizin karşılaştırılması yapılmıştır,



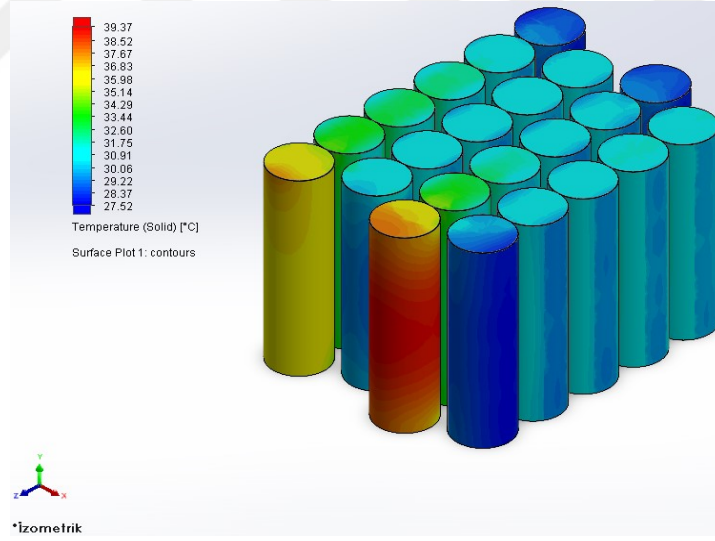
Şekil 5.25. T_{mak} ve T_{min} değerlerinin karşılaştırılması (Analiz 1-2-3-4)

İlk 4 analiz incelendiğinde, Reynolds sayısının artışı T_{mak} değerlerini düşürürken, T_{min} değerlerine göre Analiz-3 ve Analiz-4' ün T_{min} değerlerinin eşit olduğu ve $27,73^{\circ}\text{C}$ olduğu görülmektedir. Bunun sebebi Reynolds sayısının artması yani akışkan akış hızının yükselmesi T_{min} değerlerini etkileyecek kadar yüksek sınıra ulaştığını göstermektedir.

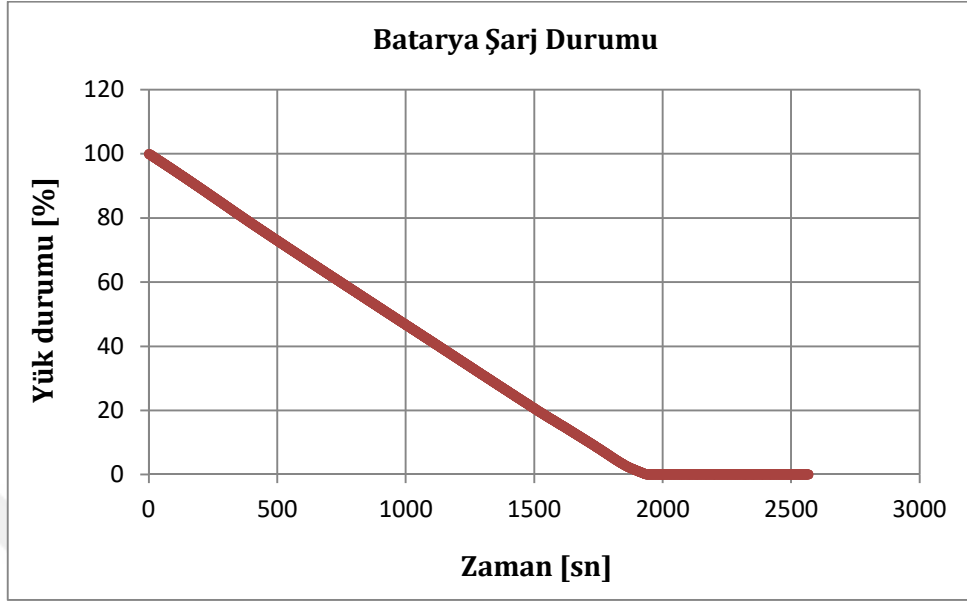




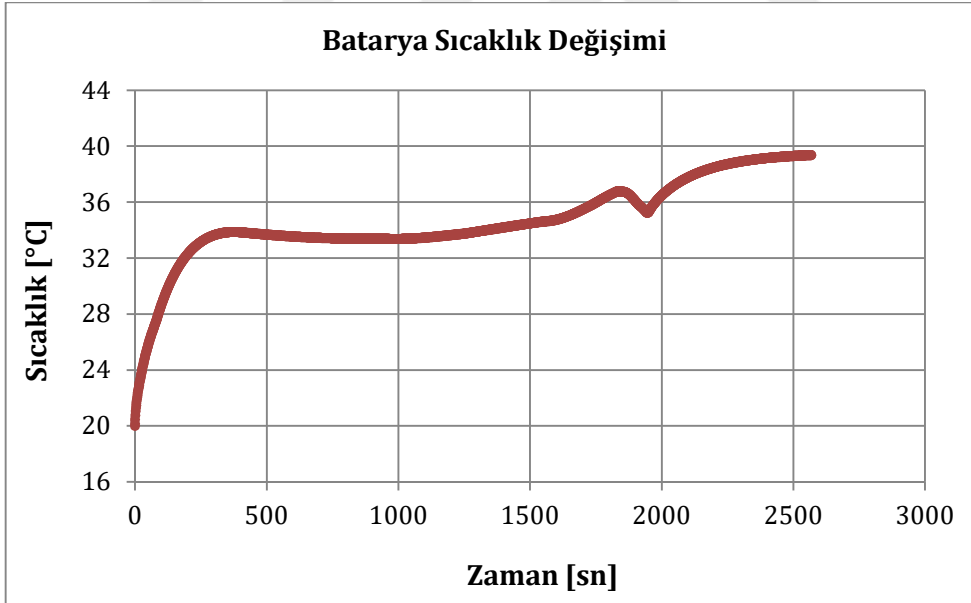
Şekil 5.28. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-5)



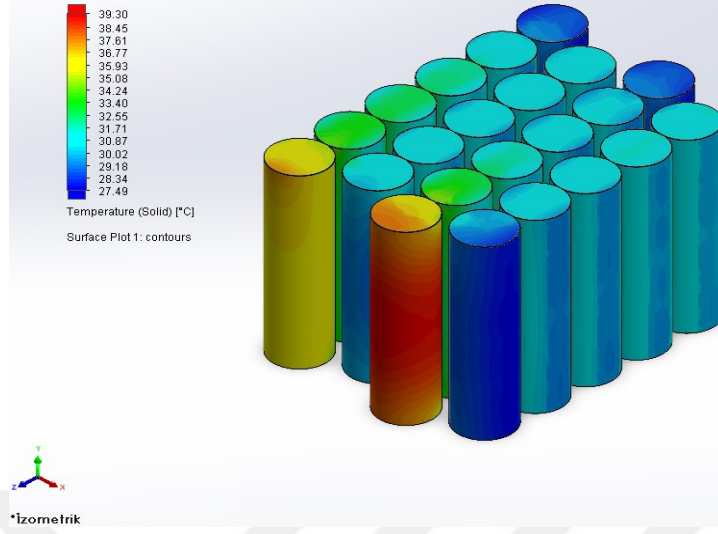
Şekil 5.29. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (Analiz-6, $2C_{T_{su}}=25^{\circ}C$, $T_{\dot{c}}=25^{\circ}C$, $Re=1200$)



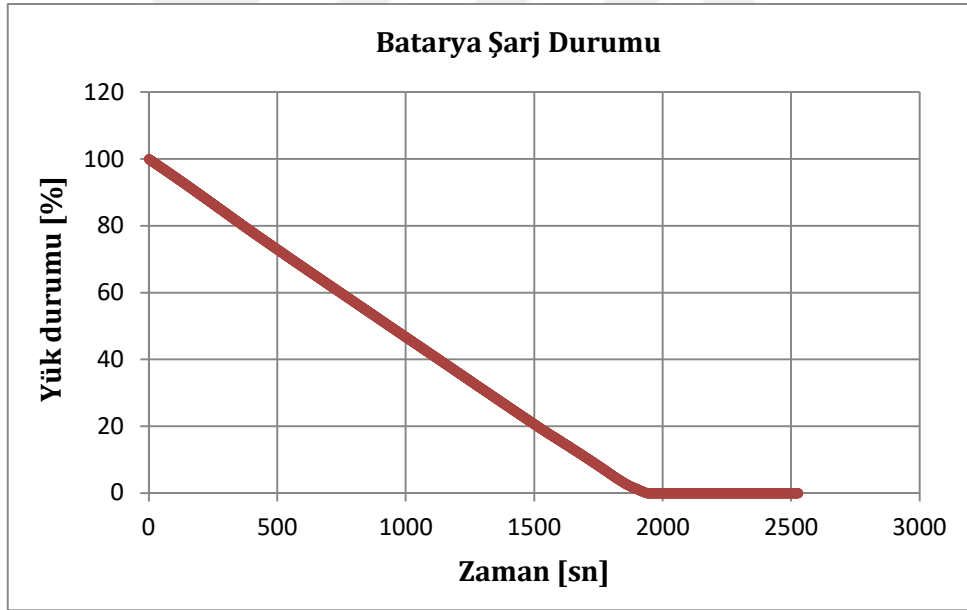
Şekil 5.30. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-6)



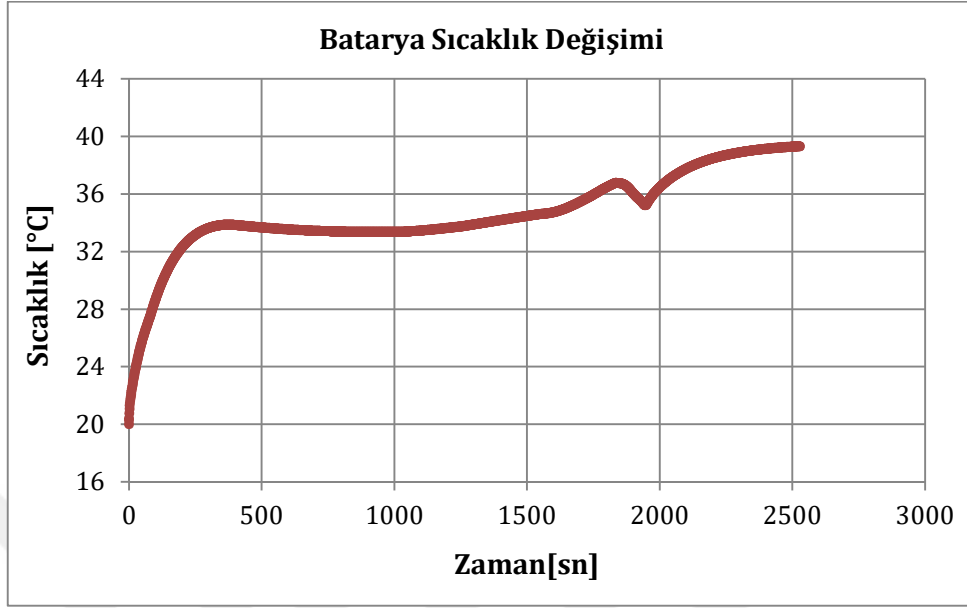
Şekil 5.31. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-6)



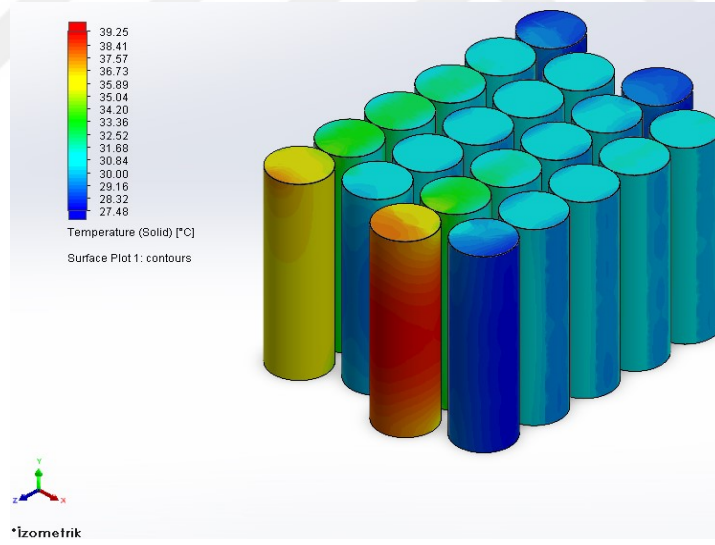
Şekil 5.32. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı
(Analiz-7, $2C_{T_{su}}=25^{\circ}C_{T_{\check{c}}}=25^{\circ}C_{Re}=1600$)



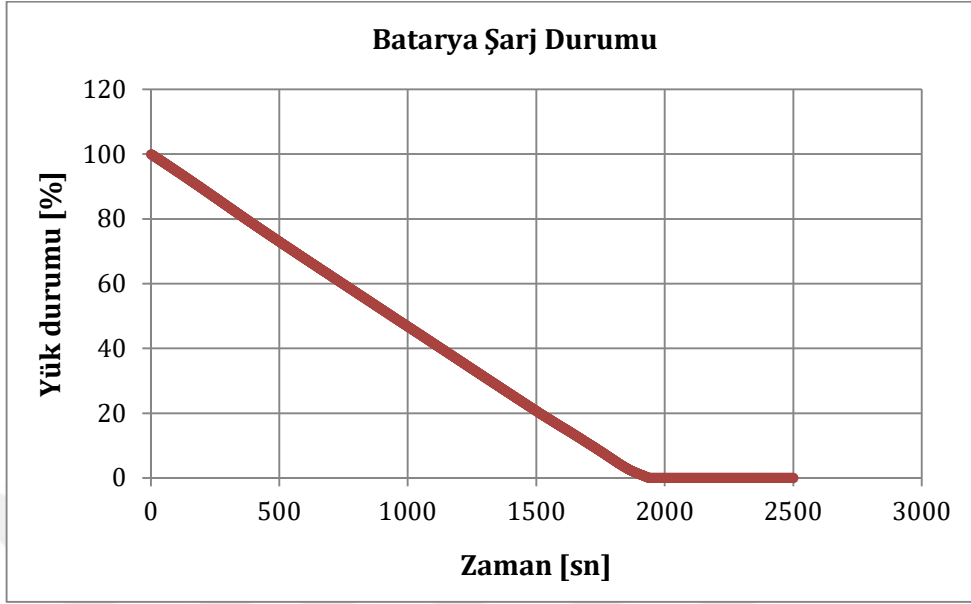
Şekil 5.33. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-7)



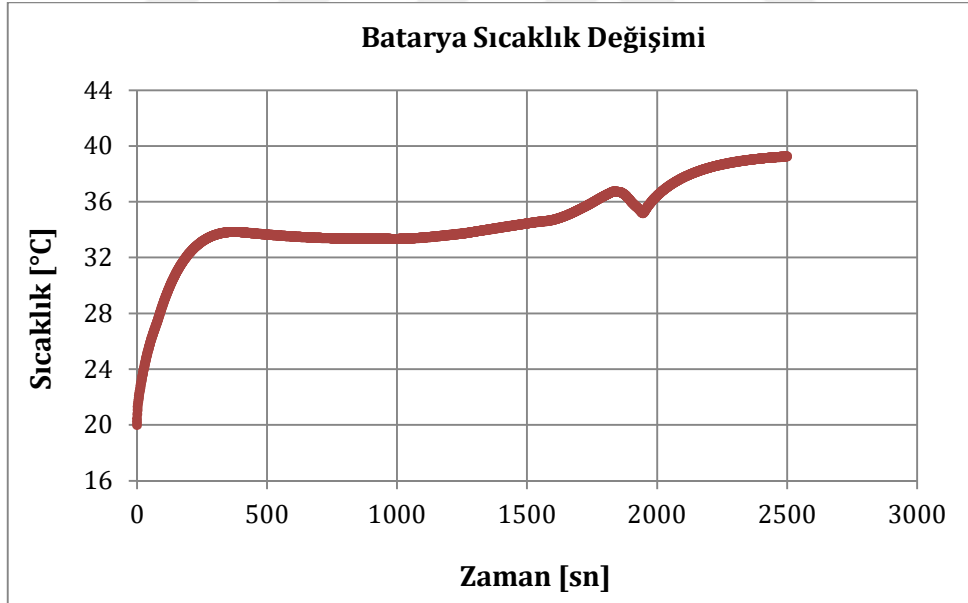
Şekil 5.34. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-7)



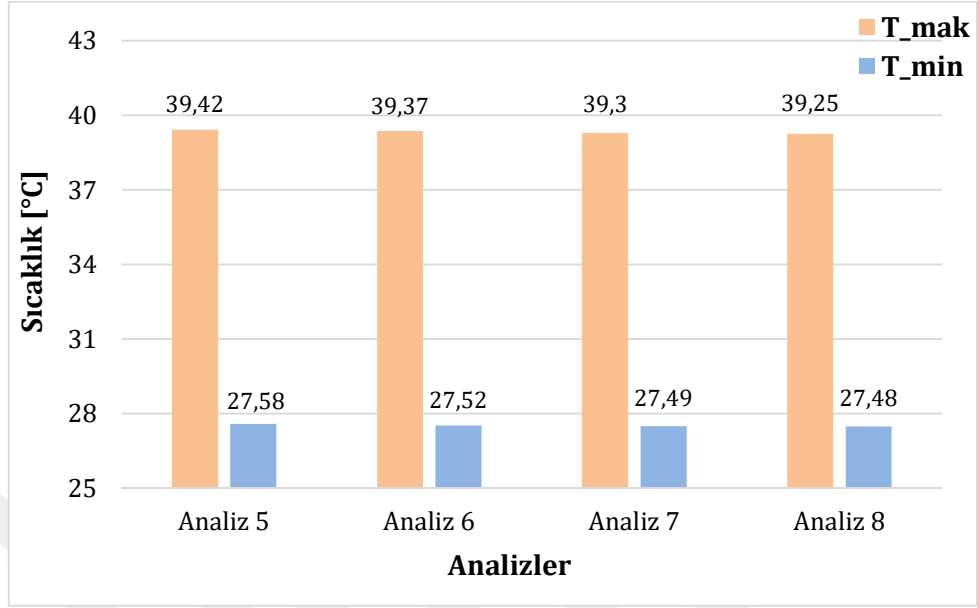
Şekil 5.35. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (Analiz-8, $2C_{T_{su}}=25^{\circ}C$, $T_{\dot{c}}=25^{\circ}C$, $Re=2000$)



Şekil 5.36. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-8)

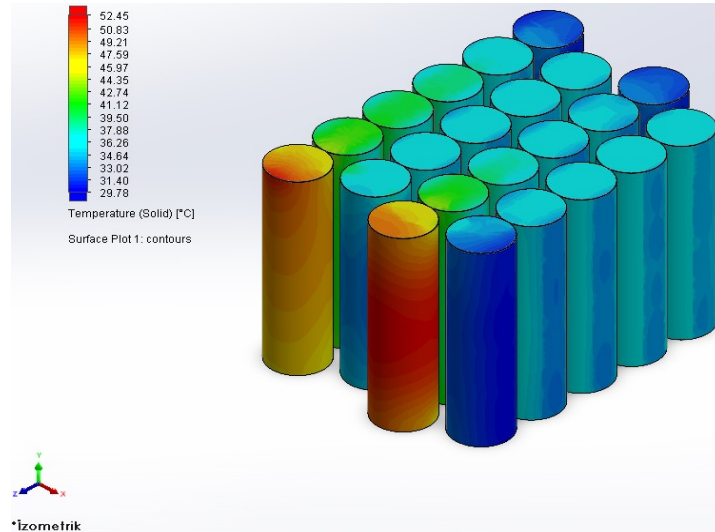


Şekil 5.37. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-8)

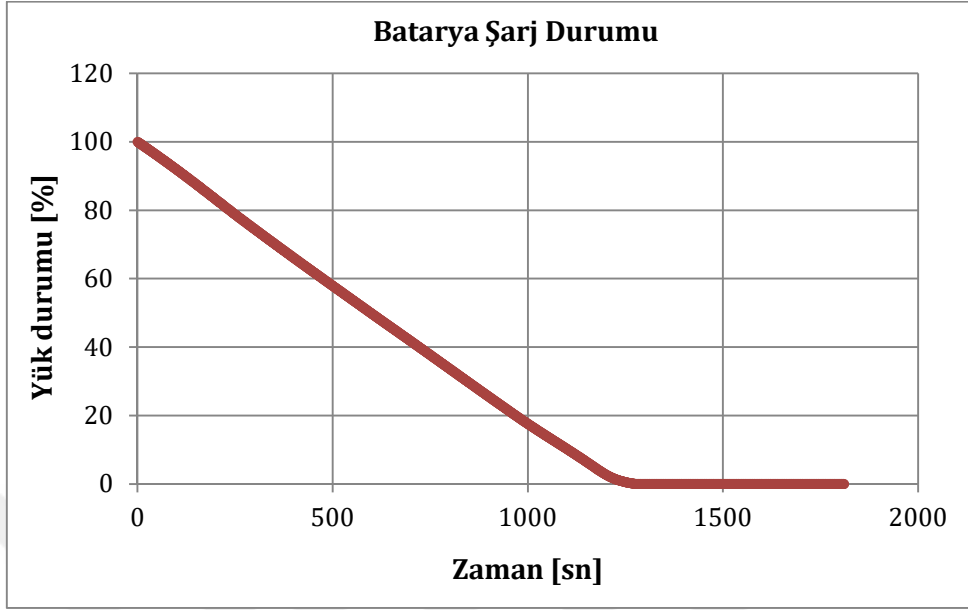


Şekil 5.38. T_{mak} ve T_{min} değerlerinin karşılaştırılması (Analiz 5-6-7-8)

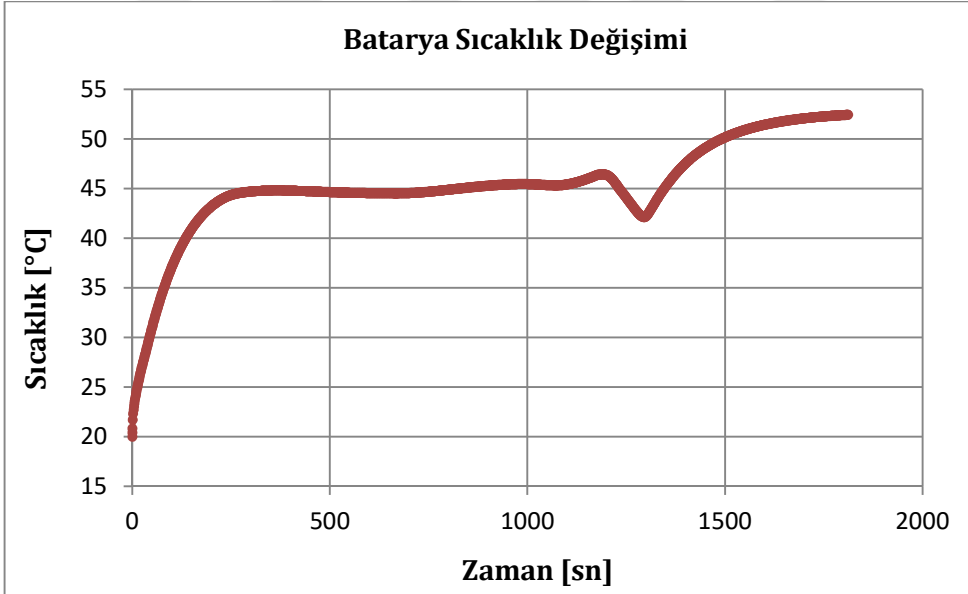
Şekil 5.38' de Analiz 5-6-7-8 incelendiğinde akışkan akış hızının artması, T_{mak} ve T_{min} değerlerini düşürdüğü görülmüştür. T_{mak} değerleri, Lityum-iyon pillerin ideal çalışma sıcaklıklarında sınır seviyelere geldiği görülmektedir ama yine de değerler ideal çalışma sıcaklığı aralığındadır ve batarya paketi 2C içinde uygunluğunu korunmuştur.



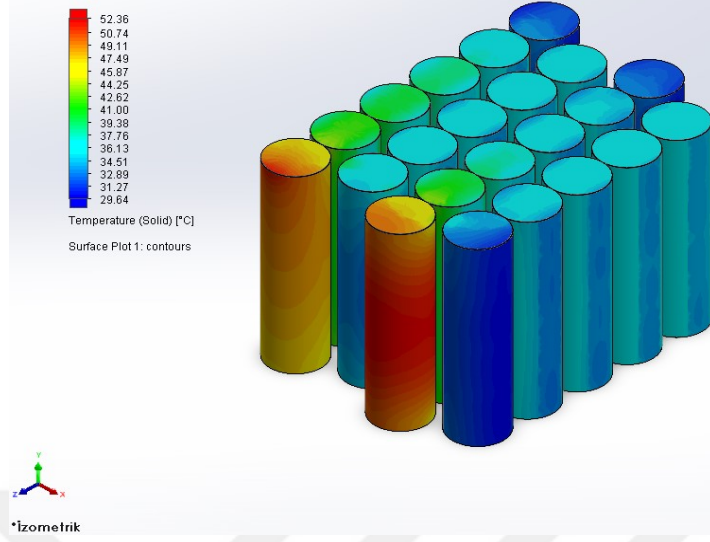
Şekil 5.39. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (Analiz-9, 3C_T_{su}=25°C_T_ç=25°C_Re=800)



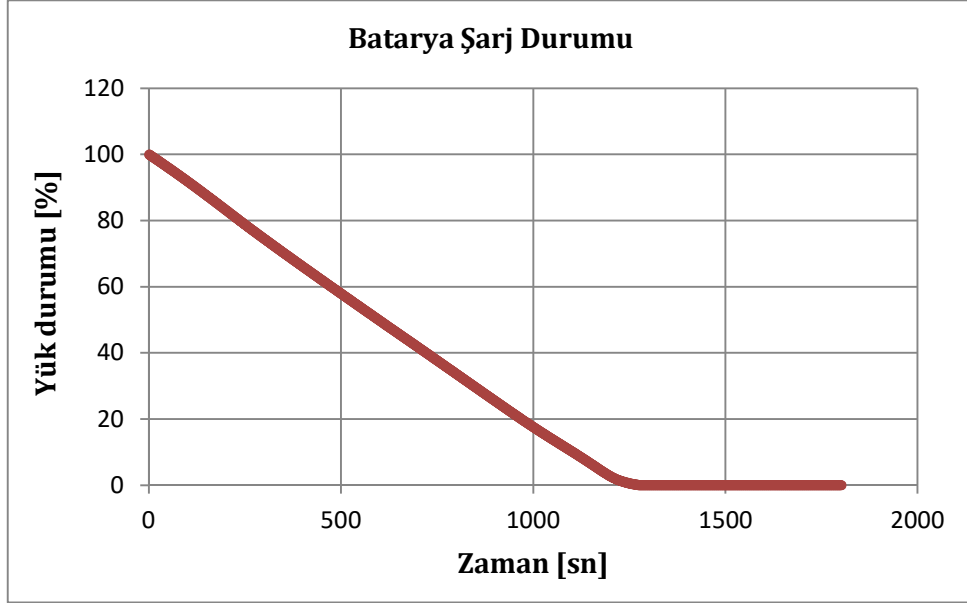
Şekil 5.40. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-9)



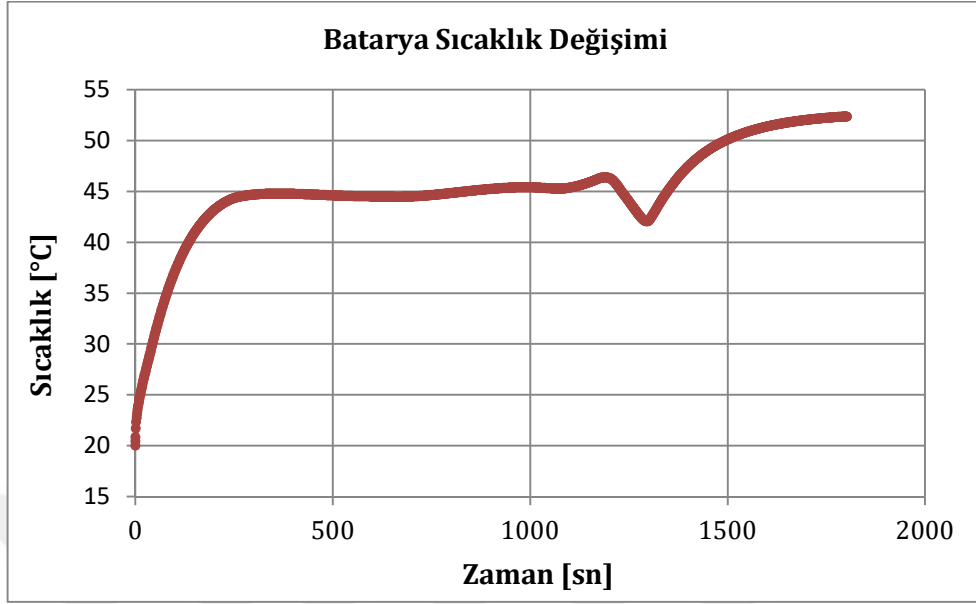
Şekil 5.41. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-9)



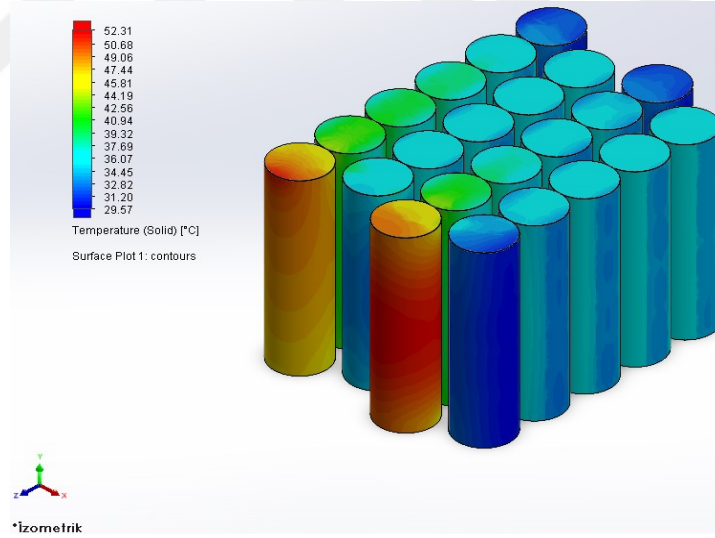
Şekil 5.42. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı
(Analiz-10, $3C_{T_{su}}=25^{\circ}C_{T_{\check{c}}}=25^{\circ}C_{Re}=1200$)



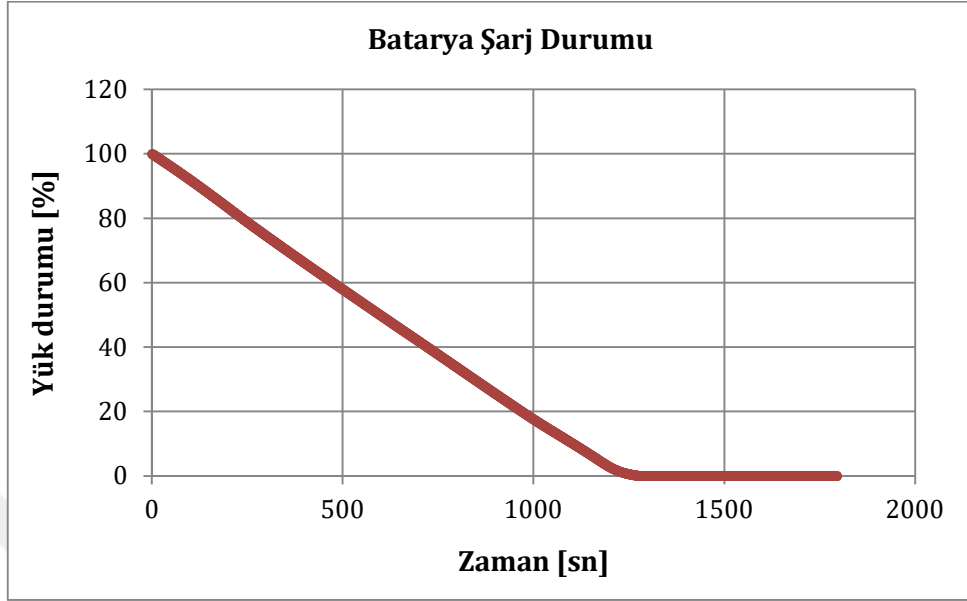
Şekil 5.43. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-10)



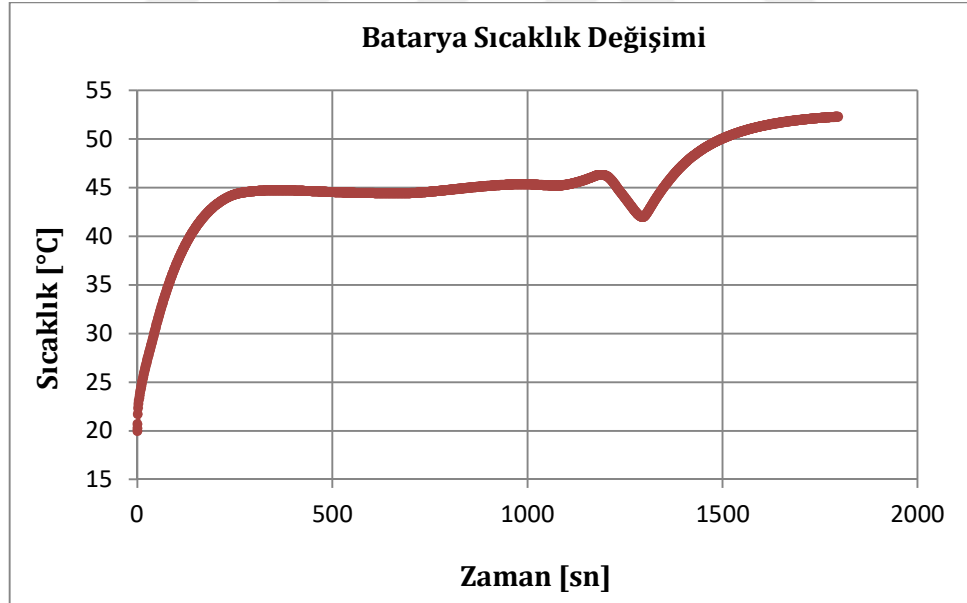
Şekil 5.44. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-10)



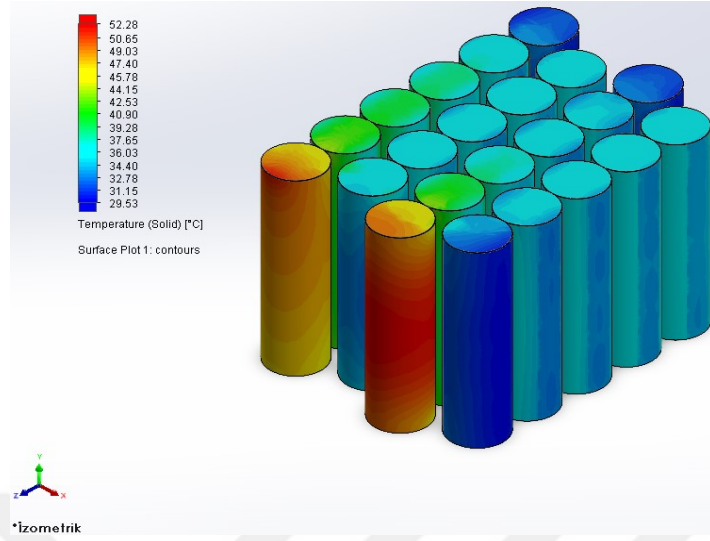
Şekil 5.45. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı (Analiz-11, $3C_{T_{su}}=25^{\circ}C_{T_c}=25^{\circ}C_{Re}=1600$)



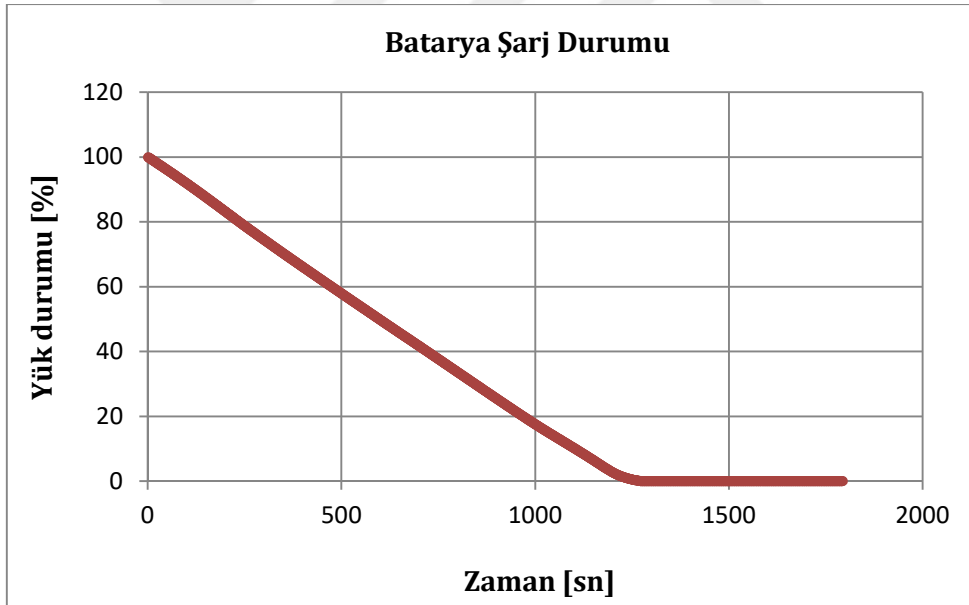
Şekil 5.46. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-11)



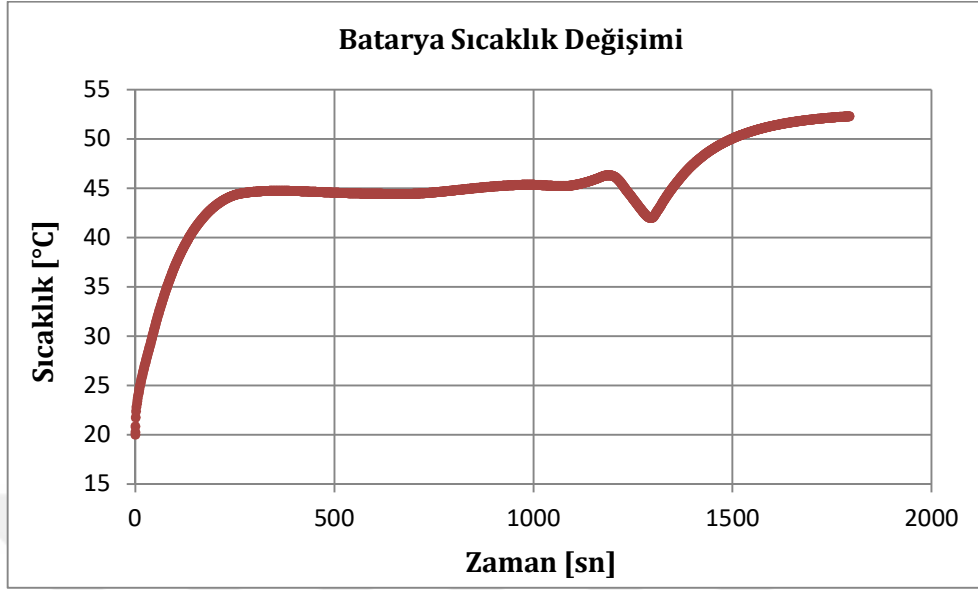
Şekil 5.47. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-11)



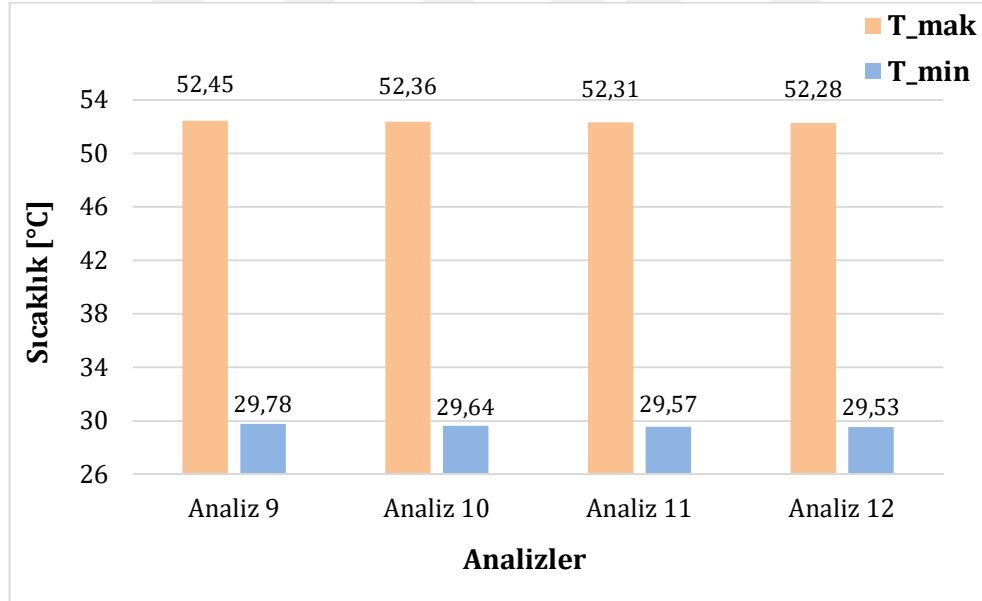
Şekil 5.48. Batarya paketi üzerinde sıcaklık dağılımı
(Analiz-12, $3C_{T_{su}}=25^{\circ}C_{T_{\check{c}}}=25^{\circ}C_{Re}=2000$)



Şekil 5.49. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-12)



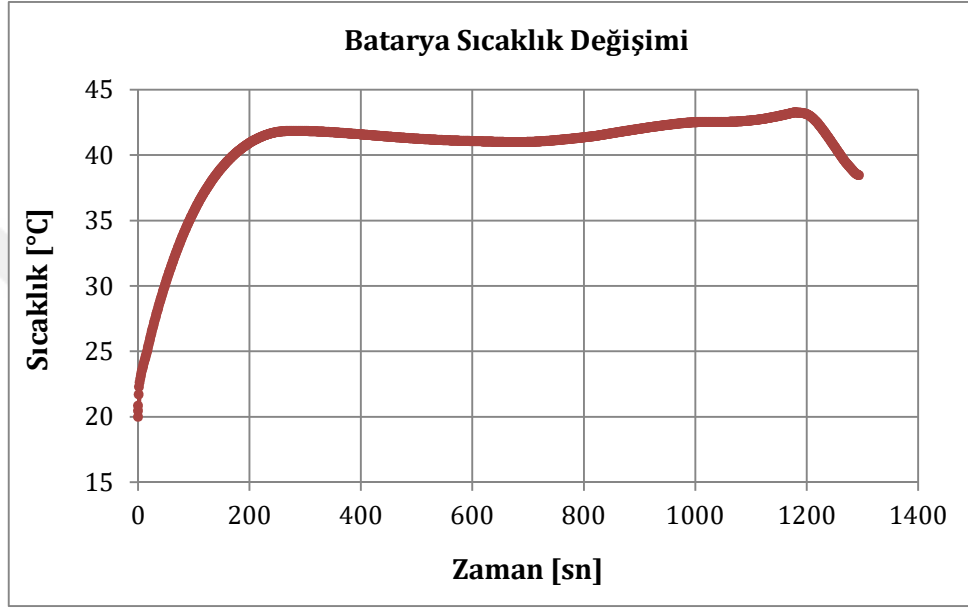
Şekil 5.50. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-12)



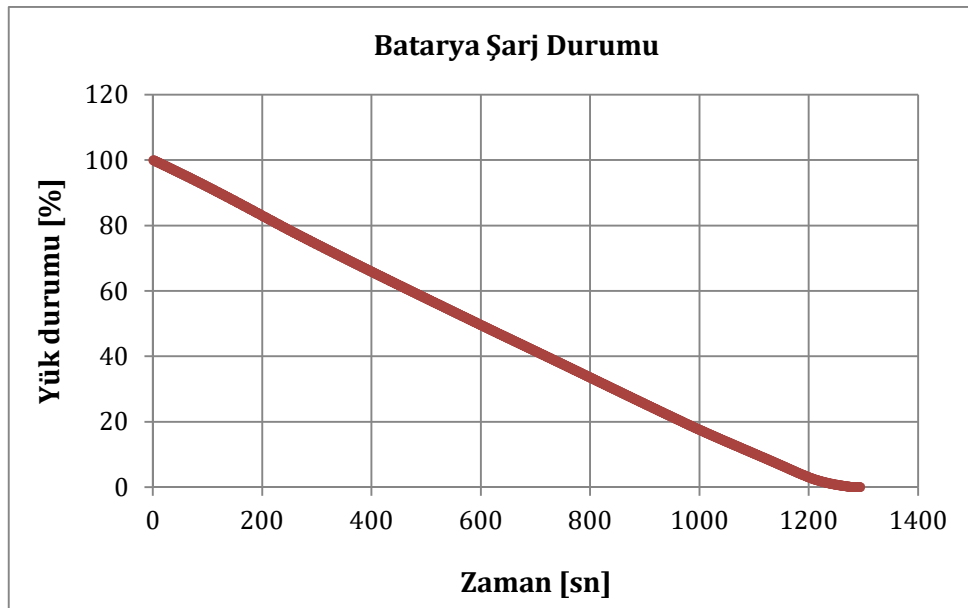
Şekil 5.51. T_{mak} ve T_{min} değerlerinin karşılaştırılması (Analiz 9-10-11-12)

Şekil 5.51' de Analiz 9-10-11-12 incelendiğinde T_{mak} değerlerinin ideal çalışma sıcaklığı olan 40°C' yi aşarak 52,45°C seviyelerine kadar geldiği görülmektedir. Bu durum batarya paketimiz için istenmeyen bir durumdur. Ayrıca T_{mak} ve T_{min} değerleri arasındaki en yüksek fark Analiz 12' de olup 22,75°C dir. Bu durum batarya paketinin sıcaklık homojenliğini de bozmaktadır.

Şekil 5.51' de yapılan Analiz 9-10-11-12' de T_{\max} değerlerinin yüksekliği ve T_{\min} değerleri ile arasındaki yüksek sıcaklık farkından dolayı, tek bir parametre değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır. Analiz-9 verilerinde, sadece soğutucu akışkan suyun giriş sıcaklığı $T_{\text{su,g}}=20^{\circ}\text{C}$ ' e düşürülüp diğer veriler sabit tutulup, analizler tekrar yapılmıştır.

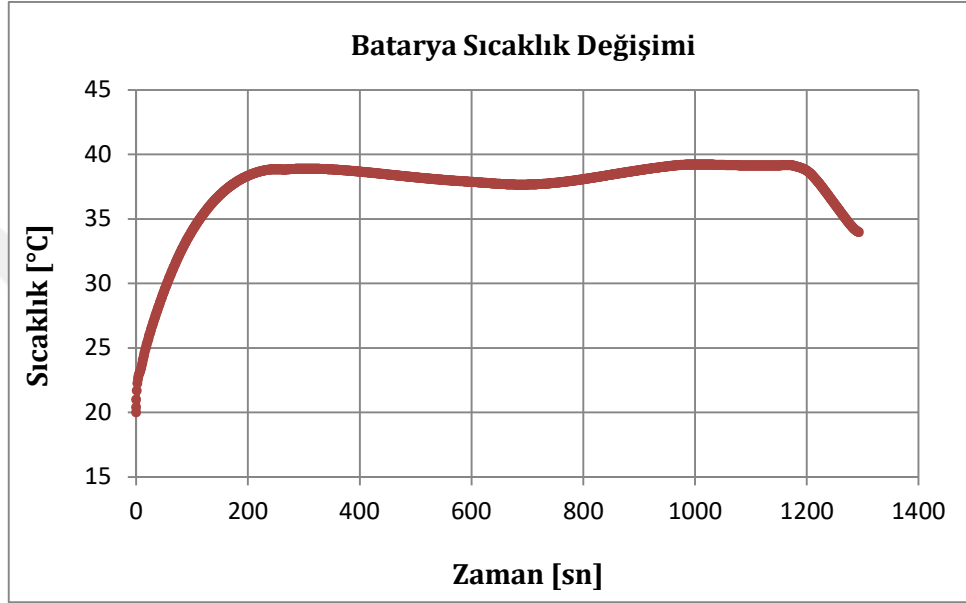


Şekil 5.52. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-9, $T_{\text{su,g}}=20^{\circ}\text{C}$)

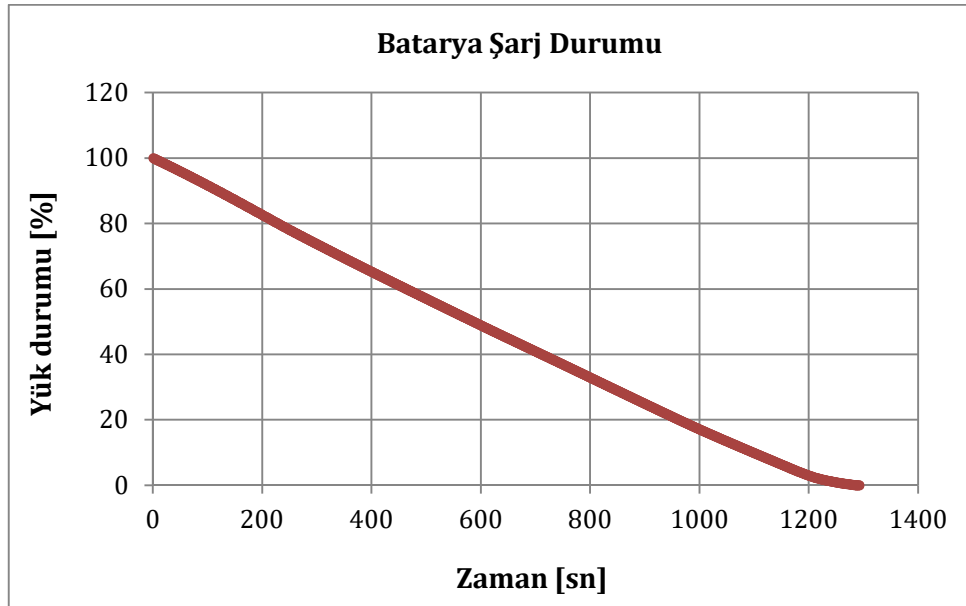


Şekil 5.53. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-9, $T_{\text{su,g}}=20^{\circ}\text{C}$)

Şekil 5.52' de batarya sıcaklık değişimi grafiğinde, sıcaklığın 40°C üzerinde olduğu ve ideal çalışma koşullarının üstüne çıktığı görünmektedir. Bu yüzden, $T_{su,g}$ düşürülerek yeniden analiz tekrarlanmıştır. Tekrarlanan analizde yine Analiz-9 verileri sabit tutulup, sadece soğutucu akışkan suyun değeri $T_{su,g}=14^{\circ}\text{C}$ ' e düşürülmüş ve analiz tekrarlanmıştır.

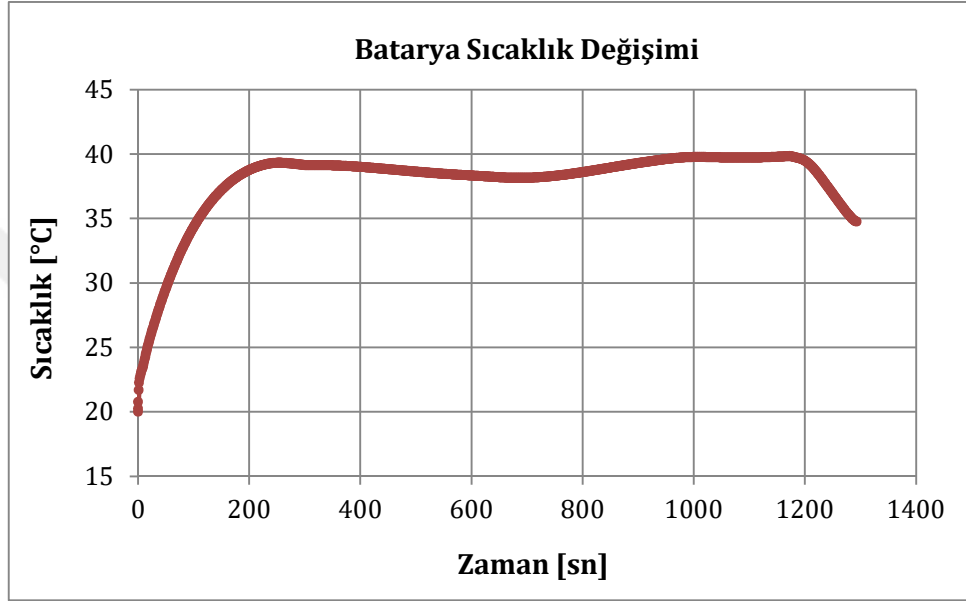


Şekil 5.54. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-9, $T_{su,g}=14^{\circ}\text{C}$)

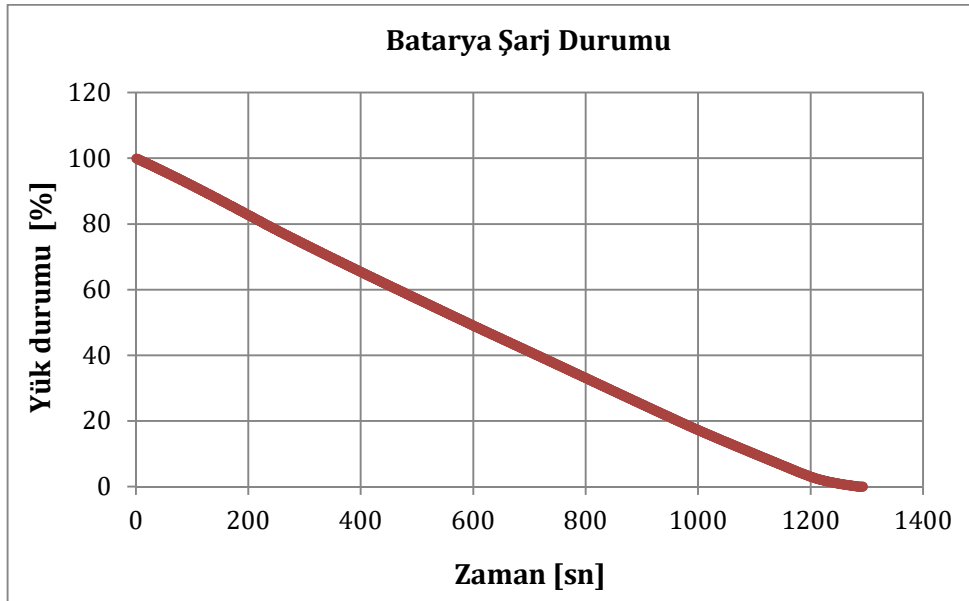


Şekil 5.55. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-9, $T_{su,g}=14^{\circ}\text{C}$)

Şekil 5.54' de batarya sıcaklık değişimi grafiğinde, sıcaklığın 40°C üzerine çıkmadığı ve ideal çalışma koşullarında olduğu görülmektedir, fakat daha optimum bir sıcaklık için analiz son kez daha tekrarlanmıştır. Tekrarlanan analizde Analiz-9 verileri sabit tutulup, sadece soğutucu akışkan suyun değeri $T_{su,g}=15^{\circ}C$ ' e düşürülmüş ve nihai analiz sonucu bulunmuştur.

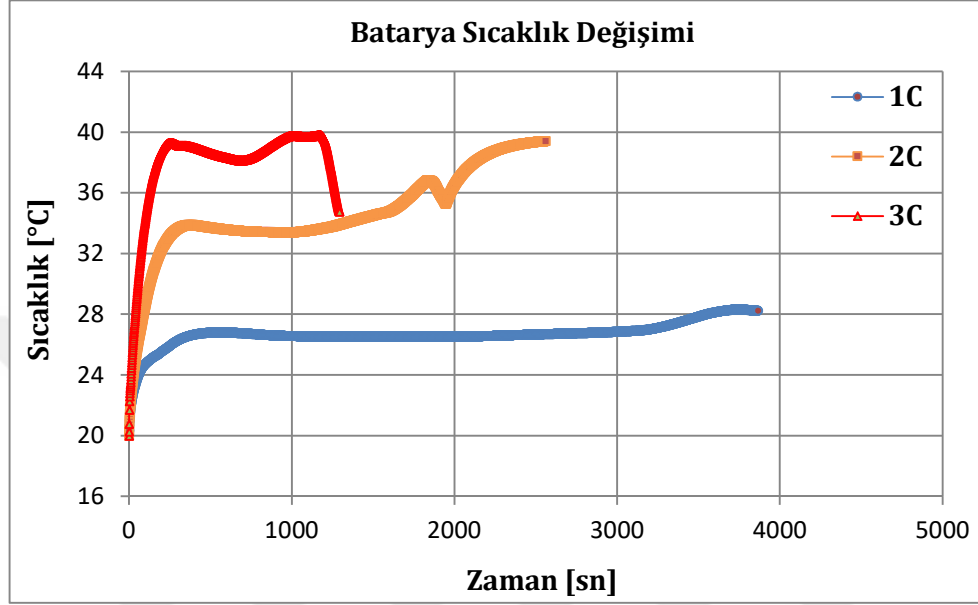


Şekil 5.56. Batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi (Analiz-9, $T_{su,g}=15^{\circ}C$)



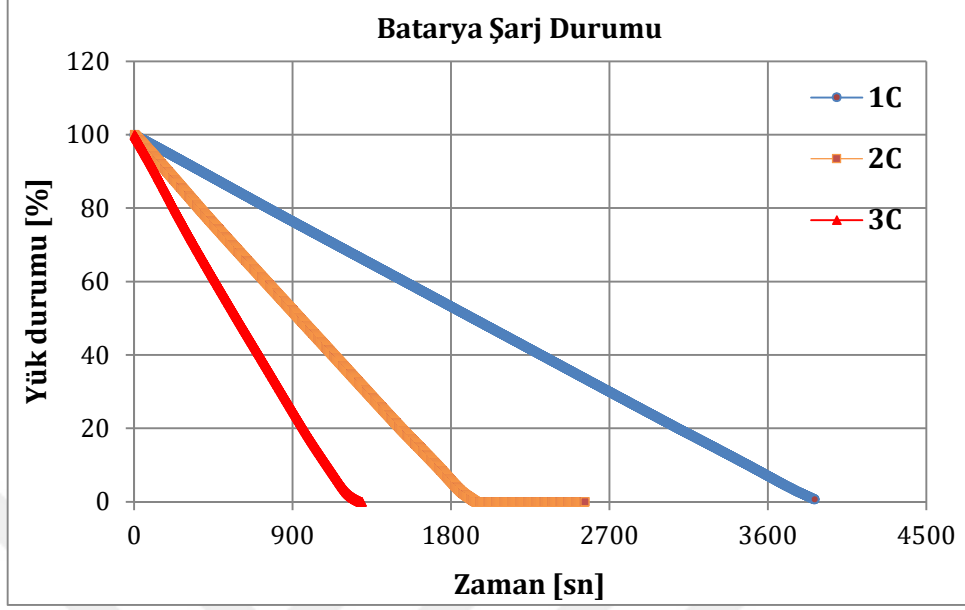
Şekil 5.57. Batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi (Analiz-9, $T_{su,g}=15^{\circ}C$)

Şekil 5.56' da akışkan giriş sıcaklığı 15°C alınarak elde edilen grafikte, batarya paketinin sıcaklığının 3C için ideal çalışma koşullarında tutulması sağlanmıştır.



Şekil 5.58. Deşarj oranlarının zamana bağlı sıcaklık değişimi

Şekil 5.58' de 3 farklı deşarj hızında batarya paketinin zamana bağlı sıcaklık değişimi gösterilmiştir. Burada 3 farklı deşarj hızında da sıcaklıkların 40°C altında ve 20°C üzerinde olduğu görülmektedir, bu da lityum iyon pillerin maksimum verimle çalıştığı sıcaklık aralığıdır. Bu sayede de 1C-2C-3C deşarj hızları içinde sıcaklık kontrolünün sağlanmış olduğu görülmektedir.



Şekil 5.59. 1C-2C-3C' de batarya paketinin zamana bağlı yük durumu değişimi

Şekil 5.59' de deşarj hızlarının artması batarya şarjının daha çabuk bittiğini gösteriyor. 1C' de batarya %100' den %0' a 3859 fiziksel saniyede gelirken, 2C ve 3C' de sırasıyla 1914 ve 1237 fiziksel saniye geldiği görülüyor. Aynı batarya paketi için, deşarj hızımız ne kadar artarsa batarya paketinin bize sunacağı zaman azalıyor. Bu da deşarj hızları ile zamanın ters orantılı olduğunu gösteriyor.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

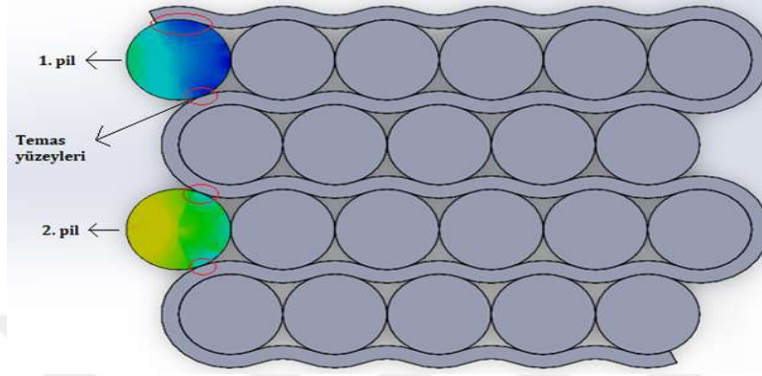
Bu tez çalışmasında, 22 adet Lityum NCA iyon 18650 tipi piller paralel bir şekilde bağlanarak bir batarya termal yönetim sistemi tasarlanmıştır. Bu batarya termal yönetim sistemi için, 3 farklı kanal U, 2-U ve 4-U bükümlü kanal yapısı modellenerek, kanallar da akış bölme sayıları ve soğutucu akışkan yönleri değiştirilerek modeller incelenmiştir. Soğutucu akışkan olarak kullanılan suyun sıcaklığı ile çevre sıcaklığı 25°C alınıp, çalışma basıncı ise 1 atm olarak ele alınmıştır. Farklı C-oranları (1C-2C-3C) ve farklı Reynolds sayılarında (800-1200-1600-2000) FloEFD programı ile sayısal analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- Yapılan doğrulama çalışmasında, mevcut sayısal çalışma ile benzer yapıya sahip sayısal çalışmanın karşılaştırılması sonucunda büyük oranda benzerlik göstermiştir ve maksimum sapma oranı %3,63 olarak bulunmuştur.
- 3 farklı kanal yapısı U, 2-U ve 4-U bükümlü için yapılan analizler sonucunda, 4-U bükümlü kanal yapısına sahip modelinin, U bükümlü kanala göre T_{mak} değerinin %1,3 azaldığını ve 2-U bükümlü kanala göre de T_{mak} değerinin de %2,9 azaldığı belirlenmiştir.
- Kanal bölme sayısı, 1-2-3-4 bölmeli diye 4 farklı kanal modelinden, 4 bölmeli kanalın 1-2-3' e göre daha iyi bir performans gösterdiğini ve batarya üzerinde oluşan ısıyı daha fazla düşürdüğü bulunmuştur.
- Soğutucu akışkanın kanala giriş yönlerini belirlemek için, 4-U bükümlü 4 bölmeli kanal üzerinde 5 farklı giriş analizi yapılmıştır ve en iyi akışkan giriş yönü düz-ters-düz-ters olarak çapraz akış modeli belirlenmiştir.
- Batarya paketi belirlenen parametrelerde 1C ve 2C' de elde edilen sonuçlarda Lityum-iyon pillerin ideal çalışma sıcaklık aralığında olduğu görülmüştür ama 3C deşarj oranında paket için verilen parametrik değerlerde ısıyı uzaklaştıramadığı görülmüştür.
- 3C deşarj hızında batarya paketinin optimum sıcaklığını elde etmek için analizler yapılmış ve $T_{su,g}=15^{\circ}C$ düşürülerek paketin ideal çalışma koşullarına getirilmesi sağlanmıştır.

Yapılan sayısal çalışmalar sonrasında, elde edilen bilgiler niteliğinde ve bu çalışmanın günümüzde oldukça revaçta olması sebebi ile çalışmanın geliştirilmesi ve genişletilmesi için bazı önerilerde bulunulmuştur.

- Batarya paketinde pillerin farklı sıcaklıklar da olduğu görülmüştür. Bu durum için tasarlanan batarya paketine bakıldığında, pillerin kanallarla ve diğer pillerle ortak kanal temas yüzeylerinin farklılığından olduğu anlaşılmıştır. 1. ve 2. pil batarya

paketinden çıkartılarak ya da kanal uzunluğu arttırılıp 1. ve 2. pilleri sararak, temas yüzeyi arttırılır ve batarya paketinin daha homojen ısı dağılımı sağlanabilir.



Şekil 5.60. Batarya paketinin üstten görünüşü

- Tasarlanan U, 2-U ve 4-U bükümlü kanallar için, seçilen pil sayısına bağlı olarak büküm sayısı ve temas yüzeyi açısı değiştirilerek daha fazla pil barındıran batarya termal yönetim sistemleri incelenebilir.
- Seçilen Lityum NCA 18650 iyon tipi pil yerine prizmatik ya da kese tipi lityum iyon pil modelleri seçilerek yeni tasarımlarla çalışmalar yapılabilir.
- Kanal bölme sayısı arttırılarak ve soğutucu akışkanın akış yönleri değiştirilerek analizler tekrarlanabilir.
- Soğutucu akışkan olarak kullanılan su yerine farklı nano-akışkanlar kullanılarak karşılaştırma yapılabilir.
- Akışkanın kanala giriş sıcaklığı ile çevre sıcaklığı değiştirilerek ya da her ikisinde değiştirilerek istenilen sabitlerde analizler tekrar yapılabilir.
- Farklı C-oranlarında batarya termal yönetim sistemini deşarj edilip sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Batarya termal yönetim sistemi için oluşturulan basitleştirme sistem kabulleri değiştirilerek analizler yapılabilir.

KAYNAKÇA

- Aktan, S. (2020). Yakın gelecekte lityum-iyon bataryanın yerini lityum-sülfür alabilir. Euronews. <https://tr.euronews.com/2020/01/28/birkac-yil-icerisinde-lityum-iyon-bataryanin-yerini-lityum-sulfur-alabilir>
- An, Z., Zhang, C., Luo, Y., Zhang, J. (2023). Cooling and preheating behavior of compact power Lithium-ion battery thermal management system. *Applied Thermal Engineering*, 226, 120238.
- Al-Zareer, M., Dincer, I., Rosen, MA. (2019). A novel approach for performance improvement of liquid to vapor based battery cooling systems. *Energy Convers Management*, 187, 191-204.
- Amalesh, T., Narasimhan, L.N. (2020). Introducing new designs of minichannel cold plates for the cooling of Lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 479, 228775.
- Andrea, D. (2010). Battery management systems for large lithium ion battery packs. *Artech house*.
- Anwar, Z., Palm, B.E., Khodabandeh, R. (2015). Dryout characteristics of natural and synthetic refrigerants in single vertical mini-channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68, 257-267.
- Atmaca, G. (2015). *Lityum-hava bataryaları nasıl çalışır*. KBT Bilim Sitesi. <https://www.kuark.org/2015/11/lityum-hava-bataryalari-nasil-calisir/>
- Attalla, M., Maghrabie, H.M., Specht, E. (2016). An experimental investigation on fluid flow and heat transfer of rough mini-channel with rectangular cross section. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 75, 199-210.
- Bai, F., Chen, M., Song, W., Yu, Q., Li, Y., Feng, Z., Ding, Y. (2019). Investigation of thermal management for lithium-ion pouch battery module based on phase change slurry and mini channel cooling plate. *Energy*, 167, 561-574.
- Bakton. (t.y.). *Batarya (akü) teknolojilerinde temel kavramlar*. Batarya Teknolojileri. Erişim Tarihi: 2 Ekim 2022. [https://www.batkon.com/aku-batarya-teknolojileri#:~:text=%C3%87evrim%20%C3%96mr%C3%BC%20\(Cycle%20Life\)%3A,%C3%A7evrim%20%C3%B6mr%C3%BC%E2%80%9D%20o%20say%C4%B1ya%20e%C5%9Fittir.](https://www.batkon.com/aku-batarya-teknolojileri#:~:text=%C3%87evrim%20%C3%96mr%C3%BC%20(Cycle%20Life)%3A,%C3%A7evrim%20%C3%B6mr%C3%BC%E2%80%9D%20o%20say%C4%B1ya%20e%C5%9Fittir.)
- Belchi, L.A., Gomez, I.F., Garcia, V.F., Cascales, G.J.R. (2014). Experimental condensing two-phase frictional pressure drop inside mini-channels. Comparisons and new model development. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 75, 581-591.
- Belchi, L.A. (2019). Assessment of a mini-channel condenser at high ambient temperatures based on experimental measurements working with R134a, R513A and R1234yf. *Applied Thermal Engineering*, 155, 341-353.
- Bi, C., Tang, G.H., Tao, W.Q. (2013). Heat transfer enhancement in mini-channel heat sinks with dimples and cylindrical grooves. *Applied Thermal Engineering*, 55(1-2), 121-132.
- Birikim Pilleri. (2018). Kurşun asit akü nasıl çalışır. <https://birikimpilleri.net/blog/kursun-asit-aku-nasil-calisir>
- BMW. (t.y.). *Elektrikli otomobil türleri*. Erişim tarihi: 11 Kasım 2022. <https://www.bmw.com.tr/tr/topics/fascination-bmw/bmw-i-ve-e-mobilite/elektrikli-otomobil-turleri.html>
- Britannica. (2022). *Jean-Charles-Athanase Peltier*. <https://www.britannica.com/biography/Jean-Charles-Athanase-Peltier>

- Bulut, H. (2005). Termoelektrik Soğutma Sistemleri. *Soğutma Dünyası*, 31, 9-16.
- Celen, A., Kaba, M.Y. (2021). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Silindirik Lityum İyon Bataryaların Soğutulmasının Parametrik İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 33(1), 49-61.
- Chen, K., Wu, W., Yuan, F., Chen, L., Wang, S. (2019). Cooling efficiency improvement of air-cooled battery thermal management system through designing the flow pattern. *Energy*, 167, 781-790.
- Chen, S., Chen, X., Luo, G., Zhu, K., Chen, L., Hou, Y. (2018). Flow boiling instability of liquid nitrogen in horizontal mini channels. *Applied Thermal Engineering*, 144, 812-824.
- Chiasson, J., Vairamohan, B. (2003). Estimating the state of charge of a battery. *Proceedings of the 2003 American Control Conference*, 4(2), 2863-2868.
- Choi, H., Han, U., Lee, H. (2023). Effects of diverging channel design cooling plate with oblique fins for battery thermal management. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 200, 123485.
- Choudhari, V.G., Dhoble, A.S., Panchal, S. (2020). Numerical analysis of different fin structures in phase change material module for battery thermal management system and its optimization. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 163, 120434.
- Chu, W.X., Chen, C.Y., Liao, Y.H., Wang, C.C. (2019). A novel micro-channel heat sink with trapezoid drainage for enhancing condensation heat transfer of dielectric fluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 106, 11-24.
- CTECHİ. (t.y.). *LiFePO4 battery*. Erişim Tarihi: 10 Kasım 2022. <https://www.ctechigroup.com/lifepo4-battery>
- Darboğaz, E. (2018). *Pil çeşitleri ve özellikleri*. Mühendis Beyinler. <https://www.muhendisbeyinler.net/pil-cesitleri-ve-ozellikleri/>
- De Santoli, L., Paiolo, R., Lo Basso, G. (2017). An overview on safety issues related to hydrogen and methane blend applications in domestic and industrial use. *Energy Procedia*, 126, 297-304.
- Deng, H., Fernandino, M., Dorao, C.A. (2014). Numerical study of heat and mass transfer of binary mixtures condensation in mini-channels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 58, 45-53.
- Deng, T., Ran, Y., Zhang, G., Chen, X., Tong, Y. (2019). Design optimization of bifurcating mini-channels cooling plate for rectangular Li-ion battery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 139, 963-973.
- Derby, M., Lee, H.J., Peles, Y., Jensen, M.K. (2012). Condensation heat transfer in square, triangular, and semi-circular mini-channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(1-3), 187-197.
- Doğan, G. (2018). *Batarya teknolojileri*. Mühendis Beyinler. [https://www.muhendisbeyinler.net/batarya-teknolojileri/#:~:text=Sodyum%20Metal%20Klorid%20\(ZEBRA\)%20Batarya,bataryan%C4%B1n%20yay%C4%B1nla%C5%9Fmas%C4%B1yla%20birlikte%20yerini%20kaybetmi%C5%9Ftir](https://www.muhendisbeyinler.net/batarya-teknolojileri/#:~:text=Sodyum%20Metal%20Klorid%20(ZEBRA)%20Batarya,bataryan%C4%B1n%20yay%C4%B1nla%C5%9Fmas%C4%B1yla%20birlikte%20yerini%20kaybetmi%C5%9Ftir)
- Doğan, N.E. (2022). *Çinko-Hava pillerin tek kullanımlık olmasının yeni bir tasarım değiştirebilir*. İNOVATİF Kimya Dergisi. <https://inovatifkimyadergisi.com/cinko-hava-pillerinin-tek-kullanimlik-olmasini-yeni-bir-tasarim-degistirebilir>
- Dong, F., Cheng, Z., Zhu, J., Song, D., Ni, J. (2021). Investigation and optimization on cooling performance of a novel double helix structure for cylindrical lithium-ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, 189, 116758.
- Electropaedia, (2014). *Lithium battery failures*. http://www.mpoweruk.com/lithium_failures.htm

- Guo, C., Liu, H.L., Guo, Q., Shao, X. D., Zhu, M.L. (2022). Investigations on a novel cold plate achieved by topology optimization for lithium-ion batteries. *Energy*, 261, 125097.
- Guo, L., Zhang, S.S., Cheng, L. (2011). Study on characteristics of vapor-liquid two-phase flow in mini-channels. *Nuclear Engineering and Design*, 241(10), 4158-4164.
- Guo, Z., Xu, Q., Zhao, S., Zhai, S., Zhao, T., Ni, M. (2022). A new battery thermal management system employing the mini-channel cold plate with pin fins. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51, 101993.
- Ho, C.J., Chen, Y.Z., Tu, F.J., Lai, C.M. (2014). Thermal performance of water-based suspensions of phase change nanocapsules in a natural circulation loop with a mini-channel heatsink and heat source. *Applied Thermal Engineering*, 64(1-2), 376-384.
- Huang, Y., Mei, P., Lu, Y., Huang, R., Yu, X., Chen, Z. (2019). A novel approach for Lithium-ion battery thermal management with streamline shape mini channel cooling plates. *Applied Thermal Engineering*, 157, 113623.
- Huai, X.L., Koyama, S., Zhao, T.S. (2005). An experimental study of flow and heat transfer of supercritical carbon dioxide in multi-port mini channels under cooling conditions. *Chemical Engineering Science*, 60(12), 3337-3345.
- Imran, A.A., Mahmoud, N.S., Jaffal, H.M. (2018). Numerical and experimental investigation of heat transfer in liquid cooling serpentine mini-channel heat sink with different new configuration models. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 128-139.
- Jaguemont, J., Boulon, L., Dube, Y., Martel, F. (2016). Thermal management of a hybrid electric vehicle in cold weather. *IEEE Trans Energy Convers*, 31(3), 1110-1120.
- Kalkan, O., Celen, A., Bakirci, K., Dalkilic, S.A. (2021). Experimental investigation of thermal performance of novel cold plate design used in a Li-ion pouch-type battery. *Applied Thermal Engineering*, 191, 116885.
- Karatas, O.B., Sokmen, F.K. (2022). Thermal optimization of intercellular distance in lithium-ion batteries and numerical analysis of the original honeycomb metal integrated battery pack. *Journal of Energy Storage*, 55, 105705.
- Khalifa, M.A., Jaffal, H.M. (2019). Effects of channel configuration on hydrothermal performance of the cylindrical mini-channel heat sinks. *Applied Thermal Engineering*, 148, 1107-1130.
- Kim, N.H., Go, M.G. (2018). Horizontal distribution of two-phase refrigerant in parallel flat mini channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 93, 139-152.
- Kozłowska, A., Lapka, P., Serebinski, M., Teodorczyk, M., Dabrowska-Tumanska, E. (2015). Experimental study and numerical modeling of micro-channel cooler with micro-pipes for high-power diode laser arrays. *Applied Thermal Engineering*, 91, 279-287.
- Kumar, S., Sarkar, M., Singh, P.K., Lee, P.S. (2019). Study of thermal and hydraulic performance of air cooled mini channel heatsink with novel geometries. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 103, 31-42.
- Kumar, S., Singh, P.K. (2019). Effects of flow inlet angle on flow maldistribution and thermal performance of water cooled mini-channel heat sink. *International Journal of Thermal Sciences*, 138, 504-511.
- Lei, Z., Zhang, C., Li, J., Fan, G., Lin, Z. (2013). A study on the low-temperature performance of lithium-ion battery for electric vehicles. *Automot Engineer*, 35(10), 927-933.
- Li, J., Zhu, Z. (2014). Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles. *Master's Thesis in Automotive Engineering*, 42.

- Li, X., Hibiki, T. (2017). Frictional pressure drop correlation for two-phase flows in mini and micro multi-channels. *Applied Thermal Engineering*, 116, 316-328.
- Li, Y., Zhou, Z., Wu, W.T. (2019). Three-dimensional thermal modeling of Li-ion battery cell and 50V Li-ion battery pack cooled by mini-channel cold plate. *Applied Thermal Engineering*, 147, 829-840.
- Li, Y., Bai, M., Zhou, Z., Wu, W.T., Lv, J., Gao, L., Huang, H., Li, Y., Li, Y., Song, Y. (2023). Experimental investigations of liquid immersion cooling for 18650 lithium-ion battery pack under fast charging conditions. *Applied Thermal Engineering*, 227, 120287.
- Liang, G., Li, J., He, J., Tian, J., Chen, X., Chen, L. (2022). Numerical investigation on a unitization-based thermal management for cylindrical lithium-ion batteries. *Energy Reports*, 8, 4608-4621.
- Liao, G., Wang, W., Zhang, F., E, J., Chen, J., Leng, E. (2022). Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system based on nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 216, 118997.
- Lim, K., Lee, J. (2019). 1-D two-phase flow analysis for interlocking double layer counter flow mini-channel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 135, 305-317.
- Linden, D., Reddy, T.B. (2002). Handbook of Batteries. Third Edition, *McGraw-Hill*, Bölüm 22-35.
- Lipu, H.M.S., Hussain, A., Saad, M.H.M., Ayob, A., Hannan, M.A., Ker, P.J., Hoque, M.M. (2018). A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 205, 115-133.
- Liu, F., Chen, Y., Qin, W., Li, J. (2023). Optimal design of liquid cooling structure with bionic leaf vein branch channel for power battery. *Applied Thermal Engineering*, 218, 119283.
- Liu, H., Wei, Z., He, W., Zhao, J. (2017). Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review. *Energy Conversion and Management*, 150, 304-330.
- Lu, Q., Chen, D., Li, C., He, X. (2017). Experimental investigation on flow boiling heat transfer in conventional and mini vertical channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 107, 225-243.
- Malhotra, S., Deshpande, A., Ghosh, S. (2017). Air-water flow through a single serpentine mini channel-flow distribution and pressure drop. *International Journal of Multiphase Flow*, 96, 48-55.
- Markal, B., Aksoy, K. (2018). Yenilikçi Soğutma Teknolojileri: Isı Boruları. *1st International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies*, 2, 336-342.
- Matthe, R., Turner, L., Mettlach, H. (2011). VOLTEC Battery System for Electric Vehicle with Extended Range. *SAE International Journal of Engines*, 4, 1944-1962.
- Monika, K., Datta, P.S. (2022). Comparative assessment among several channel designs with constant volume for cooling of pouch-type battery module. *Energy Conversion and Management*, 251, 114936.
- Najim, M., Feddaoui, M.B., Alla, A.N., Charef, A., Kabeel, A.E. (2018). New cooling approach using successive evaporation and condensation of a liquid film inside a vertical mini-channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 122, 895-912.
- Nexeon (t.y.). *Lithium Ion: The battery technology of choice*. Battery systems. Erişim tarihi: 21 Ekim 2022. <https://www.nexeon.co.uk/technology/>
- Ouyang, D., Chen, M., Huang, Q., Weng, J., Wang, J. (2019). A review on the thermal hazards of the lithium-ion battery and the corresponding countermeasures. *Applied Sciences*, 9(12), 2483-2528.
- Oyinlola, M.A., Shire, G.S.F., Moss, R.W. (2015). Investigating the effects of geometry in solar thermal absorber plates with micro-channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 90, 552-560.

- Özdemir, Ç. (2021). *Lityum sülfür bataryalar: Geleceğin pil teknolojisi*. Elektrik port. <https://www.elektrikport.com/makale-detay/lityum-sulfur-bataryalar-gelecegin-pil-teknolojisi/23069#ad-image-0>
- Panchal, S., Khasow, R., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R., Fowler, M. (2017). Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water cooled large sized prismatic lithium-ion battery. *Applied Thermal Engineering*, 122, 80-90.
- Pesaran, A., Vlahinos, A., Stuart, T. (2003). Cooling and preheating of batteries in hybrid electric vehicles. *In 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, 1-7.
- Pistoresi, C., Fan, Y., Luo, L. (2015). Numerical study on the improvement of flow distribution uniformity among parallel mini-channels. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 95, 63-71.
- Procyon Elektrik. (2022). *Nikel-kadmiyum piller*. Mühendislik Enerji Otomasyon Yazılım. <https://www.procyon.com.tr/blog/221/nikel-kadmiyum-piller/>
- Pu, H., Li, S., Dong, M., Jiao, S., Wang, Y., Shang, Y. (2019). Convective heat transfer and flow resistance characteristics of supercritical pressure hydrocarbon fuel in a horizontal rectangular mini-channel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 108, 39-53.
- Rigan, M. (2020). *Elektrikli araçlarda batarya yönetim sistemi tasarımı*, (Yüksek Lisans Tezi), Kahramanmaraş: Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Qi, Z., Chen, J., Radermacher, R. (2009). Investigating performance of new mini-channel evaporators. *Applied Thermal Engineering*, 29(17-18), 3561-3567.
- Qian, Z., Li, Y., Rao, Z. (2016). Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling. *Energy Conversion and Management*, 126, 622-631.
- Saeed, M., Kim, M.H. (2017). Header design approaches for mini-channel heatsinks using analytical and numerical methods. *Applied Thermal Engineering*, 110, 1500-1510.
- Saeed, M., Kim, M.H. (2018). Heat transfer enhancement using nanofluids (Al₂O₃-H₂O) in mini-channel heatsinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120, 671-682.
- Salimi, A., Aliabadi-Khoshvaght, M., Rashidi, S. (2022). On thermal management of pouch type lithium-ion batteries by novel designs of wavy minichannel cold plates: Comparison of co-flow with counter-flow. *Journal of Energy Storage*, 52, 104819.
- Shibahara, M., Fukuda, K., Liu, Q.S., Hata, K. (2017). Steady and transient critical heat flux for subcooled water in a mini channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 267-275.
- Shun-Bo, Z., Xuan, H., Chong-Nan, L., Jie-Yan, S., Qiang, G. (2023). Improving the air-cooling performance for lithium-ion battery packs by changing the air flow pattern. *Applied Thermal Engineering*, 221, 119825.
- Siemens. (2021). *Simcenter FLOEFD sorftware-version 21.2*, USA.
- Silva, J.E.D., Junior, J.U. (2019). Converting a Conventional Vehicle into an Electric Vehicle (EV). *Smart Energy*, 62, no.spe: e19190007.
- Taracson, J.M., Armand, M. (2001). Issues and Challenges Facing Rechargeable Lithium Batteries. *Nature*, 414, 359-367.
- Thomas, A.S., Garb, A., Kim, J., Panigrahi, B.K., Phung, L.L.M. (2022). Study on efficacy of different heat transfer fluids flowing through an aluminium flow plate channel on the temperature of the prismatic lithium-ion battery pack. *Journal of Energy Storage*, 52, 105059.

Tikadar, A., Oudah, S.K., Paul, T.C., Salman, A.S., Morshed, A.K.M.M., Khan, J.A. (2019). Parametric study on thermal and hydraulic characteristics of interconnected parallel and counter flow mini-channel heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 153, 15-28.

Turğut, M. (2018). *Elektrikli araçlar için batarya yönetim sistemi tasarımı ve geliştirilmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Karabük: Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Vasileiadou, P., Sefiane, K., Karayiannis, T.G., Christy, J.R.E. (2017). Flow boiling of ethanol/water binary mixture in a square mini-channel. *Applied Thermal Engineering*, 127, 1617-1626.

Wakihara, M. (2001). Recent developments in lithium ion batteries. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 33(4), 109-134.

Wang, H.L., Wu, H.C., Wang, S.K., Hung, T.C., Yang, R.J. (2013). A study of mini-channel thermal module design for achieving high stability and high capability in electronic cooling. *Applied Thermal Engineering*, 51(1-2), 1144-1153.

Wang, Y., Sefiane, K., Harmand, S. (2012). Flow boiling in high-aspect ratio mini- and micro-channels with FC-72 and ethanol: Experimental results and heat transfer correlation assessments. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 36, 93-106.

Wang, Y., Wang, Z.G. (2014). An overview of liquid-vapor phase change, flow and heat transfer in mini- and micro-channels. *International Journal of Thermal Sciences*, 86, 227-245.

Wen, T., Zhan, H., Lu, L., Zhang, D. (2018). Experimental investigation and development of new correlation for flow boiling heat transfer in mini-channel. *International Journal of Thermal Sciences*, 129, 209-217.

Wikipedia. (2015). *Lityum-hava pili*. The Free Encyclopedia. https://tr.wikipedia.org/wiki/Lityum%E2%80%93hava_pili

Wikipedia. (2022a). *Lityum iyon pil*. The Free Encyclopedia. https://tr.wikipedia.org/wiki/Lityum_iyon_pil

Wikipedia. (2022b). *Kurşun asit pili*. The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Lead%E2%80%93acid_battery

Wikipedia. (2022c). *Nikel-kadmiyum pil*. The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93cadmium_battery

Wikipedia. (2022d). *Nickel-metal hydride battery*. The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93metal_hydride_battery

Wikipedia. (2022e). *ZEBRA pil*. The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/ZEBRA_battery

Wikipedia. (2022f). *Lityum-kükürt pil*. The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium%E2%80%93sulfur_battery

Wikipedia. (2022g). *Lityum demir fosfat pil*. The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_iron_phosphate_battery

Wilcke, W.W., Kim, H.C. (2016). *Lityum-iyon bataryalar kullanım dışı**. Gelecek Lityum-Hava Bataryalarında: 800 Kilometrelik Batarya. Elektrik Mühendisliği, 458.

Xiang, X., Yang, J., Fan, A., Liu, W. (2018). A comparison between cooling performances of water-based and gallium-based micro-channel heat sinks with the same dimensions. *Applied Thermal Engineering*, 137, 1-10.

Yang, X.H., Tan, S.C., Ding, Y.J., Liu, J. (2017). Flow and thermal modeling and optimization of micro mini-channel heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 117, 289-296.

- Yates, M., Akrami, M., Javadi, A.A. (2021). Analysing the performance of liquid cooling designs in cylindrical lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 33, 100913.
- Yenigün, M., Utlu, Z. (2018). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Soğutma Sistemlerinin İncelenmesi ve Değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makine*, 59(692), 35-47.
- Yeşerenerji. (2021). Çinko-Hava pilleri ile elektrikli arabalar 1450 km yol alabilir. <https://yeserenerji.com/cinko-hava-pilleri-ile-elektrikli-arabalar-1450-km-yol-alabilir/>
- Yong, Y.J., Ramachandaramurthy, K.V., Tan, M.K. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365-385.
- Yu, Z., Lan, S., Yuan, H., Tan, S. (2015). Temperature fluctuation characteristics in a mini-rectangular channel under rolling motion. *Progress in Nuclear Energy*, 81, 203-216.
- Zen Elektronik. (t.y.). *Lipo pil özellikleri*. Erişim Tarihi: 10 Ekim 2022. <https://www.zenelektronik.com/Piller.html>
- Zhang, B., Wang, Y., Zhang, J., Li, Q. (2017). Experimental research on pressure drop fluctuation of two-phase flow in single horizontal mini-channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 88, 160-170.
- Zhang, C., Jiang, J., Gao, Y., Zhang, W., Liu, Q., Hu, X. (2017). Charging optimization in lithium-ion batteries based on temperature rise and charge time. *Applied Energy*, 194, 569-577.
- Zhang, D.X., Yang, X.H., Zhou, Y.X., Rao, W., Gao, J.Y., Ding, Y.J., Shu, Q.Q., Liu, J. (2019). Experimental investigation of galinstan based mini channel cooling for high heat flux and large heat power thermal management. *Energy Conversion and Management*, 185, 248-258.
- Zhang, X., Li, Z., Luo, L., Fan, Y., Du, Z. (2022). A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Energy*, 238, 121652.
- Zhang, Y., Zuo, W., E, J., Li, J., Li, Q., Sun, K., Zhou, K., Zhang, G. (2022). Performance comparison between straight channel cold plate and inclined channel cold plate for thermal management of a prismatic LiFePO₄ battery. *Energy*, 248, 123637.
- Zhao, J., Rao, Z., Li, Y. (2015). Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery. *Energy Conversion and Management*, 103, 157-165.

