



**ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ FARKLI
METODLARLA SOĞUTULMASININ DENEYSEL
VE SAYISAL ANALİZİ**

Orhan KALKAN

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2021

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ FARKLI METODLARLA
SOĞUTULMASININ DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZİ**

(Experimental and Numerical Analysis of the Cooling of Electric Vehicle Batteries with
Different Methods)

DOKTORA TEZİ

Orhan KALKAN

Danışman: Prof. Dr. Kadir BAKIRCI
İkinci Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ali CELEN

Erzurum
Haziran, 2021

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Prof. Dr. Kadir BAKIRCI danışmanlığında, Orhan KALKAN tarafından hazırlanan bu çalışma, 17/06/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Kenan YAKUT <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.
Danışman:	Prof. Dr. Kadir BAKIRCI <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Hakan TEMÜR <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. İsmail SOLMAZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Bayram ŞAHİN <i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Selahattin ÇELİK <i>Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.
İkinci Tez Danışmanı	Dr. Öğr. Üyesi Ali CELEN <i>Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.

Enstitü Yönetim Kurulunun
.../.../.... tarih ve sayılı
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Bu çalışma Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi BAP projesi kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FBA-2019-657

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak *Prof. Dr. Kadir BAKIRCI* danışmanlığında sunulan “ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ FARKLI METODLARLA SOĞUTULMASININ DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZİ” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	1	30
Kuramsal Temeller	1	30
Materyal ve Yöntem	4	35
Bulgular	3	20
Tartışma	3	20
Tezin Geneli	3	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'ten büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Orhan KALKAN	Prof. Dr. Kadir BAKIRCI
17.6.2021	17.6.2021
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında tecrübesini, ilgisini ve desteğini hiç eksik etmeyen kıymetli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Kadir BAKIRCI'ya teşekkürlerimi arz ederim. Tez konusu seçimimden deneysel çalışmalarındaki aşamalara kadar her konuda bana destek olan, bu zorlu süreçte her daim bilgi ve tecrübeleri ile yanımda olan değerli ikinci danışman hocam Sayın Ali CELEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışması sürecine değerli katkılar sunan ve desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Kenan YAKUT ve Sayın Doç. Dr. Hakan TEMÜR hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu doktora tez çalışmasını, FBA-2019-657 proje numarası ile destekleyen Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

Hayatımın her anında olduğu gibi bu tez çalışması sürecinde de bana varlıklarıyla en büyük desteği veren, dua ve hoşgörülerini esirgemeyen kıymetli aileme hürmetlerimi ve sevgilerimi sunarım.

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ FARKLI METODLARLA SOĞUTULMASININ DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZİ

Orhan KALKAN

Danışman: Prof. Dr. Kadir BAKIRCI

İkinci Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ali CELEN

Amaç: Elektrikli araçlarda kullanılan Lityum-iyon bataryalarının termal yönetiminde, batarya sıcaklığının istenilen aralıkta tutulması, sıcaklığın homojen dağılımı ve termal yönetim için harcanan enerjinin en aza indirgenmesi en önemli hususlardır. Bu amaçlar doğrultusunda, bir LiFePO_4 torba tip bataryanın belirli çalışma şartlarında soğutulması, deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Yöntem: Bu çalışmada bataryanın soğutulması, havanın doğal taşınımı ile soğutma yöntemi ve sıvı ile soğutma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Doğal taşınım şartlarındaki hava ile soğutmada, 1C-5C deşarj hızı aralığında termal görüntüleme tekniği kullanılarak batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Sıvı ile soğutma yönteminde ise iki farklı tipteki soğutucu plaka kullanılarak 0,1 L/dk, 0,6 L/dk ve 1,1 L/dk soğutma sıvısı debilerinde, 15 °C, 25 °C ve 35 °C soğutma sıvısı giriş sıcaklığı şartlarında ve 1C-5C deşarj hızı aralıklarında deneyler yapılmıştır. Bu parametrelerin soğutma performansına olan etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Hava ve sıvı ile soğutma yöntemleri kullanılarak bataryanın ısıl yöntemi deneysel olarak incelenirken, ANSYS-Fluent yazılımı ile de simülasyonları yapılmıştır. Ayrıca yeni tasarlanan mini kanallı soğutucu plakanın geometrik yapısı ve içerisinde dolaştırılan soğutma sıvısının debisi optimize edilmiştir.

Bulgular: Doğal taşınım şartlarında, en yüksek deşarj hızında (5C) elde edilen maksimum, minimum ve ortalama batarya sıcaklıkları ise sırasıyla 52,2 °C, 45,5 °C ve 50,1 °C olarak ölçülmüştür. Mini kanallı soğutucu plaka (MKSP) kullanımı ile serpantinli soğutucu plakaya göre ortalama batarya sıcaklığında elde edilen maksimum düşüş 5,7 °C olup, bu değer 1,1 L/dk su debisi ve 15 °C su giriş sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. MKSP kullanımıyla basınç kaybında, en düşük (0,1 L/dk) ve en yüksek (1,1 L/dk) su debilerinde sırasıyla %29 ve %41 oranında azalma elde edilmiştir. MKSP'nin optimizasyonu sonucunda optimum debi değeri 0,706 L/dk bulunmuştur.

Sonuç: Bu çalışma sonucunda, bataryanın 3C deşarj hızı ve üzeri şartlarda havanın doğal taşınımı ile soğutulmasının yeterli olmadığı belirlenmiştir. Sıvı soğutma deneylerinde soğutma performansının en yüksek olduğu durum, MKSP kullanımı ile 25 °C su giriş sıcaklığı şartında elde edilmiştir. MKSP kullanımı ile yerel sıcaklık farkında yaklaşık %40 iyileşme elde edilmiştir. Maksimum deşarj hızında (5C) MKSP kullanımına bağlı ısı transfer hızında %22 oranında artış görülmüştür. Sonuç olarak yeni tasarıma sahip plaka ile daha etkin ve homojen sıcaklık dağılımına sahip bir soğutma sağlanırken basınç düşümleri de azaltılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Batarya termal yönetimi, elektrikli araç, soğutucu plaka, termal görüntüleme, optimizasyon.

Haziran 2021, 163 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE COOLING OF ELECTRIC VEHICLE BATTERIES WITH DIFFERENT METHODS

Orhan KALKAN

Supervisor: Prof. Dr. Kadir BAKIRCI

Co-supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Ali CELEN

Purpose: Maintaining the temperature of the battery within a desired range, homogeneous distribution of temperature and minimizing the energy consumed for thermal management are the most important issues for the thermal management of Lithium-ion batteries used in electric vehicles. For these purposes, the cooling of a LiFePO₄ pouch type battery under certain operating conditions has been investigated experimentally and numerically.

Method: In this study, cooling of the battery was carried out using the natural convection cooling method and liquid cooling method. Temperature distributions on the battery surface were investigated by using thermal imaging technique in the range of 1C-5C discharge rate for air cooling under natural convection conditions. The experiments for liquid cooling method have been carried out using two different types of cold plates under the conditions of 0.1 L/min, 0.6 L/min, 1.1 L/min coolant flow rates, 15 °C, 25 °C, 35 °C coolant inlet temperature and 1C-5C discharge rate range. The effects of these parameters on the cooling performance have been studied experimentally and numerically. In addition to the experimental study of the battery thermal management using air and liquid cooling methods, simulations were also performed with ANSYS-Fluent software. Moreover, the geometric structure of the novel designed mini channeled cold plate and the flow rate of the coolant circulated in it have been optimized.

Findings: Under natural convection conditions, the maximum, minimum and average battery temperatures obtained at the highest discharge rate (5C) were measured as 52.2 °C, 45.5 °C and 50.1 °C, respectively. The maximum decrease obtained in the average battery temperature under the conditions of 1.1 L/min water flow rate and 15 °C water inlet temperature is 5.7 °C using mini channel cold plate (MKSP) compared to the serpentine tubed plate. Considering pressure loss with the use of MKSP, a reduction of 29% and 41% was achieved in the lowest (0.1 L/min) and the highest (1.1 L/min) water flow rates, respectively. As a result of the MKSP optimization, the optimum flow rate was found to be 0.706 L/min.

Results: As a result of this study, it was determined that it is not sufficient to cool the battery by natural convection at 3C discharge rate and above conditions. The highest cooling performance was obtained with the use of MKSP at the water inlet temperature condition of 25 °C for liquid cooling experiments. An improvement of about 40% was achieved in the local temperature difference with the use of MKSP. There was a 22% increase in heat transfer rate due to the use of MKSP at the maximum discharge rate (5C). As a result, a more efficient and homogeneous temperature distribution is provided with the cold plate has novel design, as well as the pressure drops have been reduced.

Keywords: Battery thermal management, electric vehicle, cold plate, thermal imaging, optimization.

June 2021, 163 pages

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xiv
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	8
Batarya ile İlgili Önemli Kavramlar	8
Elektrot	8
Anot ve katot	8
Elektrolit.....	8
Ayrıcı.....	9
Kapasite ve C-hızı	9
Çevrim ömrü.....	9
Özgül enerji ve özgül güç.....	10
Nominal voltaj, açık devre voltajı, kapalı devre voltajı ve kesme voltajı	10
Doluluk oranı (SoC), deşarj oranı (DoD) ve sağlık durumu (SoH)	10
Batarya Yönetim Sistemi (BYS)	11
Lityum İyon Bataryalar	14
Kimyasal yapılarına göre Li- iyon bataryaların sınıflandırılması	14
Geometrik yapılarına göre Li-iyon bataryaların sınıflandırılması	18

Li-iyon Bataryalarda Isı Üretim Modeli	19
Batarya Termal Yönetim Sistemleri (BTYS).....	20
Faz Değiştiren Maddeler (FDM) ile soğutma yöntemi	21
Isı borusu ile soğutma yöntemi	21
Hava soğutma yöntemi	22
Sıvı soğutma yöntemi	24
MATERYAL VE YÖNTEM.....	41
Hava ile Soğutmada Kullanılan Deneysel Yöntem.....	41
Hava ile Soğutmanın Sayısal Analizi.....	43
LFP bataryanın elektrokimyasal-termal birleşik modeli	45
Mesh analizi ve sayısal çözüm	48
Sıvı ile Soğutmada Kullanılan Deneysel Yöntem.....	50
Batarya test bölgesinin oluşturulması.....	51
Sıvı soğutma deney setinin oluşturulması	56
Belirsizlik ve Hata Analizi	64
Sıvı ile Soğutmanın Sayısal Analizi.....	65
Soğutucu plakaların modellenmesi	65
Batarya test bölgesinin mesh yapılanması.....	67
Mesh bağımsızlık analizi.....	69
HAD çözücü kurulumu	70
MKSP Optimizasyonu	72
Yanıt yüzey yöntemi	73
Varyans analizi (ANOVA).....	75
Kompozit istenebilirlik fonksiyonu yaklaşımı	76
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	78
Doğal Taşınım Deneyi Sonuçları.....	78
Doğal Taşınım Şartlarındaki Deneysel ve Sayısal Analizlerin Karşılaştırılması	82
Sıvı Soğutma Deney Sonuçları	89

Batarya yüzeyindeki bölgesel sıcaklık değişimi	94
SSP ve MKSP ile elde edilen ısı transfer hızları	96
SSP ve MKSP kullanımına bağlı basınç kayıpları	99
SSP Kullanılan Çalışmanın Sayısal Analizi.....	99
MKSP Sayısal Analizi	111
MKSP Optimizasyonu	123
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	137
KAYNAKLAR	139
ÖZGEÇMİŞ	145



TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 1. Son yıllarda yaşanan li-iyon bataryalar ile ilgili yangın kazaları (Meng <i>et al.</i> 2020) .6	
Tablo 2. Batarya soğutma yöntemlerinin kıyaslanması.....20	
Tablo 3. Tam ve hibrit elektrikli araçlarda kullanılan batarya soğutma yöntemleri.....21	
Tablo 4. Termal görüntüleme deneyinde kullanılan kameranın teknik özellikleri.....43	
Tablo 5. Mesh bağımsızlık analizi48	
Tablo 6. Batarya bileşenlerinin fiziksel özellikleri (Panchal et al. 2017).....50	
Tablo 7. Deneysel çalışma şartları51	
Tablo 8. Soğutma deneylerinde kullanılan bataryaya ait özellikler (Panchal et al. 2017).....53	
Tablo 9. Soğutmalı/ısıtmalı su banyosuna ait teknik özellikler.....57	
Tablo 10. Sirkülasyon pompasına ait teknik özellikler.....59	
Tablo 11. Türbin tip debimetreye ait teknik özellikler60	
Tablo 12. Fark basınç ölçere ait teknik özellikler.....61	
Tablo 13. Veri kayıt cihazına ait teknik özellikler.....62	
Tablo 14. DC güç kaynağına ait teknik özellikler63	
Tablo 15. DC elektronik yüke ait teknik özellikler64	
Tablo 16. Deneysel belirsizlikler65	
Tablo 17. SSP ve MKSP için farklı çalışma şartlarında birim kütle başına bataryadan çekilen ısı transfer hızları.....98	
Tablo 18. MKSP kullanımı ile soğutma performansında birim batarya paketi kütlesi için elde edilen iyileşme oranları98	
Tablo 19. Soğutucu plakalarda oluşan basınç kayıpları.....99	
Tablo 20. Optimizasyon parametreleri123	
Tablo 21. Deney parametreleri ve seviyeleri124	
Tablo 22. DT bağımsız değişkenler ve yanıt değerleri126	
Tablo 23. ΔP bağımlı değişkeni için yapılan ANOVA raporu127	
Tablo 24. T_{maks} bağımlı değişkeni için yapılan ANOVA raporu129	
Tablo 25. ΔT_{maks} bağımlı değişkeni için yapılan ANOVA raporu131	
Tablo 26. MKSP optimizasyon sonucu136	

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 2016 yılına ait dünya genelindeki sektörel bazlı sera gazı emisyon oranları (Friedrich and Ge 2020)	1
Şekil 2. Elektrikli araçların yapısı	2
Şekil 3. Şarj edilebilir batarya tiplerinin enerji kapasiteleri (Linden and Reddy 2002).....	3
Şekil 4. Batarya hücresi, modülü ve paketinin bileşen yapısı	4
Şekil 5. Li-iyon batarya hücresindeki ısı sürüklenme aşamaları (Arora 2018).....	5
Şekil 6. Isıl sürüklenme ile bataryası alev alan bir elektrikli araç (Wu et al. 2019)	5
Şekil 7. Bataryaya ait SoC, DoD ve SoH parametrelerinin gösterimi	11
Şekil 8. BYS şematik gösterimi (Hauser and Kuhn 2015).....	13
Şekil 9. LCO bataryanın karakteristik özellik diyagramı (Ahmadi and Torabi 2019).....	15
Şekil 10. LMO bataryanın karakteristik özellik diyagramı (Ahmadi and Torabi 2019).....	15
Şekil 11. NMC bataryanın karakteristik özellik diyagramı (Ahmadi and Torabi 2019).....	16
Şekil 12. LFP bataryanın karakteristik özellik diyagramı (Ahmadi and Torabi 2019).....	16
Şekil 13. NCA bataryanın karakteristik özellik diyagramı (Ahmadi and Torabi 2019)	17
Şekil 14. LTO bataryanın karakteristik özellik diyagramı (Ahmadi and Torabi 2019).....	17
Şekil 15. Geometrik yapılarına göre batarya çeşitleri	19
Şekil 16. a) Pasif sıvı soğutma, b) Aktif orta dereceli sıvı soğutma/ısıtma, c) Aktif yüksek dereceli sıvı soğutma/ısıtma sistemleri (Rao and Wang 2011)	25
Şekil 17. Termal kamera ile görüntüleme deney düzeneği	42
Şekil 18. Termal kamera ile görüntüleme deney setinin şematik gösterimi	42
Şekil 19. Bataryanın doğal taşınım ile soğutulmasının iki boyutlu fiziksel modeli.....	43
Şekil 20. Batarya elektrokimyasal model yapısının şematik görünümü	46
Şekil 21. Batarya ve çevre hava modelinin mesh yapısı	48
Şekil 22. Fluent programı ile NTGK modeli oluşturulmasının ekran görüntüsü.....	49
Şekil 23. Batarya test bölgesinin patlatılmış şematik görünümü	52
Şekil 24. Soğutma deneylerinde kullanılan torba tip batarya.....	52
Şekil 25. Alüminyum levhadaki a) plaka ölçüleri (mm), b) kanallarının termal macunla kaplanması, c) serpantin borunun yerleştirilmesi ve d) serpantinli soğutucu plakanın oluşturulması	54
Şekil 26. Yeni mini kanal tasarımına sahip soğutucu plakanın a) ölçülendirilmesi (mm) ve b) kesit görünümü	55

Şekil 27. a) Batarya üzerine ısıtıcı çiftlerin konumlandırılması ve b) oluşturulan batarya test düzeneğinin görünümü	55
Şekil 28. Batarya sıvı soğutma deney düzeneğinin genel görünümü.....	56
Şekil 29. Batarya sıvı soğutma deney düzeneğinin şematik görünümü	57
Şekil 30. Soğutmalı/ısıtmalı su banyosu	58
Şekil 31. Frekans kontrollü sirkülasyon pompası	58
Şekil 32. a) türbin tip debimetre ve b) göstergesi	59
Şekil 33. Fark basınç ölçer	60
Şekil 34. Veri kayıt cihazı	62
Şekil 35. DC güç kaynağı.....	63
Şekil 36. DC elektronik yük.....	64
Şekil 37. Modellenen soğutucu plakalar için sınır şartlarının şematik gösterimi	67
Şekil 38. SSP kullanılan batarya test bölgesinin a) genel mesh yapısı görünümü ve b) kanal mesh yapısı patlatılmış görünümü.....	68
Şekil 39. MKSP kullanılan batarya test bölgesinin a) genel mesh yapısı görünümü ve b) kanal mesh yapısı patlatılmış görünümü	69
Şekil 40. SSP kullanılan batarya test bölgesinin mesh bağımsızlık analizi	70
Şekil 41. MKSP kullanılan batarya test bölgesinin mesh bağımsızlık analizi	70
Şekil 42. Fluent kurulum sayfasının ekran görüntüsü.....	71
Şekil 43. MKSP için kanal optimizasyon parametreleri	72
Şekil 44. Yüzey merkezli MKD (CCF).....	74
Şekil 45. MKD tasarımları	74
Şekil 46. Optimizasyon akış şeması	77
Şekil 47. 1C hızındaki deşarj süresince batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımları	79
Şekil 48. 2C hızındaki deşarj süresince batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımları	79
Şekil 49. 3C hızındaki deşarj süresince batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımları	80
Şekil 50. 4C hızındaki deşarj süresince batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımları	81
Şekil 51. 5C hızındaki deşarj süresince batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımları	81
Şekil 52. Farklı deşarj hızlarındaki zamana bağlı voltaj değişimi	82
Şekil 53. Doğal taşınım şartlarında bataryanın 5C hızındaki deşarjı sonunda elde edilen a) simülasyon ve b) termal kamera görüntüsü.....	83
Şekil 54. 1C-5C deşarj hızları arası zamana bağlı a) maksimum, b) minimum ve c) ortalama batarya sıcaklık değişimleri.....	84
Şekil 55. 1C-5C deşarj hızları arası homojenlik indeksleri.....	85

Şekil 56. 1C-5C deşarj hızları arası zamana bağlı bataryadan çekilen ısı transfer hızı	86
Şekil 57. Hava ve batarya modelinin a) 1C, b) 2C, c) 3C, d) 4C, e) 5C deşarj hızlarındaki en-kesit yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımları.....	87
Şekil 58. Hava ve batarya modelinin a) 1C, b) 2C, c) 3C, d) 4C, e) 5C deşarj hızlarındaki en-kesit yüzeyinde oluşan hız dağılımları	88
Şekil 59. Deneysel ve hesaplanan ısı transfer hızlarının regresyon analizi.....	89
Şekil 60. 0,1 L/dk su debisi, a) 15 °C, b) 25 °C ve c) 35 °C su giriş sıcaklığı ve 1C-5C deşarj hızı şartlarında ortalama batarya sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi.....	91
Şekil 61. 0,6 L/dk su debisi, a) 15 °C, b) 25 °C ve c) 35 °C su giriş sıcaklığı ve 1C-5C deşarj hızı şartlarında ortalama batarya sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi.....	92
Şekil 62. 1,1 L/dk su debisi, a) 15 °C, b) 25 °C ve c) 35 °C su giriş sıcaklığı ve 1C-5C deşarj hızı şartlarında ortalama batarya sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi.....	93
Şekil 63. 1,1 L/dk su debisinde ve 5C deşarj hızında SSP ve MKSP'nin soğutma performansları	94
Şekil 64. Batarya yüzeyinde a) SSP ve b) MKSP ile elde edilen bölgesel sıcaklık farkları	95
Şekil 65. SSP ve MKSP ile elde edilen a) 0,1 L/dk, b) 0,6 L/dk ve c) 1,1 L/dk su debilerindeki maksimum ısı transfer hızları	97
Şekil 66. 0,1 L/dk su debisi şartlarında, ortalama batarya sıcaklıklarının deşarj oranına bağlı değişimi	100
Şekil 67. 0,6 L/dk su debisi şartlarında, ortalama batarya sıcaklıklarının deşarj oranına bağlı değişimi	101
Şekil 68. 1,1 L/dk su debisi şartlarında, ortalama batarya sıcaklıklarının deşarj oranına bağlı değişimi	102
Şekil 69. 1C hızında deşarj sonundaki batarya yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımları.....	104
Şekil 70. 3C hızında deşarj sonundaki batarya yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımları.....	105
Şekil 71. 5C hızında deşarj sonundaki batarya yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımları.....	106
Şekil 72. SSP ve soğutma sıvısının sıcaklık dağılımlarının gösterildiği kesit düzlem.....	107
Şekil 73. 1C hızında deşarj sonunda oluşan SSP kesit düzlemindeki sıcaklık dağılımları	108
Şekil 74. 3C hızında deşarj sonunda oluşan SSP kesit düzlemindeki sıcaklık dağılımları	109
Şekil 75. 5C hızında deşarj sonunda oluşan SSP kesit düzlemindeki sıcaklık dağılımları	110
Şekil 76. 0,1 L/dk su debisi şartlarında ortalama batarya sıcaklıklarının deşarj oranına bağlı değişimi	112
Şekil 77. 0,6 L/dk su debisi şartlarında ortalama batarya sıcaklıklarının deşarj oranına bağlı değişimi	113

Şekil 78. 1,1 L/dk su debisi şartlarında ortalama batarya sıcaklıklarının deşarj oranına bağılı değişimi	114
Şekil 79. 1C hızında deşarj sonundaki batarya yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımları.....	116
Şekil 80. 3C hızında deşarj sonundaki batarya yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımları.....	117
Şekil 81. 5C hızında deşarj sonundaki batarya yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımları.....	118
Şekil 82. MKSP ve soğutma sıvısının sıcaklık dağılımlarının gösterildiği kesit düzlem	119
Şekil 83. 1C hızında deşarj sonunda oluşan MKSP kesit düzlemindeki sıcaklık dağılımları	120
Şekil 84. 3C hızında deşarj sonunda oluşan MKSP kesit düzlemindeki sıcaklık dağılımları	121
Şekil 85. 5C hızında deşarj sonunda oluşan MKSP kesit düzlemindeki sıcaklık dağılımları	122
Şekil 86. ΔP için regresyon grafiği	128
Şekil 87. ΔP için Pareto grafiği	128
Şekil 88. T_{maks} için regresyon grafiği	130
Şekil 89. T_{maks} için Pareto grafiği	130
Şekil 90. ΔT_{maks} için regresyon grafiği.....	132
Şekil 91. ΔT_{maks} için Pareto grafiği	132
Şekil 92. ΔP için yüzey grafikleri	133
Şekil 93. T_{maks} için yüzey grafikleri	134
Şekil 94. ΔT_{maks} için yüzey grafikleri.....	135
Şekil 95. CDF yaklaşımı ile çoklu yanıt optimizasyonu sonuçları	136

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

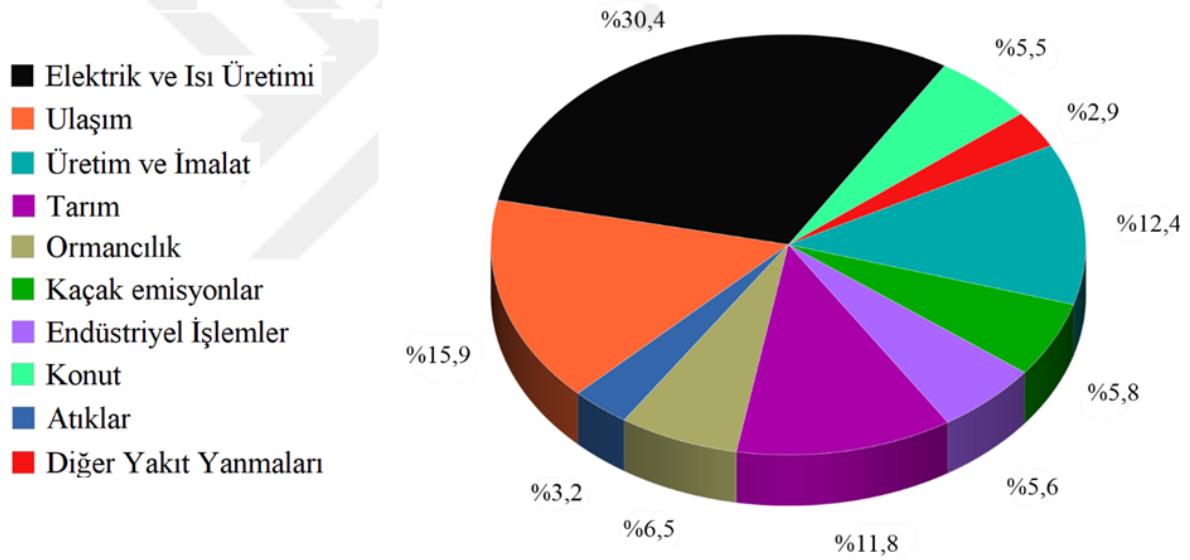
A_s	: Bataryanın yüzey alanı (m^2)
a	: Kanal kolları arası mesafe (mm)
BTYS	: Batarya termal yönetim sistemi
BYS	: Batarya yönetim sistemi
CAN	: Kontrolör alan ağı
CC/CV	: Sabit akım/Sabit voltaj
CCV	: Kapalı devre voltajı (V)
c_p	: Batarya özgül ısısı ($kJ/kg, ^\circ C$)
ÇATO	: Çok Amaçlı Tasarım Optimizasyon
d	: Kanal derinliği (mm)
DC	: Doğru akım
DoD	: Deşarj oranı
DT	: Deney Tasarımı
EV	: Elektrikli araç
FDM	: Faz değıştiren maddeler
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiğı
HEV	: Hibrit elektrikli araç
I	: Bataryadan geçen toplam akım (A)
IR	: Kızılötesi görüntüleme
j_{EKI}	: Elektrokimyasal ısı kaynaklı akım transfer hızı
j_{KDI}	: Kısa devre kaynaklı akım transfer hızı
LCO	: Lityum kobalt oksit
LFP	: Lityum demir fosfat
LMO	: Lityum manganez oksit
LTO	: Lityum titanat

Li-iyon	: Lityum iyon
MKD	: Merkezi Kompozit Dizaynı
MKSP	: Mini kanallı soğutucu plaka
NCA	: Lityum nikel kobalt alüminyum
NMC	: Lityum nikel manganez kobalt oksit
Ni-Cd	: Nikel-kadmiyum
Ni-MH	: Nikel-metal hidrit
n	: Ara geçiş sayısı
OCV	: Açık devre voltajı (V)
PHEV	: Fişli hibrit elektrikli araç
$\dot{q}_{EKI}$	: Elektrokimyasal reaksiyonlar kaynaklı ısı üretim hızı (W)
$\dot{q}_{TKI}$	: Termal kaçak kaynaklı ısı transfer hızı (W)
$\dot{Q}$	: Soğutma suyuna transfer edilen ısı yük (W)
$\dot{Q}_{t,\zeta}$	: Bataryadan çevreye olan ısı transfer hızı (W)
$\dot{Q}_{\dot{u}}$	: Batarya ısı üretim hızı (W)
Q	: Soğutma sıvısının debisi (L/dk)
SEI	: Elektrolit ara yüzü
SoC	: Doluluk oranı
SoH	: Sağlık durumu
SSP	: Serpantinli soğutucu plaka
t	: Zaman (s)
T	: Batarya sıcaklığı (K)
T_b	: Başlangıç sıcaklığı (°C)
T_{maks}	: Batarya yüzeyindeki deşarj sonunda ulaşılan maksimum sıcaklık (°C)
T_{min}	: Batarya yüzeyindeki deşarj sonunda ulaşılan minimum sıcaklık (°C)
$T_{s,g}$	: Su giriş sıcaklığı (°C)

T_y	: Bataryanın ortalama yüzey sıcaklığı (°C)
T_{∞}	: Ortam sıcaklığı (°C)
$U_{l,avg}$	: Elektrottaki ortalama bileşik için açık devre voltajı (V)
V	: Batarya çalışma voltajı (V)
$V_{s,g}$	: Su giriş hızı (m/s)
w	: Kanal genişliği (mm)
YYY	: Yüzey Yanıt Yöntemi
Zn/MnO ₂	: Çinko manganez dioksit
ΔP	: Plakalarda oluşan basınç kayıpları (Pa)
ΔT_{maks}	: Batarya yüzeyinde oluşan maksimum sıcaklık farkı (°C)
θ	: Homojenlik indeksi
σ_+	: Pozitif elektrotların etken elektrik iletkenlikleri (S/m)
σ_-	: Negatif elektrotların etken elektrik iletkenlikleri (S/m)
φ_+	: Pozitif elektrotların faz potansiyelleri (V)
φ_-	: Negatif elektrotların faz potansiyelleri (V)

GİRİŞ

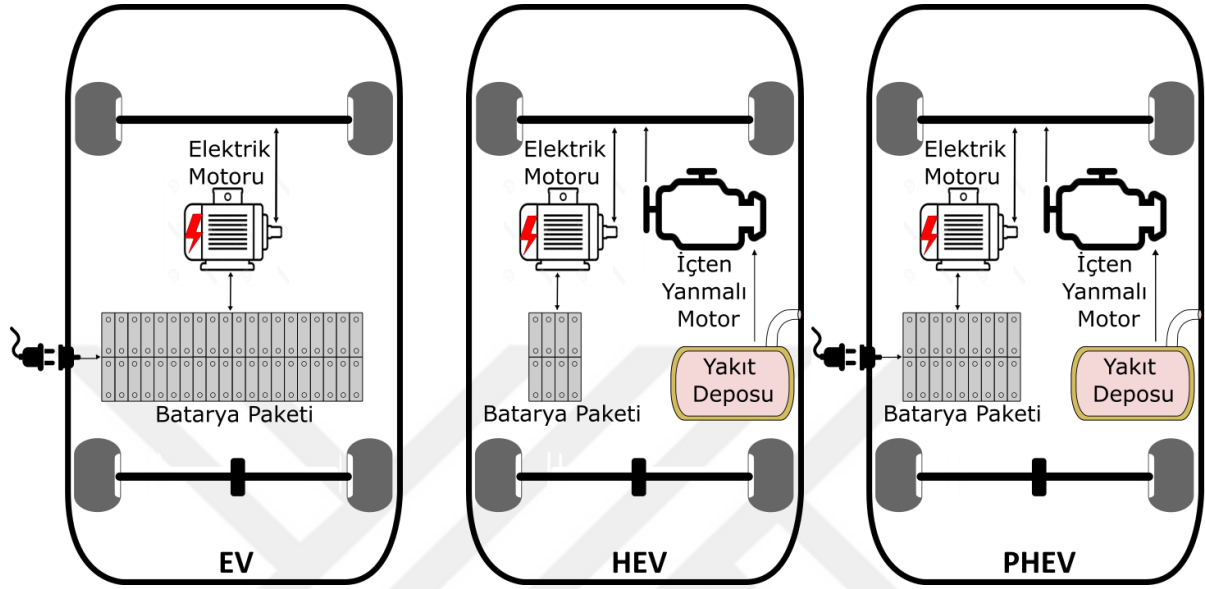
Dünyada elektrikli araç (EV) ve hibrit elektrikli araç (HEV) kullanımının giderek yaygınlaşması ile birlikte, küresel enerji ihtiyacının karşılanması ve çevre kirliliğinin önüne geçilmesi konusunda önemli adımlar atılmıştır (Eaves and Eaves 2004)(Amjad *et al.* 2010). Günümüzde, taşımacılık sektörünün büyük çoğunluğunda fosil yakıt kullanan geleneksel araçlar tercih edilmektedir. Şekil 1’de gösterilen dünya çapındaki sektörel bazda gaz emisyon oranlarına baktığımızda, ulaşımın %15,9 gibi önemli bir paya sahip olduğunu görmekteyiz. Fosil yakıtların rezervlerinin giderek tükenmesi ve çevre kirliliğinin artması ile ülkemizde ve dünyada elektrikli araçlara yönelik araştırma ve geliştirme çalışmaları aratarak devam etmektedir.



Şekil 1. 2016 yılına ait dünya genelindeki sektörel bazlı sera gazı emisyon oranları (Friedrich and Ge 2020)

Elektrikli araçlar, Şekil 2’de genel yapıları gösterildiği gibi tam elektrikli araçlar (EV), hibrit elektrikli araçlar (HEV) ve fişli hibrit elektrikli araçlar (PHEV) olmak üzere üç sınıfta incelenmektedir (Gandoman *et al.* 2021). Tam elektrikli araçlar fosil yakıtlı motor içermezler ve tüm enerjilerini içerisinde bulundurdıkları şarj edilebilir batarya paketinden almaktadırlar. Dolayısıyla sıfır emisyonu sahiptirler ve geleneksel içten yanmalı motorlu araçlar gibi çevreye zararlı atıkları yoktur. Hibrit elektrikli araçlar hem fosil yakıtlı motoru hem de elektrik motorunu bünyelerinde barındırmaktadırlar. İçerdikleri batarya paketi, içten yanmalı motora yardımcı konumundadır ve rejeneratif frenleme yoluyla şarj olurlar. Geleneksel bir içten

yanmalı motorlu taşıtta, bu frenleme enerjisi normalde fren balatalarında ve rotorlarda ısı olarak kaybolur. Fişli hibrit elektrikli araçlar ise diğer hibrit araçlar gibi hem fosil yakıtlı motora hem de elektrik motoruna sahiptirler. Fakat normal hibrit araçlardaki gibi rejeneratif frenleme ile şarj olmanın yanında, bu araçlar harici bir güç kaynağından da şarj olmaktadır. Bununla birlikte içerdeki batarya paketleri, normal hibrit araçlara göre daha büyük kapasitelidir.

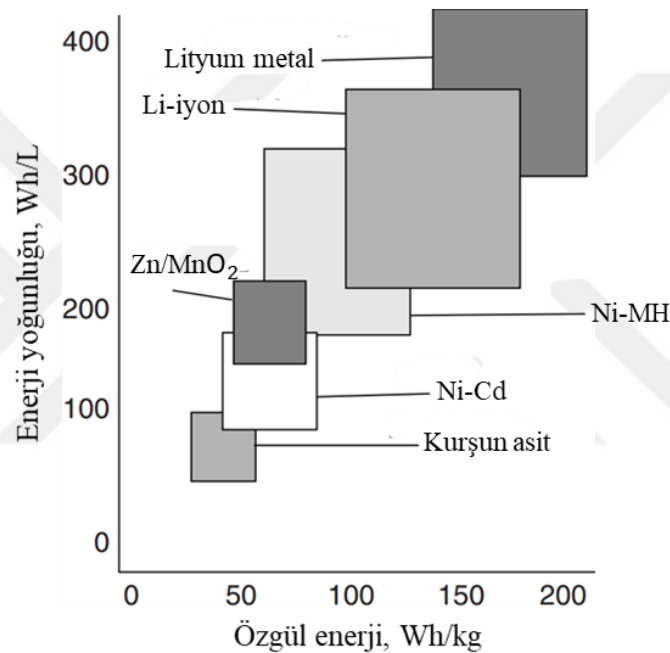


Şekil 2. Elektrikli araçların yapısı

Bataryalardaki son yıllarda olan gelişmelerle, EV ve HEV teknolojileri önemli ölçüde geliştirilmiş ve geleneksel araçlarla rekabet edebilir duruma gelmiştir (Dincer *et al.* 2017). Günümüzde, şarj edilebilir Lityum-iyon (Li-iyon) bataryalar; kurşun-asit, nikel-kadmiyum (Ni-Cd), nikel-metal hidrit (Ni-MH) gibi diğer şarj edilebilir bataryalara göre yüksek enerji yoğunluğuna, yüksek özgül güce, düşük ağırlığa, düşük kendi kendine deşarj oranlarına, yüksek geri dönüştürülebilirliğe ve daha uzun çevrim ömrüne sahip olmaları nedeniyle EV'ler için en uygun enerji depolama cihazı olarak kabul edilmektedirler (Kim *et al.* 2019).

Bataryalar kapalı bir sistemde kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren cihazlar olarak bilinmektedir. Elektrokimyasal dönüşüm iki elektrotta, yani katot ve anotta gerçekleşir. Bataryanın gücü, elektrotların yüzey alanı ve metalik içeriği ile doğru orantılı iken, bataryanın enerji içeriği daha çok aktif malzemenin kütlesine ve hacmine bağlıdır. Bununla birlikte bu parametrelerin artışı, batarya ağırlığı, hacmi ve maliyetini de artırmaktadır. Dolayısıyla bu parametrelerin uygun bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bilinen bazı şarj edilebilir bataryaların enerji kapasiteleri Şekil 3'te verilmiştir. Günümüzde de hala kullanılmakta olan kurşun asit bataryalar, ilk şarj edilebilir batarya olarak 1859 yılında piyasaya sürülmüştür. 1899 yılında Waldmar Jungner tarafından keşfedilen nikel-kadmiyum (Ni-Cd) batarya ise dayanıklılığı ve yüksek akım yüküne sahip olmasıyla ön plana çıkmıştır. Maliyet, güvenlik ve

enerji yoğunluğu konularında gelişmeler gösteren çinko mangan dioksit (Zn/MnO_2) bataryalar, mangan çözünmesi ile kapasite düşümü gibi bazı sorunlar yaşamaktadır. Nikel-metal hidrit (Ni-MH) bataryalar, 1991'deki başlangıcından bu yana, birçok yapılan iyileştirmelerle birlikte üretimi sürmektedir. Enerji, güç, çevrim ömrü ve çalışma sıcaklıkları gibi temel performans hedeflerinde başarılı olan bu bataryalar, sundukları nispeten düşük performans ve yüksek üretim maliyetleri sebebiyle Li-iyon bataryaların gerisinde kalmışlardır. Li-iyon bataryalar ise sundukları yüksek enerji ve güç yoğunluğu, hafiflik, düşük kendi keline deşarj oranı, yüksek çevrim ömrü gibi avantajları ile özellikle EV ve HEV'lerde tercih edilmektedirler (Väyrynen and Salminen 2012). Li-metal bataryalar henüz güvenlik zafiyetleri sebebiyle ticarileşmemiş ve gelecek nesil batarya olarak nitelendirilmektedirler.

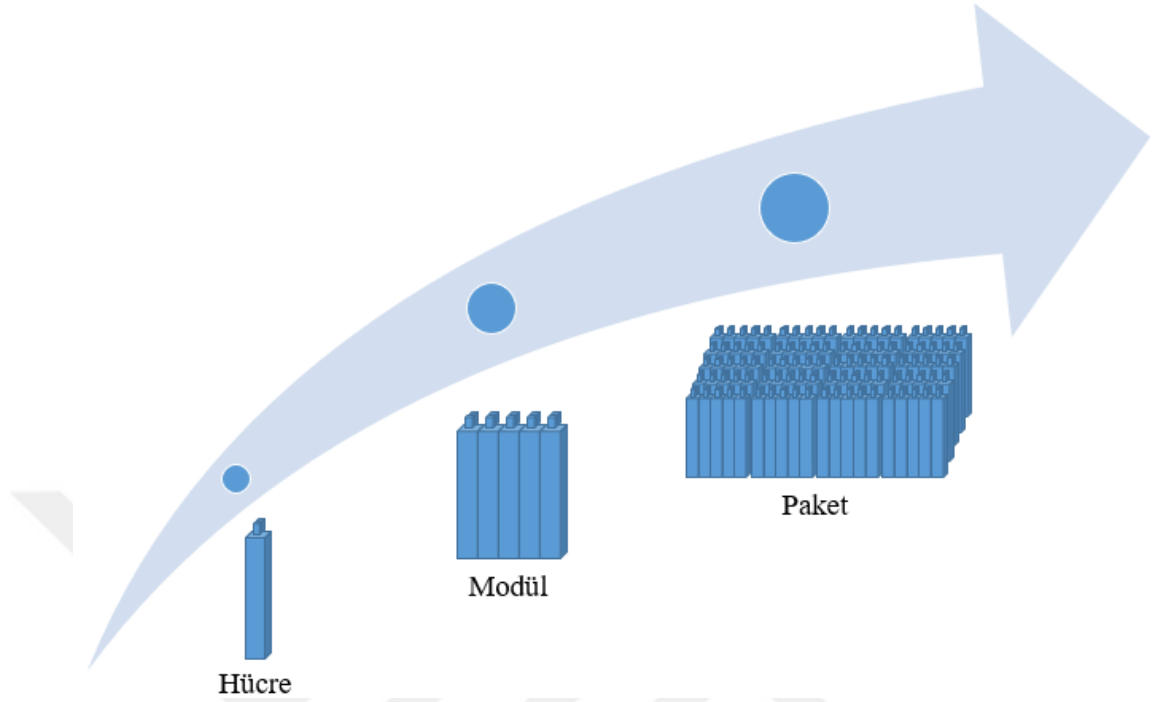


Şekil 3. Şarj edilebilir batarya tiplerinin enerji kapasiteleri (Linden and Reddy 2002)

Sıcaklığın, Li-iyon bataryaların güvenliğine, çevrim ömrüne ve performansına çok önemli etkileri vardır. Batarya yüksek sıcaklıklara ulaştıkça bileşenlerini oluşturan malzemelerinde bozulmalar meydana gelmekte ve patlamalara sebep olmaktadır (Lu *et al.* 2013). Ayrıca batarya sıcaklığı 50 °C üzerine çıktığında bileşenlerinde korozyon meydana gelmekte ve batarya ömrü azalmaktadır (Zhang *et al.* 2015). Li-iyon bataryalardan maksimum performansı ve çevrim ömrünü elde etmek için işletme sıcaklığı 20 °C ile 40 °C aralığında tutulması gerekmektedir (Rao and Wang 2011).

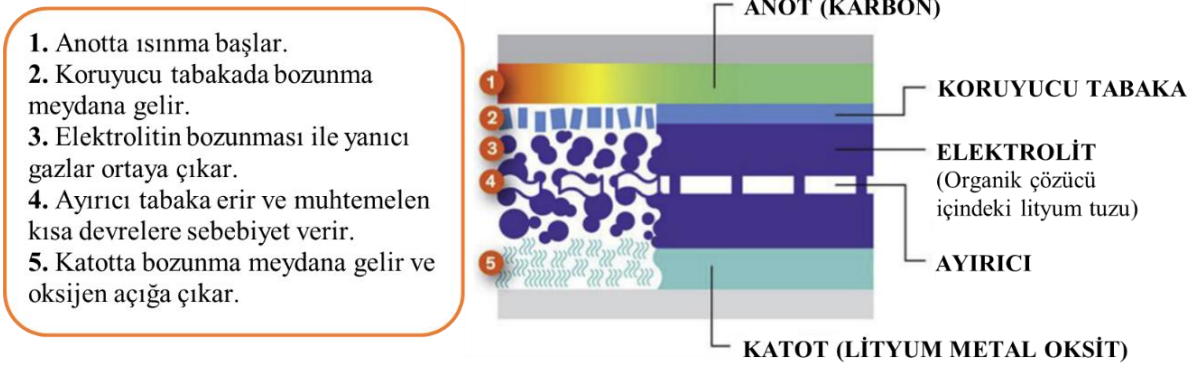
Otomobillerde kullanılan bataryalar farklı bağlantı konfigürasyonu oluşturmak için Şekil 4'te gösterildiği gibi genellikle hücre, modül ve paket olmak üzere üç sınıfta değerlendirilir (Wu *et al.* 2019). Batarya paketinde, modüller arası veya hücreler arası oluşan sıcaklık farkları voltaj dengesizliklerine yol açmakta ve bu da güvenlik problemlerini ortaya

çıkarmaktadır. Batarya performansı ve güvenliği açısından modüller arası ve hücreler arası sıcaklık farkı 5 °C'nin altında olması gerekmektedir (Wang *et al.* 2016).



Şekil 4. Batarya hücresi, modülü ve paketinin bileşen yapısı

Yüksek sıcaklıkların batarya üzerindeki etkilerine bakıldığında, 85 °C civarında anot üzerinde elektro-kimyasal bozunma başlamaktadır ve bu olay sıcaklığa bağlı hücre erimesinin ilk aşamasıdır (Yang *et al.* 2006). Bataryadan yeterli ısı atılması gerçekleştirilemediği takdirde, gelişen kimyasal reaksiyonların kendi kendini tamamladığı bir noktaya ulaşılır. Bundan sonra batarya hücresi, 0,2 °C/dk değerinden daha yüksek bir hızda kendi kendine ısınmaya başlar ve bu durum ısıl sürüklenme olarak adlandırılır (Al Hallaj *et al.* 1999). Hücre erimesinin ikinci aşaması ise batarya sıcaklığı 140 °C'yi geçtiğinde gerçekleşir. Bu durumda katotta ekzotermik reaksiyonlar başlar ve hızla oksijen salınımı meydana gelir. Bu durumda bataryanın kendi kendine sıcaklık artış oranı yaklaşık 5 °C/dk değerine ulaşmıştır. Üçüncü aşamada ise, batarya sıcaklığı 180 °C'yi aşmıştır ve elektrolit oksidasyonu başlamıştır. Bu aşamada bataryanın kendi kendine sıcaklık artış oranı 11 °C/dk olsa da, bu değer 100 °C/dk'ya kadar artabilmektedir (Lisbona and Snee 2011). Bu süreç Şekil 5'te özetlenmiştir.



Şekil 5. Li-iyon batarya hücresindeki ısıl sürüklenme aşamaları (Arora 2018)

Isıl sürüklenme, batarya ile ilgili en önemli güvenlik sorunlarından biridir. Isıl sürüklenmeyi tetikleyen en önemli sebep, batarya içerisindeki ekzotermik reaksiyonların kontrolden çıkmasıdır. Bu durumun sonucunda batarya sıcaklığı ani ve sürekli olarak yükseleceğinden, zamanla yeterli ısı transferi sağlanamayacaktır. Genellikle batarya sıcaklığı 80 °C'yi aştıktan sonra ısıl sürüklenme meydana gelmektedir (Wang *et al.* 2012). Bunun sonucunda ise bataryada patlama ve yangın meydana gelmekte, duman ve zararlı gazlar açığa çıkmaktadır (Lisbona and Snee 2011). Isıl sürüklenme nedeni ile yangın kazası geçiren örnek bir araç Şekil 6'da gösterilmiştir. Düşük sıcaklık ise bataryanın deşarj kapasitesini düşürmekte ve lityum tortulanması denilen olay meydana gelmektedir. Bu da batarya ömrünü ciddi anlamda azaltmakta ve güvenlik problemlerini beraberinde getirmektedir (von Lüdgers *et al.* 2017). Günümüzde elektrikli araçların sayısının giderek artması ile batarya yangınlarını netice veren kazaların sayısı da artmaktadır. Son yıllarda yaşanan, Li-iyon bataryalar ile ilgili bazı yangın kazaları Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 6. Isıl sürüklenme ile bataryası alev alan bir elektrikli araç (Wu *et al.* 2019)

Tablo 1. Son yıllarda yaşanan li-iyon bataryalar ile ilgili yangın kazaları (Meng *et al.* 2020)

Sayı	Tarih	Yer	Olay	Muhtemel neden
1	2019.06	Dali, Çin	Fabrika yangını	Aşırı şarj
2	2018.03	San Francisco, US	Tesla Model X araba yangını	Çarpışma
3	2018.02	Guangzhou, Çin	CZ3539 Çin güney uçuşu yangını	Kendiliğinden yanma
4	2017.09	Jinhua, Çin	Elektrikli otobüs yangını	Kendiliğinden yanma
5	2016.08	Nanjing, Çin	LG batarya fabrikası yangını	Üretim sırasında alev alma

Batarya paketinin güvenliği ve performanslı çalışması için etkili bir Batarya Termal Yönetim Sistemi (BTYS) kullanılması gerekmektedir. Elektrikli araçlarda kullanılan batarya paketlerinin optimum çalışma sıcaklığı aralığında tutulabilmesi ve batarya hücreleri arasında homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilebilmesi için kullanılan BTYS, kritik bir öneme sahiptir. BTYS, soğutucu tipine göre hava soğutma, sıvı soğutma, faz değiştiren maddeler (FDM) ile soğutma ve ısı borusu ile soğutma olarak dört gruba ayrılabilir. Hava soğutma sistemlerinin basit yapıda olması, hafifliği ve düşük kurulum maliyetli olması gibi avantajları vardır. Havanın düşük termal iletkenliği ve düşük özgül ısı kapasitesi nedeniyle soğutma kapasitesi sınırlıdır. Genellikle düşük kapasiteli batarya paketleri içeren hibrit elektrikli araçlarda tercih edilmekte olan bir yöntemdir. Bununla birlikte hava soğutma yönteminin, batarya paketinin maksimum sıcaklığını azaltma ve sıcaklık homojenliğini koruma kabiliyeti düşüktür (Deng *et al.* 2018). FDM, gizli ısıları sebebiyle batarya tarafından üretilen ısıyı faz değişimi sırasında absorbe ederek soğutma sağlarlar. FDM ile soğutma sisteminin basit bir yapıya sahip olması ve sıcaklık homojenliği sağlaması gibi avantajlarının yanı sıra düşük iletkenlik katsayıları nedeniyle yeterli soğutma performansı gösterememektedirler (Hussain *et al.* 2016). Elektronik cihazların soğutulmasında sıklıkla kullanılan ısı boruları ise esnek ve az yer kaplayan geometrik yapıları ve hafiflikleri nedeniyle BTYS için kullanılabilen verimli ısı değiştiricileridirler (Putra *et al.* 2016). Fakat ısı borularının BTYS için kullanımı hala ilk geliştirme aşamasında olup yeterli soğutma kapasitesine sahip olmadıklarından, diğer soğutma sistemleri ile birlikte kullanılmaktadırlar (Wu *et al.* 2017). Sıvı soğutma ise, sıvıların yüksek özgül ısıları ve yüksek ısı iletim katsayıları nedeniyle diğer soğutma sistemlerine göre daha verimli bir yöntemdir. Bunun yanı sıra, sıvı soğutma sistemi daha az hacim kaplayan ve daha dar bir alana yerleştirilebilen kompakt bir yapıya sahiptir (Liu *et al.* 2017).

Bu çalışmada, EV ve HEV’lerde kullanılan bir torba tip Li-iyon bataryanın, doğal taşınım şartlarında hava ile soğutulması ve soğutucu plakalar kullanarak sıvı ile soğutulması deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. 20 Ah kapasiteye sahip bu bataryanın farklı deşarj hızlarında ve doğal taşınım şartlarındaki deşarjı sırasında batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımları termal görüntüleme tekniği ile ölçülmüş ve görüntülenmiştir. Bataryanın 23 °C sıcaklığındaki ortam havasında deşarjı süresince, belirli aralıklarla termal görüntüleri kaydedilerek belirli deşarj oranlarında batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımları tespit edilmiştir. Batarya yüzeyindeki sıcaklık farklılıklarının batarya ömrü ve performansı açısından olumsuz etkileri göz önünde bulundurularak hangi zaman aralıklarında hangi bölgelerde daha fazla ısınma olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte hangi deşarj hızlarında bataryanın, havanın doğal taşınımı ile soğutulmasının yetersiz kaldığı ve farklı soğutma tekniklerine ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir. Tez çalışmasının bu bölümü, tasarlanacak soğutma sistemleri için bir ön çalışma niteliği taşımaktadır. Ayrıca bataryanın hava ile soğutulmasının sayısal modeli oluşturularak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri yapılmış ve deneysel verilerle doğrulanmıştır. 20 Ah kapasitedeki Li-iyon bataryanın doğal taşınım şartlarında ve farklı hızlarda deşarjına bağlı olarak, batarya yüzeyinden transfer edilen ısı yükleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu veriler kullanılarak transfer edilen ısı yükü, deşarj oranı ve bataryadan çekilen akıma bağlı korelasyon denklemi türetilmiştir. Bataryanın sıvı ile soğutulması ise iki farklı soğutucu plakanın soğutma performansları kıyaslanarak yapılmıştır. Bu plakalardan birisi konvansiyonel tasarıma sahip serpantinli soğutucu plaka (SSP), diğeri ise yeni bir tasarıma sahip olan mini kanallı soğutucu plakadır (MKSP). İlk defa tasarlanan bu kanal yapısı ile konvansiyonel yöntemle göre maksimum batarya sıcaklığı, maksimum batarya sıcaklık farkı ve basınç düşümlerinde iyileştirmelerin elde edilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca soğutucu plakalar ile yapılan soğutmanın HAD analizleri de gerçekleştirilerek deneysel verilerle doğrulanmıştır. Sıvı soğutma için yapılan sayısal analiz ile batarya yüzeyindeki ve soğutucu plakalardaki sıcaklık dağılımları da incelenmiştir. Bunlara ek olarak yeni tasarlanan ve üretimi yapılan mini kanallı soğutucu plakanın kanal ölçülerine tanımlanan değişkenlerin optimizasyonu yapılarak, maksimum batarya sıcaklığı, maksimum batarya sıcaklık farkı ve basınç kaybı parametrelerinin en aza indirgenmesi sağlanmıştır.

KURAMSAL TEMELLER

Batarya ile İlgili Önemli Kavramlar

Bataryaların çalışma koşullarının karakterize edilmesi amacıyla kullanılan ve sıklıkla karşılaştığımız terimler bulunmaktadır. Şarj edilebilir bataryaları içeren sistemler incelenirken bu terminolojinin bilinmesi ve doğru kullanılması önemlidir. İlgili terminolojideki yaygın olarak kullanılan kavramlar aşağıda açıklanmıştır.

Elektrot

Elektrot, bir devrenin metalik olmayan bir parçasıyla temas kurmak için kullanılan elektrik iletkenidir. Elektrotlar, bir elektrokimyasal hücre içindeki temel unsurlardır. Her hücrede biri pozitif ve diğeri negatif olmak üzere iki adet elektrot vardır. Hücre voltajı, pozitif ve negatif elektrot arasındaki voltaj farkıyla belirlenir.

Anot ve katot

Anot, oksidasyon reaksiyonunun meydana geldiği elektrottur. Bu durum, anot elektrotunun bir elektron tedarikçisi olduğu anlamına gelir. Bununla birlikte, elektron akışı, şarj ve deşarj aktiviteleri arasında tersine döner. Sonuç olarak, pozitif elektrot şarj sırasında anot iken negatif elektrot, deşarj sırasında anottur. Oluşabilecek bu karışıklığı önlemek için, anot tanımlaması normalde deşarj döngüsü sırasındaki aktivitesi için yapılır. Dolayısıyla, anot terimi, bir bataryadaki negatif elektrot için kullanılmaktadır.

Katot ise indirgeme reaksiyonunun meydana geldiği elektrottur. Buna göre, bataryanın negatif elektrotu, şarj sırasında katot iken pozitif elektrot deşarj sırasında katottur. Aynı şekilde karışıklığı önlemek adına katot tanımlaması deşarj döngüsü için yapılır. Sonuç olarak, katot terimi bataryanın pozitif elektrotu için kullanılmaktadır.

Elektrolit

Bir batarya içerisindeki elektrolitin tanımı, pozitif ve negatif elektrotlar arasında iyonların iletimini sağlayan ortam olmasıdır. Elektrolit, iyonların şarj halinde ve deşarj sırasında, ters yönde katottan anoda hareketini teşvik ederek bataryayı iletken hale getirmek için katalizör görevi görür. İyonlar, elektron kaybetmiş veya kazanmış elektrik yüklü atomlardır. Bir bataryanın elektroliti, sıvı, jel ve kuru formatlarda çözünür tuzlar, asitler veya diğere bazlardan oluşmaktadır.

Ayırıcı

Ayırıcı, anot ve katot arasında oluşabilecek kısa devreyi engellemek amacıyla kullanılan membran bir yapıdır. Hücrelerin daha kompakt hale getirilmesiyle, anot ve katot arasındaki boşluk çok daha küçük hale gelir. Sonuç olarak, iki elektrot birbirine kısa devre yapmasıyla muhtemel patlayıcı bir reaksiyona neden olabilir. Anot ve katot arasına yerleştirilen ayırıcı, elektriksel olarak iletken olmayan bir malzeme olmakla birlikte iyon geçirgenliğine sahiptir.

Kapasite ve C-hızı

Batarya kapasitesi, amper-saat (Ah) cinsinden spesifik enerjiyi temsil eder. Ah, bir bataryanın bir saat süresince verebileceği deşarj akımıdır.

Bataryalar çok farklı kapasitelerde olabildiğinden, şarj veya deşarj akımının kapasiteye olan oranının tanımlanmasına ihtiyaç duyulmuştur. C-hızı terimi, bataryanın tüm enerjisini (veya gücünü) şarj/deşarj edebileceği hızı ifade eder. Aynı zamanda C-hızı bir saatlik şarj/deşarj ile ilişkili olarak açıklanır. Bu nedenle 1C hızı ile şarj veya deşarj, bir saat içinde tamamen boşaltıldığı veya şarj edildiği hıza eşittir. Örneğin 20 Ah kapasiteye sahip bir bataryanın teorik olarak, bir saat süresince 20 A akım verebileceği bilinmektedir. Bu bataryanın 1C ile deşarjı bir saat süresince 20 A akım çekilerek deşarjı anlamına gelirken, 2C ile deşarjı ise yarım saat boyunca 40 A akım ile boşaltılması anlamına gelmektedir.

Çevrim ömrü

Şarj edilebilir bir bataryanın kapasitesi ömrü boyunca değişmektedir. Bataryanın kapasitesi önemli ölçüde azalana kadar devam edebileceği şarj/deşarj döngü sayısı, çevrim ömrü olarak adlandırılmaktadır. Bir batarya, nominal kapasitesinin %80'inin altına düştüğü durumda ömrünü sonlandırdığı kabul edilir. Örneğin NiMH bataryalar tipik olarak 500 çevrim, NiCd bataryalar ise 1.000 çevrimden fazla ömre sahip olabilirler. Lityum iyon bataryalar yaklaşık 300 çevrim ömrüne sahip iken bu konuda geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

Bir bataryanın çevrim ömrü, çevrim derinliğinden (derin veya sığ), yeniden şarj etme yönteminden ve ortam koşullarından (büyük ölçüde sıcaklık) etkilenir. Uygun olmayan şarj döngüsü kesintisi, bataryanın ömrünü büyük ölçüde azaltabilir. Bununla birlikte kapasite azalmasına, aktif elektrot materyalinin kaybı (depolama ortamı kaybı) da neden olmaktadır. Örneğin, katot materyali yüksek potansiyellerde kararsız hale gelirse, artık Lityum depolayamaz. Grafit günümüzde en yaygın kullanılan aktif anot malzemesidir. Aktif Lityum, tersinmez kaplama veya grafit yüzeyinde katı bir elektrolit ara yüzü (SEI) oluşumu nedeniyle kaybolabilir. Kaplama, optimize edilmiş bir şarj işlemi uygulanarak azaltılabilirken, grafit

parçacık yüzeyinde SEI oluşumu ise kaçınılmazdır. Ayrıca Lityum iyon bataryalar için sıvı elektrolitler, Lityuma karşı 1,5 V potansiyelin altında stabil değildir. Bu bozunma reaksiyonlarında lityum tüketilir ve bu tüketim ise zamanla kalıcı kapasite kayıplarına, dolayısıyla çevrim ömrünün tüketilmesine yol açmaktadır (Gantenbein *et al.* 2019).

Özgül enerji ve özgül güç

Özgül enerji, bataryanın birim kütlesi başına düşen nominal enerji kapasitesini (Wh/kg) temsil etmektedir. Özgül güç ise, birim kütle başına maksimum kullanılabilir güç (W/kg) olarak bilinir. Belirli bir performans hedefine ulaşmak için gereken batarya ağırlığını belirler. Özgül enerji ve özgül güç, batarya kimyası ve paketleme işleminin bir özelliğidir.

Nominal voltaj, açık devre voltajı, kapalı devre voltajı ve kesme voltajı

Nominal voltaj, bataryanın bildirilen veya referans olarak alınan karakteristik çalışma voltajı olarak tanımlanmaktadır. Açık Devre Voltajı (OCV), bataryanın açık bir devre üzerinde bulunduğu ve üzerinden akım geçmediği durumdaki gerilim değeridir. Kapalı Devre Voltajı (CCV) ise bataryanın kapalı bir devre üzerinde bulunup üzerinden akım geçtiği durumdaki gerilim değeridir.

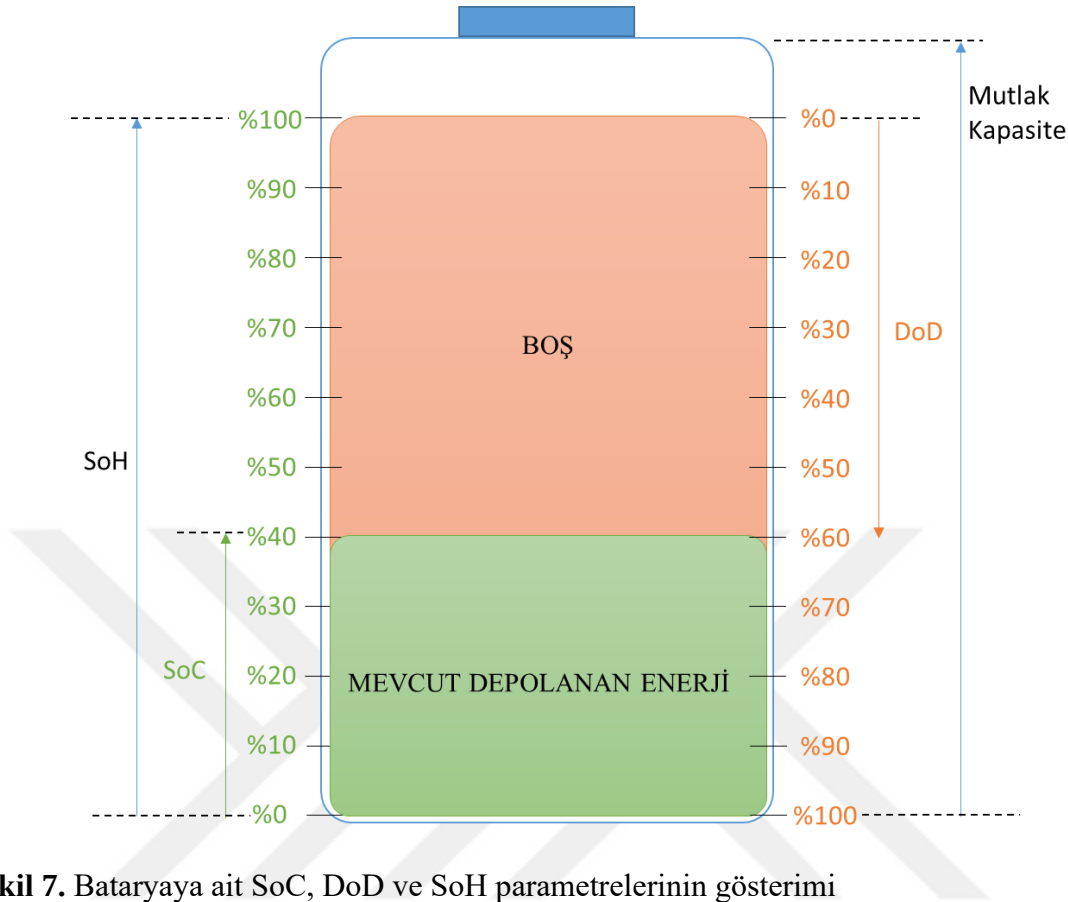
Batarya, deşarjı sırasında belirli bir voltaj eğrisini takip eder ve deşarj süresince genelde gerilimi düşer. Kesme voltajı, bu deşarj işleminin bir batarya yönetim sistemi tarafından sonlandırıldığı gerilim değeridir. Bu nokta aynı zamanda deşarj sonu voltajı olarak da adlandırılmaktadır. Kesme voltajındaki bir batarya, boş olarak kabul edilir.

Doluluk oranı (SoC), deşarj oranı (DoD) ve sağlık durumu (SoH)

SoC, mevcut durumdaki batarya kapasitesinin maksimum kapasiteye oranı olarak ifade edilmektedir. Tamamen şarj edilmiş bir bataryanın SoC'si 100% iken, tamamen boşalmış bir bataryanın SoC'si %0'dır. Kullanım ömrü başlangıcındaki nominal kapasite genellikle referans değer olarak kullanılır. SoC, elektrikli aracı doğru şekilde kontrol etmek ve çalışma koşullarındaki değişiklikler nedeniyle güç tepkilerini güvence altına almak için anahtar bir parametredir. DoD ise maksimum batarya kapasitesine oranla deşarj edilen yüzdelik kısmı ifade etmektedir. SoC ve DoD birbirini %100'e tamamlayan ifadelerdir.

SoH genelde, batarya başlangıç kapasitesine göre kalan batarya kapasitesinin bir ölçüsü olarak tanımlanır. SoH, batarya kullanılır kullanılmaz düşmeye başlar ve batarya ömrünü tamamlayana kadar azalır. SoH fiziksel bir büyüklük olmayıp şarj/deşarj döngülerinin sayısı, kapasite-güç azalması ve iç direnç gibi parametrelere bağlıdır. Bir bataryanın yaşlanma süreci karmaşık olup birçok mekanizma ile bağlantılıdır.

Bir bataryaya ait SoC, DoD ve SoH parametrelerinin şematik olarak gösterimi Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Bataryaya ait SoC, DoD ve SoH parametrelerinin gösterimi

Batarya Yönetim Sistemi (BYS)

BYS, EV'lerde ve PHEV'lerde elektrik enerjisinin depolanması, sisteminin doğru ve güvenli çalışması için hayati önem taşıyan, birçok işlevi kontrol eden gerçek zamanlı sistemlerdir. Ayrıca BYS, elektrikli araçlardaki batarya paketinin kritik bileşenlerinden birisidir. BYS, şarj ve deşarj kontrolünde, tüm bataryaların dengelenmesinde, hücrelerdeki ve batarya paketindeki sıcaklık kontrolünde, arıza teşhisinde, voltaj izlemede ve sistemin güvenilirliğini artırmada önemli bir rol oynar. BYS'nin sahip olduğu işlevler; veri toplama, veri işleme ve depolama, elektriksel yönetim, termal yönetim, güvenlik yönetimi ve haberleşme olmak üzere altı başlık altında incelenebilir (Hauser and Kuhn 2015).

Veri toplama

BYS tarafından yapılan veri işleme ve yönetiminin temelinde, batarya ve haricindeki ilgili parametrelerin yüksek doğrulukla ölçülmesi vardır. Bir EV için tipik doğruluk değerleri; 450 A akım değerine kadar %0,5-%1, hücre voltajı için 1-2 mV, 600 V değerine kadar olan paket voltajı için ise %0,1 olarak kabul edilmektedir (Brandl *et al.* 2012). Hücre ve paketteki akım ve voltaj değerlerinin ölçümünün yanı sıra, batarya paketi içerisinde birden çok noktadan

sıcaklık ve nem ölçümü ile birlikte diğer uygulama parametrelerinin (hız, güç, çevresel koşullar, konum bilgisi vb.) analog veya dijital girdi ve çıktıların elde edilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte güç elektroniği bileşenleri gibi yüksek parazit oluşturan cihazlar BMS yakınlarında konumlandığı için, ölçüm devrelerinin elektromanyetik girişime karşı korunaklı olması gerekmektedir.

Veri işleme ve depolama

BYS, mevcut batarya durumunu (SoC ve SoH) belirleyip çeşitli algoritmalar kullanarak batarya yönetimini gerçekleştirir. Ayrıca mevcut batarya durumunun değerlendirilmesinin yanı sıra, BYS geçmiş dönemdeki sürüş karakteristiğini de kaydederek ilerideki güç yönetimini, kalan enerjiyi ve menzili hesaplar. Depolanan geçmiş kullanım verilerine göre (SoH ve SoC geçmiş, çevrim sayısı, sıcaklık profilleri vb.) batarya bakım faaliyetlerinin planlanması ve ömür hesaplamaları yapılabilmektedir.

Elektriksel yönetim

Elektrik yönetimi, batarya ömrünü uzatmak ve verimliliği artırmak için deşarj akımını sınırlandırarak, hesaplanan batarya durumlarına (SoC, SoH) ve giriş parametrelerine göre şarj akımını ve voltajını kontrol ederek şarj/deşarj süreçlerini kontrol eder. Bununla birlikte, çok hücreli bir sistemdeki bireysel hücreler arasındaki kaçınılmaz yük dengesizlikleri, elektrik yönetimi tarafından eşitlenmektedir.

Termal yönetim

Yüksek güce sahip batarya paketlerinde oluşan aşırı ısınmaların önüne geçmek, hücreler arası sıcaklık dengesini korumak ve ısı kaçakları önlemek amacıyla batarya paketlerinde soğutma sistemleri kullanılmaktadır. Ayrıca düşük sıcaklıktaki çevresel koşullara bağlı olarak batarya paketinin ısıtılması da gerekebilmektedir. Bu durum, batarya paketinin termal yönetimini gerekli kılar. Batarya paketinin termal yönetiminde farklı yöntemler uygulanmakta olup bu yöntemler, Batarya Termal Yönetim Sistemleri (BTYS) başlığı altında detaylı olarak ele alınmıştır.

Güvenlik yönetimi

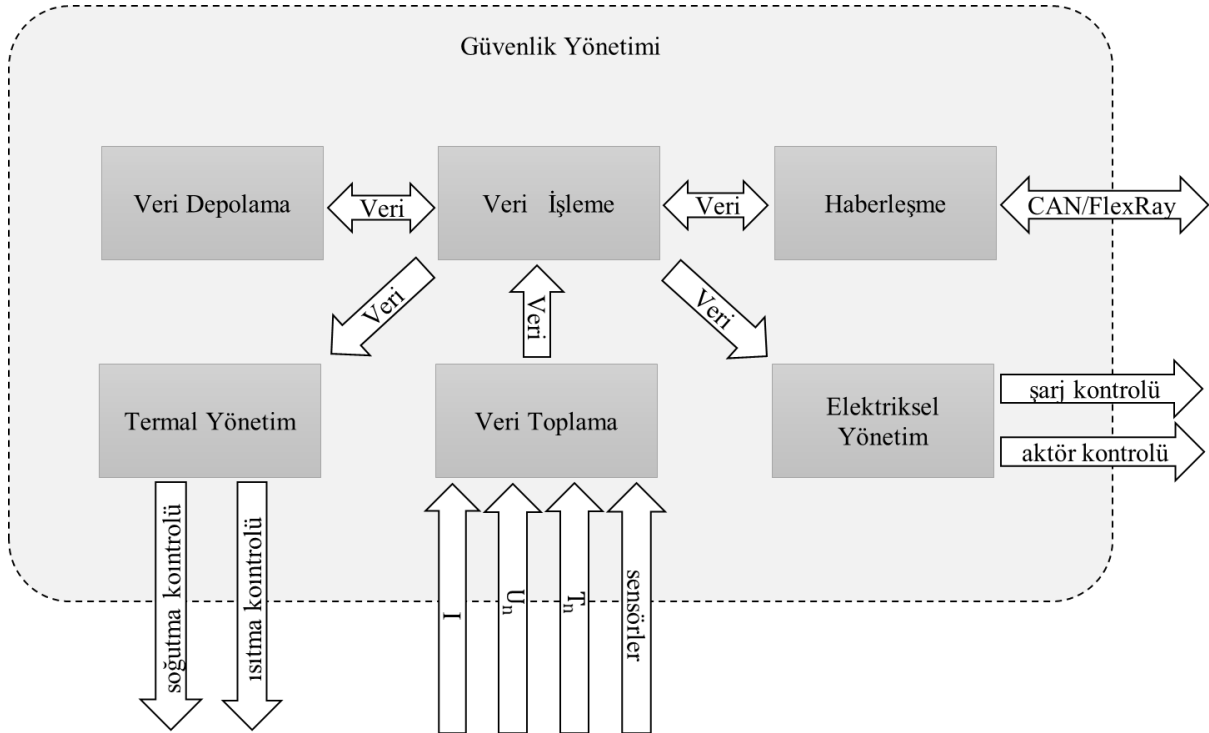
Daha önce belirtildiği gibi, bataryalar aşırı ve düşük gerilimlere, belirtilen çalışma aralığının dışındaki aşırı akımlara ve sıcaklıklara karşı çok hassastır. Güvenlik yönetiminin ana görevi ise bu değişkenlerin denetimi ve bataryaların bu koşullara karşı korunmasıdır. Ayrıca güvenlik yönetimi batarya paketindeki güvenlik cihazlarından gelen sinyallerin

değerlendirilmesini ve kontrolünü yapar. Örneğin, batarya paketi terminal bağlantı kesme röleleri, yalıtım izleme cihazı ve yangın söndürme cihazları (varsa), güvenlik ekipmanları olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte aracın çarpışma vb. kaza durumlarında güvenlik yönetimi, batarya paketinin acil olarak kapatılması işlemini başlatır.

Haberleşme

BYS'nin bir diğer önemli görevi ise, aracın veya uygulamanın diğer gömülü kontrol sistemleri ile araç dışı ve araç içi iletişimidir. Aktarılan bilgiler batarya durum bilgilerini (SoC, SoH) veya tahminleri içerebilirken, araç BMS'ye ek parametreler sağlayabilir (çevre koşulları, güç gereksinimleri, konum verileri). Batarya sisteminde bulunan yüksek voltajlı hatlar ile kullanıcının ve sistemin güvenliğini sağlamak için araç tarafından kullanılan genellikle düşük voltajlı iletişim kanallarının birbirinden izole edilmesi önem arz etmektedir. Ayrıca batarya paketinin bakımına izin vermek için yerleşik teşhis olanakları BYS tarafından sağlanmalıdır. Uygulamaya bağlı olarak, veri alışverişi için farklı sistemler kullanılır. Örneğin, sistemler arası iletişim için kontrolör alan ağı (CAN)/FlexRay, sensörler/aktörlerle iletişim için analog/dijital I/O veya darbe genişlik modülasyon sinyalleri kullanılmaktadır (Hauser and Kuhn 2015).

BYS'nin fonksiyonel birimlerini içeren şematik gösterim Şekil 8'de verilmiştir. Veri toplama birimine giren I verisi batarya paketinden gelen akımı, U_n n adet hücrenin voltaj değeri, T_n n adet hücreden gelen sıcaklık değerini temsil etmektedir.



Şekil 8. BYS şematik gösterimi (Hauser and Kuhn 2015)

Lityum İyon Bataryalar

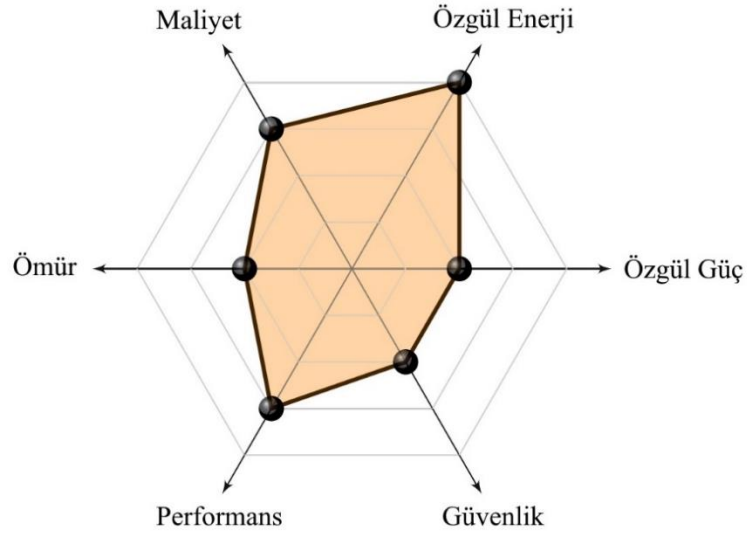
Lityum iyon (Li-iyon) bataryalar, şarj edilebilir bataryalar ailesinin bir üyesidir. Bataryaların uzun tarihi geçmişi içinde Li-iyon bataryalar, ilk olarak 1970 yılında M.S. Whittingham of Exxon adlı bir araştırma ve mühendislik şirketinin önerisi ile ortaya çıkmıştır (Yoshio *et al.* 2009). Günümüzde elektrikli araçlarda güç kaynağı olarak çoğunlukla Li-iyon bataryalar kullanılmaktadır. Li-iyon bataryaları üstün kılan en önemli üç özelliği vardır. Bunlar; lityum elementinin doğada bulunan en hafif metallere birisi olması, düşük redoks potansiyeline sahip olması ve lityum iyonunun düşük iyonik çapa sahip olmasıdır. Bu özellikleri ile yüksek voltaj ve enerji yoğunluğuna sahip olan Li-iyon bataryalar, elektrikli araçlar için güç kaynağı olarak çok iyi bir seçenek olmaktadır (Ellis and Nazar 2012).

Kimyasal yapılarına göre Li- iyon bataryaların sınıflandırılması

Li-iyon bataryalar; pozitif elektrot (katot), negatif elektrot (anot), elektrolit ve ayırıcı malzeme olmak üzere dört ana unsurdan oluşmaktadır (Zhang *et al.* 2012). Pozitif elektrotlar yüksek oranda lityum içeren birçok farklı malzemeden yapılabilmektedir. Anot malzemeleri ise genellikle karbon bazlı olup maliyetleri düşüktür. Bu sebeple batarya üretim maliyetinde en belirleyici etken katot malzemeleri olmaktadır. Elektrolitler, lityum iyonlarının transferine yol oluşturmak için lityum iyon bazlı tuzlardan oluşan malzemelerdir. Ayırıcı plakanın ise temelde iki görevi vardır. Bunlar batarya içerisindeki oluşacak kısa devreyi engellemek ve lityum iyonlarının geçişini sınırlamaktır. Li-iyon bataryalar genellikle katot malzemelerinin kimyasal yapısına göre isimlendirilmektedirler. Araştırmacılar tarafından birçok katot malzemesi geliştirilmiş olsa da bunlardan bazılarına sahip bataryalar ticari boyut kazanmıştır. Bunlar ise; LCO (lityum kobalt oksit- LiCoO_2), LMO (lityum mangan oksit- LiMn_2O_4), NMC (lityum nikel mangan kobalt oksit- LiNiMnCoO_2), LFP (lityum demir fosfat- LiFePO_4), NCA (lityum nikel kobalt alüminyum oksit- LiNiCoAlO_2) ve LTO (lityum titanat- $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) bataryalardır (Ahmadi and Torabi 2019).

LCO bataryalar

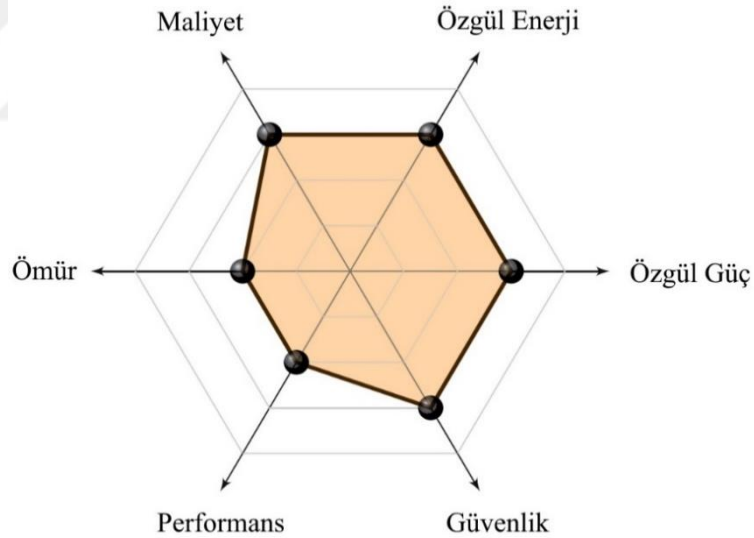
Yüksek özgül enerjiye sahip olmaları nedeniyle genellikle cep telefonu ve diz üstü bilgisayarlarda kullanılırlar. Kobalt yüksek maliyetli bir malzeme olduğundan LCO bataryaların üretim maliyetlerinin de yüksek olmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte, kısa çevrim ömrüne sahip olması ve ısı kararlılığının düşük olması diğer dezavantajları arasındadır. Şekil 9'da LCO bataryaların karakteristik özellikleri verilmiştir.



Şekil 9. LCO bataryanın karakteristik özellik diyagramı (Ahmadi and Torabi 2019)

LMO bataryalar

LMO ilk olarak 1983'te tanıtıldı ve 1996'da Moil Enerji şirketi tarafından ticarileştirildi. LMO bataryalar, LCO bataryalara göre daha düşük iç dirence ve daha yüksek özgül güce sahiptirler. Diğer yandan Şekil 10'da görüldüğü gibi düşük özgül enerjiye ve ömre sahiptirler.

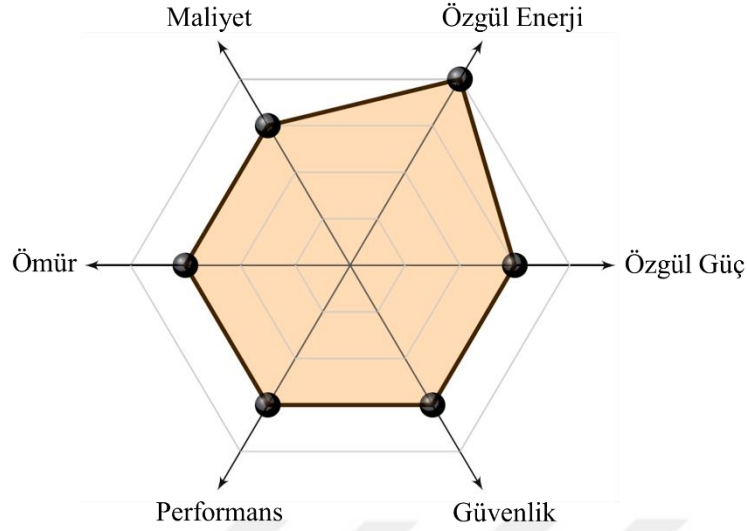


Şekil 10. LMO bataryanın karakteristik özellik diyagramı (Ahmadi and Torabi 2019)

NMC bataryalar

LMO bataryalar gibi yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanılırlar. Katot kombinasyonu genellikle üçte bir nikel, üçte bir manganez ve üçte bir kobalttır. Bu kombinasyon, NMC bataryanın LCO veya LMO' dan daha düşük maliyetli olmasına imkân vererek daha iyi bir pazar sağlar. Nikel nispeten düşük maliyetli olduğu için batarya üreticileri,

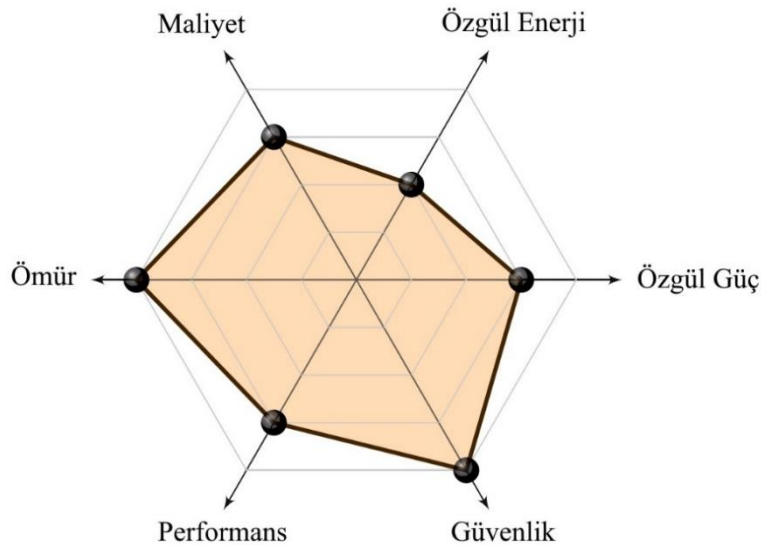
pozitif elektrotlarda kobalt yerine daha fazla nikel kullanma eğilimindedirler. NMC bataryalar Şekil 11’de görüldüğü gibi yüksek özgül enerjiye sahiptirler.



Şekil 11. NMC bataryanın karakteristik özellik diyagramı (Ahmadi and Torabi 2019)

LFP bataryalar

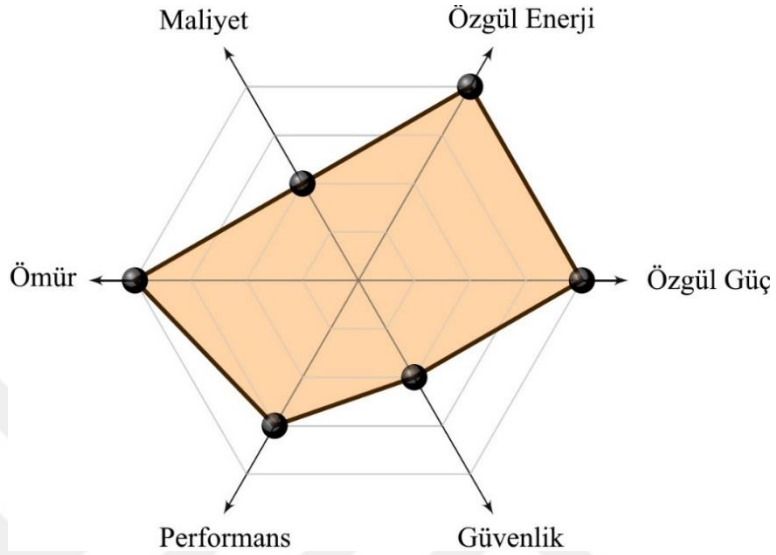
Lityum demir fosfat 1996 yılında Texas Üniversitesi tarafından keşfedildi. Diğer Li-iyon bataryalara göre LFP bataryalar, düşük termal dirence sahiptirler ve daha yüksek güç sağlayabilirler. Fosfatın kobalta göre düşük maliyetli ve daha çevreci olması LFP bataryalar için bir avantaj olmuştur. Şekil 12’den de anlaşılacağı üzere özgül enerjileri düşüktür. 3,2 V nominal voltaja sahiptirler ve diğer bataryalar gibi düşük sıcaklıklarda ömür kaybı yaşarlar. İyi bir güvenlik karakteristiği göstermeleri ve çevrim ömürlerinin nispeten daha uzun olması ile otomotiv ve solar uygulamalarda tercih edilmektedirler.



Şekil 12. LFP bataryanın karakteristik özellik diyagramı (Ahmadi and Torabi 2019)

NCA bataryalar

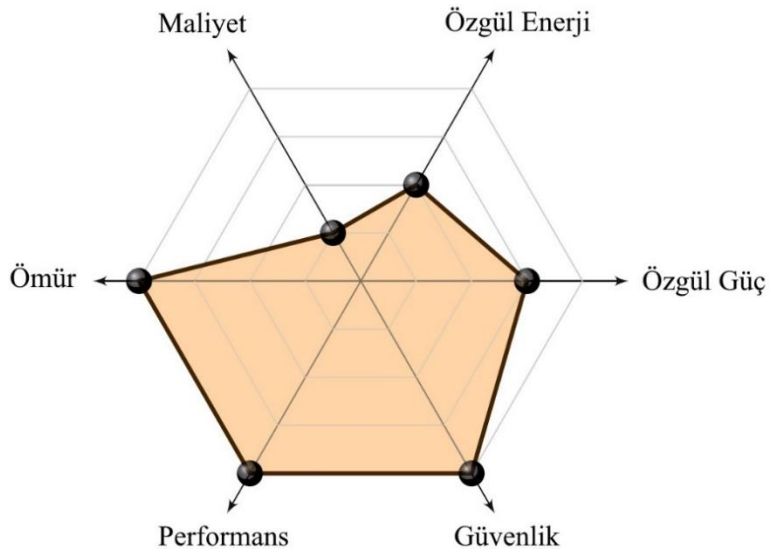
Lityum-nikel-kobalt-alüminyum oksit bataryalar, 1999 yılından beri özel uygulamalar için üretilmektedir. Bu bataryalar; yüksek özgül güce, yüksek özgül enerjiye ve makul ömür seviyesine sahip olmakla birlikte NMC ile birçok benzer davranışa sahiptir. Ancak, maliyet ve güvenlik sorunları vardır. NCA bataryanın belirli özellikleri Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 13. NCA bataryanın karakteristik özellik diyagramı (Ahmadi and Torabi 2019)

LTO bataryalar

Şekil 14'te görüldüğü gibi özgül güç, güvenlik ve çevrim ömrü ile iyi bir performans sergilemekle birlikte üretim maliyetleri diğer bataryalara göre çok daha yüksektir. Bununla birlikte 2,4 V gibi düşük bir nominal voltaja sahiptirler.



Şekil 14. LTO bataryanın karakteristik özellik diyagramı (Ahmadi and Torabi 2019)

Geometrik yapılarına göre Li-iyon bataryaların sınıflandırılması

Li-iyon bataryalar geometrik yapıları itibariyle prizmatik, torba tip ve silindirik olarak sınıflandırılabilirler.

Prizmatik bataryalar

1990'ların başında piyasaya sürülen modern prizmatik hücre, ince boyutlarda batarya kullanılması gereken durumlar için tercih sebebi olmuştur. Bu hücreler ağırlıklı olarak 800 mAh ile 4.000 mAh arasında değişen kapasiteye sahip cep telefonlarında, tabletlerde ve düşük profilli dizüstü bilgisayarlarda bulunur. Evrensel bir formatı yoktur ve her üretici kendi tasarımını yapar. Esnek olmayan alüminyum muhafazalarla paketlenirler (Sundén 2019).

Torba tip bataryalar

Torba tip batarya hücrelerinde elektroda kaynak yapılan ve torbaya yapıştırılan iletken folyo şeritler, pozitif ve negatif terminalleri dışarıya taşır. Bu hücreler, batarya paketleri arasında en yüksek paketleme verimliliğine sahiptir. Torba hücreleri basit, esnek ve hafif batarya tasarımı sunar. Bununla birlikte, yüksek nem ve yüksek sıcaklık ortamlarına maruz kalmak çevrim ömrünü kısaltabilir. Bu hücre türü, daha çok askeri ve otomotiv endüstrilerinde tüketiciler için kullanılmaktadır. Yaygın olarak Li-iyon-polimer kimyası kullanılır. Şarj ve deşarj sırasında, gaz oluşumuna bağlı olarak bu hücrelerde şişme görünebilir. Şişmeyi önlemek için, bazı üreticiler hücrenin dışında bir gaz torbası oluşturmak için alan oluştururlar (Sundén 2019).

Silindirik bataryalar

Silindirik batarya hücreleri kullanılan en yaygın ambalaj tasarımlarından biridir. Silindirik yapı, imalattaki avantajlarının yanı sıra iyi bir mekanik stabilite sağlar. Silindirik hücreler, elektrikli aletlerde, tıbbi aletlerde, dizüstü bilgisayarlarda ve elektrikli bisikletler gibi birçok uygulamada yer alır. 18 mm çapında ve 65 mm uzunluğunda olan 18650 olarak adlandırılan silindirik batarya en çok bilinen ve kullanılan türüdür. Bununla birlikte farklı standart ölçülere sahip silindirik hücrelerde üretilmektedir (Sundén 2019).

Şekil 15'te prizmatik, torba tip ve silindirik yapıdaki bataryaların görünüşleri verilmiştir.



Şekil 15. Geometrik yapılarına göre batarya çeşitleri

Li-iyon Bataryalarda Isı Üretim Modeli

Li-iyon bataryalardaki sıcaklık dağılımı simülasyon modelini oluşturmak için ısı üretiminin matematiksel olarak tanımlanması gerekmektedir. Batarya içindeki ısı üretiminin, yüzeydeki sıcaklık dağılımına etkisi oldukça fazladır. Batarya içindeki ısı üretimi aynı zamanda sürece bağlı olarak da değişmektedir. Lityum Demir Fosfat (LFP), $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.015}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ (NCA) ve $\text{LiNi}_{1-2x}\text{Co}_x\text{Mn}_x\text{O}_2$ (NCM) gibi birçok bataryanın temel ısı üretim prensibi aynıdır (Xie *et al.* 2020). Bernardi *et al.* (1985) ilk defa bataryalar için Eşitlik (1)'de gösterilen ısı üretim modelini tanımlamıştır.

$$\dot{Q}_{t,\zeta} = IV + \sum_l I_l \left(T^2 \frac{d}{dT} \left(\frac{U_{l,\text{avg}}}{T} \right) \right) + mc_p \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

Burada $\dot{Q}_{t,\zeta}$ bataryadan çevreye olan ısı transfer hızı, $\sum_l$ her bir elektrottaki reaksiyonların toplamı, I bataryadan geçen toplam akım, V batarya çalışma voltajı, I_l belirli elektrottan geçen akım, T batarya sıcaklığı, $U_{l,\text{avg}}$ belirli bir elektrottaki ortalama bileşik için açık devre voltajı, m batarya kütlesi, c_p batarya özgül ısı ve t ise zaman olarak tanımlanmıştır. Denklemin sağ tarafındaki birinci ifade tersinir ısı üretimini, ikinci ifade tersinmez entropi kaynaklı ısı üretimini, üçüncü ifade ise bataryanın iç enerjisi ifade etmektedir.

Entropi kaynaklı ısı üretimi olarak tanımlanan $\sum_l I_l \left(T^2 \frac{d}{dT} \left(\frac{U_{l,\text{avg}}}{T} \right) \right)$ ifadesi, her bir elektrot için ayrı hesaplama gerektirdiği için karmaşık bir yapıya sahiptir. Thomas ve Newman

(2003), bataryada üretilen ısı denklemini basitleştirmek için Eşitlik (2)'de gösterilen şekli ile denklemi formülize etmiştir.

$$\dot{Q}_u = I \left(V - U + T \frac{dU}{dT} \right) \quad (2)$$

Batarya Termal Yönetim Sistemleri (BTYS)

Bir batarya paketi, içerisindeki birçok bataryanın istenilen voltaj ve kapasite değerlerine göre seri ya da paralel olarak birbirine bağlanmasıyla oluşur. Batarya paketindeki ısı yayılımının yetersiz olması, şarj ve deşarj sırasında batarya içerisinde ısı birikimine neden olacaktır. Biriken bu ısı ile aşırı sıcaklık artışı meydana gelmekte ve bu da batarya ömrünün azalmasına ve güvenlik tehlikelerine neden olmaktadır. Bu sebepten dolayı, bataryaların sıcaklığını istenilen aralıkta tutmak için çeşitli soğutma yöntemleri geliştirilmiştir (Wang *et al.* 2014).

Batarya paketinin güvenliği ve performanslı çalışması için etkili bir Batarya Termal Yönetim Sistemi (BTYS) kullanılması gerekmektedir. BTYS, soğutucu tipine göre; hava soğutma, faz değiştiren maddeler (FDM) ile soğutma, ısı borusu ile soğutma ve sıvı soğutma olarak dört ana gruba ayrılabilir. Tablo 2’de, kullanılan soğutma yöntemlerinin birbiriyle olan performans kıyaslaması verilmiştir (Rao and Wang 2011). Tablo 3’te ise bazı ticari EV ve HEV’de kullanılan Li-iyon bataryaların geometrik şekilleri, batarya paketinin kapasiteleri ve soğutma yöntemleri gösterilmiştir (Stefanopoulou and Kim 2015).

Tablo 2. Batarya soğutma yöntemlerinin kıyaslanması

Parametre	Hava	Sıvı	Isı Borusu	FDM
Kullanım Kolaylığı	Kolay	Zor	Orta	Kolay
Verim	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Sıcaklık Düşüşü	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Sıcaklık Dağılımı	Düzensiz	Düzenli	Orta	Düzenli
Bakım-Onarım	Kolay	Zor	Orta	Kolay
Kullanım Ömrü	>20 yıl	3-5 yıl	>20 yıl	>20 yıl
İlk Maliyet	Düşük	Yüksek	Yüksek	Orta
Yıllık Maliyet	Düşük	Yüksek	Orta	Düşük

Tablo 3. Tam ve hibrit elektrikli araçlarda kullanılan batarya soğutma yöntemleri

Araç Markası	Batarya Türü	Kapasite [kWh]	Soğutma Yöntemi
Tesla Roadster	Silindirik	53,0	Sıvı
Tesla Model S	Silindirik	40,0	Sıvı
Daimler Smart	Prizmatik	17,6	Sıvı
Nissan Leaf	Prizmatik	24,0	Hava
Mitsubishi i-MiEV	Prizmatik	16,0	Hava
Ford FOCUS	Prizmatik	23,0	Sıvı

Faz Değiştiren Maddeler (FDM) ile soğutma yöntemi

Faz değiştiren maddeler bilindiği üzere terimsel olarak, belirli çalışma sıcaklıklarında katı-sıvı faz değişimleri gösteren ve yüksek miktarda gizli ısı enerji depolayabilen malzemeleri temsil etmektedir. FDM birçok soğutma uygulamalarında kullanıldığı gibi, bataryaların ısı yönetiminde kullanımına ait de literatürde birçok çalışma mevcuttur. FDM'nin pasif soğutma sağlaması ve basit yapıya sahip olması gibi avantajlarının yanında tek başına batarya ısı yönetimi için yeterli performans sağlamadığı da belirtilmelidir. Aynı zamanda araç için fazladan ağırlık oluşturmaması ve düşük ısı iletimi sebebiyle tepki süresinin geç olması gibi dezavantajları da vardır (Kim *et al.* 2019). Bu dezavantajları en aza indirme adına FDM'ye ısı iletkenliği yüksek malzemelerin eklenmesi, metal kanatçıkların eklenmesi ve gözenekli yapı içeren malzemelerin eklenmesi gibi yöntemlere başvurulmaktadır. Bu yöntemler üzerine Pan *et al.* (2016) çalışmasında detaylı bir derleme yapmıştır.

Isı borusu ile soğutma yöntemi

Isı boruları elektronik cihazların soğutulmasında sıklıkla kullanılan yüksek ısı iletkenliğe sahip araçlardır. Aynı zamanda kompakt yapı, esnek geometri, uzun ömür ve düşük bakım maliyeti gibi avantajlara sahip ısı borularının kullanımı, içerdiği çalışma akışkanının faz değişimi ile ısı transferini sağlayan pasif soğutma yöntemlerindendir. Bununla birlikte ısı borusu, düşük kapasitesi, düşük verimliliği ve yetersiz temas alanı nedeniyle elektrikli araç bataryalarının ısı yönetiminde tek başına kullanılamamaktadır. Çoğunlukla hava, sıvı ve FDM ile hibrit olarak tasarlanan soğutma yöntemlerinde kullanılmaktadır (Kim *et al.* 2019).

Hava soğutma yöntemi

Batarya soğutma sisteminde hava kullanılması en basit ve düşük maliyetli yöntemlerden biridir. (Rao and Wang 2011; Stefanopoulou and Kim 2017). Hava soğutma yöntemi, doğal taşınım ve zorlanmış taşınım olmak üzere iki sınıfta incelenmektedir (He *et al.* 2015). Zorlanmış taşınım ile batarya soğutma yöntemi elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek kapasiteli batarya paketlerinin kullanıldığı elektrikli araçlarda genellikle doğal taşınım ile soğutma yeterli olmamaktadır. Buna bağlı olarak bataryaların doğal taşınım şartlarında ısı davranışlarını incelemek için termal görüntüleme tekniklerinin kullanıldığı birçok çalışma vardır. Bu kapsamda literatürde geçen bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Kanbur *et al.* (2020) çalışmalarında, veri güdümlü dinamik mod ayrıştırma yöntemini kullanarak batarya ısı performansını, yüzey sıcaklık gradyanlarına, ısı ve ekserji kayıplarına göre tahmin etmek için yeni ve alternatif bir yöntem önermektedirler. Deneysel çalışmada, bir akıllı telefonun Li-polimer bataryası termal kamera aracılığıyla görüntülenmiştir. Kamera ilk etapta veri eğitim periyodu olarak batarya yüzeyindeki termal görüntüleri 1 dakika boyunca toplamakta; daha sonra önerilen yöntem, deneysel sürenin geri kalan 5 dakikası için yüzey sıcaklık gradyanlarını tahmin etmektedir. Batarya yüzeyindeki sıcaklık gradyanları %1'den daha az hata ile tahmin edilirken, ısı yayılımı ve ekserji kaybı sırasıyla %2,75 ve %5,30 maksimum hata değerleri ile tahmin edilmiştir.

Akbarzadeh *et al.* (2020) 43 Ah kapasiteye sahip bir prizmatik Li- iyon bataryanın ısı kapasitesinin ve anizotropik ısı iletkenliğinin belirlenmesi için yaptıkları bir çalışmada, yeni, basit ve uygun maliyetli bir yöntem sunmuşlardır. Ayrıca çalışmada, 12 hücreden oluşan 48 V gerilime sahip batarya modülünün ısı davranışı, oda sıcaklığında üç boyutlu bir ısı model kullanılarak simüle edilmiştir. Hem hücre hem de modül seviyesinde yapılan simülasyonlar, ısı çift ve termal kamera ile elde edilen deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Isı karakterizasyon sonuçları, bataryanın ısı kapasitesinin çalışma sıcaklığı arttıkça bir miktar arttığını, ısı iletkenliğinin ise sıcaklıktan bağımsız kaldığını ortaya koymaktadır.

Zhu *et al.* (2020) Li-iyon bataryaların iç sıcaklığını ölçmek için yeni bir dahili sıcaklık ölçüm tekniği geliştirilmiştir. Spesifik bu tasarımda, kızılötesi kameranın bataryanın şarj ve deşarj işlemleri sırasında dahili sıcaklığı gerçek zamanlı olarak izleyebilmesi için, bataryanın bir ucu optik cam ile kaplanmıştır. 2C deşarj hızı koşulu altında, deşarj işleminin sonunda bataryanın görselleştirilmiş iç ve dış yüzeyleri arasında 2 °C maksimum sıcaklık farkı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, sıcaklığın yüksek kapasiteli bataryaların ısı güvenliği üzerindeki etkilerini analiz etmek için iç sıcaklığın daha önemli olduğu gösterilmiştir.

Wang *et al.* (2019) yaptıkları çalışmada, NCM ($\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$) katot malzemesine sahip bir bataryanın deneysel ve sistematik bir yaklaşımla doğal taşınım şartlarında ısı davranışlarını araştırmışlardır. Farklı deşarj hızları ve DoD için batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımı, kızılötesi görüntüleme (IR) teknolojisi ile elde edilmiştir. Sıcaklık dalgalanmasını ve dağılımını değerlendirmek için iki yeni faktör, sıcaklık varyansı ve yerel aşırı ısınma indeksi önerilmiştir. Bu iki faktörün farklı deşarj hızları ve DoD'a bağlı olarak konumsal dağılım grafiklerinde sıcaklık homojenitesini bütünsel olarak gösterebildiği anlaşılmıştır.

Zhang *et al.* (2019) bir Li-iyon bataryanın ısı taşınım katsayısını ve özgül ısı kapasitesini termal kamera aracılığı ile deneysel olarak belirlemişlerdir. Çalışmada lumped kapasitans yöntemi kullanılarak ölçülen batarya yüzey sıcaklıkları ile bataryanın özgül ısı kapasitesine ulaşılmıştır. Araştırmacılar bir cep telefonu bataryası için bu çalışmayı gerçekleştirmiş ve bu yöntemin geniş ebatlı bataryalar için uygun olmadığını belirtmişlerdir.

Kim *et al.* (2017) LFP torba tip bir bataryanın anot ve katot malzemelerindeki yüksek deşarj hızı ve sıcaklığa bağlı bozulmaları incelemişlerdir. Termal kamera ile iç direnç değişikliğine bağlı batarya sıcaklıkları görüntülenerek bataryanın ısı performansı değerlendirilmiştir. Sonuçta, bataryanın iç direncinin batarya ömrünü doğrudan etkilediği tespit edilmiştir.

Panchal *et al.* (2016) prizmatik bir LFP bataryanın yüzey sıcaklığını ve sıcaklık dağılımlarını farklı deşarj hızlarında termal kamera ile görüntüleyerek bataryanın ısı performansını incelemişlerdir. Aynı zamanda bataryanın ısı üretimi, iç direnç profili ve voltaj değişimleri de incelenmiştir. Bununla birlikte çalışmada, Matlab Simulink yazılımı kullanılarak bataryanın ısı modeli oluşturulmuş ve bu model yapılan deneysel ölçümlerle doğrulanmıştır.

Bazinski *et al.* (2016) çalışmalarında, 14,5 Ah ve 10 Ah kapasitelerindeki iki farklı ebatlı torba tip LFP bataryanın deneysel olarak ısı iletimini incelemişlerdir. Bataryalar deney sisteminde bir ısı kaynağına kanat görevi görecektir şekilde tasarlanmış ve bataryanın ısı iletimi, kanatlar için kullanılan tek boyutlu ısı transfer denklemleri ile çözülmüştür. Yapılan deneyde batarya yüzeyindeki sıcaklıklar termal kamera kullanılarak ölçülmüştür. Sonuç olarak 14,5 Ah ve 10 Ah kapasiteli bataryaların ortalama ısı iletim katsayıları sırasıyla 28,9 W/m.K ve 35,1 W/m.K bulunmuştur.

Jaguemont *et al.* (2017) bir lityum titanyum oksit (LTO) batarya için üç boyutlu ısı model geliştirmişlerdir. Geliştirilen model, elektrokimyasal süreçleri göz ardı ederek daha hızlı bir çözüm sunabilen bir ısı transfer modelini barındırmaktadır. Sonlu elemanlar analizi ile

bataryanın farklı ortam sıcaklığı şartlarında simülasyonları yapılmış ve elde edilen sıcaklık sonuçları, termal kamera ile deneysel olarak ölçülen batarya yüzey sıcaklıkları ile karşılaştırılmıştır.

Xu *et al.* (2021) farklı elektriksel bağlantı konfigürasyonlarına sahip Li-iyon batarya modüllerinin ısı kaçak yayılımlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, ısı kaçak yayılım karakteristiği termal kamera ile görüntülenmiştir. Hücre içerisine yerleştirilen ısı çiftleri ile ısı kaçak sırasında batarya sıcaklığı 160 °C olarak ölçülmüştür. Ayrıca batarya modülünün elektriksel modeli oluşturularak ısı kaçak sırasında kaçak olan hücreye diğer hücrelerden transfer edilen elektriksel yük miktarı da hesaplanmıştır.

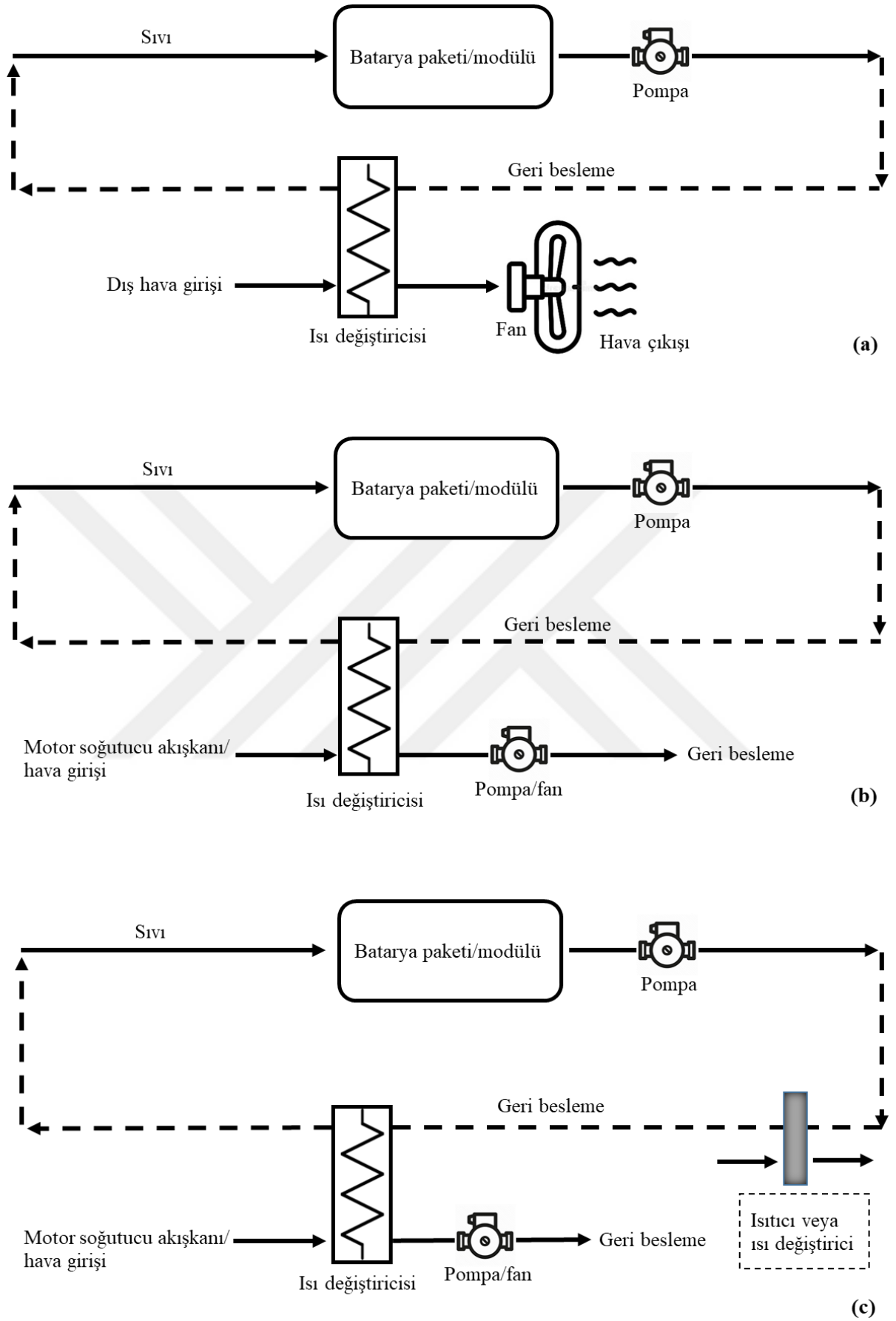
Li *et al.* (2020) yaptıkları çalışmada, termal kamera ve üç boyutlu tarayıcı kullanarak prizmatik bir Li-iyon batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımını modellemişlerdir. Batarya yüzey topografyası ile batarya yüzey sıcaklığı arasındaki ilişkiyi doğru bir şekilde elde etmek için, bir veri füzyon modeli önerilmiş ve buna göre veri füzyon modelinin parametre tanımlaması için bir ortak kalibrasyon yöntemi sunulmuştur. Sonuç olarak araştırmacılar, çoklu fiziksel ölçüm sisteminin yüksek çözünürlük ve yüksek veri toplama hızı ile 0,19 mm'lik bir konum eşleştirme sapmasına ulaşılabilirdiğini göstermişlerdir.

Sıvı soğutma yöntemi

Sıvı soğutma yöntemi, sıvıların yüksek özgül ısıları ve yüksek ısı iletim katsayıları nedeniyle diğer soğutma sistemlerine göre daha verimli bir yöntemdir. Bunun yanı sıra, sıvı soğutma sistemi daha az hacim kaplayan ve daha dar bir alana yerleştirilebilen kompakt bir yapıya sahiptir (Liu *et al.* 2017).

Sıvı soğutma yöntemleri için BTYS, Şekil 16'da gösterildiği gibi aktif veya pasif soğutma olarak da gruplandırılmaktadır.

Sıvı soğutma yöntemi, soğutma sıvısının bataryalara doğrudan veya dolaylı teması ile uygulanmaktadır. Dolaylı temaslı sıvı soğutma, yaygın olarak ısı transfer akışkanının, içerisinde kanallar barındıran metal plakalarda (soğutucu plaka) devridaim ettirilmesi ile yapılmaktadır. Soğutma sıvısı olarak ise, pompalama gücünü düşürmek için genellikle diğer soğutuculara (mineral yağ gibi) göre viskozitesi daha düşük olan etilen glikol ve su karışımı kullanılmaktadır (Jin *et al.* 2014). Doğrudan temaslı sıvı soğutma yönteminde ise bataryalar, elektriksel olarak yalıtkan (dielektrik) ısı transfer sıvısına daldırılır. Isı transfer sıvısı olarak genellikle dielektrik olan mineral yağ, silikon yağı, hidrofloroeter ve saf su gibi akışkanlar kullanılmaktadır (Deng *et al.* 2018). Literatürde BTYS için kullanılan sıvı soğutma yöntemi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir:



Şekil 16. a) Pasif sıvı soğutma, b) Aktif orta dereceli sıvı soğutma/ısıtma, c) Aktif yüksek dereceli sıvı soğutma/ısıtma sistemleri (Rao and Wang 2011)

Jin *et al.* (2014) çalışmalarında, elektrikli araç bataryalarının termal yönetimi için tasarladıkları bir mini kanallı soğutucu plakanın sayısal ve deneysel analizini yapmışlardır. 4 adet Li-iyon bataryayı soğutmak üzere tasarlanan soğutucu plakanın düz kanatçıklı ve eğik kanatçıklı olmak üzere iki farklı konfigürasyonu bulunmaktadır. Soğutma sıvısı olarak su kullanılmış ve suyun farklı debilerinin soğutma performansına etkisi incelenmiştir. Soğutucu plakanın bir HAD yazılımı ile iki boyutlu simülasyonu farklı çalışma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada, bataryanın farklı şarj/deşarj hızlarındaki yaydığı 220 W-1240 W aralığındaki ısı yük altında soğutucu plakanın performansı incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, eğik kanatçıklı soğutucu plaka tasarımının performansı önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. Eğik kanatçıklı yapıda, akışkan ikincil bir akış yönüne sahip olduğu ve akışkan yolu boyunca çalkantılara sebep olduğu için ısı transferinde iyileşmeler elde edilmiştir. Yapılan tasarımla, 220 W ve 1240 W ısı yükleri için sırasıyla 0,1 L/dk ve 0,9 L/dk akışkan debilerinde ısıtıcı yüzeyin sıcaklığı 50 °C'nin altında tutulmuştur. Ayrıca ortalama batarya yüzey sıcaklığında, yine aynı ısı yükleri için sırasıyla 2,0 °C ve 4,1 °C düşüş sağlanmıştır. Bununla birlikte, eğik kanatçıklı tasarımla ısı transfer katsayısında %25 artış elde edilmiştir.

7 Ah kapasitede Li-iyon bataryanın maksimum batarya sıcaklığını ve lokal sıcaklık farkını düşürmek için yapılan bir çalışmada, mini kanallı soğutucu plakalar kullanılmıştır. Yapılan sayısal çalışmada soğutma sisteminin üç boyutlu termal modeli oluşturulmuştur. Soğutma sıvısı olarak su kullanılmış ve suyun debisi, akış yönü, kanal sayısı ve çevre sıcaklığı gibi parametrelerin soğutma performansı üzerine etkisi araştırılmıştır. 5Cdeşarj hızı ile yapılan simülasyon sonuçlarına göre kanal sayısı arttıkça maksimum batarya sıcaklığının düştüğü görülmüştür. Bataryanın 5C hızındadeşarjı sonunda, soğutma yapılmadan doğal taşınım maruz kaldığı durumda maksimum sıcaklığı 77,33 °C ve yerel sıcaklık farkı ise 13,19 °C olarak hesaplanmıştır. Maksimum batarya sıcaklığının ve yerel sıcaklık farkının en düşük elde edildiği tasarım, sırasıyla 58,4 °C ve 9,6 °C ile 6 kanallı plaka tasarımı olmuştur. Akış yönünün soğutma performansına etkisinin düşük olduğu belirlenmiş, en iyi sonuç ise elektrot tarafından giriş yönü olarak tespit edilmiştir. Akışkan debisinin 5×10^{-6} kg/s ile 10^{-3} kg/s arasında artırılması ile batarya soğutma performansının arttığı görülse de optimum akışkan debisi olarak 5×10^{-4} kg/s belirlenmiştir (Huo *et al.* 2015).

20 Ah kapasitede su soğutmalı bir LiFePO₄ (LFP) prizmatik bataryanın, 1C ile 4C arasında değişendeşarj hızlarında ve farklı çalışma sıcaklıklarında ısı üretim hızları deneysel olarak incelenmiştir. Bunun yanı sıra, MATLAB yazılımı ile yapay sinir ağı kullanılarak bataryanın termal modeli oluşturulmuştur. Modelin eğitilmesinde ise Levenberg–Marquardt

yöntemi kullanılmıştır. Modelin üç adet girdisi bulunmakla beraber bunlar ortam sıcaklığı, deşarj akımı ve batarya kapasitesidir. Modelin çıktısı ise bir adet olup o da ısı üretim hızıdır. Deney düzeneğinde, 10 adet T-tipi ısı çift ve 3 adet ısı akısı sensörü batarya yüzeyindeki belirli kritik bölgelere uygulanarak sıcaklık ve ısı akısı ölçümleri yapılmıştır. Çalışmada kullanılan torba tip bataryanın iki yüzeyi su sirkülasyonlu soğutucu plakalarla soğutulmuştur. Soğutma sıvısının debisi 170-218 mL/dk aralığında tutularak 1C, 2C, 3C ve 4C deşarj hızlarında bataryanın ısı üretim hızları ölçülmüş ve kıyaslanmıştır. Deneysel verilerin belirsizlik analizini yapmak için ise Moffat yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca bataryanın doluluk oranına (SoC) bağlı olarak ısı üretim hızları da hesaplanmıştır. Maksimum ısı üretim hızı, 4C deşarj hızı ve 5 °C ortam sıcaklığı şartlarında 91 W olarak ölçülmüştür. Minimum ısı üretim hızı ise, 1C deşarj hızı ve 35 °C ortam sıcaklığı şartlarında 13 W olarak ölçülmüştür. (Panchal *et al.* 2016).

Qian *et al.* (2016) mini kanallı soğutucu plaka ile soğutma yöntemi kullanarak 3 adet Li-iyon bataryadan oluşan modülün ısı analizini yapmışlardır. ANSYS Fluent HAD yazılımı ile üç boyutlu sayısal model oluşturularak bataryaların soğutulma simülasyonu yapılmıştır. Çalışmada mini kanal sayısı, akışkanın kütleli debisi, akış yönü ve kanal genişliğinin soğutma performansına etkileri incelenmiştir. Sınır şartları olarak batarya modülünün dış yüzeyine doğal taşınım tanımlanmış ve taşınım katsayısı olarak ise 5 W/m.K belirlenmiştir. Ortam sıcaklığı ve giriş soğutma suyu sıcaklığı 25 °C kabul edilmiştir. Bataryaların deşarj hızı 5C olarak belirlenmiştir. 1 ile 7 arasında değişen kanal sayılarına sahip soğutucu plakalar kullanılmıştır. Beş kanallı soğutucu plaka ile 1×10^{-4} ile 2×10^{-3} arasında değişen akışkan debisi değerleri sınır şartı olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda mini kanallı soğutucu plaka ile batarya ısı yönetiminin iyi bir performans sergilediği görülmüştür. İki kanallı soğutucu plaka ile batarya modülünün sıcaklığı deşarj süresince 40 °C'nin altında tutulabilmektedir. Kanal sayısı arttıkça soğutma performansında iyileşme gözlenirken beş kanaldan fazla uygulamalarda ciddi bir iyileşme gözlemlenmemiştir.

Silika plaka ile batarya ısı yönetim sistemi incelenen deneysel ve sayısal diğer bir çalışmada, 20 Ah kapasiteli bir prizmatik LFP bataryanın sıvı ile soğutulması incelenmiştir. Deneysel düzende, içinden 5 mm çapında 5 adet bakır boru geçen iki adet silika levha arasına batarya yerleştirilerek soğutulmuştur. Batarya 1C, 3C ve 5C hızlarında deşarj edilirken, soğutma suyunun hızı 0,1 m/s ile 0,4 m/s aralığında tutularak batarya sıcaklıkları ölçülmüştür. Batarya yüzey sıcaklığı beş farklı noktadan ısı çiftler ile ölçülmüştür. Bataryanın ısı üretimi ise 1C, 3C ve 5C deşarj hızları için sırasıyla 5,89 W, 47,51 W ve 238,80 W olarak hesaplanmıştır. Yapılan simülasyon çalışmasında ise, soğutucu plakaların 1, 3, 5 ve 7 borulu olmak üzere 4 farklı tasarıma sahip olduğu durumlar incelenmiştir. 0,1 m/s akışkan hızı ve 5C deşarj hızı ile

yapılan modellemede, verim/maliyet oranı açısında en etkili soğutmanın 5 borulu plaka ile yapıldığı görülmüştür. Bununla birlikte, soğutucu plakalardaki akış yönleri paralel ve zıt olarak modellenmiş ve zıt akışlı modelde batarya yüzeyinde daha düzenli bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir (Wang *et al.* 2017).

An *et al.* (2017) yaptıkları çalışmada, Li-iyon batarya modülünün kaynamalı akış ile ısı yönetimini deneysel olarak incelemişlerdir. Soğutucu akışkan olarak atmosfer basıncında 34 °C kaynama sıcaklığına sahip Novec7000 sıvısı kullanılmıştır. Batarya modülü 20 Ah kapasitede 14 adet LFP prizmatik bataryanın seri bağlanması ile oluşturulmuştur. Her bir batarya iki adet soğutucu plakanın arasında olacak şekilde sekiz adet de soğutucu plaka kullanılmıştır. Soğutucu akışkan, mini kanallı soğutucu plakalarda devridaim ettirilerek ısı yönetim sağlanmıştır. Batarya modülünü soğutma deneyleri, 1C, 3C ve 5C deşarj hızları; 0 °C, 15 °C, 25 °C ve 35 °C ortam sıcaklıkları; 50 g/dk -1200 g/dk arasında değişen akışkan debileri baz alınarak gerçekleştirilmiştir. 1C, 3C ve 5C deşarj hızları ile yapılan deneylerde maksimum batarya sıcaklıkları, soğutma işlemi uygulanmadığı takdirde sırasıyla 37,1 °C, 62,1 °C ve 72,8 °C olarak ölçülmüştür. 400 g/dk akışkan debisi ile soğutma işlemi yapıldığında, bu sıcaklıkların 1C ve 3C deşarj hızları için sırasıyla 30,1 °C ve 41,8 °C değerlerine düştüğü görülmüştür. 5C deşarj hızı için ise 1200 g/dk akışkan debisi kullanılarak maksimum batarya sıcaklığı 36,6 °C'ye düşürülmüştür. Batarya modülünün soğutulmasında, kaynama ile ısı transferinin avantajlarında yararlanılarak daha düzenli sıcaklık ve voltaj dağılımları elde edilmiştir. Akışkanın Reynold sayısının yükselmesi ile batarya voltajının da düştüğü gözlemlenmiştir. Sonuç olarak batarya modülü, kaynamalı soğutma ile 40 °C civarında sabit tutulmuş ve maksimum yüzey sıcaklık farkı ise 4 °C seviyesine indirilmiştir.

Patil *et al.* (2018) 20 Ah kapasiteli bir LFP bataryanın soğutucu plaka ile soğutulmasının sayısal analizini yapmışlardır. Soğutucu plaka içindeki akışkan kanalları U-tipi serpantin olarak tasarlanmıştır. Soğutma sıvısı olarak su kullanılan çalışmada, 4-10 arasında değişen kanal sayıları ile çözüm yapılmıştır. Simülasyon çözümü için sınır şartları belirlenirken giriş suyu sıcaklığı için 5 °C, 15 °C, 25 °C ve 35 °C seçilmiştir. Akışkanın kütleli debisi ise 0,000833 kg/s, 0,001667 kg/s, 0,002500 kg/s ve 0,003333 kg/s olarak belirlenmiştir. Batarya 1C ve 2C hızlarında deşarj edilirken sırasıyla 12,5 W ve 29,5 W ısı üretimi açığa çıkmıştır. Soğutma performansı parametreleri olarak sıcaklık dağılımı, basınç düşümü ve soğutma enerji verimi göz önünde bulundurulmuş ve hesaplanmıştır. En yüksek basınç düşümü 0,001667 kg/s debi ile 4 kanallı soğutucu plakada 227,6 Pa olarak bulunmuştur. Optimum batarya sıcaklığı 25 °C ile 40 °C arasında olduğu düşünülerek optimum giriş suyu sıcaklığı 15 °C ve 25 °C olarak

hesaplanmıştır. Enerji verimliliği açısından değerlendirildiğinde ise en uygun şartların, giriş suyu sıcaklığı 5 °C, kütleli debi ise 0,000833 kg/s olduğu tespit edilmiştir.

3 adet seri bağı 20 Ah kapasiteli LFP bataryadan oluşan bir modülün sıvı ile soğutulması 1C, 2C, 3C ve 4C deşarj hızlarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada soğutma sıvısı olarak su kullanılmış ve akışkan giriş sıcaklığı soğutma banyosu kullanılarak 10 °C, 20 °C, 30 °C ve 40 °C değerlerinde sabit tutulmuştur. 4 adet alüminyum soğutucu plaka kullanılarak batarya paketinin ısı ve elektriksel performans analizi yapılmıştır. Batarya yüzey sıcaklığını ölçmek için her bir bataryanın ön ve arka yüzeylerine 3 adet ısı çift yerleştirilmiştir. Bunlardan biri katot yakınına, diğeri anot yakınına, bir diğeri ise bataryanın orta bölgesine yerleştirilmiştir. 10 °C akışkan sıcaklığında ve 4C deşarj hızında maksimum batarya sıcaklığı 21,4 °C, ortalama batarya sıcaklığı ise 17,8 °C olarak ölçülmüştür. Diğeri akışkan sıcaklıkları için yapılan deneylerden de alınan sonuçlara göre 30 °C, akışkan giriş sıcaklığı için optimum değer olarak belirlenmiştir. Ekserji analizi de yapılan çalışmada en yüksek ekserji yıkımı, 4C deşarj hızında ve 40 °C soğutma suyu sıcaklığında 732,1 J olarak hesaplanmıştır. Bataryanın soğutulmadığı şartlarda 4C deşarj hızında ise toplam maksimum ekserji yıkımı 3870,3 J bulunmuştur (Malik *et al.* 2018).

Mondal *et al.* (2018) çalışmalarında, BTYS soğutucu kanallarında vorteks üretici kullanımının soğutma performansına etkilerini incelemişlerdir. Soğutma kanallarında 4 farklı konfigürasyonda kanat yapısı olan ve 20 adet NCM prizmatik Li-iyon hücreden oluşan batarya modülünün Star CCM+ programı ile üç boyutlu nümerik simülasyonu yapılmıştır. Battery Design Studio programı ile de NTG modeli kullanılarak batarya modülünün elektrokimyasal modeli oluşturulmuştur. Yapılan simülasyonda, BTYS’de bulunan dikdörtgen kesitli kanallardan geçen soğutucu akışkan için Reynold sayısı aralığı 65 ile 1650 arasında kabul edilmiştir. Farklı vorteks üretici konfigürasyonlarının performansı Nusselt sayısı, maksimum modül sıcaklığı ve hücreler arası sıcaklık farkı bakımından kıyaslanmıştır. Vorteks üreticisi olarak kullanılan kanatçıkların uzunluğu 1,2 mm, genişliği 0,3 mm, kalınlığı ise 0,05 mm olup, 45° açıyla soğutma kanallarına yerleştirilmiştir. Kanatçıkların soğutma kanallarındaki pozisyonlarına göre 4 farklı konfigürasyon oluşturulmuştur. Reynold sayısının 1250 olduğu şartta, kanatçıksız çözümlemede Nusselt sayısı yaklaşık 10 iken, kanatçıklı yapıda yaklaşık 27’ye yükseldiği görülmüştür. En performanslı konfigürasyon seçeneğinin maksimum batarya sıcaklığını %10 azalttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak sisteme vorteks üretici eklenmesinin toplam ısı transferini iyileştirdiği, maksimum batarya sıcaklığını düşürdüğü ve hücreler arası daha düşük sıcaklık farkları elde edilmesine imkân sağladığı tespit edilmiştir.

Mini kanallı soğutucu plaka ile 15 adet prizmatik LFP bataryadan oluşan modülün soğutulması incelenen bir sayısal çalışmada, maksimum batarya sıcaklığı ve batarya modülündeki sıcaklık dağılımı hesaplanmıştır. 70 Ah kapasitedeki batarya modülü, ANSYS Fluent yazılımı ile 1C deşarj hızı ve 40 °C ortam sıcaklığı şartlarında deşarj edilerek simülasyonu yapılmıştır. Batarya modülünün soğutulması için toplamda 16 adet dairesel kesitli dikey mini kanal içeren 4 adet soğutucu plaka kullanılmıştır. Soğutma sıvısı olarak su kullanılmış ve her bir soğutucu plakada toplam su debisi için 0,2 g/s ile 2 g/s arasında, giriş sıcaklığı için ise 26 °C ile 30 °C arasında değişen değerler seçilmiştir. Yapılan analiz sonucunda 1C deşarj hızında ve 40 °C ortam sıcaklığında, en düzenli sıcaklık dağılımı 26 °C giriş suyu sıcaklığı ve 1 g/s su debisi ile elde edilmiştir. Maksimum batarya sıcaklığı 32,5 °C iken batarya modülündeki maksimum sıcaklık farkı ise 1,5 °C olarak bulunmuştur. Soğutma akışkanı olarak hava, glikol, mineral yağ ve hidrojel de incelenmiştir. Hava, düşük ısı taşınım katsayısına sahip olduğu için soğutma performansı en az olan alternatif görülürken, en performanslı seçenek su ve glikol karışımı olarak öngörülmüştür (Xu *et al.* 2019).

Mini kanallı bir BTYS'in optimizasyonu yapılan parametrik diğer bir çalışmada, 20 Ah kapasiteli bir LFP bataryanın her bir yüzeyine mini kanallardan oluşan üç adet yatay tüp yerleştirilmiştir. Soğutma sıvısı olarak su kullanılmış ve sistemin iki boyutlu simülasyonu ANSYS CFX programı ile yapılmıştır. Dikdörtgen kesitli mini kanalların kesit kenarlarının birisi 2 mm ölçüde sabit tutulup diğer kenarı farklı en boy oranlarına göre tasarlanarak farklı konfigürasyonda yapılar elde edilmiştir. Bu konfigürasyonların maksimum batarya sıcaklığındaki değişimlere etkisi 1 °C'nin altında olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte batarya üzerindeki sıcaklık değişimi için 2 °C kabul edilebilir bir değer olarak varsayılırsa, iki adet mini kanallı tüpün bataryanın soğutulması için yeterli olduğu görülmüştür. Bu şartlarda akışkan debisi ise 2,39 g/s olduğunda, maksimum batarya sıcaklık farkı 2 °C'nin altında tutulabilmektedir. Ayrıca mini kanallardaki en boy oranı azaldıkça akışkan basınç kaybının da arttığı vurgulanmıştır. Çalışmada ısıl temas direncinin soğutma performansına etkisini araştırmak için mini kanallı tüpler, batarya yüzeyine doğrudan ve termal macun kullanılarak iki farklı şekilde yerleştirilmiştir. Sonuç olarak ise temas direncindeki değişkenliğin maksimum batarya sıcaklığında kayda değer bir değişikliğe neden olmadığı görülmüştür. Diğer yandan BTYS uygulamaları için soğutucu plaka yerine mini kanallı tüplerin kullanılmasının sistem ağırlığını azalttığı belirtilmiştir (An *et al.* 2019).

Bai *et al.* (2019) mikro kapsüllü faz değiştiren madde ve su karışımından (mPCS) oluşan soğutma sıvısı ile Li-iyon batarya modülünün soğutulmasını incelemişlerdir. ANSYS Fluent programı ile üç boyutlu termal modeli oluşturulan BTYS için optimum enerji tüketimi ve

soğutma performansı sağlanması hedeflenmiştir. Mini kanallardan oluşan soğutucu plakanın yapısı optimize edilerek maksimum batarya sıcaklığının ve maksimum batarya sıcaklık farkının en aza indirgenmesi sağlanmıştır. Kütlesel olarak %80'i su ve %20'si n-oktodekan mikro kapsülden oluşan soğutma sıvısı ile geliştirilen soğutucu plaka tasarımı, ortogonal deney metodu ile doğrulanmıştır. Bununla birlikte, kullanılan soğutma sıvısının 2C deşarj hızındaki soğutma performansı, saf su, glikol-su karışımı ve mineral yağ akışkanlarının soğutma performansı ile karşılaştırılmıştır. mPCS akışkanı kullanıldığında, kütlesel debi 3×10^{-4} kg/s'ye kadar maksimum batarya sıcaklığı en düşük değerlere ulaşırken, kütlesel debi belirtilen değeri geçince en düşük maksimum batarya sıcaklığı saf su akışkanı ile sağlanmıştır. Bu akışkanların sistemde oluşturdukları basınç kayıpları da hesaplanmış ve en fazla basınç kaybı su-glikol karışımında, en düşük basınç kaybı ise saf suda elde edilmiştir. Sonuç olarak geliştirilen BTYS ile batarya ömrünün uzatılmasına ve ulaşılabilir batarya doluluk oranının artırılmasına katkı sağlandığı vurgulanmıştır.

Farklı batarya paketi yapısal tasarımları ile BTYS performansının iyileştirilmesi planlanan bir çalışmada, soğutma performansında iyileştirme, batarya paketindeki sıcaklık homojenliğini ve basınç düşümünü minimize etme konuları ele alınmıştır. 16 Ah kapasiteli 144 adet prizmatik NMC bataryalardan oluşan paket sayısal olarak modellenmiştir. Metal kanatçıklar ve paketin altına yerleştirilen 4 kanallı soğutucu plakalar ile oluşturulan BTYS referans tasarım olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte kanatçık kalınlığının artırılması, soğutucu plakanın sandviç tarzı batarya paketine yerleştirilmesi ve soğutucu plakaların modüller arasına yerleştirilmesi ile dört farklı konfigürasyonda BTYS tasarımı yapılmıştır. 2C deşarj hızı ile yapılan çözümlemelerde, modüller arası soğutucu plaka uygulanan konfigürasyon ile en başarılı termal iyileşme sağlanmıştır. Bu tasarımla, batarya paketi hacmine oranla eşdeğer ısı iletkenliği %64 artırılmıştır. Bununla birlikte toplam basınç kaybında da %19 artış gerçekleşmiştir. Ayrıca batarya paketindeki sıcaklık değişimi hücrenin kendi içindeki sıcaklık değişimi, hücreler arası sıcaklık değişimi ve modüller arası sıcaklık değişimi olarak ele alınmıştır. Referans geometri ile yapılan simülasyonda hücre içindeki sıcaklık değişimi 6,47 °C iken maksimum batarya sıcaklık farkı ise 9,08 °C olarak bulunmuştur. Geliştirilen BTYS konfigürasyonu ile maksimum batarya sıcaklık farkı 5,4 °C 'ye düşürülmüştür (Chung and Kim 2019).

Liu *et al.* (2019) ağaç benzeri bir konfigürasyona sahip mini kanallı soğutucu plaka ile bir prizmatik bataryanın ısı yönetimini incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmada 10 Ah kapasitede bir adet LFP katot materyaline sahip bataryanın, 4C deşarj hızı ile ısı üretimi sağlanmıştır. Soğutma sıvısı olarak su kullanılmış ve suyun sirkülasyonu 1-1,5 ml/s hacimsel debi aralığında peristaltik pompa ile sağlanmıştır. Soğutma sıvısının sisteme giriş sıcaklığı ise

25 °C’ de su banyosu ile sabit tutulmuştur. Bataryanın ön ve arka yüzeyine 1 mm² – 4 mm² arasında değişen kesit alanlarına sahip mini kanallı iki adet soğutucu plaka yerleştirilerek soğutma sistemi oluşturulmuştur. Soğutucu plaka üzerinde, su giriş ve çıkış noktalarında olmak üzere toplam 6 adet K-tipi ısıl çift ile sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Soğutucu plakada paralel akış uygulaması ile maksimum batarya sıcaklığı 33,08 °C, maksimum sıcaklık farkı 5,25 °C olarak ölçülmüştür. Ters akış uygulamasında ise maksimum batarya sıcaklığı 31,82 °C, maksimum sıcaklık farkı 2,96 °C olarak ölçülmüştür. Çalışmada ayrıca soğutucu plaka kanal genişliği ve açılarının optimizasyonu yapılmıştır. Optimize edilen kanal yapısı ile maksimum batarya sıcaklığında 0,52 °C azalma, sistemdeki basınç kaybında ise 6,73 Pa artış gözlemlenmiştir.

Mini kanallı soğutucu plaka ile soğutulan 50 V gerilime sahip bir Li-iyon batarya paketinin eşdeğer devre modeli kullanılarak üç boyutlu termal modeli oluşturulmuştur. Batarya paketinde, 14 adet 20 Ah kapasiteye ve Li[Ni-CoMn]O₂ (NCM) katot malzemesine sahip prizmatik batarya kullanılmıştır. C/2 ile 4C arasında değişen deşarj hızı ve 0,1 m/s ile 0,01 m/s arasında değişen soğutma sıvısı hızı şartlarında sistemin simülasyonu yapılmıştır. 0,1 m/s akışkan hızı ile yüksek deşarj hızlarında maksimum batarya sıcaklık farkı 5 °C’nin altında tutulabilirken, akışkan hızı 0,01 m/s olduğunda sıcaklık farkı 10 °C’yi geçtiği tespit edilmiştir. Bataryalar arası homojen olmayan bu sıcaklık dağılımının ise bataryalar arasında dengesiz indirgenmelere sebep olduğu belirtilmiştir. Ayrıca tek bataryanın kısa devre yapılarak aşırı akım ile deşarjı sağlanmış ve bu durumdaki ısıl karakteristiği incelenmiştir. 270 saniye içinde deşarj olan batarya, 0,1 m/s ve 0,2 m/s akışkan hızı ile soğutulduğu durumda, ısıl sürüklenme sınır sıcaklığı olan 80 °C’yi aşmadığı gözlemlenmiştir. Belirtilen durumda 0,01 m/s ve 0,02 m/s akışkan hızı ile batarya soğutulduğunda ise 200 saniye sonra 80 °C limit sıcaklığına ulaşılmıştır. Kısa devre ile deşarj işlemi bütün batarya paketine uygulandığında ise 0,2 m/s akışkan hızı ile maksimum paket sıcaklığının 80 °C’yi aştığı görülmüştür (Li *et al.* 2019).

Chen *et al.* (2019) çalışmalarında, iki adet soğutucu plaka ve bir adet 8 Ah kapasiteli prizmatik Li-iyon bataryadan oluşan paketin ısıl yönetimini incelemişlerdir. BTYS’nin, Çok Amaçlı Tasarım Optimizasyon Metodu (ÇATO) ile optimizasyonunun yapıldığı çalışmada, çok disiplinli bir yaklaşım ile sistemin termodinamik ve akışkanlar mekaniği analizi de yapılmıştır. Optimizasyon için soğutucu plakanın kanal ölçüleri bağımsız değişkenler olarak kullanmıştır. Maksimum sistem sıcaklığı, sıcaklık standart sapması ve maksimum basınç değerleri ise optimizasyonun bağımlı değişkenleridir. NSGA II çok amaçlı genetik algoritması kullanılarak bağımlı ve bağımsız değişkenler optimize edilmiştir. Belirli aralıklardaki değerlere sahip bağımsız değişkenlerin hassasiyet analizi de soğutma performansına etkileri incelenerek

yapılmıştır. Analiz sonucunda mini kanal derinliğinin maksimum batarya sıcaklığına etkisi %91,8, sıcaklık standart sapmasına etkisi %43,2, basınç kaybına etkisi ise %99,5 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca soğutma sisteminin doğrulaması da bataryanın 1C hızında deşarjı ile deneysel olarak yapılmıştır.

Li *et al.* (2019) tasarladıkları bakır borular ve silikon plakalardan oluşan soğutucu plakanın BTYS performansını incelemişleridir. 5 adet 20 Ah kapasiteli LFP prizmatik bataryanın seri bağlanması ile ve bataryaların her iki yüzeyine soğutucu plakaların yerleştirilmesiyle batarya modülü oluşturulmuştur. Yapılan deneysel çalışmada soğutma sıvısı olarak su kullanılmış ve silikon soğutucu plakalı modülün ısıl performansını göstermek için aynı modül akrilik kutu içerisinde hava ile de soğutulmuştur. 5 adet bakır boru birbirine paralel olacak şekilde silikon plakalardan geçirilmiş ve oluşturulan modül 5C hızıyla deşarj edilerek 2 mL/s ile 10 mL/s arasında değişen akışkan debilerinde soğutulmuştur. Su debisi 2 mL/s iken maksimum batarya sıcaklığı 43,94 °C bulunurken, 10 mL/s debide ise sıcaklık 41,02 °C değerine düşmüştür. Ayrıca akış yönüne göre 4 farklı konfigürasyon belirlenerek soğutma performansları karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte hava ile soğutma ve su ile soğutmanın enerji maliyet oranları sırasıyla %2,91 ve %1,53 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak silikon soğutucu plaka kullanarak su soğutmanın, hava ile soğutmaya göre daha başarılı sonuçlar verdiği belirtilmiş ve maksimum batarya sıcaklığının batarya için kritik sıcaklık kabul edilen 45 °C'nin altında tutulduğuna değinilmiştir.

Tang *et al.* (2019) alüminyum mini kanallı soğutucu plaka ile üç farklı BTYS stratejisi geliştirmişlerdir. 50 Ah kapasitede prizmatik LFP batarya kullanılan çalışmada, soğutucu plakalar bataryanın altına, iki yanına ve hem altına hem de iki yanına yerleştirilmesi ile üç farklı konfigürasyon elde edilmiştir. Birinci konfigürasyondaki batarya altına yerleştirilen soğutucu plakayı, kesit geometrisinin uzunluğu, genişliği ve kalınlığı sırasıyla 6,9 mm, 3 mm ve 1mm olan 10 adet mini kanal oluşturmaktadır. İkinci konfigürasyonda 4 adet mini kanaldan oluşan soğutucu plakalardan, bataryanın iki yanına toplamda 6 adet uygulanmıştır. Üçüncü konfigürasyon ise birinci ve ikinci konfigürasyonların birleşimi şeklinde tasarlanmıştır. Tasarlanan BTYS, ANSYS Fluent programı kullanılarak modellenmiş ve bununla birlikte deneysel doğrulaması yapılmıştır. Deneysel ve simülasyon verileri arasındaki doğrulama hatası %2,4'ü geçmemiştir. Deneysel çalışma sonucunda üçüncü konfigürasyon deşarj sonunda 23,7 °C maksimum batarya sıcaklığı ile en iyi sonucu vermiştir. 1 L/dk, 2 L/dk ve 3 L/dk akışkan debileri ile soğutma performansı incelendiğinde, 1 L/dk debi değerinin maksimum batarya sıcaklık farkını 5 °C'nin altında tutmak için yeterli olduğu görülmüştür. Ayrıca akışkan giriş sıcaklıklarının da soğutma performansına etkisi incelenmiştir. 15 °C, 20 °C ve 25 °C giriş

sıcaklıkları, 1C deşarj hızı ve 2 L/dk debi değerine göre çözümlenerek kıyaslanmış ve en düşük batarya sıcaklık farkı değerinin 25 °C giriş sıcaklığında elde edildiği belirtilmiştir.

24 adet 5 Ah kapasitede LFP hücreden oluşan batarya paketinin ısı analizinin yapıldığı sayısal bir çalışmada, sistemin üç boyutlu termal modeli oluşturularak soğutucu plaka ile soğutulması incelenmiştir. Batarya paketi, elektrokimyasal olarak NTGK modeli ile ANSYS Fluent programı kullanılarak modellenmiştir. Zamana bağlı çözüm yapılan modelde, 10 saniye zaman aralığı kullanılarak 5C deşarj hızı ile batarya paketinin simülasyonu yapılmıştır. Soğutma sıvısı olarak su kullanılmış ve akışkan hızı 0,1 m/s ile 2 m/s arasında değişen değerlerde çözümler yapılmıştır. Akışkanın giriş sıcaklığı 10 °C ile 40 °C arasında değişirken ortam sıcaklığı ise 20 °C olarak kabul edilmiştir. Akış modeli Reynold sayısına bağımlı olarak k-ε türbülans modeli seçilmiştir. Ayrıca sınır tabakadaki y^+ değeri ise 0,5 m/s akış hızı için 7,7208 olarak hesaplanmış ve çözüm için uygunluğu belirtilmiştir. Akışkan hızı 0,1 m/s'den 2 m/s'ye çıkarıldığında 5C deşarj hızı şartlarında 24 batarya arasındaki maksimum batarya sıcaklık farkı 5 °C'nin altında tutulmuştur. Maksimum batarya paketi sıcaklığı ise 40 °C'nin altında tutulduğu belirtilmiştir. Akışkan giriş sıcaklığının soğutma performansına etkisini incelemek için sistem, 5C deşarj hızında ve 0,5 m/s akışkan hızında sabit tutularak çözümler yapılmıştır. Sonuç olarak ise 20 °C akışkan giriş sıcaklığı ile bataryalar arası maksimum sıcaklık farkının 4,8 °C olduğu bulunmuştur (Zhang *et al.* 2020).

Bir batarya paketinin ısıl performansı üzerinde şarj/deşarj hızı, ortam sıcaklığı ısıl kaynak karakteristiği ve ısıl kapasitans değerlerinin etkilerini araştırmak için sıvı bazlı bir BTYS deneysel olarak incelenmiştir. Batarya paketinde, her biri 120 Ah kapasiteye sahip 80 adet NCM prizmatik hücre kullanılmıştır. Deneyler, batarya paketinin 195 A ve 120 A değerinde şarjı/deşarjı ile yapılmıştır. Hücreler arasına U-tipi serpantin yapısına sahip soğutucu plakalar yerleştirilerek batarya paketinin ısıl yönetimi sağlanmıştır. Soğutma sıvısı olarak ise %50 karışım oranında su-glikol kullanılmıştır. Batarya modülü üzerinde sıcaklık ölçümleri ısıl çiftler ile 40 farklı noktadan yapılarak kaydedilmiştir. Ortam sıcaklığı -20 °C ile 45 °C arasında belirli sıcaklıklarda sabit tutularak sistem performansına etkileri incelenmiştir. Soğutma sıvısı sıcaklığı ise 15 °C ile 40 °C arasında değiştiği belirtilmiştir. Ayrıca soğutucu plakalardaki akış düzeni ve basınç kaybını optimize etmek için sistemin HAD simülasyonu yapılmıştır. Yapılan simülasyon ile soğutucu plakalardaki akış bölmelerinin optimum açıları belirlenerek en uygun geometrik yapı oluşturulmuştur. Sonuç olarak, sadece batarya yüzeyinde yapılan soğutmanın batarya paketinde istenilen sıcaklık istikrarını sağlayamadığı belirtilmiş ve daldırma yöntemi ile soğutmanın BTYS için gelecekte iyi bir alternatif olacağı vurgulanmıştır (Liu *et al.* 2020).

Al-Zareer *et al.* (2019) çalışmalarında, sıvı propan havuzuna kısmen veya tamamen batırılmış batarya paketinin havuz kaynama ile soğutulmasını ele almışlardır. İşletme sıcaklığı soğutucu akışkanın buharlaşma sıcaklığına geldiğinde buharlaşma gizli ısısından yararlanılarak soğutma gerçekleştirilmektedir. Paketteki silindirik batarya çaplarının katları şeklinde bataryalar arası boşluklar oluşturularak 4 farklı konfigürasyon geliştirilmiş ve modellenmiştir. Bununla birlikte 4C, 5C ve 6C hızlarında şarj/deşarj işlemleri 600 defa tekrarlanarak sayısal veriler elde edilmiş ve analizi yapılmıştır. Model ve simülasyon çalışmaları COMSOL Multiphysics programı kullanılarak yapılmıştır. Sistem, propan doyma sıcaklığı 26,94 °C'ye karşılık gelen 10 bar basınçta çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Sonuç olarak bataryalar arası mesafenin artmasıyla maksimum sıcaklığı düşerken bataryalar arası sıcaklık farkının arttığı gözlemlenmiştir. Bataryalar arası mesafenin en fazla olduğu, yani batarya çapının iki katı olduğu durumda ve 4Cdeşarj hızında maksimum batarya sıcaklığı 30,3 °C olarak ölçülmüştür. Mesafe, batarya çapı kadar ve batarya çapının yarısı kadar olduğu durumlarda ise maksimum sıcaklık sırasıyla 31,5 °C ve 32,6 °C'ye yükselmiştir. Ayrıca batarya şarj/deşarj hızlarının bataryalar arası sıcaklık farkına etkisi incelenirken, şarj/deşarj hızı arttıkça bataryalar arası sıcaklık farkının da arttığı gözlemlenmiştir. Bataryadeşarj hızı 4C'den 5C'ye yükseltildiğinde, propan havuzunun 480 saniye sonra tamamen buharlaştığı görülmüştür. Kaynama simülasyon modeli geliştirilen bu çalışmada, kaynama ile ısı transfer hızı %14,9 ortalama hata payı ile tahmin edilmiştir.

Hirano *et al.* (2014) çalışmalarında, bir batarya modülünün kaynamalı sıvı soğutma ile termal yönetim sistemini incelemiştir. Çalışmada 3,7 V nominal voltaj değerinde ve 1 Ah kapasitesinde prizmatik Li-iyon bataryalar kullanılmıştır. Batarya modülü 10C ve 20C hızlarında şarj vedeşarj edilerek deneyler yapılmıştır. Batarya hücreleri hidrofluoroether ve perfluoroketone sıvısına doğrudan daldırma yöntemi ile soğutulmuştur. Novec7000 ve Novec649 marka iki farklı soğutucu akışkan kullanılmıştır. Bu akışkanlar yüksek elektrik direnci, ateş almaz ve çevre dostu olmaları ile ön plana çıkmaktadır. Ayrıca bu akışkanların kaynama sıcaklıkları sırasıyla 34 °C ve 49 °C olduğu için çalışma sıcaklıklarında faz değişimi yaparak bataryaları etkili soğutmaya imkân sağlamaktadır. Deneysel çalışmada, plastik, mikro fiber ve gözenekli malzeme gibi bataryalar arasına farklı yapıda levhalar uygulanmıştır. Bu ara levhalar soğutucu sıvıya yol oluşturmakla birlikte düzenli kaynamayı da sağlamaktadır. Sonuç olarak, batarya modülü Novec7000 sıvısına tamamıyla daldırılmış halde iken 20C hızındadeşarj sonrasında, sıcaklık 35±2,5 °C değerinde tutulmuştur. Batarya modülünün aynı şartlarda hava ile soğutulması sonucunda ise sıcaklığın 90 °C'ye çıktığı görülmüştür. Batarya modülü yarı hacmine kadar soğutucu akışkana daldırıldığı durumda ise 20Cdeşarj hızında, sıcaklığın

45 °C' ye kadar ulaştığı gözlemlenmiştir. Fakat hücreler arası mikro fiber ayırıcılar kullanılması ile maksimum sıcaklığın 37 °C' ye kadar düşürüldüğü görülmüştür.

Van Gils *et al.* (2014) yaptıkları çalışmada batarya paketini kaynama ile ısı transfer metodunu kullanarak soğutmayı ve kaynama sırasında oluşan basıncın ısı transferine etkisini incelemiştir. Soğutucu akışkan olarak Novec7000 kullanılmıştır. 1 Ah kapasitede silindirik Li-iyon batarya kullanılarak 5C deşarj hızıyla deneyler yapılmıştır. Sistemin atmosfer üstü ve altı basınçlarda tutulmasıyla farklı kaynama yapıları elde edilebildiği görülmüştür. İki aşamada deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş olup birinci aşamada; akışkanın dielektrik özellikleri test edilmiş, atmosfer basıncında deşarj deneyleri yapılarak havaya göre soğutma performansı ölçülmüş ve ani şarj/deşarj ile bataryanın maksimum ısı üretimi sağlanarak soğutma performansı incelenmiştir. İkinci aşamada ise, basınç değişimlerinin kaynamaya etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, kaynama yokken bataryanın pozitif ve negatif kutupları arasında 0,7 °C sıcaklık farkı oluşurken, kaynama başladıktan sonra sıcaklığın homojenize olduğu görülmüştür. Basınç düşürüldüğünde ise kaynama sıcaklığının aniden yükseldiği tespit edilmiştir.

Seri ve paralel bağlı 60 adet NCM811 silindirik Li-iyon bataryadan oluşan modülün kaynamalı akış ile soğutulması gerçekleştirilen çalışmada, soğutucu akışkan olarak HFE-7000 kullanılmıştır. Soğutma sisteminin simülasyonu, ANSYS Fluent programı kullanılarak 6 farklı sınır şartı için gerçekleştirilmiştir. Soğutucu akışkan giriş sıcaklığı 21 °C'de sabit tutulmuş ve 0,03 m/s ile 0,3 m/s arasında değişen akışkan debileri için 1C, 2C, 3C, 4C ve 5C deşarj hızlarında sayısal çözümleme yapılmıştır. Batarya modülünün modellenmesinde 3,46 milyon yapılandırılmış mesh kullanılmıştır. İki fazlı akış çözümlenmesi için RKE türbülans modeli uygulanırken, farklı akışkan debileri için Reynold sayısı 1.875 ile 18.750 arasında değişmektedir. Aynı zamanda çalışmada, sayısal çözümün deneysel doğrulanması da yapılmıştır. Deney setinde batarya modülüne giren HFE-7000 sıvısının sıcaklığı, su banyosuna bağlı bir plakalı ısı değiştiricisi yardımıyla sabit tutulmuştur. Akışkan giriş sıcaklığının 31 °C, deşarj hızının 5C ve ortam sıcaklığının 25 °C olduğu şartlarda, akışkan debisi 0,03 m/s ve 0,3 m/s iken maksimum batarya modülü sıcaklığı sırasıyla 41,57 °C ve 35,12 °C' ye ulaşmıştır. Aynı şartlarda akışkan debisi 0,03 m/s ve 0,3 m/s iken batarya modülü içerisindeki maksimum sıcaklık farkı ise sırasıyla 5,21 °C ve 3,17 °C olarak kaydedilmiştir. Yine belirtilen sınır şartlarında batarya modülündeki kaynama yapısına bakıldığında, deşarj hızı 3C'nin üzerinde iken çekirdek kaynama görülürken, 3C'nin altındaki deşarj hızlarında tek fazlı akış gözlemlenmiştir (Wang and Wu 2020).

Sıvıya daldırma ve sıvı sirkülasyonlu iki yöntemin uygulandığı bir çalışmada, BTYS sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada soğutma sıvısı olarak, 40 nm çapında Al_2O_3 nano partikül katkılı saf su kullanılmıştır. Batarya paketi, 18650 silindirik 7 adet Li-iyon bataryadan oluşmakta olup, soğutma sıvısı ile dolu bir konteynır içerisinde daldırılmıştır. Sıvı sirkülasyonlu yöntem için ise, batarya paketi akışkan giriş ve çıkışına sahip diğer bir konteynıra yerleştirilmiştir. Sıvıya daldırma yöntemi kullanılan batarya paketinin bulunduğu kapalı bir kap, hava sirkülasyonu ile soğutulmuştur. Hava giriş sıcaklığı 30 °C ve deşarj hızı 2C olduğu şartlarda, kapalı kap saf su ile dolu iken maksimum batarya sıcaklığı 40,66 °C, nano akışkan ile dolu iken ise 39,69 °C ölçülmüştür. Hava giriş sıcaklığı 35 °C ve deşarj hızı 2C olduğu durumda ise, saf su ve nano akışkan için maksimum batarya sıcaklıkları sırasıyla 42,85 °C ve 41,90 °C olarak kaydedilmiştir (Jilte *et al.* 2019).

İki fazlı soğutucu akışkan ile Li-iyon bataryaların doğrudan soğutulması incelenen deneysel çalışmada, EV’de kullanılan geleneksel BTYS yöntemleri ile ısıl performans kıyaslaması yapılmıştır. Soğutucu akışkan olarak kullanılan R134a, sprey soğutma yöntemi ile batarya yüzeyine doğrudan püskürtülmüştür. Soğutma kanallarındaki sıcaklık değişimi, batarya sıcaklığı ve batarya hücreleri arasındaki sıcaklık değişimi ölçülerek farklı şarj hızlarında ve çevre şartlarında analizleri yapılmıştır. Bununla birlikte, batarya yaşlanma süresince hücre kapasitesi ve iç direnç değişimleri tahmin edilmiştir. Deney setinde soğutucu akışkanın sirkülasyonu manyetik dişli pompa ile sağlanırken, batarya yüzeyinden aldığı ısı ile buharlaşan akışkan bir ısı değiştiricisi vasıtasıyla sıvılaştırılmıştır. Yapılan çalışmanın diğer bir deney setinde ise, batarya paketi su-glikol karışımı ile dolaylı sıvı soğutmaya tabi tutulmuştur. Çalışmada kullanılan batarya paketi 86,5 Ah kapasiteye ve 4,2 V gerilime sahiptir. Doğrudan sıvı soğutma modülünün dolaylı soğutmaya göre ağırlıkça %56 daha hafif olduğu kaydedilmiştir. Batarya sıcaklıkları her bir hücre yüzeyinden 6 farklı noktadan ısıl çiftler ile ölçülmüştür. Doğrudan sıvı soğutma deneyinde, 0,5C ile 2C arasında değişen şarj hızlarında deneyler yapılmış ve debisi 0,167 kg/s olan akışkanın giriş sıcaklıkları 20 °C, 25 °C, 30 °C ve 35 °C olarak seçilmiştir. İki fazlı akış deneyinde ise, batarya şarj hızı 2C ve akışkan basıncı ise 380 kPa değerlerinde sabit tutulmuştur. Buhar kalitesinin 0,85 olduğu şartlarda, hücreler arası sıcaklık farkı 5 °C’nin altında tutulabilmektedir. Bunun yanı sıra, buhar kalitesi 0,95 olduğu durumda hücreler arası sıcaklık farkı 5 °C’yi geçmiştir. Tüm şartlarda, batarya maksimum sıcaklığı 45 °C’nin altında tutulmuştur. Sonuç olarak, iki fazlı doğrudan soğutma yönteminde, diğer sıvı soğutma yöntemine göre 4,1 °C daha düşük maksimum batarya sıcaklığı değeri elde edilmiştir (Hong *et al.* 2020).

Prizmatik geometride ve LiMn_2O_4 katot malzemesine sahip hücrelerden oluşan batarya paketinin kısmi olarak amonyak havuzuna daldırılması ile hazırlanan bir BTYS'nin COMSOL programı ile simülasyonu yapılmıştır. Bataryanın ürettiği ısıyı absorbe ederek buharlaşan sıvı amonyak, batarya paketinin üst kısmına yükselir ve burada bulunan buhar kollektörü ve basınç regülatörüne yönlendirilir. Simülasyon çözümü için sınır şartı olarak batarya modelinin yüzeyine bir ısı akısı korelasyonu tanımlanmıştır. Buhar fazındaki amonyağın yüzeyde akışı laminer olarak seçilmiştir. Amonyak havuzunun basıncı 9 bar ve buna bağlı yoğunlaşma sıcaklığı ise 21,5 °C olarak belirlenmiştir. Batarya yüzeyinin %5 ile %50'si arasında değişen kısmının kaplandığı havuza daldırma yüksekliğinin, maksimum batarya sıcaklığına nasıl etki ettiği araştırılmıştır. Sonuç olarak daldırma yüksekliği arttıkça maksimum sıcaklık değeri de lineer olmayan şekilde azalış gösterdiği görülmüştür. Ayrıca daldırma yüksekliğinin bataryadaki sıcaklık dağılımına etkisi de araştırılmıştır. Batarya yüzeyinin %5'inin kaplandığı daldırma yüksekliğinde, maksimum sıcaklık farkı 13,6 °C iken daldırma yüksekliği artırıldıkça sıcaklık farkı azalmaktadır. Daldırma yüksekliği %5'ten %50'ye çıkarıldığında ise ortalama batarya sıcaklığı 33 °C'den 27,5 °C'ye düştüğü tespit edilmiştir (Al-Zareer *et al.* 2018).

Al-Zareer *et al.* (2020) yaptıkları diğer bir sayısal çalışmada, 18650 tip silindirik hücrelerden oluşan bir batarya paketinin buharlaşan sıvı havuzunda soğutulmasını incelemişlerdir. Soğutucu akışkan olarak, 7,7 bar yoğunlaşma basıncına karşılık gelen 30 °C yoğunlaşma sıcaklığındaki R134a kullanılmıştır. Batarya paketinin şarjı/deşarjı ile ürettiği ısıdan kaynaklanan sıcaklık artışı, soğutucu akışkanın yoğunlaşma sıcaklığına geldiğinde, akışkan buharlaşırken bataryalar da soğumaktadır. Batarya paketinde hücrelerin yerleşimi iki farklı durumda yapılarak incelenmiştir. Birincisinde hücreler arası bir batarya yarı çapı kadar, diğerinde ise iki farklı yön için batarya yarıçapının %10'u ve %20'si kadar mesafe belirlenmiştir. 6C, 7C ve 8C şarj/deşarj hızlarında COMSOL programı kullanılarak BTYS'nin simülasyonu yapılmıştır. Batarya paketinin %20'sinin akışkan havuzuna daldırıldığı durumda belirtilen şarj/deşarj hızlarında maksimum batarya sıcaklıkları sırasıyla 37,6 °C, 40,0 °C ve 42,9 °C olarak bulunmuştur. Daldırma oranı %80'e çıkarıldığında ise maksimum sıcaklıklar sırası ile 32,6 °C, 33,5 °C ve 35,0 °C değerlerine düşmüştür. 8Cdeşarj hızında batarya ortalama sıcaklıklarına bakıldığında, %20, %40, %60 ve %80 daldırma yükseklikleri için sırasıyla 1,4 °C, 1,6 °C, 1,4 °C ve 1,2 °C değerinde sıcaklık düşüşü gözlemlenmiştir. Ayrıca, maksimum soğutma performansının sağlandığı %80 daldırma oranına göre, sistemin gerçek sürüş şartlarındaki simülasyonu da yapılmıştır. Batarya paketindeki maksimum sıcaklık değişkenliği 4 °C'ye kadar çıkarken, maksimum paket sıcaklığı ise 35 °C olarak hesaplanmıştır.

Huo and Rao (2015) silindirik batarya paketlerindeki BTYS için soğutma performansının iyileştirilmesine yönelik sayısal bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, Lattice Boltzmann metodu kullanılarak BTYS modellenmiş ve Al_2O_3 -su karışımı nano akışkan ile batarya modülü soğutulmuştur. Lattice Boltzmann metodunda, momentum ve kütle korunum denklemleri ile enerji korunum denklemi birleştirilerek yeni bir fonksiyon tanımlanmaktadır. Nano akışkan, 47 nm boyutlu Al_2O_3 parçacıkların saf su ile 0,01 ile 0,04 aralığındaki hacimsel oranlarda karıştırılması ile dört farklı türde hazırlanmıştır. Batarya modülü, bu dört nano akışkan ve saf su ile soğutularak performans iyileşmesi kıyaslanmıştır. Nano partiküllerin hacimsel oranı 0,01'den 0,04'e yükseldiğinde Nusselt sayısının 6,292'den 6,111'e düştüğü görülmüştür. 5 adet silindirik hücrenin seri bağlanması ile oluşturulan modülde, saf su ile soğutulduğunda maksimum boyutsuz batarya sıcaklığı 0,855'e kadar yükseldiği görülmüştür. 0,01 hacimsel oranlı karışımda bu değer 0,848'e düşerken, 0,04 hacimsel oranlı karışımda ise 0,795 değerine düşmüştür. Bataryalardaki sıcaklık dağılımlarına bakıldığında ise, akışkan girişindeki hücreden son hücreye kadar maksimum boyutsuz batarya sıcaklıkları sırasıyla 0,830, 0,955, 1,012, 1,048 ve 1,047 bulunmuştur. Ayrıca farklı Reynold sayılarında batarya modülünün soğutma performansı da incelenmiştir. Saf su ve 0,01 ile 0,03 oranlı nano akışkan kullanılan çözümlerde, Reynold sayısı 20'den 80'e kadar arttığında maksimum batarya sıcaklığı düşerken, Reynold sayısı 80'i geçtiği durumlarda ise azalma eğilimine geçmiştir. 0,04 oranlı nano akışkanda ise sıcaklık eğilimindeki bu değişim Reynold sayısı 60 olduğunda gerçekleşmiştir.

Gao *et al.* (2019) açık devre acil durum ısı yönetim metodu kullanarak EV bataryalarını ısı sürüklenmelere karşı korumayı amaçlayan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Soğutucu akışkanın doğrudan batarya yüzeyine püskürtülmesi ile bataryanın soğutulması deneysel olarak incelenmiştir. Soğutucu akışkan olarak kullanılan R410A, 4 mm çapındaki iki adet püskürtücü ile batarya yüzeyine püskürtülerek soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Püskürtücü çapı ise soğutucu akışkanın batarya yüzeyine ulaşmadan buharlaşmasını minimize etmek için uygun şekilde seçilmiştir. 20 Ah kapasitede prizmatik LFP batarya kullanılan çalışmada, batarya sıcaklık homojenliğini maksimum seviyede tutmak için farklı sprej pozisyonları denenmiştir. Bununla birlikte sürekli ve fasıllı sprej yöntemlerinin uygulanması ile, soğutma karakteristiği ve ortamdaki oksijenin baskılanma performansı incelenmiştir. Farklı sürelerde sürekli sprej uygulamaları, farklı ve sabit fasıla sürelerinde fasıllı sprej uygulamaları ve değişken fasıla sürelerinde fasıllı sprej uygulamaları gibi farklı durumlar seçilerek 12 durum için deneyler yapılmıştır. 0,2 saniye sabit fasıla aralığında minimum batarya sıcaklığına ulaşılmıştır. Ayrıca sprej frekansı artırıldıkça batarya kutusundaki oksijen konsantrasyonunun da azaldığı

gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, sürekli sprej ile soğutmanın, fasılalı sprej ile soğutmaya göre maksimum batarya sıcaklık farkı bakımından daha performanslı olduğu gözlemlenmiştir.

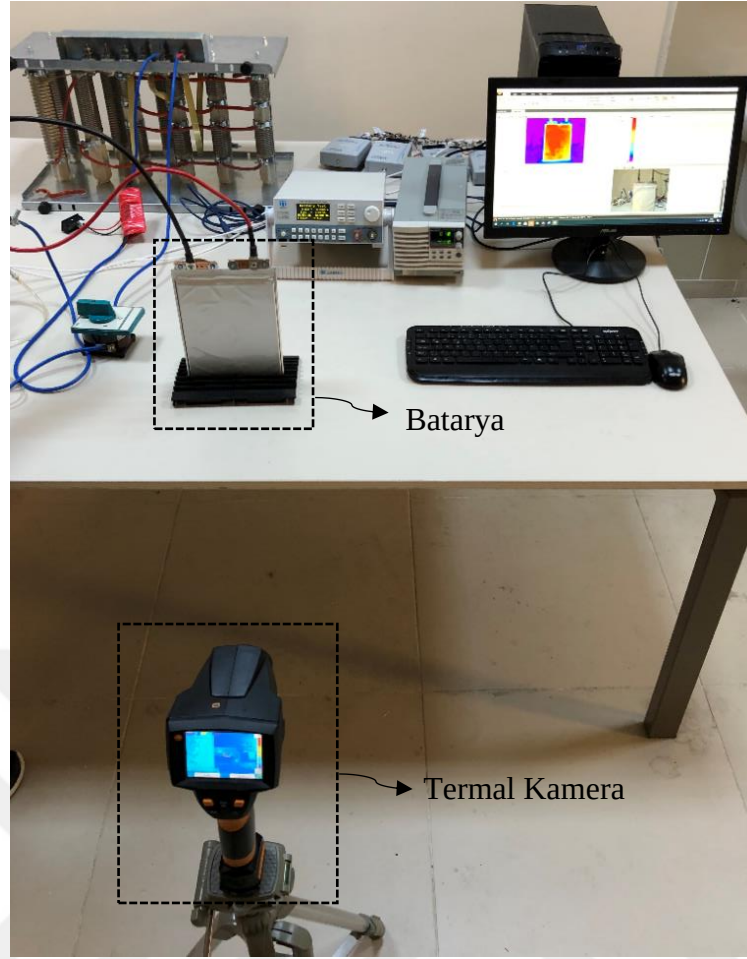
Bu çalışmada, 20 Ah kapasiteye sahip bir torba tip LFP bataryanın hava ve sıvı ile soğutulması deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bataryanın hava ile soğutulması doğal taşınım şartlarında gerçekleştirilmiş olup termal görüntüleme tekniği ile batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımı ve bataryanın ısı performansını incelenmiştir. Çalışmanın bu bölümü sonunda, bataryanın ısı üretim miktarının tahmini için farklı bağımsız değişkenlere bağlı korelasyon denklemi türetilmiştir. Daha önce literatürde bu batarya için doğal taşınım şartlarında ısı üretimi ile ilgili korelasyon denklemi türetilmemiş olup bataryanın deşarjı sırasında bataryadan transfer edilen ısı yükünü, deşarj oranına ve bataryadan çekilen akıma bağlı olarak hesaplanabilmesi amacıyla bir denklem literatüre sunulmuştur. LFP bataryanın sıvı ile soğutulması çalışmasında iki tip soğutucu plaka kullanılmıştır. Bunlardan birisi geleneksel serpantinli soğutma plakası, diğeri ise yeni bir tasarıma sahip mini kanallı soğutma plakasıdır (MKSP). Literatürde hem serpantinli hem de mini kanallı plakalara ait batarya soğutma çalışmaları bulunmakla birlikte bu iki tip soğutma plakasının farklı çalışma şartlarındaki performansları detaylı olarak kıyaslanarak incelenmemiştir. Bu çalışmada, iki tip plakanın soğutma performansları deneysel ve sayısal olarak incelenerek karşılaştırılmış, MKSP ile elde edilen soğutma performansındaki iyileşmeler irdelenmiştir. Bunlara ek olarak, MKSP'nin kanal tasarımının ve plaka içerisinde devridaim ettirilen soğutma sıvısının debisinin optimizasyonu yapılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

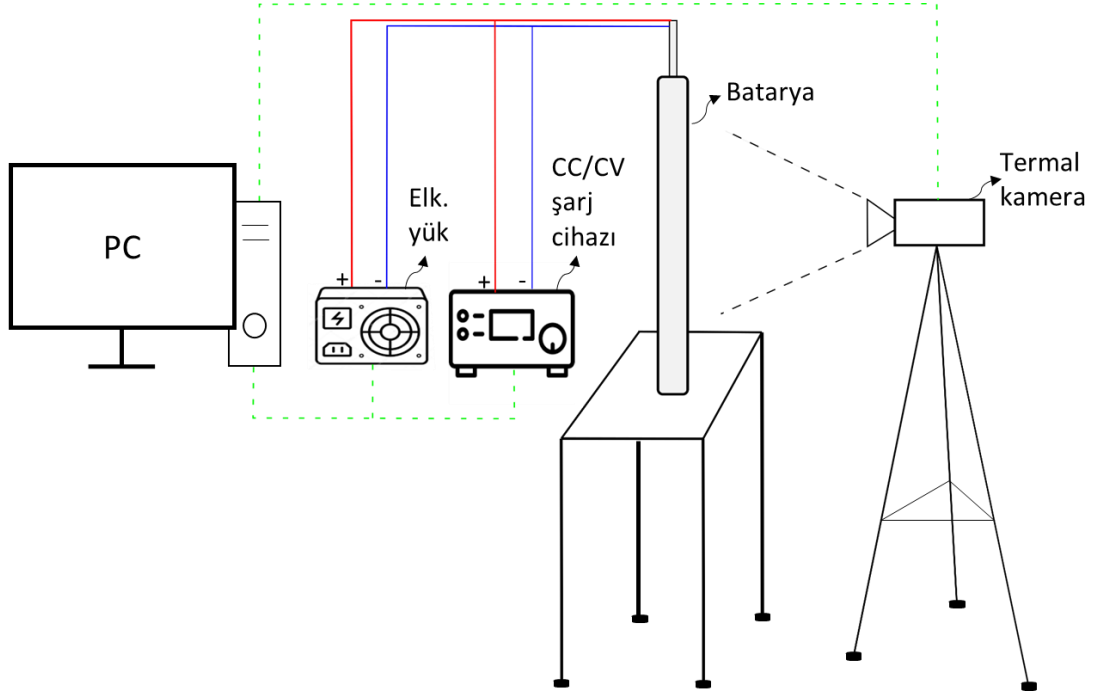
Bu çalışmada, 20 Ah kapasiteye sahip bir torba tip LFP bataryanın ilk olarak doğal taşınım şartlarında ısı performansını termal görüntüleme tekniği ile incelenmiştir. Sonrasında bataryanın doğal taşınım ile soğutulmasının sayısal modeli oluşturulmuştur. Bununla birlikte bataryanın sıvı soğutma yöntemi ile ısı yönetimi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sıvı soğutma yönteminde iki tip soğutucu plaka kullanılmıştır. Bunlardan birincisi, serpantinli soğutucu plaka (SSP), ikincisi ise mini kanallı soğutucu plakadır (MKSP). İki farklı plakanın bataryayı soğutma performansları farklı çalışma şartlarında deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Ayrıca yeni tasarıma sahip MKSP'nin Yüzey Yanıt Yöntemi (YYY) kullanılarak farklı kanal yapılarında sayısal çözümleri yapılmış ve optimum kanal yapısı belirlenmiştir.

Hava ile Soğutmada Kullanılan Deneysel Yöntem

20 Ah kapasitedeki LFP bataryanın, 23 °C ortam sıcaklığındaki doğal taşınım şartlarında, 1C, 2C, 3C, 4C ve 5C hızlarında deşarj süresince yüzey sıcaklıkları termal kamera ile görüntülenmiştir. Şekil 17'de gösterilen düzenekte, Tablo 4' te teknik özellikleri verilen Testo 875 marka cihaz kullanılarak termal görüntüleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 18'de ise deney sisteminin şematik gösterimi verilmiştir. Bu yöntem ile batarya yüzeyindeki bölgesel sıcaklık farkları ve bunun zamana bağlı değişimi de görüntülenmiş bulunmaktadır. Batarya her deneyden önce doğrusal (DC) güç kaynağı kullanılarak sabit akım sabit voltaj (CC/CV) metodu ile tam şarj edilmiştir. Bataryanın deney süresince deşarj işlemi ise elektronik yük cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Deşarj süresince bataryanın voltaj ve akım değerleri, elektronik yük cihazı ve cihazın bilgisayar yazılımı ile kaydedilebilmektedir. Batarya tam dolu halde 3,65 V gerilime sahipken deşarj süresince elektrotlar arası elektron transferi olduğundan gerilimi giderek düşmekte ve deşarj kesme voltajı olarak üretici firma tarafından tavsiye edilen 2 V gerilim değerinde deşarj işlemi sonlandırılmaktadır.



Şekil 17. Termal kamera ile görüntüleme deney düzeneği



Şekil 18. Termal kamera ile görüntüleme deney setinin şematik gösterimi

- Yüzeyde oluşan radyasyon ile ısı transferi ihmal edilmiştir.
- Batarya yüzeyindeki sınır tabakada Boussinesq yaklaşımı geçerli kabul edilmiştir. Bununla birlikte kaldırma kuvveti formülasyonundaki havanın, sıcaklığa bağlı fiziksel özelliklerinin değişmediği varsayılmıştır.
- Başlangıç şartında batarya yüzeyi homojen sıcaklık dağılımına sahiptir.

Bu kabuller altında batarya yüzeyindeki sınır tabakanın çözümlenmesinde kullanılacak olan enerji korunum denklemi, momentum korunum denklemi ve süreklilik denklemi aşağıdaki gibidir (Merkin and Pop 1996).

Enerjinin korunumu denklemi:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (3)$$

Momentumun korunumu denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = g\beta(T - T_{\infty}) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4)$$

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

Korunum denklemlerinin (3-5) çözümü için belirlenen başlangıç ve sınır şartları aşağıda verilmiştir:

Başlangıç şartları:

$$u(x, y, 0) = 0; T(x, y, 0) = T_{\infty}; \{0 \leq x < \infty, 0 \leq y < \infty\} \quad (6)$$

Sınır şartları:

$$u(x, 0, t) = 0; u(x, \infty, t) = 0; \frac{\partial u}{\partial y}(x, \infty, t) = 0; \{0 \leq x < \infty, t > 0\} \quad (7)$$

$$T(x, 0, t) = T_y; T(x, \infty, t) = T_{\infty}; \frac{\partial T}{\partial y}(x, \infty, t) = 0; \{0 \leq x < \infty, t > 0\} \quad (8)$$

Yukarıda verilen denklemlerimdeki parametrelerin boyutsuzlaştırma işleminden sonra Rayleigh sayısı, Grashof ve Prandtl sayılarının çarpımı olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Bergman *et al.* 2011).

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_y - T_{\infty})L^3}{\nu\alpha} \quad (9)$$

Dikey plakaların yüzeyinde gerçekleşen doğal taşınım ile ısı transferi uygulamalarında kullanılmak üzere Churchill and Chu (1975) tarafından geliştirilen aşağıdaki ampirik korelasyon, batarya yüzeyindeki doğal taşınım ile ısı transferi hesaplamaları için de kullanılmıştır.

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \right\}^2 \quad (10)$$

23 °C ortam sıcaklığında doğal taşınım ile deneysel olarak soğutulan bataryadan, çevre havaya transfer edilen ısı transfer hızını ($\dot{Q}_{t,\zeta}$) hesaplamak için aşağıda verilen Newton'un soğuma yasası denklemi kullanılmıştır.

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_L L}{k} \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{t,\zeta} = \bar{h}A_s(T_y - T_\infty) \quad (12)$$

Burada; $\bar{h}$ ortalama ısı taşınım katsayısını, k havanın ısı iletim katsayısını, A_s bataryanın yüzey alanını, T_y bataryanın ortalama yüzey sıcaklığını ve T_∞ ise durgun ortam havasının sıcaklığını belirtmektedir.

Farklı çalışma şartlarında batarya yüzey sıcaklıklarındaki homojenliği belirlemek için Θ boyutsuz sayısı tanımlanmış olup homojenlik indeksi olarak adlandırılabilir. Bu sayı şöyle hesaplanmaktadır:

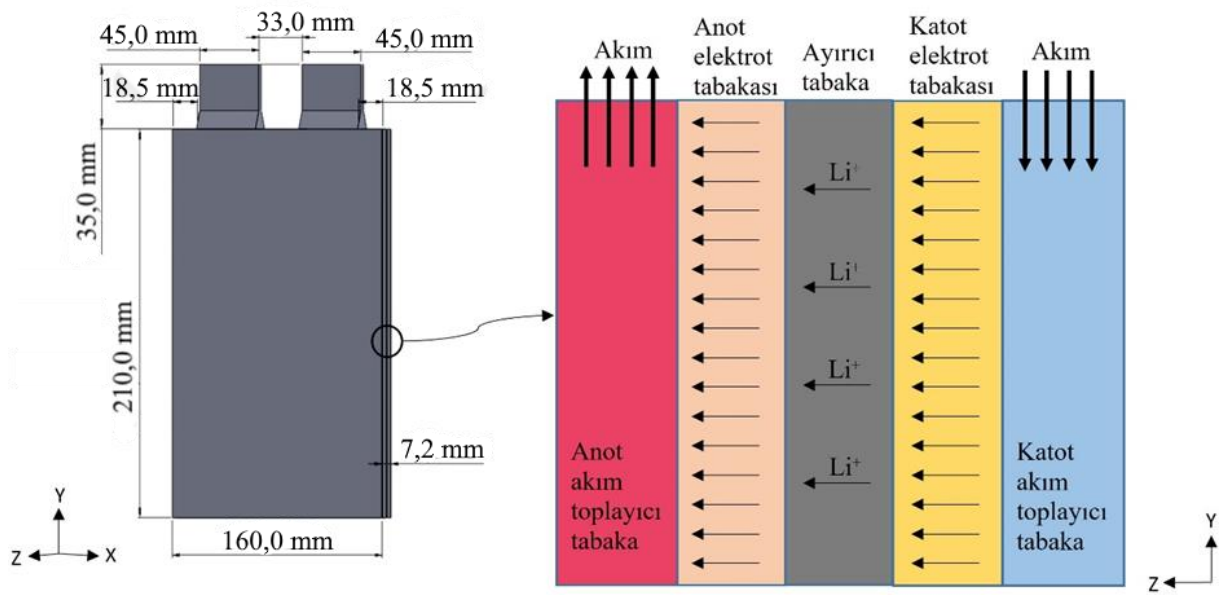
$$\Theta = \frac{T_{maks} - T_{min}}{T_{min}} \quad (13)$$

Burada; T_{maks} batarya yüzeyindeki deşarj sonunda ulaşılan maksimum sıcaklık, T_{min} ise batarya yüzeyindeki deşarj sonunda ulaşılan minimum sıcaklıktır.

LFP bataryanın elektrokimyasal-termal birleşik modeli

Soğutma deneylerinde kullanılan Li-iyon bataryanın modeli; anot (negatif) elektrot tabakası, katot (pozitif) elektrot tabakası, anot akım toplayıcı, katot akım toplayıcı, ayırıcı tabaka, anot ucu ve katot ucu olmak üzere 7 bölgeden oluşmaktadır. Hücrenin, pozitif elektrot, negatif elektrot, pozitif akım toplayıcı, negatif akım toplayıcı ve ayırıcı tabakadan oluşan kısımları aktif materyal olarak tanımlanmıştır. Hücre 3,2 V nominal voltaja ve 20 Ah nominal kapasiteye sahiptir. Modelde kullanılan pozitif ve negatif aktif materyalleri sırasıyla $LiFePO_4$ ve grafit olarak belirlenmiştir. Pozitif akım toplayıcı tabaka malzemesi olarak alüminyum, negatif akım toplayıcı tabaka malzemesi olarak da bakır seçilmiştir.

Bir batarya hücresinin doğru modellenmesi için, bataryanın konfigürasyonu, geometrisi, fiziksel ve elektrokimyasal özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmadaki bataryanın elektrokimyasal modelinde hücre, anot, katot ve ayırıcılar homojen tabakalardan oluşan bir sandviç yapı olarak karakterize edilmiştir. Hücre birimi içindeki akım, sandviç yapıya dik olan düzlem yönünde Şekil 20’de gösterildiği gibi hareket eder. Sandviç yapıya paralel akım ise ihmal edilebilir düzeydedir. Bu nedenle, negatif elektrot, ayırıcı ve pozitif elektrot dahil olmak üzere her yerel hücre birimi, elektrokimyasal reaksiyonları simüle etmek için tek boyutlu (1D) olarak kabul edilir. Pozitif elektrot, LiFePO₄ aktif malzeme partiküllerini içermektedir. Negatif elektrot ise aktif grafit partiküllerini içermektedir. Bununla birlikte, ayırıcı tabaka iki elektrot arasında bariyer oluşturan gözenekli bir polimer membran yapıdadır.



Şekil 20. Batarya elektrokimyasal model yapısının şematik görünümü

Bataryanın elektrokimyasal ve termal birleşik modeli MSMD (Multi-Scale Multi-Domain) yaklaşımı kullanılarak oluşturulmuştur. Li-iyon bataryaların şarjı/deşarjı sırasında kendi içerisinde birçok farklı fiziksel eylem gerçekleştiğinden modellenmeleri zordur. MSMD yaklaşımına (Kim *et al.* 2011) ait aşağıdaki diferansiyel eşitlikler HAD analizi ile çözülmüştür.

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \sigma_+ |\nabla \varphi_+|^2 + \sigma_- |\nabla \varphi_-|^2 + \dot{q}_{EKI} + \dot{q}_{KDI} + \dot{q}_{TKI} \quad (14)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_+ \nabla \varphi_+) = -(\dot{j}_{EKI} - \dot{j}_{KDI}) \quad (15)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_- \nabla \varphi_-) = \dot{j}_{EKI} - \dot{j}_{KDI} \quad (16)$$

Burada; ρ , yoğunluk; C_p , özgül ısı; T , sıcaklık; k , ısı iletim katsayısı; σ_+ ve σ_- pozitif ve negatif elektrotların etken elektrik iletkenlikleri; φ_+ ve φ_- pozitif ve negatif elektrotların

faz potansiyelleri; j_{EKI} , elektrokimyasal ısı kaynaklı akım transfer hızı; $\dot{q}_{EKI}$, elektrokimyasal reaksiyonlar kaynaklı ısı üretim hızı, j_{KDI} , kısa devre kaynaklı akım transfer hızı; $\dot{q}_{KDI}$, kısa devre kaynaklı ısı üretim hızı ve $\dot{q}_{TKI}$, termal kaçak kaynaklı ısı transfer hızıdır.

Batarya içerisinde kısa devre olmadığı ve termal kaçağın olmadığı normal durumlarda $\dot{q}_{KDI}$, $\dot{q}_{TKI}$ ve j_{KDI} sifıra eşittir. j_{EKI} ve $\dot{q}_{EKI}$ ise NTGK (Newman, Tiedemann, Gu, and Kim) alt modeli kullanılarak çözülmüştür.

NTGK modeli

NTGK modeli, Kwon *et al.* (2006) tarafından basit bir yarı ampirik elektrokimyasal model olarak sunulmuştur. Model formülasyonunda, Eşitlik (15) ve (16)'daki hacimsel akım transfer hızı (j_{EKI}), aşağıdaki cebirsel denklem aracılığıyla potansiyel alanla ilişkilendirilmiştir.

$$j_{EKI} = \alpha Y [U - (\varphi_+ - \varphi_-)] \quad (17)$$

Burada; α , elektrot sandviç tabakasının özgül alanı; Y ve U ise model parametreleridir. Bu parametreler, aşağıda denklemi verilen deşarj oranının (DoD) bir fonksiyonudur.

$$DoD = \frac{V_b}{3600 Q_{Ah}} \left(\int_0^t j \, dt \right) \quad (18)$$

Burada; V_b , bataryanın hacmi, Q_{Ah} ise toplam batarya kapasitesidir.

Y ve U model parametreleri aşağıda ifade edildiği gibi bir bataryanın akım-voltaj grafiğine eğri uydurulması ile elde edilen polinom denklemleridir.

$$U = \left(\sum_{n=0}^5 a_n (DoD)^n \right) - C_2 (T - T_{ref}) \quad (19)$$

$$Y = \left(\sum_{n=0}^5 b_n (DoD)^n \right) \exp \left[-C_1 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (20)$$

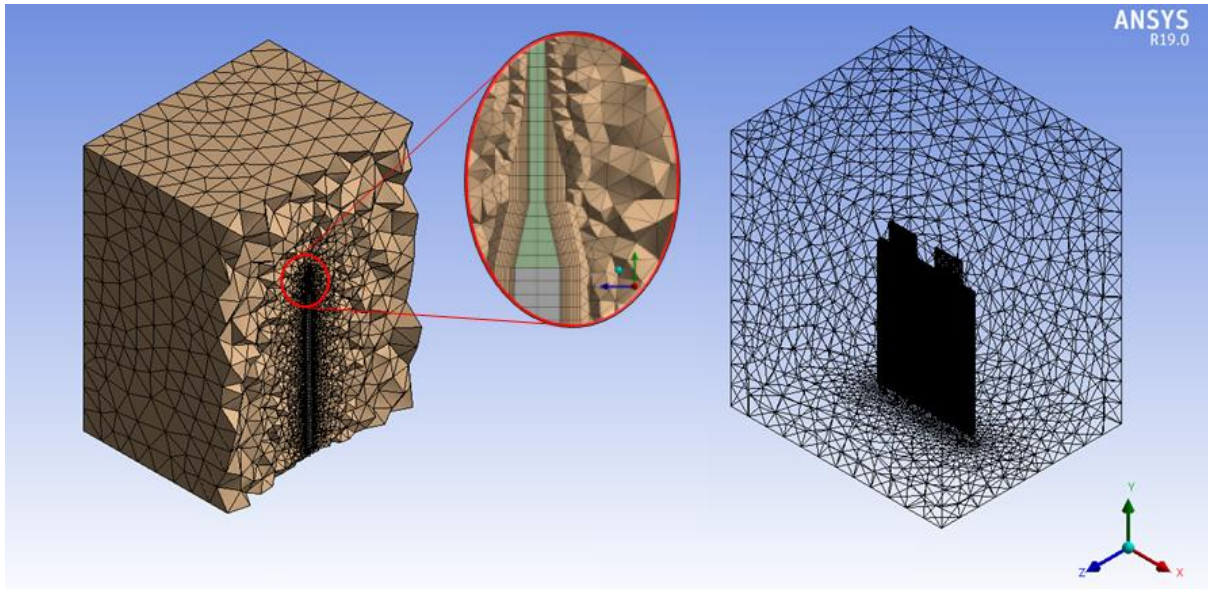
Burada; C_1 ve C_2 batarya NTGK modeli sabitleri, T_{ref} ise referans sıcaklığıdır. LFP batarya için U ve Y fonksiyonları Zhang *et al.* (2020) tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$U = 3,6 - 0,804(DoD) + 1,075(DoD)^2 - 1,177(DoD)^3 + 0,00095(T - T_{ref}) \quad (21)$$

$$Y = [1168,59 - 8928(DoD) + 52504,6(DoD)^2 - 136231(DoD)^3 + 158531,7(DoD)^4 - 67578,5(DoD)^5] \exp \left[-1800 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (22)$$

Mesh analizi ve sayısal çözüm

Akış ve enerji denklemlerinin sonlu hacimler metodu ile çözümü için oluşturulan modelin, Şekil 21’de gösterildiği gibi hibrit mesh yapısı kullanılarak çözüm ağı oluşturulmuştur. Batarya yüzey sıcaklığının ve bataryadan çekilen ısı transfer hızının mesh sayısına göre değişimi baz alınarak, modelin mesh bağımsızlık analizi yapılmıştır. Bataryanın 5C hızı ile deşarjı sonunda ulaşılan ortalama batarya sıcaklıklarının ve bataryadan çekilen ısı transfer hızının mesh sayısına göre değişimi Tablo 5’te verilmiş olup, 802682 mesh sayısına sahip modelin ortalama batarya sıcaklığı ve ısı transfer hızı sonuçlarında sırasıyla %0,10 ve %0,39 bağıl hata oranına sahip olduğu görülmüştür.

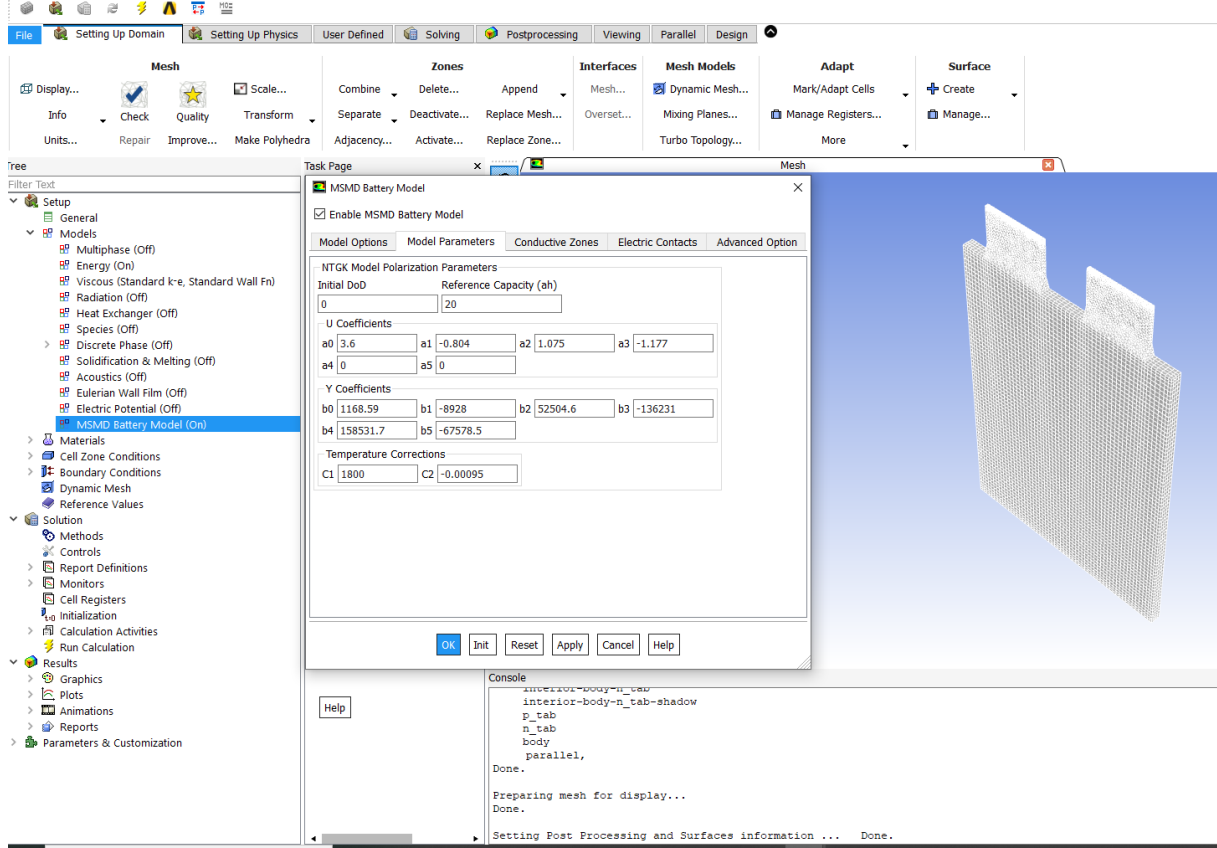


Şekil 21. Batarya ve çevre hava modelinin mesh yapısı

Tablo 5. Mesh bağımsızlık analizi

Mesh sayısı	Ortalama batarya sıcaklığı (°C)	Bağıl hata oranı (%)	Isı transfer hızı (W)	Bağıl hata oranı (%)
269460	54,38	12,32	9,96	20,48
429104	47,68	3,44	7,92	2,90
802682	49,32	0,10	7,69	0,39
1431871	49,27	0,43	7,66	0,91
2108169	49,48	-	7,73	-

Oluşturulan modelde belirtilen başlangıç ve sınır şartlarına göre bataryanın doğal taşınım şartlarında soğutulmasının sayısal çözümü ANSYS-Fluent paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 22’de NTGK model parametrelerinin girildiği Fluent programına ait ekran görüntüsü verilmiştir. Ayrıca batarya modelinde kullanılmak üzere batarya bileşenlerinin fiziksel özelliklerini belirleyen parametreler Tablo 6’da verilmiştir.



Şekil 22. Fluent programı ile NTGK modeli oluşturulmasının ekran görüntüsü

Tablo 6. Batarya bileşenlerinin fiziksel özellikleri (Panchal et al. 2017).

Özellik	Değer	Birim
Pozitif elektrot kalınlığı	183	μm
Negatif elektrot kalınlığı	100	μm
Ayırıcı tabaka kalınlığı	52	μm
Pozitif elektrotun referans difüzyon katsayısı	1e-13	m^2/s
Negatif elektrotun referans difüzyon katsayısı	3,9e-14	m^2/s
Pozitif elektrotun elektrik iletkenliği	3,8	S/m
Negatif elektrotun elektrik iletkenliği	100	S/m
Pozitif terminal yoğunluğu	2719	kg/m^3
Negatif terminal yoğunluğu	8978	kg/m^3
Aktif materyal yoğunluğu	2092	kg/m^3
Pozitif terminal özgül ısısı	871	J/kg.K
Negatif terminal özgül ısısı	381	J/kg.K
Aktif materyal özgül ısısı	678	J/kg.K
Pozitif terminal ısı iletim katsayısı	202	W/m.K
Negatif terminal ısı iletim katsayısı	387,6	W/m.K
Aktif materyal ısı iletim katsayısı	18,2	W/m.K
Minimum durma voltajı	2	V
Maksimum durma voltajı	3,6	V
Nominal hücre kapasitesi	20	Ah

Sıvı ile Soğutmada Kullanılan Deneysel Yöntem

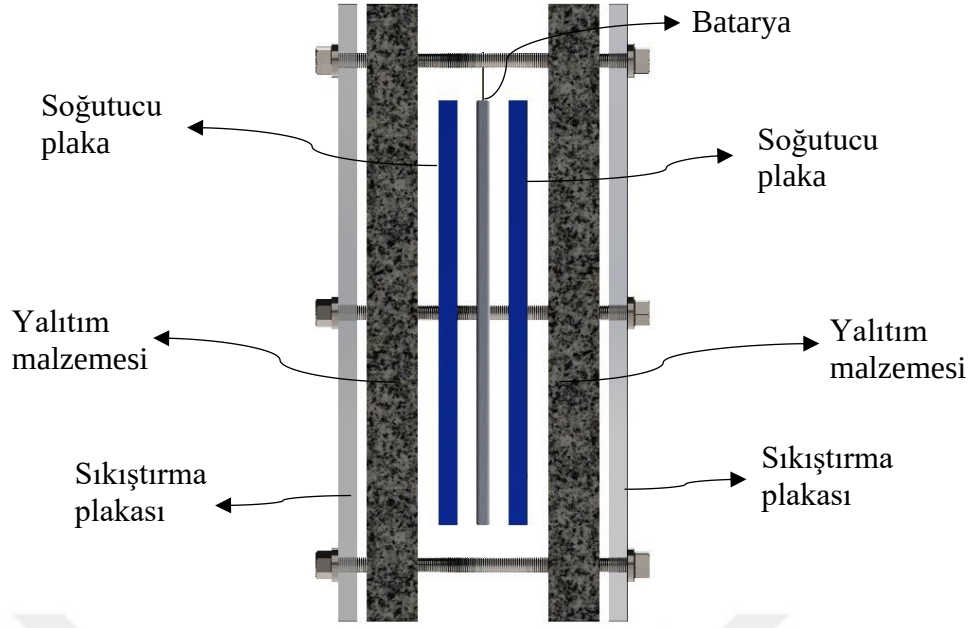
Sıvı soğutma deneyleri iki farklı tipteki soğutucu plakalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Soğutma sıvısı olarak su kullanılmıştır. Sıvı soğutma deneylerinin hangi şartlarda yapıldığı Tablo 7’de verilmiştir. Tüm deneylerde, batarya yüzeyindeki dokuz farklı noktanın sıcaklığı, su giriş ve çıkış sıcaklıkları, su debisi ve soğutucu plakalarda meydana gelen basınç düşümü parametrelerinin ölçümü yapılmıştır. Yapılan deneysel ölçümler kullanılarak maksimum batarya sıcaklığı, ortalama batarya sıcaklığı, batarya yüzeyindeki maksimum sıcaklık farkı ve bataryadan transfer edilen ısı güç hesaplanmıştır.

Tablo 7. Deneysel çalışma şartları

Deney no	Plaka tipi	Su debisi (L/dk)	Su giriş sıcaklığı (°C)	Deşarj hızı
1-5	SSP	0,1	15	1C-5C
6-10	SSP	0,6	15	1C-5C
11-15	SSP	1,1	15	1C-5C
16-20	SSP	0,1	25	1C-5C
21-25	SSP	0,6	25	1C-5C
26-30	SSP	1,1	25	1C-5C
31-35	SSP	0,1	35	1C-5C
36-40	SSP	0,6	35	1C-5C
41-45	SSP	1,1	35	1C-5C
46-50	MKSP	0,1	15	1C-5C
51-55	MKSP	0,6	15	1C-5C
56-60	MKSP	1,1	15	1C-5C
61-65	MKSP	0,1	25	1C-5C
66-70	MKSP	0,6	25	1C-5C
71-75	MKSP	1,1	25	1C-5C
76-80	MKSP	0,1	35	1C-5C
81-85	MKSP	0,6	35	1C-5C
86-90	MKSP	1,1	35	1C-5C

Batarya test bölgesinin oluşturulması

Şekil 23'te patlatılmış şematik düzeni gösterilen batarya test bölgesi; batarya, soğutucu plakalar, ısıl çiftler, yalıtım malzemesi ve sıkıştırma plakasından oluşmaktadır.



Şekil 23. Batarya test bölgesinin patlatılmış şematik görünümü

Yapılan deneylerde kullanılan ve Şekil 24’te gösterilen LFP torba tip bataryaya ait özellikler Tablo 8’de verilmiştir.

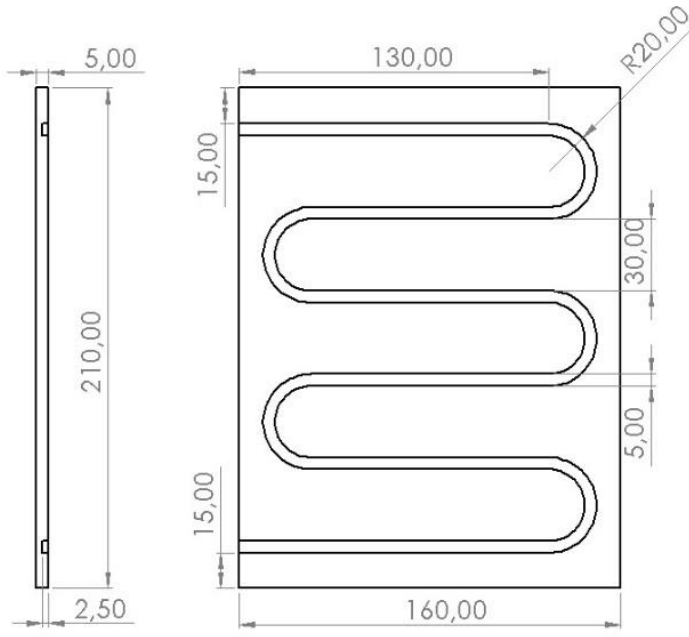


Şekil 24. Soğutma deneylerinde kullanılan torba tip batarya

Tablo 8. Soğutma deneylerinde kullanılan bataryaya ait özellikler (Panchal et al. 2017)

Parametreler	Değer
Marka/model	A123 Systems/AMP20
Katot malzemesi	LiFePO ₄
Anot malzemesi	Grafit
Elektrolit malzemesi	Karbon bazlı
Nominal kapasite	20 Ah
Deşarj gücü	1200 W
Özgül enerji	471600 J/kg
Özgül güç	2400 W/kg
Nominal enerji	65 Wh
Enerji yoğunluğu	889,2 J/m ³
Nominal voltaj	3,3 V
Şarj kesme voltajı	3,65 V
Deşarj kesme voltajı	2 V
Çalışma sıcaklığı	-30 °C – 55 °C
İç direnç	5e-4 Ω
Çevrim ömrü	Minimum 300, yaklaşık 2000 çevrim
Ağırlık	496 g
Ölçüler	7,2 x 160 x 227 mm

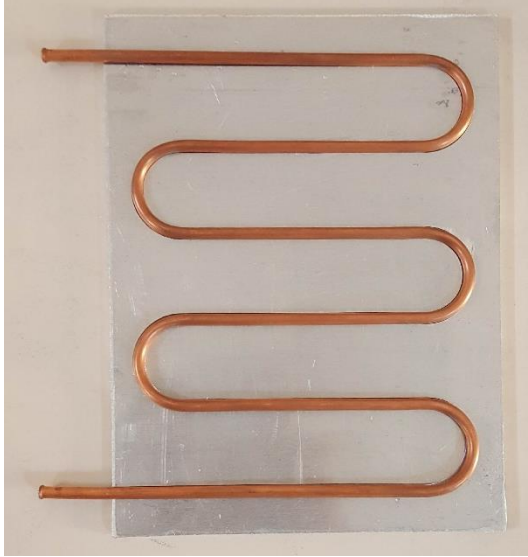
Serpantinli soğutucu plakalar (SSP), Şekil 25-a'da gösterildiği gibi ölçülendirilerek tasarlanmış ve üretilmiştir. Soğutucu plaka oluşturulurken kanal içlerindeki oluşabilecek boşluklardan meydana gelecek olan ısı dirençleri ortadan kaldırmak için kanallar, Şekil 25-b'de görüldüğü gibi termal macun ile kaplanmıştır. Şekil 25-c' de görüleceği üzere serpantin kanalı açılmış alüminyum levhalara bakır borular yerleştirilmiş ve Şekil 25-d'de görüldüğü gibi soğutucu plakalar oluşturulmuştur.



(a)



(b)



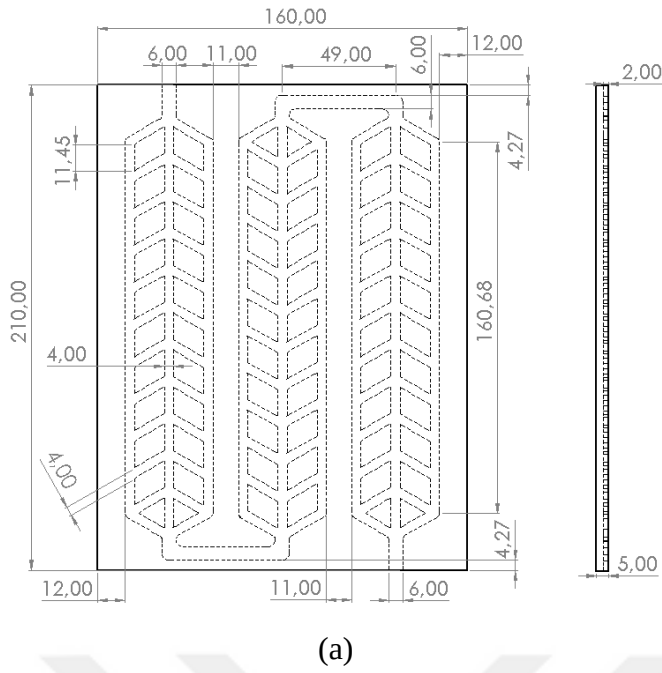
(c)



(d)

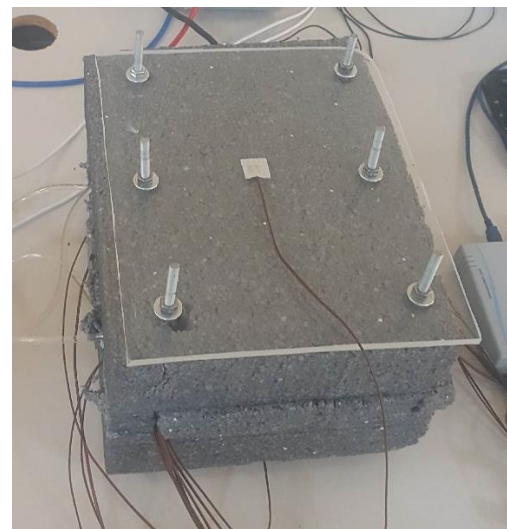
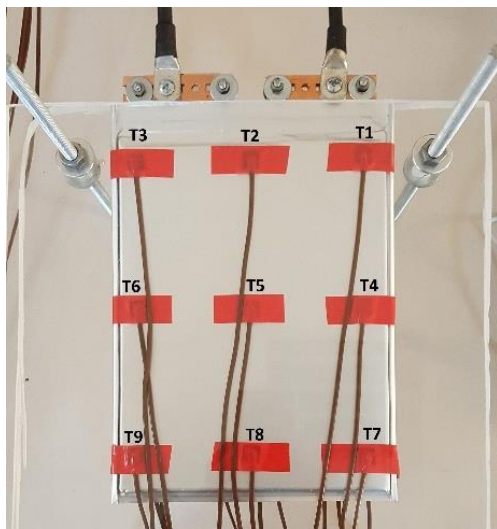
Şekil 25. Alüminyum levhadaki a) plaka ölçüleri (mm), b) kanallarının termal macunla kaplanması, c) serpantin borunun yerleştirilmesi ve d) serpantinli soğutucu plakanın oluşturulması

Yeni tasarıma sahip mini kanallı soğutucu plakalar (MKSP) ise Şekil 26'da gösterildiği gibi ölçülendirilerek tasarlanmış ve üretilmiştir.



Şekil 26. Yeni mini kanal tasarımına sahip soğutucu plakanın a) ölçülendirilmesi (mm) ve b) kesit görünümü

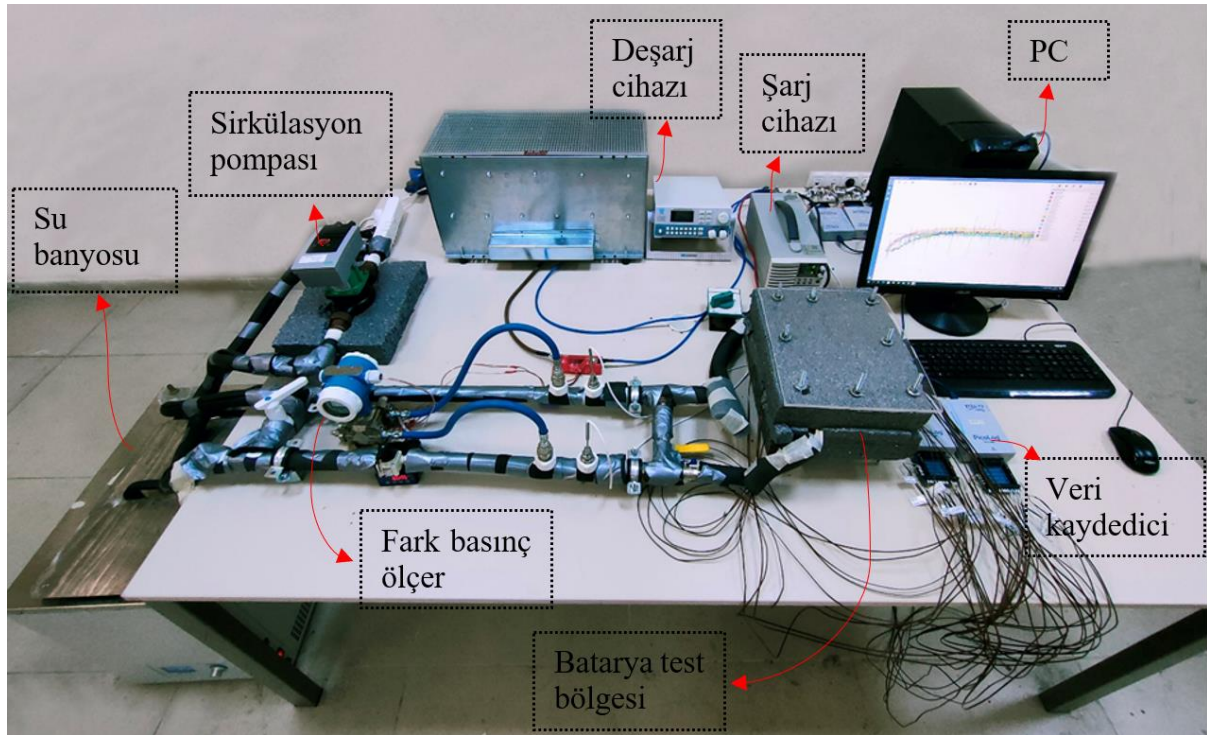
Batarya yüzey sıcaklığının zamana bağlı ölçülerek kaydedilmesi için her iki yüzeyine 9 adet T tipi ısı çifti, Şekil 27-a’da gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Ayrıca bataryanın anot ve katot uçlarından şarj/deşarj için kablolama yapıldığı da görülmektedir. Bataryadandeşarj sırasında açığa çıkacak olan ısıyı kayıpsız olarak soğutma sıvısına iletilmesi için, bataryanın ve soğutucu plakaların 7cm kalınlığındaki yalıtım köpüğü ile ortamdaki termal izolasyonu sağlanmıştır. Batarya ve soğutucu plakaların birbiriyle tam olarak temasını sağlamak için şeffaf akrilik levhalardan oluşturulan sıkıştırma plakaları kullanılmıştır. Böylelikle batarya test düzeneği Şekil 27-b’de gösterildiği gibi oluşturulmuştur.



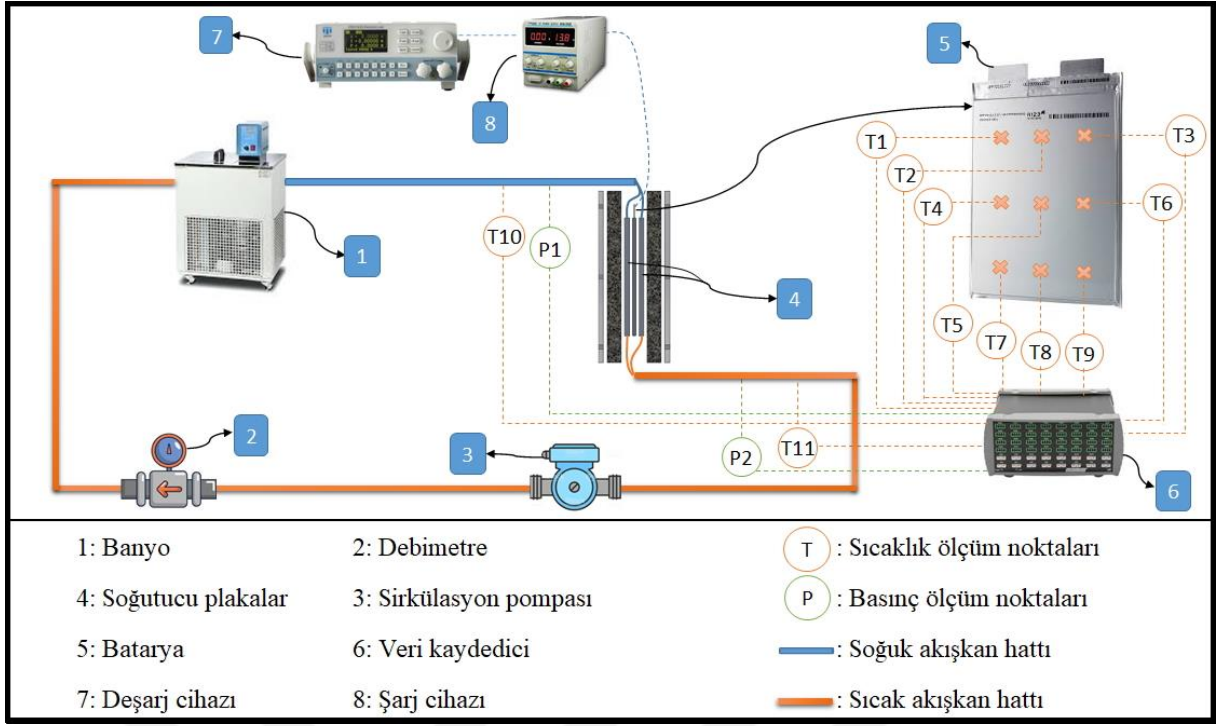
Şekil 27. a) Batarya üzerine ısı çiftlerinin konumlandırılması ve b) oluşturulan batarya test düzeneğinin görünümü

Sıvı soğutma deney setinin oluşturulması

LFP torba tip bataryanın, SSP ve MKSP kullanarak farklı çalışma şartlarında sıvı ile soğutma deneylerinin yapılması için gerekli olan deney seti Şekil 28’de genel görünümü verildiği şekliyle hazırlanmıştır. Şekil 29’daki deney sisteminin şematik gösteriminden de anlaşılacağı üzere, soğutma sıvısı olarak kullanılan suyun istenilen çalışma sıcaklığında batarya test bölgesinde devridaim ettirilmesi ve bataryanın şarjı/deşarjı için gerekli sistem oluşturulmuştur. Deney seti üzerindeki sistem elemanları; su banyosu, sirkülasyon pompası, debimetre, fark basınç ölçer, sıcaklık ölçüm sensörleri, veri kaydedici, şarj cihazı vedeşarj cihazıdır.



Şekil 28. Batarya sıvı soğutma deney düzeneğinin genel görünümü



Şekil 29. Batarya sıvı soğutma deney düzeneğinin şematik görünümü

Su banyosu

Şekil 30’da gösterilen su banyosu batarya test bölgesindeki soğutucu plakalardan ısınarak gelen suyu istenilen giriş sıcaklığı değerinde sabit tutmak için kullanılmıştır. Teknik özellikleri Tablo 9’da verilen ısıtma ve soğutma özelliklerine sahip su banyosu kendi içerisinde de sirkülasyon pompası barındırmaktadır. Böylelikle 15 lt hacmindeki su tankında, soğutma sıvısı kendi içerisinde de sürekli devridaim ettirilerek su sıcaklığının homojenliği sağlanmaktadır.

Tablo 9. Soğutmalı/ısıtmalı su banyosuna ait teknik özellikler

Özellik	Değer
Marka/model	Miprolab/MSS30
Çalışma sıcaklık aralığı	0 – 99,9 °C
Sıvı hacmi	15 Litre
Sıcaklık gösterge hassasiyeti	0,1 °C
Gösterge tipi	LCD



Şekil 30. Soğutmalı/ısıtmalı su banyosu

Sirkülasyon pompası

Su banyosunda istenilen çalışma sıcaklığına şartlandırılan soğutma sıvısının istenilen debide batarya test bölgesine girişinin sağlanması için Şekil 31’de gösterilen sirkülasyon pompası kullanılmıştır. Sirkülasyon pompasının kendi üzerinde barındırdığı frekans kontrolörü ile suyun istenilen debiye ayarlanması mümkün olmaktadır. Su banyosunun dış sirkülatörü de bulunmasına rağmen sistemdeki basınç kayıplarından dolayı istenilen debi değerini sağlayamaması sebebiyle harici bir sirkülasyon pompasının kullanımına ihtiyaç duyulmuştur. Kullanılan bu sirkülasyon pompasının teknik özellikleri Tablo 10’da verilmiştir.



Şekil 31. Frekans kontrollü sirkülasyon pompası

Tablo 10. Sirkülasyon pompasına ait teknik özellikler

Özellik	Değer
Marka/model	Wilo/Yonos Maxo 25-0,5-10
Maksimum debi	8,8 m ³ /saat
Maksimum basma yüksekliği	10,0 metre
Maksimum işletme basıncı	10 bar
Maksimum devir hızı	4450 devir/dk
Minimum devir hızı	1000 devir/dk
Maksimum güç tüketimi	190 W
Minimum akışkan sıcaklığı	-20 °C
Maksimum akışkan sıcaklığı	110 °C

Debimetre

Batarya test bölgesine giren soğutma sıvısının hacimsel debisini ölçerek görüntülemek için Şekil 32'deki türbin tip debimetre ve göstergesi kullanılmıştır. Türbin tip debimetreler akış yolu üzerinde kanatlara sahip bir rotor içerir. Bu rotorun akışkanın mekanik enerjisi ile döndürülmesi sonucu akış hızına bağlı bir dönme hızı elde edilir. Rotor üzerindeki kanatlar dönme hızına bağlı değişen sıklıklarda sinyaller üretir. Bu sinyallerin işlenmesi ile akış hızına bağlı debi okunmuş olmaktadır. Deney sisteminde kullanılan türbin tip debimetrenin teknik özellikleri Tablo 11'de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 32. a) türbin tip debimetre ve b) göstergesi

Tablo 11. Türbin tip debimetreye ait teknik özellikler

Özellik	Değer
Marka/model	Bass Instruments/DFFK.020.B
Ölçüm doğruluğu	$\pm\%1$
Ölçüm aralığı	6-200 L/saat
Dayanma basıncı	5 bar
Çalışma sıcaklığı	-10 °C – 80 °C
Çıkış	Pulse
Besleme	5-24 VDC
Gösterge tipi	LCD

Fark basınç ölçer

Deney setinde kullanılan soğutucu plakalardaki basınç düşümlerini ölçmek ve görüntülemek için Şekil 33'te gösterilen fark basınç ölçer kullanılmıştır. Teknik özellikleri Tablo 12'de verilen cihaz, kendi üzerinde iki akışkan girişi barındırmaktadır. Birinci giriş batarya test bölgesine giren sıvı hattına bağlanırken ikinci giriş ise batarya test bölgesinden çıkış hattına bağlanmıştır. Böylelikle iki noktadaki basınçlar ölçülüp farkı alınarak soğutucu plakalardaki basınç düşümü ölçülmüş olmaktadır. Cihaz kendi üzerinde barındırdığı LCD ekran ile ölçülen basınç düşümü değerini Pascal cinsinden göstermektedir.

**Şekil 33.** Fark basınç ölçer

Tablo 12. Fark basınç ölçere ait teknik özellikler

Özellik	Değer
Marka/model	MESENS/MSP3100
Ölçüm doğruluğu	$\pm 0,075\%$
Ölçüm aralığı	0-20 kPa
Dayanma basıncı	137 bar
Çalışma sıcaklığı	-40 °C – 125 °C
Çıkış	4-20 mA, 2 Telli HART
Besleme	12-45 VDC
Gösterge tipi	LCD

Sıcaklık ölçüm sensörleri

Deney setinde akışkan sıcaklığı ve batarya yüzey sıcaklıklarını ölçmek üzere iki tip sıcaklık ölçüm sensörü kullanılmıştır. Soğutma sıvısının batarya test bölgesine giriş ve çıkış sıcaklıklarını ölçmek için PT100 daldırma tipli sıcaklık sensörlerinin akışkan hattına montajı gerçekleştirilmiştir. Batarya yüzeyindeki farklı noktalarda sıcaklık ölçümü yapabilmek için ise T tipi ısıl çiftler kullanılmıştır. PT100 sensörleri sıcaklığa göre değişken direnç üretirken ısıl çiftler sıcaklığa göre farklı gerilim değeri üretmektedirler. Deney sisteminde kullanılan PT100 sensörleri $\pm 0,1$ °C ölçüm hassasiyetine sahipken, T-tipi ısıl çiftler ise ± 1 °C hassasiyetle ölçüm yapmaktadırlar. Ayrıca PT100 sensörleri ısıl çiftlere göre daha hassas sıcaklık ölçümü yaparken, ısıl çiftler ise sıcaklık değişimlerine PT100 sensörlerine göre daha hızlı tepki vermektedirler. Deneyde kullanılan PT100 ve ısıl çiftlerin veri kayıt cihazına bağlantıları yapıldıktan sonra kalibrasyonlu bir sıcaklık ölçer kullanılarak su banyosunda kalibrasyonları yapılmıştır.

Veri kayıt cihazı

PT100 ve T-tipi ısıl çiftler, Şekil 34'te gösterilen Picolog marka veri kaydedici ile bağlantıları yapılarak sıcaklık ölçüm ve kayıt işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ölçülen sıcaklık değerleri cihazın bilgisayar yazılımı vasıtasıyla anlık görüntülenmekte ve kaydedilebilmektedir. Veri kayıt cihazının teknik özellikleri Tablo 13'te verilmiştir.



Şekil 34. Veri kayıt cihazı

Tablo 13. Veri kayıt cihazına ait teknik özellikler

Özellik	Değer
Marka/model	Picolog/1216
Kanal sayısı	16 adet analog giriş-4 adet dijital çıkış
Doğruluk	$\pm 0,5\%$
Çözünürlük	16 bits
Voltaj giriş aralığı	0 – 2,5 V
Ara bellek	8000 örneklem

Şarj cihazı

Her deneyin başlangıcında 20 Ah kapasiteye sahip LFP batarya, Şekil 35’te gösterilen doğru akım (DC) güç kaynağı kullanılarak 1C hızında şarj edilmiştir. Teknik özellikleri Tablo 14’te verilen güç kaynağı, sabit akım/sabit voltaj (CC/CV) şarj moduna sahiptir. Böylelikle batarya belirli bir voltaj değerine kadar sabit akımda şarj edilirken, batarya belirli bir voltaj değerine ulaştıktan sonra sabit voltajda, giderek düşen akım değeri ile şarj edilmektedir. CC/CV yöntemi ile Li-iyon bataryaların şarj edilmesi, bataryanın performansını olumlu yönde etkilediği ve hafıza etkilerini düşürdüğü bilinmektedir (Hoque *et al.* 2016).



Şekil 35. DC güç kaynağı

Tablo 14. DC güç kaynağına ait teknik özellikler

Özellik	Değer
Marka/model	GW INSTEK/PSW 80-27
Voltaj çıkış aralığı	0-80 V
Akım çıkış aralığı	0-27 A
Doğruluk	$\pm\%0,1$
Voltaj çözünürlüğü	2 mV
Akım çözünürlüğü	2 mA
Şarj modu	CC/CV
Gösterge tipi	LCD

Deşarj cihazı

Şekil 36’da gösterilen DC elektronik yük, deşarj cihazı olarak kullanılmıştır. Cihazın teknik özellikleri Tablo 15’te verilmiştir. Batarya, istenilen deşarj hızına denk gelen akım değeri cihaza girilerek sabit akım (CC) modunda deşarj edilmiştir. Elektronik yükler, kendi içerisinde barındırdığı elektronik olarak kontrol edilebilen güç transistörleri ve MOSFETler ile elektrik akımını depolayabilmekte veya ısıya dönüştürerek bir fan yardımı ile çevreye atabilmektedirler.



Şekil 36. DC elektronik yük

Tablo 15. DC elektronik yüke ait teknik özellikler

Özellik	Değer
Marka/model	Jartul/6313A
Elektriksel güç	300 W
Doğruluk	$\pm\%0,03$
Çözünürlük	10 uA and 100 uV
Frekans	500 kHz
Deşarj modları	CC/CV/CP/CR
Gösterge tipi	LCD

Belirsizlik ve Hata Analizi

Deneysel bir çalışmada ölçüm yapılan değerler farklı sebeplerden dolayı tam doğru sonucu yansıtmamaktadır. Yapılan hatalı ölçümler, ölçüm aletinin yetersizliğinden ve ölçüm yapanın hatasından kaynaklanabilmektedir. Ölçüm yapan kişi hatasız ölçüm yapsa da çoğunlukla ölçüm aletleri belirli oranlarda yapıları gereği hatalı ölçüm yapmaktadırlar. Bu noktada, deneysel bir ölçümde belirsizliğe neden olabilecek üç farklı hata türünden bahsedilebilir. Birincisi, ölçüm cihazının veya sisteminin yanlış seçimi gibi büyük hatalardır ki bu hatalar deney yapan şahıs deneyimli bir kişi ise rahatlıkla elimine edilebilir. İkincisi sistematik hatalardır. Bu hatalar, ölçüm aletlerinin kalibrasyon eksiklikleri ve ortam şartlarından etkilenme gibi durumlarda ortaya çıkar. Üçüncüsü ise rastgele diye tabir edilen hatalardır. Bu hatalar ise kontrol dışı etkenler veya çeşitli dalgalanmalardan kaynaklanmaktadır. Çoğu zaman sistematik hataları ve rastgele hataları ayırt etmek zordur (Holman 2012).

Yeterli sayıda deney yapıldıktan sonra sistematik hataların belirlenmesi için kullanılan Akılcı Yaklaşım ve Belirsizlik Analizi, iki temel yöntemdir. Deneysel belirsizliklerin tahmini için Kline and McClintock (1953) tarafından aşağıdaki denklem önerilmiştir:

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (23)$$

Burada R , ölçüm yapılan bağımsız değişkenlere $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ bağlı, bağımlı değişkendir. $w_1, w_2, \dots, w_n$ bağımsız değişkenlerin belirsizlik miktarlarıdır. w_R ise bağımlı değişkenin belirsizlik miktarıdır. Bu çalışmada bağımlı değişken olarak hesaplanan sadece soğutma suyuna transfer edilen ısı yük ($\dot{Q}$) mevcuttur. Hesaplanan bu değişkenin ve deneysel olarak ölçülen bağımsız değişkenlerin belirsizlik değerleri Tablo 16’da verilmiştir.

Tablo 16. Deneysel belirsizlikler

n	Bağımsız değişkenler (x_n)	Belirsizlik (w_n)
1	Hacimsel debi (L/saat)	± 2 L/saat
2	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	$\pm 0,1$ $^{\circ}\text{C}$
Bağımlı değişken (R)		Belirsizlik ($w_R/\dot{Q}$)
Isı transferi (W)		%4,78

Sıvı ile Soğutmanın Sayısal Analizi

Bu bölümde, LFP bataryanın MKSP ve SSP ile farklı çalışma şartlarında soğutulmasının sayısal modeli oluşturulmuştur. Batarya ve soğutucu plakalar olmak üzere iki ana birleşimden oluşan, batarya test bölgesindeki batarya için oluşturulan elektrokimyasal-termal model ve soğutucu plakalardaki akış için oluşturulan türbülans modeli, ANSYS-Fluent paket programı kullanılarak çözülmüştür. Batarya için oluşturulan elektrokimyasal-termal model, doğal taşınım ile soğutma bölümünde açıklanmış olup aynı model sıvı soğutma analizinde de kullanmıştır. Soğutucu plakalardaki akış için oluşturulan türbülans modeli ise aşağıda izah edilmiştir.

Soğutucu plakaların modellenmesi

Bu bölümde, sıvı soğutma deneylerinde LFP bataryanın üst ve altına konumlandırılan serpantinli soğutucu plakalar (SSP) ve yeni tasarıma sahip mini kanallı soğutucu plakaların (MKSP), ANSYS-Fluent yazılımı ile üç boyutlu HAD modeli oluşturulmuştur. Soğutucu plakalardaki çoğu çalışma şartı için akış türbülanslı olduğu için, bu çalışmada standart k- ϵ türbülans akış modeli kullanılmıştır. Standart k- ϵ türbülans akış modeli, genel olarak batarya soğutma modellenmesinde tercih edilen güçlü bir türbülans modelidir (Tao et al. 2020; Zhang

et al. 2020; Amalesh and Narasimhan 2020). Türbülanslı akışların analitik çözümleri oldukça karmaşık ve zordur. Bu yüzden yapılan analizlerde süreklilik ve Navier-Stokes denklemleri kullanılarak akış modelinin çözümlemeleri nümerik olarak yapılmıştır. Aşağıda verilen RANS (Reynolds-Average Navier Stokes) denklemleri ve Reynolds-Average enerji denklemi kullanılarak HAD modeli çözülmüştür.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (24)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) \right] = -\nabla P + (\mu \nabla^2 \vec{V} - \lambda) \quad (25)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{T}}{\partial t} + \rho \vec{V} \nabla T = \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla \bar{T} \right] \quad (26)$$

Burada; ∇ , del operatörü, V , hız (m/s), ρ , akışkan yoğunluğu (kg/m^3), $\bar{V}$, ortalama hız (m/s), t , zaman (s), P , basınç (Pa), λ , Reynold gerilme gradyanı, T , sıcaklık (K), $\bar{T}$, ortalama sıcaklık (K), μ , viskozite (Pa.s), μ_t , türbülans viskozitesi (Pa.s), Pr , Prandtl sayısı ve Pr_t ise türbülans Prandtl sayısıdır.

Standart k- ϵ modeli için ANSYS-Fluent analizinde kullanılan transport denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon + Y_m + S_k \quad (27)$$

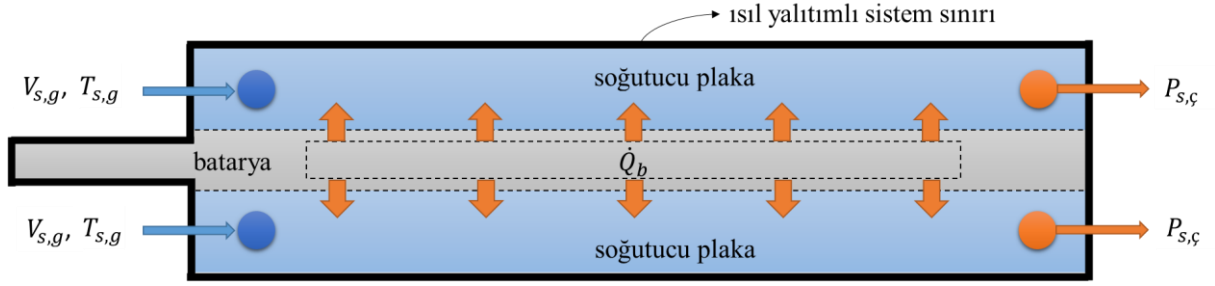
$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \epsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (28)$$

Burada; σ_k ve σ_ϵ , k ve ϵ için türbülans Prandtl sayıları, $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$ model sabitleri, G_k , ortalama hız gradyanlarından kaynaklı türbülans kinetik enerjisi oluşumu, G_b , kaldırma kuvveti kaynaklı türbülans kinetik enerjisi oluşumu, Y_m , sıkıştırılabilir türbülanstaki dalgalı genişlemenin genel dağılım hızına katkısı, S_k ve S_ϵ ise kullanıcı tanımlı kaynak terimleridir. Buradaki k , ϵ ve sabit bir değer olarak tanımlanan C_μ katsayısına bağlı türbülans viskozitesi, aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (29)$$

Başlangıç ve sınır şartları

Sayısal model için tanımlanan sınır şartlarının şematik gösterimi Şekil 37’de verilmiştir. Batarya ve her iki yüzeyine konumlandırılan soğutucu plakaların dış ortam ile olan sınırlarından ısı transferi yoktur ve bataryada üretilen ısı ($\dot{Q}_b$) doğrudan soğutma sıvısına aktarılmaktadır.



Şekil 37. Modellenen soğutucu plakalar için sınır şartlarının şematik gösterimi

Soğutma sıvısı olarak su seçilmiştir. Sıkıştırılamaz akış kabulü altındaki suyun yoğunluğu ve dinamik viskozitesi sırasıyla $998,2 \text{ kg/m}^3$ ve $1,002 \times 10^{-3} \text{ N s/m}^2$ 'dir. Suyun soğutucu plakaya giriş şartı için giriş hızı (m/s) ve giriş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$V = V_{s,g} \quad (30)$$

$$T = T_{s,g} \quad (31)$$

Kanal yüzeyinde akışkan için kaymama koşulu geçerlidir. Suyun plakalardan çıkışı için ise çıkış basıncı (Pa) şartı atmosfer basıncına eşit olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$P = P_{\text{atm}} \quad (32)$$

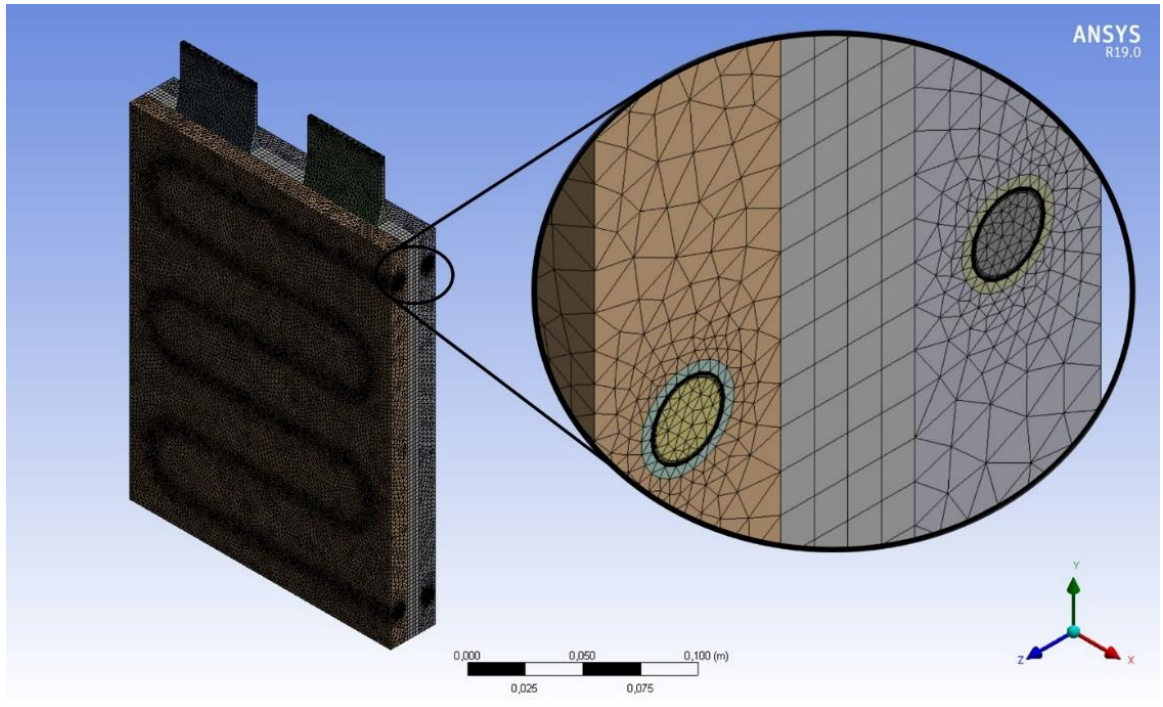
Zamana bağlı yapılan sayısal çözüm için başlangıç sıcaklık şartı (T_b), ortam sıcaklığına (T_{∞}) eşit olarak aşağıda gösterildiği gibi tanımlanmıştır.

$$T_b = T_{\infty} = 23 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (33)$$

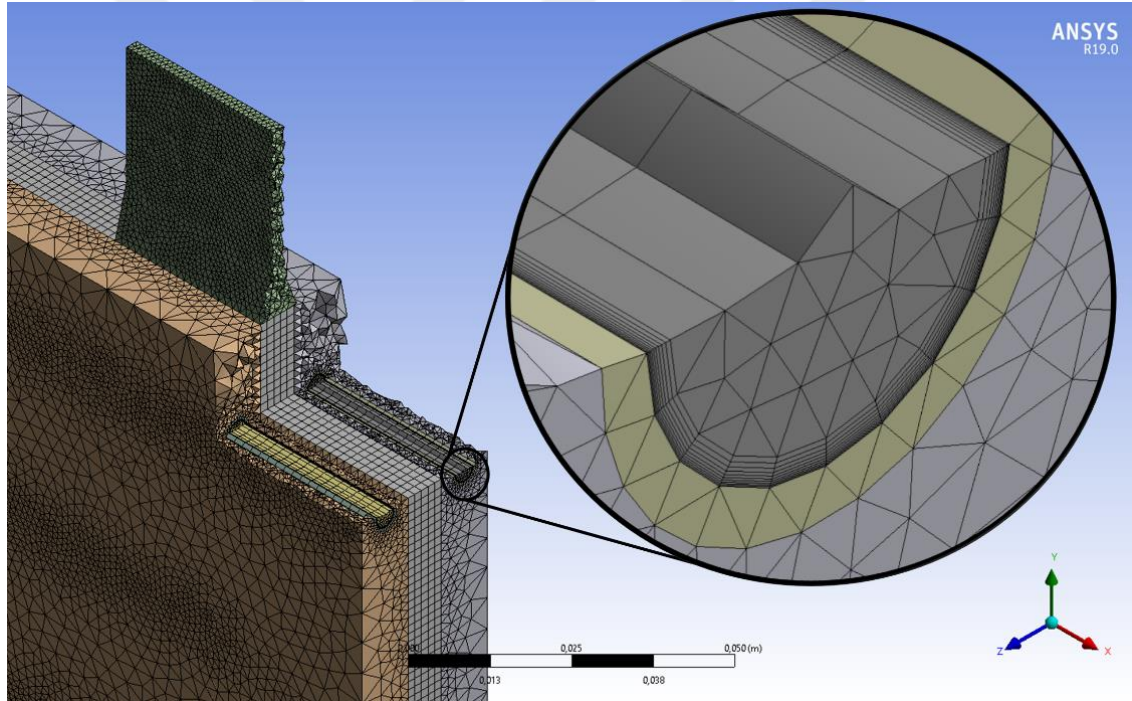
Rezidülerin yakınsama değişkenleri; anot ve katot için yayılım katsayıları, x yönündeki akışkan hızı, y yönündeki akışkan hızı, z yönündeki akışkan hızı, k-epsilon, enerji ve süreklilik denklemleridir. Tüm bu değişkenler için yakınsama kriteri olarak 10^{-6} tanımlanmıştır.

Batarya test bölgesinin mesh yapılanması

Sayısal çözümlemeden sağlıklı sonuçlar alabilmek için çözüm alanının doğru mesh yapısına sahip olması çok önemlidir. Oluşturulan mesh yapısındaki düğüm noktası sayısı ve mesh elemanlarının şekli gibi parametrelerin, çözümün doğruluğuna etkisi oldukça fazladır. Batarya test bölgesinin detaylı mesh yapısı, SSP ve MKSP kullanılan iki farklı çözüm için sırasıyla Şekil 38 ve Şekil 39'da gösterilmiştir. Her iki soğutucu plakayı içeren batarya test bölgesinde de yapılandırılmamış hibrit mesh yapısı kullanılmıştır. SSP ve MKSP içeren batarya test bölgelerinin mesh yapıları sırasıyla ortalama 0,26 ve 0,32 skewness değerlerine sahiptir. Bu değerler mesh kalitesinin ortalamanın üzerinde bir seviyede olduğunu göstermektedir.

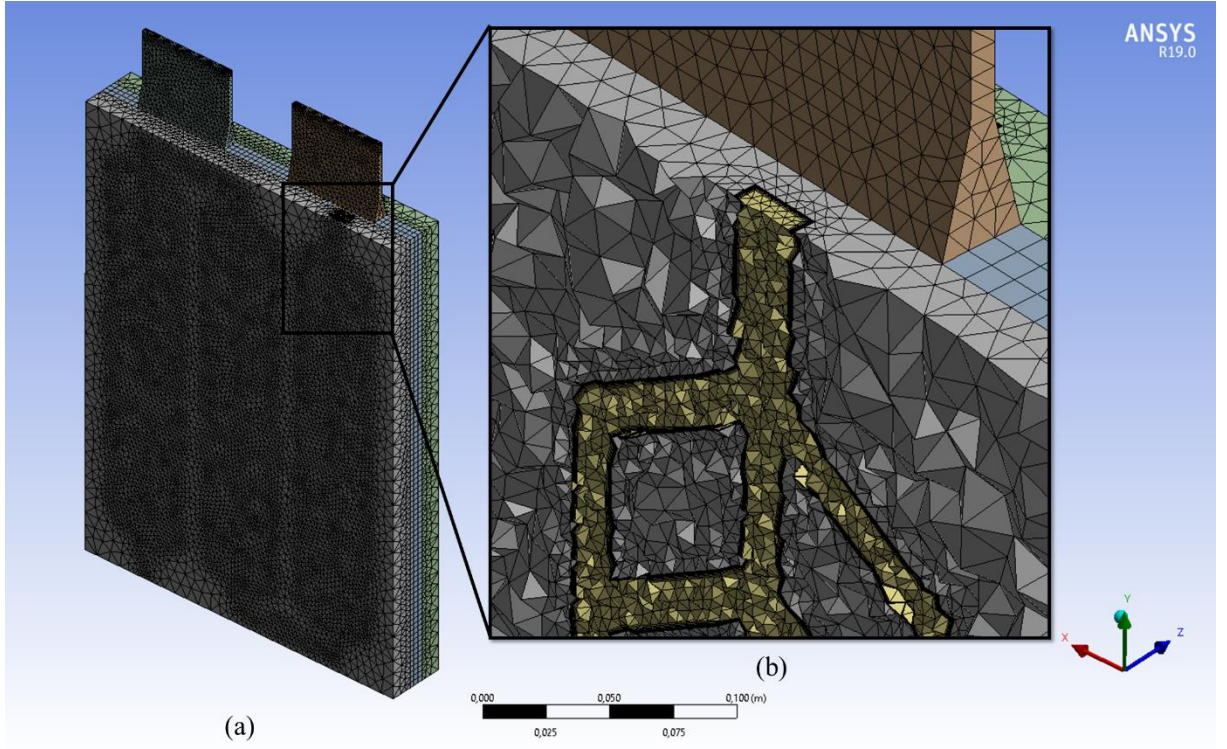


(a)



(b)

Şekil 38. SSP kullanılan batarya test bölgesinin a) genel mesh yapısı görünümü ve b) kanal mesh yapısı patlatılmış görünümü

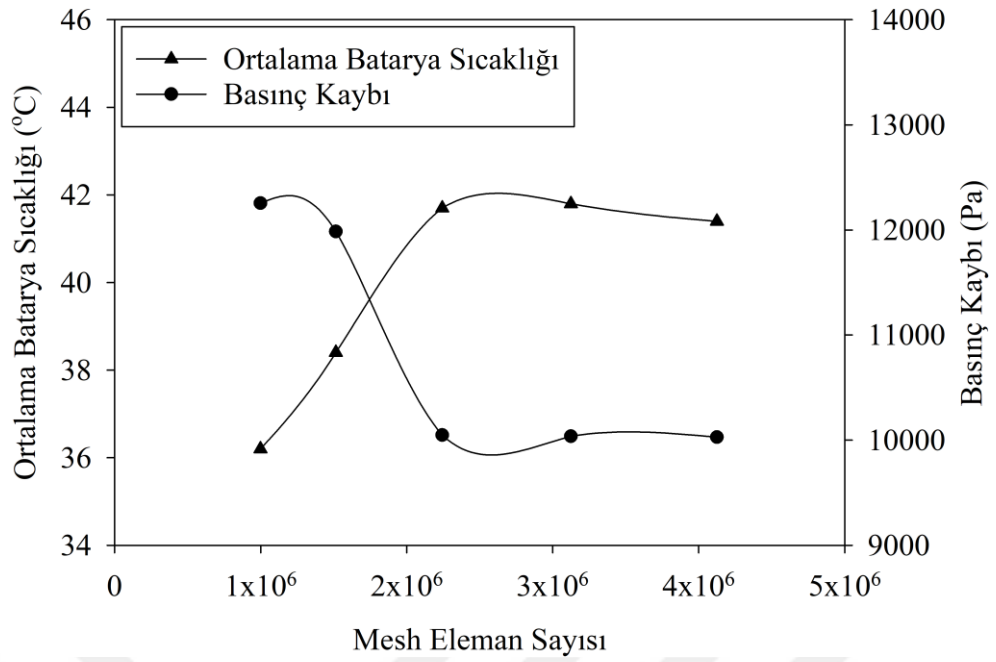


Şekil 39. MKSP kullanılan batarya test bölgesinin a) genel mesh yapısı görünümü ve b) kanal mesh yapısı patlatılmış görünümü

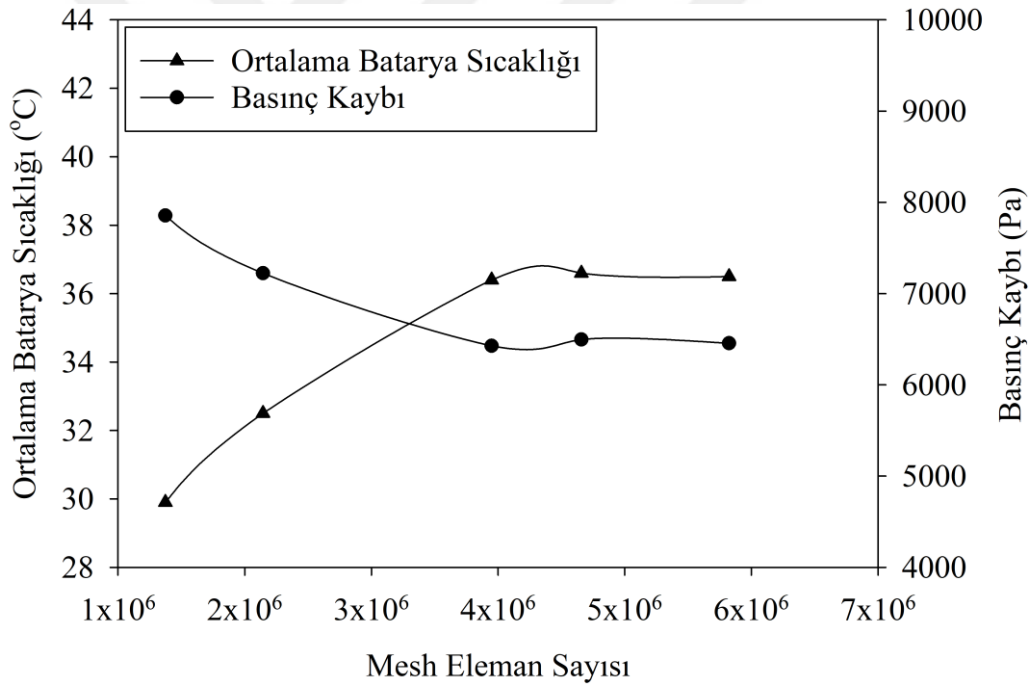
Mesh bağımsızlık analizi

Sayısal çözümlerin simülasyonu yapılırken çözümün doğruluğu ve hesaplama maliyetinin düşürülmesi açısından mesh bağımsızlık analizi yapmak gereklidir. Mesh bağımsızlığı analizi ile modeldeki mesh yoğunluğu artışının, hangi noktadan sonra çözüm sonucuna etkisinin önemsenmeyecek kadar az olduğu tespit edilir. Böylelikle gereksiz bir şekilde fazla mesh elemanı üretmekle çözüm süresinin uzaması ve hesaplama maliyetinin artmasının önüne geçilmiş olur. Ayrıca mesh sayısı arttıkça sayısal çözümde yapılan hesaplamalar da artacağından kesme ve yuvarlama hataları da aynı oranda artacaktır. Kısacası mesh bağımsızlık analizi ile optimum mesh sayısını elde etmek amaçlanmaktadır.

SSP ve MSKP ile oluşturulan batarya test bölgeleri için geliştirilen modellere ait farklı sayılardaki mesh yapıları sayısal olarak çözümlenmiş ve bu çözümden elde edilen ortalama batarya sıcaklıkları ve basınç kayıpları kıyaslanarak mesh bağımsızlık analizi yapılmıştır. İki model için elde edilen mesh sayılarına göre sıcaklık ve basınç kaybı değerlerinin değişim grafiği Şekil 40'ta ve Şekil 41'de gösterilmiştir. SSP ve MKSP modelleri için sırasıyla yaklaşık 2,2 milyon ve 3,9 milyon eleman sayısına sahip mesh yapıları seçilmiştir. Mesh analizi yapılırken 5C deşarj hızı ve 1,1 L/dk su debisi ve 25 °C su giriş sıcaklığı şartlarında yapılan çözümler baz alınmıştır.



Şekil 40. SSP kullanılan batarya test bölgesinin mesh bağımsızlık analizi



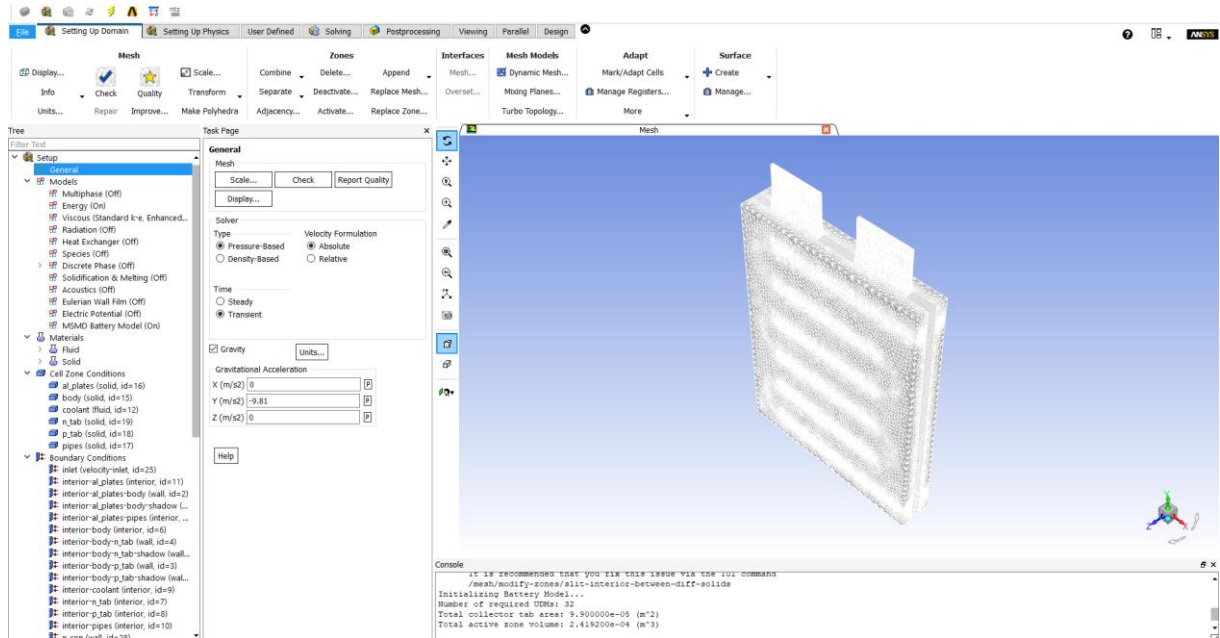
Şekil 41. MKSP kullanılan batarya test bölgesinin mesh bağımsızlık analizi

HAD çözücü kurulumu

HAD simülasyonu yapılırken fiziksel ve hesaplama parametrelerinin eksiksiz ve doğru bir şekilde tanımlanması çok önemlidir. Oluşturulan model için sınır şartları ve çözücünün belirlenmesi de çözümün yakınsaması ve doğruluğu açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmanın üç boyutlu sayısal analizi Fluent yazılımı ile yapılmış olup kurulum kısmında aşağıdaki adımlar takip edilmiştir:

- 1- Çözücü basınca dayalı olarak seçilmiştir. Aynı zamanda mutlak hız formülasyonu ve zamana bağlı çözüm uygulanmıştır.
- 2- Model oluşturulurken üç farklı model yapılandırılmıştır. Birincisi enerji denkleminin çözümü için enerji modeli aktifleştirilmiştir. İkinci olarak akış modeli oluşturulmuştur. Birçok çalışma şartında Reynolds sayısı kritik değerin üzerinde olduğu için “Standart k-ε with EWT” türbülans akış modeli seçilmiştir. Üçüncü olarak ise batarya elektrokimyasal-termal birleşik modeli, hava soğutma sayısal analizi bölümünde belirtildiği gibi yapılandırılmıştır.
- 3- Oluşturulan modelin katı ve akışkan parçalarına ilgili malzemeler tanımlanmıştır. Batarya modeli aktif materyal, pozitif terminal ve negatif terminal olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Bu üç kısma Tablo 6’da verilen özelliklere sahip malzemeler tanımlanmıştır.
- 4- Sınır şartları modelin ilgili bölgelerine tanımlanmıştır. Batarya modelinin dış yüzeyleri ısı yalıtımlı olup sıfır ısı akısı girilmiştir. Akışkan girişi için hız ve sıcaklık, akışkan çıkışı için ise basınç tanımlaması yapılmıştır. Bununla birlikte akışkan duvarına kaymama koşulu tanımlıdır.

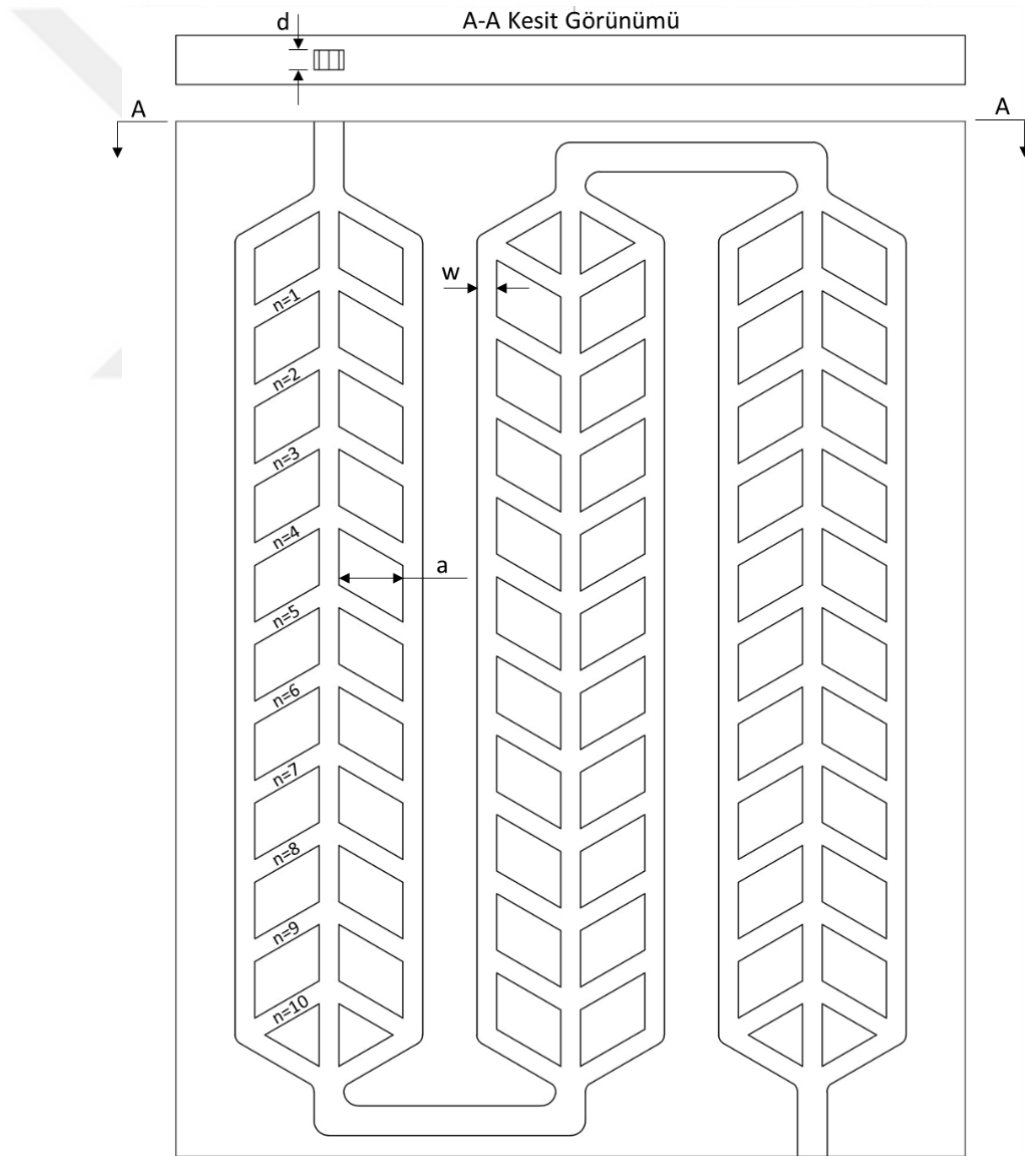
Çözücünün kurulumu tamamlandıktan sonra çözüm için istenilen raporlamalar ve grafikler de belirlenir ve daha sonra çözümü başlatma işlemi uygulanır. Son olarak ise hesaplama başlatılır. Fluent kurulum sayfasının ekran görüntüsü Şekil 42’de gösterilmiştir.



Şekil 42. Fluent kurulum sayfasının ekran görüntüsü

MKSP Optimizasyonu

Bu aşamada, deneysel ve sayısal olarak soğutma performansı incelenen MKSP'nin kanal tasarımı optimize edilerek maksimum batarya sıcaklığının, maksimum batarya sıcaklık farkının ve plakada oluşan basınç kaybının en aza indirgenmesi hedeflenmektedir. Şekil 43'te gösterildiği gibi kanal genişliği (w), kanal kolları arası mesafe (a), ara geçiş sayısı (n) ve kanal derinliği (d) olmak üzere dört farklı parametre belirlenmiştir. Belirlenen kanal parametreleri üç farklı seviyede değerlendirilerek optimizasyon yapılacaktır. Bu dört kanal parametresine ek olarak üç farklı seviyede ele alınan soğutma sıvısının debisi (Q) de ayrı bir parametre olarak seçilmiştir. Belirlenen bu beş parametrenin üç farklı seviyede değişimine bağlı olarak toplamda 243 adet deney yapılması gerekmektedir. Bu sayının en aza indirilmesi amacı ile Yanıt Yüzey Yöntemine (YYY) başvurulmuştur.



Şekil 43. MKSP için kanal optimizasyon parametreleri

Yanıt yüzey yöntemi

Yanıt yüzey metodolojisi ilk olarak 1951'de Box ve Wilson tarafından geliştirilmiştir. YYY, tasarım alanındaki çeşitli noktalarda hesaplanan sonuçlara dayalı olarak sistem davranışına genel yaklaşımlar oluşturmak için bir yöntem olarak tanımlanabilir (Roux *et al.* 1988). Bu yöntemi oluşturan temel ilke, hesaplama açısından maliyetli analiz ve simülasyon kodunun basitleştirilmiş bir matematiksel yaklaşımını oluşturmak ve daha sonra bu kodu, çok disiplinli tasarım optimizasyonunu kolaylaştırmak için orijinal kod yerine kullanmaktır. Yaklaşım modeli, orijinal kod için bir vekil görevi gördüğünden, genellikle bir vekil model, vekil yaklaşım, yaklaşım modeli veya bir meta model olarak adlandırılır (Simpson *et al.* 2004). YYY, tasarım alanında ilgilenilen bölge olarak tanımlanan ve Deney Tasarımı (DT) olarak adlandırılan bir yapı üzerinde çalışır. Yanıt yüzeyi yapılandırılırken en önemli amaç, hesaplama maliyetini en aza indirirken kabul edilebilir bir doğruluk seviyesine ulaşmaktır. Yanıt yüzeyinin doğruluğunu etkileyen iki temel faktör vardır. Bunlardan birincisi yaklaşım fonksiyonun seçilmesi, ikincisi ise tasarım alanı üzerindeki seçilen tasarım noktalarını yani DT'yi belirlemektir (Menon 2005).

Yaklaşım fonksiyonun belirlenmesi için matematiksel bir modele ihtiyaç vardır. Mühendislik tasarım uygulamalarının optimizasyonunda çokça kullanılan İkinci Dereceden Yüzey Yanıt Yaklaşımı metodu bu çalışmada da kullanılmıştır. Bu yöntem, tasarım değişkenleri ile ilgili yanıt arasında açık bir ilişki sağlayan ikinci dereceden bir polinomu temel alır. Matematiksel modeldeki bilinmeyen katsayılar, en küçük kareler yöntemi kullanılarak tahmin edilir. Eşitlik 34 ve Eşitlik 35'te sırasıyla gerçek yanıt fonksiyonu ve yaklaşım fonksiyonu verilmiştir.

$$y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) + E \quad (34)$$

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i X_i + \sum_{i=1}^m \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij} X_i X_j + E \quad (35)$$

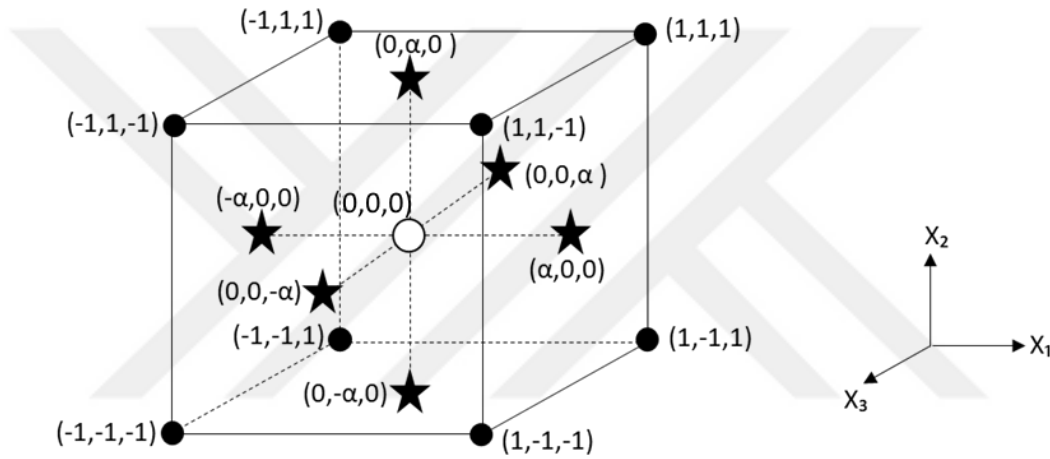
Burada m tasarım değişkenlerinin toplam sayısı, X_i ilgili tasarım değişkeninin ölçekli değeri, E deneysel hata terimi, β değerleri ise bilinmeyen katsayılardır. Tasarım değişkenlerinin ölçeklendirilmesi ise $[-1 \ 1]$ aralığında yapılmaktadır.

Deney Tasarımı (DT), sınırlı sayıda örnekten elde edilen bilgi miktarını en üst düzeye çıkarmak amacıyla, tasarım alanında bir dizi örnek seçmek için belirlenmiş bir prosedür olarak tanımlanabilir (Giunta *et al.* 2003). Tipik bir DT çalışmasının amacı, yanıt verilerindeki eğilimleri tahmin etmektir. Bu nedenle yanıt yüzeyi yaklaşımları genellikle DT ile ilişkilendirilir. Yanıt fonksiyonu geliştirmede olduğu gibi, DT çalışmasında da örnek setler

ölçeklendirilir. Birçok DT tekniği bulunmakla birlikte, İkinci Dereceden Yüzey Yanıt Yaklaşımı için en çok kullanılan yöntemlerden birisi Merkezi Kompozit Dizaynı (MKD) olduğu bilinmektedir.

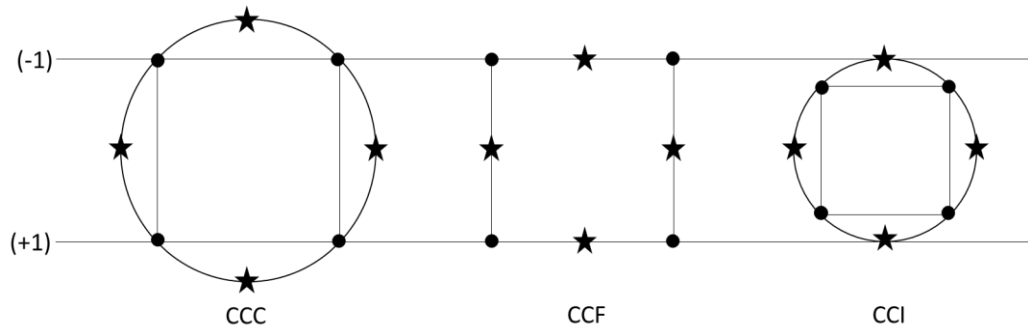
Merkezi Kompozit Dizaynı

Merkezi Kompozit Dizaynı (MKD), Şekil 44'te gösterildiği gibi faktöriyel noktalar yıldız noktalar ve merkez noktadan oluşan deneysel tasarım metodudur. Faktör noktaları, faktör seviyelerinin -1 , $+1$ olarak kodlandığı tam veya kesirli faktör tasarımından gelen n boyutlu küpün köşeleridir. Merkezi nokta, tasarım uzayının merkezindeki noktadır. Yıldız noktalar veya diğer bir tabirle eksenel noktalar, koordinat sisteminin eksenlerinde, tasarım merkezinden α mesafesinde, merkezi noktaya göre simetrik olarak yerleştirilmiştir.



Şekil 44. Yüzey merkezli MKD (CCF)

Şekil 45'te iki adet faktöriyele sahip bir MKD'nin CCC (Central Composite Circumscribed), CCF (Central Composite Face-centered) ve CCI (Central Composite Inscribed) olmak üzere üç farklı tasarımı gösterilmiştir. CCC ve CCI için beş farklı seviyede faktör gerekli iken CCF için yıldız noktalar yüzey merkezinde olduğu için ($\alpha = 1$, $\alpha = 0$ veya $\alpha = -1$) üç farklı seviye ile çözüm yapılır. Dolayısıyla yüzey merkezli MKD (CCF), tasarımı daha basit bir hale getirir (Ait-Amir *et al.* 2020). Bu çalışmada da CCF modeli kullanılmıştır.



Şekil 45. MKD tasarımları

Varyans analizi (ANOVA)

ANOVA, iki veya daha fazla grubu içeren deneyler üzerinde istatistiksel test gerçekleştirmenin kavramsal olarak basit, güçlü ve popüler bir yoludur. ANOVA, aynı konularda tekrarlanan ölçümler içeren deneysel tasarımlar için veya deneydeki farklı faktörlerin birbiriyle etkileşime girip girmediğini görmek için uygun bir uygulamadır (Smalheiser 2017).

Oluşturulan matematiksel model ile elde edilen yaklaşım fonksiyonun, yanıtlar ile uyumluluğunu test etmek için çeşitli istatistiksel hesaplama araçları mevcuttur. Bu uyumluluğu açıklayabilecek olan dört temel istatistiksel parametre vardır. Bunlar; F istatistiği, R^2 , düzeltilmiş R^2 (R^2_{adj}) ve Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE) olup sırasıyla Eşitlik (36), Eşitlik (37), Eşitlik (38) ve Eşitlik (39)'da verilmiştir. Ayrıca bu parametrelerin tamamen birbirinden bağımsız olmadığını da belirtmek gerekir (Menon 2005).

$$F = \frac{(SST - SSE)/p}{SSE/(n - p - 1)} \quad (36)$$

$$R^2 = 1 - SSE/SST \quad (37)$$

$$R^2_{adj} = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - p - 1} \quad (38)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{n - p - 1}} \quad (39)$$

Burada SSE hata kareler toplamı, SST toplam kareler toplamı, p ise yanıt yüzey modelindeki sabit olmayan terimlerin sayısıdır.

Bu istatistiksel parametrelere ek olarak yanıt yüzey için oluşturulan matematiksel modelinin doğru tahmin edilip edilmediğini ölçmek için Eşitlik (40) ve Eşitlik (41)'de sırasıyla verilen Tahmini Hata Kareler Toplamı (PRESS) ve tahmini R^2 (R^2_{pred}) parametreleri kullanılmaktadır.

$$PRESS = \sum_{i=1}^n y_i - Y_i \quad (40)$$

$$R^2_{pred} = 1 - PRESS/SST \quad (41)$$

Burada; y_i , i numaralı örneklem noktasındaki gerçek değer, Y_i ise i numaralı örneklem noktasındaki tahmin edilen değerdir.

Kompozit istenebilirlik fonksiyonu yaklaşımı

İstenebilirlik (Desirability) fonksiyonu yaklaşımı (DFA) ilk olarak 1965 yılında Harrington tarafından tanıtılmış ve daha sonra Derringer and Suich (1980) tarafından genişletilmiştir. Bu yöntem, optimum girdi değişkenlerini bulmak için birden fazla yanıt değişkenini ayrı ayrı ve aynı anda optimize eden arama tabanlı bir optimizasyon yöntemidir (Mobin *et al.* 2016). Çoklu yanıt değişkenlerinin analizi, önce her yanıt değişkeni için regresyon modeli olarak bilinen bir matematiksel model oluşturmayı gerektirir. Ardından, tüm yanıtları optimize eden bir dizi optimize edilmiş faktör elde edilmektedir. Çok yanıtlı optimizasyon problemlerini çözmek, birden fazla yanıtı kompozit istenebilirlik fonksiyonu (D) olarak adlandırılan boyutsuz bir fonksiyona entegre etmek için bir teknik uygulamakla başlar. Yaklaşım, öncelikle her bir yanıt fonksiyonunu (y_i), bireysel istenebilirlik fonksiyonu (d_i) olarak bilinen $[0,1]$ aralığında değerlere sahip boyutsuz fonksiyonlara dönüştürmektedir. Bu fonksiyonlar; eğer yanıt fonksiyonu (y_i) için hedef değerin (T_i) maksimum olması isteniyorsa Eşitlik (42), (y_i) için hedef değerin minimum olması isteniyorsa Eşitlik (43), (y_i) için hedef değerin L_i ile U_i arasında bir değer alması isteniyorsa Eşitlik (44) kullanılarak hesaplanmaktadır. Her bir yanıt için istenebilirlik fonksiyonunun şeklini belirleyen, ağırlık faktörü (w) olarak bilinen pozitif bir sayı belirlenir. Bu sayı genelde çözümde basitlik için bire eşit kabul edilir (Mobin *et al.* 2016).

$$d_i = \begin{cases} 0 & y_i < L_i \\ \left(\frac{y_i - L_i}{T_i - L_i} \right)^w & L_i \leq y_i \leq T_i \\ 1 & y_i > T_i \end{cases} \quad (42)$$

$$d_i = \begin{cases} 1 & y_i < L_i \\ \left(\frac{T_i - y_i}{T_i - L_i} \right)^w & L_i \leq y_i \leq T_i \\ 0 & y_i > T_i \end{cases} \quad (43)$$

$$d_i = \begin{cases} 0 & y_i < L_i \\ \left(\frac{y_i - L_i}{T_i - L_i} \right)^w & L_i \leq y_i \leq T_i \\ \left(\frac{U_i - y_i}{U_i - L_i} \right)^w & T_i \leq y_i \leq U_i \\ 0 & y_i > U_i \end{cases} \quad (44)$$

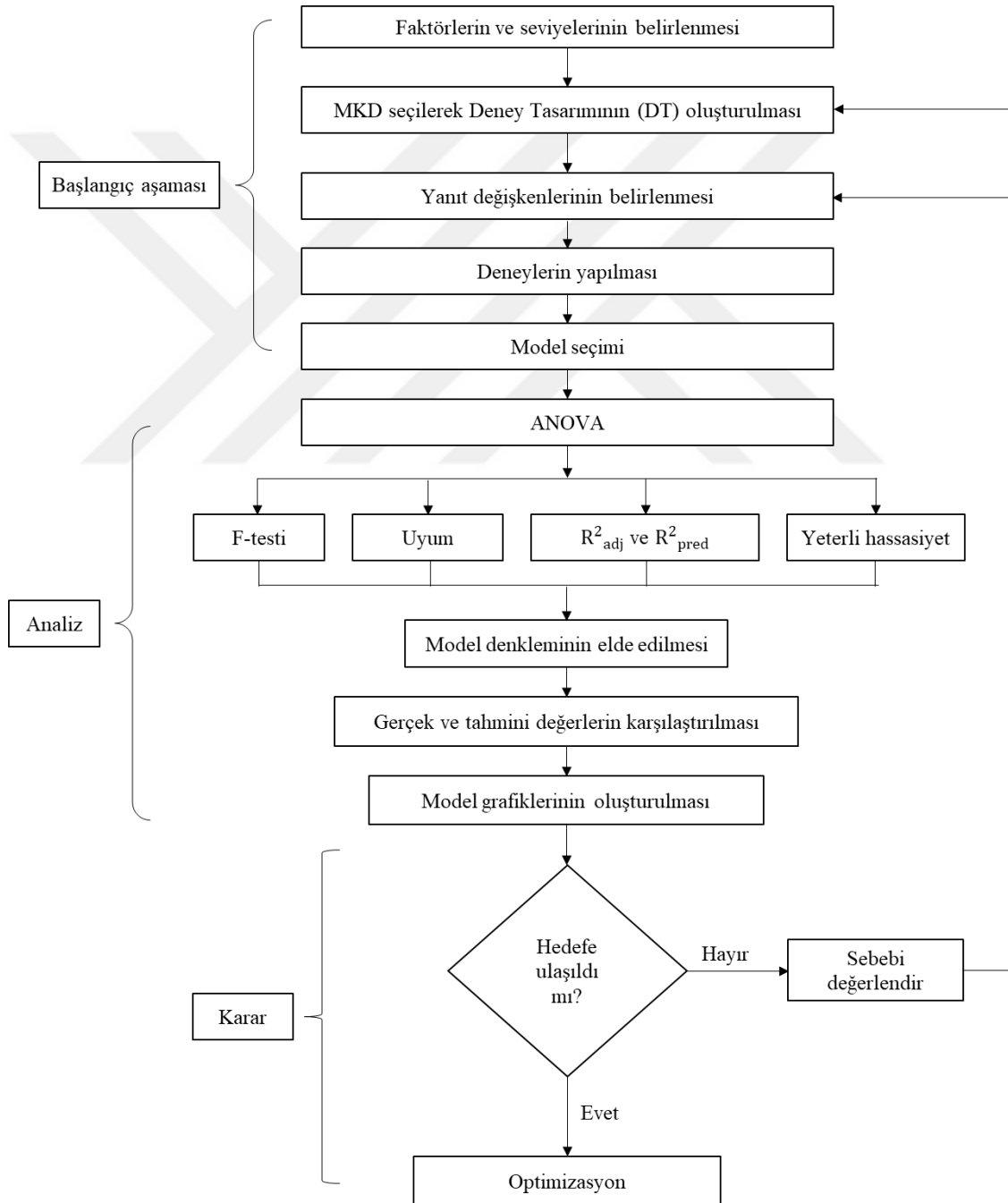
Sonrasında, her bir istenebilirlik fonksiyonunun ağırlıklı geometrik ortalaması olarak Eşitlik (45)'te gösterildiği gibi tanımlanan kompozit (bileşik) istenebilirlik fonksiyonu elde edilir.

$$D = (d_1^{w_1} \times d_2^{w_2} \times d_3^{w_3} \times \dots \times d_n^{w_n})^{\frac{1}{(w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n)}} = \prod_{i=1}^n d_i^{w_i \frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i}} \quad (45)$$

Burada w_i , her bir i numaralı yanıt değerine atanan d_i fonksiyonlarının karşılaştırmalı bir ölçüğüdür, n ise yanıt değerlerinin sayısıdır.

Optimum değerler seti, birden çok başlangıç noktasına sahip bir azaltılmış gradyan algoritması uygulanarak kompozit istenebilirlik fonksiyonunun (D) maksimize edilmesi ile elde edilir.

MKSP optimizasyonu yapılırken izlenecek adımlar Şekil 46'da gösterilmiştir.



Şekil 46. Optimizasyon akış şeması

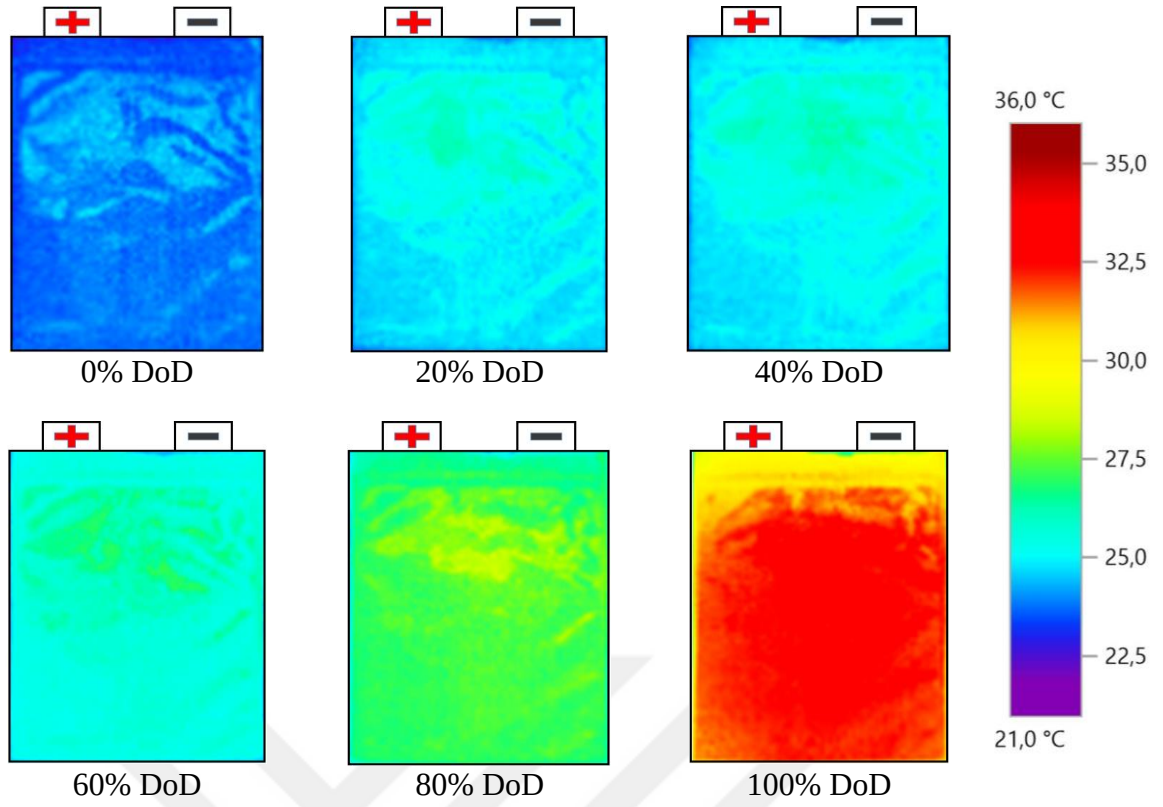
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Doğal Taşınım Deneyi Sonuçları

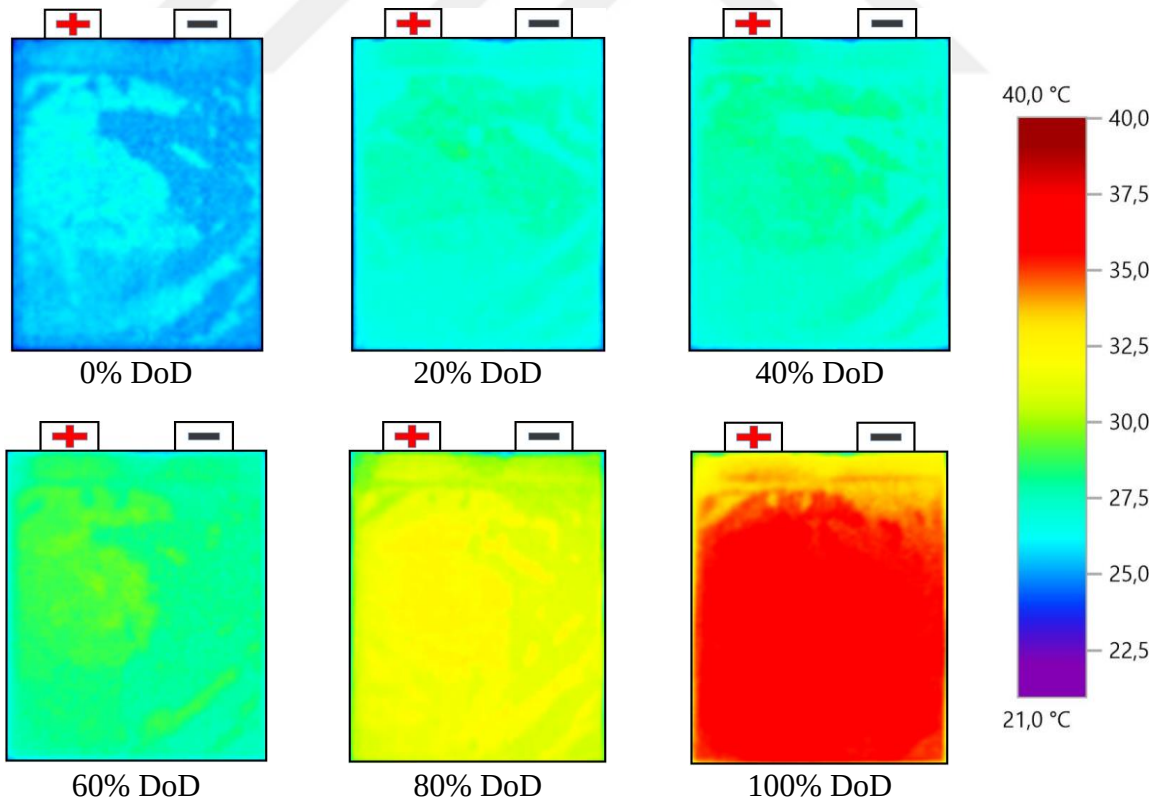
Termal görüntüleme deneyleri, LFP batarya 23 °C ortam sıcaklığında iken 1C-5C hızlarında deşarj sırasında gerçekleştirilmiştir. Batarya yüzey sıcaklığının 1C-5C deşarj hızlarında ve farklı deşarj oranlarında (DoD) değişimi termal kamera ile ölçülmüş olup Şekil 47-51’de gösterilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde maksimum batarya sıcaklığına deşarj sonunda (%100 DoD) ulaşıldığı görülmüş olup, artan deşarj hızıyla (1C-5C) bu sıcaklığın daha da arttığı belirlenmiştir. Yine Şekil 47-51’den anlaşılabacağı üzere her bir deşarj hızında yapılan deneyde, %80 DoD seviyesine kadar bataryanın anot (negatif) ve katot (pozitif) bölgelerinde diğer bölgelere göre daha fazla ısınma olduğu anlaşılmaktadır. Katot ucunda ise anot ucuna göre daha fazla ısınma olduğu görülmektedir. Bu sıcaklık farkı ise, katot ucunda alüminyum, anot ucunda ise bakır malzeme kullanıldığından ve bu iki malzemenin ısı iletim katsayısının farklılığından kaynaklanmaktadır. %80-%100 DoD aralığında, sıcaklığın maksimum olduğu bölgenin, bataryanın yüzeyindeki orta kısımlarda yoğunlaştığı görülmektedir.

1C deşarj hızında yapılan deneylerde farklı DoD seviyelerindeki batarya yüzeyinin termal görüntüleri Şekil 47’de verilmiştir. Deşarj süresi ile doğru orantılı olarak yüzey sıcaklığının arttığı görülmektedir. Deşarj başlangıcında ortalama 24,4 °C olarak ölçülen yüzey sıcaklığı, deşarj sonunda (%100 DoD) 32,2 °C’e yükselmiştir. Yüzeydeki maksimum sıcaklık bölgesi, deşarj süresi boyunca anot katot uçları yakınlarından bataryanın orta kısımlarına doğru kaymaktadır. 1C hızındaki deşarj sonunda, batarya yüzeyinde ölçülen maksimum ve minimum sıcaklıklar ise sırasıyla 33,7 °C ve 30,0 °C olarak ölçülmüştür.

Şekil 48’de, bataryanın 2C deşarj hızında belirli DoD seviyelerindeki yüzey sıcaklıklarına ait termal görüntüler verilmiştir. 1C deşarj hızındaki yüzey sıcaklık dağılımında görülen genel karakteristik yapı, 2C deşarj hızında da korunmuştur. Aynı şekilde batarya yüzeyindeki maksimum sıcaklık bölgesinin deşarj sonlarına doğru batarya gövdesinin ortalarında yoğunlaştığı görülmektedir. 2C hızındaki deşarj sonunda, batarya yüzeyinde ölçülen maksimum, minimum ve ortalama sıcaklıklar ise sırasıyla 38,5 °C, 33,9 °C ve 36,9 °C olarak belirlenmiştir.



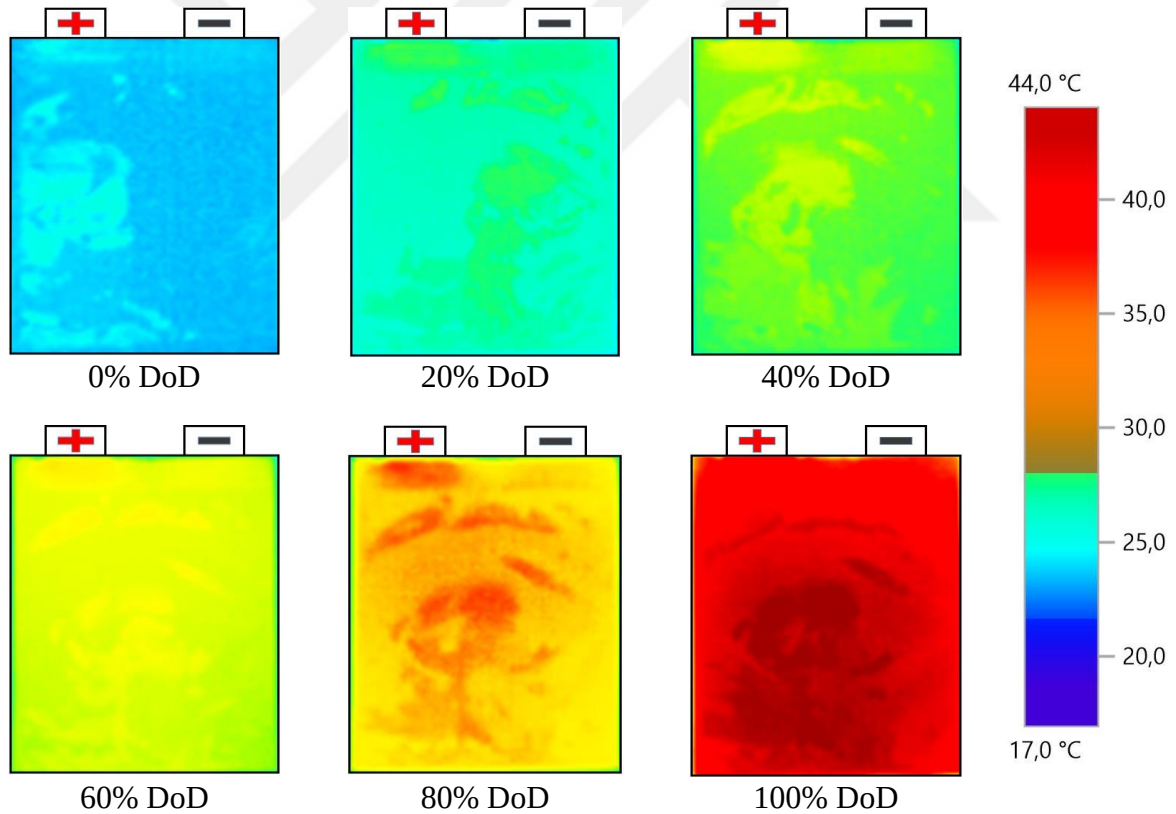
Şekil 47. 1C hızındaki deşarj süresince batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımları



Şekil 48. 2C hızındaki deşarj süresince batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımları

Şekil 49 incelendiğinde, bataryanın 3C deşarj hızında belirli DoD seviyelerindeki yüzey sıcaklık dağılımları görülmektedir. 1C ve 2C deşarj hızlarında olduğu gibi 3C deşarj hızında yapılan deneyde de deşarj sonuna doğru maksimum sıcaklık bölgesinin bataryanın orta bölgelerinde yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Fakat bu deneyde deşarj sonundaki maksimum sıcaklık bölgesi, önceki deşarj hızlarında yapılan deneylerdeki gibi homojen bir yayılıma sahip değildir. 3C hızındaki deşarj sonunda batarya yüzeyinde ölçülen maksimum, minimum ve ortalama sıcaklıklar ise sırasıyla 42,9 °C, 37,6 °C ve 41,2 °C olarak tespit edilmiştir.

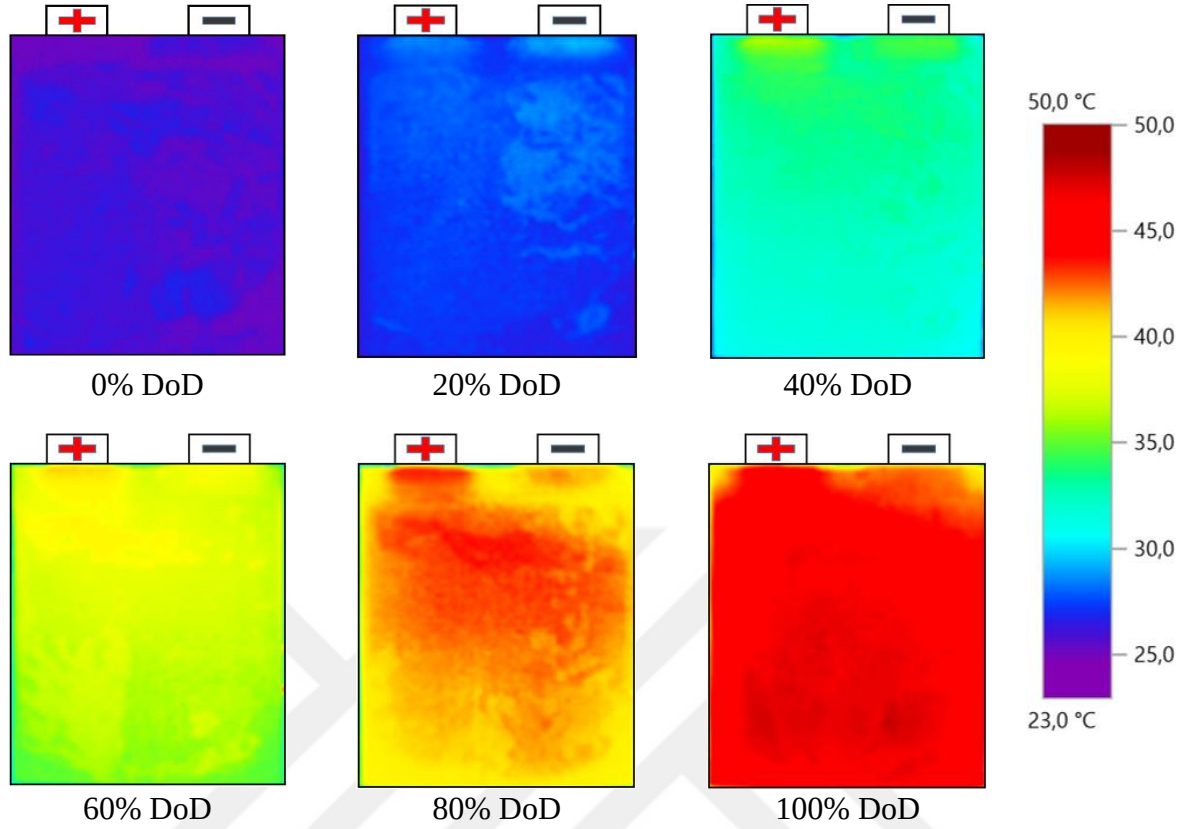
Şekil 50, bataryanın 4C hızındaki deşarjı sırasında, farklı DoD seviyelerine göre yüzey sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Bu deneyde katot bölgesinin anot bölgesine göre daha fazla ısındığı belirgin bir şekilde görülmektedir. Deşarj boyunca maksimum sıcaklık bölgesi %80 DoD seviyesine kadar anot ve katot bölgelerinde yoğunlaşırken, deşarj sonunda (%100 DoD) gövdenin tamamına yayılan bir sıcaklık dağılımı vardır. 4C hızındaki deşarj sonunda batarya yüzeyindeki maksimum, minimum ve ortalama sıcaklıklar ise sırasıyla 47,9 °C, 41,6 °C ve 46,1 °C olarak ölçülmüştür.



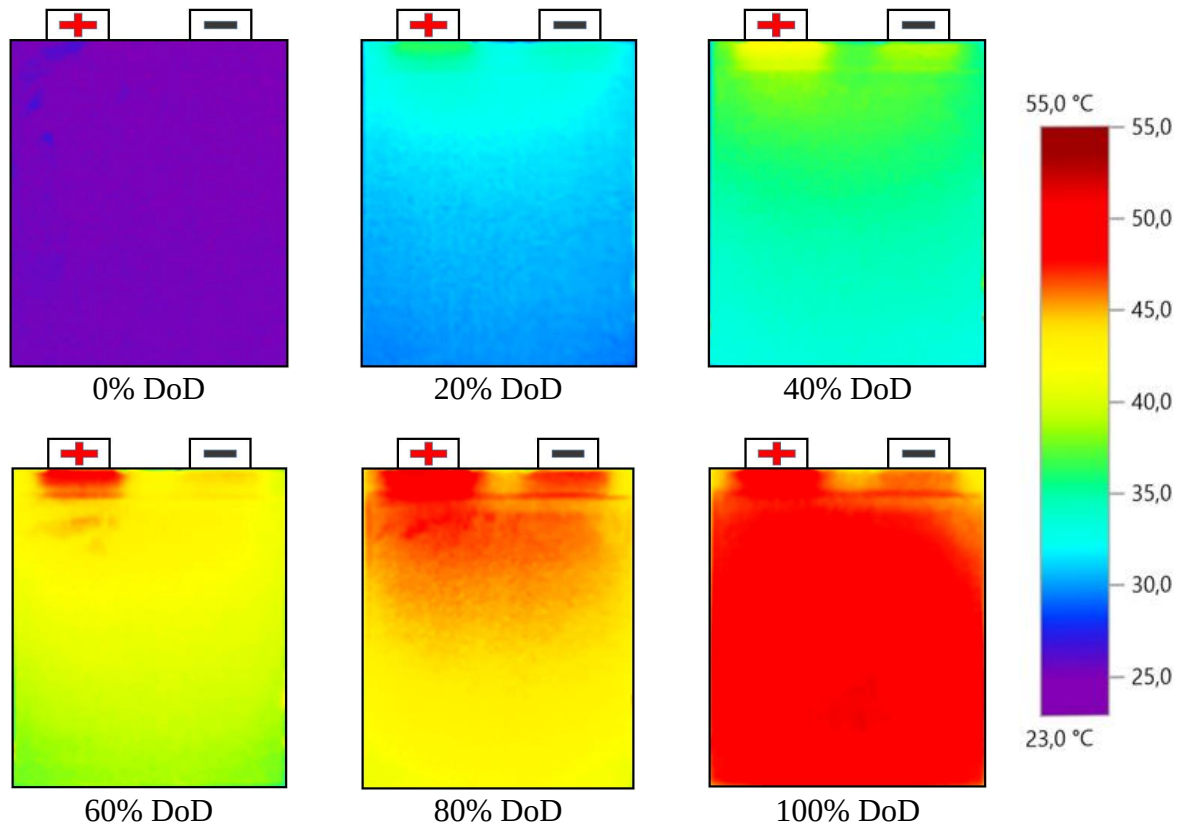
Şekil 49. 3C hızındaki deşarj süresince batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımları

Şekil 51’de ise belirli DoD seviyelerine göre bataryanın 5C hızındaki deşarjı süresince yüzey sıcaklık dağılımları verilmiştir. 4C deşarj hızındaki deneyde görülen sıcaklık dağılım karakteristiğini bu deneyde de görebilmekle birlikte, her DoD seviyesinde katot bölgesi sıcaklığı anot bölgesinden daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. 5C hızındaki deşarj sonunda

batarya yüzeyindeki maksimum, minimum ve ortalama sıcaklıklar ise sırasıyla 52,2 °C, 45,5 °C ve 50,1 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil 50. 4C hızındaki deşarj süresince batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımları

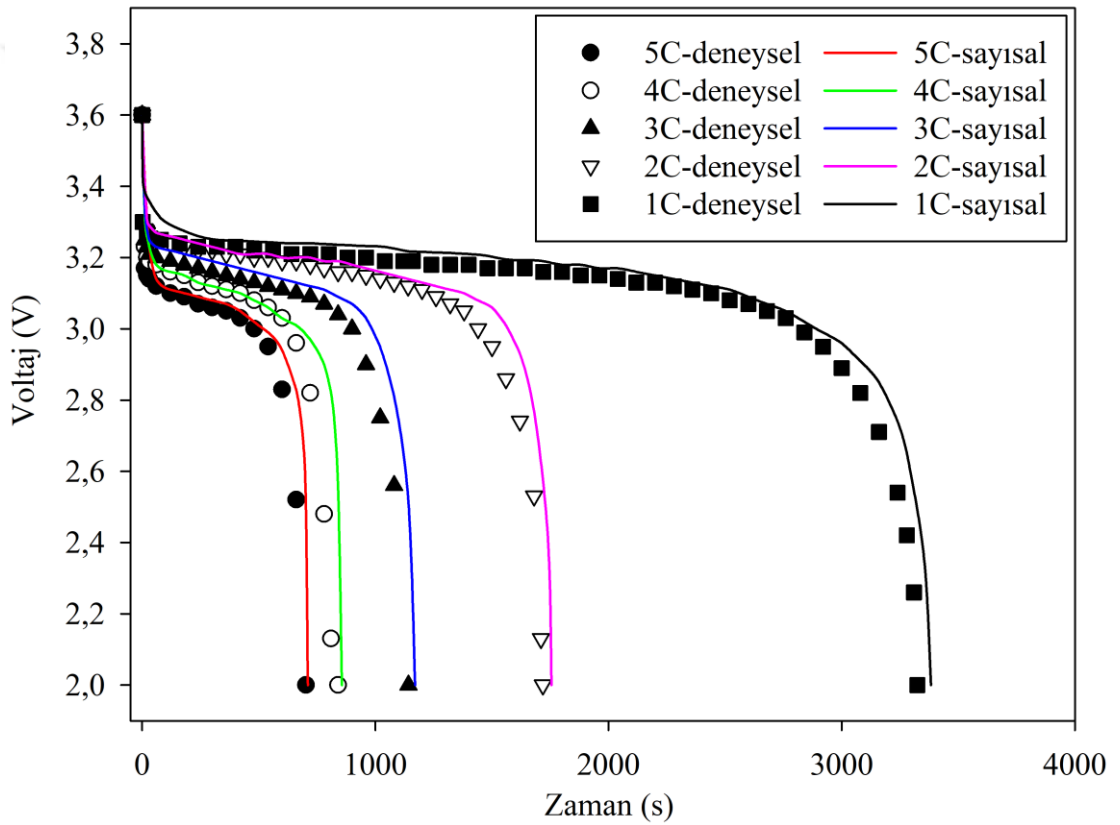


Şekil 51. 5C hızındaki deşarj süresince batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımları

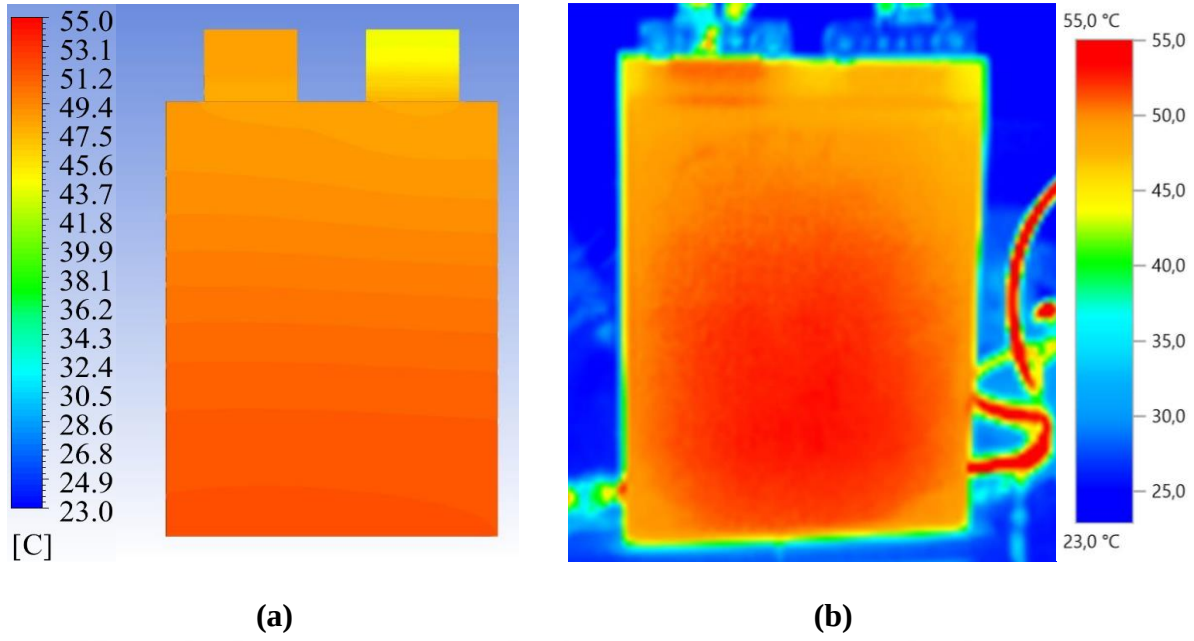
Doğal Taşınım Şartlarındaki Deneysel ve Sayısal Analizlerin Karşılaştırılması

Bataryanın deşarjı süresince voltaj düşümünün deneysel ve sayısal değişimi 1C-5C deşarj hızları için elde edilmiş olup Şekil 52’de verilmiştir. Tam dolu halde yaklaşık 3,6 V gerilime sahip bataryanın, kesme voltajı olan 2 V değerinde deşarjı sonlandırılmıştır. Şekil 52’den anlaşılacağı üzere deşarj hızı arttıkça hem deşarj süresi hem de nominal voltaj değerinin azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, deneysel ve sayısal sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu da görülmektedir.

Şekil 53’te, 5C deşarj hızı sonunda batarya yüzeyindeki deneysel ve sayısal olarak elde edilen sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Bataryanın NTGK elektrokimyasal-termal modelinin deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu maksimum %5,3 hata oranı ile görülmüştür.

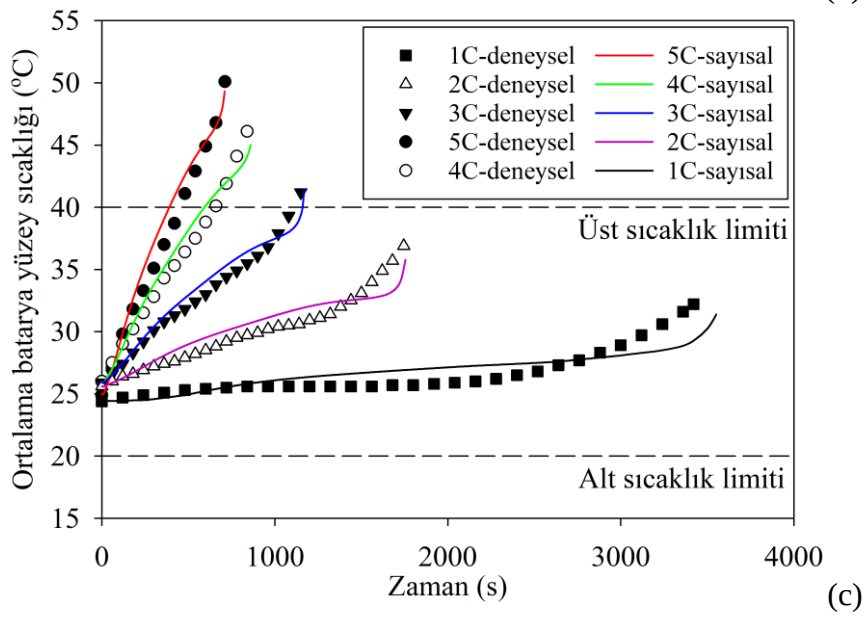
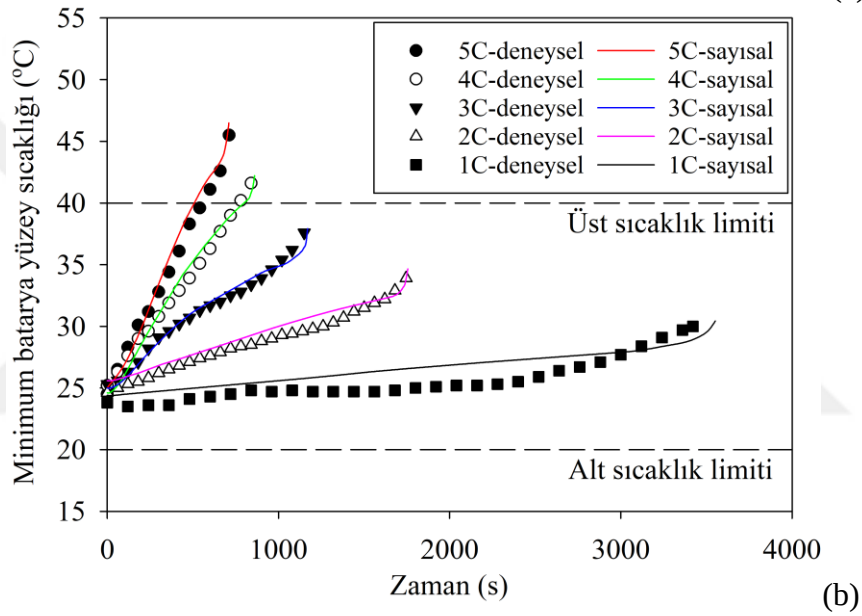
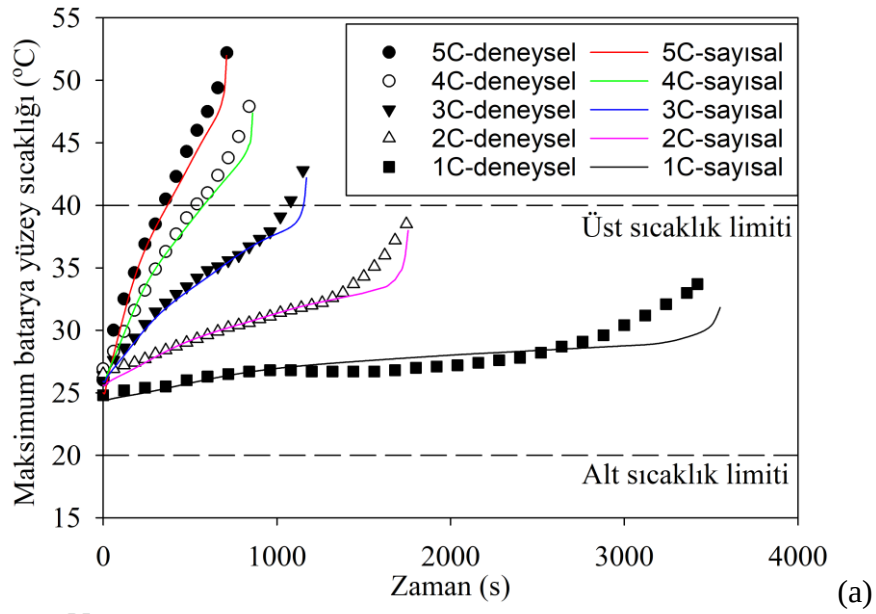


Şekil 52. Farklı deşarj hızlarındaki zamana bağlı voltaj değişimi



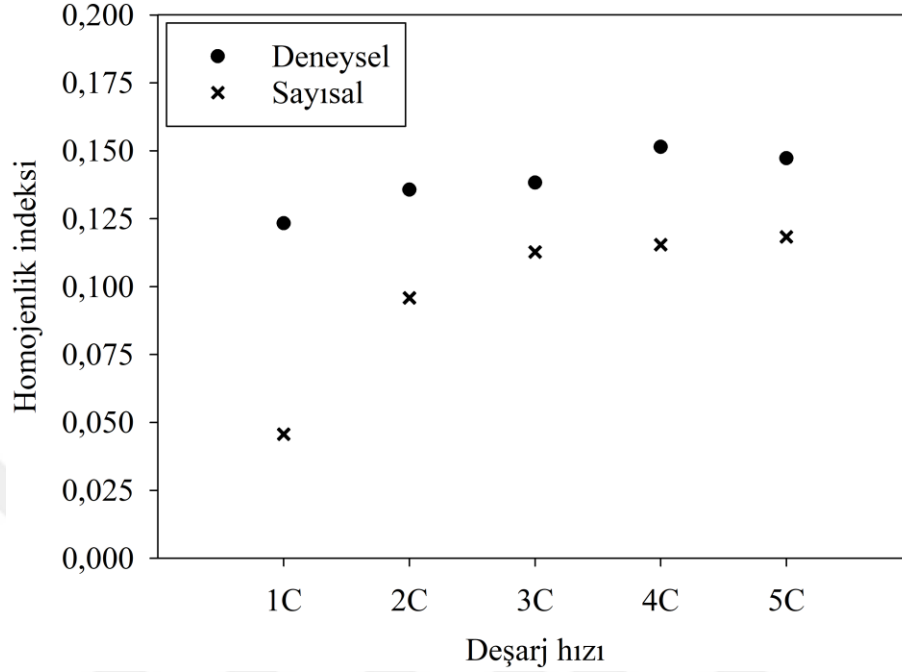
Şekil 53. Doğal taşınım şartlarında bataryanın 5C hızındaki deşarjı sonunda elde edilen a) simülasyon ve b) termal kamera görüntüsü

Termal görüntülerden elde edilen zamana bağlı sıcaklık verileri sonucunda, batarya yüzeyindeki maksimum, minimum ve ortalama sıcaklık değerleri deneysel ve sayısal olarak belirlenmiştir. Sayısal ve deneysel verilerde maksimum %13,1 hata oranı, Şekil 54-a’da görülen 1C deşarj hızında elde edilmiştir. Şekil 54’te gösterildiği gibi batarya yüzey sıcaklıklarının her bir deşarj hızı için zamana göre değişimi verilmiştir. Maksimum, minimum ve ortalama batarya sıcaklıklarının, deşarj hızı ile doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. 1C ve 2C hızlarında, bataryanın deşarjı sonunda ortalama batarya sıcaklığı, Li-iyon bataryalar için tavsiye edilen üst çalışma sıcaklığı sınırını (40 °C) aşmadığı görülürken, 3C, 4C ve 5C hızlarındaki deşarjı sonunda bu sınır aşılmıştır. Bununla birlikte deşarj sonlarına doğru her bir deşarj hızı için maksimum, minimum ve ortalama batarya sıcaklık artışında bir ivmelenme olduğu görülmektedir. Yüksek deşarj hızlarında (3C-5C) doğal taşınım ile soğutmanın batarya için yeterli olmadığı anlaşılmaktadır.



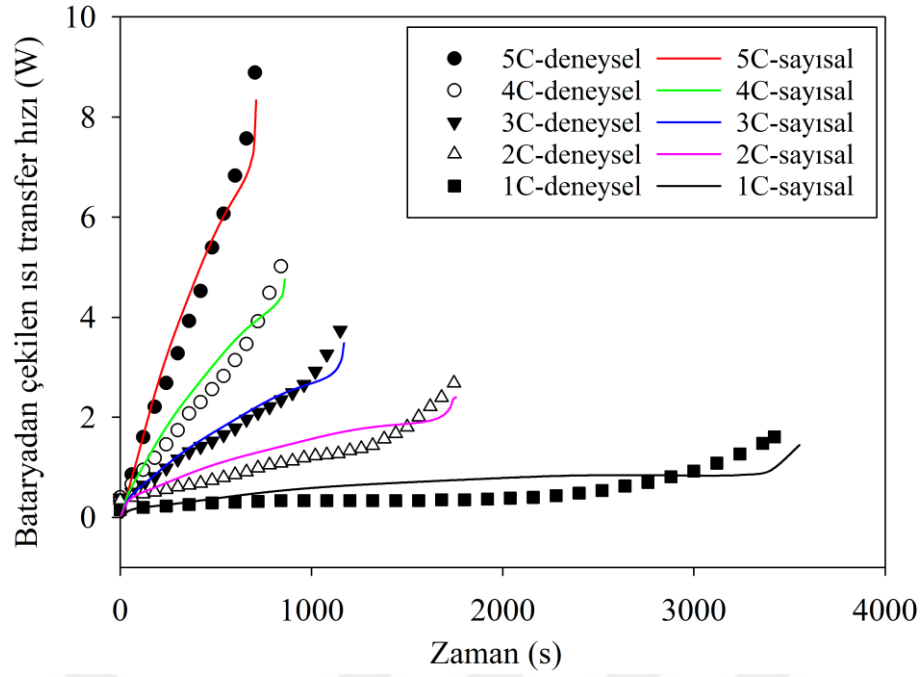
Şekil 54. 1C-5C deşarj hızları arası zamana bağlı a) maksimum, b) minimum ve c) ortalama batarya sıcaklık değişimleri

Bataryanın 1C'den 5C'ye kadar olan deşarj hızları arasında yapılan doğal taşınım şartlarındaki batarya soğutma deneylerinde daha önceden tanımlanan sıcaklık homojenlik indeksi (Θ) değerleri Şekil 55'te verilmiştir. Deşarj hızı arttıkça homojenlik indeksinin arttığı dolayısıyla batarya yüzeyindeki sıcaklık homojenliğinin giderek azaldığı görülmektedir.



Şekil 55. 1C-5C deşarj hızları arası homojenlik indeksleri

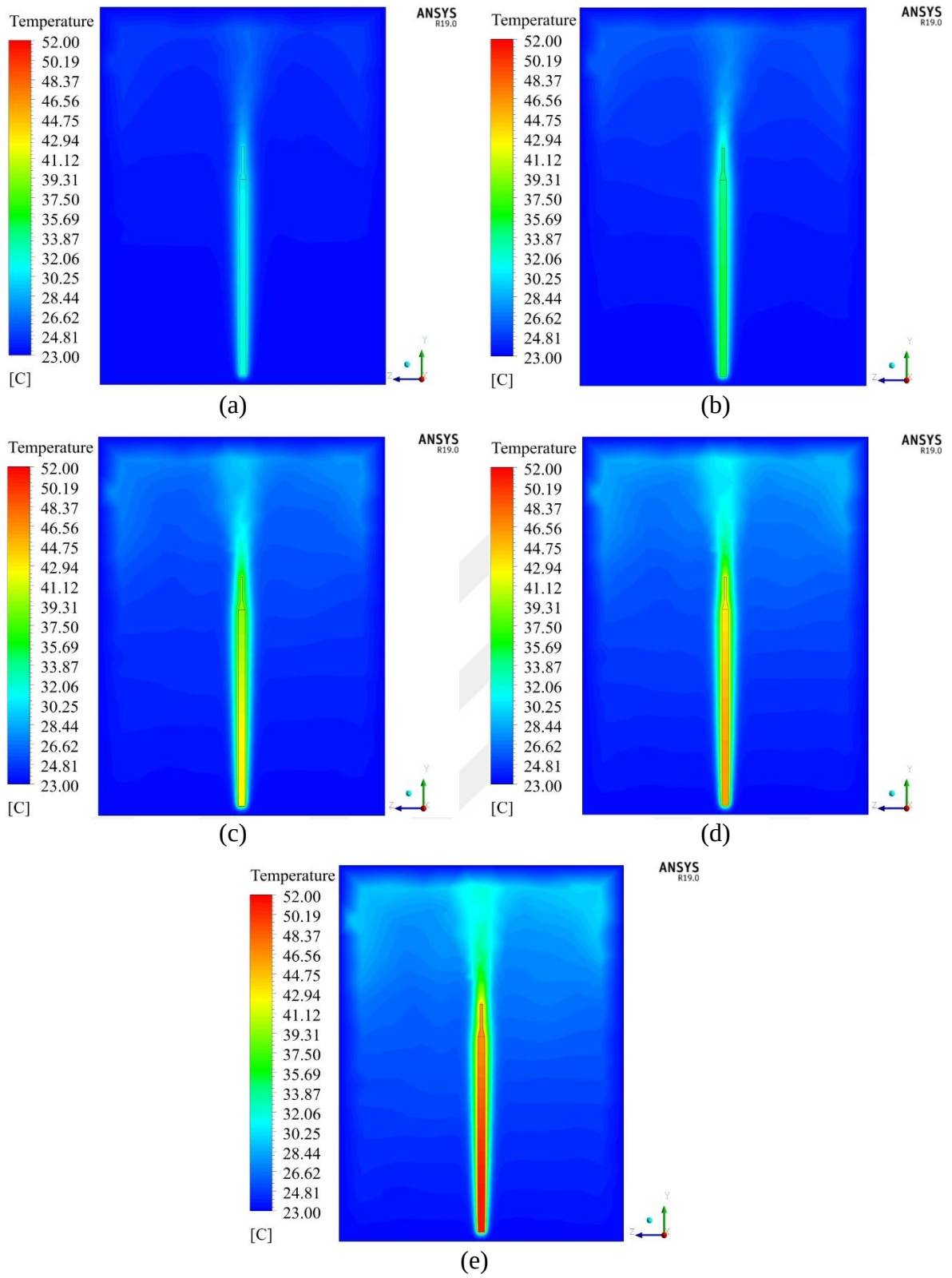
Bataryadan çekilen ısı transfer hızının deneysel olarak hesaplanması için Eşitlik (12) kullanılmış olup bu denklemdeki ısı taşınım katsayısı Eşitlik (11) aracılığıyla belirlenmiştir. Her bir deşarj hızı için, bataryadan çekilen ısı transfer hızının zamana bağlı değişimi Şekil 56'da verilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere artan deşarj hızıyla bataryadan çekilen ısı transfer hızı artmış olup bu durum, ısı taşınım katsayısının ve ortalama batarya yüzey sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının artışı ile açıklanabilir. Bununla birlikte her bir deşarj hızında, batarya deşarj oranı (DoD) arttıkça ortalama batarya yüzey sıcaklığı artacağından dolayı yüzey ve ortam sıcaklık farkı da artacaktır. Buna bağlı olarak ısı taşınım katsayısı, yüzey ve ortam sıcaklık farkı ile doğru orantılı olduğundan, bataryadan çekilen ısı transfer hızının, deşarj hızı ve batarya deşarj oranının artmasıyla arttığı görülmüştür.



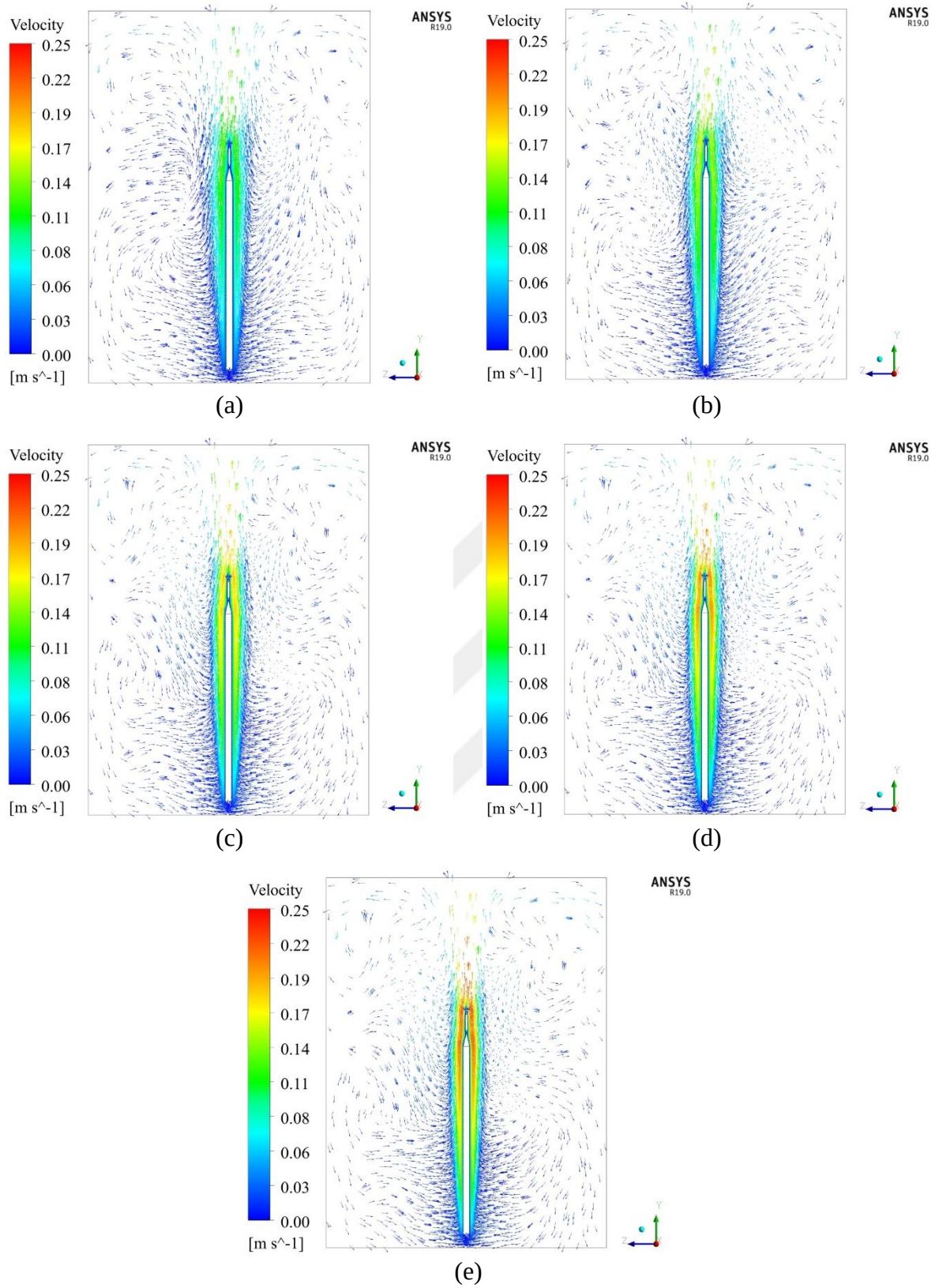
Şekil 56. 1C-5C deşarj hızları arası zamana bağlı bataryadan çekilen ısı transfer hızı

Şekil 57’de, göz önüne alınan deşarj hızlarında batarya ve havanın kesit düzlemindeki sıcaklıklarının değişimi verilmiştir. Yüzeyde oluşan sıcaklık sınır tabakası görülmekte olup beklenildiği üzere deşarj hızının artmasıyla batarya sıcaklığı ve sıcaklık sınır tabaka kalınlığının arttığı belirlenmiştir. Maksimum deşarj hızında (5C) batarya gövdesi boyunca en alt, orta ve en üst bölgenin ($x=0$ mm, $x=155$ mm ve $x=210$ mm) ortalama sınır tabaka sıcaklıkları sırasıyla $35,0^{\circ}\text{C}$, $35,5^{\circ}\text{C}$ ve $34,2^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplanmıştır. Minimum deşarj hızında (1C) batarya gövdesi boyunca en alt, orta ve en üst bölgenin ($x=0$ mm, $x=155$ mm ve $x=210$ mm) ortalama sınır tabaka sıcaklıkları ise sırasıyla $29,0^{\circ}\text{C}$, $28,9^{\circ}\text{C}$ ve $28,5^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 58’de aynı düzlemde doğal taşınım ile gerçekleşen hava hızı vektörleri ve hız sınır tabakasının farklı deşarj hızlarında değişimleri verilmiştir. Deşarj hızının artması ile hız sınır tabakadaki ortalama hava hızının arttığı anlaşılmaktadır. Maksimum deşarj hızında (5C) batarya gövdesi boyunca en alt, orta ve en üst bölgenin ($x=0$ mm, $x=155$ mm ve $x=210$ mm) ortalama sınır tabaka hızları sırasıyla $0,002$ m/s, $0,077$ m/s ve $0,106$ m/s olarak hesaplanmıştır. Minimum deşarj hızında (1C) batarya gövdesi boyunca en alt, orta ve en üst bölgenin ($x=0$ mm, $x=155$ mm ve $x=210$ mm) ortalama sınır tabaka hızları ise sırasıyla $0,002$ m/s, $0,050$ m/s ve $0,061$ m/s olarak hesaplanmıştır.



Şekil 57. Hava ve batarya modelinin a) 1C, b) 2C, c) 3C, d) 4C, e) 5C deşarj hızlarındaki en-kesit yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımları

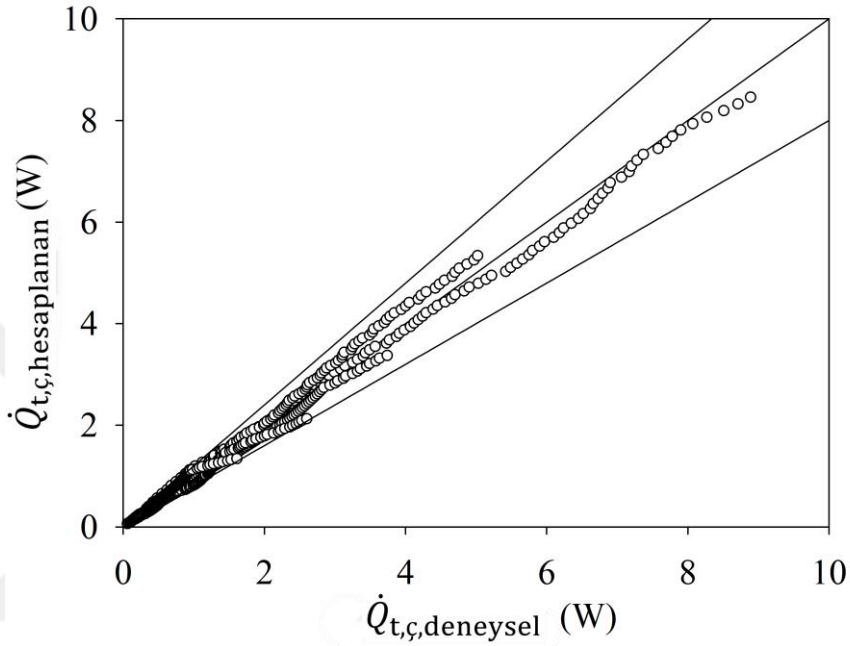


Şekil 58. Hava ve batarya modelinin a) 1C, b) 2C, c) 3C, d) 4C, e) 5C deşarj hızlarındaki enkesit yüzeyinde oluşan hız dağılımları

Yapılan deneysel çalışma sonuçları kullanılarak bataryadan çekilen ısı transfer hızının tahmini için regresyon analizi yöntemi ile deşarj oranı (DoD) ve bataryadan çekilen akıma (I) bağlı bir korelasyon geliştirilmiş olup Eşitlik (46)'da verilmiştir. Elde edilen denklemin

sonuçları ve deneysel sonuçlar Şekil 59’da karşılaştırılmış olup denklemin maksimum $\pm\%20$ hata aralığında tahmin edebildiği görülmektedir. Yapılan regresyon analizinde toplamda 505 adet veri kullanılmış olup bu verilerin 426 adeti $\pm\%10$ hata bandının altında kalırken sadece 79 adeti $\pm\%10$ -20 hata bandı aralığındadır. Gerçekleştirilen regresyon analizindeki R^2 değeri ise yaklaşık 0,99 olarak elde edilmiştir.

$$\dot{Q}_{t,\zeta} = [0,593(DOD)^3 - 0,641(DOD)^2 + 0,856(DOD) + 0,04]e^{0,023 I} \quad (46)$$



Şekil 59. Deneysel ve hesaplanan ısı transfer hızlarının regresyon analizi

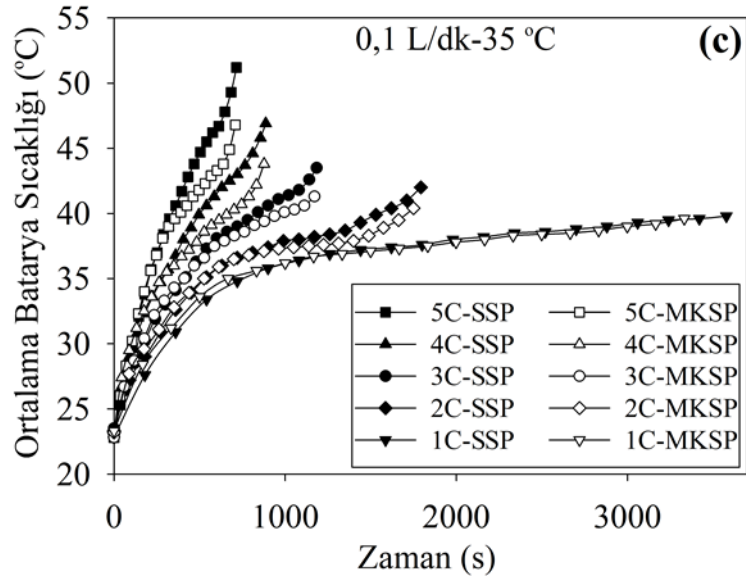
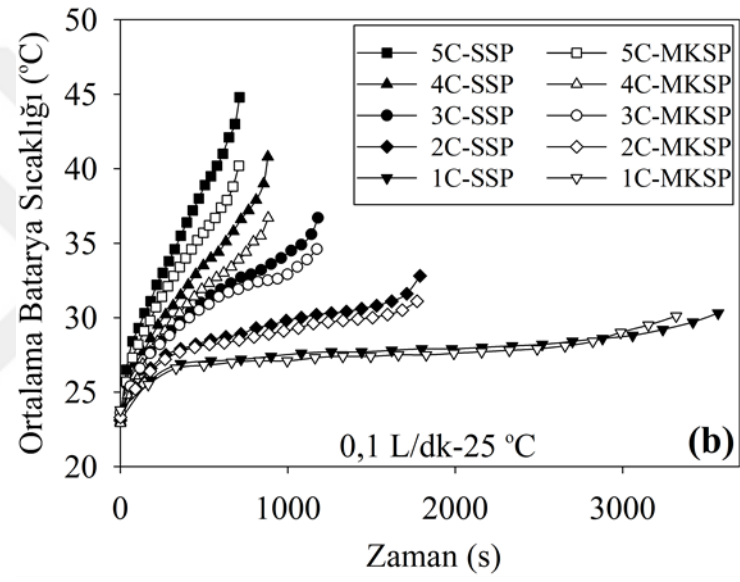
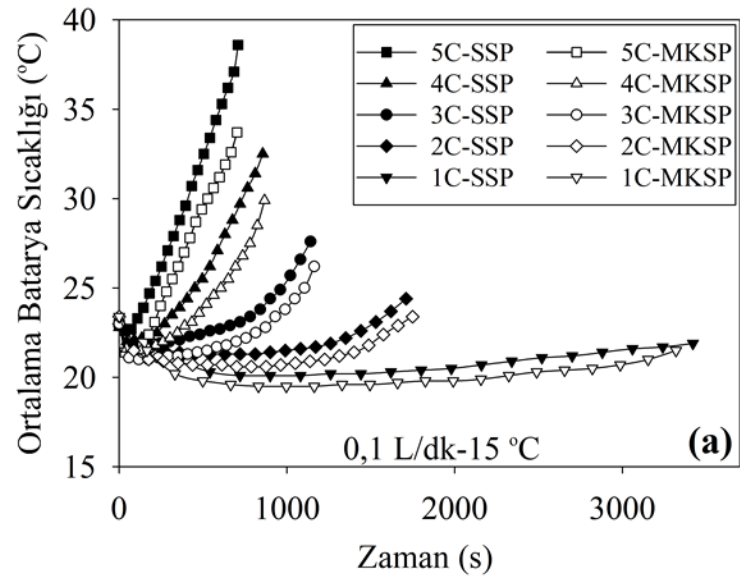
Sıvı Soğutma Deney Sonuçları

Yapılan kontrollü deneylerde geleneksel serpantinli soğutucu plakanın (SSP) ve yeni kanal tasarımına sahip mini kanallı soğutucu plakanın (MKSP), LFP torba tip bataryayı soğutma performansları incelenmiştir. Deneyler, üç farklı bağımsız değişkenden oluşan parametrelerin farklı değerlerde sabit tutulması ile gerçekleştirilmiştir. Bunlardan birisi akışkanın hacimsel debisi olup 0,1 L/dk, 0,6 L/dk ve 1,1 L/dk olmak üzere üç farklı değerde sabit tutulmuştur. Diğer bir parametre, akışkanın soğutucu plakalara giriş sıcaklığıdır. Soğutma sıvısı olarak kullanılan su, 15 °C, 25 °C ve 35 °C giriş sıcaklıklarında sabit tutularak deneyler yapılmıştır. Bir diğer parametre ise batarya deşarj hızıdır ki bu da 1C, 2C, 3C, 4C ve 5C olmak üzere beş farklı değerde sabit tutularak deneyler yapılmıştır. Toplamda 45 farklı durumda SSP ve MKSP plakalarının soğutma performansları incelenerek karşılaştırılmıştır. Bataryanın iki yüzeyindeki 9 farklı kritik noktadan yapılan sıcaklık ölçümlerinin ortalaması alınarak, ortalama batarya sıcaklıkları elde edilmiştir.

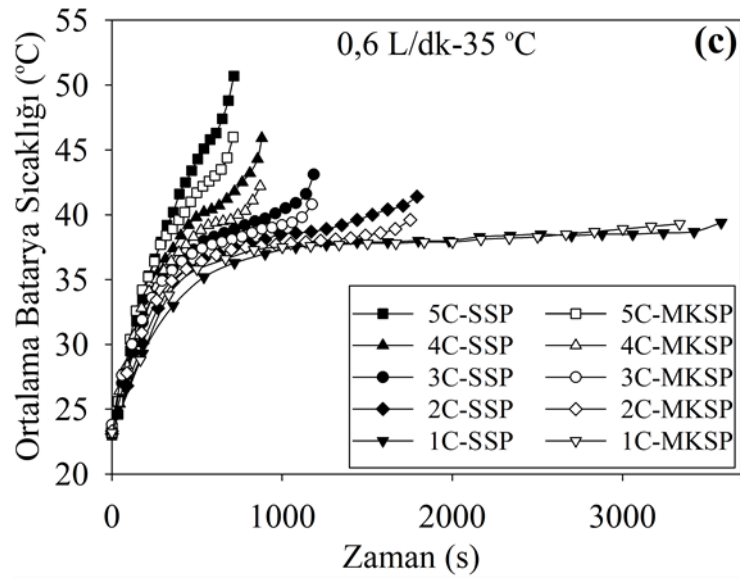
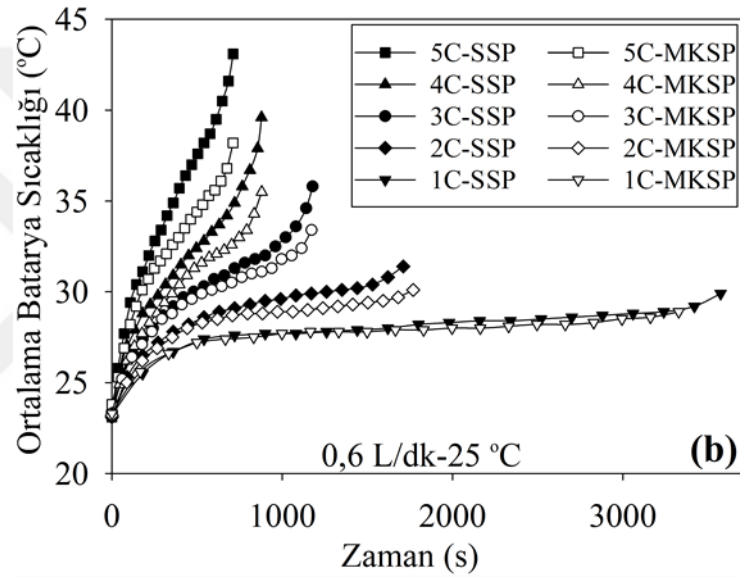
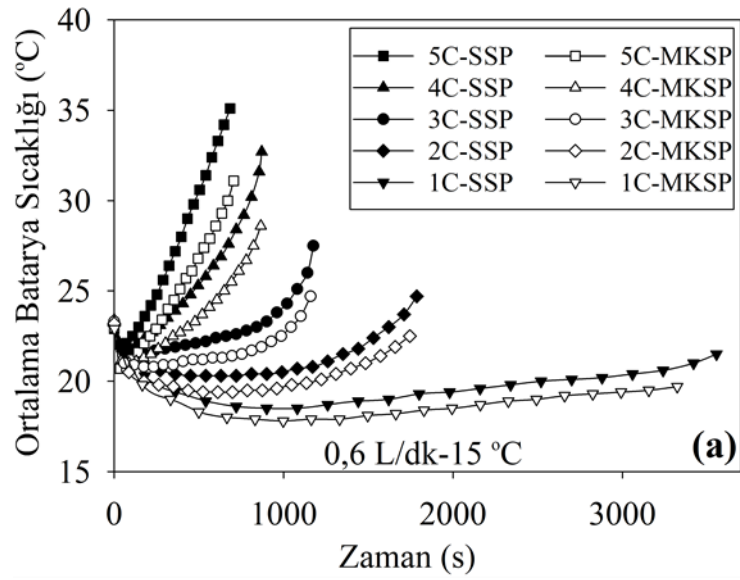
Soğutma suyunun 0,1 L/dk debi, 15 °C, 25 °C ve 35 °C giriş sıcaklıklarında sabit tutulduğu deneylerdeki ortalama batarya sıcaklıklarının zamana göre değişim grafikleri her iki plaka için de Şekil 60'ta verilmiştir. Aynı giriş sıcaklıkları için 0,6 L/dk ve 1,1 L/dk su debilerinde yapılan deneylerdeki ortalama batarya sıcaklıklarının zamana göre değişim grafikleri ise sırasıyla Şekil 61 ve Şekil 62'de verilmiştir. Tüm çalışma şartlarında ortalama batarya sıcaklıklarının, deşarj hızı artıkça ısı üretiminin artmasına bağlı olarak arttığı görülmektedir. Yine Şekil 60, Şekil 61 ve Şekil 62 genel olarak incelendiğinde, su giriş sıcaklığı arttıkça ortalama batarya sıcaklıklarının, her bir durum için deşarj sonunda ulaştığı maksimum değerlerinin de arttığı görülmektedir. Ayrıca aynı su giriş sıcaklığı şartlarında, su debisi arttıkça ortalama batarya sıcaklığı da beklenildiği üzere azalmaktadır.

Li-iyon bataryalar için tavsiye edilen çalışma sıcaklığı 20 °C-40 °C aralığında olduğu daha önceden belirtilmişti. Bu kapsamda, 35 °C su giriş sıcaklığına ait grafiklerin gösterildiği Şekil 60-c, Şekil 61-c ve Şekil 62-c incelendiğinde, 3C, 4C ve 5C deşarj hızlarında yapılan deneylerde ortalama batarya sıcaklıklarının 40 °C olan üst sıcaklık limitini her iki plaka kullanımında da aştığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla 35 °C su giriş sıcaklığı ile yapılan soğutmanın yüksek deşarj hızlarında yetersiz kaldığı tespit edilmiştir.

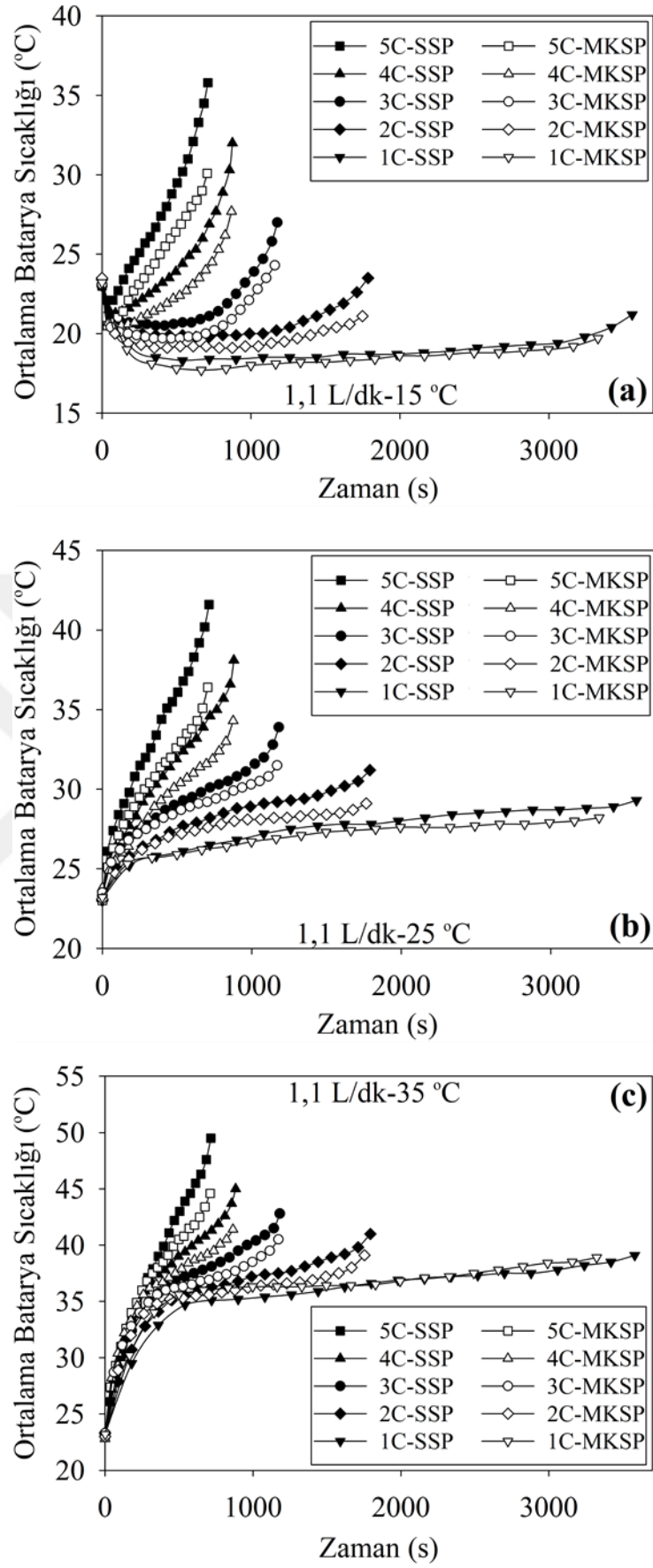
Zamana bağlı ortalama batarya sıcaklıklarının deşarj sonunda ulaştığı maksimum değerler incelendiğinde, 1,1 L/dk su debisi ve 15 °C su giriş sıcaklığı ile yapılan deneyin en etkili soğutma performansı sergilediği Şekil 62-a'dan anlaşılmaktadır. Şekil 60-a, Şekil 61-a ve Şekil 62-a'da gösterilen 15 °C su giriş sıcaklığı şartlarında, 1C ile 5C deşarj hızı arasında ortalama batarya sıcaklıklarında oluşan farkın diğer giriş sıcaklıklarındaki farklara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bilindiği üzere batarya yüzeyinde oluşan sıcaklık farkları, batarya performansı, sağlığı ve güvenliği açısından olumsuz etkilere sahiptir. Her ne kadar düşük su giriş sıcaklıklarında maksimum batarya sıcaklığı en düşük seviyelerde tutulabilse de batarya yüzeyinde oluşan yüksek sıcaklık farklarından dolayı bu durumun batarya ısı yönetimi açısından uygun olmadığı sonucuna varılabilir. Ayrıca düşük deşarj hızlarında ortalama batarya sıcaklığının optimum çalışma sıcaklığı alt limiti olan 20 °C'nin altına düştüğü görülmektedir.



Şekil 60. 0,1 L/dk su debisi, a) 15 °C, b) 25 °C ve c) 35 °C su giriş sıcaklığı ve 1C-5C deşarj hızı şartlarında ortalama batarya sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi



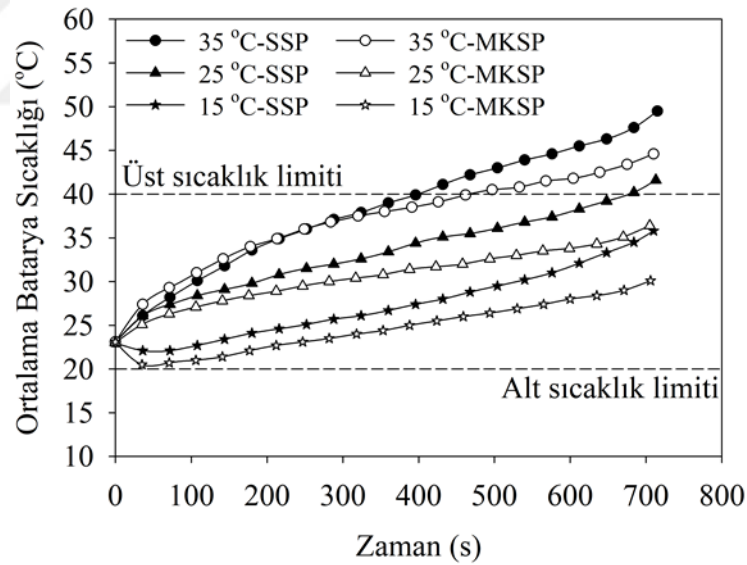
Şekil 61. 0,6 L/dk su debisi, a) 15 °C, b) 25 °C ve c) 35 °C su giriş sıcaklığı ve 1C-5C deşarj hızı şartlarında ortalama batarya sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi



Şekil 62. 1,1 L/dk su debisi, a) 15 °C, b) 25 °C ve c) 35 °C su giriş sıcaklığı ve 1C-5C deşarj hızı şartlarında ortalama batarya sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi

SSP kullanılan deneylerde ortalama batarya sıcaklığının, sadece 15 °C su giriş sıcaklığı şartında üst limit sıcaklığının altında tutulabildiği görülmektedir. Bu sıcaklığın alt limit değerinin üstünde tutulması ise sadece 0,1 L/dk su debisi şartında sağlanabilmiştir. MKSP kullanılan deneyler göz önüne alındığında, 0,6 L/dk su debisi ve 25 °C su giriş sıcaklığında bataryanın optimum çalışma sıcaklık aralığında tutulabildiği belirlenmiştir. MKSP ile yapılan deneylerde bataryanın maksimum sıcaklığında elde edilen iyileşmenin deşarj hızı arttıkça arttığı görülmektedir. Ayrıca giriş suyu sıcaklığı ile ortalama batarya sıcaklığı arasındaki fark arttıkça da elde edilen ısıl iyileşme zamana bağlı olarak artmaktadır.

SSP ve MKSP'nin soğutma etkinliklerini kıyaslamak için maksimum debideki (1,1 L/dk) ve maksimum deşarj hızındaki (5C) ortalama batarya sıcaklıklarının zamana göre değişimi Şekil 63'te verilmiştir. 25 °C su giriş sıcaklığında, MKSP ile batarya üst limit sıcaklığının altında tutulabildiği görülmektedir. SSP ile ise 15 °C su giriş sıcaklığında limit değerinin altında tutulabildiği görülmektedir. Bu durumda, 25 °C su giriş sıcaklığı ile MKSP'nin etkin soğutma sağlayabilmesinin hem sıcaklık homojenliği açısından hem de soğutma sistemine harcanacak harici enerjiden tasarruf açısından avantaj sağladığı anlaşılmaktadır. MKSP kullanımı ile elde edilen soğutmadaki maksimum iyileşme, 15 °C su giriş sıcaklığında 5,7 °C olarak ölçülmüştür.

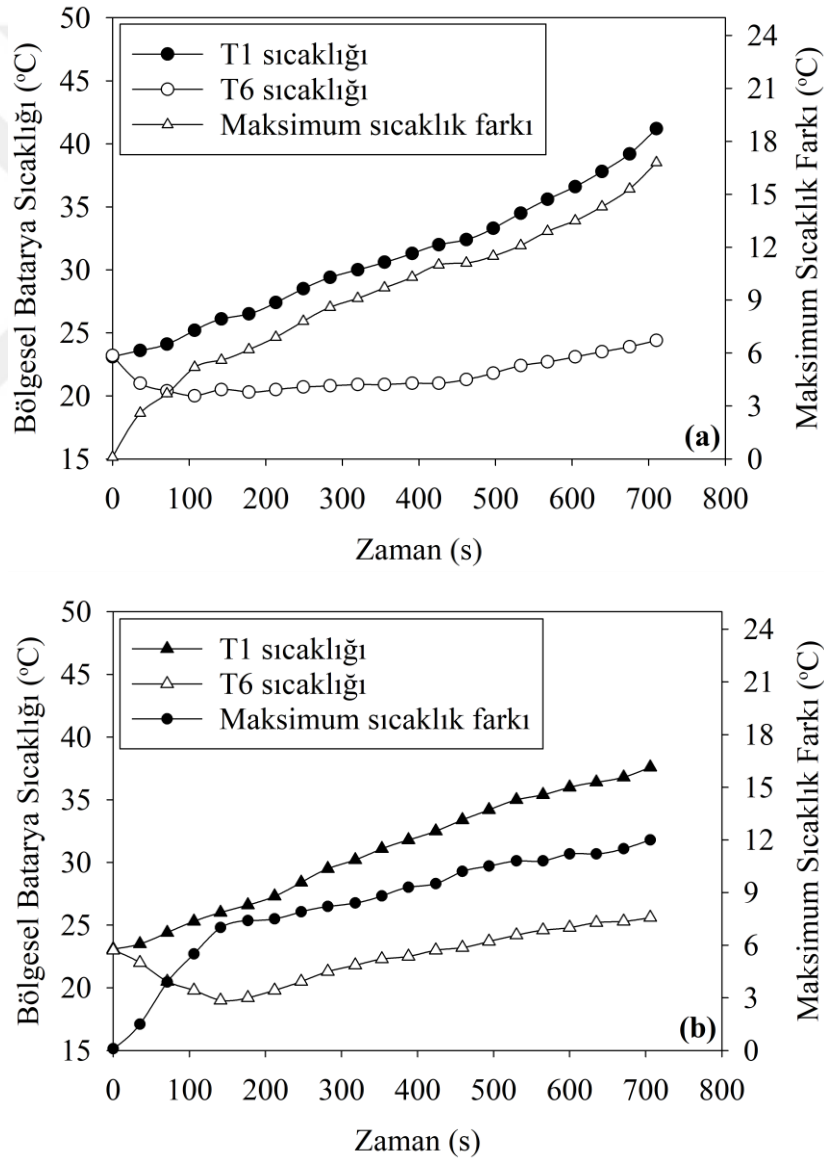


Şekil 63. 1,1 L/dk su debisinde ve 5C deşarj hızında SSP ve MKSP'nin soğutma performansları

Batarya yüzeyindeki bölgesel sıcaklık değişimi

Bir Li-iyon bataryanın yüzeyindeki sıcaklık homojenliği batarya performansı, ömrü ve güvenliği açısından önemli bir kriterdir. SSP ve MKSP kullanılan soğutma deneylerinde batarya yüzeyinde konumlandırılan 9 adet ısı çifti ile yüzey sıcaklıkları deneysel olarak ölçülmüştür. Şekil 27-a'da görüldüğü üzere T1 ve T9 arasında adlandırılan ölçüm noktalarının sıcaklıkları tüm şartlarda yapılan deneyler için değerlendirilmiş. Her iki plaka içinde T1 ve T6

noktaları, tüm deneylerde sırasıyla maksimum ve minimum sıcaklık değerlerine sahip olmuştur. T1 sıcaklık noktası bataryanın pozitif ucu yakınlarına denk gelirken, T6 sıcaklık noktası ise bataryanın orta kısmının negatif uç tarafına denk gelmektedir. Şekil 64'te bataryanın, en zorlu çalışma şartları olan 1,1 L/dk su debisi, 15 °C su giriş sıcaklığı ve 5C deşarj hızı şartlarında zamana bağlı maksimum ve minimum sıcaklıklarının değişimi verilmiştir. Deşarj sonunda SSP ve MKSP için elde edilen maksimum bölgesel sıcaklık farkları sırasıyla 16,8 °C ve 12,0 °C olmuştur. Ayrıca minimum sıcaklık değeri her iki plaka için de yaklaşık yüz ellinci saniyelere kadar düşüş gösterirken sonrasında artışa geçmiştir. Maksimum sıcaklık farkı ise yine yaklaşık yüz ellinci saniyelere kadar MKSP için daha ivmeli bir artış göstermekte iken, SSP kullanılan deneyde bu süre sonrasında daha ivmeli bir artış gösterdiği Şekil 64-a ve Şekil 64-b'den anlaşılmaktadır.



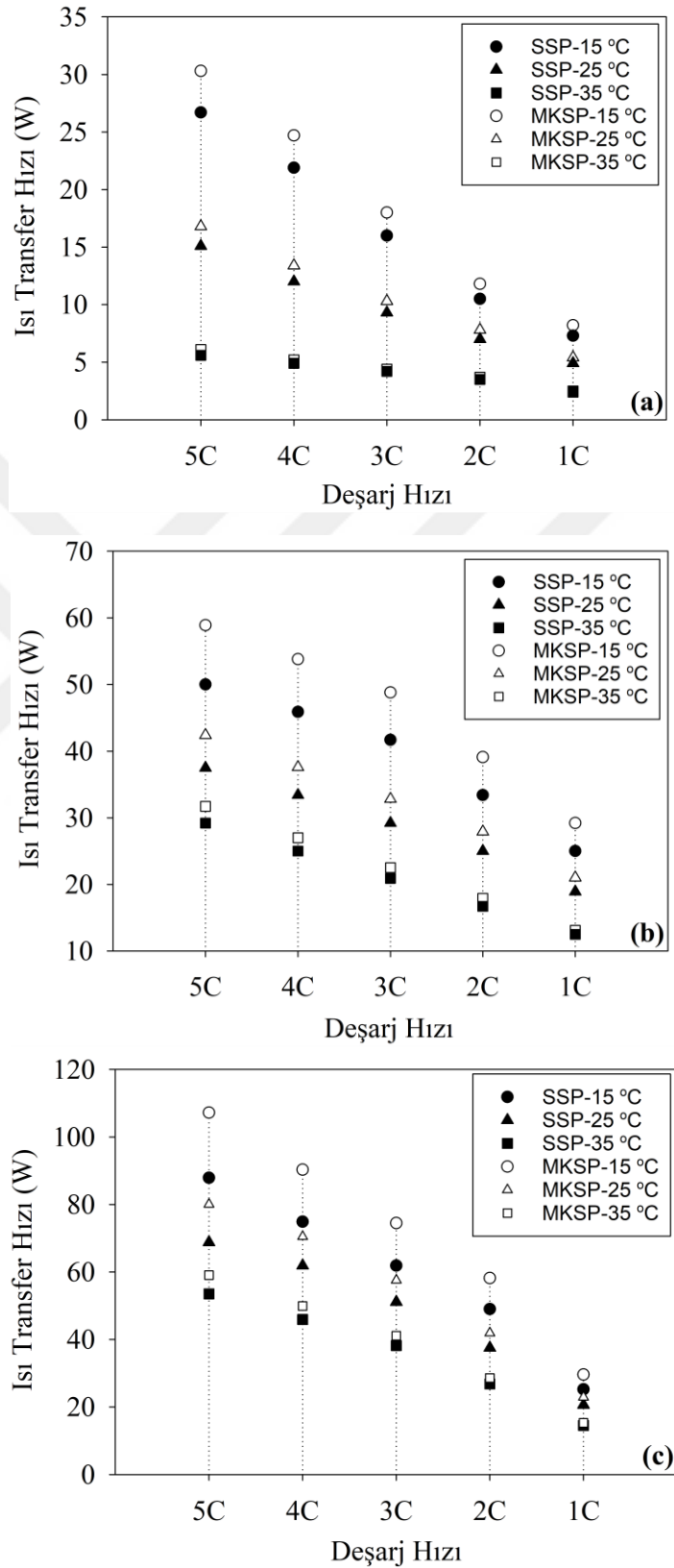
Şekil 64. Batarya yüzeyinde a) SSP ve b) MKSP ile elde edilen bölgesel sıcaklık farkları

SSP ve MKSP ile elde edilen ısı transfer hızları

SSP ve MKSP'nin soğutma performanslarını analiz etmenin diğer bir yolu da batarya yüzeyindeki ısı transfer hızlarını incelemektir. Soğutma sıvısına olan ısı transfer hızı; soğutma sıvısının kütleli debisi, özgül ısı kapasitesi ve giriş-çıkış sıcaklık farklarının çarpımı olarak hesaplanmıştır. Belirli su giriş sıcaklıklarındaki (15 °C, 25 °C, 35 °C) ve su debilerindeki (0,1 L/dk, 0,6 L/dk, 1,1 L/dk) deneysel çalışma şartlarında her iki plaka ile elde edilen ısı transfer hızları Şekil 65'te gösterilmiştir. 1C ile 5C deşarj hızları arasında yapılan deneylerin sonunda maksimum ulaşılan ısı transfer hızları değerlendirilmiştir. Bütün çalışma şartlarında deşarj hızı arttıkça ve su giriş sıcaklığı azaldıkça ısı transfer hızının arttığı görülmektedir. MKSP kullanımı ile soğutma sıvısının plaka ile temas yüzey alanı artırılarak ısı transferinde iyileşme elde edilmiştir. Maksimum ısı transfer hızı MKSP kullanımı ile 5C deşarj hızı, 1,1 L/dk su debisi ve 15 °C su giriş sıcaklığı şartlarında elde edilmiş olup 107,1 W olarak hesaplanmıştır. Aynı şartlarda SSP kullanımı ile elde edilen ısı transfer hızı ise 87,9 W bulunmuştur. Maksimum ısı transfer hızlarının elde edildiği bu şartlarda, MKSP kullanımı ile ısı transfer hızında %22 artış elde edilmiştir. MKSP kullanımı ile ısı transfer hızındaki minimum artış ise 1C deşarj hızı, 1,1 L/dk su debisi ve 35 °C su giriş sıcaklığı şartlarında elde edilmiş olup %5 olarak hesaplanmıştır. Yüksek su giriş sıcaklıklarında batarya sıcaklığı ile soğutma sıvısının sıcaklığı arasındaki fark azalacağından ısı transferi de nispeten azalacaktır. Bu sebeple yüksek su giriş sıcaklıklarında, MKSP ile elde edilen iyileşmenin daha az olduğu görülmektedir.

Elektrikli araçlarda batarya paketlerinin ağırlığının en aza indirgenmesi için soğutucu plakaların hafif tasarımlara sahip olması önemli bir parametredir (Zhao et al., 2021). Bu sebeple geleneksel tasarıma sahip SSP ve yeni tasarıma sahip MKSP için birim kütle başına bataryadan çekilen ısı transfer hızlarını kıyaslamak, plakaların soğutma performanslarını değerlendirmek açısından anlamlı olmaktadır. Batarya test paketinin ağırlığı hesaplanırken iki adet soğutma plakası, batarya ve kanallarda bulunan soğutma sıvılarının ağırlıkları toplamı göz önüne alınmıştır. Bu bağlamda, SSP ve MKSP içeren batarya test paketlerinin kütleleri sırasıyla 2,360 kg ve 2,161 kg olarak ölçülmüştür. SSP ve MKSP içeren batarya test paketleri için farklı deşarj hızları, soğutma sıvısı giriş sıcaklığı ve soğutma sıvısı debisi şartlarında birim kütle başına elde edilen ısı transfer hızları Tablo 17'de verilmiştir. Tablo 17 incelendiğinde, soğutma performansındaki maksimum iyileşmenin; 5C deşarj hızı, 1,1 L/dk soğutma sıvısı debisi ve 15 °C soğutma sıvısı giriş sıcaklığı şartlarında elde edildiği görülmektedir. Bu şartlarda, SSP ile bataryadan 37,2 W/kg ısı transfer hızı elde edilirken, MKSP kullanımı ile bu değer 49,5 W/kg seviyesine çıkarılmıştır. Minimum iyileşme ise 1C deşarj hızı, 0,1 L/dk soğutma sıvısı debisi ve 35 °C soğutma sıvısı giriş sıcaklığı şartlarında gerçekleşmiş olup 0,2 W/kg olarak

hesaplanmıştır. Tablo 18’de görüleceği üzere MKSP kullanımı ile soğutma performansında birim batarya paketi kütlesi için elde edilen maksimum ve minimum iyileşme oranları sırasıyla %33,2 ve %13,8 olarak belirlenmiştir.



Şekil 65. SSP ve MKSP ile elde edilen a) 0,1 L/dk, b) 0,6 L/dk ve c) 1,1 L/dk su debilerindeki maksimum ısı transfer hızları

Tablo 17. SSP ve MKSP için farklı çalışma şartlarında birim kütle başına bataryadan çekilen ısı transfer hızları

Plaka tipi	Su debisi (L/dk)	Su giriş sıcaklığı (°C)	Bataryadan çekilen ısı transfer hızı (W/kg)				
			Deşarj hızı				
			1C	2C	3C	4C	5C
SSP	0,1	15	3,1	4,4	6,8	9,3	11,3
		25	2,1	3,0	3,9	5,1	6,4
		35	1,0	1,5	1,8	2,1	2,4
	0,6	15	10,6	14,2	17,7	19,4	21,2
		25	8,0	10,6	12,4	14,2	15,9
		35	5,3	7,1	8,9	10,6	12,4
	1,1	15	10,7	20,8	26,2	31,7	37,2
		25	8,7	15,9	21,7	26,2	29,2
		35	6,1	11,4	16,2	19,4	22,7
	0,1	15	3,8	5,5	8,3	11,4	14,0
		25	2,5	3,6	4,8	6,2	7,8
		35	1,2	1,7	2,0	2,4	2,8
MKSP	0,6	15	13,5	18,1	22,6	24,9	27,3
		25	9,7	12,9	15,2	17,4	19,6
		35	6,1	8,3	10,4	12,5	14,7
	1,1	15	13,7	26,9	34,5	41,8	49,6
		25	10,6	19,4	26,7	32,6	37,1
		35	7,1	13,2	19,0	23,1	27,3

Tablo 18. MKSP kullanımı ile soğutma performansında birim batarya paketi kütlesi için elde edilen iyileşme oranları

Deşarj hızı	1,1 L/dk			0,6 L/dk			0,1 L/dk		
	15 °C	25 °C	35 °C	15 °C	25 °C	35 °C	15 °C	25 °C	35 °C
1C	%28,3	%21,4	%15,2	%27,6	%21,3	%14,5	%22,7	%20,4	%13,8
2C	%29,7	%22,0	%16,5	%27,8	%21,9	%17,1	%22,7	%21,7	%15,4
3C	%31,4	%23,1	%17,5	%27,8	%22,7	%17,6	%22,9	%21,0	%14,4
4C	%31,7	%24,4	%18,7	%28,0	%22,9	%17,9	%23,2	%21,9	%15,9
5C	%33,2	%27,1	%20,6	%28,6	%23,5	%18,6	%23,9	%21,5	%19,0

SSP ve MKSP kullanımına bağı basınç kayıpları

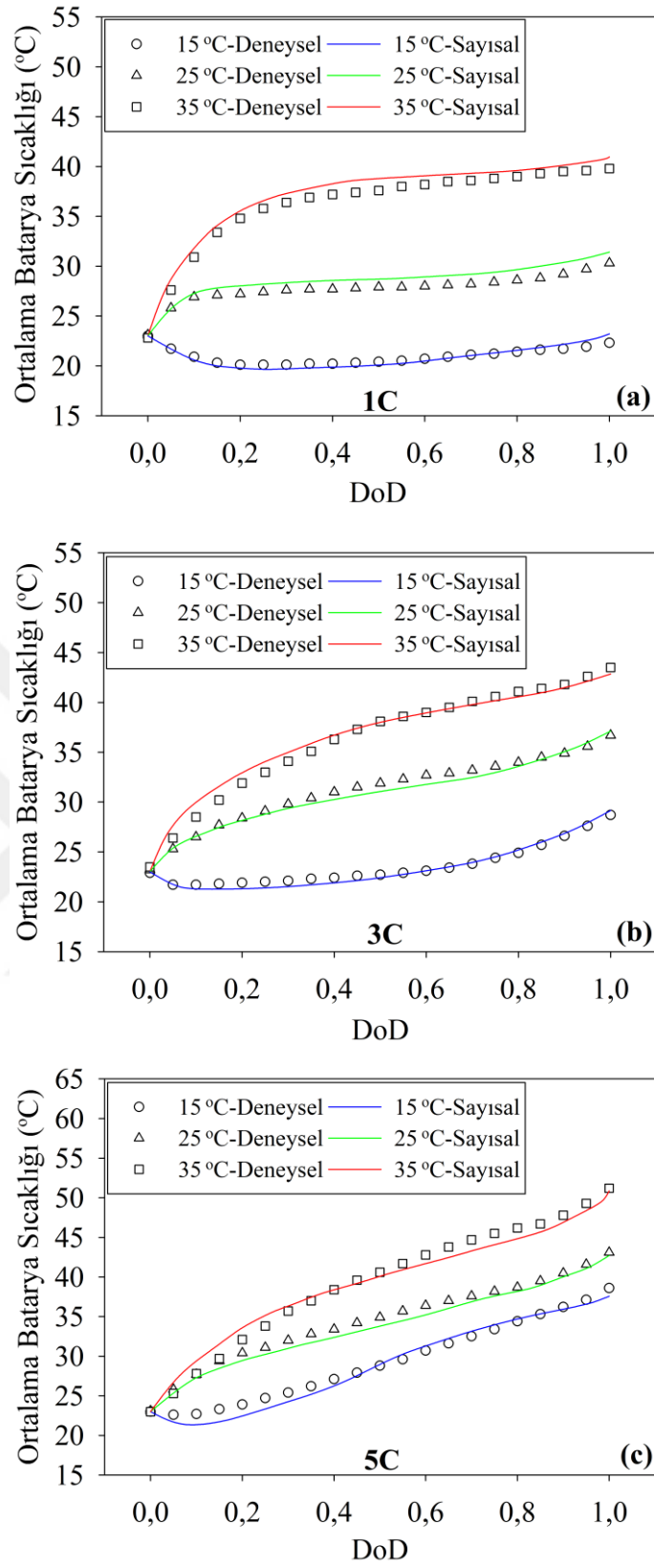
Pompalama için harcanan enerjiyi en aza indirmek için soğutucu plakalarda oluşan basınç kayıpları kritik öneme sahiptir. Farklı çalışma şartlarında yapılan deneylerde, SSP ve MKSP için ölçülen basınç kayıpları (ΔP) Tablo 17’de verilmiştir. Her iki soğutucu plaka için de basınç kaybının, su debisinin artmasıyla üssel bir artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, su giriş sıcaklığına göre basınç kaybı değişiminin ihmal edilebilecek seviyelerde olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise su yoğunluğunun, değişen su sıcaklığı aralığında çok az bir değişim göstermesidir. 15 °C su giriş sıcaklığı şartlarındaki basınç kaybı değerleri baz alındığında, MKSP kullanımı ile basınç kaybında, en düşük (0,1 L/dk) ve en yüksek (1,1 L/dk) su debilerinde sırasıyla %29 ve %41 oranında azalma elde edilmiştir. MKSP’de akışkan kanallara bölündüğünden dolayı akışkan hızı da düşmektedir. Basınç kaybının da akışkan hızının karesi ile doğru orantılı olduğu bilindiği üzere, SSP’ye göre elde edilen basınç kaybı kazancı bu durum ile izah edilebilir.

Tablo 19. Soğutucu plakalarda oluşan basınç kayıpları

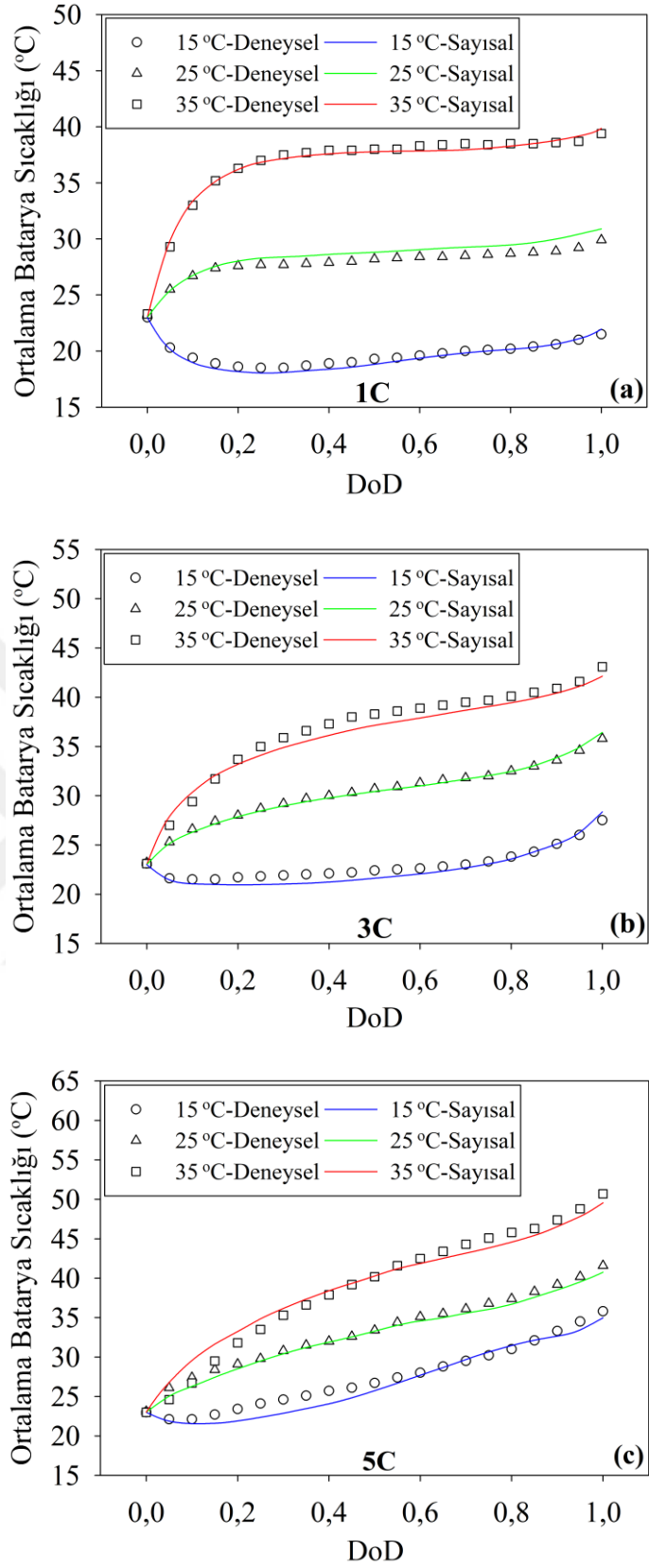
Su debisi (L/dk)	ΔP (Pa)					
	15 °C su giriş sıcaklığı		25 °C su giriş sıcaklığı		35 °C su giriş sıcaklığı	
	SSP	MKSP	SSP	MKSP	SSP	MKSP
0,1	345	244	344	244	343	243
0,6	4395	2503	4387	2499	4373	2491
1,1	12246	7201	12224	7187	12186	7165

SSP Kullanılan Çalışmanın Sayısal Analizi

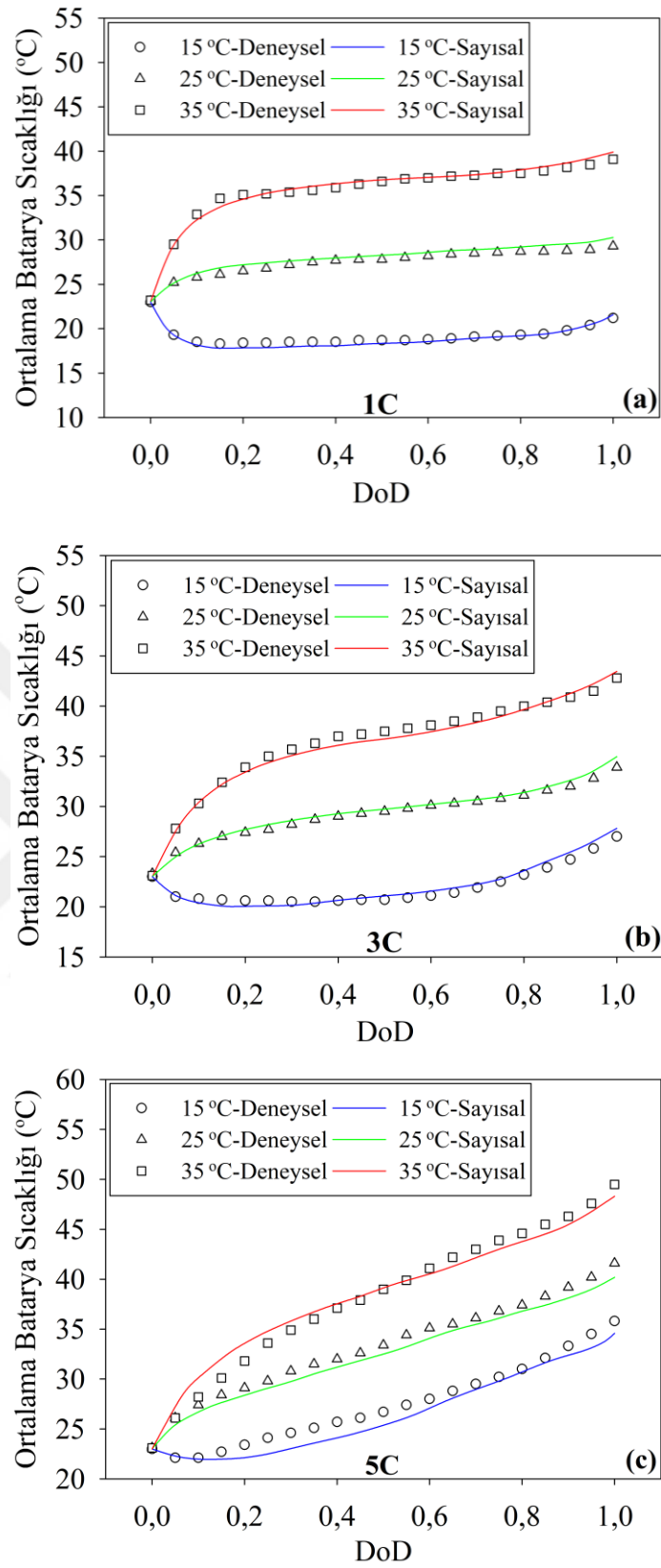
SSP içeren bataryanın sayısal çözümü deneysel verilerle ortalama batarya sıcaklıkları baz alınarak doğrulanmıştır. Sayısal analiz yapılırken 1C, 3C ve 5C deşarj hızlarında çözümler yapılmış, deneysel olarak incelenen 2C ve 4C ara deşarj hızı şartları, hesaplama maliyeti göz önünde bulundurularak çözüme dahil edilmemiştir. Şekil 66’da 0,1 L/dk su debisi; 1C, 3C ve 5C deşarj hızlarında; 15 °C, 25 °C ve 35 °C giriş suyu sıcaklığı şartlarında ortalama batarya sıcaklığının batarya deşarj oranına (DoD) göre değişim grafikleri verilmiştir. Şekil 67 ve Şekil 68’de ise aynı şartlarda sırasıyla 0,6 L/dk ve 1,1 L/dk su debisi için ortalama batarya sıcaklıklarının DoD’a göre değişimi, deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması şeklinde verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, ortalama sıcaklıkları için elde edilen sayısal sonuçların deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmektedir. Sayısal verilerle deneysel veriler arasındaki maksimum hata oranı %11,7 olarak Şekil 67-c’de verilen 35 °C giriş suyu sıcaklığı şartında hesaplanmıştır.



Şekil 66. 0,1 L/dk su debisi şartlarında, ortalama batarya sıcaklıklarının deşarj oranına bağılı değışimi



Şekil 67. 0,6 L/dk su debisi şartlarında, ortalama batarya sıcaklıklarının deşarj oranına bağılı değışimi

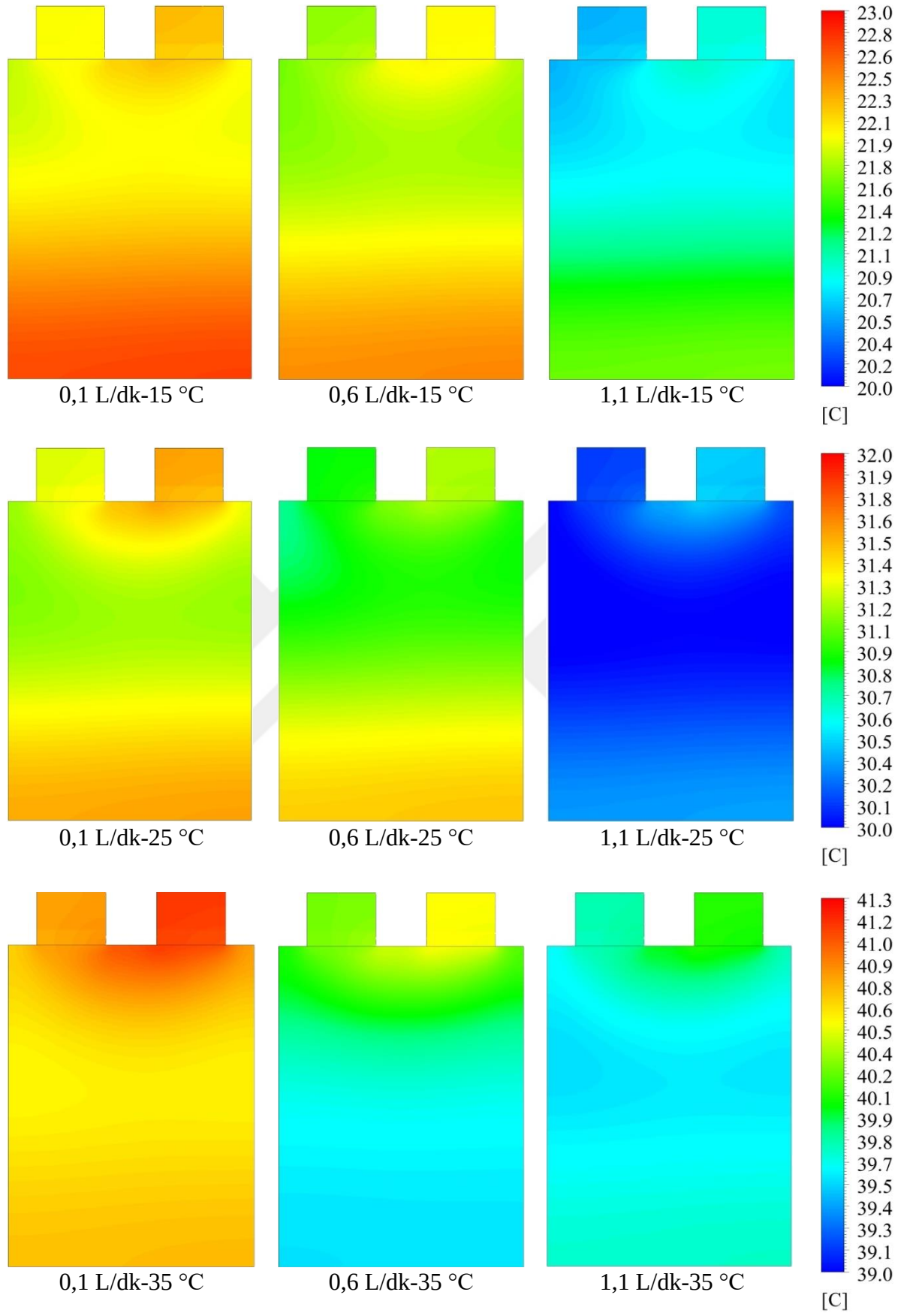


Şekil 68. 1,1 L/dk su debisi şartlarında, ortalama batarya sıcaklıklarının deşarj oranına bağılı değışimi

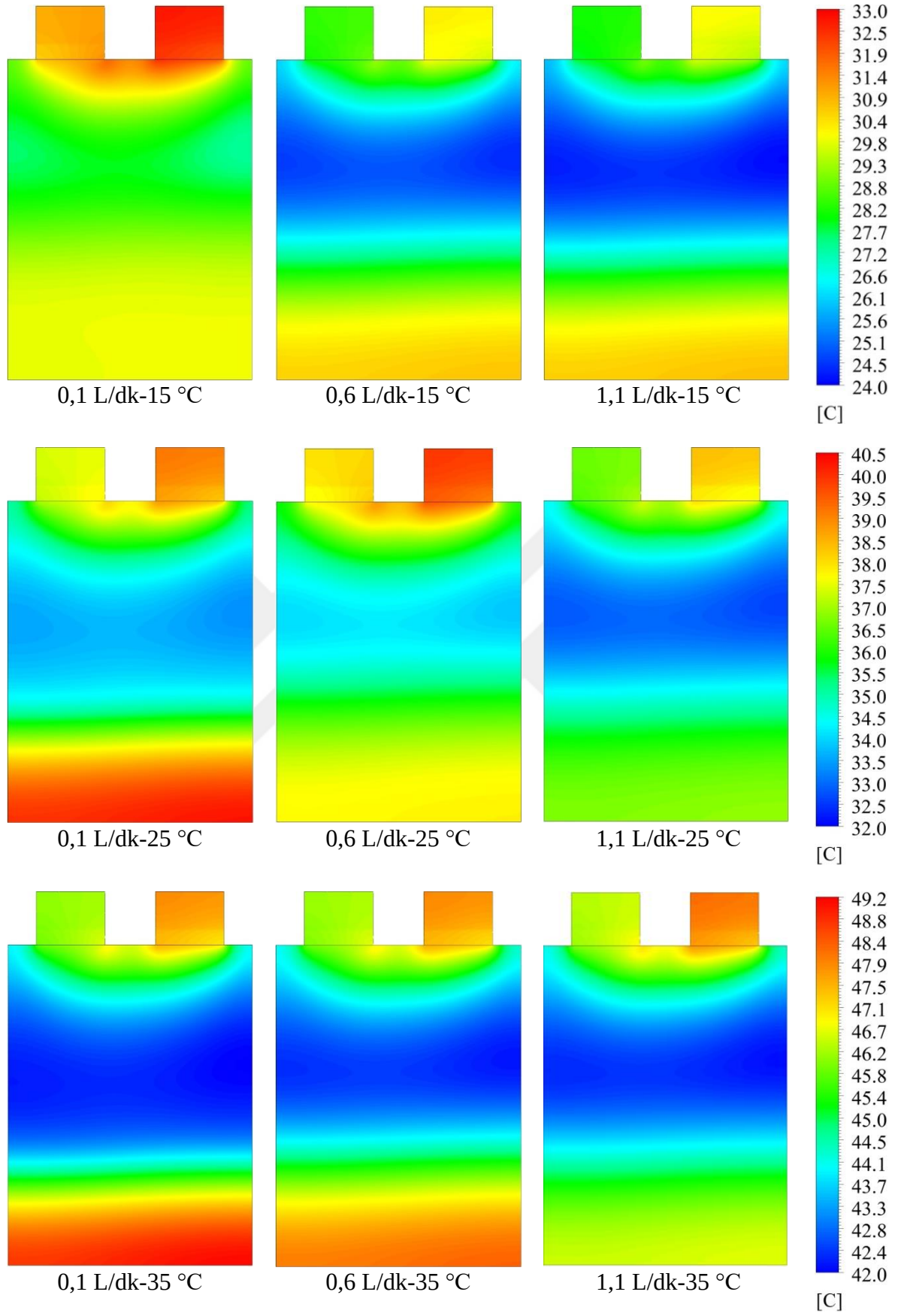
Belirli su debisi ve su giriş sıcaklığı şartlarındaki, SSP kullanımı ile yapılan batarya soğutma simülasyonları sonucunda elde edilen batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımları 1C, 3C ve 5C deşarj hızları için sırasıyla Şekil 69, Şekil 70 ve Şekil 71’de gösterilmiştir. Şekil 69’da verilen 1C deşarj hızındaki sıcaklık dağılımı incelendiğinde, en yüksek sıcaklık değerlerinin bataryanın pozitif terminal ucunda ve bataryanın alt bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Ayrıca batarya yüzeyinde en düzensiz sıcaklık dağılımları, 15 °C su giriş sıcaklığı şartındaki sonuçlarda görülürken, en homojen sıcaklık dağılımı ise 25 °C su giriş sıcaklığı şartındaki konturlarda görülmektedir. Beklenildiği üzere, soğutma sıvısının debisi arttıkça batarya maksimum sıcaklık değeri azalmakta, soğutma sıvısının giriş sıcaklığı arttıkça maksimum batarya sıcaklığı da artmaktadır.

Şekil 70’te verilen 3C deşarj hızındaki sıcaklık dağılımları incelendiğinde, 1C deşarj hızında olduğu gibi maksimum sıcaklık bölgeleri pozitif uçta ve bataryanın alt kısımlarında yoğunlaşmıştır. Yalnız, 0,1 L/dk su debisi ve 15 °C su giriş sıcaklığı şartındaki sıcaklık konturuna bakıldığında, pozitif terminal ucundaki ısınmanın diğer bölgelere göre oldukça fazla olduğu görülmektedir. Yine 1C deşarj hızında olduğu gibi 3C deşarj hızındaki sıcaklık dağılımlarına bakıldığında, en homojen sıcaklık dağılımının 25 °C su giriş sıcaklığı şartında sağlandığı anlaşılmaktadır. En düzensiz sıcaklık dağılımının ise 35 °C su giriş sıcaklığı şartında ve en düşük debi değerlerinde elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte, bataryanın minimum sıcaklık değerine sahip bölgesinin orta kısımlar olduğu söylenebilir.

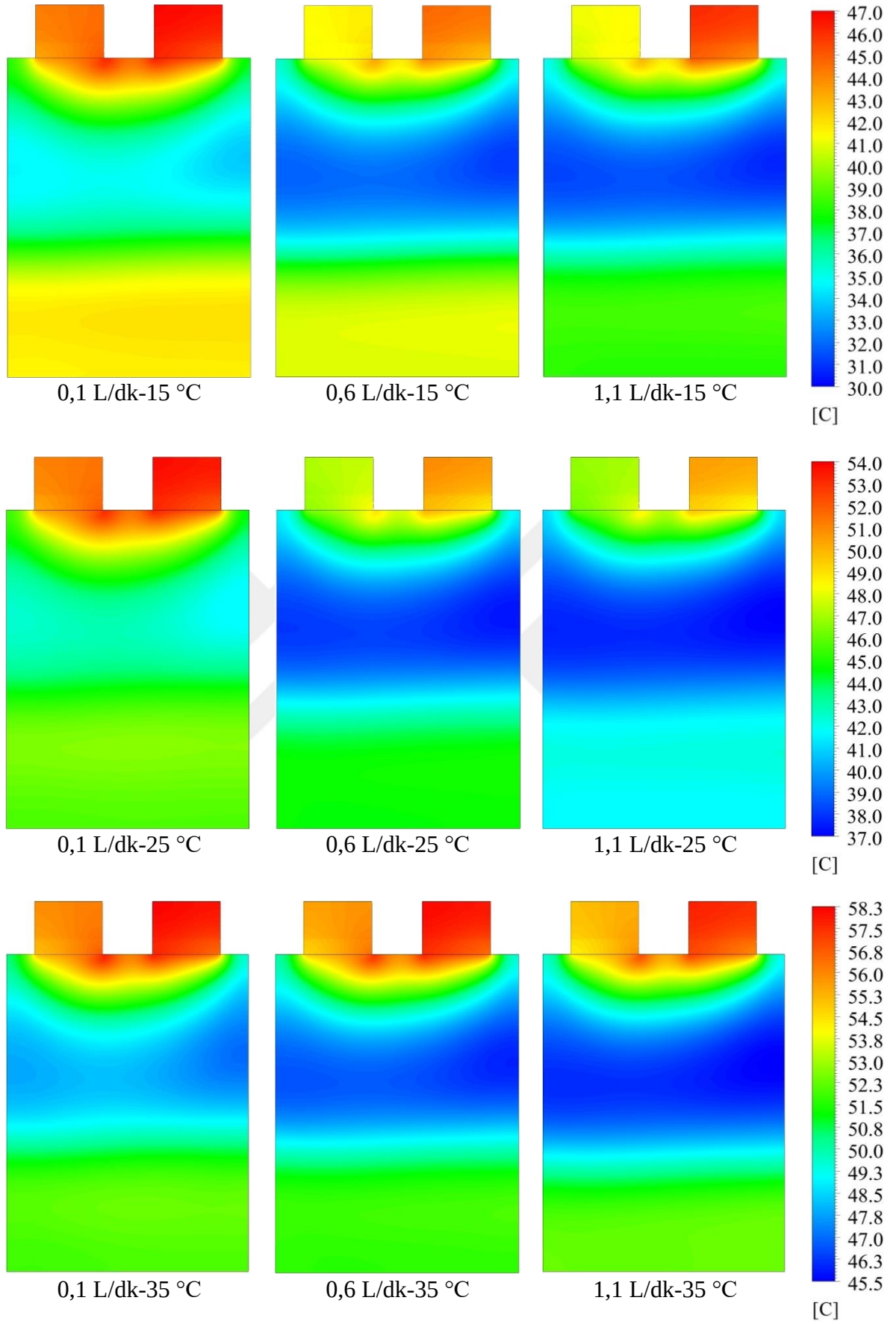
Şekil 71’de verilen en yüksek deşarj hızındaki (5C) sıcaklık dağılımları incelendiğinde, diğer deşarj hızı şartlarındaki sonuçlara kıyasla terminal uçlarda olan ısınmanın daha fazla ön plana çıktığı görülmektedir. 5C deşarj hızındaki tüm şartlarda elde edilen sıcaklık dağılımlarına bakıldığında, maksimum sıcaklıkların pozitif elektrot bölgesinde yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. 5C deşarj hızında bataryadan 100 A akım çekildiği göz önünde bulundurulduğunda, yaklaşık 1mm kalınlığındaki terminal uçlarda meydana gelen aşırı ısınmalar anlaşılabilir olmaktadır. Batarya yüzeyindeki minimum sıcaklık bölgeleri ise, 3C deşarj hızında olduğu gibi bataryanın orta kısımlarında kendini göstermektedir. Batarya yüzeyinde oluşan sıcaklık farkları, diğer deşarj hızlarında olduğu gibi soğutma sıvısının debisi arttıkça arttığı açıkça görülmektedir.



Şekil 69. 1C hızında deşarj sonundaki batarya yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımları

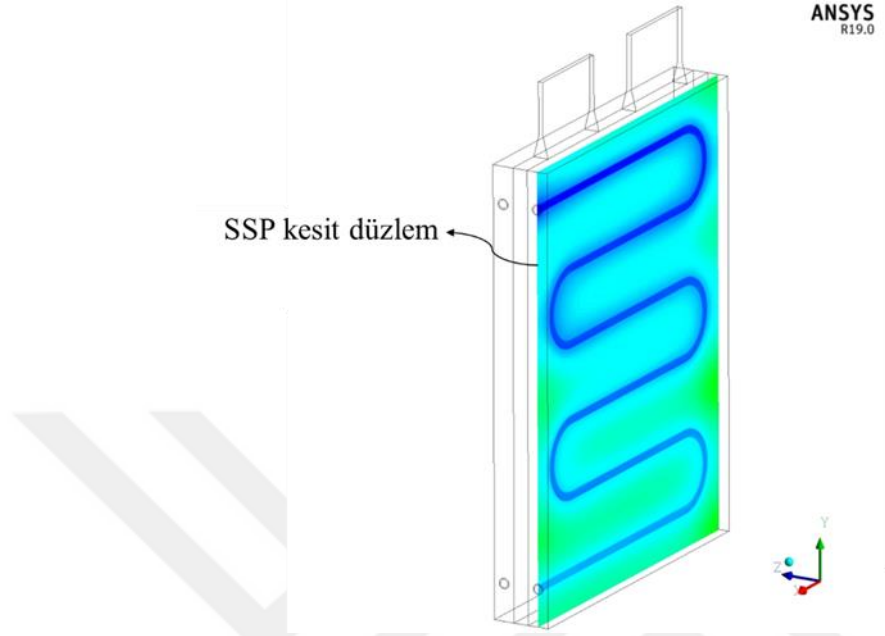


Şekil 70. 3C hızında deşarj sonundaki batarya yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımları



Şekil 71. 5C hızında deşarj sonundaki batarya yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımları

SSP'ye ve plaka içerisinde devridaim ettirilen soğutma suyuna ait 1C, 3C ve 5C deşarj hızı şartlarındaki sıcaklık dağılımları, sırasıyla Şekil 73, Şekil 74 ve Şekil 75'te verilmiştir. Bu sıcaklık dağılımları, Şekil 72'de gösterilen üç boyutlu batarya ve SSP'ye ait görünümde belirlenen kesit düzlem üzerinde gösterilmiştir.

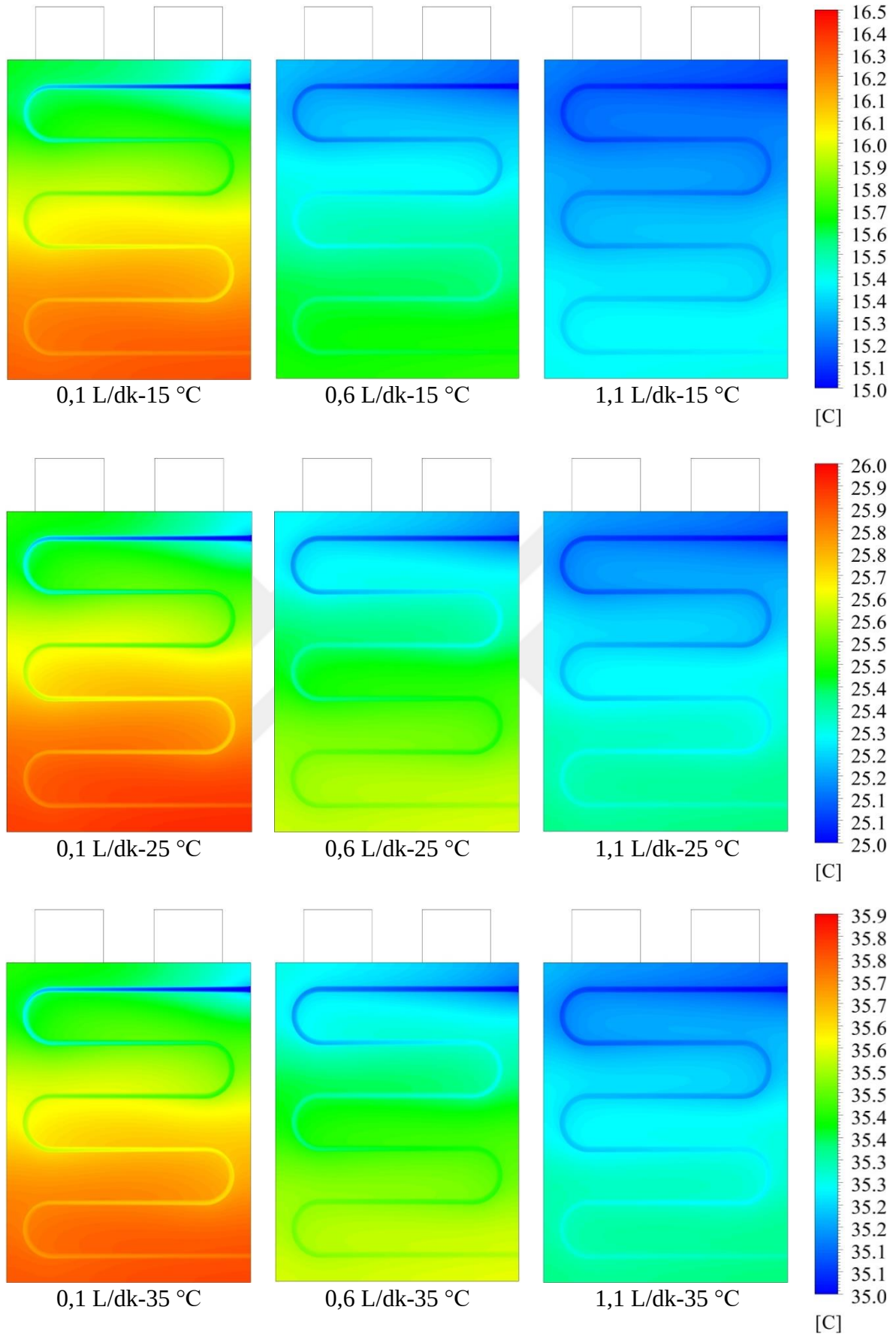


Şekil 72. SSP ve soğutma sıvısının sıcaklık dağılımlarının gösterildiği kesit düzlem

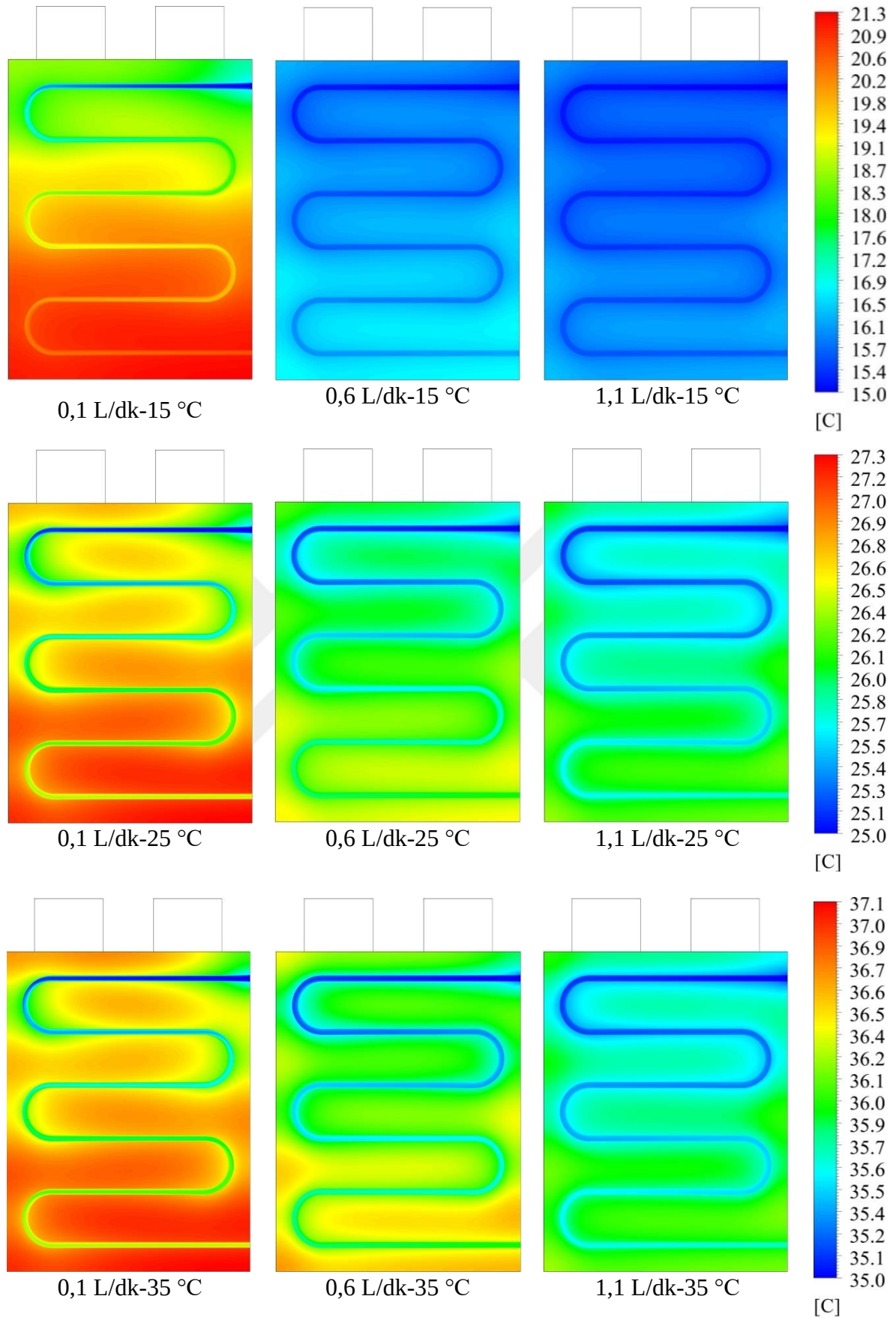
Şekil 73'te gösterilen, 1C deşarj hızındaki SSP kesit düzleminde verilen sıcaklık dağılımları incelendiğinde, su giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın, akışkan debisi arttıkça azaldığı görülmektedir. Soğutma sıvısının giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın en yüksek olduğu değerlerin, 15 °C su giriş sıcaklığı şartında okunduğu görülmektedir. Bu durum, en etkili soğutmanın 15 °C su giriş sıcaklığı şartında elde edildiğini göstermektedir. Düşük akışkan debilerinde su, çıkış bölgesine doğru daha fazla ısındığından, SSP'nin alt bölgelerinde sıcaklık artışının daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 74'te gösterilen, 3C deşarj hızındaki SSP kesit düzleminde verilen sıcaklık dağılımlarına bakıldığında, 1C deşarj hızında görülen sıcaklık dağılım karakteristiğinin bu şartlarda da görüldüğü anlaşılmaktadır. Deşarj hızının artmasına bağlı olarak bataryada üretilen ısı artması ile soğutma suyuna aktarılan ısı da artacağından, soğutma sıvısının giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın artış göstermesi beklenen bir sonuçtur.

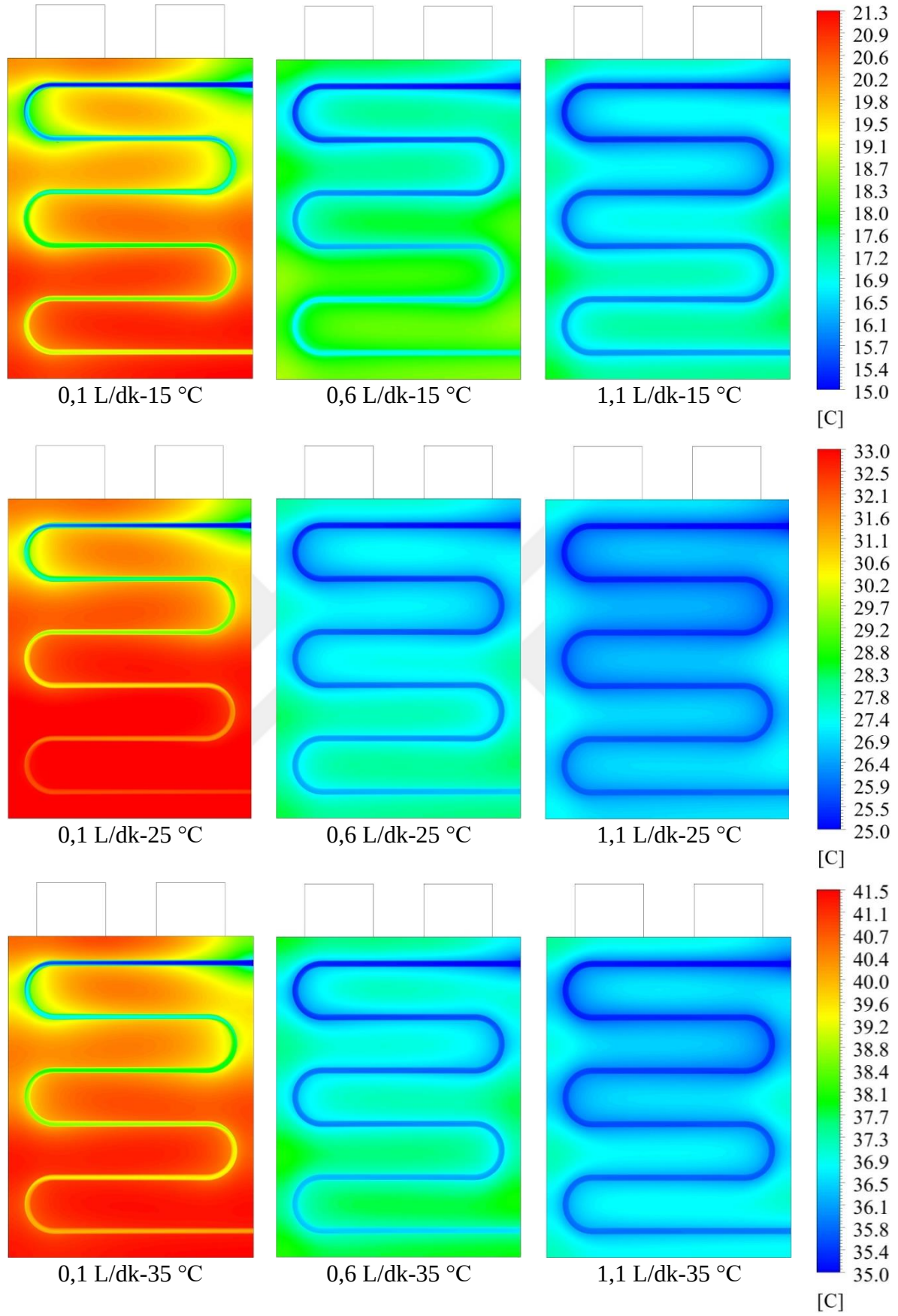
Şekil 75 incelendiğinde ise, deşarj hızının 5C'ye yükselmesi ile soğutma suyuna aktarılan ısı yükünün artmasına bağlı olarak, soğutma sıvısının giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın maksimum seviyelere ulaştığı görülmektedir.



Şekil 73. 1C hızında deşarj sonunda oluşan SSP kesit düzlemindeki sıcaklık dağılımları



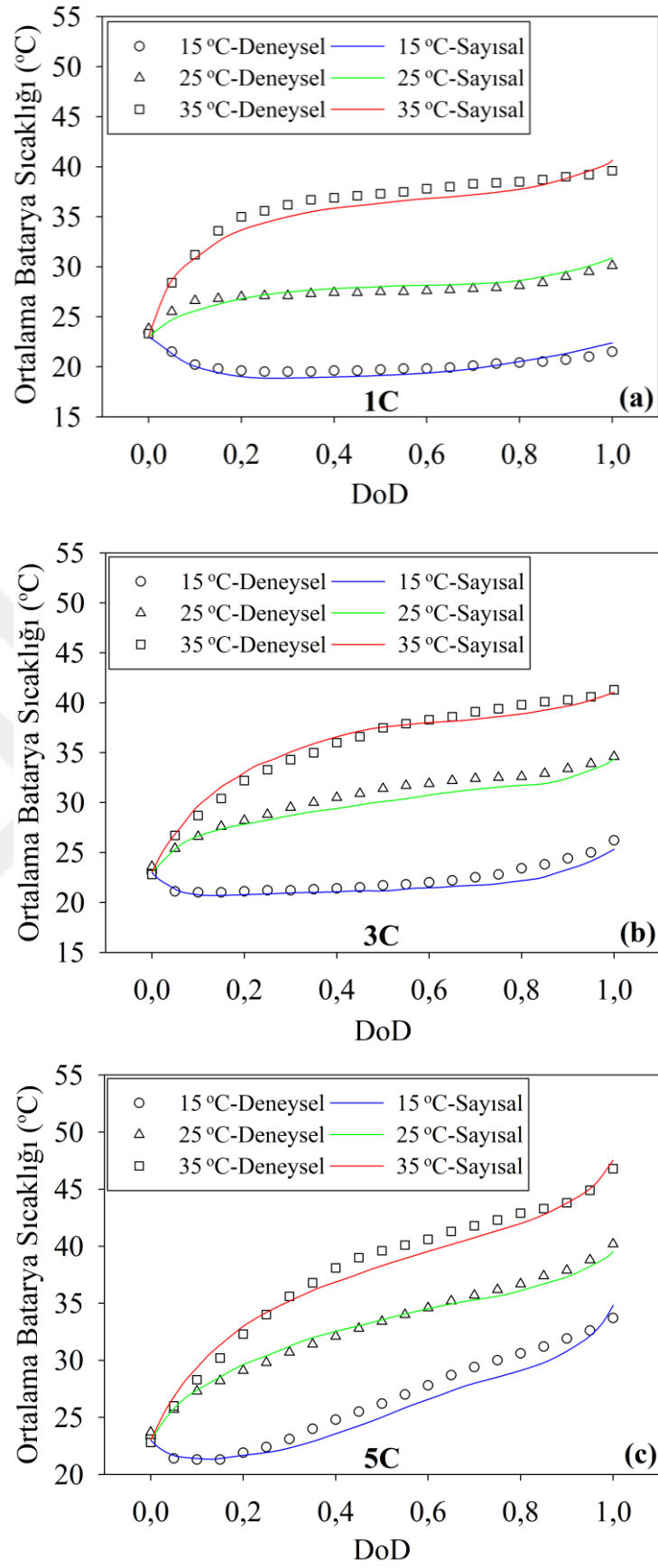
Şekil 74. 3C hızında deşarj sonunda oluşan SSP kesit düzlemindeki sıcaklık dağılımları



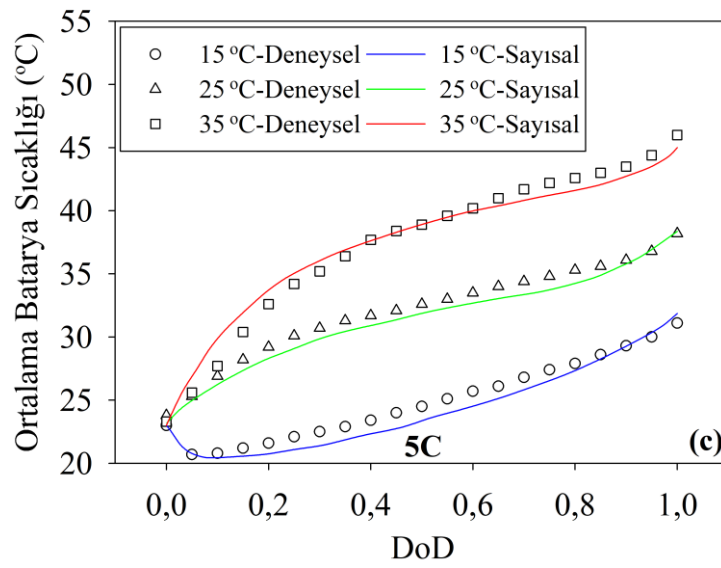
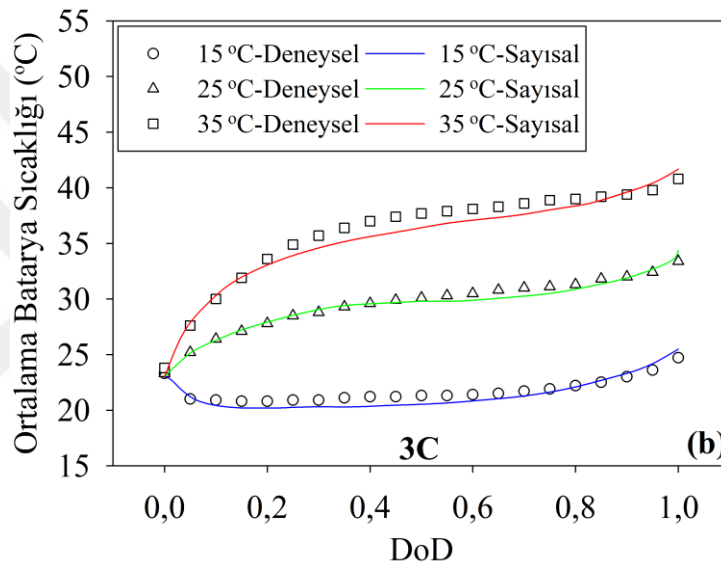
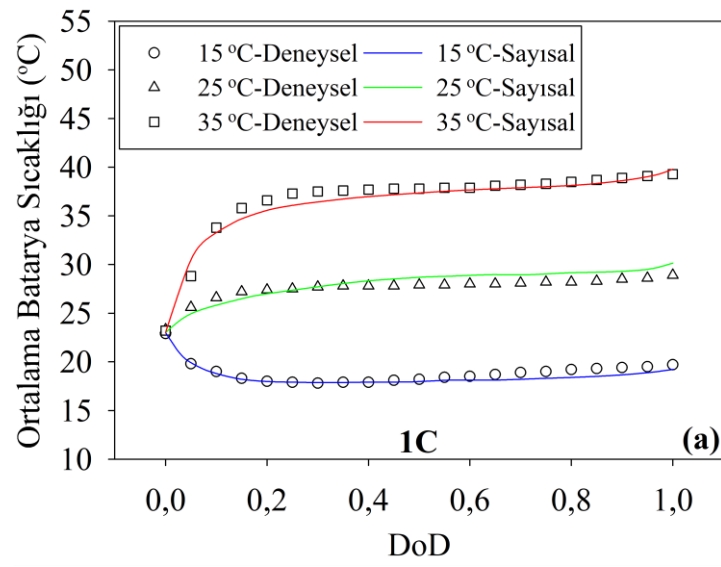
Şekil 75. 5C hızında deşarj sonunda oluşan SSP kesit düzlemindeki sıcaklık dağılımları

MKSP Sayısal Analizi

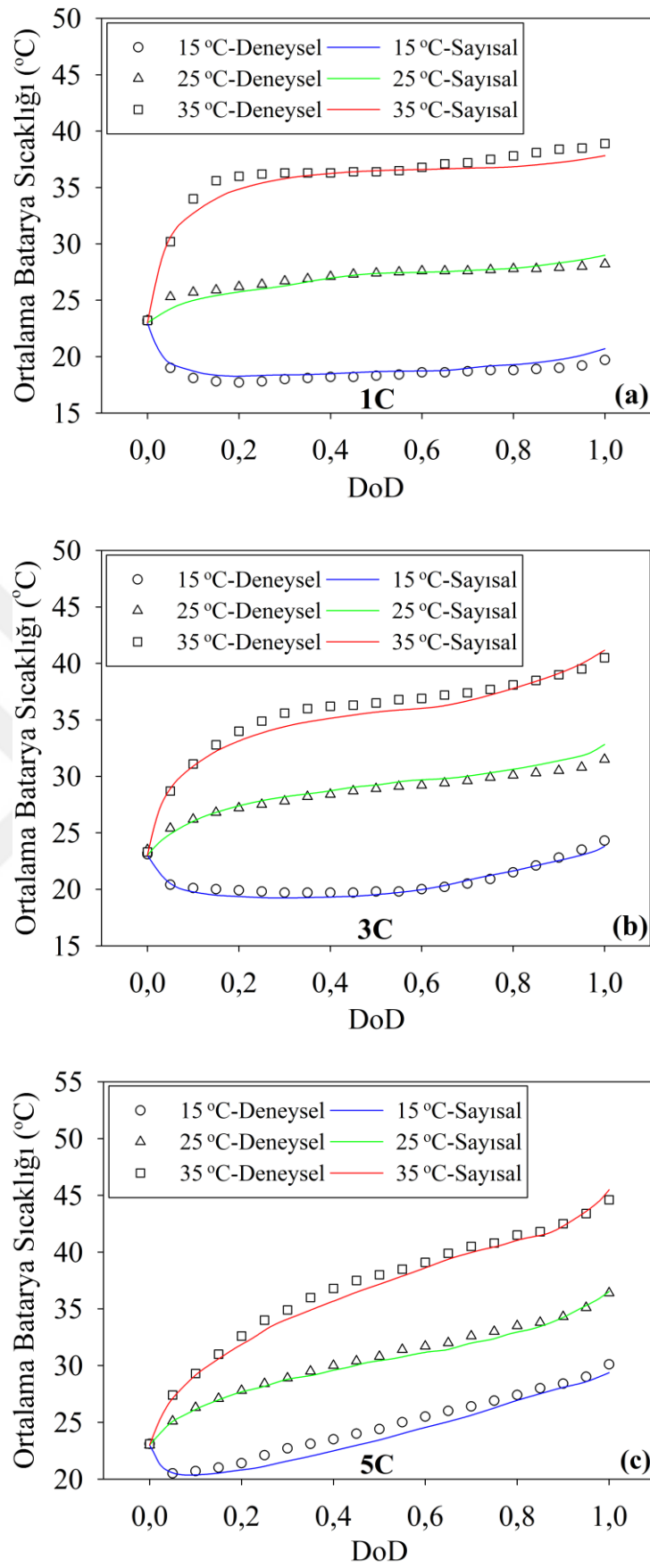
MKSP'nin sayısal analizi yapılırken 1C, 3C ve 5C deşarj hızlarında çözümler yapılmış, deneysel olarak incelenen 2C ve 4C ara deşarj hızı şartları, hesaplama maliyeti göz önünde bulundurularak SSP analizinde olduğu gibi çözüme dahil edilmemiştir. Şekil 76'da 0,1 L/dk su debisi; 1C, 3C ve 5C deşarj hızlarında; 15 °C, 25 °C ve 35 °C giriş suyu sıcaklığı şartlarında ortalama batarya sıcaklığının batarya deşarj oranına (DoD) göre değişim grafikleri verilmiştir. Şekil 77 ve Şekil 78'de ise aynı şartlarda sırasıyla 0,6 L/dk ve 1,1 L/dk su debisi için ortalama batarya sıcaklıklarının DoD'a göre değişimi, deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması şeklinde verilmiştir. Grafikler incelendiğinde ortalama batarya sıcaklıkları için elde edilen sayısal sonuçların deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmektedir. MKSP içeren batarya test bölgesinin sayısal çözümü deneysel verilerle ortalama batarya sıcaklıkları baz alınarak maksimum %7 hata oranı ile doğrulanmıştır.



Şekil 76. 0,1 L/dk su debisi şartlarında ortalama batarya sıcaklıklarının deşarj oranına bağılı değışimi



Şekil 77. 0,6 L/dk su debisi şartlarında ortalama batarya sıcaklıklarının deşarj oranına bağılı değışimi

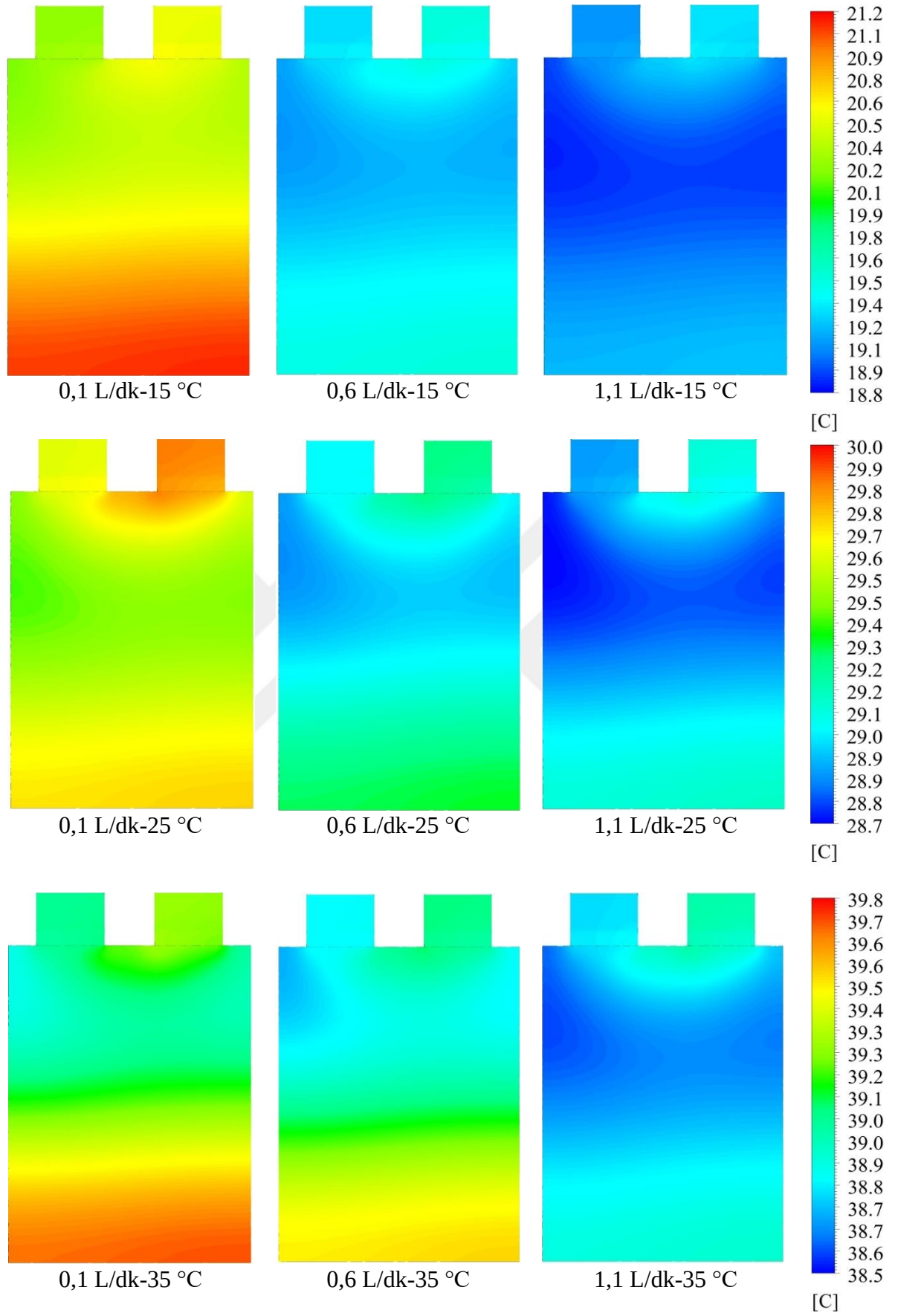


Şekil 78. 1,1 L/dk su debisi şartlarında ortalama batarya sıcaklıklarının deşarj oranına bağılı değışimi

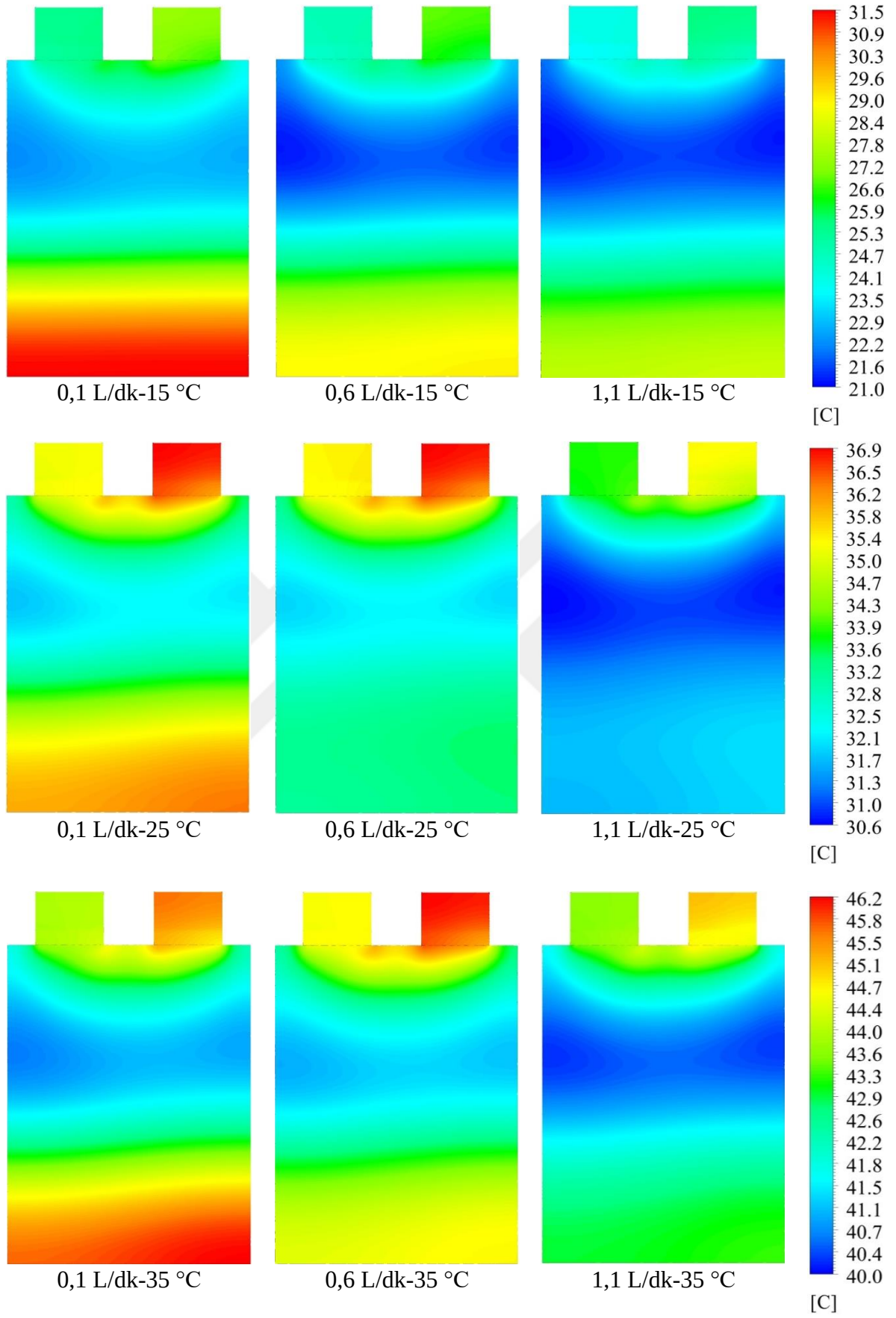
Belirli su debisi ve su giriş sıcaklığı şartlarındaki, MKSP kullanımı ile yapılan batarya soğutma simülasyonları sonucunda elde edilen batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımları 1C, 3C ve 5C deşarj hızları için sırasıyla Şekil 79, Şekil 80 ve Şekil 81’de gösterilmiştir. Şekil 79’da verilen 1C deşarj hızındaki sıcaklık dağılımı incelendiğinde, en yüksek sıcaklık değerlerinin genelde bataryanın pozitif terminal ucunda ve bataryanın alt bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Ayrıca batarya yüzeyinde en düzensiz sıcaklık dağılımları, 15 °C su giriş sıcaklığı şartındaki sonuçlarda görülürken, en homojen sıcaklık dağılımı ise 25 °C su giriş sıcaklığı şartındaki konturlarda görülmektedir. Beklenildiği üzere, soğutma sıvısının debisi arttıkça batarya maksimum sıcaklık değeri azalmakta, soğutma sıvısının giriş sıcaklığı arttıkça maksimum batarya sıcaklığı da artmaktadır.

Şekil 80’de verilen 3C deşarj hızındaki sıcaklık dağılımları incelendiğinde, sıcaklık bölgeleri daha çok pozitif uçlarda yoğunlaşırken, düşük su debisi şartlarında bataryanın alt kısımlarında da yoğunlaşmıştır. 25 °C ve 35 °C su giriş sıcaklığı şartındaki sıcaklık konturuna bakıldığında, pozitif terminal ucundaki ısınmanın diğer bölgelere göre oldukça fazla olduğu görülmektedir. Yine 1C deşarj hızında olduğu gibi 3C deşarj hızındaki sıcaklık dağılımlarına bakıldığında, en homojen sıcaklık dağılımının 25 °C su giriş sıcaklığı şartında sağlandığı anlaşılmaktadır. En düzensiz sıcaklık dağılımının ise 0,1 L/dk su debisi ve 15 °C su giriş sıcaklığı şartında elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte, tüm çalışma şartlarında bataryanın minimum sıcaklık değerine sahip bölgesinin orta kısımlar olduğu söylenebilir.

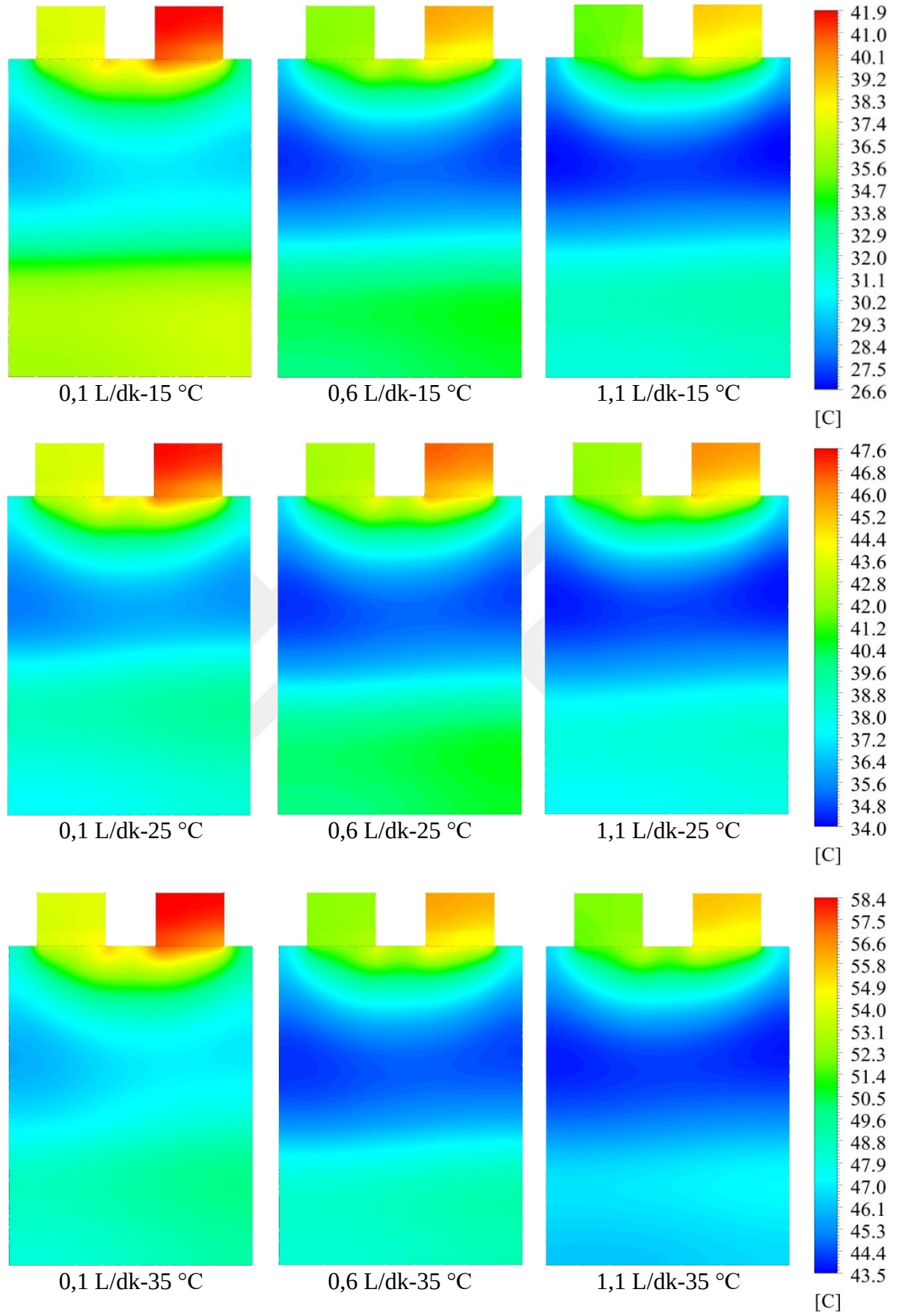
Şekil 81’de verilen en yüksek deşarj hızındaki (5C) sıcaklık dağılımları incelendiğinde, diğer deşarj hızı şartlarındaki sonuçlara kıyasla terminal uçlarda olan ısınmanın daha fazla ön plana çıktığı görülmektedir. 5C deşarj hızındaki tüm şartlarda elde edilen sıcaklık dağılımlarına bakıldığında, maksimum sıcaklıkların pozitif elektrot bölgesinde yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. 5C deşarj hızında bataryadan 100 A akım çekildiği bilindiği üzere, yaklaşık 1mm kalınlığındaki terminal uçlarda meydana gelen aşırı ısınmaların bu yüksek akım ile ilişkili olduğu aşıkardır. Batarya yüzeyindeki minimum sıcaklık bölgeleri ise, 1C ve 3C deşarj hızında olduğu gibi bataryanın orta kısımlarında kendini göstermektedir. Batarya yüzeyinde oluşan sıcaklık farkları, diğer deşarj hızlarında olduğu gibi soğutma sıvısının debisi arttıkça arttığı açıkça görülmektedir.



Şekil 79. 1C hızında deşarj sonundaki batarya yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımları

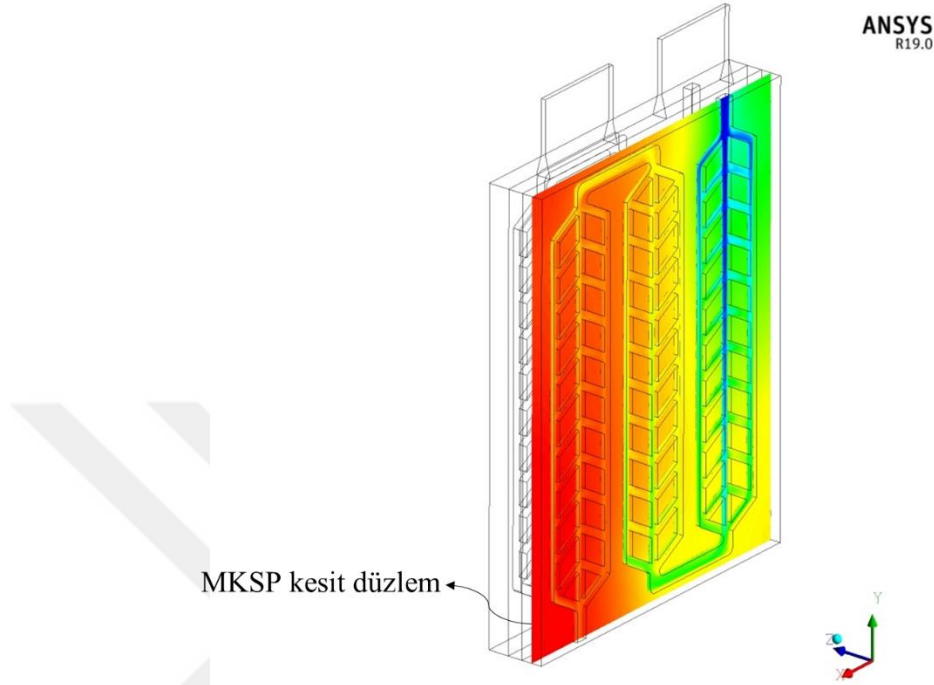


Şekil 80. 3C hızında deşarj sonundaki batarya yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımları



Şekil 81. 5C hızında deşarj sonundaki batarya yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımları

MKSP'ye ve plaka içerisinde devridaim ettirilen soğutma suyuna ait 1C, 3C ve 5C deşarj hızı şartlarındaki sıcaklık dağılımları, sırasıyla Şekil 83, Şekil 84 ve Şekil 85'te verilmiştir. Bu sıcaklık dağılımları, Şekil 82'de gösterilen üç boyutlu batarya ve MKSP'ye ait görünümde belirlenen kesit düzlem üzerinde gösterilmiştir.

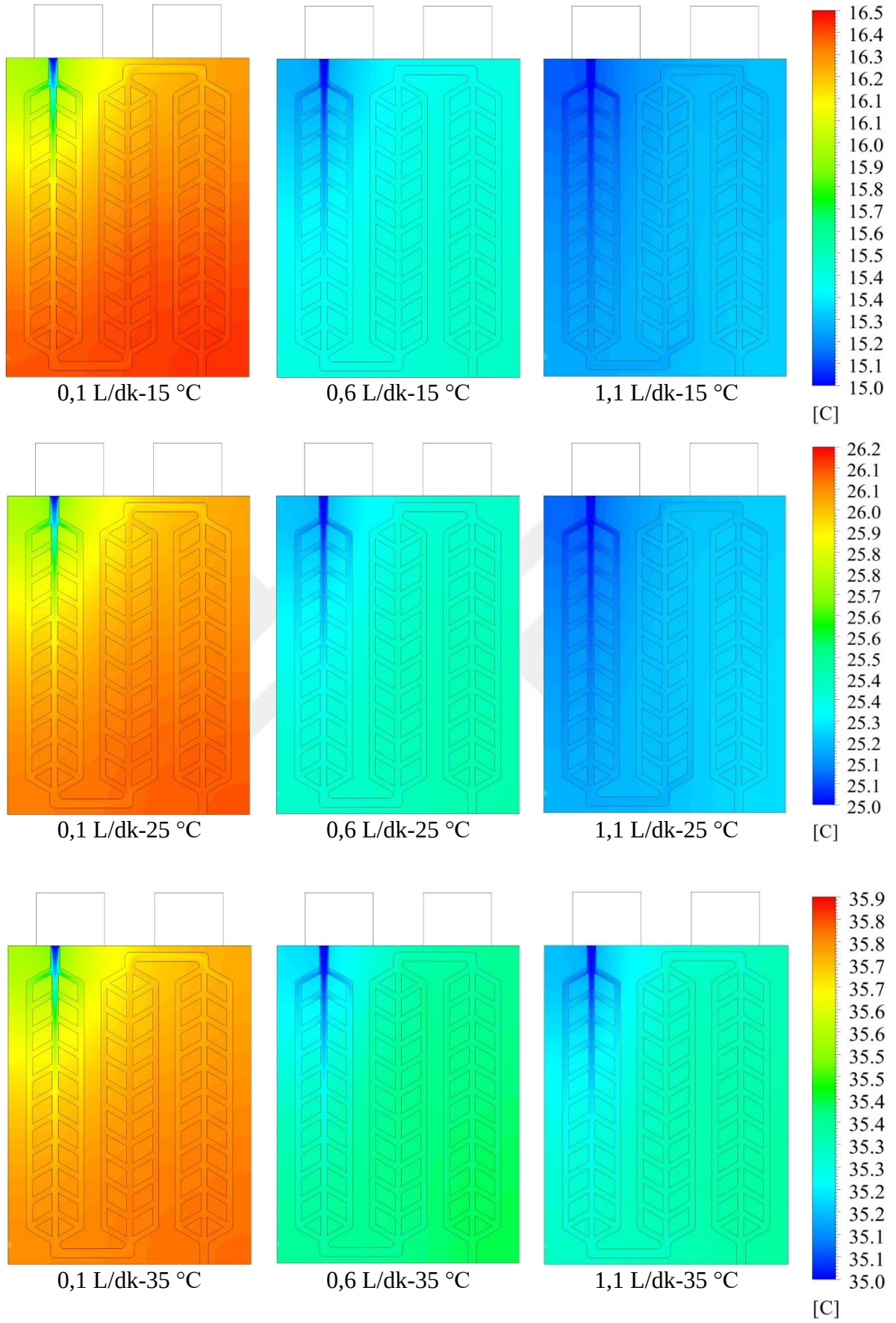


Şekil 82. MKSP ve soğutma sıvısının sıcaklık dağılımlarının gösterildiği kesit düzlem

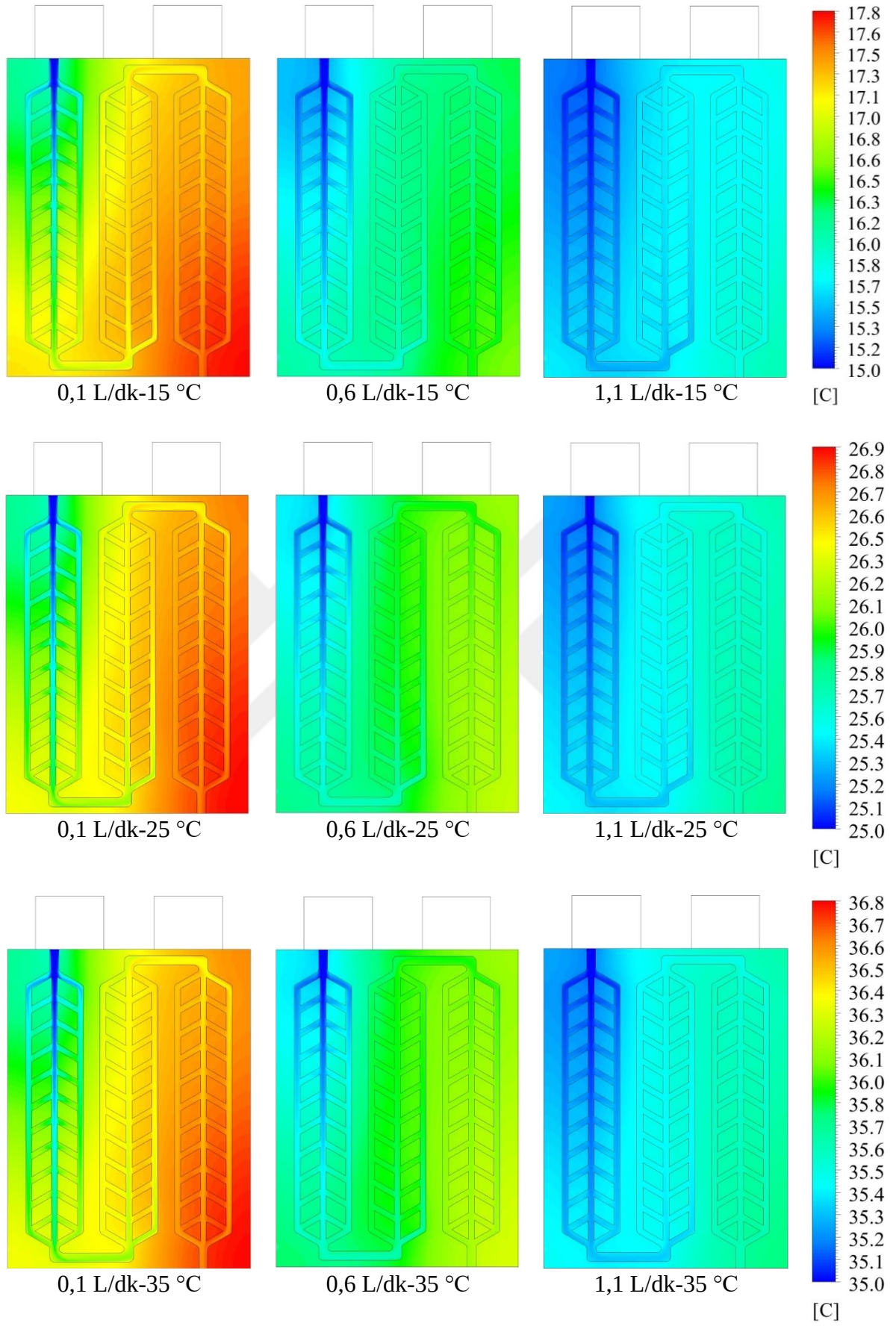
Şekil 83'te gösterilen, 1C deşarj hızındaki MKSP kesit düzleminde verilen sıcaklık dağılımları incelendiğinde, su giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın, akışkan debisi arttıkça azaldığı görülmektedir. Soğutma sıvısının giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın en yüksek olduğu değerlerin, 15 °C su giriş sıcaklığı şartında okunduğu görülmektedir. Dolayısıyla en etkili soğutmanın 15 °C su giriş sıcaklığı şartında elde edilmiştir. Düşük akışkan debilerinde suyun çıkış bölgesine doğru daha fazla ısınması sebebiyle, MKSP'nin su çıkış bölgelerinde sıcaklık artışının daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 84'te gösterilen, 3C deşarj hızındaki MKSP kesit düzleminde verilen sıcaklık dağılımlarına bakıldığında, 1C deşarj hızında görülen sıcaklık dağılım karakteristiği bu şartlarda da görülmektedir. Deşarj hızının artmasına bağlı olarak bataryada üretilen ısının artması ile soğutma suyuna aktarılan ısı da artacağından, soğutma sıvısının giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın artış göstermesi beklenen bir sonuçtur.

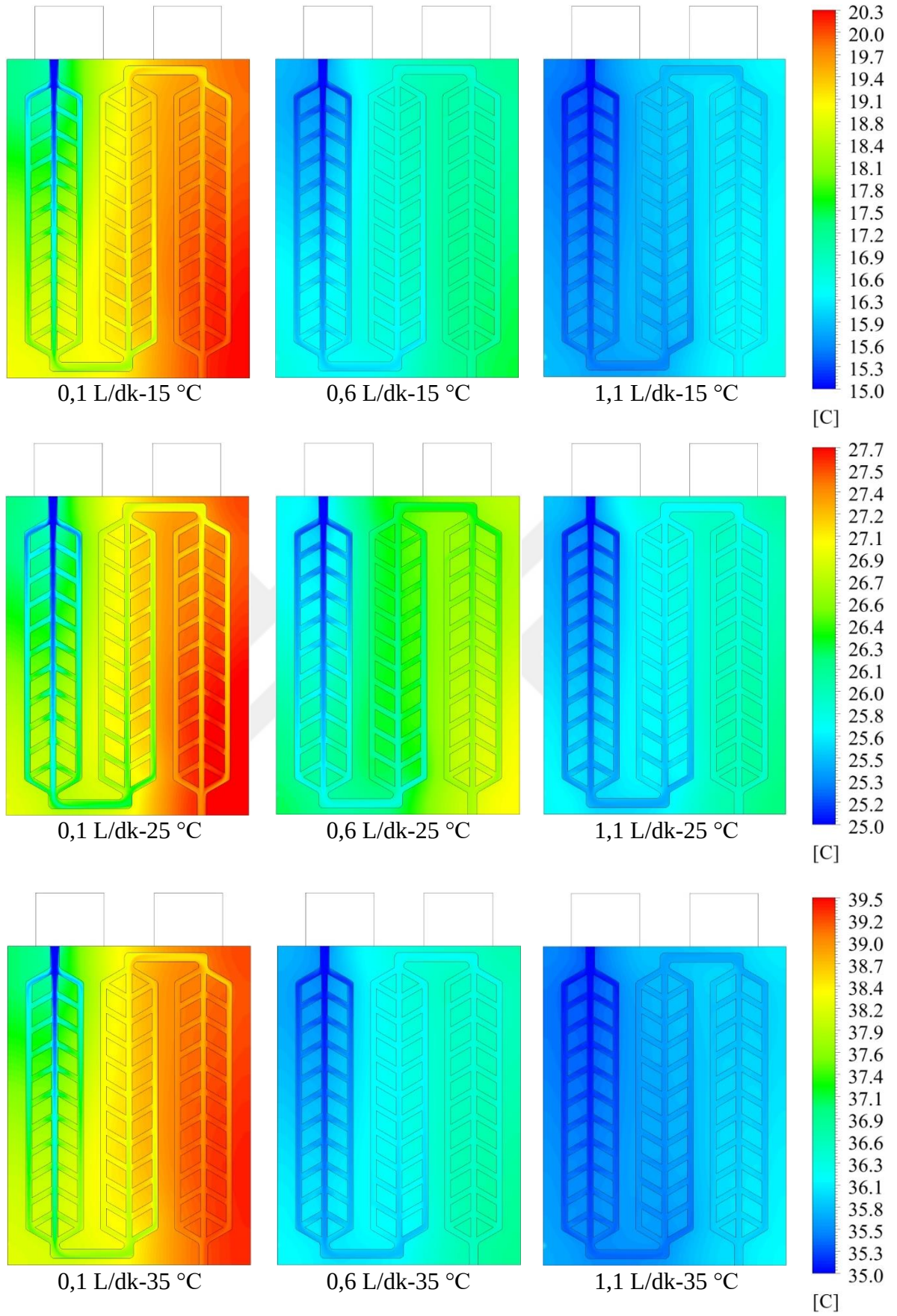
Şekil 85 incelendiğinde ise, deşarj hızının 5C'ye yükselmesi ile soğutma suyuna aktarılan ısı yükünün artmasına bağlı olarak, soğutma sıvısının giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın maksimum seviyelere ulaştığı görülmektedir. Ayrıca deşarj hızı arttıkça sıcaklık dağılımındaki homojenlik de azalmaktadır.



Şekil 83. 1C hızında deşarj sonunda oluşan MKSP kesit düzlemindeki sıcaklık dağılımları



Şekil 84. 3C hızında deşarj sonunda oluşan MKSP kesit düzlemindeki sıcaklık dağılımları



Şekil 85. 5C hızında deşarj sonunda oluşan MKSP kesit düzlemindeki sıcaklık dağılımları

MKSP Optimizasyonu

Deneysel ve sayısal olarak incelenen MKSP'nin soğutma performansını eniyileme ve oluşan basınç kayıplarını en aza indirmek amacıyla yapılan optimizasyon için seçilen parametreler, Eşitlik (34)'te verilen yanıt fonksiyonundaki bağımsız değişkenler ile ilişkilendirilerek Tablo 18'de gösterildiği gibi üç farklı seviyede gruplandırılmıştır.

Tablo 20. Optimizasyon parametreleri

Bağımsız değişkenler	Parametreler	Seviyeler		
		-1	0	+1
X_1	w (mm)	3	4	5
X_2	a (mm)	10	13	16
X_3	n (mm)	5	10	15
X_4	d (mm)	3	4	5
X_5	Q (L/dk)	0,1	0,6	1,1

Her bir parametre için üç farklı seviyede belirlenen değerler ile Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) kullanılarak yapılacak deney sayısı 32 adete indirgenmişti. Optimizasyon parametreleri için Yüzey Merkezli Merkezi Kompozit Dizaynı (CCF) ile Deney Tasarımı (DT) Tablo 19'da gösterildiği gibi oluşturulmuştur.

Tablo 21. Deney parametreleri ve seviyeleri

Deney no	Parametre seviyeleri				
	w	a	n	d	Q
1	-1	1	-1	1	1
2	1	1	-1	1	-1
3	0	1	0	0	0
4	0	0	-1	0	0
5	0	0	0	0	1
6	0	0	0	-1	0
7	0	0	0	0	0
8	1	1	1	-1	-1
9	0	0	0	0	-1
10	1	0	0	0	0
11	-1	-1	1	-1	-1
12	0	-1	0	0	0
13	1	-1	-1	-1	-1
14	0	0	0	1	0
15	1	1	-1	-1	1
16	-1	-1	-1	-1	1
17	-1	1	1	-1	1
18	1	-1	1	-1	1
19	1	-1	-1	1	1
20	-1	-1	-1	1	-1
21	-1	1	1	1	-1
22	0	0	0	0	0
23	-1	-1	1	1	1
24	-1	0	0	0	0
25	0	0	1	0	0
26	1	-1	1	1	-1
27	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0
30	-1	1	-1	-1	-1
31	0	0	0	0	0
32	1	1	1	1	1

CCF yöntemi baz alınarak hazırlanan DT için yapılması gereken 32 deney, maliyet ve zaman avantajları göz önünde bulundurularak sayısal olarak çözümlenmiştir. Öncesinde, soğutucu plakanın geometrik parametrelerinin sıfır seviyelerindeki tasarım için yapılan HAD analizleri deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Geometrik parametrelerin diğer seviyeleri ile oluşan farklı tasarımların da geometrik modelleri ve mesh yapıları tekrardan oluşturularak Fluent paket programı ile, belirlenen üç farklı akışkan debisi şartında çözülmüştür. Yapılan çözümler, maksimum deşarj hızı (5C) ve 25 °C su giriş sıcaklığı şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Optimize edilecek yanıt değerleri için soğutucu plakalarda oluşacak basınç kayıpları (ΔP), batarya yüzeyindeki maksimum sıcaklık değeri (T_{maks}) ve batarya yüzeyinde oluşan maksimum sıcaklık farkı (ΔT_{maks}) olmak üzere üç farklı parametre seçilmiştir. Sayısal olarak çözülen her bir örneklem için elde edilen yanıt değerleri Tablo 20’de verilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi bataryanın termal yönetimi için T_{maks} ve ΔT_{maks} iki kritik parametredir ve bunların minimize edilmesi planlanmıştır. Diğer yandan her ne kadar soğutma sıvısının debisinin artması ile soğutma işlemi iyileştirilse de sistemde oluşacak basınç kayıpları artacağından gerekli pompalama gücü de artacaktır. Bu durumda basınç ve sıcaklık yanıt değerlerinin optimize edilmesi için çok amaçlı optimizasyona başvurulmuştur. Bunun için öncelikle her bir yanıt değişkeni için tasarım değişkenlerine bağlı matematiksel model oluşturularak Eşitlik (35)’te verilen yaklaşım fonksiyonları, yapılan varyans analizleri (ANOVA) sonucunda elde edilmiştir. Sonrasında ise yapılan çok amaçlı optimizasyon ile optimum yanıt değerleri elde edilmiştir. ANOVA ve çok amaçlı optimizasyon işlemleri Minitab yazılımının deneme sürümü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 22. DT bağımsız değişkenler ve yanıt değerleri

Deney No	Bağımsız Değişken Değerleri					Yanıt Değerleri		
	w (mm)	a (mm)	n (mm)	d (mm)	Q (L/dk)	ΔP (Pa)	T_maks (°C)	ΔT_{maks} (°C)
1	3	16	5	5	1,1	7672,50	45,07	11,43
2	5	16	5	5	0,1	149,76	46,72	11,73
3	4	16	10	4	0,6	2405,26	45,61	11,52
4	4	13	5	4	0,6	2311,76	45,74	11,85
5	4	13	10	4	1,1	6281,12	45,27	11,03
6	4	13	10	3	0,6	2750,05	45,93	11,62
7	4	13	10	4	0,6	2413,18	45,69	11,57
8	5	16	15	3	0,1	228,064	47,40	11,89
9	4	13	10	4	0,1	198,24	46,85	11,62
10	5	13	10	4	0,6	2162,64	45,71	11,58
11	3	10	15	3	0,1	368,80	47,52	11,92
12	4	10	10	4	0,6	2413,07	45,68	11,41
13	5	10	5	3	0,1	228,064	47,61	11,95
14	4	13	10	5	0,6	2238,61	45,48	11,57
15	5	16	5	3	1,1	6554,31	45,50	11,53
16	3	10	5	3	1,1	9079,14	45,48	11,47
17	3	16	15	3	1,1	10752,92	45,39	11,33
18	5	10	15	3	1,1	6891,98	44,19	10,54
19	5	10	5	5	1,1	5680,20	45,31	11,43
20	3	10	5	5	0,1	272,74	46,94	11,91
21	3	16	15	5	0,1	273,76	46,88	11,94
22	4	13	10	4	0,6	2413,18	45,69	11,61
23	3	10	15	5	1,1	8857,24	43,94	10,49
24	3	13	10	4	0,6	3178,82	45,64	11,56
25	4	13	15	4	0,6	3322,70	45,68	11,60
26	5	10	15	5	0,1	153,02	46,96	11,95
27	4	13	10	4	0,6	2413,18	45,69	11,61
28	4	13	10	4	0,6	2413,18	45,69	11,61
29	4	13	10	4	0,6	2413,18	45,69	11,61
30	3	16	5	3	0,1	397,15	47,29	11,74
31	0	0	0	0	0	2413,18	45,69	11,61
32	1	1	1	1	1	6170,25	44,70	11,21

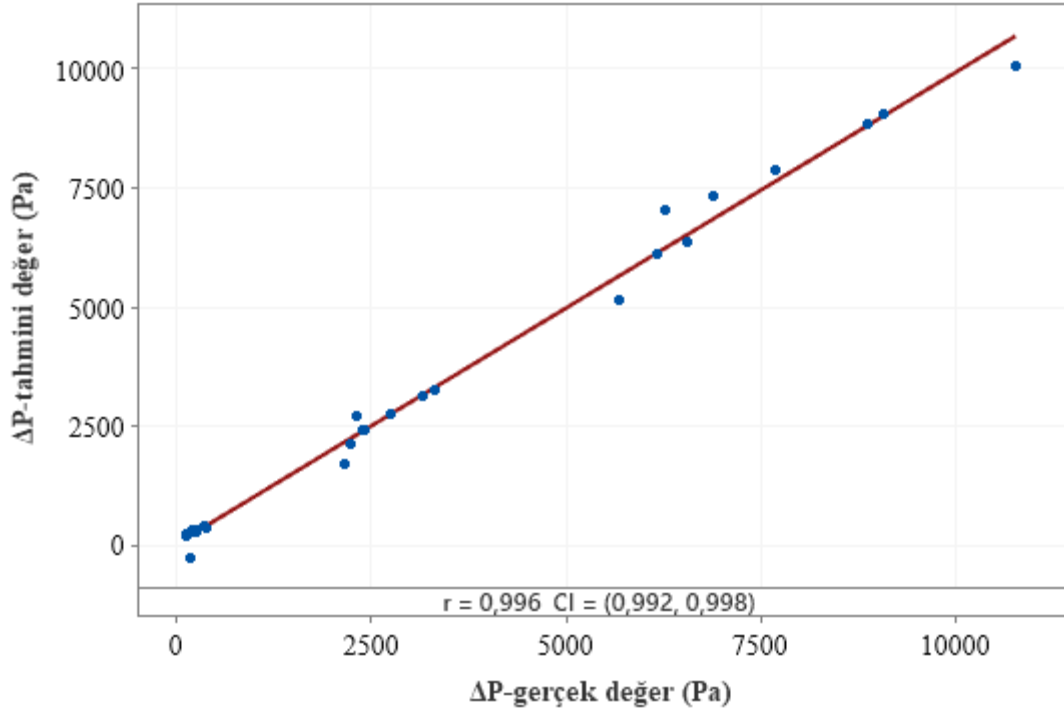
Yanıt değerlerini tahmin edecek olan regresyon modeli oluşturulurken bazı bağımsız değişkenlerin modele katkısı anlamsız olabilmektedir. Bu durumda, yanıt yüzey modeli oluşturulurken bağımsız değişkenlerin en uygun bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bu bağımsız değişkenlerin seçimi için belirlenen; ileriye doğru adım regresyonu, geriye doğru adım regresyonu ve karışık regresyon olmak üzere üç farklı adımsal (stepwise) yöntem mevcuttur (Hoffman 2019). Bu çalışmada en doğru yaklaşımı veren geriye doğru regresyon yöntemi kullanılmış ve önemsiz katkıya sahip değişkenler elenmiştir.

ΔP bağımlı değişkeni için yapılan ANOVA raporu Tablo 21’de verilmiştir. Yapılan regresyon analizi sonucunda Eşitlik (47)’de verilen model denklem elde edilmiştir. Ayrıca ΔP bağımlı değişkeninin gerçek ve tahmini değer saçılımını gösteren regresyon grafiği ise Şekil 86’da gösterilmiştir.

Tablo 23. ΔP bağımlı değişkeni için yapılan ANOVA raporu

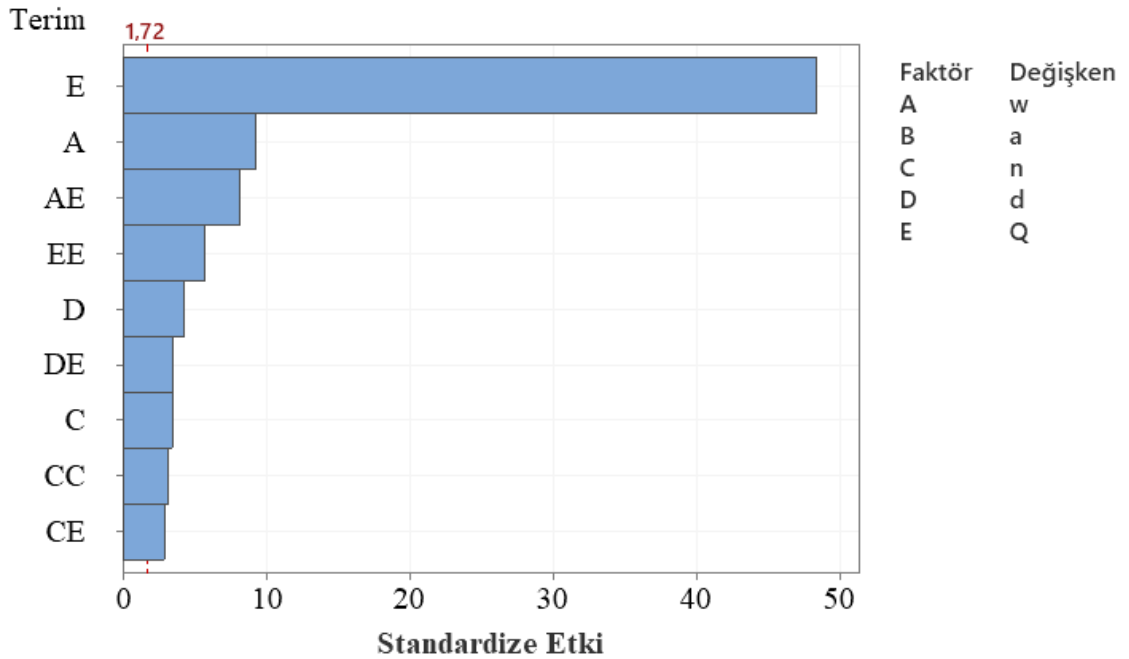
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Katkı Oranı	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Model	9	%99,19	276661789	30740199	300,58	<0,0001
Lineer	4	%90,18	251525127	62881282	614,85	<0,0001
w	1	%3,18	8868745	8868745	86,72	<0,0001
n	1	%0,43	1213232	1213232	11,86	0,002
d	1	%0,67	1857523	1857523	18,16	<0,0001
Q	1	%85,90	239585627	239585627	2342,65	<0,0001
Kare	2	%5,77	16090586	8045293	78,67	<0,0001
n*n	1	%4,59	1054352	1054352	10,31	0,004
Q*Q	1	%1,18	3298348	3298348	32,25	<0,0001
2 Yönlü Etkileşim	3	%3,24	9046077	3015359	29,48	<0,0001
w*Q	1	%2,48	6905751	6905751	67,52	<0,0001
n*Q	1	%0,31	860404	860404	8,41	0,008
d*Q	1	%0,46	1279922	1279922	12,51	0,002
Hata	22	%0,81	2249964	102271		
Uyum Eksikliği	17	%0,81	2249964	132351		
Saf Hata	5	%0,00	0	0		
Toplam	31	%100				
Model Özeti						
R^2	R^2_{adj}	PRESS	R^2_{pred}			
%99,19	%98,86	6288356	%97,75			

$$\Delta P = 1279 + 86.w - 443.n + 18.d + 9223.Q + 21,98.n^2 + 3887.Q^2 - 1314.w.Q + 92,8.n.Q - 566.d.Q \quad (47)$$



Şekil 86. ΔP için regresyon grafiği

Pareto analizi, her değişkenin katkısını ve ölçülen özellik üzerindeki etkileşimlerini göstermek için kullanılmaktadır (Amiandamhen *et al.* 2016). Bu bağlamda, ΔP bağımlı değişkeni üzerindeki bağımsız değişkenlerin etkileşimlerini gösteren Pareto grafiği Şekil 87’de gösterilmiştir.



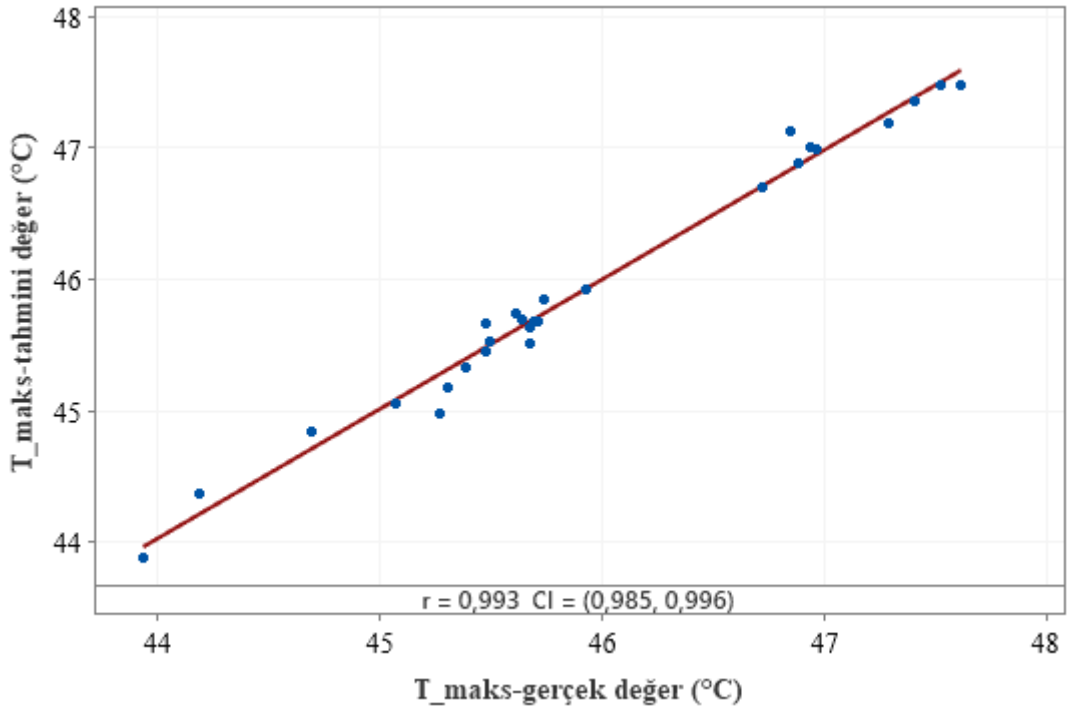
Şekil 87. ΔP için Pareto grafiği

T_maks bağımlı değişkeni için yapılan ANOVA raporu Tablo 22’de verilmiştir. Yapılan regresyon analizi sonucunda Eşitlik (48)’de verilen model denklem elde edilmiştir. Bununla birlikte T_maks bağımlı değişkeninin gerçek ve tahmini değer saçılımlarını gösteren regresyon grafiği ise Şekil 88’de gösterilmiştir.

Tablo 24. T_maks bağımlı değişkeni için yapılan ANOVA raporu

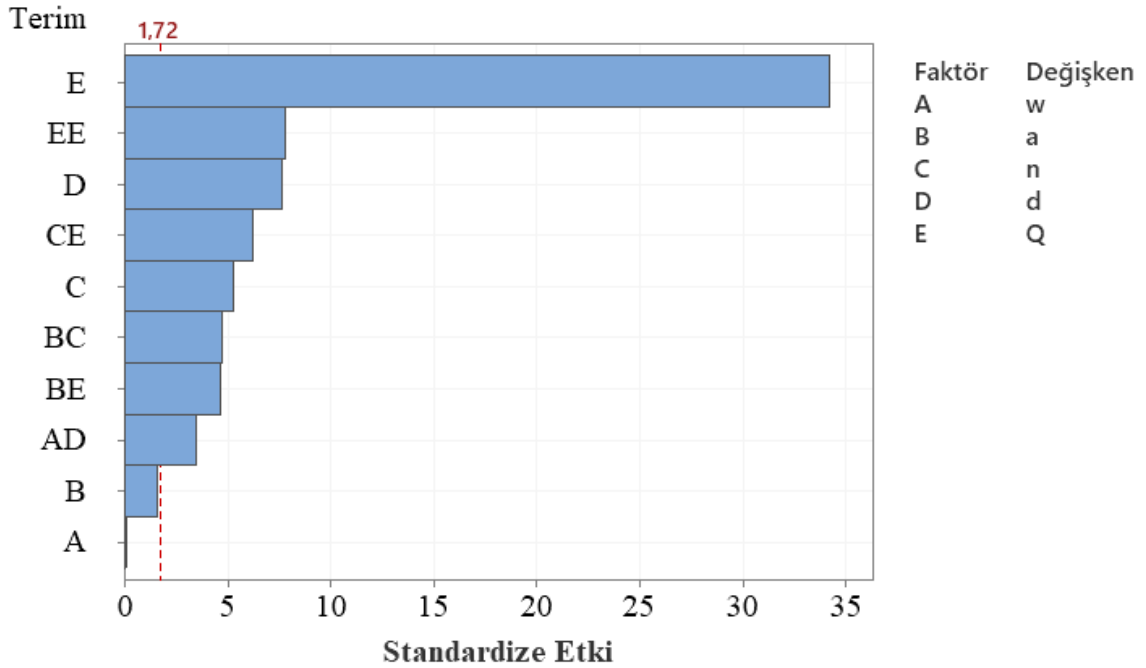
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Katkı Oranı	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Model	10	%98,54	25,0866	2,5087	141,69	<0,0001
Lineer	5	%87,66	22,317	4,4634	252,1	<0,0001
w	1	%0,00	0,0001	0,0001	0,01	0,93
a	1	%0,19	0,0481	0,0481	2,71	0,114
n	1	%1,96	0,5	0,5	28,24	<0,0001
d	1	%4,05	1,032	1,032	58,29	<0,0001
Q	1	%81,45	20,7368	20,7368	1171,25	<0,0001
Kare	1	%4,24	1,0795	1,0795	60,97	<0,0001
Q*Q	1	%4,24	1,0795	1,0795	60,97	<0,0001
2 Yönlü Etkileşim	4	%6,64	1,6901	0,4225	23,87	<0,0001
w*d	1	%0,83	0,2116	0,2116	11,95	0,002
a*n	1	%1,56	0,3969	0,3969	22,42	<0,0001
a*Q	1	%1,51	0,3844	0,3844	21,71	<0,0001
n*Q	1	%2,74	0,6972	0,6972	39,38	<0,0001
Hata	21	%1,46	0,3718	0,0177		
Uyum Eksikliği	16	%1,46	0,3718	0,0232		
Saf Hata	5	%0,00	0	0		
Toplam	31	%100,00				
Model Özeti						
R²	R²_{adj}	PRESS	R²_{pred}			
%98,54	%97,84	1,14756	%95,49			

$$\begin{aligned}
 T_{maks} = & 52,096 - 0,463.w - 0,1498.a - 0,1197.n - 0,699.d - \\
 & 4,432.Q + 1,481.Q^2 + 0,1150.w.d + 0,01050.a.n + \\
 & 0,1033.a.Q - 0,0835.n.Q
 \end{aligned}
 \tag{48}$$



Şekil 88. T_{maks} için regresyon grafiği

T_{maks} bağımlı değişkeni üzerindeki bağımsız değişkenlerin etkileşimlerini gösteren Pareto grafiği Şekil 89’da gösterilmiştir.



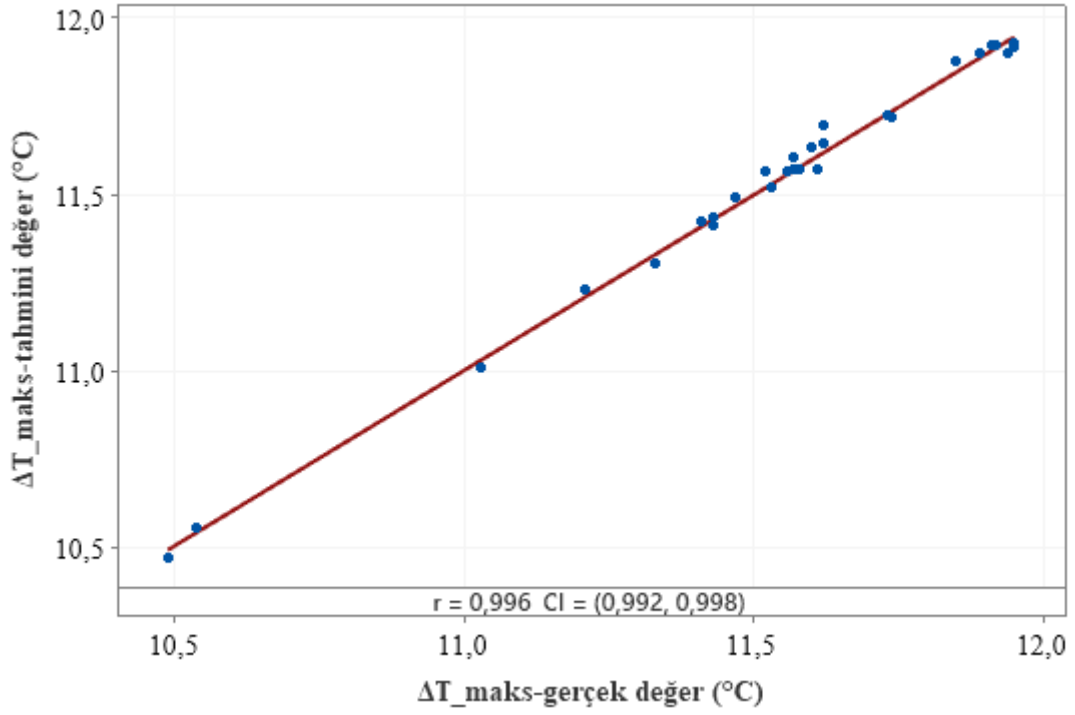
Şekil 89. T_{maks} için Pareto grafiği

ΔT_{maks} bağımlı değişkeni için yapılan ANOVA raporu Tablo 23’te verilmiştir. Yapılan regresyon analizi sonucunda Eşitlik (49)’da verilen model denklem elde edilmiştir. Buna ek olarak ΔT_{maks} bağımlı değişkeninin gerçek ve tahmini değer saçılımlarını gösteren regresyon grafiği ise Şekil 90’da gösterilmiştir.

Tablo 25. ΔT_{maks} bağımlı değişkeni için yapılan ANOVA raporu

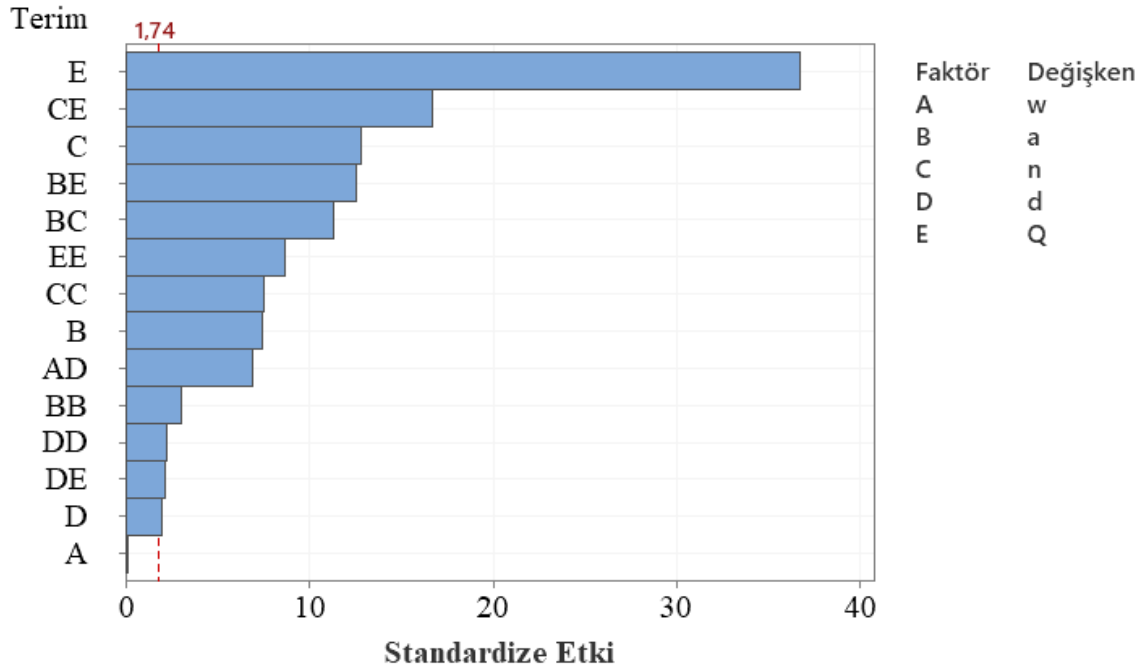
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Katkı Oranı	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Model	14	%99,27	3,65133	0,26081	165,02	<0,0001
Lineer	5	%67,51	2,48316	0,49663	314,22	<0,0001
w	1	%0,00	0,00002	0,00002	0,01	0,907
a	1	%2,36	0,08681	0,08681	54,92	<0,0001
n	1	%7,11	0,26161	0,26161	165,52	<0,0001
d	1	%0,16	0,00605	0,00605	3,83	0,067
Q	1	%57,87	2,12867	2,12867	1346,84	<0,0001
Kare	4	%5,18	0,1906	0,04765	30,15	<0,0001
a*a	1	%0,61	0,01426	0,01426	9,02	0,008
n*n	1	%1,33	0,08984	0,08984	56,84	<0,0001
d*d	1	%0,01	0,00813	0,00813	5,14	0,037
Q*Q	1	%3,24	0,11909	0,11909	75,35	<0,0001
2 Yönlü Etkileşim	5	%26,58	0,97757	0,19551	123,7	<0,0001
w*d	1	%2,06	0,07563	0,07563	47,85	<0,0001
a*n	1	%5,51	0,2025	0,2025	128,12	<0,0001
a*Q	1	%6,80	0,25	0,25	158,18	<0,0001
n*Q	1	%12,02	0,44223	0,44223	279,8	<0,0001
d*Q	1	%0,20	0,00722	0,00722	4,57	0,047
Hata	17	%0,73	0,02687	0,00158		
Uyum Eksikliği	12	%0,69	0,02554	0,00213	7,98	0,016
Saf Hata	5	%0,04	0,00133	0,00027		
Toplam	31	%100,00				
Model Özeti						
R²	R²_{adj}	PRESS	R²_{pred}			
%99,27	%98,67	0,104829	%97,15			

$$\begin{aligned}
\Delta T_{maks} = & 14,156 - 0,2739.w + 0,1121.a - 0,2305.n - 0,715.d + \\
& 0,091.Q - 0,00823.a^2 + 0,007437.n^2 + 0,0559.d^2 - \\
& 0,8563.Q^2 + 0,06875.w.d + 0,007500.a.n + \\
& 0,08333.a.Q - 0,06650.n.Q - 0,0425.d.Q
\end{aligned}
\tag{49}$$



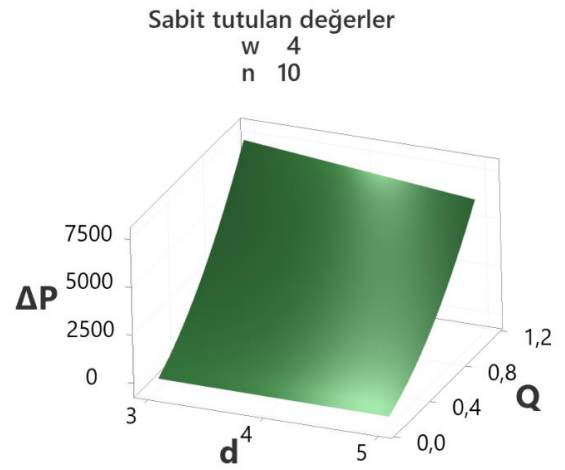
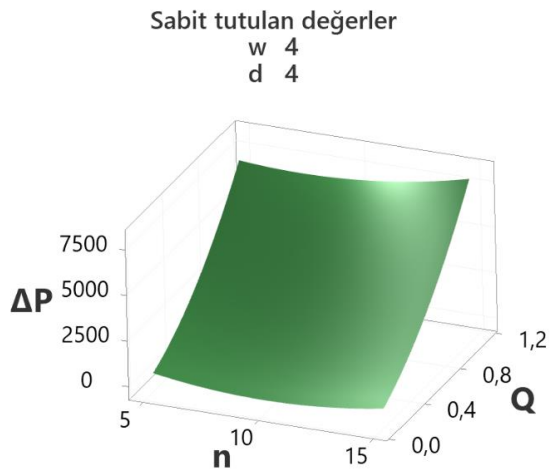
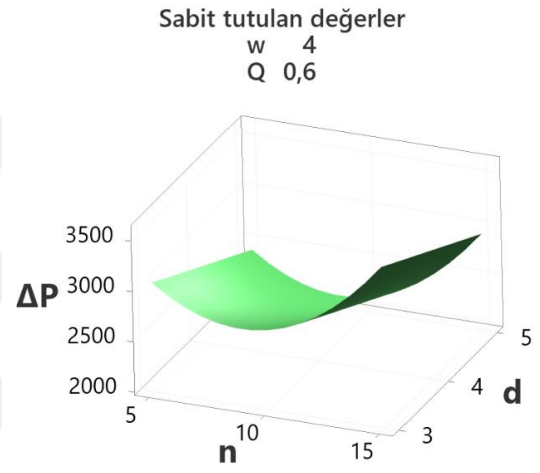
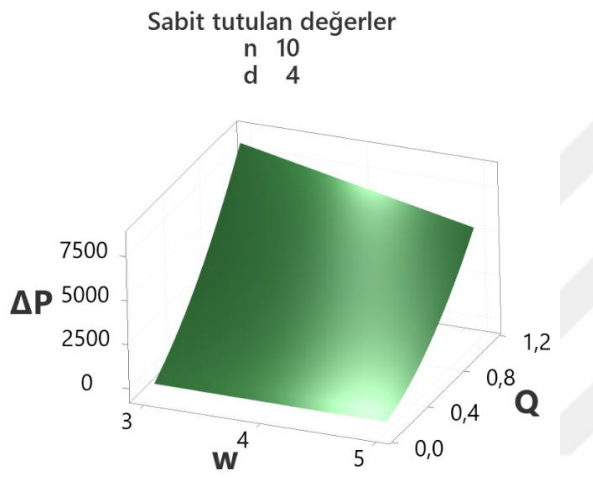
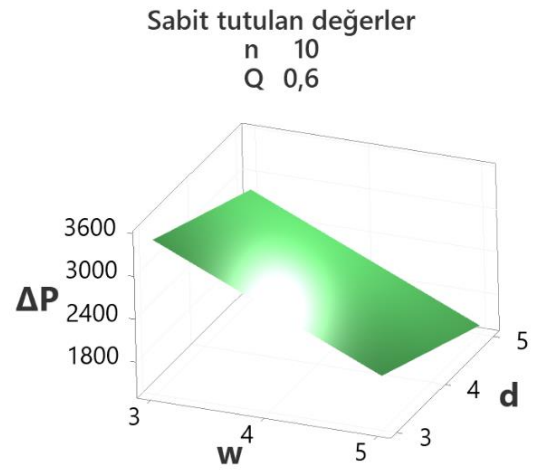
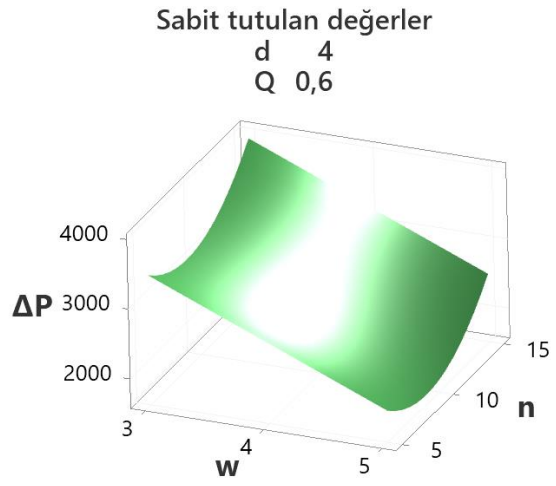
Şekil 90. ΔT_{maks} için regresyon grafiği

ΔT_{maks} bağımlı değişkeni üzerindeki bağımsız değişkenlerin etkileşimlerini gösteren Pareto grafiği Şekil 91’de gösterilmiştir.

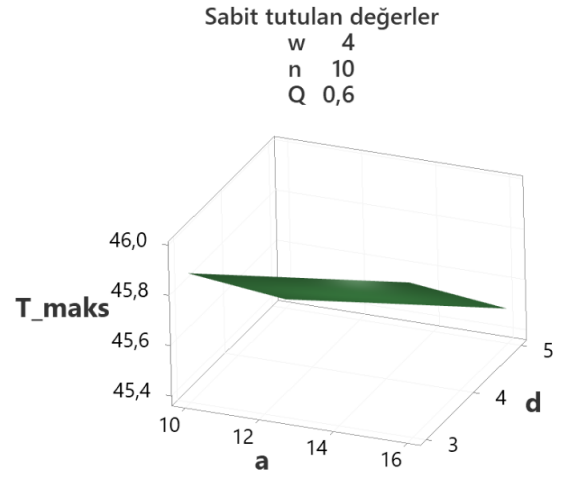
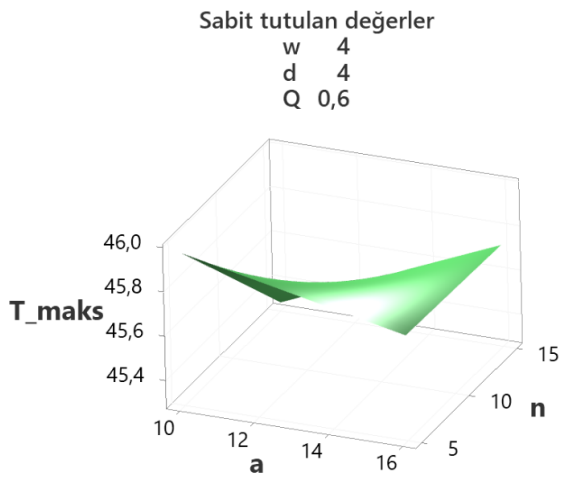
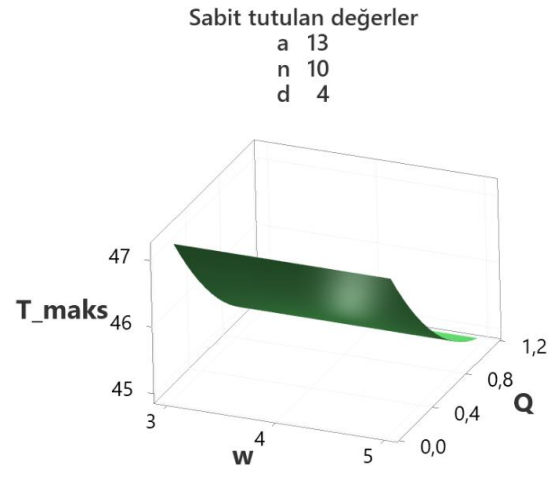
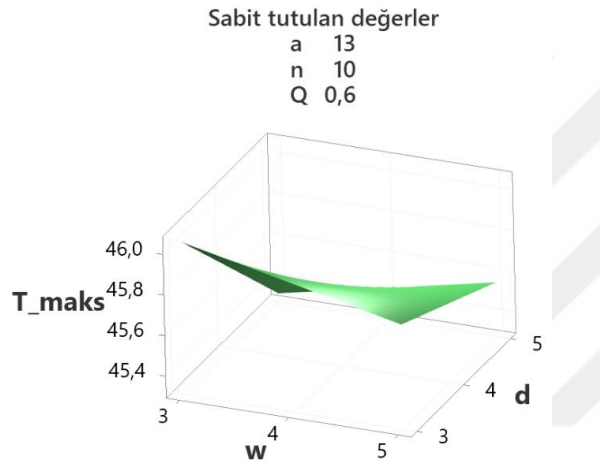
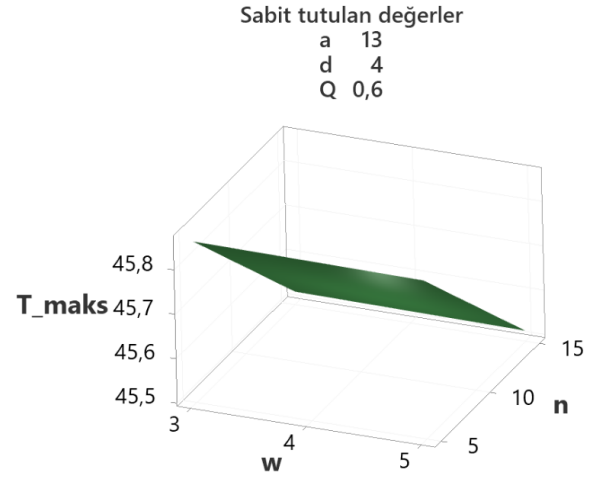
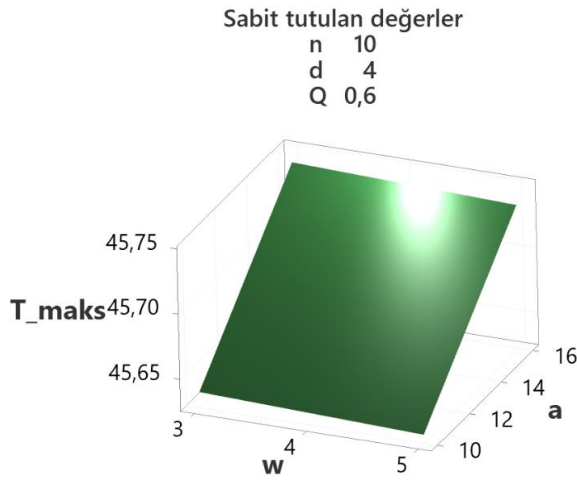


Şekil 91. ΔT_{maks} için Pareto grafiği

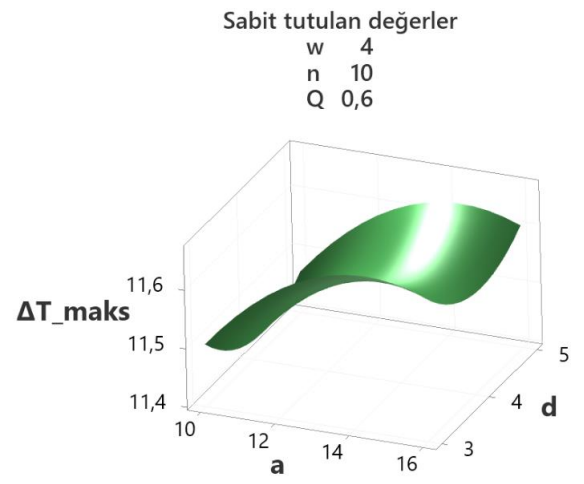
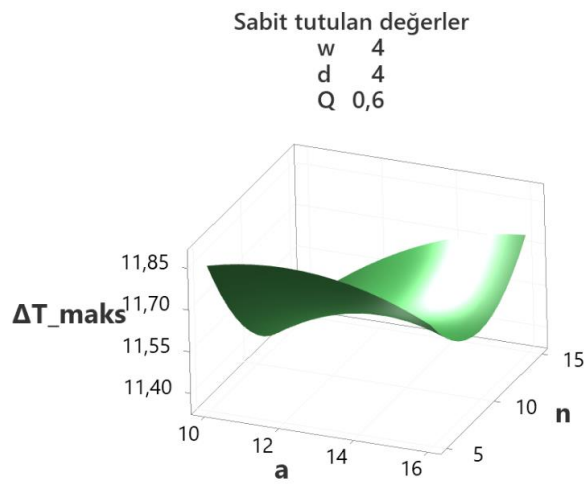
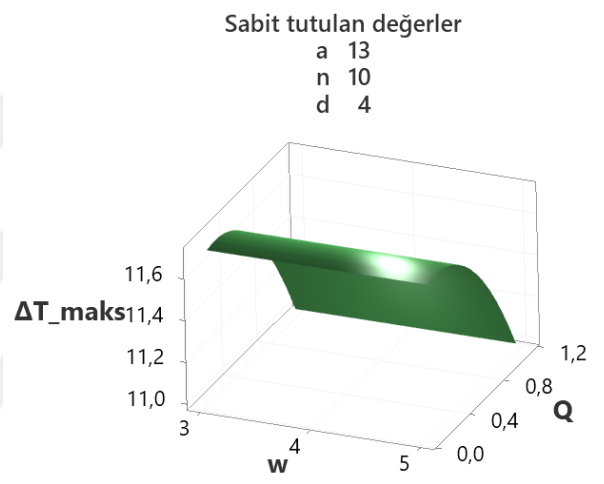
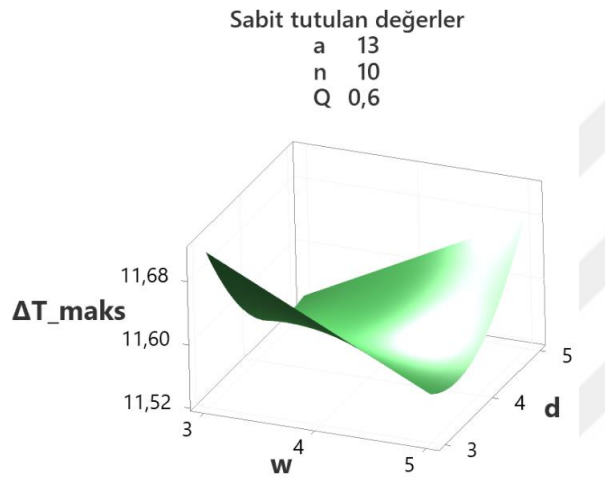
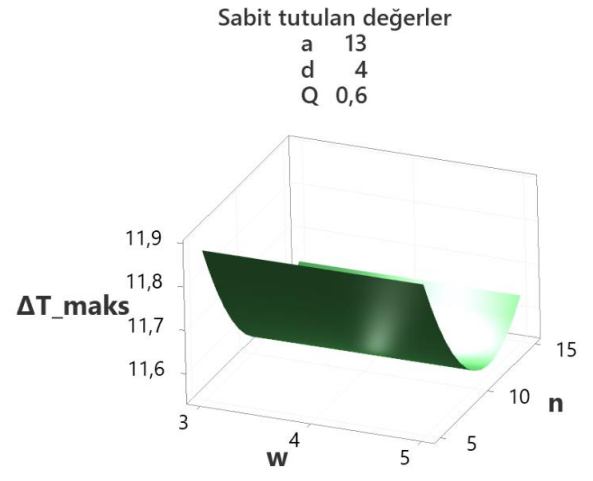
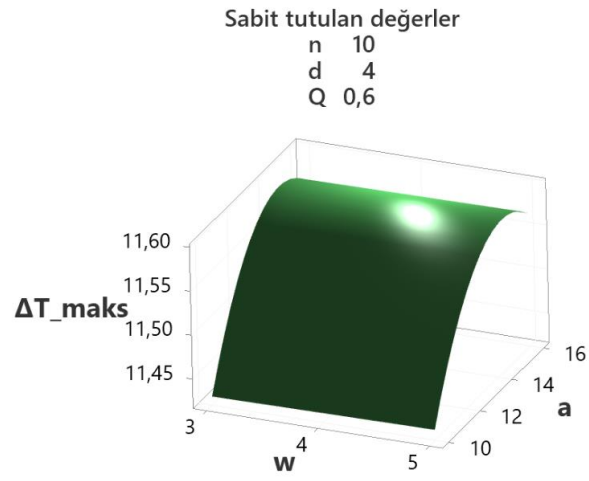
ΔP , T_{maks} ve ΔT_{maks} bağımlı değişkenleri için bağımsız değişkenlerle olan ilişkilerini daha detaylı okuyabilmek amacıyla elde edilen yüzey grafikleri sırasıyla Şekil 92, Şekil 93 ve Şekil 94’te verilmiştir.



Şekil 92. ΔP için yüzey grafikleri

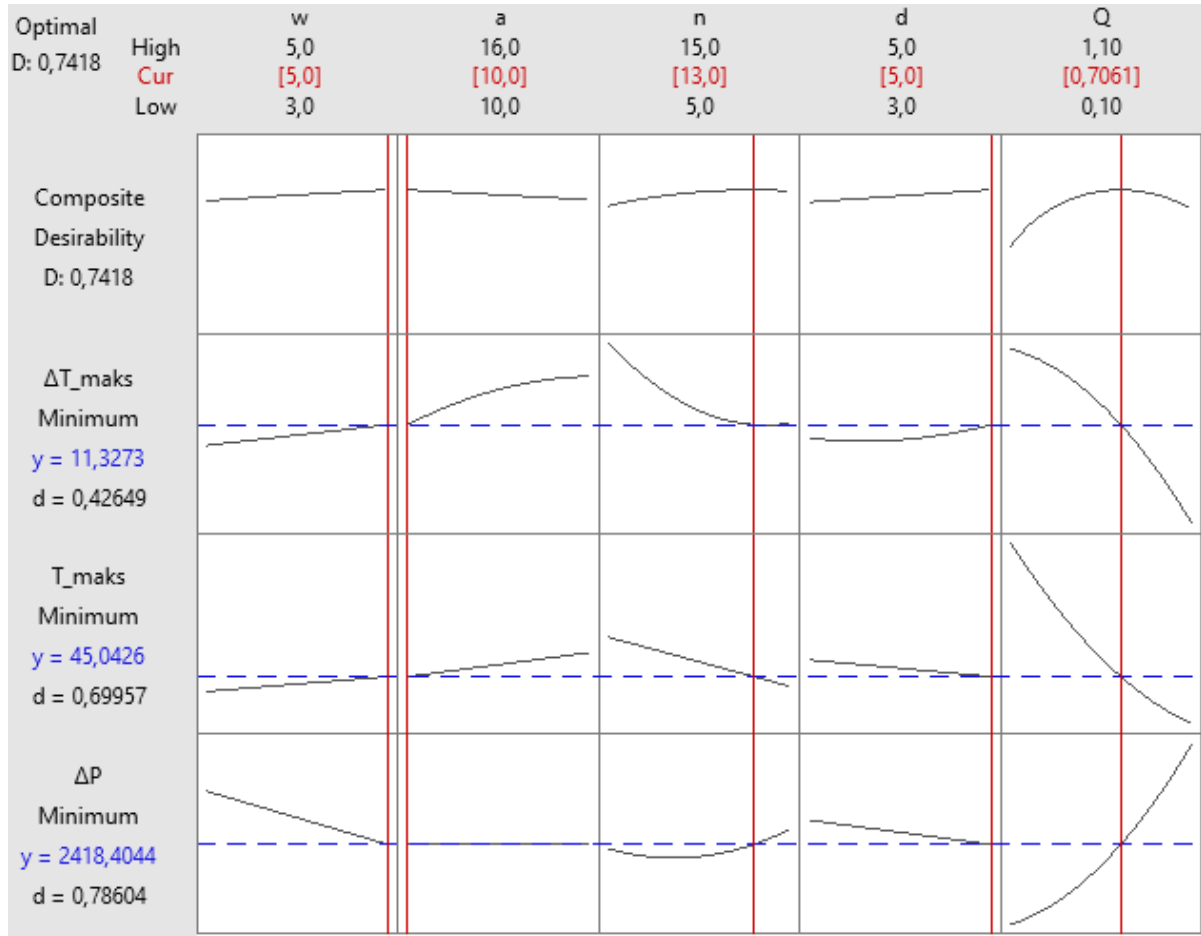


Şekil 93. T_{maks} için yüzey grafikleri



Şekil 94. ΔT_{maks} için yüzey grafikleri

ΔP , T_{maks} ve ΔT_{maks} olmak üzere belirlenen bu üç yanıt değişkeninin matematiksel modelleri oluşturulmuş ve tahmin doğrulukları kanıtlanmıştır. Bu aşamadan sonra çok amaçlı optimizasyon için amaç fonksiyonu olarak düşünülen üç farklı yanıt değişkeni minimize edilerek bağımsız değişkenlerin optimum değerlerine ulaşılmıştır. Yapılan çok amaçlı optimizasyonda Kompozit İstenebilirlik Fonksiyonu (Composite Desirability Function-CDF) yaklaşımı kullanılmıştır. Bu üç amaç fonksiyonun eş zamanlı optimizasyonu ile elde edilen sonuçlar Şekil 95'te gösterilmiştir. MKSP'nin dört farklı geometrik parametresi (w , a , n , d) ve soğutma sıvısının debisinden (Q) oluşan faktörlerin optimal değerleri Tablo 24'te verilmiştir.



Şekil 95. CDF yaklaşımı ile çoklu yanıt optimizasyonu sonuçları

Tablo 26. MKSP optimizasyon sonucu

w (mm)	a (mm)	n (mm)	d (mm)	Q (L/dk)	ΔT_{maks} uyum değeri (°C)	T_{maks} uyum değeri (°C)	ΔP uyum değeri (Pa)	Kompozit istenebilirlik
5	10	13	5	0,706	11,33	45,04	2418,40	0,7418

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, elektrikli araçlarda kullanılan LiFePO_4 torba tip bataryanın doğal taşınım şartlarında hava ile soğutma yöntemi ve iki farklı soğutucu plaka kullanarak sıvı ile soğutma yöntemi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Kullanılan iki farklı soğutucu plakadan yeni kanal tasarımına sahip mini kanallı soğutucu plakanın (MKSP) kanal yapısı ve plakada devridaim ettirilen su debisinin optimizasyonu yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar ile elde edilen önemli sonuçlar ve bu sonuçlara bağlı öneriler maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır.

- Doğal taşınım şartlarında batarya 1C ve 2C deşarj hızlarında Li-iyon bataryalar için tavsiye edilen üst çalışma sıcaklığı sınırını ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$) aşmadığı görülürken, 3C, 4C ve 5C deşarj hızlarında bu sınır aşılmış ve bu yüksek deşarj hızlarında doğal taşınım ile soğutmanın batarya için yeterli olmadığı tespit edilmiştir. 3C ve üzeri deşarj hızları için bataryanın farklı soğutma teknikleri ile ısı yönetiminin yapılması önerilmektedir.
- Doğal taşınım şartlarında, en yüksek deşarj hızında (5C) elde edilen maksimum, minimum ve ortalama batarya sıcaklıkları ise sırasıyla $52,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $45,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $50,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür.
- DoD ve bataryadan çekilen akıma (I) bağlı geliştirilen korelasyon denklemi ile doğal taşınım şartlarında bataryadan transfer edilen ısı, maksimum $\pm\%20$ hata aralığında ve $0,99\text{ }R^2$ değeri ile tahmin edilmiştir.
- Sıvı soğutma deneylerinde en etkili soğutma her iki plaka kullanımında da $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ su giriş sıcaklığı şartında elde edilmiştir. Bununla birlikte bu şartlarda deşarj süresince bazı DoD değerlerinde batarya sıcaklığının, alt sıcaklık limitinin ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) altına düştüğü görülmüştür. Ayrıca belirli deşarj hızlarındaki yapılan deneylerde oluşan sıcaklık farkları en yüksek seviyelere çıkmıştır ki bu batarya için istenmeyen bir durumdur.
- 3C, 4C ve 5C deşarj hızları ve $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ su giriş sıcaklığı şartlarında yapılan deneylerde, ortalama batarya sıcaklıklarının $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ olan üst sıcaklık limitini her iki plaka kullanımında da aştığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ su giriş sıcaklığı ile yapılan soğutmanın yüksek deşarj hızlarında yetersiz kaldığı tespit edilmiştir.
- En verimli soğutmanın $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ su giriş sıcaklığında yapıldığı tespit edilmiştir. Bu sıcaklık şartında SSP, 5C deşarj hızında yeterli soğutma sağlayamazken MKSP ile tüm deneysel şartlarda batarya istenilen çalışma sıcaklığı arasında tutulabilmiştir.

- Her iki plaka içinde T1 ve T6 noktaları, tüm deneylerde sırasıyla maksimum ve minimum sıcaklık değerlerine sahip olmuştur.
- MKSP kullanımı ile SSP kullanımına göre ortalama batarya sıcaklığında elde edilen maksimum düşüş 5,7 °C olup, bu değer 1,1 L/dk su debisi ve 15 °C su giriş sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir.
- Batarya ısı yönetiminde bir başka önemli parametre olan batarya yüzeyinde oluşan sıcaklık farkıdır. SSP ve MKSP kullanımı ile yapılan soğutma deneylerinde elde edilen maksimum yerel sıcaklık farkları sırasıyla 16,8 °C ve 12,0 °C olmuştur. MKSP kullanımı ile yerel sıcaklık farkında yaklaşık %40 iyileşme elde edilmiştir.
- Maksimum ısı transfer hızı MKSP kullanımı ile 5C deşarj hızı, 1,1 L/dk su debisi ve 15 °C su giriş sıcaklığı şartlarında elde edilmiş olup 107,1 W olarak hesaplanmıştır. Aynı şartlarda SSP kullanımı ile elde edilen ısı transfer hızı ise 87,9 W bulunmuştur. Ayrıca bu şartlarda MKSP kullanımı ile birim kütle başına maksimum ısı transfer hızında %33,2 artış elde edilmiştir.
- SSP ile kıyaslandığında, MKSP kullanımıyla basınç kaybında, en düşük (0,1 L/dk) ve en yüksek (1,1 L/dk) su debilerinde sırasıyla %29 ve %41 oranında azalma elde edilmiştir.
- Her iki plaka kullanımı ile yapılan sıvı soğutma HAD analizleri sonucunda, batarya yüzeyindeki maksimum sıcaklık bölgelerinin genellikle pozitif terminal ucu ve bataryanın alt kasımlarında yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak bu bölgelerde daha etkin soğutma yapabilecek farklı kanal tasarımlarına sahip soğutucu plakalar geliştirilebilir.
- MKSP'nin optimizasyonu için belirlenen, kanal geometrisine ait w, a, n, d bağımsız değişkenleri ve Q su debisi bağımsız değişkeni için elde edilen optimum değerler sırasıyla 5 mm, 10 mm, 13 adet, 5 mm ve 0,706 L/dk olmuştur.
- Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlardan yola çıkarak bataryanın daha etkin ve homojen soğutulmasını sağlayacak farklı tasarımlarda soğutucu plakalar geliştirilebilir.
- Bu soğutucu plakaların çoklu batarya paketlerindeki soğutma performansları, deneysel ve sayısal olarak incelenebilir.
- Geliştirilen farklı soğutma sıvıları kullanılarak elde edilebilecek maksimum batarya sıcaklığı, sıcaklık homojenliği ve basınç düşümündeki değişimler değerlendirilebilir.
- Elektrikli araçlar için geliştirilebilecek gerçek sürüş modellerine ait çalışma şartlarında soğutucu plakaların ısı performansları incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Ahmadi, P. and Torabi, F., 2019. Simulation of Battery Systems. Elsevier Gezondheidszorg, Academic Press, 263-309.
- Ait-Amir, B., Pougnet, P. and El Hami, A., 2020. Meta-model development. In *Embedded Mechatronic Systems*, Pougnet, P., and El Hami, A., ISTE. 157-187.
- Akbarzadeh, M., Kalogiannis, T., Jaguemont, J., He, J., Jin, L., Berecibar, M. and Van Mierlo, J., 2020. Thermal modeling of a high-energy prismatic lithium-ion battery cell and module based on a new thermal characterization methodology. *Journal of Energy Storage*, 32, 101707.
- Al Hallaj, S., Maleki, H., Hong, J.S. and Selman, J.R., 1999. Thermal modeling and design considerations of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 83 (1–2), 1–8.
- Al-Zareer, M., Dincer, I., and Rosen, M.A., 2018. Development and evaluation of a new ammonia boiling based battery thermal management system. *Electrochimica Acta*, 280, 340–352.
- Al-Zareer, M., Dincer, I. and Rosen, M.A., 2019. A novel approach for performance improvement of liquid to vapor based battery cooling systems. *Energy Conversion and Management*, 187, 191-204.
- Al-Zareer, M., Dincer, I. and Rosen, M.A., 2020. A thermal performance management system for lithium-ion battery packs. *Applied Thermal Engineering*, 165 (May 2019), 114378.
- Amalesh, T. and Narasimhan, N. L., 2020. Introducing new designs of minichannel cold plates for the cooling of Lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 479, 228775.
- Amiandamhen, S. O., Meincken, M. and Tyhoda, L., 2016. Magnesium based phosphate cement binder for composite panels: a response surface methodology for optimisation of processing variables in boards produced from agricultural and wood processing industrial residues. *Industrial crops and products*, 94, 746-754.
- Amjad, S., Neelakrishnan, S. and Rudramoorthy, R., 2010. Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (3), 1104–1110.
- An, Z., Jia, L., Li, X. and Ding, Y., 2017. Experimental investigation on lithium-ion battery thermal management based on flow boiling in mini-channel. *Applied Thermal Engineering*, 117, 534–543.
- An, Z., Shah, K., Jia, L. and Ma, Y., 2019. A parametric study for optimization of minichannel based battery thermal management system. *Applied Thermal Engineering*, 154 (October 2018), 593–601.
- Arora, S., 2018. Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies. *Journal of Power Sources*, 400 (July), 621–640.
- Bai, F., Chen, M., Song, W., Yu, Q., Li, Y., Feng, Z. and 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.
- Bazinski, S. J., Wang, X., Sangeorzan, B. P. and Guessous, L., 2016. Measuring and assessing the effective in-plane thermal conductivity of lithium iron phosphate pouch cells. *Energy*, 114, 1085-1092.
- Bergman T.L., Incropera F.P., DeWitt D.P. and Lavine A.S., 2011. Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley and Sons, 1052 p, New York, A.B.D.

- Bernardi D., Pawlikowski E. and Newman J., 1985. A general energy balance for battery systems, *J. Electrochem. Soc.* 132 (1), 5–12.
- Brandl, M., Gall, H., Wenger, M., Lorentz, V., Giegerich, M., Baronti, F., ... and Prochazka, W., 2012. Batteries and battery management systems for electric vehicles. In 2012 Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition (DATE), IEEE, 971-976.
- Chen, S., Peng, X., Bao, N. and Garg, A., 2019. A comprehensive analysis and optimization process for an integrated liquid cooling plate for a prismatic lithium-ion battery module. *Applied Thermal Engineering*, 156 (January), 324–339.
- Chung, Y. and Kim, M.S., 2019. Thermal analysis and pack level design of battery thermal management system with liquid cooling for electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 196 (February), 105–116.
- Churchill, S.W. and Chu, H.H.S., 1975. Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18, 1323-1329.
- Deng, Y., Feng, C., E, J., Zhu, H., Chen, J., Wen, M. and Yin, H., 2018. Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review. *Applied Thermal Engineering*, 142 (April), 10–29.
- Dincer, I., Hamut, H.S. and Javani, N., 2017. Introductory Aspects of Electric Vehicles. Thermal management of hybrid vehicle battery systems. Ed: T. Kurfess. John Wiley and Sons Ltd, UK, 1-45.
- Eaves, S. and Eaves, J., 2004. A cost comparison of fuel-cell and battery electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 130 (1–2), 208–212.
- Ellis, B.L. and Nazar, L.F., 2012. Sodium and sodium-ion energy storage batteries. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 16, 168–177.
- Friedrich, J. and Ge, M., 2020. 4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors. [online]. World Resources Institute, <https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors> (10.01.2021).
- Gao, Q., Liu, Y., Wang, G., Deng, F. and Zhu, J., 2019. An experimental investigation of refrigerant emergency spray on cooling and oxygen suppression for overheating power battery. *Journal of Power Sources*, 415 (September 2018), 33–43.
- Gandoman, F. H., Behi, H., Bercibar, M., Jaguemont, J., Aleem, S. H. A., Behi, M. and Van Mierlo, J. 2020. Reliability evaluation of Li-ion batteries for electric vehicles applications from the thermal perspectives. In *Uncertainties in Modern Power Systems*. Academic Press, 563-587.
- Gantenbein, S., Schönleber, M., Weiss, M. and Ivers-Tiffée, E. 2019. Capacity fade in lithium-ion batteries and cyclic aging over various state-of-charge ranges. *Sustainability*, 11(23), 6697.
- Giunta, A., Wojtkiewicz, S. and Eldred, M., 2003. Overview of modern design of experiments methods for computational simulations. 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Nevada.
- Hauser, A. and Kuhn, R. 2015. High-voltage battery management systems (BMS) for electric vehicles. In *Advances in battery technologies for electric vehicles*, Woodhead Publishing, 265-282.
- He, F., Wang, H. and Ma, L. 2015. Experimental demonstration of active thermal control of a battery module consisting of multiple Li-ion cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 91, 630-639.
- Hirano, H., Tajima, T., Hasegawa, T., Sekiguchi, T. and Uchino, M., 2014. Boiling Liquid Battery Cooling for Electric Vehicle. IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 1–4.
- Hoffman, J.I.E., 2019. Multiple Regression. *Basic Biostatistics for Medical and Biomedical Practitioners*, Academic Press, 525–560.

- Holman, J., 2012. *Experimental methods for engineers*, 8th edition. McGraw-Hill, 761 p, New York, USA.
- Hong, S.H., Jang, D.S., Park, S., Yun, S. and Kim, Y., 2020. Thermal performance of direct two-phase refrigerant cooling for lithium-ion batteries in electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 173 (March), 115213.
- Hoque, M. M., Hannan, M. A. and Mohamed, A. 2016. Optimal CC-CV charging of lithium-ion battery for charge equalization controller. In 2016 International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering (ICAEEES), IEEE, 610-615.
- Huo, Y. and Rao, Z., 2015. The numerical investigation of nanofluid based cylinder battery thermal management using lattice Boltzmann method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 91, 374–384.
- Huo, Y., Rao, Z., Liu, X. and Zhao, J., 2015. Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate. *Energy Conversion and Management*, 89, 387–395.
- Hussain, A., Tso, C.Y. and Chao, C.Y.H., 2016. Experimental investigation of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using nickel foam-paraffin composite. *Energy*, 115, 209–218.
- Jaguemont, J., Omar, N., Martel, F., Van den Bossche, P. and Van Mierlo, J., 2017. Streamline three-dimensional thermal model of a lithium titanate pouch cell battery in extreme temperature conditions with module simulation. *Journal of Power Sources*, 367, 24-33.
- Jilte, R.D., Kumar, R. and Ahmadi, M.H., 2019. Cooling performance of nanofluid submerged vs. nanofluid circulated battery thermal management systems. *Journal of Cleaner Production*, 240.
- Jin, L.W.W., Lee, P.S.S., Kong, X.X.X., Fan, Y. and Chou, S.K.K., 2014. Ultra-thin minichannel LCP for EV battery thermal management. *Applied Energy*, 113, 1786–1794.
- Kanbur, B. B., Kumtepli, V. and Duan, F., 2020. Thermal performance prediction of the battery surface via dynamic mode decomposition. *Energy*, 201, 117642.
- Kim, G. H., Smith, K., Lee, K. J., Santhanagopalan, S. and Pesaran, A. 2011. Multi-domain modeling of lithium-ion batteries encompassing multi-physics in varied length scales. *Journal of the electrochemical society*, 158(8), A955.
- Kim, H. J., Lee, J. H., Baek, D. H. and Lee, J. K., 2017. A study on thermal performance of batteries using thermal imaging and infrared radiation. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 45, 360-365.
- Kim, J., Oh, J. and Lee, H., 2019. Review on battery thermal management system for electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 149 (November 2018), 192–212.
- Kline, S. and McClintock, F., 1953. Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments. *Mechanical Engineering*, Vol. 75, 3-8.
- Kwon, K. H., Shin, C. B., Kang, T. H. and Kim, C. S. 2006. A two-dimensional modeling of a lithium-polymer battery. *Journal of Power Sources*, 163(1), 151-157.
- Li, X., Zhang, Z., Wang, W., Tian, Y., Li, D. and Tian, J., 2020. Multiphysical field measurement and fusion for battery electric-thermal-contour performance analysis. *Applied Energy*, 262, 114518.
- Li, X., Zhou, D., Zhang, G., Wang, C., Lin, R. and Zhong, Z., 2019. Experimental investigation of the thermal performance of silicon cold plate for battery thermal management system. *Applied Thermal Engineering*, 155 (February), 331–340.
- Li, Y., Zhou, Z. and Wu, W.-T.T., 2019. Three-dimensional thermal modeling of Li-ion battery cell and 50 V Li-ion battery pack cooled by mini-channel cold plate. *Applied Thermal Engineering*, 147 (November 2018), 829–840.
- Linden, D. and Reddy, T.B., 2002. *Handbook of Batteries*. McGraw-Hill, 1454 p, New York, USA.

- Lisbona, D. and Snee, T., 2011. A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries. *Process Safety and Environmental Protection*, 89 (6), 434–442.
- Liu, H. ling, Shi, H. bo, Shen, H. and Xie, G., 2019. The performance management of a Li-ion battery by using tree-like mini-channel heat sinks: Experimental and numerical optimization. *Energy*, 189, 116150.
- Liu, H., Wei, Z., He, W. and 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.
- Liu, J., Li, H., Li, W., Shi, J., Wang, H. and Chen, J., 2020. Thermal characteristics of power battery pack with liquid-based thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 164 (June 2019), 114421.
- Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J. and Ouyang, M., 2013. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 226, 272–288.
- von Lüders, C., Zinth, V., Erhard, S. V., Osswald, P.J., Hofmann, M., Gilles, R. and Jossen, A., 2017. Lithium plating in lithium-ion batteries investigated by voltage relaxation and in situ neutron diffraction. *Journal of Power Sources*, 342, 17–23.
- Malik, M., Dincer, I., Rosen, M.A., Mathew, M. and Fowler, M., 2018. Thermal and electrical performance evaluations of series connected Li-ion batteries in a pack with liquid cooling. *Applied Thermal Engineering*, 129, 472–481.
- Meng, X., Yang, K., Zhang, M., Gao, F., Liu, Y., Duan, Q. and Wang, Q., 2020. Experimental study on combustion behavior and fire extinguishing of lithium iron phosphate battery. *Journal of Energy Storage*, 30 (May), 101532.
- Menon, A., 2007. Structural optimization using ANSYS and regulated multiquadric response surface model. MS Thesis, The University of Texas at Arlington, U.S.A.
- Merkin, J. H. and Pop, I., 1996. Conjugate free convection on a vertical surface. *International Journal of heat and Mass transfer*, 39(7), 1527-1534.
- Mondal, B., Lopez, C.F., Verma, A. and Mukherjee, P.P., 2018. Vortex generators for active thermal management in lithium-ion battery systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124, 800–815.
- Pan, D., Xu, S., Lin, C. and Chang, G., 2016. Thermal Management of Power Batteries for Electric Vehicles Using Phase Change Materials: A Review, SAE Technical Paper 2016-01-1204.
- Panchal, S., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R. and Fowler, M., 2016. Experimental and simulated temperature variations in a LiFePO₄-20 Ah battery during discharge process. *Applied Energy*, 180, 504-515.
- Panchal, S., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R. and Fowler, M., 2016. Experimental and theoretical investigations of heat generation rates for a water cooled LiFePO₄ battery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 101, 1093–1102.
- Panchal, S., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R. and Fowler, M., 2017. Transient electrochemical heat transfer modeling and experimental validation of a large sized LiFePO₄/graphite battery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109, 1239-1251.
- Patil, M.S., Panchal, S., Kim, N. and Lee, M.Y., 2018. Cooling performance characteristics of 20 Ah lithium-ion pouch cell with cold plates along both surfaces. *Energies*, 11 (10), 2550.
- Putra, N., Ariantara, B. and Pamungkas, R.A., 2016. Experimental investigation on performance of lithium-ion battery thermal management system using flat plate loop heat pipe for electric vehicle application. *Applied Thermal Engineering*, 99, 784–789.
- Qian, Z., Li, Y. and Rao, Z., 2016. Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling. *Energy Conversion and Management*, 126, 622–631.

- Rao, Z.H. and Wang, S.F., 2011. A review of power battery thermal energy management. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 15(9), 4554–4571.
- Roux, W. J., Stander, N. and Haftka, R. T. 1998. Response surface approximations for structural optimization. *International journal for numerical methods in engineering*, 42(3), 517–534.
- Simpson, T. W., Booker, A. J., Ghosh, D., Giunta, A. A., Koch, P. N. and Yang, R. J., 2004. Approximation methods in multidisciplinary analysis and optimization: a panel discussion. *Structural and multidisciplinary optimization*, 27(5), 302–313.
- Smalheiser, N.R., 2017. ANOVA. *Data Literacy*, Academic Press, U.S.A, 149–155.
- Sundén, B., 2019. Battery technologies. *Hydrogen, Batteries and Fuel Cells*, academic Press, 57–79 p, U.S.A.
- Stefanopoulou, A. G. and Kim, Y., 2015. System-level management of rechargeable lithium-ion batteries. *Rechargeable Lithium Batteries*, Michigan, USA, WP, 281–302.
- Tang, A., Li, J., Lou, L., Shan, C. and Yuan, X., 2019. Optimization design and numerical study on water cooling structure for power lithium battery pack. *Applied Thermal Engineering*, 159 (May), 113760.
- Tao, F., Zhang, W., Guo, D., Cao, W., Sun, L. and Jiang, F., 2020. Thermofluidic modeling and temperature monitoring of Li-ion battery energy storage system. *Applied Thermal Engineering*, 181, 116026.
- Thomas K.E. and Newman J., 2003. Thermal modeling of porous insertion electrodes, *J. Electrochem. Soc.* 150 (2), A176.
- Van Gils, R. W., Danilov, D., Notten, P. H. L., Speetjens, M. F. M. and Nijmeijer, H., 2014. Battery thermal management by boiling heat-transfer. *Energy Conversion and Management*, 79, 9–17.
- Väyrynen, A. and Salminen, J., 2012. Lithium ion battery production. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 46, 80–85.
- Wang, C., Zhang, G., Meng, L., Li, X., Situ, W., Lv, Y. and Rao, M., 2017. Liquid cooling based on thermal silica plate for battery thermal management system. *International Journal of Energy Research*, 41 (15), 2468–2479.
- Wang, S., Li, K., Tian, Y., Wang, J., Wu, Y. and Ji, S., 2019. Infrared imaging investigation of temperature fluctuation and spatial distribution for a large laminated lithium-ion power battery. *Applied Thermal Engineering*, 152, 204–214.
- Wang, T., Tseng, K. J., Zhao, J. and Wei, Z., 2014. Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies. *Applied energy*, 134, 229–238.
- Wang, Q., Jiang, B., Li, B. and Yan, Y., 2016. A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 106–128.
- Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J. and Chen, C., 2012. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. *Journal of Power Sources*, 208, 210–224.
- Wang, Y.F. and Wu, J.T., 2020. Thermal performance predictions for an HFE-7000 direct flow boiling cooled battery thermal management system for electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 207 (January), 112569.
- Wu, W., Wang, S., Wu, W., Chen, K., Hong, S. and Lai, Y., 2019. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. *Energy Conversion and Management*, 182 (January), 262–281.
- Wu, W., Yang, X., Zhang, G., Chen, K. and Wang, S., 2017. Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material based battery thermal management system. *Energy Conversion and Management*, 138, 486–492.
- Xie, Y., He, X., Hu, X., Li, W., Zhang, Y., Liu, B. and Sun, Y., 2020. An improved resistance-based thermal model for a pouch lithium-ion battery considering heat generation of posts. *Applied Thermal Engineering*, 164, 114455.

- Xu, C., Zhang, F., Feng, X., Jiang, F., Ren, D., Lu, L., Yang, Y., Liu, G., Han, X., Friess, B. and Ouyang, M., 2021. Experimental study on thermal runaway propagation of lithium-ion battery modules with different parallel-series hybrid connections. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124749.
- Xu, X., Li, W., Xu, B. and Qin, J., 2019. Numerical study on a water cooling system for prismatic LiFePO₄ batteries at abused operating conditions. *Applied Energy*, 250 (January), 404–412.
- Yang, H., Amiruddin, S., Bang, H.J., Sun, Y.-K. and Prakash, J., 2006. A Review of Li-Ion Cell Chemistries and their Potential use in Hybrid Electric Vehicles. *J. Ind. Eng. Chem.*, 12 (1), 12–38.
- Yoshio, M., Brodd, R.J. and Kozawa, A., 2009. *Lithium-Ion Batteries: Science and Technologies*, Springer Science and Business Media, 1-7 p, Newyork, USA.
- Zhang, H., Li, C., Zhang, R., Lin, Y. and Fang, H., 2020. Thermal analysis of a 6s4p Lithium-ion battery pack cooled by cold plates based on a multi-domain modeling framework. *Applied Thermal Engineering*, 173 (March), 115216.
- Zhang, J., Zhang, L., Liu, R.-S. and Liu, H., 2012. *Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion*, 2 Volume Set, vol. 1, John Wiley and Sons, USA.
- Zhang, T., Gao, C., Gao, Q., Wang, G., Liu, M.H., Guo, Y., Xiao, C. and Yan, Y.Y., 2015. Status and development of electric vehicle integrated thermal management from BTM to HVAC. *Applied Thermal Engineering*, 88 (5988), 398–409.
- Zhang, X., Klein, R., Subbaraman, A., Chumakov, S., Li, X., Christensen, J., Linder, C. and Kim, S.U., 2019. Evaluation of convective heat transfer coefficient and specific heat capacity of a lithium-ion battery using infrared camera and lumped capacitance method. *Journal of Power Sources*, 412, 552-558.
- Zhao, R., Wen, D., Lai, Z., Li, W., Ye, M., Zhuge, W., and Zhang, Y., 2021. Performance analysis and optimization of a novel cooling plate with non-uniform pin-fins for lithium battery thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 194, 117022.
- Zhu, S., Han, J., Pan, T. S., Wei, Y. M., Song, W. L., Chen, H. S. and Fang, D., 2020. A novel designed visualized Li-ion battery for in-situ measuring the variation of internal temperature. *Extreme Mechanics Letters*, 37, 100707.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Orhan KALKAN
Doğum tarihi:	-
Doğum Yeri:	-
Uyruğu:	-
Adres:	-
E-posta:	-
Eğitim	
Lise:	Erzincan Y.D.A. Lisesi
Lisans:	Marmara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Yüksek lisans:	Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens. Makine Mühendisliği Anabilim Dalı (2016)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Makine Mühendisleri Odası	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
1. Kalkan, O., Celen, A., Bakirci, K. and Dalkilic, A. S., 2021. Experimental investigation of thermal performance of novel cold plate design used in a Li-ion pouch-type battery. Applied Thermal Engineering, 191, 116885. 2. Kalkan, O., Celen, A., Bakirci, K., 2021. Experimental and numerical investigation of the LiFePO4 battery cooling by natural convection. Journal of Energy Storage, 40, 102796.	