



**T. C.
SIVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN
PASİF, AKTİF VE HİBRİT BATARYA SOĞUTMA
SİSTEMLERİNİN PERFORMANSLARININ
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Emre TORUN
(20189216002)**

**Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ertan BUYRUK**

**SİVAS
MAYIS 2024**

Emre TORUN' un hazırladığı ve “**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN PASİF, AKTİF VE HİBRİT BATARYA SOĞUTMA SİSTEMLERİNİN PERFORMANSLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı	Prof. Dr. Ertan BUYRUK Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
Jüri Üyesi	Prof. Dr. İlhami HORUZ Gazi Üniversitesi
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Haşmet TÜRKOĞLU Çankaya Üniversitesi
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Ferhat KILINÇ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Netice DUMAN Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nevcihan GÜRSOY
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.





Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Emre TORUN, 2024

Çalışma sırasında bana destek olan canım eşim Malike Torun'a, sevgili kızım Zeynep'e,
canım oğlum Melih'e, kıymetli Annem ve Babam'a, kardeşlerime, tüm aileme ve
dostlarıma...

ETİK

Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

24.05.2024

Emre TORUN

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Ertan BUYRUK'a, Doç. Dr. Ferhat KILINÇ'a, Dr. Öğr. Üyesi Netice DUMAN'a ve Dr. Mustafa CANER'e çok teşekkür ederim.



ÖZET

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN PASİF, AKTİF VE HİBRİT BATARYA SOĞUTMA SİSTEMLERİNİN PERFORMANSLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Emre TORUN

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ertan BUYRUK

2024, 158 +xxiii sayfa

Elektrikli araçlar, ihtiyacı olan elektrik enerjisini bünyesinde bulundurduğu batarya sistemlerinden karşılar. Batarya, elektrikli araç motorunun ihtiyacı olan gerilim ve akım değerlerini karşılayarak motora enerji sağlar. Bataryalar gerek kullanımı sonrasında şarj edilirken gerekse kullanım esnasında deşarj edilirken yüksek miktarda ısı enerjisi açığa çıkarır. Bataryanın en yüksek verimde çalışabilmesi, ömrünün uzun olabilmesi ve can ve mal kaybına neden olmaması için çalışma ortam sıcaklığının belirli bir sıcaklık aralığında tutulması büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle batarya sistemi termal olarak yönetilmeli ve belirli sıcaklık değerinin üzerine çıkılmasına izin verilmemelidir. Batarya soğutma sistemleri bataryada oluşan ısının hızlı bir şekilde dış ortama atılmasını ve batarya içerisindeki sıcaklığın üniform olarak dağıtılması görevlerini karşılayabilmelidir.

Bu çalışmada faz değiştiren malzeme, kompozit faz değiştiren malzeme, ısı boruları, zorlanmış taşınım ve bunların farklı kombinasyonları ile oluşturulan batarya modüllerinin soğutma performansları farklı çalışma koşullarında ve farklı ortam sıcaklıklarında deneysel düzenekler kurularak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ise hem kendi aralarında hem de doğal taşınımlı durum ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca doğal taşınımlı durum Ansys programı Fluent modülünde iki farklı model ile sayısal olarak da modellenerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Elektrikli Araç, Batarya Soğutma Sistemi, Faz Değiştiren Malzeme, Kompozit Faz Değiştiren Malzeme, Isı Borusu, Isı Transferi, Fluent

ABSTRACT

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF PASSIVE, ACTIVE AND HYBRID BATTERY COOLING SYSTEMS USED IN ELECTRIC VEHICLES

Emre TORUN

Master of Science Thesis

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ertan BUYRUK

2024, 158 + xxiii pages

Electric vehicles meet their electrical energy needs from the battery systems they contain. The battery provides energy to the electric vehicle engine by meeting the voltage and current values required by it. Batteries release high amounts of heat energy both when being charged after use and when being discharged during use. It is of great importance to keep the working environment temperature within a certain temperature range so that the battery can operate at the highest efficiency, have a long life and not cause loss of life or property. For this reason, the battery system should be thermally managed and not allowed to exceed a certain temperature value. Battery cooling systems must be able to meet the tasks of quickly discharging the heat generated in the battery to the external environment and uniformly distributing the temperature inside the battery.

In this study, the cooling performances of battery modules created with phase change material, composite phase change material, heat pipes, forced convection and their different combinations were examined by setting up experimental setups under different operating conditions and different ambient temperatures. The results obtained were compared both among themselves and with the situation where no cooling was applied. In addition, the situation where no cooling system was applied was modeled numerically with two different models in the Fluent module of the Ansys program and the results obtained were compared.

Key Words: Electric Vehicle, Battery Cooling System, Phase Change Material, Composite Phase Change Material, Heat Pipe, Heat Transfer, Fluent

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxi
SİMGELER DİZİNİ	xxii
KISALTMALAR DİZİNİ	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Lityum İyon Bataryalar	4
1.1.1. Lityum iyon bataryalarda gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar	6
1.1.2. Batarya terminolojisi	7
1.2. Batarya Soğutma Sistemleri	8
1.2.1. Hava ile batarya soğutma sistemleri	10
1.2.2. Sıvı ile batarya soğutma sistemleri	10
1.2.3. Faz değiştiren malzeme ile batarya soğutma	11
1.2.4. Isı boruları ile batarya soğutma	13
1.2.5. Termoelektrik modül ile batarya soğutma	14
1.2.6. Hibrit sistemler ile batarya soğutma	15
1.3. Önceki Çalışmalar	16
2. MATERYAL VE METOD	22
2.1. Batarya Modülü	22
2.2. Deney Düzenegi ve Performans Testleri	23
2.3. Soğutma Sistemi Tasarımları	24
2.3.1. Doğal taşınımlı sistem (S1)	24
2.3.2. FDM ve alüminyum blok kullanarak oluşturulan pasif sistem (S2).....	25
2.3.3. FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanarak oluşturulan pasif sistem (S3).....	27
2.3.4. Kompozit FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanarak oluşturulan pasif sistem (S4).....	28
2.3.5. Kompozit FDM, alüminyum blok, ısı boruları (17cm) ve fan kullanarak oluşturulan aktif sistem (S5)	29
2.3.6. Kompozit FDM, alüminyum blok, ısı boruları (15cm) ve fan kullanarak oluşturulan aktif sistem (S6)	30
3. BATARYA SICAKLIĞININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ	31
3.1. Hacimsel Isı Kaynağı Modeli (HIKM)	32
3.1.1. Batarya toplam iç direncinin hesaplanması	35
3.1.2. Batarya entropi katsayısının hesaplanması	38
3.1.3. Hacimsel ısı kaynağı modeli denkleminin sayısal çözümü	40
3.1.3.1. Hacimsel ısı kaynağı modelinin 20°C ortam sıcaklığında sayısal çözümü .	46
3.1.3.2. Hacimsel ısı kaynağı modelinin 36°C ortam sıcaklığında sayısal çözümü .	53
3.2. NTGK Modeli	60
3.2.1. 20°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile elde edilen sonuçlar	63
3.2.2. 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile elde edilen sonuçlar	69

4. DENEYSEL ÇALIŞMA	76
4.1. Doğal Taşınımli Sistemin (S1) Deneysel ve Sayısal Sonuçlarının Karşılaştırılması	77
4.1.1. S1 sisteminin 20°C ortam sıcaklığında deneysel ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması	77
4.1.2. S1 sisteminin 36°C ortam sıcaklığında deneysel ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması	79
4.2. FDM ve Alüminyum Blok Kullanarak Oluşturulan Pasif Sistemin (S2) Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması	81
4.2.1. S2 sisteminin 20°C ortam sıcaklığındaki performansı	82
4.2.1.1. S2 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı... 82	
4.2.1.2. S2 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı... 83	
4.2.1.3. S2 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı... 85	
4.2.2. S2 sisteminin 36°C ortam sıcaklığındaki performansı	86
4.2.2.1. S2 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı... 86	
4.2.2.2. S2 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı... 87	
4.2.2.3. S2 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı... 90	
4.3. FDM, Alüminyum Blok ve Isı Boruları Kullanarak Oluşturulan Pasif Sistemin (S3) Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması	93
4.3.1. S3 sisteminin 20°C ortam sıcaklığındaki performansı	93
4.3.1.1. S3 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı... 93	
4.3.1.2. S3 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı... 95	
4.3.1.3. S3 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı... 96	
4.3.2. S3 sisteminin 36°C ortam sıcaklığındaki performansı	97
4.3.2.1. S3 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı... 97	
4.3.2.2. S3 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı... 99	
4.3.2.3. S3 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı. 101	
4.4. Kompozit FDM, Alüminyum Blok ve Isı Boruları Kullanarak Oluşturulan Pasif Sistemin (S4) Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması	104
4.4.1. S4 sisteminin 20°C ortam sıcaklığındaki performansı	104
4.4.1.1. S4 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı. 104	
4.4.1.2. S4 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı. 106	
4.4.1.3. S4 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı. 107	
4.4.2. S4 sisteminin 36°C ortam sıcaklığındaki performansı	108
4.4.2.1. S4 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı. 108	
4.4.2.2. S4 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı. 109	
4.4.2.3. S4 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı. 112	
4.5. Kompozit FDM, Alüminyum Blok, Isı Boruları (17cm) ve Fan Kullanarak Oluşturulan Aktif Sistemin (S5) Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	114
4.5.1. S5 sisteminin 20°C ortam sıcaklığındaki performansı	115
4.5.1.1. S5 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı. 115	
4.5.1.2. S5 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı. 116	
4.5.1.3. S5 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı. 118	
4.5.2. S5 sisteminin 36°C ortam sıcaklığındaki performansı	119
4.5.2.1. S5 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı. 119	
4.5.2.2. S5 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı. 120	
4.5.2.3. S5 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı. 123	
4.6. Kompozit FDM, Alüminyum Blok, Isı Boruları (15cm) ve Fan Kullanarak Oluşturulan Aktif Sistemin (S6) Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	125

4.6.1. S6 sisteminin 20°C ortam sıcaklığındaki performansı	126
4.6.1.1. S6 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı. 126	
4.6.1.2. S6 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı. 128	
4.6.1.3. S6 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı. 130	
4.6.2. S6 sisteminin 36°C ortam sıcaklığındaki performansı	131
4.6.2.1. S6 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı. 131	
4.6.2.2. S6 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı. 133	
4.6.2.3. S6 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı. 136	
4.7. Tüm Sistemlerin 20°C Ortam Sıcaklığındaki Soğutma Performanslarının Karşılaştırılması	139
4.8. Tüm Sistemlerin 36°C Ortam Sıcaklığındaki Soğutma Performanslarının Karşılaştırılması	142
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	147
5.1. Sonuçlar.....	147
5.2. Önerilen Çalışmalar.....	151
KAYNAKLAR	152

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Lityum iyon batarya sistemlerinde şarj ve deşarj durumlarında sıcaklığın etkisi (Url-2, 2022)	2
Şekil 1.2 Silindirik tip lityum iyon batarya yapısı (Linden, 2001).....	4
Şekil 1.3 Farklı tipte lityum iyon bataryaların özgül enerji, özgül güç, güvenlik, fiyat, ömür ve soğuk/sıcak ortamlardaki performansları açısından karşılaştırılması (Url-3, 2024)	5
Şekil 1.4 NMC ($LiNiMnCoO_2$) tip batarya hücresinde anot ve katot reaksiyonları	6
Şekil 1.5 Şarj edilebilir lityum iyon bataryalarda şarj ve deşarj mekanizması.....	6
Şekil 1.6 Batarya soğutma sistemleri ve sınıflandırılması	9
Şekil 1.7 Toyota Prius model araçta kullanılan hava ile batarya soğutma sistemi (Url-4, 2024).....	10
Şekil 1.8 Sıvı soğutmalı batarya sistemi örneği (Url-4, 2024).....	11
Şekil 1.9 Faz değiştiren malzemelerin sınıflandırılması	12
Şekil 1.10 Isı borusu yapısı, bölümleri ve çalışma sistemi.....	13
Şekil 1.11 Isı borusunun iç cidarlarındaki gözenekli yapı.....	14
Şekil 1.12 Termoelektrik modülü çalışma şeması.....	15
Şekil 2.1 Deney düzeneği görseli	24
Şekil 2.2 Doğal taşınımlı referans modül (S1)	25
Şekil 2.3 FDM ve alüminyum blok kullanarak oluşturulan pasif sistem (S2)	26
Şekil 2.4 FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanarak oluşturulan sistem (S3)....	27
Şekil 2.5 Alüminyum blok içine yerleştirilen bakır file yapısı.....	28
Şekil 2.6 Kompozit FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanarak oluşturulan pasif sistem (S4)	28
Şekil 2.7 Kompozit FDM, alüminyum blok, ısı boruları (17cm) ve fan kullanarak oluşturulan aktif sistem (S5).....	29
Şekil 2.8 Kompozit FDM, alüminyum blok, ısı boruları (15cm) ve fan kullanarak oluşturulan aktif sistem (S6).....	30
Şekil 3.1 Silindirik koordinat sistemi	32
Şekil 3.2 30°C Sabit ortam sıcaklığında batarya iç direncinin hesaplanması için yapılan deşarj testi	37
Şekil 3.3 Farklı ortam sıcaklıklarında ve batarya doluluk oranlarında batarya iç direnci, R_i	38
Şekil 3.4 %90 batarya doluluk oranında batarya açık devre voltajının batarya sıcaklığına göre değişimi	39
Şekil 3.5 18650 tip lityum iyon batarya için entropi katsayısının batarya doluluk oranına göre değişimi	39
Şekil 3.6 Ansys Fluent'te modellenen bölge	41
Şekil 3.7 Fluent'te elde edilen mesh yapısı	42
Şekil 3.8 Fluent'te yazılan UDF (kullanıcı tanımlı fonksiyon)	44
Şekil 3.9 Modellenen bölgeye uygulanan sınır koşulları	45
Şekil 3.10 Farklı hücre sayılarına göre batarya maksimum sıcaklık değerleri değişimi	46
Şekil 3.11 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında bataryada birim hacimde Fluent'te HIKM ile elde edilen joule ısı, entropik ısı ve toplam ısı üretiminin zamana göre değişimi	47

Şekil 3.12 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında bataryada birim hacimde Fluent'te HIKM ile elde edilen joule ısı, entropik ısı ve toplam ısı üretiminin zamana göre değişimi	47
Şekil 3.13 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında bataryada birim hacimde Fluent'te HIKM ile elde edilen joule ısı, entropik ısı ve toplam ısı üretiminin zamana göre değişimi	48
Şekil 3.14 1C, 3C ve 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında bataryada birim hacimde Fluent'te HIKM ile elde edilen toplam ısı üretiminin zamana göre değişimi	48
Şekil 3.15 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-1	49
Şekil 3.16 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-2	49
Şekil 3.17 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-3	50
Şekil 3.18 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-1	50
Şekil 3.19 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-2	51
Şekil 3.20 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-3	51
Şekil 3.21 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-1	52
Şekil 3.22 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-2	52
Şekil 3.23 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-3	53
Şekil 3.24 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında bataryada birim hacimde Fluent'te HIKM ile elde edilen joule ısı, entropik ısı ve toplam ısı üretiminin zamana göre değişimi	54
Şekil 3.25 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında bataryada birim hacimde Fluent'te HIKM ile elde edilen joule ısı, entropik ısı ve toplam ısı üretiminin zamana göre değişimi	54
Şekil 3.26 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında bataryada birim hacimde Fluent'te HIKM ile elde edilen joule ısı, entropik ısı ve toplam ısı üretiminin zamana göre değişimi	55
Şekil 3.27 1C, 3C ve 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında bataryada birim hacimde Fluent'te HIKM ile elde edilen toplam ısı üretiminin zamana göre değişimi	55
Şekil 3.28 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-1	56
Şekil 3.29 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-2	56
Şekil 3.30 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-3	57
Şekil 3.31 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-1	57

Şekil 3.55 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-3	73
Şekil 3.56 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-4	73
Şekil 3.57 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-1	74
Şekil 3.58 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-2	74
Şekil 3.59 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-3	75
Şekil 3.60 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-4	75
Şekil 4.1 Doğal taşınımlı referans modül (S1)	77
Şekil 4.2 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında batarya modülünde deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum sıcaklıkların batarya doluluk oranına göre değişimi, T_{maks} (°C)	78
Şekil 4.3 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında batarya modülünde deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum sıcaklıkların batarya doluluk oranına göre değişimi, T_{maks} (°C)	79
Şekil 4.4 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında batarya modülünde deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum sıcaklıkların batarya doluluk oranına göre değişimi, T_{maks} (°C)	79
Şekil 4.5 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında batarya modülünde deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum sıcaklıkların batarya doluluk oranına göre değişimi, T_{maks} (°C)	80
Şekil 4.6 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında batarya modülünde deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum sıcaklıkların batarya doluluk oranına göre değişimi, T_{maks} (°C)	81
Şekil 4.7 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında batarya modülünde deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum sıcaklıkların batarya doluluk oranına göre değişimi, T_{maks} (°C)	81
Şekil 4.8 FDM ve alüminyum blok kullanarak oluşturulan pasif sistem (S2)	82
Şekil 4.9 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	83
Şekil 4.10 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	83
Şekil 4.11 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	84
Şekil 4.12 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	84
Şekil 4.13 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	85
Şekil 4.14 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	86
Şekil 4.15 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	87

Şekil 4.16 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	87
Şekil 4.17 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	88
Şekil 4.18 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	88
Şekil 4.19 S2 sisteminde 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi	90
Şekil 4.20 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	91
Şekil 4.21 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	91
Şekil 4.22 S2 sisteminde 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi	92
Şekil 4.23 FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanarak oluşturulan sistem (S3)..	93
Şekil 4.24 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	94
Şekil 4.25 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	94
Şekil 4.26 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	95
Şekil 4.27 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	96
Şekil 4.28 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	96
Şekil 4.29 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	97
Şekil 4.30 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	98
Şekil 4.31 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	98
Şekil 4.32 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	99
Şekil 4.33 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	100
Şekil 4.34 S3 sisteminde 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi	101
Şekil 4.35 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	102
Şekil 4.36 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	102
Şekil 4.37 S3 sisteminde 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi	103

Şekil 4.38 Kompozit FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanarak oluşturulan pasif sistem (S4)	104
Şekil 4.39 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	105
Şekil 4.40 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	105
Şekil 4.41 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	106
Şekil 4.42 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	107
Şekil 4.43 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	107
Şekil 4.44 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	108
Şekil 4.45 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	108
Şekil 4.46 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	109
Şekil 4.47 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	110
Şekil 4.48 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	110
Şekil 4.49 S4 sisteminde 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi	111
Şekil 4.50 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	112
Şekil 4.51 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	112
Şekil 4.52 S4 sisteminde 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi	113
Şekil 4.53 Kompozit FDM, alüminyum blok, ısı boruları (17cm) ve fan kullanarak oluşturulan aktif sistem (S5)	115
Şekil 4.54 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	116
Şekil 4.55 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	116
Şekil 4.56 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	117
Şekil 4.57 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	117
Şekil 4.58 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)	118
Şekil 4.59 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)	118

Şekil 4.60 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C).....	119
Şekil 4.61 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C).....	120
Şekil 4.62 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C).....	121
Şekil 4.63 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C).....	121
Şekil 4.64 S5 sisteminde 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi.....	122
Şekil 4.65 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C).....	123
Şekil 4.66 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C).....	123
Şekil 4.67 S5 sisteminde 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi.....	124
Şekil 4.68 Kompozit FDM, alüminyum blok, ısı boruları (15cm) ve fan kullanarak oluşturulan aktif sistem (S6).....	125
Şekil 4.69 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C).....	126
Şekil 4.70 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C).....	126
Şekil 4.71 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C).....	128
Şekil 4.72 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C).....	129
Şekil 4.73 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C).....	130
Şekil 4.74 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C).....	130
Şekil 4.75 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C).....	132
Şekil 4.76 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C).....	132
Şekil 4.77 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C).....	133
Şekil 4.78 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C).....	134
Şekil 4.79 S6 sisteminde 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi.....	136
Şekil 4.80 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C).....	136
Şekil 4.81 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C).....	137

Şekil 4.82 S6 sisteminde 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi.....	139
Şekil 4.83 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C).....	139
Şekil 4.84 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C).....	140
Şekil 4.85 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C).....	140
Şekil 4.86 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C).....	141
Şekil 4.87 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C).....	141
Şekil 4.88 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C).....	142
Şekil 4.89 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C).....	143
Şekil 4.90 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C).....	143
Şekil 4.91 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C).....	144
Şekil 4.92 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C).....	144
Şekil 4.93 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C).....	145
Şekil 4.94 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C).....	145

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Bataryanın termal, fiziksel ve elektriksel özellikleri	22
Çizelge 2.2 Batarya modülünün elektriksel özellikleri	23
Çizelge 2.3 Batarya modülüne uygulanan testler ve voltaj değerleri.....	24
Çizelge 2.4 Seçilen FDM'nin termofiziksel özellikleri	26
Çizelge 3.1 Entropi katsayısının batarya doluluk oranına göre değişimi.....	39
Çizelge 3.2 Bataryanın termal ve fiziksel özellikleri	40
Çizelge 3.3 Sayısal modellemede kullanılan konfigürasyonlar	42
Çizelge 3.4 Başlangıç ve sınır koşulları.....	43
Çizelge 3.5 Sayısal modellemede kullanılan yakınsama değerleri ve iterasyon sayısı.....	45
Çizelge 3.6 Farklı hücre sayılarında elde edilen batarya maksimum sıcaklık değerleri	46
Çizelge 3.3 NTGK modelinde kullanılan parametreler	63
Çizelge 3.4 NTGK modelinde kullanılan hücre malzemesi özellikleri	63
Çizelge 3.5 NTGK modelinde kullanılan kutup malzemesi özellikleri	63
Çizelge 4.1 Tasarlanan tüm sistemler	76
Çizelge 4.2 S5 ve S6 sistemlerinde kullanılan ısı borusu özellikleri	127
Çizelge 4.3 S5 ve S6 sistemlerinde 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında oluşan maksimum ısı ve sıcaklık farkı değerleri.....	128
Çizelge 4.4 S5 ve S6 sistemlerinin 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında oluşan maksimum ısı ve sıcaklık farkı değerleri.....	129
Çizelge 4.5 S5 ve S6 sistemlerinin 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında oluşan maksimum ısı ve sıcaklık farkı değerleri.....	131
Çizelge 4.6 S5 ve S6 sistemlerinin 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında oluşan maksimum ısı ve sıcaklık farkı değerleri.....	133
Çizelge 4.7 S5 ve S6 sistemlerinin 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında oluşan maksimum ısı ve sıcaklık farkı değerleri.....	134
Çizelge 4.8 S5 ve S6 sistemlerinin 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında oluşan maksimum ısı ve sıcaklık farkı değerleri.....	137
Çizelge 4.9 Her bir sistemde 20°C ortam sıcaklığında görülen maksimum yüzey sıcaklık değerleri ve maksimum sıcaklık farkı değerleri	142
Çizelge 4.10 Her bir sistemde 36°C ortam sıcaklığında görülen maksimum yüzey sıcaklık değerleri ve maksimum sıcaklık farkı değerleri	146

SİMGELER DİZİNİ

V_{oc}	Batarya Açık Devre Voltajı, V
V	Batarya Voltajı, V
V_{cut}	Batarya Kesme Voltajı, V
$Q_{nominal}$	Batarya Nominal Kapasitesi, Ah
Q_{ref}	Deşarj testlerine tabi tutulan batarya kapasitesi, Ah
Q_{kalan}	Bataryada kullanım sonrası kalan kapasite, Ah
Q_{max}	Bataryanın o andaki tam kapasitesi, Ah
SOC	Batarya Doluluk Oranı
DOD	Batarya Deşarj Derinliği
SOH	Batarya Sağlık Durumu
C	Şarj/deşarj hızı
I	Şarj/Deşarj akımı, A
ρ	Batarya yoğunluğu, kg/m ³
C_p	Batarya özgül ısısı, J/kgK
T	Sıcaklık, K
t	Zaman, sn
k_r, k_ϕ ve k_z	Bataryanın silindirik koordinatlarda r, ϕ ve z yönündeki ısı iletim katsayıları, W/mK
\dot{q}_{gen}	Bataryanın birim hacimdeki ısı üretimi, W/m ³
$\frac{dV_{oc}}{dT}$	Entropi katsayısı, V/K
∇	Batarya hücreninin hacmi, m ³
R	Batarya iç direnci, Ω
R_{omik}	Bataryanın omik direnci, Ω
R_{YT}	Batarya içindeki yük transfer direnci, Ω
R_{dif}	Difüzyon (konstrasyon veya polarizasyon direnci) direnci, Ω
$R_{ısıl}$	Isı Borusu Isıl Direnci, K/W
ΔV_{omik}	Omik direnç nedeniyle voltaj değişimi, V
ΔV_{YT}	Yük transferi direnci nedeniyle voltaj değişimi, V
ΔV_{dif}	Difüzyon direnci nedeniyle oluşan voltaj değişimi, V
ΔV_{toplam}	Toplam voltaj değişimi, V
k_{eff}	Isı borusu efektif ısı transfer katsayısı, W/mK
L_{eff}	Isı borusu efektif uzunluğu, m
A_{hp}	Isı borusu kesit alanı, m ²
ΔT	Sıcaklık farkı, K
Ra	Rayleigh sayısı
g	Yerçekimi ivmesi m/s ²
β	Genleşme katsayısı, 1/K
ν	Kinematik vizkozite, m ² /s
μ	Dinamik vizkozite, kg/ms
α	Isı yayılım katsayısı, m ² /s
u	Hız, m/s
Pr	Prandtl Sayısı
p	Basınç, N/m ²

KISALTMALAR DİZİNİ

BTYS	: Batarya Termal Yönetim Sistemleri
FDM	: Faz Değiştiren Malzeme
ECM	: Eşdeğer devre modeli
NTGK	: Newman, Tiedemann, Gu ve Kim (NTGK) modeli
HPPC	: Hibrit puls güç karakterizasyon testleri
EIS	: Elektrokimyasal empedans spektroskopisi testi
DC	: Doğru Akım
AC	: Alternatif Akım
UDF	: Kullanıcı tarafından tanımlanan fonksiyon
MSMD	: Çok ölçekli ve çok boyutlu yöntem
NMC	: Lityum nikel manganez kobalt oksit bileşimli batarya
LFP	: Lityum demir fosfat bileşimli batarya
NCA	: Lityum nikel kobalt alüminyum oksit bileşimli batarya
LCO	: Lityum kobalt oksit bileşimli batarya
LMO	: Lityum manganez oksit bileşimli batarya
LTO	: Lityum titanyum oksit bileşimli batarya
P2D	: Pseudo-2D modeli
3S3P	: 3 seri ve 3 paralel bağlantı
HIKM	: Hacimsel Isı Kaynağı Modeli

1. GİRİŞ

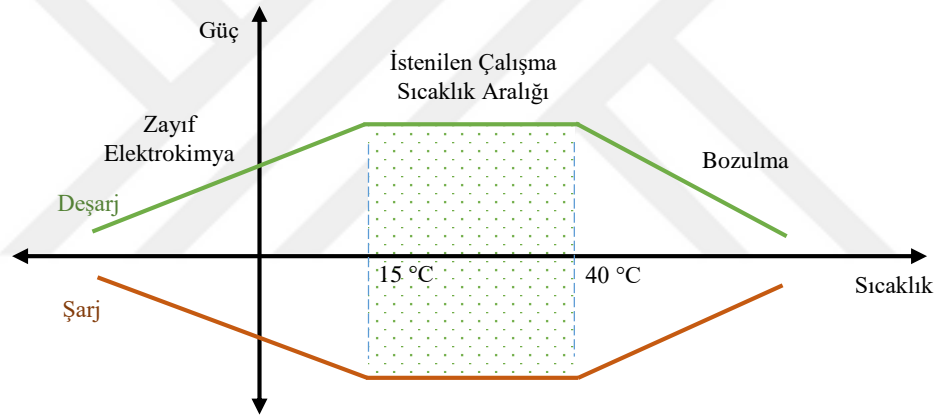
Dünya nüfusunun zamanla artmasıyla hem gıda hem de enerji kaynaklarında kısıtlılık oluşmakta ve mevcut kaynaklar kâfi gelmemekte, kaynaklardaki kısıtlılık ise insanlığın ihtiyaçları için farklı alternatif arayışlarına yol açmaktadır. Bilim insanları 21. yüzyılda gıda ve enerji kaynaklarının yetersiz kalmaya başlaması, yeni fosil kaynakların bulunamaması ve rezervlerin azalması nedeniyle farklı enerji kaynaklarını kullanabilen ve depolayabilen daha etkin ve çevre dostu alet ve araçları araştırmaya yönelmiştir (Torun ve Buyruk, 2023). Bu araştırmalardan biri olan elektrikli araç çalışmaları bilhassa son yıllarda önem kazanmıştır. Özellikle son on yılda elektrikli araç pazarı hızla büyümekte olup 2018 yılında dünyadaki elektrikli araç stoku 2017 yılına göre %63'lük bir artış göstermiş ve 5 milyonu aşmıştır (Url-1, 2022).

Elektrikli araçlar ihtiyacı olan elektrik enerjisini bünyesinde bulundurduğu batarya sistemlerinden alırlar. Batarya, şebekeden beslendikten sonra elektrikli aracın motorunun ihtiyacı olan gerilim ve akım değerlerini karşılayarak motora enerji sağlayarak aracın hareket etmesini sağlar. Elektrikli araçlarda değişik tiplerde şarj edilebilen batarya sistemleri kullanılmakta olup nikel-kadmiyum tip bataryalar, nikel-metal hidrit tip bataryalar, kurşun- asit tip bataryalar ve lityum iyon tip bataryalar bu batarya sistemlerinden bazılarıdır. Bu batarya çeşitleri arasında lityum iyon bataryalar, uzun pil ömrü, düşük kendinden boşalma hızı, yüksek enerji depolama yoğunluğu ve hafifliğinden dolayı diğer batarya çeşitlerine göre daha uygun ve verimli olduğu anlaşılmıştır (Etacheri vd., 2011). Lityum iyon bataryalar bu avantajlarına rağmen yüksek ısı üretimi, sıcaklığa göre değişen performans ve aşırı şarj gibi bazı dezavantajlara sahiptir (Maleki ve Howard, 2006; Belov ve Yang, 2008).

Lityum iyon bataryalar kullanımları sonrası şarj olurken veya kullanımları esnasında deşarj edilirken batarya içindeki reaksiyonlardan ve batarya iç direncinden dolayı yüksek düzeyde ısı enerjisi açığa çıkarırlar. Oluşan bu ısı üretimi batarya sıcaklığının artmasına ve artan sıcaklık ise batarya veriminin düşmesine neden olur.

Araştırmalara göre bataryalardan maksimum fayda sağlayabilmek için batarya hücre sıcaklığının Şekil 1.1'de gösterildiği gibi (15°C) - (40°C) aralığında tutulması gerekmektedir (Pesaran, 2001; Jouhara vd., 2019; Ramadass vd., 2022; Url-2, 2022). Diğer bir yandan batarya modülü içindeki maksimum sıcaklık farkının 5°C altında olması

batarya modülünden yüksek verim alabilmek ve batarya ömrünü uzun tutabilmek için büyük önem arz etmektedir (Pesaran, 2002; Park, 2003; Mahamud, 2011; Greco, 2015; Rao, 2017; Wu, 2019). Motloch vd. (2002) batarya sıcaklığının izin verilen çalışma sıcaklığı üzerindeki her 1°C artışının batarya ömrünün yaklaşık olarak 2 ay kısalmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. 45°C gibi yüksek ortam sıcaklıklarında eğer batarya modülünde üretilen ısı hızlı ve etkin bir şekilde modülden uzaklaştırılmaz ise bataryada oluşan yüksek sıcaklık batarya ömrünün hızlı bir şekilde azalmasına ve termal kaçaklar gibi güvenlik problemlerine neden olmaktadır (Yang vd., 2020; Fan vd., 2013; Sabbah vd., 2008). Wilke vd. (2017) bataryada fazla ısı birikmesinin bir dizi kimyasal reaksiyonu tetikleyeceğini ve batarya sıcaklığında ilave bir artışa neden olarak patlamalara neden olabileceğini ifade etmişlerdir. Diğer bir yandan, eğer batarya hücrelerinin sıcaklığı 80-100°C'ye ulaşırsa termal kaçak süreci tetiklenerek bataryada patlama riski oluşmaktadır (Bandhauer vd., 2011).



Şekil 1.1 Lityum iyon batarya sistemlerinde şarj ve deşarj durumlarında sıcaklığın etkisi (Url-2, 2022)

Bu bakımdan batarya sıcaklığının doğru şekilde ölçülebilmesi ve gerektiğinde müdahale edilebilmesi sistemin verimli ve güvenli çalışması açısından oldukça önemlidir. Dolayısıyla batarya sistemi termal olarak yönetilmeli ve belirli sıcaklık değerinin üzerine çıkılmasına izin verilmemelidir. Bu amaç doğrultusunda bataryaları optimum sıcaklık aralığında tutabilmek için kullanılan sistemlere batarya termal yönetim sistemleri (BTYS) denir. Batarya termal yönetim sistemlerinin modül ısıtma ve modül soğutma şeklinde iki ana işlevi vardır. Batarya termal yönetim sistemleri soğuk havalarda batarya modülünü ısıtarak bataryaları istenen çalışma sıcaklık aralığına getirirken, sıcak havalarda veya şarj/deşarj işlemi esnasında batarya modülünün sıcaklığının aşırı artması durumunda modül sıcaklığını düşürerek bataryaların optimum sıcaklık aralığında çalışmasını ve

böylece bataryaların maksimum verimde çalışmalarını ve uzun ömürlü olmalarını sağlar. Bu çalışmada batarya termal yönetim sistemlerinin ana işlevlerinden biri olan ve özellikle yüksek güç gereksiniminde veya yüksek ortam sıcaklıklarında gerekli olan soğutma işlevi araştırılmıştır.

Bu kapsamda, alüminyum malzemedeki farklı bir blok tasarımı yapılmış, bataryalar bu blok içerisindeki batarya yuvalarına yerleştirilmiştir. Söz konusu blok hem faz değiştiren malzemeyi (FDM) içinde barındıracak şekilde hazneli hem de bataryalarda üretilen ve blokta biriken ısıyı blok dışına ısı boruları ile atacak şekilde kanallı olarak tasarlanmıştır. Ayrıca bataryaların yüksek ısı üreterek FDM'yi eritmesi durumunda sızıntı ve hacimsel genişleme problemlerini engellemek için esnek ve demonte edilebilir bir kapak tasarlanmıştır.

Farklı bir şekilde tasarlanan ve silindirik 9 adet 18650 tipindeki lityum iyon bataryadan oluşan bu modül, modüle faz değiştiren malzeme ve ısı borusu eklenmesi suretiyle farklı deşarj hızlarında ve farklı ortam sıcaklıklarında deneysel düzenekler kurularak sistemlerinin soğutma performansları test edilmiştir.

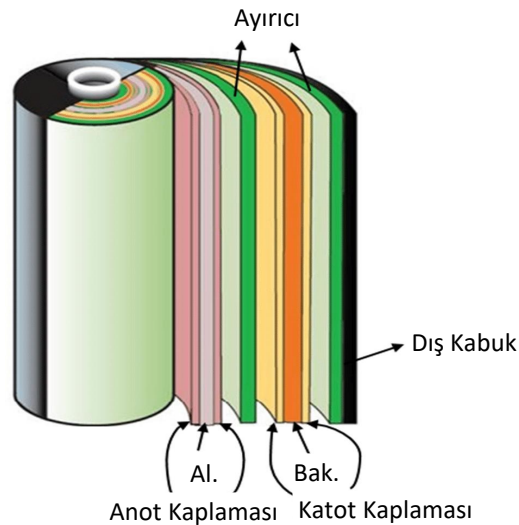
İlk olarak sadece bataryaların olduğu ve ilave hiçbir ekipman veya malzemenin olmadığı doğal taşınımlı durum referans sistem olarak alınmış, sonrasında sırasıyla sisteme faz değiştiren malzeme ve alüminyum blok, ısı boruları ve ikinci alüminyum blok, kompozit faz değiştiren malzeme, kanatçık, fan ve farklı uzunlukta ısı boruları eklenerek oluşturulan toplam 6 farklı tasarım kurulan deney düzeneğinde test edilmiştir. Deşarj hızı olarak normal deşarj hızı olan 1C ve ani hızlanmalarda ve yüksek güç gereksinimlerinde gerekli olan 3C ve 5C deşarj hızları seçilmiştir. Test edilecek batarya tipleri de bu deşarj hızlarına uyumlu olacak ve yüksek güç gereksinimlerinde oldukça iyi performans sergileyecek şekilde seçilmiştir. Ortam sıcaklıkları olarak ise genel çalışma sıcaklığı olan 20°C ve özellikle sıcaklığın arttığı yaz aylarındaki batarya performansını da değerlendirmek üzere 36°C olmak üzere iki farklı sıcaklık değeri seçilmiştir. Tasarlanan 6 farklı sistem hem 20°C hem de 36°C sabit ortam sıcaklığında ve 1C, 3C ve 5C deşarj hızlarında batarya tamamen boşalınca kadar test edilmiş ve batarya modülünde oluşan maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları kayıt altına alınmış ve tasarlanan sistemlerin hem doğal taşınımlı referans sisteme göre hem de kendi aralarındaki soğutma performansı incelenmiştir.

Ayrıca doğal taşınımı sistem Ansys programı Fluent modülünde sayısal olarak hacimsel ısı kaynağı (HIKM) modeli ve Newman, Tiedemann, Gu, and Kim (NTGK) modeli olmak üzere iki farklı yöntem ile modellenerek elde edilen sayısal sonuçlar, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve böylece oluşturulan sayısal modellerin hem 1C, 3C ve 5C olmak üzere farklı deşarj hızlarında hem de 20°C ve 36°C olmak üzere farklı ortam sıcaklıklarında deneysel verilere göre uygunlukları incelenmiştir.

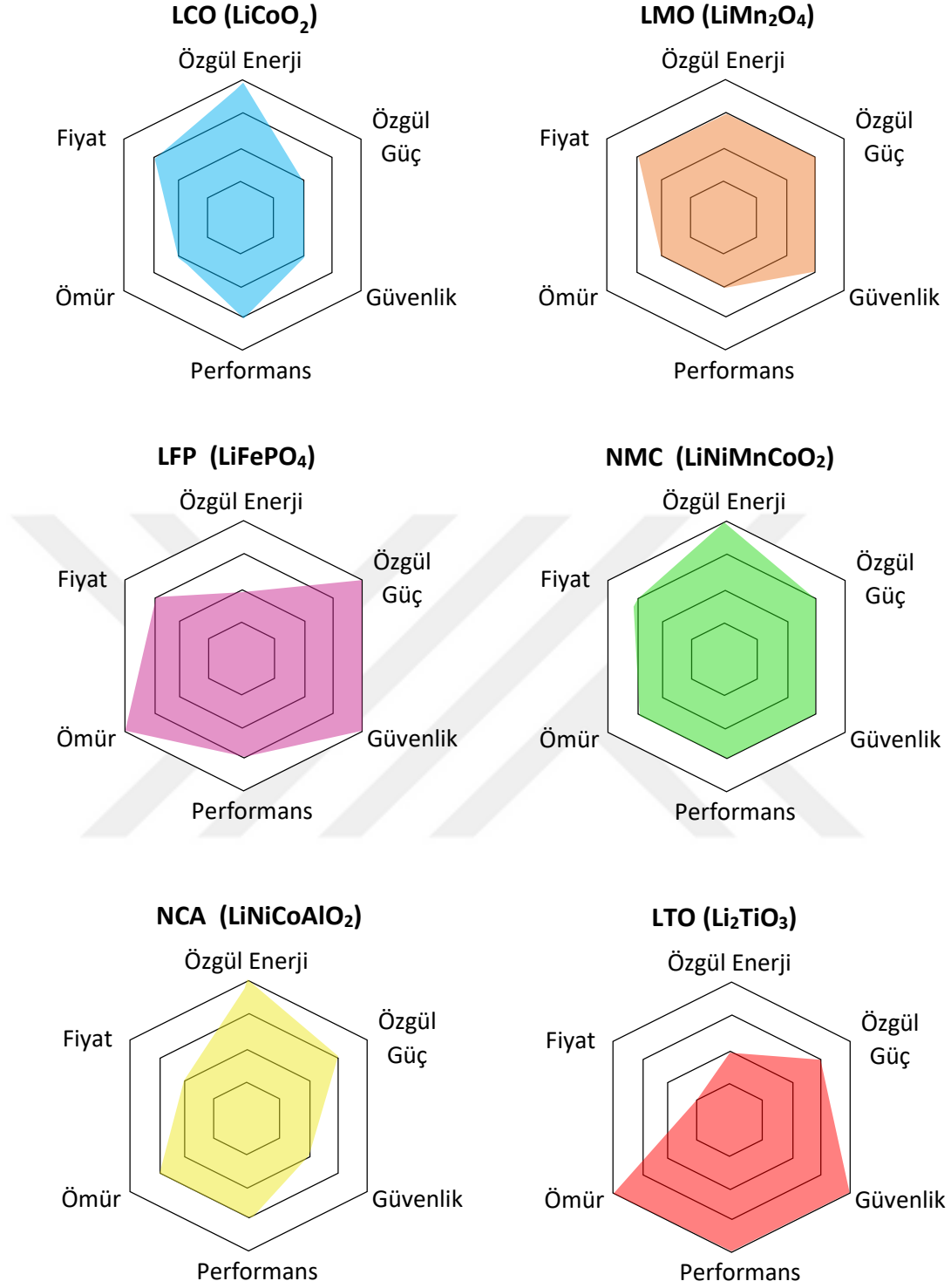
1.1. Lityum İyon Bataryalar

Lityum-iyon bataryalar, pozitif ve negatif malzemeler olarak lityum ara katman bileşiklerini kullanan hücrelerden oluşur (Linden, 2001). Tasarım olarak kullanım yerlerine göre silindirik, prizmatik, kese veya düğme şeklinde üretilebilirler. Lityum iyon bataryalar Şekil 1.2’de gösterildiği üzere metal ceket içerisine pozitif ve negatif elektrot levhalar, elektrolit ve ayırıcıdan oluşan katmanlı bir yapıya sahiptir.

Bataryalarda pozitif elektrot katot, negatif elektrot ise anot olarak adlandırılır. Pozitif elektrot malzemesi genellikle alüminyum folyo üzerinde katmanlı bir yapıya sahip lityum kobalt oksit veya tünelli bir yapıya sahip lityum mangan oksit gibi metal oksitlerdir. Negatif elektrot malzemesi ise genellikle bakır üzerinde karbon içeren bileşiklerdir. Bileşenlerden bir diğeri olan elektrolit ise batarya içerisinde elektrotlar arasındaki iyon transferini sağlamaktadır. Diğer bir bileşen ayırıcı ise bir yandan artı ve eksi elektrotları birbirinden ayırarak ve sadece lityum iyonların geçişine izin verirken diğer bir yandan anot ve katot uçlar arasında kısa devre oluşmasını önlemek üzere yalıtkan bir tabaka olarak görev yapmaktadır (Linden, 2001).



Şekil 1.2 Silindirik tip lityum iyon batarya yapısı (Linden, 2001)



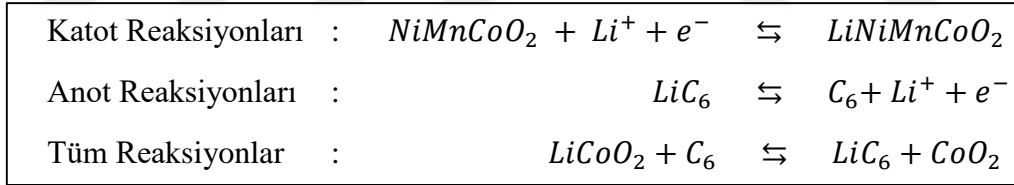
Şekil 1.3 Farklı tipte lityum iyon bataryaların özgül enerji, özgül güç, güvenlik, fiyat, ömür ve soğuk/sıcak ortamlardaki performansları açısından karşılaştırılması (Url-3, 2024)

Lityum iyon bataryalar genellikle pozitif elektrot üzerindeki kaplama malzemesine göre adlandırılmakta olup birçok çeşit lityum iyon batarya mevcuttur. Pozitif elektrot üzerindeki bu malzeme aynı zamanda bataryanın özgül enerjisini, özgül gücünü, batarya

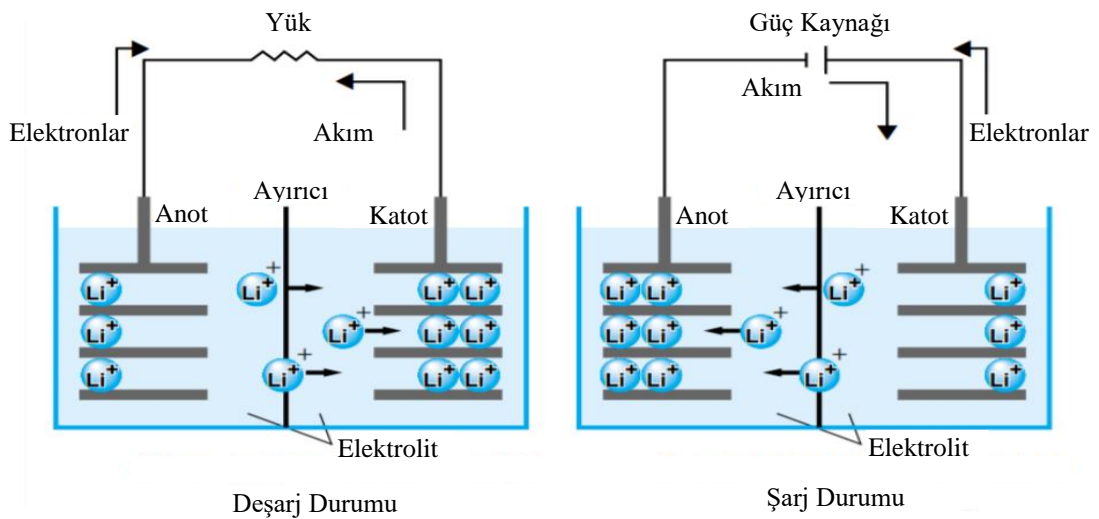
ömrünü, fiyatını, güvenliğini ve performansını belirlemektedir. Ticari olarak en çok kullanılan lityum iyon bataryalar lityum nikel manganez kobalt oksit bileşimli NMC, lityum nikel kobalt alüminyum oksit bileşimli NCA, lityum demir fosfat bileşimli LFP, lityum kobalt oksit bileşimli LCO, lityum manganez oksit bileşimli LMO ve lityum titanyum oksit bileşimli LTO tip bataryalardır. Şekil 1.3'te lityum iyon bataryaların özgül enerjisi, özgül gücü, batarya ömrü, fiyatı, güvenliği ve performansına göre avantajları ve dezavantajları verilmiş olup kullanım yerine göre en uygun batarya tipi seçilebilir (Url-3, 2024).

1.1.1. Lityum iyon bataryalarda gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar

Lityum iyon bataryaların şarj edilmesi veya deşarj edilmesi esnasında elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle lityum iyonları (Li^+) anotlar ve katotlar arasında hareket eder (Wikner, 2017). Bir Lityum iyon pil şarj edildiğinde pozitif malzeme yükseltgenir ve negatif malzeme indirgenir. Bu süreçte lityum iyonları Şekil 1.4'te gösterildiği gibi pozitif malzemeden ayrıştırılır ve negatif malzemeye eklenir. Bu prosesin tam tersi deşarj esnasında meydana gelir. Şekil 1.4'te batarya hücresindeki elektrotlarda şarj ve deşarj durumlarında gerçekleşen tüm reaksiyonlar gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 1.5'de bataryalardaki şarj ve deşarj mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 1.4 NMC ($LiNiMnCoO_2$) tip batarya hücresinde anot ve katot reaksiyonları



Şekil 1.5 Şarj edilebilir lityum iyon bataryalarda şarj ve deşarj mekanizması

1.1.2. Batarya terminolojisi

Batarya Modülü: Gerekli güç ve kapasiteyi karşılamak üzere birden fazla batarya hücresi ile oluşturulan yapıyı ifade eder. Batarya hücreleri seri, paralel ya da seri ve paralel bağlantı kombinasyonları ile bağlanarak istenen kapasite ve güçte batarya modülü elde edilebilir.

Batarya Açık Devre Voltajı (V_{oc}): Bataryanın herhangi bir devreye bağlanmadığı durumda pozitif ve negatif terminalleri arasında okunan voltaj değerini ifade eder.

Batarya Voltajı (V): Batarya yüke bağlandığı durumda pozitif ve negatif terminalleri arasında okunan voltaj değerini ifade eder.

Batarya Kesme Voltajı (V_{cut}): Bataryanın izin verilir minimum voltajını ifade eder. Batarya deşarj işlemi batarya kesme voltajı değerine ulaşıncaya kadar devam eder ve bu değere ulaştığında batarya tamamen boşalmış olur.

Batarya Nominal Kapasitesi ($Q_{nominal}$): Bataryanın %100 doluluk oranından kesme voltajına kadar 1 saatte sağlamış olduğu akım değeri olarak ifade edilebilir. Birimi Ah (amper saat)' tir.

Batarya Doluluk Oranı (SOC): Bataryanın boş ve dolu durumlarına göre şarj durumunu ifade eder. Batarya tamamen boşken SOC değeri 0 iken batarya tamamen dolduğunda bu değer 1 olarak ifade edilir. Pratikte bu oran yüzdesel olarak kullanılır. Batarya doluluk oranı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir. Denklemden $i(t)$ akım değerini (A), t zamanı (h), $Q_{nominal}$ ise batarya nominal kapasitesini (Ah) ifade etmektedir.

$$SOC = 1 - \frac{\int_0^t i(t).dt}{Q_{nominal}} \quad [1.1]$$

Sabit akımdaki şarj/deşarj işlemlerinde akım değeri integral dışına alınarak denklem aşağıdaki formda kullanılabilir.

$$SOC = 1 - \frac{i.t}{Q_{nominal}} \quad [1.2]$$

Burada t bataryanın deşarj işleminde kesme voltajına ulaşıncaya kadar geçen zamanı ifade eder. Bu durumda batarya kesme voltajına ulaşıncaya batarya doluluk oranı sıfır olacaktır. Sabit akımlı deşarj işleminde batarya kapasitesi ($Q_{nominal}$) akım değeri ile

kesme voltajına ulaşıldığı andaki sürenin çarpımına eşittir. Akımın sabit olması durumunda bataryada kalan kapasite (Q_{kalan}) aşağıdaki formül ile bulunabilir.

$$Q_{kalan} = Q_{nominal} - i \cdot t \quad [1.3]$$

Batarya doluluk oranı aynı zamanda kalan kapasiteye göre aşağıdaki formül ile de hesaplanabilir.

$$SOC = \frac{Q_{kalan}}{Q_{nominal}} \quad [1.4]$$

Batarya Deşarj Derinliği (DOD): Bataryanın kullanılan kapasitesinin nominal kapasitesine göre oranını gösteren bir değerdir. Batarya tamamen boşken *DOD* değeri 1 iken batarya tamamen dolduğunda bu değer 0 olarak ifade edilir. *SOC* değerine benzer bir şekilde pratikte *DOD* oranı da yüzdesel olarak kullanılır.

Batarya Sağlık Durumu (SOH): *SOH* değeri bataryanın o andaki tam kapasitesinin (Q_{maks}), nominal kapasitesine oranını gösteren bir değerdir. Hiç kullanılmamış ve yeni bataryalarda batarya maksimum kapasitesi batarya nominal kapasitesine eşit olduğu için bu değer 1 olup batarya kullanıldıkça bu değer zamanla azalır.

$$SOH = \frac{Q_{maks}}{Q_{nominal}} \quad [1.5]$$

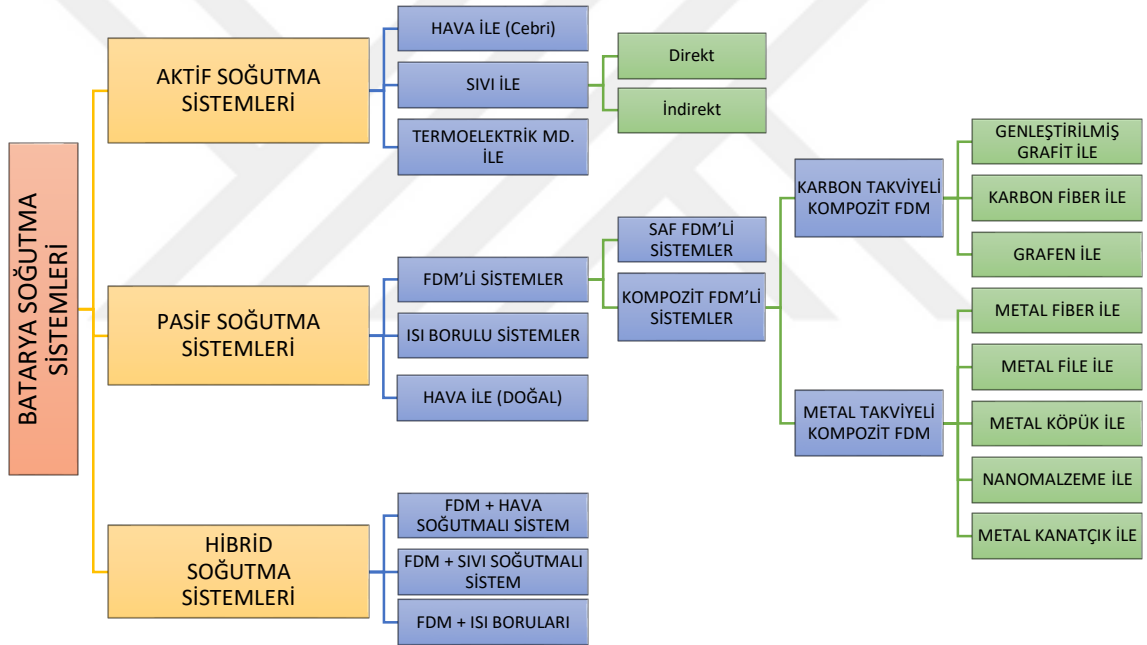
C Değeri: Şarj veya deşarj durumunda bataryanın nominal akımının kaç katının kullanılacağını gösteren bir değerdir. Örneğin 1C deşarj hızı deşarj işleminin batarya nominal akımı ile aynı hızda, 3C deşarj hızı ise deşarj işleminin batarya nominal akımının 3 katı kadar hızda gerçekleşeceğini ifade eder. *C* değeri aynı zamanda batarya deşarj süresini de belirlemektedir. 1C deşarj hızında batarya 60 dakikada deşarj edilirken, 3C deşarj hızında bu süre 20 dakika, 5C deşarj hızında ise bu süre 12 dakikadır. Dolayısıyla deşarj süresi bataryanın 1C deşarj hızındaki deşarj süresi olan 60 dakikanın deşarj hızına bölünmesi ile bulunabilir.

1.2. Batarya Soğutma Sistemleri

Batarya soğutma sistemleri bataryanın en yüksek verimde çalışabilmesi, ömrünün uzun olabilmesi ve can ve mal kaybına neden olmaması için ana işlev olarak bataryada oluşan ısının hızlı bir şekilde dış ortama atılmasını ve batarya içerisindeki sıcaklığın üniform

olarak dağıtılması görevlerini karşılayan sistemlerdir. Batarya modüllerinin soğutulmasında gereksinimlere göre hava, sıvı, faz değiştiren malzemeler, ısı boruları, termoelektrik modül veya bunların kombinasyonları kullanılabilir.

Batarya modülünde oluşan ısı eğer dışarıdan enerji kullanılmadan dış ortama atılıyorsa bu sistemlere pasif soğutma sistemleri, ısı eğer dışarıdan enerji kullanılarak dış ortama atılıyorsa bu sistemlere aktif soğutma sistemleri denir. Birden fazla aktif ya da pasif soğutma sisteminin beraber kullanılması ile oluşturulan sistemlere ise hibrit soğutma sistemleri denir. Eğer hibrit bir sistemi oluşturan alt sistemlerden en az biri de aktif bir sistem ise hibrit sistem de aktif olarak, alt sistemlerde herhangi bir aktif sistem kullanılmamışsa hibrit sistem pasif olarak nitelendirilir. Şekil 1.6'da batarya soğutma sistemleri ve sınıflandırılması ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

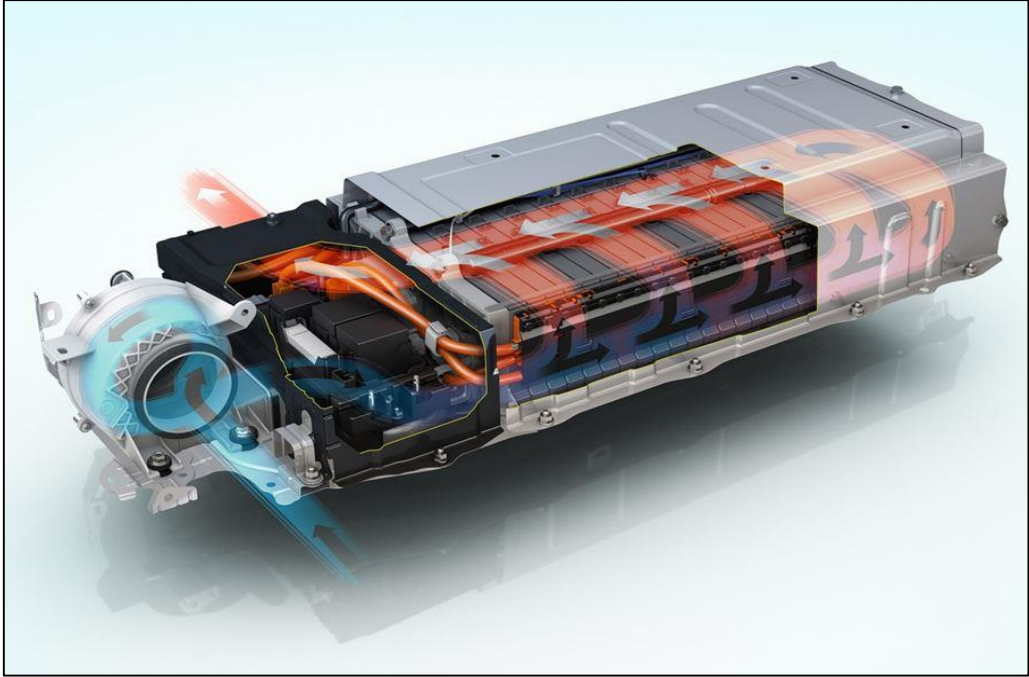


Şekil 1.6 Batarya soğutma sistemleri ve sınıflandırılması

Pasif soğutma sistemlerine; doğal taşınım ile batarya soğutma, ısı borusu kullanarak batarya soğutma ve faz değiştiren malzemeler (FDM) kullanılarak oluşturulan batarya soğutma sistemleri örnek gösterilebilir. Aktif soğutma sistemlerine ise hava ile zorlanmış taşınımlı batarya soğutma sistemi, sıvı ile batarya soğutma sistemi ve termoelektrik malzeme kullanarak batarya soğutma sistemleri örnek gösterilebilir. Hibrit soğutma sistemlerine ise FDM ve hava ile zorlanmış taşınımlı batarya soğutma sistemi, FDM ve sıvı ile batarya soğutma sistemi, FDM ve ısı borulu sistem ve bu sistemlerin farklı kombinasyonları örnek gösterilebilir.

1.2.1. Hava ile batarya soğutma sistemleri

Batarya soğutma sistemleri arasında en basit, en düşük maliyetli, en hafif, sızıntı problemi olmayan ve kolay bakım fırsatı sunan sistemlerdir. Bu avantajlarının yanı sıra batarya modülünde üretilen ısıyı tamamen dış ortama atamayıp batarya modülü sıcaklığını istenilen oranda düşüremediklerinden dolayı yüksek ortam sıcaklıklarında, büyük ebatlardaki batarya modüllerinde ve yüksek şarj/deşarj hızlarında kullanımı uygun değildir (Wu, 2019; Deng, 2018). Bu nedenle hava ile soğutma sistemlerine daha iyi soğutma performansı sergileyebilmesi için batarya hücrelerinin konfigürasyonu veya batarya modülünün geometrisi optimize edilerek ilave fan, kanatçıklar ve hava kanalları eklenebilir. Hava ile batarya soğutma yöntemi genel olarak doğal taşınımlı batarya soğutma sistemi ve zorlanmış taşınımlı batarya soğutma sistemi olmak üzere iki ayrı başlıkta incelenebilir. Şekil 1.7’ de Toyota Prius Model araçta kullanılan hava ile zorlanmış taşınımlı batarya soğutma sistemi gösterilmiştir (Url-4, 2024).

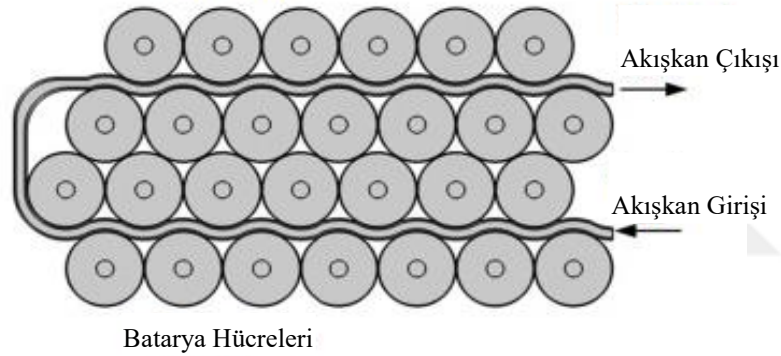


Şekil 1.7 Toyota Prius model araçta kullanılan hava ile batarya soğutma sistemi (Url-4, 2024).

1.2.2. Sıvı ile batarya soğutma sistemleri

Sıvı ile batarya soğutma sistemleri, hava ile batarya soğutma sistemlerine göre daha etkin bir soğutma performansı sergiler. Ancak sıvı ile soğutma sistemi içerisinde bulunan pompa ve gerekli diğer tesisat malzemeleri nedeniyle hem daha pahalı hem de bakım ve onarım maliyetleri daha yüksektir. Ayrıca kullanılan sıvı sızıntılara ve elektriksel

kaçaklara neden olabilmektedir. Bu soğutma yönteminde soğutucu sıvı ve batarya modülü direkt veya indirekt temasta olabilir. Direkt soğutma yönteminde batarya modülü direkt olarak soğutucu sıvı içine konularak soğutma işlemi gerçekleşir. Bu durumda soğutucunun iyi bir soğutma performansı için termal olarak iyi bir iletken olması beklenirken güvenlik açısından elektriksel olarak da iyi bir yalıtkan olması gerekmektedir. İndirekt soğutma yöntemi ise batarya modülü çevresindeki borulardan ya da batarya modülü ile temas halindeki soğuk plaka içindeki kanallardan akışkanın geçirilmesiyle yapılır. Soğutucu sıvı olarak su (Basu, 2016), deiyonize su (Gou, 2019a), etilen glikol ve su karışımı (Jarrett, 2011), mineral yağ (Hosseinzadeh, 2017), sıvı metal (Yang, 2016), Al_2O_3 su nanoakışkanı (Huo, 2015) vb. kullanılabilir. Şekil 1.8’ de Tesla Model araçta kullanılan ondülünlü yapıya sahip sıvı ile batarya soğutma sistemi gösterilmiştir (Url-4, 2024).



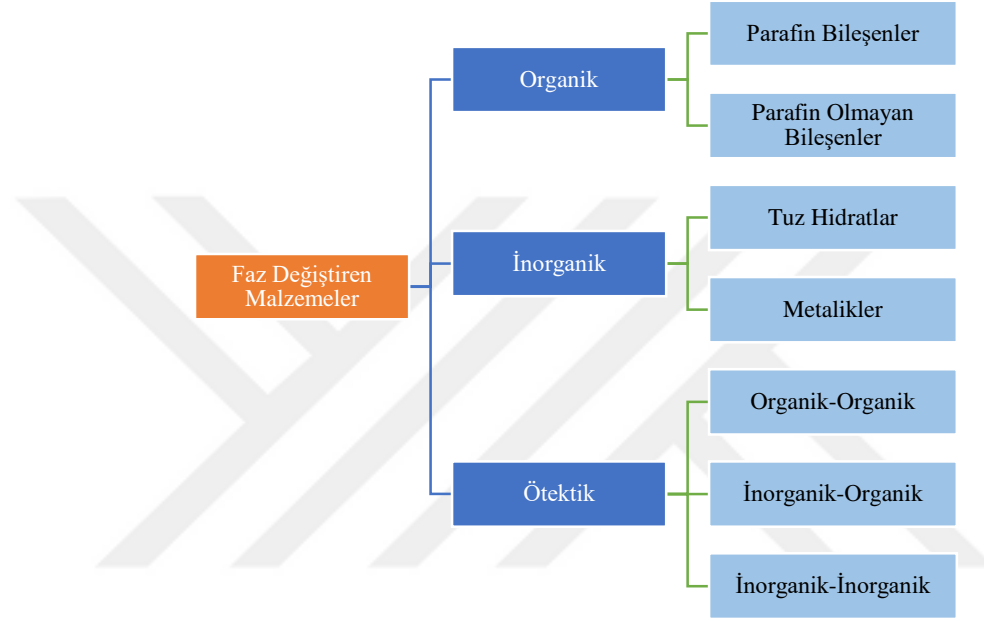
Şekil 1.8 Sıvı soğutmalı batarya sistemi örneği (Url-4, 2024).

1.2.3. Faz değiştiren malzeme ile batarya soğutma

Faz değiştiren malzemeler (FDM'ler), seçilen bir termal uygulamanın ęalıřma aralığı içindeki bir sıcaklıkta katı-sıvı faz dđnüşümüne uğrayan malzemelerdir (Abhat, 1983). Bir malzeme katı halden sıvı hale geğerken, sabit veya neredeyse sabit bir sıcaklıkta kalırken çevresinden ısı alır. Erime-katılaşma dđngüsü sırasında alınan veya verilen bu enerji gizli ısı olarak adlandırılır (Fleischer, 2015).

Faz değiştiren malzemeler Şekil 1.9'da gösterildiği gibi kimyasal bileşenlerine göre organik, inorganik ve ötektik olmak üzere üç sınıfa ayrılabilir (Sharma, 2009). Organik FDM'ler, parafin ve yağ asitleri gibi karbon bazlı bileşiklerdir. İnorganik FDM'ler hidratlı tuzlardan veya metallere oluşur. Ötektik FDM'ler ise organik veya inorganik FDM'lerin karışımından oluşur.

Sahip oldukları yüksek gizli ısı nedeniyle FDM'ler, sıcaklığı FDM erime sıcaklığı bölgesinde tutarak batarya modülünün maksimum yüzey sıcaklığı ve maksimum yüzey sıcaklık farkı değerleri azaltabilir. Eğer faz değıştiren malzemenin erime sıcaklığı bölgesi, batarya modülünün maksimum izin verilebilir çalışma sıcaklık bölgesine denk getirilecek şekilde seçilirse kullanılan faz değıştiren malzeme o sıcaklıkta erimeye başlayacak ve böylece batarya modülü sıcaklığını artırmadan gizli ısı çekilerek modülün istenilen sıcaklıkta kalması sağlanacaktır.



Şekil 1.9 Faz değıştiren malzemelerin sınıflandırılması

Batarya soğutma yöntemlerinde FDM seçiminde diğeri önemli bir husus, FDM'nin erime sıcaklığı bölgesinin normal ortam sıcaklığından yüksek seçilmesi gerektiğidir. FDM erime sıcaklığı bölgesi normal ortam sıcaklığından düşük olması durumunda FDM daha batarya modülü şarj/deşarj işlemine başlanmadan eriyecek ve böylece çalışma esnasında FDM'nin gizli ısı çekerek batarya modülünün sıcaklığını baskılayıcı etkisinden yararlanılamayacaktır.

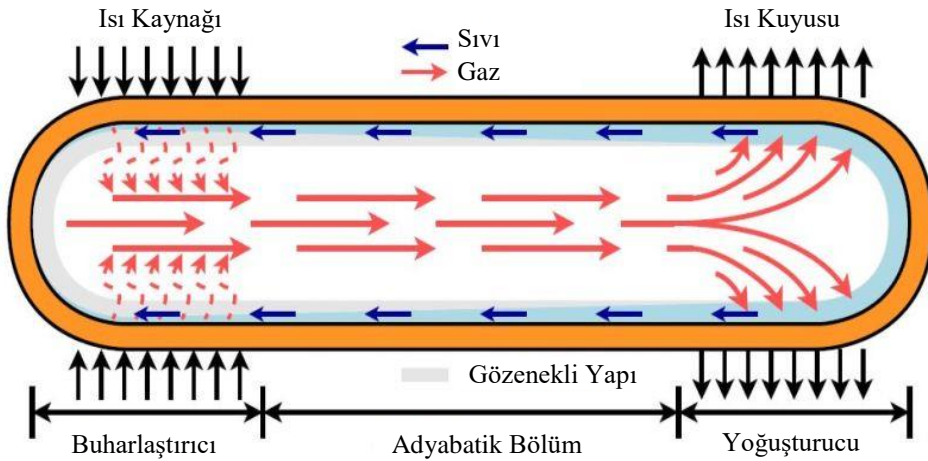
Faz değıştiren malzemelerin batarya soğutma sistemlerinde kullanımını her ne kadar önemli avantajlar sağlasa da FDM'ler düşük ısıl iletim katsayısı, erime sonrasında sıvı hale geçildiğinde sızıntı problemi ve erime sırasında hacminin artması gibi bazı ciddi dezavantajlara da sahiptir. Dolayısıyla batarya soğutma yönteminde kullanılacak FDM seçimi oldukça önemli olup seçilen malzemenin aşağıdaki gereksinimleri karşılması beklenir (Patel, 2020).

- Erime sıcaklığı bölgesinin izin verilen maksimum çalışma sıcaklığı bölgesine denk getirilmesi
- Erime sıcaklığı bölgesinin ortam sıcaklığı bölgesinden yüksek olması
- Büyük gizli ısı ve özgül ısı, böylece bataryadan maksimum miktarda ısı emilebilir.
- FDM'nin ısı emilimini ve ısı dağıtım oranını artırmak için yüksek termal iletkenlik
- Düşük yoğunluk, böylece bataryanın ağırlığı önemli ölçüde artmaz.
- FDM elektrotlarla veya elektrolitle kimyasal reaksiyona girmemelidir.
- FDM'yi bataryanın çok sayıda şarj/deşarj döngüsü için kullanmak için dögüsel kararlılık
- Ucuz ve kolay bulunabilirlik

Ayrıca FDM'lerin sahip oldukları bazı dezavantajlar FDM'ler kompozit hale getirilerek giderilebilir. Örneğin FDM'nin düşük ısı iletkenlik değeri, FDM' ye ısı iletkenliği yüksek malzemeler karıştırılıp kompozit hale getirilerek artırılabilir. Kompozit FDM'ler ise karbon takviyeli ve metal takviyeli olmak üzere iki ana grupta incelenebilir. Şekil 1.6'da kompozit FDM'ler detaylı olarak verilmiştir.

1.2.4. Isı boruları ile batarya soğutma

Yapay bir bileşen olan ısı boruları son yıllarda yüksek ısı transfer kabiliyetleri, düşük alan gereksinimleri, çalışmalarını esnasında enerjiye ihtiyaç duymamaları, bakım masrafı gerektirmemeleri ve uzun servis ömürleri nedeniyle özellikle soğutma sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır (Tiari, 2016). Isı boruları Şekil 1.10'da gösterildiği üzere buharlaştırıcı bölümü, adyabatik bölüm ve yoğuşturucu bölümü olmak üzere üç ana bölümden oluşur.



Şekil 1.10 Isı borusu yapısı, bölümleri ve çalışma sistemi



Şekil 1.11 Isı borusunun iç cidarlarındaki gözenekli yapı

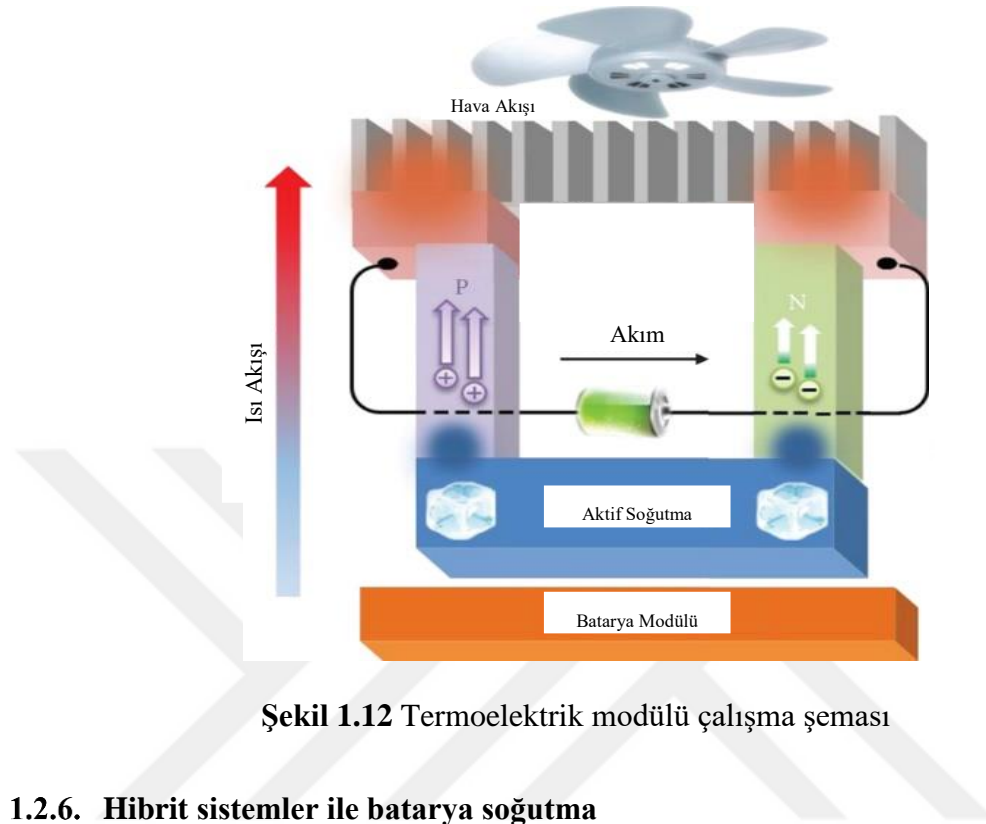
Isı boruları yapı olarak Şekil 1.11’de gösterildiği üzere bakır ceket içerisinde çeperlerde kılcallık etkisi oluşturan gözenekli, kanallı veya elekli bir yapıya sahiptir ve iç ortam basıncı negatiftir. İçerisinde akışkan olarak hava, damıtılmış su vb. kullanılır. Ayrıca ısı boruları kullanım amacına göre geometrik olarak silindirik veya yassı geometride, şekil olarak düz ya da bükümlü olarak üretilebilirler.

Isı borularında çalışma prensibi olarak ısı borusunun buharlaştırıcı bölümü ısıtıldığında, ısı borusu içindeki çalışma sıvısı ortam negatif basınçta olduğu için normal kaynama sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta kaynarak buhar haline gelir ve oluşan buhar basınç farkı nedeniyle yoğuşturucu bölümüne ilerler. Yoğuşturucu bölümüne ilerleyen buhar burada sahip olduğu ısıyı dışarı vererek tekrar sıvı hale geçer ve boru cidarlarındaki gözenekli yapının kılcallık etkisi nedeniyle tekrar buharlaşma bölümüne ilerler ve çevrim sıcaklık dengesi kuruluncaya kadar bu şekilde devam eder. Yapılan çalışmalar ısı borusunun ısı iletkenliğinin aynı boyuttaki bakır çubuğa kıyasla neredeyse 90 kat daha yüksek olduğunu ortaya çıkarmıştır (Faghri, 1995). Uygulamada ısı borusu buharlaştırıcı bölümü batarya modülüne temas ettirilirken yoğuşturucu bölümü ise dış ortama yahut soğutma bölümüne temas ettirilir.

1.2.5. Termoelektrik modül ile batarya soğutma

Termoelektrik soğutucu veya Peltier soğutucu olarak da adlandırılan termoelektrik modül, ısıyı cihazın bir tarafından diğer tarafına aktaran, küçük bir ısı pompası işlevi gören yarı iletken tabanlı bir elektronik bileşendir. Termoelektrik modül uygulanan akımın yönü değiştirilerek ısıtma veya soğutma amacıyla kullanılabilir. Termoelektrik

modül ile soğutma yöntemi dışarıdan enerji gereksinimi olduğu için aktif bir soğutma yöntemidir. Şekil 1.12’de termoelektrik modülün çalışma şeması gösterilmiştir.



Şekil 1.12 Termoelektrik modülün çalışma şeması

1.2.6. Hibrit sistemler ile batarya soğutma

Daha önce bahsi geçen tüm tekil soğutma yöntemleri olan hava ile soğutma, sıvı ile soğutma, faz değiştiren malzeme ile soğutma, ısı borusu ile soğutma ve termoelektrik modül ile soğutma yöntemleri kendi içlerinde bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Dolayısıyla tekil soğutma yöntemleri kendi aralarında birleştirilerek daha etkin soğutma sistemleri elde edilebilir. Bu tür birleşik sistemlere hibrit batarya soğutma sistemleri denir. Hibrit batarya soğutma sistemleri iki farklı tekil soğutma sisteminin birleşimi olabileceği gibi ikiden fazla tekil batarya soğutma sisteminin birleşimi şeklinde de olabilir. Hibrit sistemi oluşturan soğutma sistemleri tamamen pasif sistemlerden oluşuyorsa oluşan sistem pasif hibrit soğutma sistemi olarak adlandırılırken, bileşenler arasında en az bir adet aktif sistem bulunması halinde oluşan sistem aktif hibrit soğutma sistemi olarak adlandırılır. Literatürde en yaygın olarak kullanılan hibrit sistemler, FDM ve hava ile zorlanmış taşınımli batarya soğutma sistemi, FDM ve sıvı soğutmalı batarya soğutma sistemi ve FDM ve ısı boruları ile oluşturulan batarya soğutma sistemi olarak tanımlanabilir. Ayrıca hibrit sistemlerde FDM yerine kompozit FDM veya fan eklenerek daha iyi bir soğutma performansı elde edilebilir.

Pasif soğutma sistemleri ya da içerisinde tamamen pasif soğutma sistemleri barındıran hibrit soğutma sistemleri enerji tüketmeden soğutma yapabildiklerinden aktif soğutma sistemlerine göre daha çok tercih edilmektedirler. Lakin yüksek güç gereksinimlerinde ve yüksek şarj/deşarj hızlarında aktif soğutma sistemlerine veya içerisinde aktif soğutma sistemi bulunduran hibrit soğutma sistemlerine gerek duyulabilmektedir.

1.3. Önceki Çalışmalar

Son yıllarda özellikle faz değiştiren malzemeler ve ısı boruları kullanılarak oluşturulan pasif hibrit soğutma sistemleri üzerinde ve faz değiştiren malzemeler, ısı boruları ve hava/sıvı ile aktif hibrit soğutma sistemleri üzerinde çok çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Sabbah vd. (2008) FDM ve hava ile zorlanmış taşınımlı batarya soğutma sistemlerini sayısal olarak incelemişler ve FDM ile batarya soğutma yönteminin yüksekdeşarj hızlarında ve yüksek çalışma sıcaklıklarında hava ile zorlanmış taşınımlı batarya soğutma sistemine nazaran daha etkin bir soğutma performansı sergilediğini göstermişlerdir.

Ling vd. (2015) silindirik tip 18650 model lityum iyon bataryaların ısı performansını incelemek ve FDM’de oluşan ısı birikimini engellemek üzere FDM ve hava ile zorlanmış taşınımlı batarya soğutma yöntemi entegre edilmiş hibrit soğutma sistemi tasarlamışlardır. Tasarlanan sistemin 2Cdeşarj hızının altındaki hızlarda maksimum batarya yüzey sıcaklığını 50°C’nin altına ve maksimum batarya yüzey sıcaklık farkını ise 3°C’nin altına düşürdüğünü göstermişlerdir. Önerilen sistemin geleneksel FDM ile batarya soğutma yöntemlerinin dezavantajlarını ortadan kaldırdığı görülmüştür.

Wu vd. (2016) kompozit FDM ve hava ile zorlanmış taşınımlı batarya soğutma sistemi tasarlamışlardır. Kompozit FDM’yi oluştururken bakır file, parafin ve genişmiş grafit kullanmışlardır. Bu şekliyle tasarlanan sistemin özellikle yüksekdeşarj hızları ve yüksek çalışma sıcaklığı gibi ağır çalışma şartlarında bakır file kullanılmadan oluşan FDM’ye göre çok daha iyi ısı performans ve üniform sıcaklık dağılımı sergilediğini göstermişlerdir.

Jiang vd. (2017) batarya modülünün soğutma performansını artırmak üzere silindirik tüp şeklinde FDM ve hava ile zorlanmış taşınımlı batarya soğutma sistemi tasarlamışlardır. Tasarlanan sistemin maksimum batarya yüzey sıcaklığını düşürdüğünü ve maksimum batarya yüzey sıcaklık farkını ise 1-2°C’nin altında tuttuğunu ve böylece önerilen sistemin yüksek soğutma performansı sergilediğini tespit etmişlerdir.

Xie vd. (2017) FDM ve hava ile zorlanmış taşınımlı batarya soğutma yöntemi kullanan batarya modülünün ısı davranışının hava akım hızı ve FDM sıvılaşma oranına göre değişimini incelemiş ve hava akım hızı ve FDM'deki sıvılaşma oranının batarya modülü sıcaklığına etkisinin çok belirgin olmadığını kaydetmişlerdir.

Rao vd. (2016) FDM ve mini kanallı soğutma plakalı sıvı soğutmalı batarya modülünün performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Önerilen sistemin maksimum batarya yüzey sıcaklığını 47,6°C'de sınırlarken maksimum batarya yüzey sıcaklık farkını etkin bir şekilde düşüremediği tespit edilmiştir.

Mehrabi-Kermani vd. (2019), FDM ve hava ile zorlanmış taşınım yöntemi entegre edilmiş yeni bir hibrit soğutma sistemi tasarlamışlar ve bu sistemi yüksek deşarj hızlarında test etmişlerdir. Tasarlanan sistemin FDM gizli ısının tamamını kullandığını ve belirli bir süre içerisinde batarya sıcaklığını 60°C'nin altında tutmayı başardığını göstermişlerdir.

Jilte vd. (2019) her bir hücrenin FDM tarafından çevrelendiği hava ile soğutulan bir sistem tasarlamışlar ve bu sistemin ısı performansını araştırmışlardır. Tasarlanan sistemde FDM kaplama kalınlığının 4 mm olduğunda araç ağırlığını etkilemeyecek uygunlukta olduğunu ve sistemin geleneksel FDM ile batarya soğutma yöntemlerine göre maksimum batarya yüzey sıcaklığını 5°C daha düşürdüğünü belirlemişlerdir.

Qin vd. (2019) FDM ve hava ile zorlanmış taşınım yöntemi kullanılarak soğutulan ve dört adet bataryanın paralel şekilde bağlanmasıyla oluşturulan batarya modülünün soğutma performansını incelemişlerdir. Tasarlanan sistemde 4C şarj/deşarj hızında dahi maksimum batarya yüzey sıcaklığının ve maksimum yüzey sıcaklık farkının optimum sıcaklık aralığında kaldığını ve optimum bir soğutma performansı için FDM kalınlığının 5 mm olması gerektiği tespit edilmiştir.

Bai vd. (2017) FDM ve sıvı soğutmalı batarya soğutma sisteminde sıvı soğutma sisteminin soğutma performansına ve FDM ile batarya soğutmanın üniform sıcaklık dağılımına etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Önerilen sistemin ısı performansının ardışık 5 şarj/deşarj çevriminde oldukça iyi olduğu tespit edilmiştir.

Zhao vd. (2019) FDM ve sıvı soğutmalı batarya soğutma sistemi tasarlamışlar ve Ansys Fluent programında bu sistemi modelleyerek farklı deşarj hızlarında sistemin ısı performansını incelemişlerdir. Tasarlanan sistemin maksimum batarya yüzey sıcaklığını

etkin bir şekilde düşüremediğini ancak FDM ile gözenekli bakırın kompozit haline getirilerek sistemde kullanılması durumunda maksimum batarya yüzey sıcaklığının 14°C düşürüldüğünü göstermişlerdir.

Bai vd. (2019) bir çeşit sıvı kompozit FDM ve mini kanallı soğutma plakası içinde sıvı ile soğutma yöntemini kullanan bir sistem tasarlamışlar ve bu sistemin sayısal analizini yapmışlardır. Sonuç olarak soğutma plakasında akışkan olarak kullanılan sıvının, su, glikol çözeltisi ve mineral yağa göre daha iyi bir soğutma performansı sergilediğini tespit etmişlerdir.

Zhang vd. (2019) FDM ve sıvı soğutmalı batarya soğutma sistemi tasarlamışlar ve sistemin soğutma performansını incelemişlerdir. Çalışma sonunda FDM ile yapılan batarya soğutma, sıvı ile yapılan batarya soğutma ve bunların birleşimi ile yapılan soğutma yöntemleri incelenmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Hibrit soğutma sisteminde maksimum batarya yüzey sıcaklığının 10.6°C, maksimum batarya yüzey sıcaklık farkının ise 1,7°C düşürüldüğü, 5C deşarj hızında yapılan ardışık şarj/deşarj çevrimlerinde maksimum batarya yüzey sıcaklığının 50°C altında ve maksimum batarya yüzey sıcaklık farkının 3,4 °C civarında kaldığı gözlemlenmiştir.

An vd. (2019) FDM ve sıvı soğutmalı batarya soğutma sistemi tasarlamışlar ve 3C deşarj hızında maksimum batarya yüzey sıcaklığının izin verilen sıcaklığı aştığını tespit etmişlerdir. Daha sonra FDM' ye kütleli olarak %6 oranında genişlemiş grafit eklenmiş ve farklı akış şartlarında modülün soğutma performansını incelemişlerdir. Sonuç olarak 0,14 m/s akış hızında maksimum batarya yüzey sıcaklığı 46,3°C ve maksimum batarya yüzey sıcaklık farkı 2°C olarak ölçülmüş ve kompozit FDM kullanılarak elde edilen batarya modülünün 0,04 m/s akış hızlarında dahi daha iyi bir soğutma performansı sergilediği tespit edilmiştir.

Zheng vd. (2019) hızlı deşarj esnasında soğutma yapmak üzere FDM ve sıvı soğutmalı batarya soğutma sistemi tasarlamışlardır. Sistem, soğutma sıvısının soğutma tüpleri ve poliüretandan geçirilecek şekilde tasarlanmış ve sıcaklık homojenliğinin etkin bir şekilde sağlanması için soğutma tüpleri arasına adyabatik ara katmanlar yerleştirilmiştir. Sonuçlar 8C deşarj hızında dahi maksimum batarya yüzey sıcaklığının 38,69°C ve maksimum batarya yüzey sıcaklık farkının 2,23°C değerinde kaldığını göstermiştir.

Song vd. (2019) FDM ve sıvı soğutmalı batarya soğutma sisteminin ısıl performansını hem deneysel hem de sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçların oldukça uyumlu olduğunu ve önerilen metodun daha doğru bir batarya ısıl yönetim sistemi için gerçek batarya modeline entegre edilebileceğini göstermişlerdir.

Zhao vd. (2016) FDM ve salınımlı ısı borusu kullanılarak oluşturulan batarya modülünün soğutma performansını farklı çalışma şartlarında test etmişler ve sonuç olarak salınımlı ısı borusu çalışma şartının tüm modülün soğutma performansını doğrudan etkilediğini tespit etmişlerdir.

Zhao vd. (2017) FDM ve ısı borularının birlikte çalıştığı ve ısı borularının yoğunlaştırıcı kısmına dairesel kanatçıklar yerleştirdiği yeni bir sistem tasarlamışlardır. Zhao, batarya maksimum sıcaklığının FDM kullanılan sistemde FDM kullanılmayan sisteme göre %33,6 düşürülebildiğini, eğer FDM ile birlikte ısı boruları da kullanılırsa ek %28,9 bir düşüş daha elde edilebileceği gözlemlenmiştir. Ayrıca uzun çalışma periyodu sonrasında FDM ile ısı borularının oluşturduğu batarya soğutma sistemi ile çalışan bataryada maksimum sıcaklık farkının 5°C altında kaldığını göstermişlerdir.

Wang vd. (2016) ise FDM ve salınımlı ısı boruları kullanarak yeni bir sistem tasarlamışlardır. Tasarlanan sistem iki prizmatik batarya hücresi arasında FDM konulup FDM içerisinden salınımlı ısı borularının buharlaştırıcı kısımları geçirilip ısı borularının yoğunlaştırıcı kısımları ise zorlanmış taşınım yardımıyla soğutulmak suretiyle oluşturulmuştur. Oluşturulan tasarımda batarya sıcaklığının 50°C ye ulaşması için gerekli süre 934 saniye iken sadece salınımlı ısı boruları kullanılarak oluşturulan sistemde bu sürenin 498 saniye civarında olduğunu tespit etmişlerdir.

Wu vd. (2017a) buharlaştırıcı kısmı FDM plakaları arasında, yoğunlaştırıcı kısmı kanatçıklar eklenmiş şekilde batarya dışında olan ısı borulu soğutma sistemi tasarlamışlar ve FDM ve ısı borusu kullanılarak oluşturulan sistemdeki batarya sıcaklığının 50,9°C iken sadece FDM kullanılan sistemde ki batarya sıcaklığının 53,2°C olduğunu gözlemlenmişlerdir. Ayrıca ısı borusunun yoğunlaştırıcı kısmının fan ile soğutulduğu takdirde uygulanan en yüksek deşarj hızı 5C'de bile batarya yüzey sıcaklığının 50°C altında seyrettiğini, ardışık şarj/deşarj çevrimlerinde daha stabil batarya sıcaklık dağılımı ve daha az sıcaklık dalgalanmaları olduğunu göstermişlerdir.

Yamada vd. (2017) prizmatik batarya hücreleri arasına FDM ve ısı boruları yerleştirerek bir sistem tasarlamışlardır. Tasarlanan sistemde ısı borularının buharlaştırıcı kısımları FDM ve batarya hücreleri ile temasta iken yoğunlaştırıcı kısımları ise batarya dışında kanatçıklar eklenmiş şekilde oluşturulmuş ve kanatçıklardan doğal taşınım ile ısı transferinin gerçekleşmesi sağlanmıştır. Sistem anormal olmayan ısıtma koşullarında çalıştırılarak zorlanmıştır. Doğal taşınımlı sistemde 80°C sistem sıcaklığına 104 saniyede ulaşılırken FDM ve ısı boruları kullanılarak elde edilen tasarımda 80°C'ye 708 saniyede ulaşılmıştır.

Huang vd. (2018) silindirik lityum iyon pillerin soğutulması için üç farklı sistem tasarlamışlardır. Birinci sistemde sadece FDM kullanılırken, ikinci sistemde FDM ile birlikte içinde hava olan ısı borusu, üçüncü sistemde ise FDM ile birlikte içinde sıvı olan ısı borusu kullanılmıştır. FDM ile birlikte içinde sıvı olan ısı borusu hibrit soğutma sisteminin mükemmel termal performans gösterdiğini, farklı deşarj hızlarında ısı boruların ısı transferinde çok önemli bir rol oynadığını ve FDM tabanlı batarya soğutma sisteminde sıcaklık dağılımının dengelendiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca FDM ile birlikte içinde sıvı olan ısı borusu hibrit soğutma sisteminde 3C deşarj hızında maksimum batarya yüzey sıcaklığının 50°C altında kaldığını, batarya maksimum ve minimum sıcaklık farkının ise 3°C civarlarında olduğunu göstermişlerdir.

Qu vd. (2019) FDM ve üç boyutlu salınımlı ısı boruları kullanarak tasarladığı farklı sistemleri karşılaştırmışlardır. FDM'yi hem dört katmanlı ve üç boyutlu salınımlı ısı borusu geometrisi ile hem üç katmanlı ve üç boyutlu ısı borusu geometrisi ile hem de iki boyutlu ısı borusu geometrisi ile birleştirerek oluşturduğu sistemleri ayrı ayrı incelemişlerdir. Sonuç olarak üç boyutlu ısı borusu geometrisi ile oluşturulan sistemin daha iyi soğutma performansı gösterdiği belirlenmiştir.

Jiang ve Qu (2019) ise FDM ve ısı borularının bütünleşik çalıştığı farklı bir batarya soğutma sistemi tasarlamışlardır. Tasarlanan sistemde FDM'li sisteme ısı boruları entegre edildiği takdirde ilk şarj/deşarj çevriminde çok ciddi bir etki gözlemlenmezken üçüncü şarj/deşarj çevrimi neticesinde maksimum batarya yüzey sıcaklığının 46°C'den 31°C'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Sadece FDM ile oluşturulan sistemin özellikle sonraki şarj/deşarj çevrimlerinde batarya sıcaklığını kontrol etmede yeterli olmadığı görülmüştür.

Gou vd. (2019b) ise silindirik yapıya sahip içi boş yeni bir batarya hücresi tasarlamışlardır. Tasarlanan içi boş batarya hücresi önce herhangi bir soğutma sistemi

etkmeden incelenmiş sonra silindirik boşluk içine FDM konularak ve sonrasında da FDM ve ısı boruları konularak oluşturulan sistemler 1C, 2C ve 3C hızlarında deşarj edilerek karşılaştırılmıştır. Tasarlanan üç sistem arasından FDM ve ısı borulu sistemin en etkili soğutma sistemi olduğu ve maksimum batarya sıcaklığını %20 oranında düşürdüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca ardışık şarj/deşarj çevrimlerinde dördüncü çevrimden sonra soğutma sistemi kullanılmayan ve sadece doğal taşınım ile soğuyan sistemin maksimum sıcaklığının 48°C'ye ulaştığı görülürken FDM ve ısı borulu sistemin dördüncü çevrimde maksimum batarya sıcaklığının 31°C civarında olduğu belirlenmiştir.

Putra vd. (2020) ısı üretmek üzere batarya simülatörü, FDM ve ısı boruları kullanarak tasarladıkları pasif sistemin performansını incelemişlerdir. 60 W ısı yükünde ısı borulu tasarımın sistem sıcaklığını 26,62°C düşürdüğü, ayrıca ısı borusuna ek olarak tasarımda FDM olarak RT 44 HC kullanılması durumunda maksimum batarya sıcaklığının 33,42°C daha düştüğü görülmüştür.

Lei vd. (2020) FDM ve ısı boruları ile oluşturduğu sistemde ısı borularının yoğunlaştırıcı ucuna eklediği alüminyum kanatçıkları su ile spreyleme yöntemi ile soğutmaya denemişlerdir. Önerilen tasarımın 40°C ortam sıcaklığında batarya maksimum sıcaklığını sadece FDM ya da sadece ısı boruları kullanılan sisteme göre %9-16 daha düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Zhang vd. (2020) yeni bir batarya soğutma sistemi tasarlamışlardır. Bu zamana kadar FDM ve ısı boruları kullanılarak yapılan tasarımlar da FDM, batarya ısını alırken ısı boruları ise FDM ısını transfer etmek için tasarlanmıştır. Zhang vd. ise yaptıkları tasarımda batarya ısını dış ortama transfer etmek için ısı borularının buharlaştırıcı kısmını kullanırken ısı borularının yoğunlaştırıcı kısmına ise FDM eklemişlerdir. Yeni sistem 1C, 3C, 4C ve 5C deşarj hızlarında test edilmiştir. Önerilen hibrit sistemin tek başına FDM ile soğutulan ya da tek başına ısı boruları ile soğutulan sistemden daha iyi soğutma performansı sergilediği gözlemlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Batarya Modülü

Bu çalışmada 9 adet 18650 model (18 mm çapında, 65 mm uzunluğunda) silindirik lityum iyon batarya ile 3 seri ve 3 paralel bağlantı yapılarak (3S3P) batarya modülü oluşturulmuştur. Batarya seçilirken özellikle yüksek güç gereksinimlerinde oldukça iyi performans sergileyen INR yahut NMC olarak da adlandırılan Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (LiNiMnCoO_2) tip batarya seçilmiştir. NMC tip bataryalarda genellikle anot olarak grafit, katot olarak ise yüksek özgül enerjisinden dolayı nikel ve düşük iç direncinden dolayı manganez kullanılır (Huria, 2012).

Batarya modülleri oluşturulurken gerekli olan güç ve voltaj değerlerine göre tasarım yapılır. Sistemin çalışması için gerekli voltaj değerinden batarya modülünde seri olarak bağlanacak batarya hücresi sayısı hesaplanır. Benzer şekilde gerekli olan güç değerine göre de batarya modülünde paralel olarak bağlanacak batarya hücresi sayısı belirlenir. Seri ve paralel bağlanacak batarya hücrelerinden de batarya modülünde kullanılacak toplam batarya hücre sayısı kolaylıkla hesaplanabilir. Bu çalışmada batarya modülünü oluşturan batarya hücre sayısı ve bağlantı şekilleri batarya modülünün deşarj testinde kullanılan elektronik yük cihazının maksimum akım, voltaj ve güç değerlerine göre 3 paralel ve 3 seri bağlantı yapılarak 9 adet olarak seçilmiştir.

Kullanılan batarya hücrelerinin termal, fiziksel ve elektriksel özellikleri Çizelge 2.1’de, oluşturulan batarya modülünün elektriksel özellikleri ise Çizelge 2.2’de belirtilmiştir.

Çizelge 2.1 Bataryanın termal, fiziksel ve elektriksel özellikleri

Pil Tipi	18650, Lityum İyon
Pil Şekli	Silindirik
Pil Kimyasal Bileşeni	LiNiMnCoO_2
Diğer Adı	INR veya NMC
Nominal Kapasitesi	2000 mAh
Nominal Voltajı	3,7 V
Yükseklik	65 mm
Çap	18 mm
Isı İletim Katsayısı	3 W/mK
Batarya Özgül Isısı	1000 J/kgK
Yoğunluk	2539 kg/m ³
Şarj Kesme Voltajı	4,2 V
Deşarj Kesme Voltajı	3,0 V

Çizelge 2.2 Batarya modülünün elektriksel özellikleri

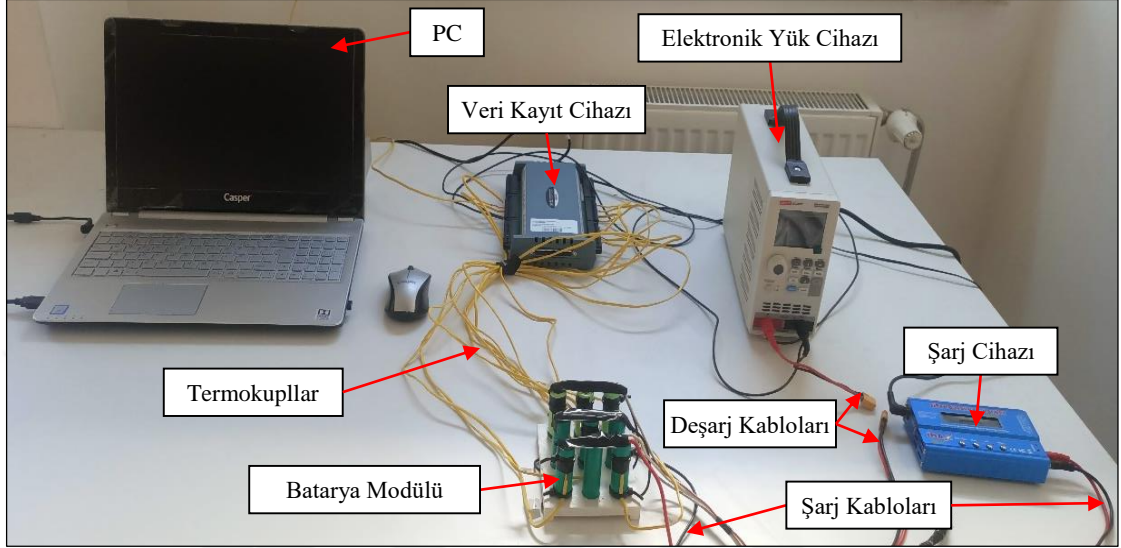
Pil Sayısı	9 adet
Bağlantı Şekli	3 seri ve 3 Paralel (3S3P)
Nominal Kapasitesi	6000 mAh
Nominal Voltajı	11,1 V

2.2. Deney Düzenegi ve Performans Testleri

Deney düzenegi, 2000 mAh kapasitesinde ve 3,7 V gerilim değerinde 9 adet 18650 model silindirik lityum iyon batarya (LiNiMnCoO_2), bataryaları sabit akımda değarj edebilmek için 1 adet Elektronik Yük Cihazı (40 A, 15 Volt, 400 Watt), batarya sıcaklıklarını ve ortam sıcaklığını ölçmek için $\pm 0,5^\circ\text{C}$ sıcaklık okuma hassasiyetinde 10 adet K tipi termokupl, sıcaklık ve voltaj verilerini belirli sürelerde kaydetmek için 1 adet veri kayıt cihazı, batarya hücreleri boşaldığında tekrar şarj edebilmek için 1 adet batarya şarj cihazı (5 A - 12,6 V) ve veri kayıt cihazının kaydettiği verileri işlemek üzere 1 adet PC'den oluşmaktadır. Elektronik yük cihazı, bataryaları istenilen gerilimde veya istenilen akımda önceden belirlenen kesme gerilimine göre değarj etmek için kullanılan ekipmandır. Bu deneyde 400 Watt gücünde ve sabit akım değarj işleminde $\pm \%0.05$ hassasiyetinde olan UNI-T marka ve UTL8211 model elektronik yük cihazı kullanılmıştır. Kullanılan veri kayıt cihazı ise MC Measurement Computing marka ve USB-2416 model olup termokupl sıcaklık değerlerini $\pm 0,457^\circ\text{C}$ hassasiyette kayıt altına alabilir özelliktedir. Batarya değarj işleminden sonra şarj etmek üzere şarj cihazı olarak ise modüldeki her üçlü batarya serisini aralarında gerilim farkı olmayacak şekilde dengeli bir şekilde şarj edebilme özelliğine sahip olan 6 amper kapasitesinde IMAX marka B6 model şarj cihazı kullanılmıştır. Batarya maksimum yüzey sıcaklıklarını ölçmek için kullanılan termokupllar batarya tabanından 48 mm yukarıda olacak şekilde batarya yüzeyine yapıştırılmışlardır. Kullanılan deney düzenegi Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

Bu çalışmada önerilen batarya soğutma sistemleri farklı ortam sıcaklıklarında 1C, 3C ve 5C değarj hızlarında değarj edilmiştir. Ortam sıcaklığı olarak genel çalışma sıcaklığı olan 20°C ve özellikle sıcaklığın arttığı yaz aylarındaki batarya performansını da değerlendirmek üzere 36°C olarak iki farklı sıcaklık değeri seçilmiştir. Dolayısıyla önerilen her bir sistem için her bir ortam sıcaklığında 3 farklı deney olmak üzere tüm sistemler için toplam 36 adet deney yapılmış ve deneylerde uygulanan akım ve voltaj değerleri Çizelge 2.3'te gösterilmiştir. Batarya hücrelerindeki zamana göre sıcaklık değişimi veri kayıt cihazı ile kayıt altına alınmış ve sıcaklıkların batarya doluluk oranına

(SOC) göre değişimi hesaplanmıştır. Çizelge 2.3'te ifade edilen V_{oc} açık devre voltajı, bataryanın her iki ucu boşta iken yani batarya yükte değilken okunan değeri, V_{cut} batarya deşarj kesme voltajı ise bataryaların deşarj edilirken deşarj işleminin durdurulduğu voltaj değerini ifade eder.



Şekil 2.1 Deney düzeneği görseli

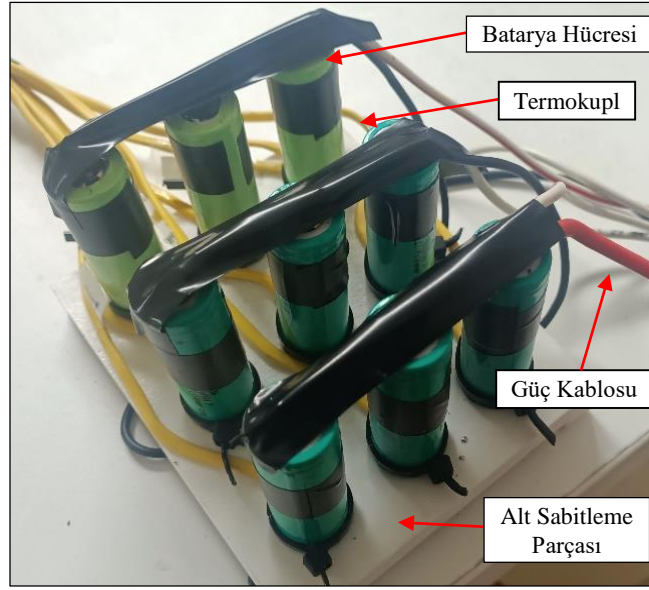
Çizelge 2.3 Batarya modülüne uygulananan testler ve voltaj değerleri

	Test-1	Test-2	Test-3
Deşarj Hızı, C	1C	3C	5C
Test Sresi	3600 saniye	1200 saniye	720 saniye
Uygulanan Deşarj Akımı, I	6 Amper	18 Amper	30 Amper
Batarya Açık Devre Voltajı, V_{oc}	12,6 V	12,6 V	12,6 V
Batarya Deşarj Kesme Voltajı, V_{cut}	9,0 V	9,0 V	9,0 V
Termokupl Montaj Noktası	Batarya tabanından 48 mm yukarıda, batarya yüzeyinde		

2.3. Soğutma Sistemi Tasarımları

2.3.1. Doğal taşınımlı sistem (S1)

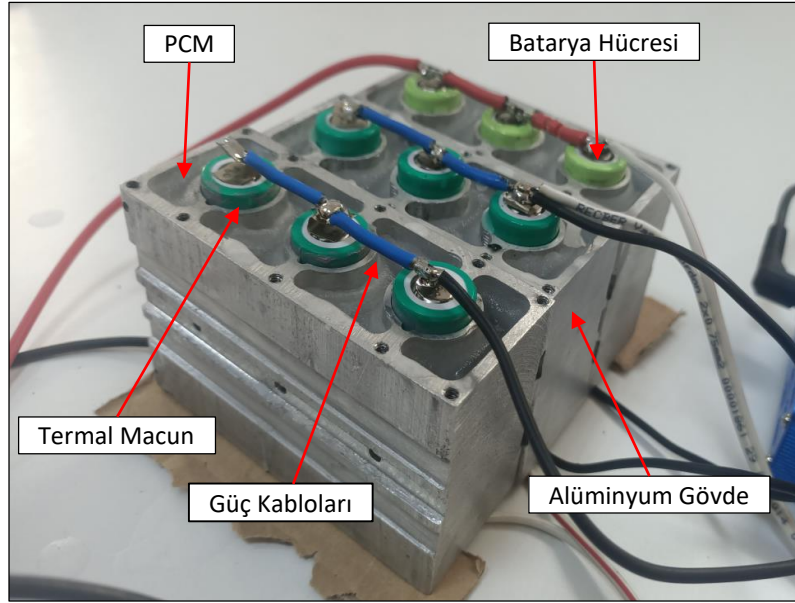
Bu çalışmada doğal taşınımlı sistem referans sistem olarak kabul edilmiş ve diğer önerilen tasarımların soğutma performansını karşılaştırabilmek üzere kullanılmıştır. Soğutma için herhangi bir FDM, alüminyum blok, ısı boruları veya fan kullanılmamış sadece batarya hücreleri çevresinden doğal taşınım ile ısı transferi mevcuttur. Batarya hücreleri arasındaki mesafeler diğer tasarımlarda ki batarya hücreleri arasındaki mesafeler ile aynı olacak şekilde ayarlanmış ve batarya hücrelerini sabit mesafede tutabilmek üzere bir adet plastik alt sabitleme parçası sisteme dâhil edilmiştir. Her bir batarya hücresindeki batarya yüzey sıcaklığını ve ortam sıcaklığını ölçmek üzere K tipi termokupllar kullanılmıştır. Şekil 2.2'de oluşturulan referans sistem gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Doğal taşınimli referans modül (S1)

2.3.2. FDM ve alüminyum blok kullanarak oluşturulan pasif sistem (S2)

Bu sistemde her paralel bağlı 3 batarya hücresi için bir adet alüminyum blok üretilmiş ve alüminyum bloklar hem batarya hücrelerini tamamen çevreleyecek şekilde yuvalı olarak hem de FDM'yi içinde barındıracak şekilde hazneli olarak tasarlanmıştır. Kullanılan her bir alüminyum blok ölçüleri 100x40x60 mm olarak seçilmiş ve 3 adet alüminyum blok yan yana getirilerek tam batarya modülü elde edilmiştir. Batarya yüzey sıcaklıklarını ölçebilmek üzere alüminyum bloktaki batarya yuvaları bölümüne ayrıca mini kanallar açılmış ve termokupl kabloları bu kanallar içine yerleştirilmiştir. Ayrıca FDM'nin eriyerek sıvı hale dönüşmesi durumunda sızıntı problemlerini engellemek adına demonte edilebilir kapak tasarlanmıştır. FDM erimesi durumunda hacimsel olarak yaklaşık %12,5 genişleyeceği için tasarlanan kapak ve gövde arasına esnek ve sızdırmaz kauçuk bir conta yerleştirilmiş ve hacim genişmeleri tolere edilmiştir. Bataryaların alüminyum blok içerisindeki batarya yuva yüzeylerine tam temas ettiği için emin olabilmek için yuva yüzeylerine temas ısı iletim direncini düşürmek amacıyla termal macun sürülmüş ve tam bir temas sağlandığı kabul edilmiştir. Her bir batarya hücresindeki yüzey sıcaklığını ve ortam sıcaklığını ölçmek üzere K tipi termokupullar kullanılmıştır. Tasarlanan sistem soğutma işlemini dışarıdan herhangi bir enerji girişi ile sağlamadığı için pasif bir sistemdir. Şekil 2.3'te tasarlanan sistem detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3 FDM ve alüminyum blok kullanarak oluşturulan pasif sistem (S2)

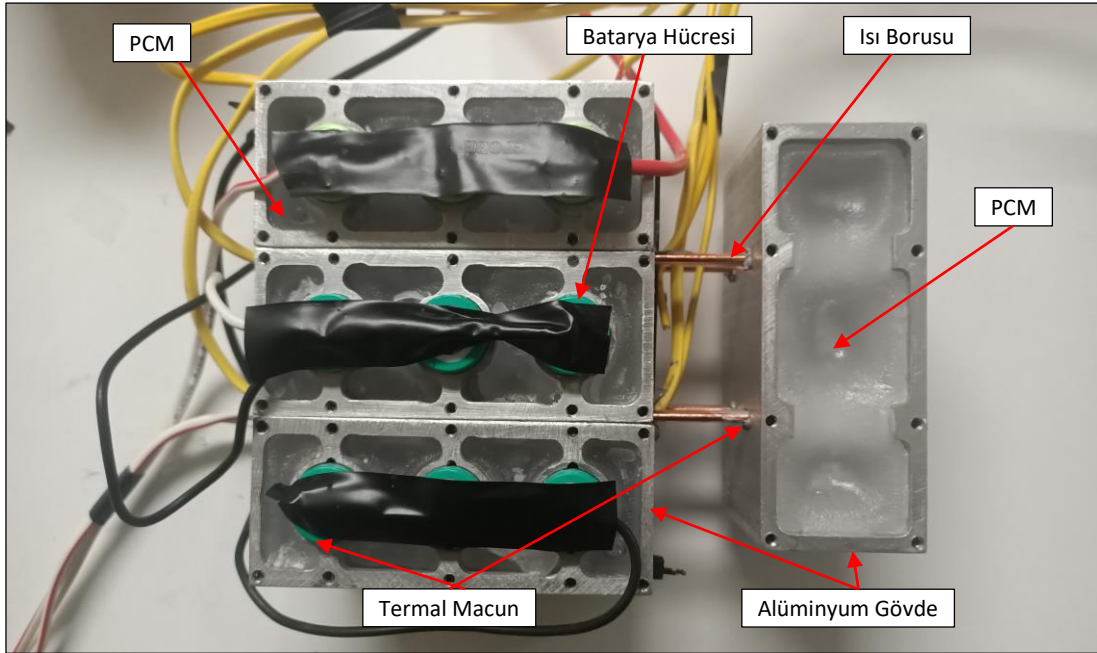
Organik FDM'ler için genellikle erime sıcaklığı ifadesi yerine erime sıcaklığı bölgesi ifadesini kullanmak daha isabetli olur. Çoğu organik FDM keskin bir erime sıcaklığında değil aksine belirli bir sıcaklık bölgesi içerisinde yavaşça erir (Fleischer, 2015). Bunun nedeni parafinin farklı erime noktalarına sahip birkaç alkanla karıştırılması sonucu oluşmasıdır (Jiang vd., 2017). Bataryaların optimum çalışma sıcaklığı aralığı (15°C) - (40°C) olduğundan FDM'nin gizli ısı çekerek batarya modülünün sıcaklığını baskılayıcı etkisinden faydalanabilmek üzere optimum çalışma sıcaklık aralığının içinde erime sıcaklığı olan ve erime sıcaklığı 20°C ve 36°C ortam sıcaklıklarının üzerinde olan FDM seçilmiştir. FDM olarak Rubitherm firmasından RT42 modeli temin edilmiştir. Çizelge 2.4'de temin edilen FDM'nin termofiziksel özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 2.4 Seçilen FDM'nin termofiziksel özellikleri

Ticari ismi	RT42 Parafin
Kimyasal Sınıf	Organik
Erime Bölgesi	38-43°C
Katılma Bölgesi	43-37°C
Isı Depolama Kapasitesi \pm %7,5	165 kJ/kg
35°C ile 50°C sıcaklık aralığındaki gizli ve duyulur ısının birleşimi	48 Wh/kg
Özgül Isı	2000 J/kgK
Yoğunluk (katı halde, 25°C'de)	0,88 kg/l
Yoğunluk (sıvı halde, 80°C'de)	0,76 kg/l
Isıl iletkenlik (katı ve sıvı hallerinde)	0,2 W/mK
Hacim Genleşmesi	% 12,5
Maksimum Çalışma Sıcaklığı	72°C

2.3.3. FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanarak oluşturulan pasif sistem (S3)

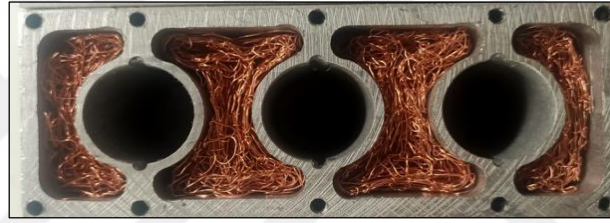
Bu sistemde bir önceki sisteme ilave olarak 4 adet 17 cm uzunluğunda yassı tipte ısı borusu (8 x 3mm) ve FDM içeren ikinci bir alüminyum blok (100 x 40 x 50mm) eklenmiştir. Bu sistemde ısı boruları ve FDM içeren ikinci bir blok eklenmesindeki amaç yüksek deşarj hızlarında FDM içeren birinci alüminyum blokta oluşabilecek ısı birikmesini hızlı ve etkin bir biçimde batarya modülünden uzaklaştırabilmektir. Seçilen ısı boruları içinde akışkan olarak damıtılmış su bulunmaktadır. Tüm alüminyum bloklar ısı boruları blok birleşme yüzeylerine tam oturacak şekilde kanallı olarak imal edilmiştir. Isı boruları alüminyum blok içerisindeki ısı borusu yuvasının tamamına temas edecek şekilde ve temas direncini azaltmak için temas eden yüzeylere termal macun uygulanarak yerleştirilmiştir. Isı boruları her iki bloktaki yuvaların tamamına yuva boyunca tam temas edecek şekilde yerleştirildiği için bloklar arası mesafe 3 cm'dir. Dolayısıyla ısı borularının 10 cm uzunluğundaki bölüm buharlaştırıcı bölüm, 3 cm uzunluğundaki bölüm adyabatik bölüm ve 4 cm uzunluğundaki bölüm ise yoğuşturucu bölüm olarak çalışmaktadır. Bu sistemde de her bir batarya hücresindeki batarya yüzey sıcaklığını ölçmek ve ortam sıcaklığını ölçmek üzere K tipi termokupllar kullanılmıştır. Tasarlanan sistem soğutma işlemini dışarıdan herhangi bir enerji girişi ile sağlamadığı için pasif bir sistem olarak değerlendirilir. Şekil 2.4'de tasarlanan sistem detaylı olarak gösterilmiştir.



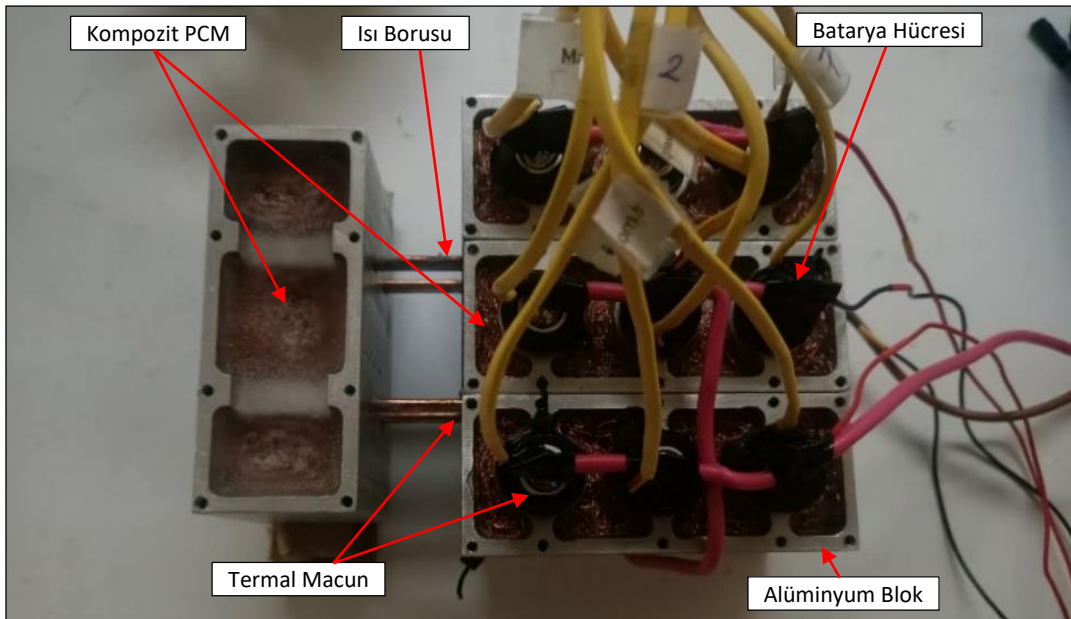
Şekil 2.4 FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanarak oluşturulan sistem (S3)

2.3.4. Kompozit FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanarak oluşturulan pasif sistem (S4)

Tasarlanan bu sistemde ise bir önceki sisteme göre FDM yerine kompozit FDM kullanılmıştır. Bu şekilde FDM'nin düşük ısıl iletkenliğinin kompozit hale getirilerek yükseltilmesi hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda kompozit FDM üretmek için kolay bulunabilen bir çözüm olan bakır file malzemesi kullanılmıştır. Bakır file malzemesi alüminyum blok içerisindeki her bir haznede FDM'ye göre kütsel oranı ve kompozit malzeme yoğunluğu aynı olacak şekilde kesilmiş ve hazne boşluğunu üniform olarak dolduracak formda şekillendirilerek haznelere yerleştirilmiştir. Tüm haznelere yerleştirilen bakır file kütsesi 205,5 gram, kullanılan FDM kütsesi ise 297 gram olup oluşturulan kompozit FDM'de bakır kütle oranı yaklaşık olarak %41'dir. Oluşturulan kompozit FDM yoğunluğu ise 1152 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Şekil 2.5'de alüminyum blok içersine kompozit FDM yapmak üzere yerleştirilen bakır file yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Alüminyum blok içine yerleştirilen bakır file yapısı

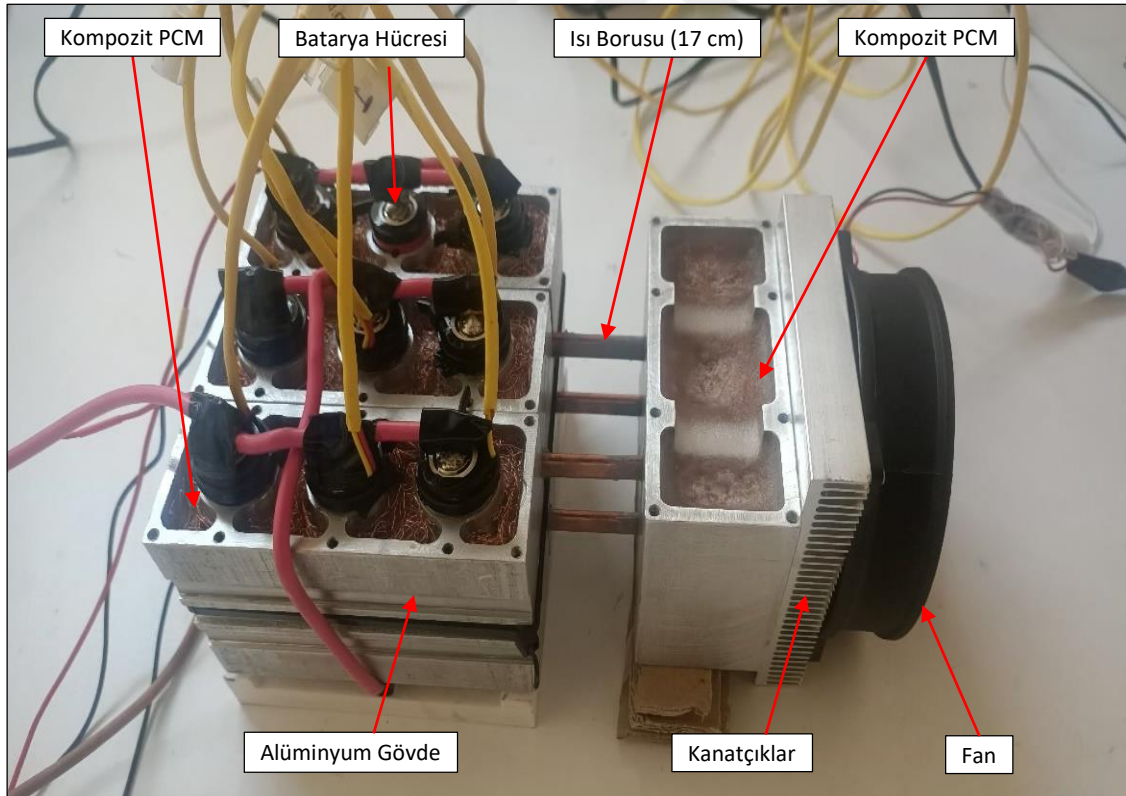


Şekil 2.6 Kompozit FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanarak oluşturulan pasif sistem (S4)

Haznelere bakır file yapısı yerleştirildikten sonra PCM eritilerek haznelere tam doluluk sağlanacak şekilde dökülmüş ve kompozit FDM elde edilmiştir. Tasarlanan sistem soğutma işlemini dışarıdan herhangi bir enerji girişi ile sağlamadığı için pasif bir sistem olarak değerlendirilir. Şekil 2.6’da ise kompozit FDM ile oluşturulan tasarım gösterilmiştir.

2.3.5. Kompozit FDM, alüminyum blok, ısı boruları (17cm) ve fan kullanarak oluşturulan aktif sistem (S5)

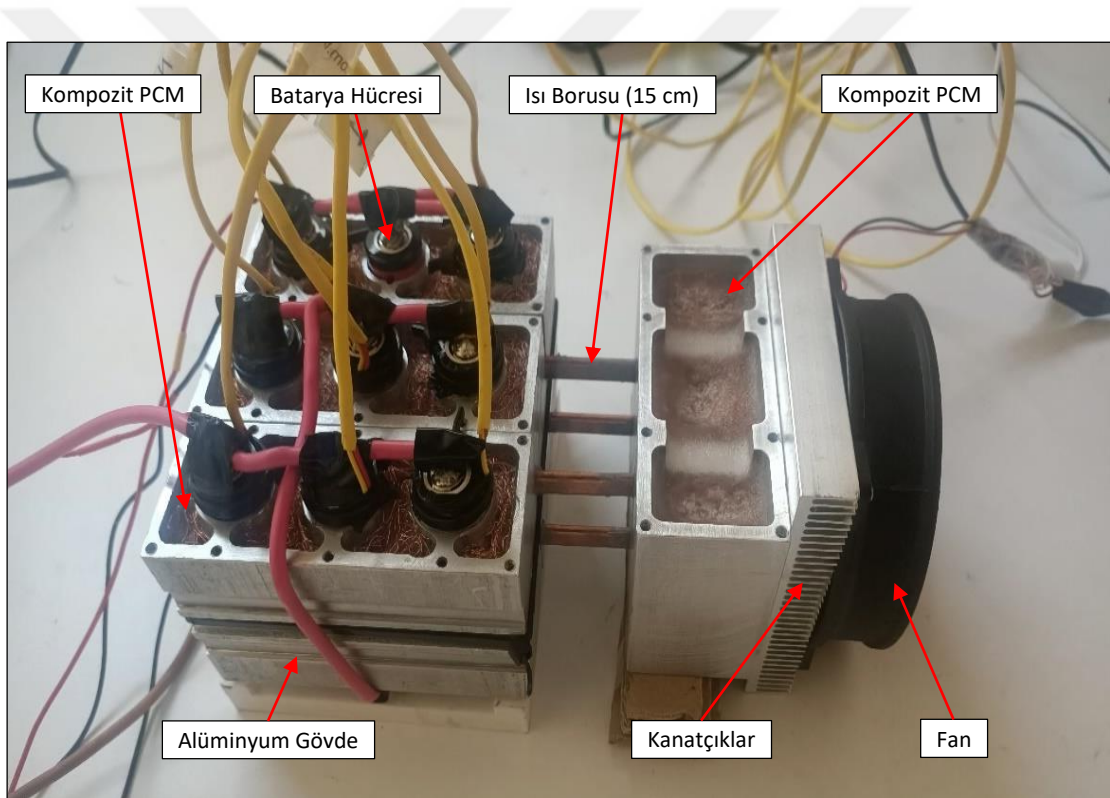
Tasarlanan bu sistemde ise bir önceki sisteme ilave olarak ikinci alüminyum bloğa alüminyum kanatçık ve soğutma fanı eklenmiştir. Bu sistemin oluşturulmasında ki amaç yüksek deşarj hızlarında oluşacak ısıyı hem birinci hem ikinci alüminyum bloktan dış ortama hızlı ve etkin bir şekilde uzaklaştırmaktır. Kanatçık taban yüzeyinin alüminyum bloğa tam temas etmesi için ara yüzeye termal macun uygulanmıştır. Soğutma fanı ise deşarj işlemine başlandığı zaman çalışacak şekilde ayarlanmıştır. Tasarlanan sistem soğutma işleminin bir bölümünü dışarıdan enerji girişi ile sağladığı için aktif bir sistem olarak değerlendirilir. Şekil 2.7’de tasarlanan sistem detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Kompozit FDM, alüminyum blok, ısı boruları (17cm) ve fan kullanarak oluşturulan aktif sistem (S5)

2.3.6. Kompozit FDM, alüminyum blok, ısı boruları (15cm) ve fan kullanarak oluşturulan aktif sistem (S6)

Tasarlanan bu sistemde ise bir önceki sisteme göre 17 cm'lik ısı boruları yerine 15 cm'lik ısı boruları kullanılmıştır. Böylece ısı borusu uzunluğunun batarya soğutma performansına etkisi incelenebilmiştir. Isı boruları her iki bloktaki yuvaların tamamına tüm kanal boyunca temas edecek şekilde yerleştirildiği için bloklar arası mesafe 1 cm'dir. Dolayısıyla ısı borularınının 10 cm uzunluğundaki bölüm buharlaştırıcı bölüm, 1 cm uzunluğundaki bölüm adyabatik bölüm ve 4 cm uzunluğundaki bölüm ise yoğuşturucu bölüm olarak çalışmaktadır. Tasarlanan sistem soğutma işleminin bir bölümünü dışarıdan enerji girişi ile sağladığı için aktif bir sistem olarak değerlendirilir. Şekil 2.8'de tasarlanan sistem detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Kompozit FDM, alüminyum blok, ısı boruları (15cm) ve fan kullanarak oluşturulan aktif sistem (S6)

3. BATARYA SICAKLIĞININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Batarya sıcaklığının hesaplanabilmesi için, şarj ve deşarj esnasında bataryada birim zamanda üretilen toplam ısı miktarının hesaplanması gerekmektedir. Lityum iyon bataryalar ısıyı hem bataryanın iç direnci nedeniyle, hem batarya içindeki kimyasal reaksiyonlar nedeniyle, hem yaşlanma sürecinde yan reaksiyonlar nedeniyle hem de hücre içindeki konsantrasyon farklılıklarından kaynaklı karışım işlemleri nedeniyle üretirler (Liu vd., 2014; Han vd., 2023). Bataryanın iç direnci nedeniyle üretilen ısı joule ısı olarak, bataryadaki kimyasal reaksiyonlar nedeniyle oluşan ısı ise entropik ısı olarak ifade edilir. Lityum iyon bataryaların yaşlanma süreci çok yavaş olup tek bir şarj/deşarj döngüsünde bataryadaki yan reaksiyon hızı çok yavaştır (Forgez, 2010). Karışım işleminden dolayı oluşan ısı ise dinamik şarj/deşarj hızlarında daha etkin olup, sabit akımlı uygulamalarda önemsizdir (Thomas ve Newman, 2003). Dolayısıyla eğer lityum iyon batarya sabit şarj/deşarj akımında test ediliyorsa karışım işlemi nedeniyle oluşan ısı ve yan reaksiyonlar nedeniyle oluşan ısı, entropik ısı ve joule ısısına nazaran önemsiz olup Liu vd., (2014) bataryada üretilen toplam ısının joule ısı ve entropik ısının toplamı olarak ifade edilebileceğini belirtmişlerdir.

Yapılan çalışmalar düşük deşarj hızlarında entropik ısının, yüksek deşarj hızlarında ise joule ısının bataryanın toplam ısı üretiminde daha etkin olduğunu ortaya koymuştur (Jeon ve Baek, 2011; Heubner vd., 2015). Bu durum joule ısısının akımın karesi ile doğru orantılı olması sebebiyledir.

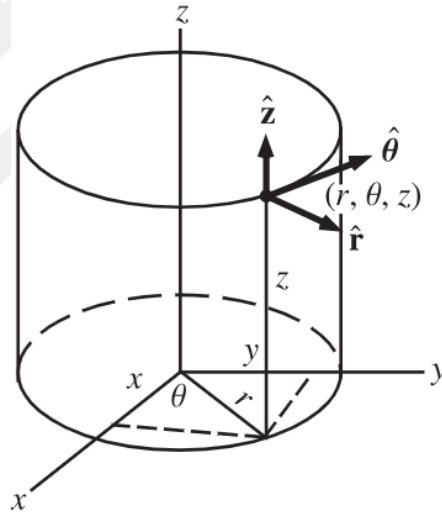
Lityum iyon bataryaların ısı davranışını sadece bataryanın kimyasal yapısı ve şarj/deşarj akım değerleri değil aynı zamanda bataryanın başlangıç sıcaklığı ve ortam sıcaklığı da belirlemektedir (Lin, 2017; Chen, 2013). Dolayısıyla ortam sıcaklığına bağlı olarak da lityum iyon bataryalar farklı ısı davranış sergilemektedirler.

Lityum iyon bataryaların sıcaklık dağılımı, bataryada oluşan ısı üretiminin termal modeller, elektrokimyasal modeller veya eşdeğer devre modeli (ECM) yardımı ile hesaplanmasıyla bulunabilir (Paccha-Herrera, 2020). Bataryadaki ısı üretiminin hacimsel ısı kaynağı olarak kullanıldığı termal modellemede bataryanın farklı deşarj akımlarındaki ve farklı batarya doluluk oranlarındaki ısı üretimi Bernardi vd. (1985) tarafından önerilen [3.2] nolu denklem yardımıyla hesaplandıktan sonra bataryanın sıcaklık dağılımı enerjinin korunum denkleminin sayısal olarak çözülmesi ile kolaylıkla bulunabilir. Gao

vd., (2021) bataryaların küçük boyutlarda olması, batarya kutuplarının toplam ısı üretimine etkisinin az olması ve batarya ısı üretiminin bataryanın gövdesinde olmasından dolayı bataryaları termal olarak modellerken bataryaların basitçe hacimsel bir ısı kaynağı şeklinde modellenebileceğini ifade etmiştir. Bu çalışmada bataryanın termal modellenmesinde hem Bernardi vd. (1985) tarafından önerilen ısı üretim denkleminin hacimsel ısı kaynağı olarak kullanıldığı model (*Hacimsel Isı Kaynağı Modeli*), hem de ANSYS Fluent'te batarya modellenmesinde hazır modül olarak kullanılan ve elektrokimyasal modellerden biri olan NTGK alt modeli kullanılmıştır.

3.1. Hacimsel Isı Kaynağı Modeli (HIKM)

Bu çalışmada kullanılan batarya hücreleri 18650 tipte ve silindirik geometride olduğundan batarya hücresi içindeki enerjinin korunumu denklemi ile batarya çevresindeki akışkan ortam için kullanılan süreklilik, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri Şekil 3.1'de gösterildiği üzere silindirik koordinat sisteminde verilmiştir.



Şekil 3.1 Silindirik koordinat sistemi

Batarya içindeki diferansiyel bir parça üzerindeki enerji korunum denkleminde batarya içindeki enerjinin korunumu denklemi silindirik koordinatlar için aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k_\theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}_{gen} \quad [3.1]$$

Bu denklemde ρ değeri bataryanın malzemesinin yoğunluğunu, C_p değeri bataryanın özgül ısısını, T değeri batarya sıcaklığını, t değeri zamanı, k_r, k_θ ve k_z değerleri

bataryanın silindirik koordinatlarda r, θ ve z yönündeki ısı iletim katsayılarını, \dot{q}_{gen} değeri ise bataryanın birim hacimdeki birim zamandaki ısı üretimini ifade etmektedir.

Diğer bir yandan batarya çevresindeki akışkan hava ortamı için havanın çalışma şartlarında sıkıştırılmaz gaz olduğu kabulü yapılarak silindirik koordinatlarda sırasıyla süreklilik denklemi, radyal yöndeki, açısız yöndeki ve eksenel yöndeki momentum denklemleri ile enerjinin korunumu denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad [3.2]$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\theta^2}{r} \right) \\ & = \rho g_r - \frac{\partial p}{\partial r} \\ & + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{u_r}{r^2} \right) \end{aligned} \quad [3.3]$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{u_r u_\theta}{r} \right) \\ & = \rho g_\theta - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \\ & + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta}{r^2} \right) \end{aligned} \quad [3.4]$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \\ & = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad [3.5]$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial T}{\partial t} + u_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \\ & = \frac{\dot{q}_{gen}}{C_p} + \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \\ & + \frac{1}{\rho C_p} \left(2\mu \left[\left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 \right] \right. \\ & + \mu \left[\left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} \right)^2 \right. \\ & \left. \left. + \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right)^2 \right] \right) \end{aligned} \quad [3.6]$$

Bu denklemlerde u_r, u_θ ve u_z değerleri batarya çevresindeki havanın silindirik koordinatlarda r, θ ve z yönündeki hızlarını, g_r, g_θ ve g_z değerleri silindirik koordinatlarda r, θ ve z yönündeki yerçekimi ivmesini, p değeri havanın basıncını, α değeri havanın ısı yayılım katsayısını ve μ değeri ise havanın dinamik viskozitesini ifade etmektedir.

[3.1] nolu denklem ile [3.2], [3.3], [3.4], [3.5] ve [3.6] denklemlerin eş zamanlı olarak sayısal yöntemler ile başlangıç ve sınır şartları da uygulanarak çözülmesiyle hem batarya içindeki hem de batarya çevresindeki sıcaklık dağılımının zamana göre değişimi sayısal olarak bulunabilir.

Bernardi vd. (1985) yaptıkları çalışmada bataryada birim zamanda üretilen toplam ısının aşağıdaki [3.7] nolu formülle ifade edilebileceğini belirtmiştir. [3.7] nolu denklemde eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim bataryada üretilen joule ısıyı (\dot{Q}_{joule}), ikinci terim ise bataryada üretilen entropik ısıyı (\dot{Q}_{ent}) ifade etmektedir. Bataryada üretilen joule ısı ve entropik ısı sırasıyla [3.8] ve [3.9] nolu denklemlerde ayrıca belirtilmiştir.

$$\dot{Q}_{gen} = I(V_{oc} - V) + \left(-IT \frac{dV_{oc}}{dT}\right) \quad [3.7]$$

$$\dot{Q}_{joule} = I(V_{oc} - V) \quad [3.8]$$

$$\dot{Q}_{ent} = -IT \frac{dV_{oc}}{dT} \quad [3.9]$$

[3.7] nolu denklemde I şarj/deşarj akımını (deşarj olması durumunda $I > 0$, şarj olması durumunda $I < 0$), V_{oc} batarya boşta iken açık devre voltajını, V batarya yükte iken batarya voltajını, $\frac{dV_{oc}}{dT}$ ise entropi katsayısını ya da sıcaklık katsayısını ifade etmektedir.

Isı üretiminin batarya içinde homojen dağılım gösterdiği varsayıldığından, birim hacimdeki ısı üretimi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\dot{q}_{gen} = \frac{\dot{Q}_{gen}}{\forall} \quad [3.10]$$

Denklemde (\forall) her bir batarya hücresinin hacmini ifade etmektedir. [3.7] nolu denklem bataryanın birim hacmi için [3.10] nolu denklem kullanarak yeniden yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir. Denklemde kullanılan i değeri birim hacme denk gelen şarj/deşarj akımını ifade eder.

$$\dot{q}_{gen} = i^2(V_{oc} - V) - iT \frac{dV_{oc}}{dT} \quad [3.11]$$

[3.11] nolu denklemde eşitliğin sağ tarafındaki ilk kısım batarya iç direncinden dolayı birim hacimde oluşan *joule ısıyı*, eşitliğin sağ tarafındaki ikinci kısım ise bataryadaki kimyasal reaksiyondan dolayı birim hacimde oluşan *entropik ısıyı* ifade etmektedir. Dolayısıyla batarya tarafından üretilen toplam ısıyı hesaplayabilmek için hem bataryada yük altındaki gerilim farkı ($V_{oc} - V$) değerini, dolayısıyla R batarya iç direncini, hem de $\frac{dV_{oc}}{dT}$ batarya entropi katsayısını ölçmek gereklidir.

3.1.1. Batarya toplam iç direncinin hesaplanması

Batarya yüke bağlandığı zaman batarya iç direncinden dolayı batarya uçları arasında okunan gerilim değerinde düşme meydana gelir. Bu düşme hem bataryanın omik direncinden (R_{omik}), hem batarya içindeki yük transfer direncinden (R_{YT}) hem de difüzyon (konsantrasyon) direncinden (R_{dif}) kaynaklanır (Ratnakumar,2006; Schweiger, 2010).

$$R = R_{omik} + R_{YT} + R_{dif} \quad [3.12]$$

Omik direnç R_{omik} , batarya yüke bağlandığı ilk anda elektrotların elektronik direnci ve elektrolitin iyonik direnci nedeniyle oluşur. Yük transfer direnci R_{YT} , batarya yüke bağlandığı ilk birkaç saniye içerisinde bataryanın çift tabakalı kapasitansı ve elektrot ile elektrolit ara yüzeyindeki yük transfer reaksiyonundaki direnç nedeniyle oluşur. Difüzyon direnci R_{dif} ise iyonların şarj veya deşarj işlemindeki difüzyonu esnasında oluşur (Barai, 2018). Dolayısıyla batarya yüke bağlandığı andaki voltaj değeri aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$V = V_{oc} - \Delta V_{omik} - \Delta V_{YT} - \Delta V_{dif} \quad [3.13]$$

Denklemden ΔV_{omik} omik direnç nedeniyle, ΔV_{YT} yük transferi direnci nedeniyle, ΔV_{dif} ise difüzyon direnci nedeniyle oluşan voltaj değişimini ifade etmektedir. Toplam voltaj değişimi ΔV_{toplam} ise;

$$\Delta V_{toplam} = \Delta V_{omik} + \Delta V_{YT} + \Delta V_{dif} \quad [3.14]$$

formülü ile hesaplanabilir. Bu düşüş değeri aynı zamanda batarya toplam iç direnci ile batarya üzerinden geçirilen akımın çarpımına eşittir (Onda, 2003; Finden, 2012; Seyed Ehsan, 2015; Trinuruk vd., 2022).

$$\Delta V_{toplam} = I \cdot R \quad [3.15]$$

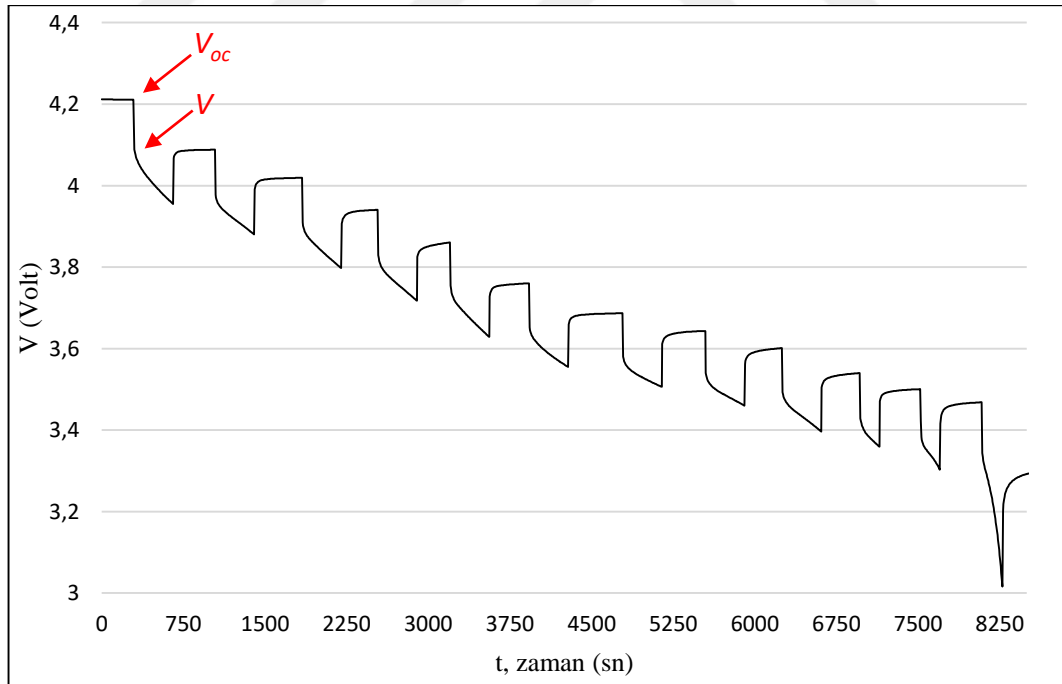
Başka bir deyişle batarya herhangi bir devreye bağlı değilken iki ucu arasında okunan açık devre voltaj değeri V_{oc} ve batarya devreye bağlanıp sabit akımda yük çekildiğinde ki voltaj değeri V ölçülür ve bu iki değer arasındaki farkın toplam devre akımına bölünmesi ile bataryanın o anki çalışma sıcaklığı ve batarya doluluk oranındaki R iç direnci hesaplanabilir (Finden, 2012; Seyed Ehsan, 2015; Trinuruk vd., 2022).

Yapılan çalışmalar, R batarya iç direncinin hem sıcaklığın hem de batarya doluluk oranının bir fonksiyonu olduğunu ancak batarya sıcaklığının artmasıyla birlikte batarya iç direncinin batarya sıcaklığı ve batarya doluluk oranına olan bağımlılığının azaldığını ve neredeyse sabit bir seyir izlediğini ortaya koymuştur (Inui vd., 2007; Xie vd., 2018; Trinuruk vd., 2022).

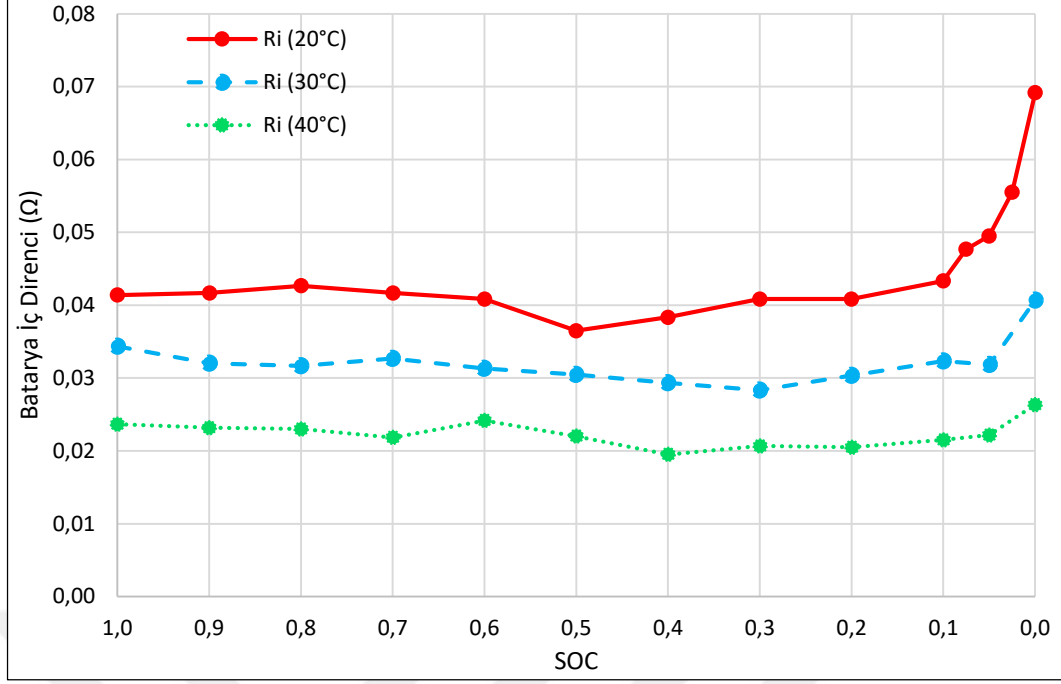
Bataryalar kapasitif, indüktif ve omik davranış gösteren karmaşık bir yapıya sahip olması ve bataryanın lineer olmayan ve zamana bağlı bir davranış sergilemesi nedeniyle batarya iç direncini ölçmek kolay değildir (Schweiger, 2010). Batarya iç direncini ölçmek üzere birçok yöntem mevcut olup en çok kullanılan yöntemler arasında puls güç testleri veya hibrit puls güç karakterizasyon (HPPC) testlerinde olduğu gibi bataryaya kısa süreli DC akım sinyali uygulanması veya elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) testinde olduğu gibi AC akım sinyali uygulanması gelmektedir (Barai, 2018). Puls güç testlerinin amacı bataryanın dikdörtgen bir akım sinyaline karşı gerilim cevabını analiz etmektir (Bialon, 2023). Puls güç testleri genellikle elektron transferi, iyon transferi ve iyon difüzyonu süreçlerini kapsayacak şekilde 1 ila 30 saniye arasında uygulanır (Uddin, 2014). NMC tip bataryalarda puls uzunluğu olarak 9 ve 18 saniye arası yeterli olmakla birlikte Huang (2020), Li (2020), Haghjoo (2022), Thanagasundram (2012), Barai (2018) ve Tran'a (2021) göre genellikle bu süre 10 saniye olarak uygulanır. LFP tip bataryalarda ise elektron transferi, iyon transferi ve iyon difüzyon süreçleri daha yavaş olduğundan 60 saniye gibi daha uzun puls süreleri uygulanır (Bialon, 2023). Ayrıca Ratnakumar (2006) tarafından batarya iç direncini hesaplamak üzere yapılan puls güç testlerinde ortalama 20°C sabit ortam sıcaklığında akım puls değeri büyüklüğünün batarya direncini

değiştirmediğini ve toplam batarya direncinin uygulanan puls akım büyüklüğüne göre değişiminin sabit bir seyir izlediğini tespit etmiştir.

Bu çalışmada bataryaların iç direncini 20°C, 30°C ve 40°C sabit ortam sıcaklıklarında ve farklı batarya doluluk oranlarında hesaplamak üzere çeşitli testler yapılmıştır. İlk olarak batarya %100 doluluk oranında iken %90 doluluk oranına ulaşıncaya kadar sabit akımda yük çekilmeye başlanmış ve %90 doluluk oranına ulaşınca yük kaldırılmış ve batarya voltaj dengesine gelene kadar beklenmiş ve testler batarya doluluk oranı %0'a ulaşıncaya kadar devam ettirilmış, her farklı batarya doluluk oranında açık devre voltajı V_{oc} ve yük yüklendiği andan 10 saniye sonraki devre voltajı V değerleri ölçülmüştür. Şekil 3.2' de 30°C ortam sıcaklığında yapılan testler sonucu elde edilen V değişim grafiği gösterilmiştir. Her farklı ortam sıcaklığında ve her bir batarya doluluk oranında V_{oc} ve V değerleri (yük başlangıcından sonraki 10. saniyedeki gerilim değerleri) ölçüldükten sonra [3.15] nolu formül yardımıyla batarya iç direnci R hesaplanmıştır. Şekil 3.3 batarya iç direncinin farklı ortam sıcaklıklarında ve farklı batarya doluluk oranlarındaki değerimini göstermektedir.



Şekil 3.2 30°C Sabit ortam sıcaklığında batarya iç direncinin hesaplanması için yapılan deşarj testi



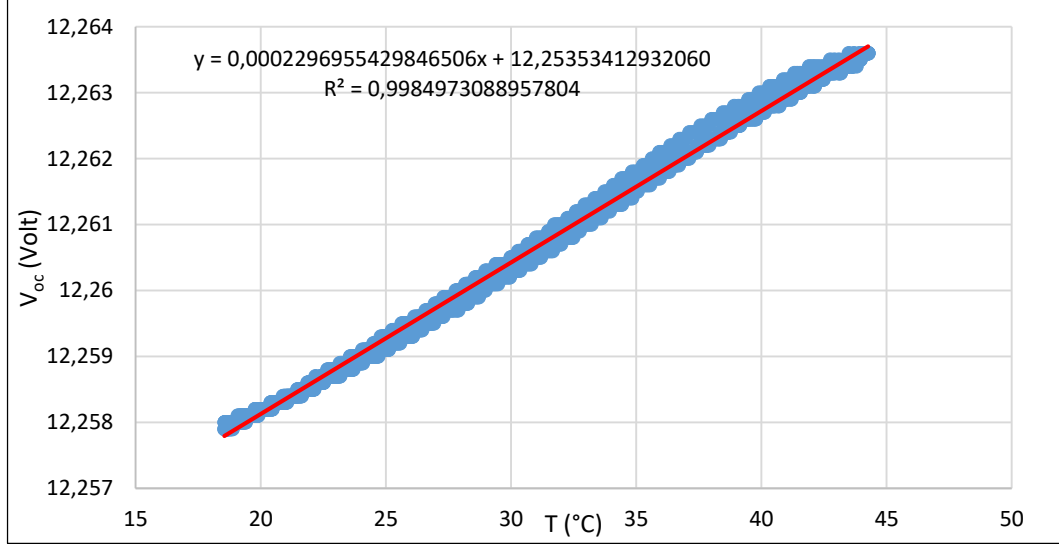
Şekil 3.3 Farklı ortam sıcaklıklarında ve batarya doluluk oranlarında batarya iç direnci, R_i

3.1.2. Batarya entropi katsayısının hesaplanması

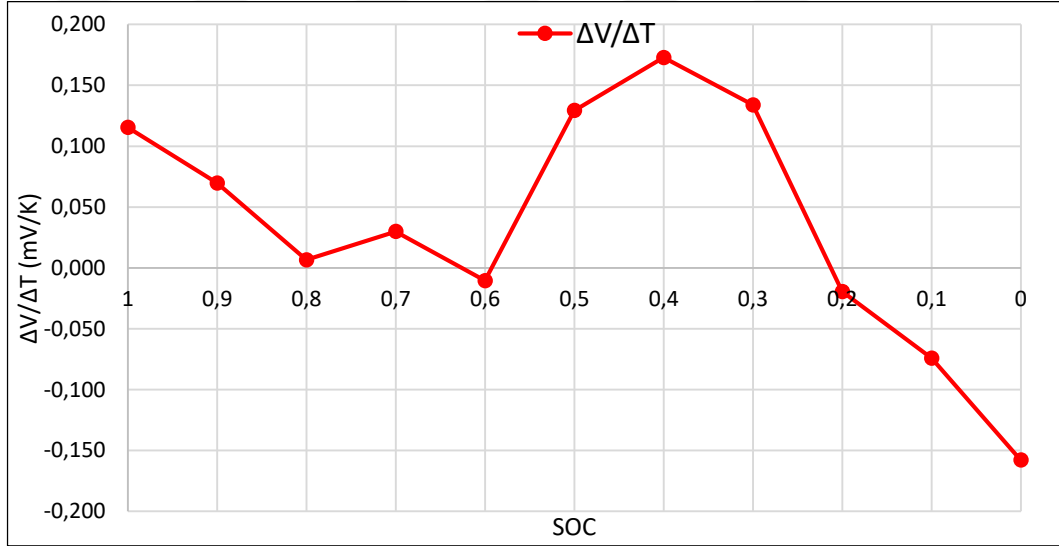
Batarya entropi katsayısı $\frac{dV_{oc}}{dT}$ batarya doluluk oranının bir fonksiyonu olup sıcaklık ile çok fazla değişkenlik göstermemektedir (Inui vd., 2007; Karimi ve Li, 2013; Wu vd., 2017b). Entropi katsayısı yaklaşık olarak aşağıdaki formülle ifade edilebilir.

$$\frac{dV_{oc}}{dT} \cong \frac{V_{oc}(T_2) - V_{oc}(T_1)}{(T_2 - T_1)} \quad [3.16]$$

Bataryaların herhangi bir doluluk oranındaki açık devre voltajının sıcaklığa göre değişimi ölçülerek bataryanın her bir farklı doluluk oranındaki entropi katsayısı bulunabilir. Şekil 3.4'te %90 batarya doluluk oranında batarya açık devre voltajının batarya sıcaklığına göre değişimi gösterilmiştir. Her bir batarya doluluk oranında ilgili testler yapılarak bataryanın farklı doluluk oranlarındaki entropi katsayıları bulunmuştur. Çizelge 3.1'de entropi katsayısının batarya doluluk oranına göre değişimi listelenmiş ve grafik olarak Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 %90 batarya doluluk oranında batarya açık devre voltajının batarya sıcaklığına göre değişimi



Şekil 3.5 18650 tip lityum iyon batarya için entropi katsayısının batarya doluluk oranına göre değişimi

Çizelge 3.1 Entropi katsayısının batarya doluluk oranına göre değişimi

SOC	$\Delta V/\Delta T$	
1	0,115	mV/K
0,9	0,070	mV/K
0,8	0,007	mV/K
0,7	0,030	mV/K
0,6	-0,011	mV/K
0,5	0,129	mV/K
0,4	0,173	mV/K
0,3	0,134	mV/K
0,2	-0,019	mV/K
0,1	-0,074	mV/K
0	-0,158	mV/K

3.1.3. Hacimsel ısı kaynağı modeli denkleminin sayısal çözümü

Lityum iyon bataryalar metal ceket içerisine pozitif ve negatif elektrot levhalar, elektrolit ve ayırıcıdan oluşan katmanlı bir yapıdan oluşmaktadır. Lityum iyon bataryaların katmanlı yapısı nedeniyle homojen bir yapıda olmamasına rağmen araştırmalar matematiksel modelleme yapılırken bazı varsayımlar yapılarak sistemin yarı homojen olarak modellenmesiyle de oldukça doğru ve kabul edilebilir sonuçlar elde edildiğini göstermiştir (Choi ve Yao, 1979; Chen ve Evans, 1993; Wu vd., 1998). Silindirik bataryalarda aksenal yöndeki ısı iletim direnci radyal yöndeki ısı iletim direncinden çok daha düşük olduğundan modelleme yapılırken radyal yöndeki ısı iletim katsayısı tüm bataryanın ısı iletim katsayısı olarak kabul edilebilir.

Literatürde benzer batarya sistemleri modellenirken ısı iletim katsayısı (k) ve özgül ısısının (C), sabit ve sırasıyla 3 W/mK ve 1000 J/kgK olarak kabul edildiğinden sunulan bu çalışmada da aynı değerler kullanılmış ve kullanılan değerler Çizelge 3.2' de verilmiştir. (Al Hallaj vd., 1999).

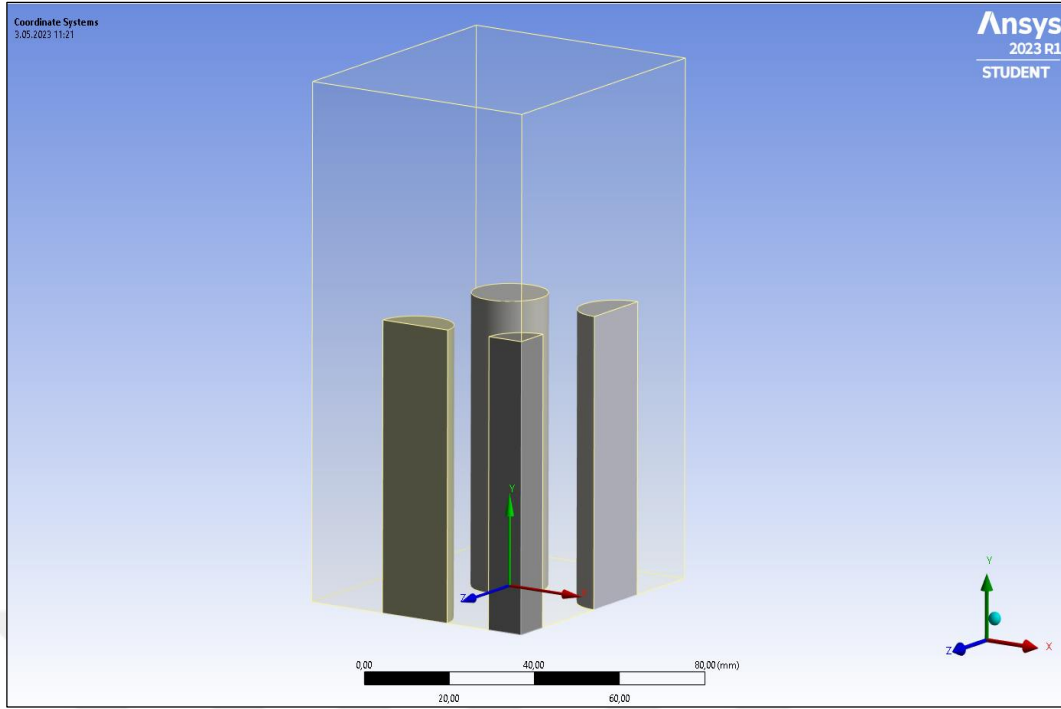
Çizelge 3.2 Bataryanın termal ve fiziksel özellikleri

Isı İletim Katsayısı	3 W/mK
Batarya Özgül Isısı	1000 J/kgK
Yoğunluk	2539 kg/m ³

Sayısal analiz için ANSYS 2023 Fluent Modülü kullanılmıştır. Modelleme yapılırken batarya k ısı iletim katsayısının sıcaklığa göre değişmeyip sabit kaldığı ve batarya yüzeyindeki renkli PVC tabakanın ısı iletimine olan etkisi ihmal edilmiştir.

Programda modülün çeyreği simetrik olduğu için hesaplama zamanını kısaltmak ve daha hassas sonuçlar elde edebilmek amacıyla sadece Şekil 3.6'da gösterilen bölge modellenmiştir.

Mesh yapılırken element boyutu 1,2 mm olacak şekilde seçilmiş, özellikle pil yüzeyine temas eden bölgelerde sıcaklık dağılımı daha keskin olacağından programın *inflation* özelliği kullanılarak Şekil 3.7'de gösterildiği gibi söz konusu bölgelerde daha ince bir mesh yapısı elde edilmiştir.



Şekil 3.6 Ansys Fluent'te modellenen bölge

Programda batarya sıcaklıklarının çok yüksek seviyelere çıkmaması nedeniyle *ışınım* ile ısı transferi ihmal edilmiş ve sadece *doğal taşınım* ile ısı transferi modellenmiştir. Doğal taşınım ile modelleme yapılırken havanın *sıkıştırılmaz ideal gaz* olduğu varsayımı yapılmış olup yoğunluğu sıcaklıkla değişmektedir. Doğal taşınım ile ısı transferi esnasında akışın laminar akış ya da türbülanslı akış olduğuna karar vermek üzere Rayleigh sayısı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr \quad [3.17]$$

Denklemden g yerçekimi ivmesini, β genleşme katsayısını, T_s batarya yüzey sıcaklığını, T_∞ ortam sıcaklığını, L_c karakteristik uzunluğu, ν kinematik viskoziteyi, Pr ise Prandtl sayısını ifade etmektedir.

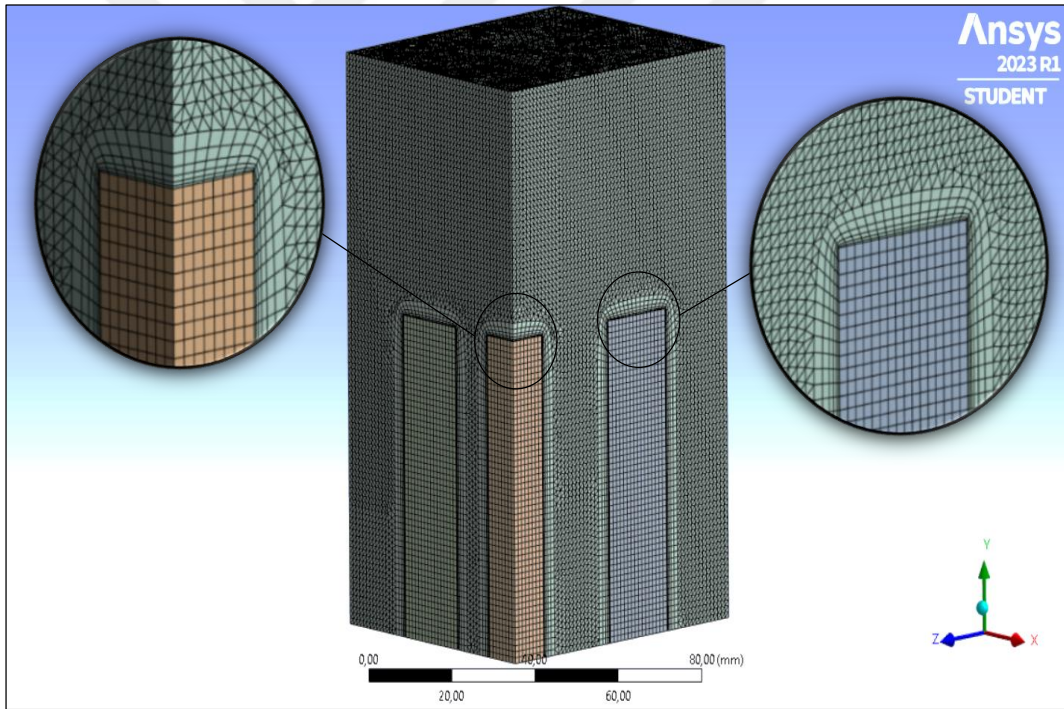
Hesaplanan Rayleigh sayısı değerinin maksimum $1,12e+6$ değerine ulaştığından ve bu değer türbülanslı akım sınır değeri olan $1e+9$ değerinden küçük olduğundan dolayı akışın laminar olduğu sonucuna varılmış ve akış laminar olarak modellenmiştir.

Çözüm yapılırken literatürde benzer çalışmalarda sıklıkla kullanılan ve daha doğru sonuçlar veren simülasyon konfigürasyonları seçilmiştir. Bu konfigürasyonlar içerisinde, çözüm metodu için basınç ve hız alanlarını ilişkilendirmek üzere zamana bağlı ısı

transferinde kullanılması tavsiye edilen ve daha doğru sonuçlar veren *SIMPLE* algoritması, basıncın boyutsal diskritizasyonu için *gövde kuvveti ağırlıklı algoritma*, momentum ve enerjinin boyutsal diskritizasyonu ve zamana bağlı modelleme için *ikinci derece örtük algoritma* seçilmiştir. Kullanılan konfigürasyonlar Çizelge 3.3’de tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 3.3 Sayısal modellemede kullanılan konfigürasyonlar

Akış Rejimi	: Laminer Akış
Çözüm Metodu	: SIMPLE
Basınç Boyutsal Diskritizasyonu	: Gövde kuvveti ağırlıklı algoritma
Momentum Boyutsal Diskritizasyonu	: İkinci derece örtük algoritma
Enerjinin Boyutsal Diskritizasyonu	: İkinci derece örtük algoritma
Zamana Bağlı Modelleme	: İkinci derece örtük algoritma



Şekil 3.7 Fluent’te elde edilen mesh yapısı

Batarya hücrelerinde oluşan ve daha önce [3.11] nolu denklem ile belirtilen ısı üretimi modellenirken batarya ısı üretiminin sabit olmayıp batarya doluluk oranına, batarya iç direncine ve deşarj akımına göre değişmesi nedeniyle 1C, 3C ve 5C olmak üzere her bir deşarj hızı için Fluent programında Şekil 3.8’de gösterildiği gibi 3 adet UDF (kullanıcı tarafından tanımlanan fonksiyon) yazılmış, ısı üretimini tanımlayan matematik model bu

fonksiyon içine yerleştirilmiştir. Denklemden ısı kaynağının hesaplanabilmesi için gerekli olan I akım değeri sabit olup *entropi katsayısı* sadece batarya doluluk oranına göre ve R iç direnç değeri ise Seyed Ehsan'ın (2015) çalışmalarına göre batarya doluluk oranına ve sıcaklığa göre değişmektedir. Başlangıçta batarya modülü sıcaklığı ortam sıcaklığı ile aynı olup ısı üretim denkleminin ilk adımının hesaplanmasında bu sıcaklık değeri kullanılmış, bu şekilde birim hacimdeki ısı üretimi hesaplanarak ikinci adımda kullanılacak sıcaklık değeri bulunmuştur.

Sayısal analiz yapılırken başlangıç şartları olarak atmosferik basınçta ve ortam sıcaklığında durgun hava bulunduğu, sınır şartları olarak ise oluşturulan çeyrek modelin simetri yüzeylerinin simetri sınır şartı olduğu, yan yüzeylerinden ortam sıcaklığında ve atmosferik basınçta giriş, üst yüzeyinden ortam sıcaklığında atmosferik basınçta çıkış olduğu, zemin yüzeyinden herhangi bir ısı transferi olmadığı kabul edilmiş ve Şekil 3.9'da ve Çizelge 3.4'de bahsedilen sınır koşulları belirtilmiştir.

Çizelge 3.4 Başlangıç ve sınır koşulları

Başlangıç Koşulları	$t = 0$ sn	$T_{batarya} = T_{\infty}$
		$T_{hava} = T_{\infty}$
		$P_{hava} = P_{\infty}$
		$v = 0$
Sınır Koşulları	Akış Bölgesi Yan ve Üst Yüzey Sınırlarında	$T_{hava} = T_{\infty}$ $P_{hava} = P_{\infty}$
	Simetri Yüzeylerinde Simetri Sınır Şartı	$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$
	Taban Yüzeyinde Adyabatik Sınır Şartı	$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$

```

#include "udf.h"

DEFINE_SOURCE(heat_generation,c,t,dS,eqn)
{
real SOC,ds,tm,Ri,R_,R01,volume,source,temp,i;
int C;
tm = CURRENT_TIME;
SOC = 1.-((tm)/720.); /* t=720 for C=5, t=1200 for C=3, t=3600 for C=1; */
volume=0.00001654; /* bir pilin hacmi [m3]/
C=5; /* C RATE */
i=2.*C;
temp = C_T(c,t);

/*(ΔS)fonksiyonu, deneyden elde edilen */
if ((SOC > 0.9) && (SOC <= 1.))
ds =(0.45*SOC-0.335)*96485./1000.;
else if ((SOC > 0.8) && (SOC <= 0.9))
ds =(0.63*SOC-0.497)*96485./1000.;
else if ((SOC > 0.7) && (SOC <= 0.8))
ds =(-0.23*SOC+0.191)*96485./1000.;
else if ((SOC > 0.6) && (SOC <= 0.7))
ds =(0.41*SOC-0.257)*96485./1000.;
else if ((SOC > 0.5) && (SOC <= 0.6))
ds =(-1.4*SOC+0.829)*96485./1000.;
else if ((SOC > 0.4) && (SOC <= 0.5))
ds =(-0.44*SOC+0.349)*96485./1000.;
else if ((SOC > 0.3) && (SOC <= 0.4))
ds =(0.39*SOC+0.017)*96485./1000.;
else if ((SOC > 0.2) && (SOC <= 0.3))
ds =(1.53*SOC-0.325)*96485./1000.;
else if ((SOC > 0.1) && (SOC <= 0.2))
ds =(0.55*SOC-0.129)*96485./1000.;
else if ((SOC >= 0.) && (SOC <= 0.1))
ds =(0.84*SOC-0.158)*96485./1000.;

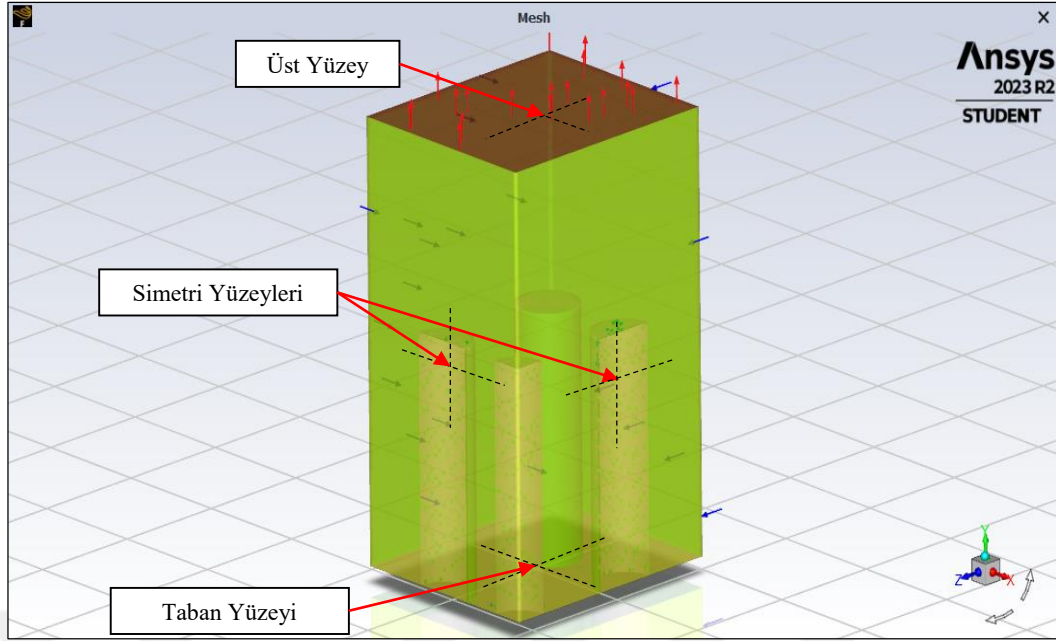
/* Ri */
if ((SOC >= 0.05) && (SOC <= 1.))
Ri=(3.61961 - 0.02901999*temp + 0.00007688571*temp*temp - 6.666667e-
8*temp*temp*temp);
else if ((SOC >= 0.) && (SOC < 0.05))
Ri=(3.61961 - 0.02901999*temp + 0.00007688571*pow(temp,2) - 6.666667e-
8*pow(temp,3)*(1.18059-3.6118*SOC);

source = ((Ri*i*i)-(i*temp*ds/96485.))/volume;
C_UDMI(c,t,0)=source; /* total heat generation */
C_UDMI(c,t,1)=(Ri*i*i)/volume; /* irreversible heat generation */
C_UDMI(c,t,2)=(-i*temp*ds/96485.)/volume; /* reversible heat generation */
C_UDMI(c,t,3)=SOC;

dS[eqn] = 0.0;
return source;
}

```

Şekil 3.8 Fluent'te yazılan UDF (kullanıcı tanımlı fonksiyon)



Şekil 3.9 Modellenen bölgeye uygulanan sınır koşulları

Sayısal analiz süresi olarak gerçek deşarj süreleri olan 1C deşarj hızı için 3600 saniye, 3C deşarj hızı için 1200 saniye ve 5C deşarj hızı için 720 saniye uygulanmıştır. Sayısal analiz adım aralığı olarak 1 saniye seçilmiştir. Diğer bir yandan literatürdeki benzer çalışmalara göre her adımdaki maksimum iterasyon sayısı olarak 20, yakınsama değerleri için ise süreklilik ve momentum denklemleri için $1e-3$, enerji denklemi için ise $1e-6$ olarak seçilmiştir. Seçilen değerler çizelge 3.5’de tablo olarak verilmiştir.

Çizelge 3.5 Sayısal modellemede kullanılan yakınsama değerleri ve iterasyon sayısı

Her Adımdaki Maksimum İterasyon Sayısı:	20
Süreklilik Denklemi Yakınsama Değeri:	$1e-3$
Momentum Denklemi Yakınsama Değeri:	$1e-3$
Enerji Denklemi Yakınsama Değeri:	$1e-6$

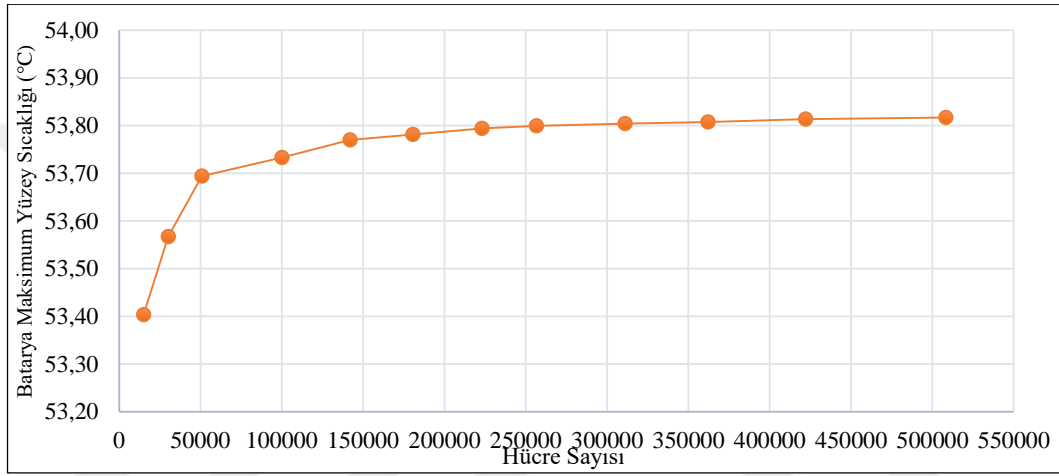
Ayrıca, söz konusu model farklı hücre (eleman) ve node (düğüm) sayılarına denk gelecek şekilde mesh yapılarak elde edilen sayısal analiz sonuçlarının hücre sayısı ile ilişkisi incelenmiştir. Çizelge 3.6’da farklı hücre sayılarına göre elde edilen maksimum batarya yüzey sıcaklıkları verilmiş, sıcaklıkların hücre sayısına göre değişimi ise Şekil 3.10’da gösterilmiştir.

Sayısal analiz yapılırken hücre sayısının artmasıyla hesaplanan batarya yüzey sıcaklığının arttığı ancak yaklaşık 422 bin adet hücre sayısından sonra artan hücre sayısına rağmen deşarj sonunda hesaplanan batarya maksimum yüzey sıcaklığının neredeyse hiç

değişmediği ve sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla doğru bir sayısal çözümleme yapabilmek için 422 bin hücre sayısı ile elde edilen meshin yeterli olduğu kanaatine varılmıştır.

Çizelge 3.6 Farklı hücre sayılarında elde edilen batarya maksimum sıcaklık değerleri

	1. Mesh	2. Mesh	3. Mesh	4. Mesh	5. Mesh	6. Mesh	7. Mesh	8. Mesh	9. Mesh	10. Mesh	11. Mesh	12. Mesh
Hücre Sayısı	14988	30305	50864	100066	142030	180515	223122	256487	311078	362019	422006	508245
T-maks. (Batarya Yüzeyi) [°C]	53,403	53,567	53,694	53,733	53,770	53,781	53,794	53,799	53,804	53,807	53,813	53,817



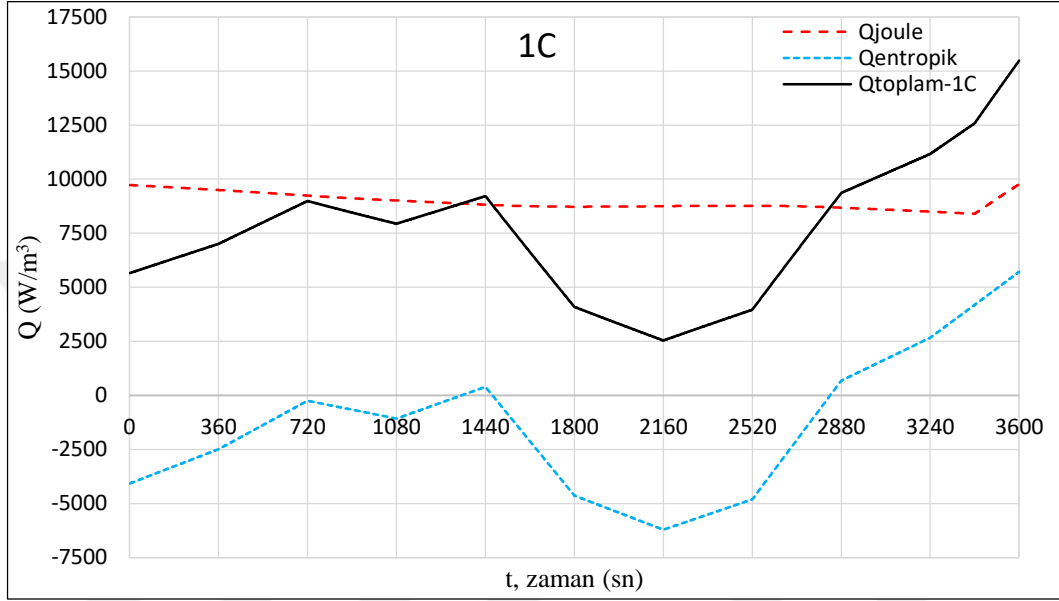
Şekil 3.10 Farklı hücre sayılarına göre batarya maksimum sıcaklık değerleri değişimi

3.1.3.1. Hacimsel ısı kaynağı modelinin 20°C ortam sıcaklığında sayısal çözümü

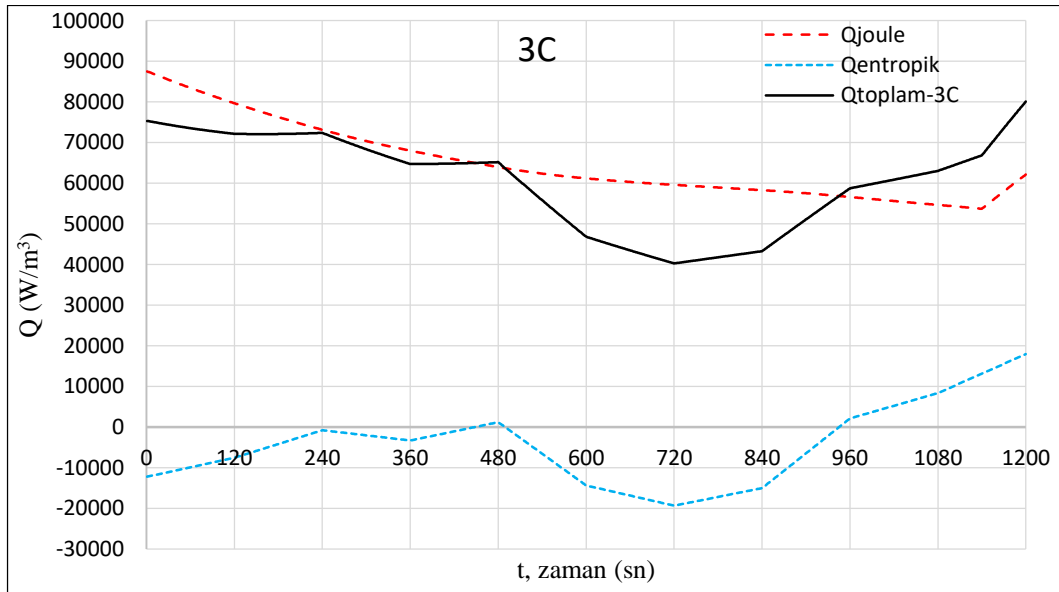
Sayısal model ile batarya yüzey sıcaklıklarını hesaplayabilmek için gerekli olan joule ısı, entropik ısı ve toplam ısı sabit olmayıp zamana göre değişim göstermeleri nedeniyle 1C, 3C ve 5C deşarj hızları için Fluent modülünde UDF yazılmış ve 20°C ortam sıcaklığında elde edilen joule ısı, entropik ısı ve toplam ısı üretim değerleri sırasıyla Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 3.14'te 1C, 3C ve 5C deşarj hızlarında ve 20°C ortam sıcaklığında bataryada üretilen toplam ısının zamana göre değişimi verilmiştir.

Bilindiği üzere bataryadaki toplam ısı üretimi joule ısı ve entropik ısının toplamına eşittir. Bataryada üretilen joule ısı akımın karesi ile doğru orantılı olduğundan joule ısı her zaman pozitiftir. Ancak batarya iç direnci sıcaklığa ve batarya doluluk oranına göre değişen bir performans izlediğinden farklı batarya doluluk oranlarında ve artan batarya sıcaklıklarında bataryada birim hacimde üretilen joule ısı deşarj işlemi boyunca artış ya da azalış gösterebilir. Diğer bir yandan ısı üretiminde ikinci terim olan entropik ısının

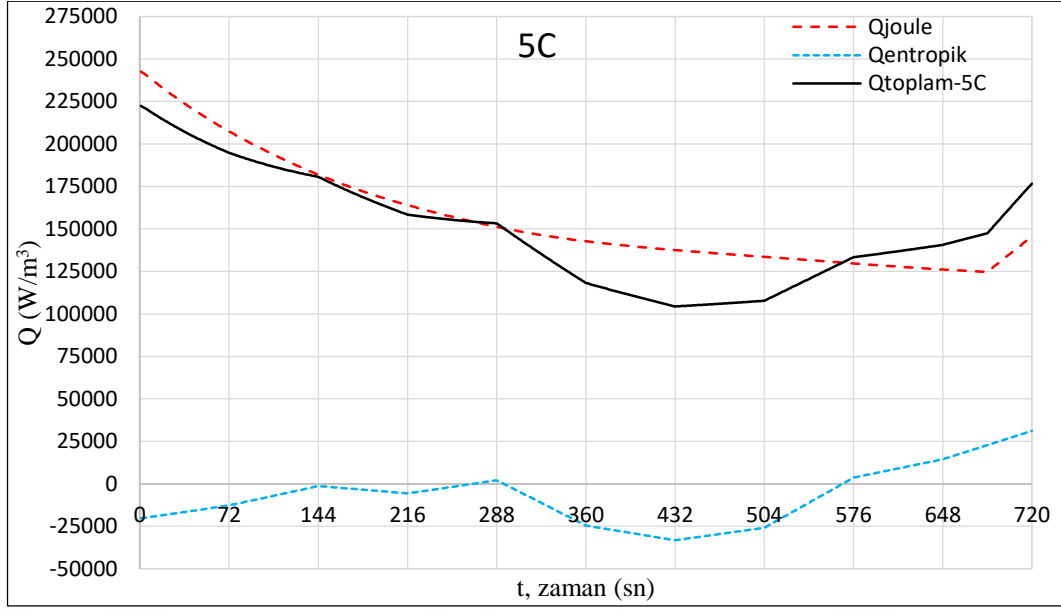
işareti entropi katsayısının işaretine göre değişmektedir. Toplam ısının joule ısısı ve entropik ısısının toplamına eşit olduğundan ve entropik ısının belirli batarya doluluk oranlarında negatif olması ve iç direncin sıcaklık ve batarya doluluk oranına göre değerinin değişmesi nedeniyle toplam ısı üretiminde de zamanla artış ya da azalışlar görülebilir. Isı üretimindeki bu azalışlar Şekil 3.11, Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’te açıkça görülmektedir.



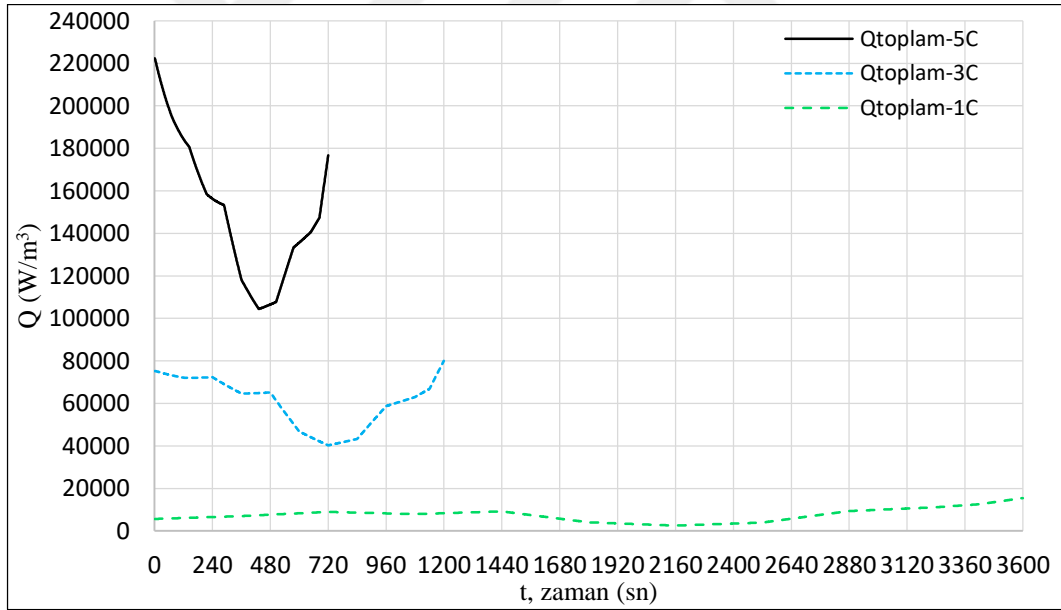
Şekil 3.11 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında bataryada birim hacimde Fluent’te HIKM ile elde edilen joule ısısı, entropik ısısı ve toplam ısısı üretiminin zamana göre değişimi



Şekil 3.12 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında bataryada birim hacimde Fluent’te HIKM ile elde edilen joule ısısı, entropik ısısı ve toplam ısısı üretiminin zamana göre değişimi



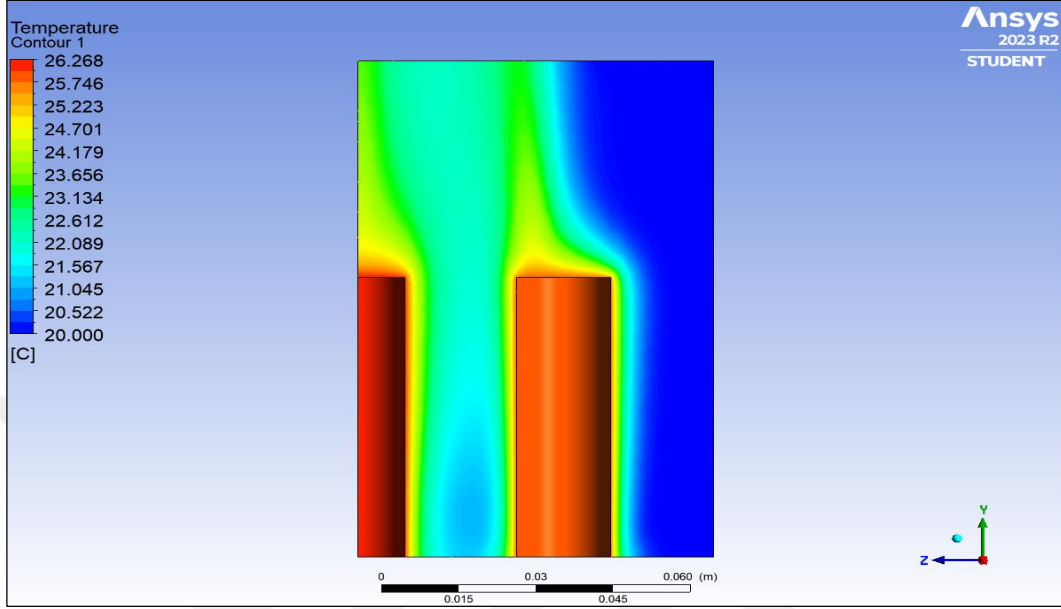
Şekil 3.13 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında bataryada birim hacimde Fluent'te HIKM ile elde edilen joule ısı, entropik ısı ve toplam ısı üretiminin zamana göre değişimi



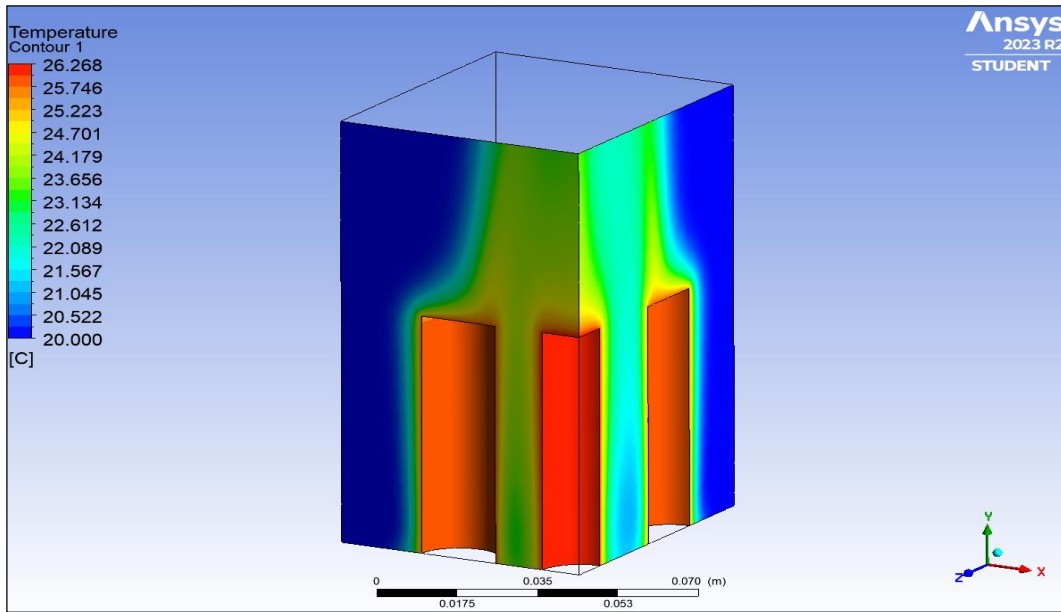
Şekil 3.14 1C, 3C ve 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında bataryada birim hacimde Fluent'te HIKM ile elde edilen toplam ısı üretiminin zamana göre değişimi

Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de batarya modülünün 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında ANSYS Fluent programında UDF yazılarak oluşturulan hacimsel ısı kaynağı modeli ile elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları görünmekte olup sıcaklığın ortadaki bataryada daha yüksek olduğu, dış ortama bakan batarya hücrelerinde sıcaklığın

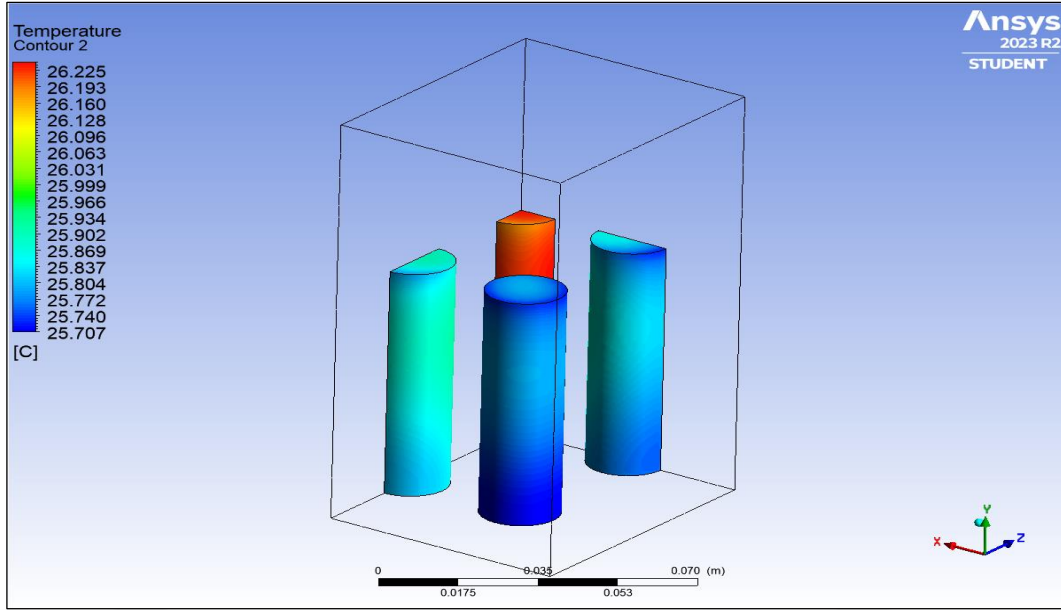
daha düşük olduğu, iç ve dış batarya hücreleri arasında sıcaklık farkı bulunduğu, batarya modülü maksimum yüzey sıcaklığının 26,27°C, minimum yüzey sıcaklığının ise 25,71°C olduğu hesaplanmıştır.



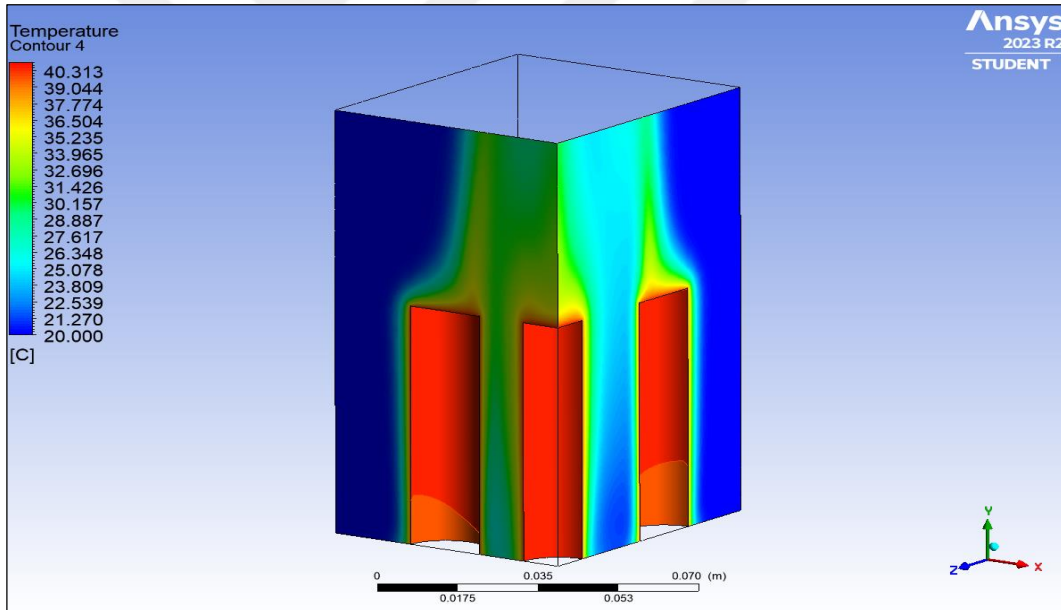
Şekil 3.15 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-1



Şekil 3.16 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-2



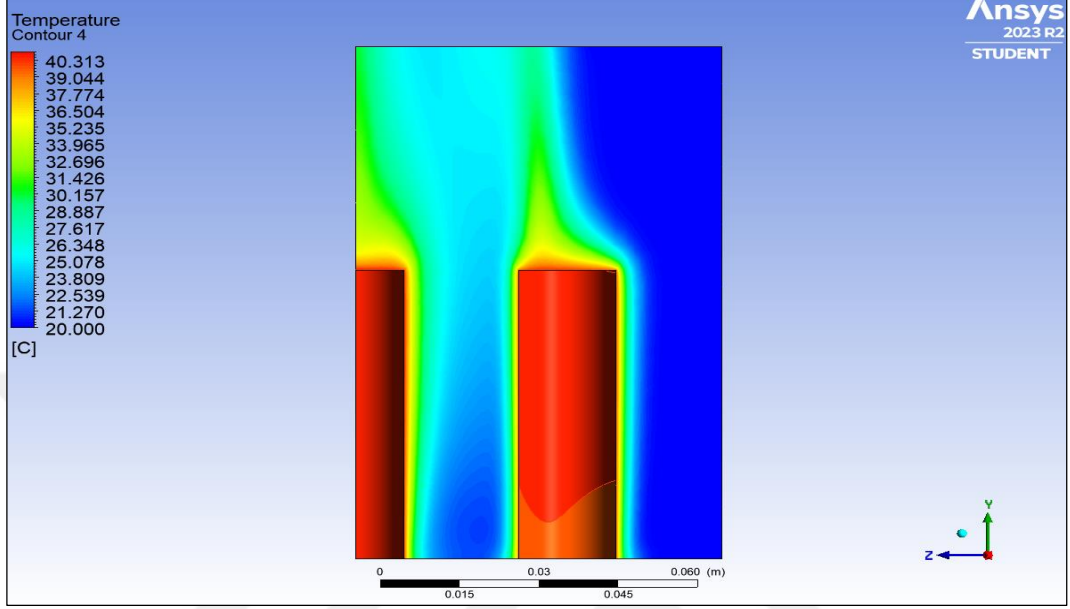
Şekil 3.17 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-3



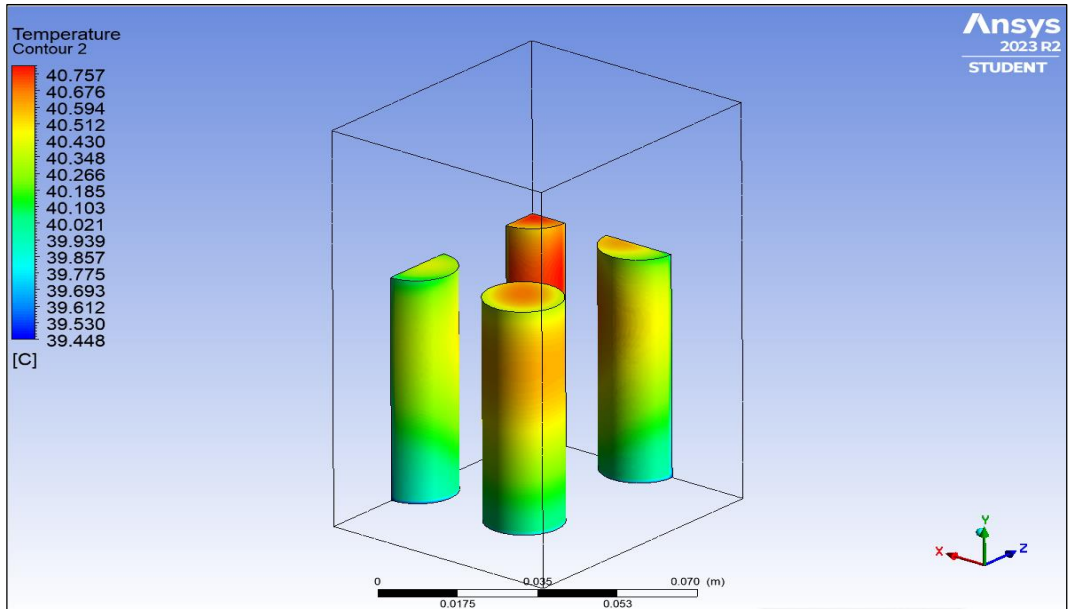
Şekil 3.18 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-1

Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de batarya modülünün 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında ANSYS Fluent programında hacimsel ısı kaynağı modeli ile elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları görünmekte olup 1C deşarj hızındakine benzer bir şekilde 3C deşarj hızında yapılan sayısal modellemede de sıcaklığın ortadaki bataryada daha yüksek olduğu, dış ortama bakan batarya hücrelerinde sıcaklığın daha düşük olduğu, iç ve dış batarya hücreleri arasında sıcaklık farkı bulunduğu, batarya modülü maksimum

yüzey sıcaklığının $40,80^{\circ}\text{C}$, minimum yüzey sıcaklığının ise $39,90^{\circ}\text{C}$ olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca hesaplamalarda iç ve dış batarya hücreleri arasındaki sıcaklık farkı değerinin ($0,90^{\circ}\text{C}$), 1C deşarj hızındaki sıcaklık farkından ($0,56^{\circ}\text{C}$) daha büyük olduğu görülmektedir.



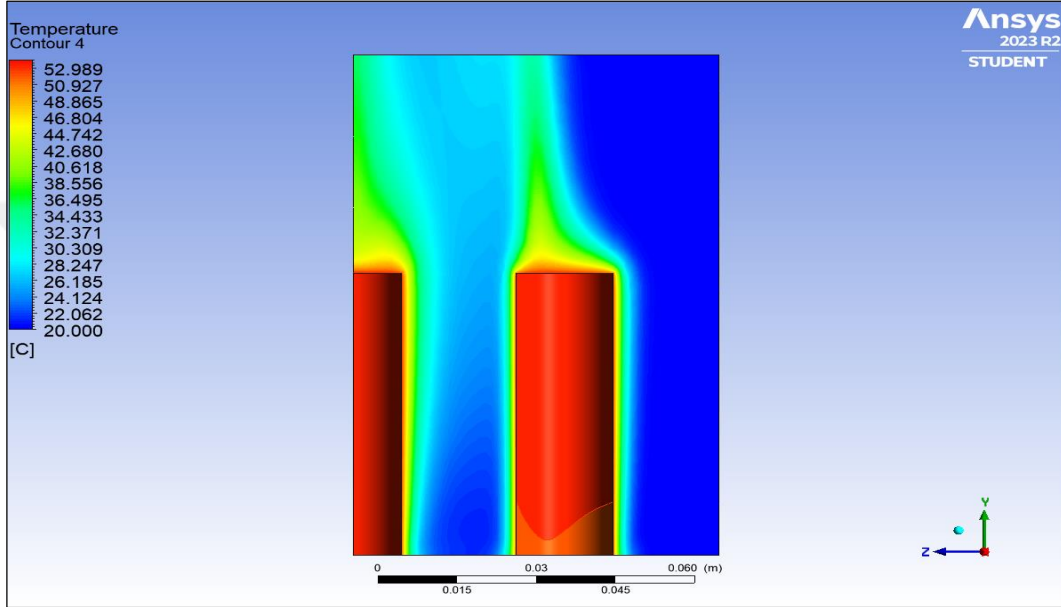
Şekil 3.19 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-2



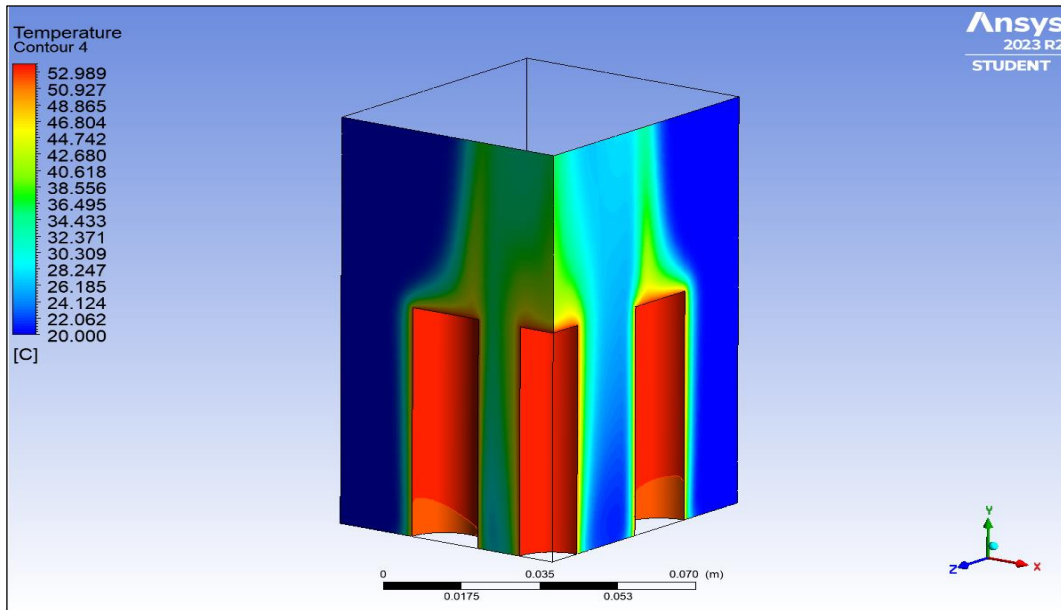
Şekil 3.20 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-3

Diğer bir yandan doğal taşınımlı batarya modülünün (S1) 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında ANSYS Fluent programında hacimsel ısı kaynağı modeli ile elde

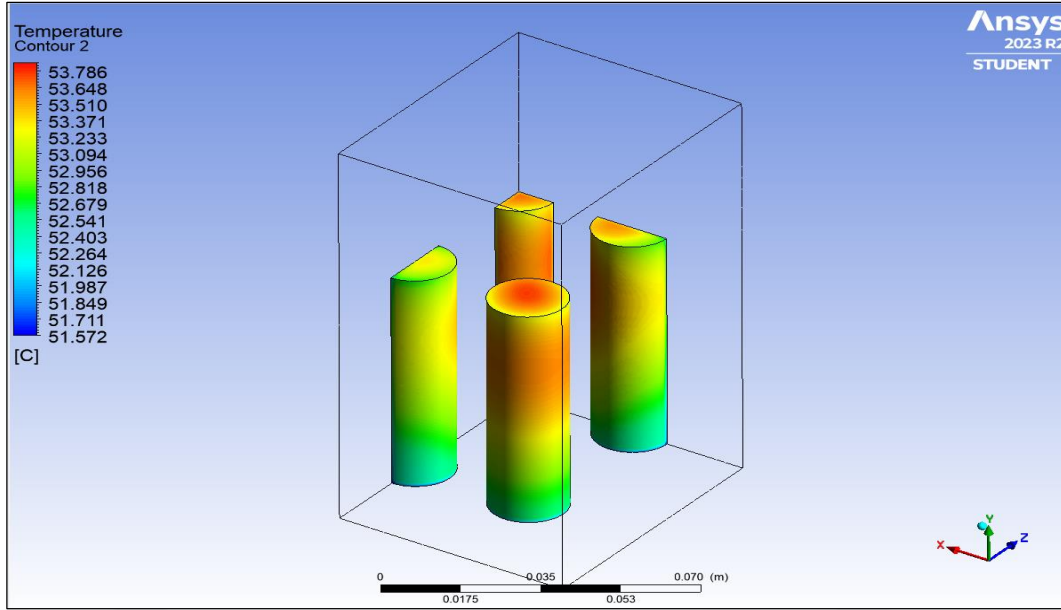
edilen sıcaklık dağılımı sonuçları ise Şekil 3.21, Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'te görünmekte olup 1C ve 3C deşarj hızlarındakine benzer bir şekilde sıcaklığın ortadaki bataryada daha yüksek, dış ortama bakan batarya hücrelerinde daha düşük olduğu, batarya modülü maksimum yüzey sıcaklığının 53,86°C, minimum yüzey sıcaklığının ise 52,41°C olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca hesaplamalarda iç ve dış batarya hücreleri arasındaki sıcaklık farkı değerinin (1,45°C), 1C (0,56°C) ve 3C (0,90°C) deşarj hızlarındaki sıcaklık farkından daha büyük olduğu görülmektedir.



Şekil 3.21 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-1



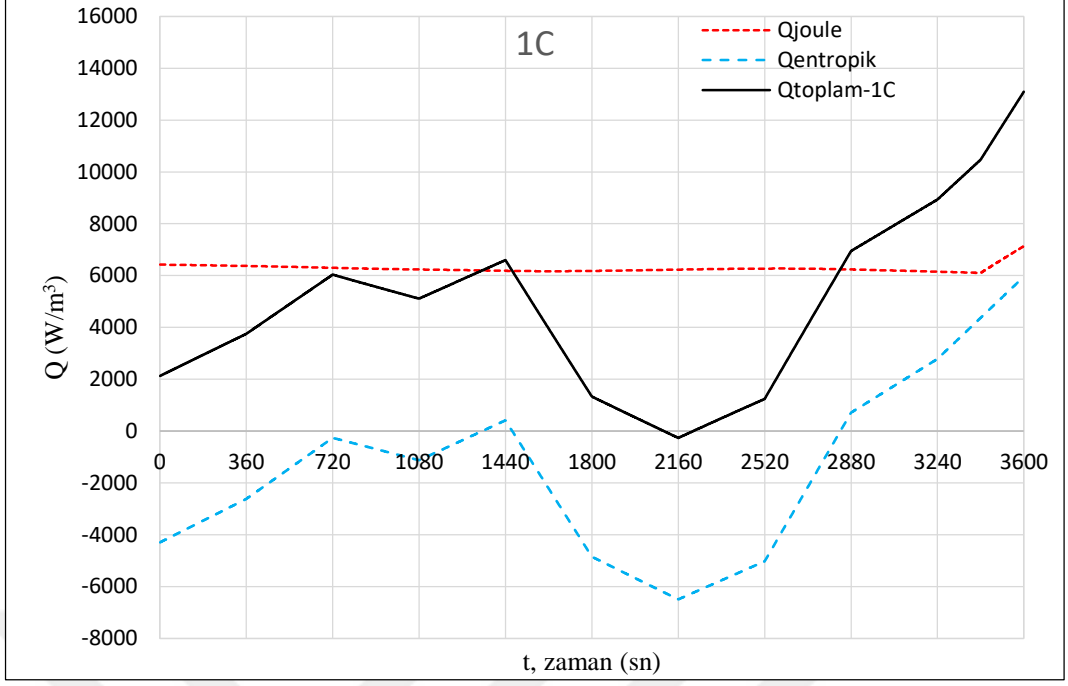
Şekil 3.22 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-2



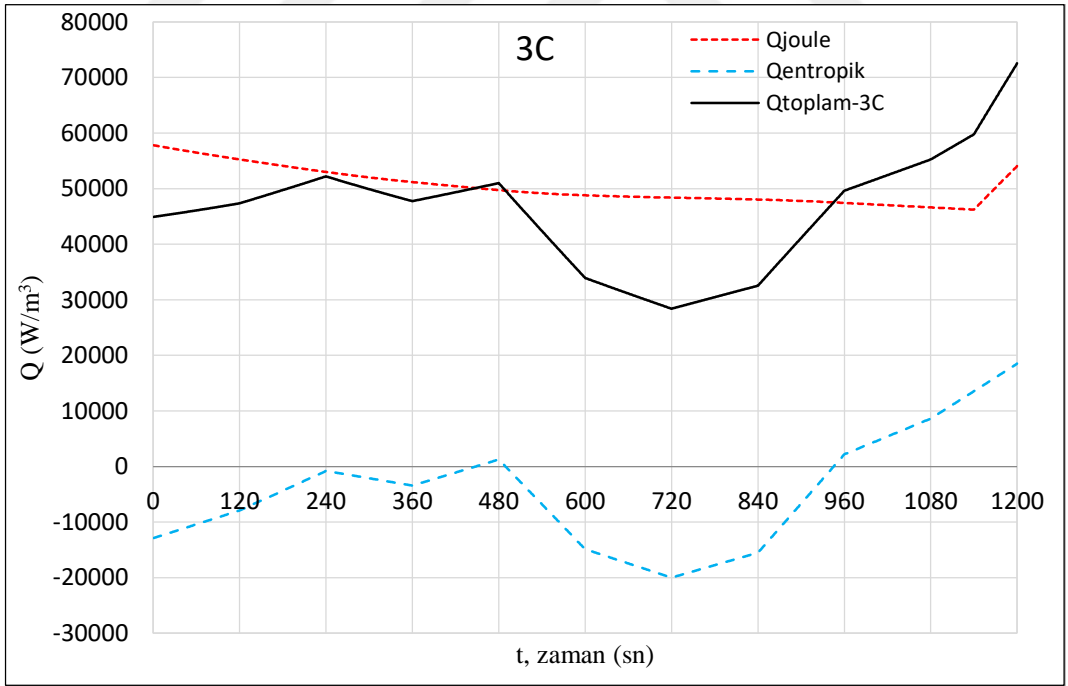
Şekil 3.23 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-3

3.1.3.2. Hacimsel ısı kaynağı modelinin 36°C ortam sıcaklığında sayısal çözümü

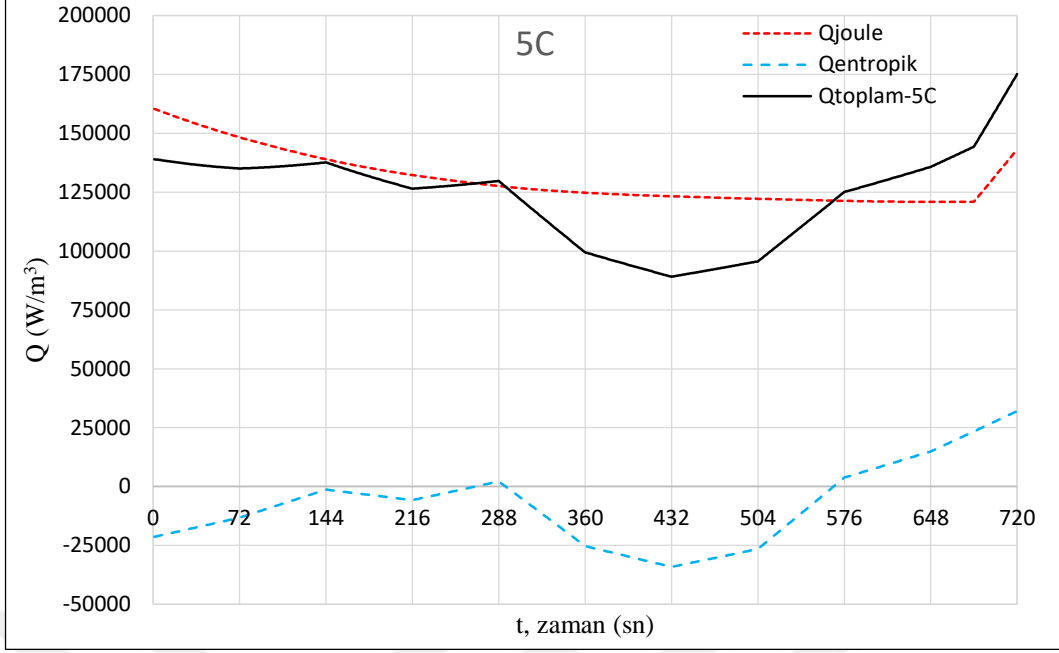
20°C ortam sıcaklığında olduğu gibi 36°C ortam sıcaklığı için de S1 modülü Fluent'te UDF yazılarak hacimsel ısı kaynağı modeli ile sayısal olarak çözümlenmiş olup 1C, 3C ve 5C deşarj hızları için elde edilen joule ısı, entropik ısı ve toplam ısı üretim değerleri sırasıyla Şekil 3.24, Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 3.27'de 1C, 3C ve 5C farklı deşarj hızlarında ve 36°C ortam sıcaklığında bataryada üretilen toplam ısının zamana göre değişimi verilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı gibi ortam sıcaklığının artmasıyla birlikte batarya toplam ısı üretiminin düştüğü görülmektedir. 5C deşarj hızında bataryada üretilen toplam ısı deşarj işlemi sonunda (SOC=0), 20°C ortam sıcaklığında 176.735 W/m³ iken bu değer 36°C ortam sıcaklığında 174.325 W/m³ olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, 5C deşarj işleminde deşarj işlemi boyunca üretilen toplam ısının ortalaması 20°C ortam sıcaklığında 148.216 W/m³ iken 36°C ortam sıcaklığında bu değer 122.472 W/m³ olarak hesaplanmıştır. Diğer bir yandan, 1C deşarj işleminde deşarj işlemi boyunca üretilen toplam ısının ortalaması 20°C ortam sıcaklığında 7.447 W/m³ iken 36°C ortam sıcaklığında bu değer 4.704 W/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu durum batarya iç direncinin sıcaklıkla ters orantılı olması, sıcaklığın artması ile batarya iç direncinin azalması ve daha az ısı üretmesi olgusu ile açıklanabilir.



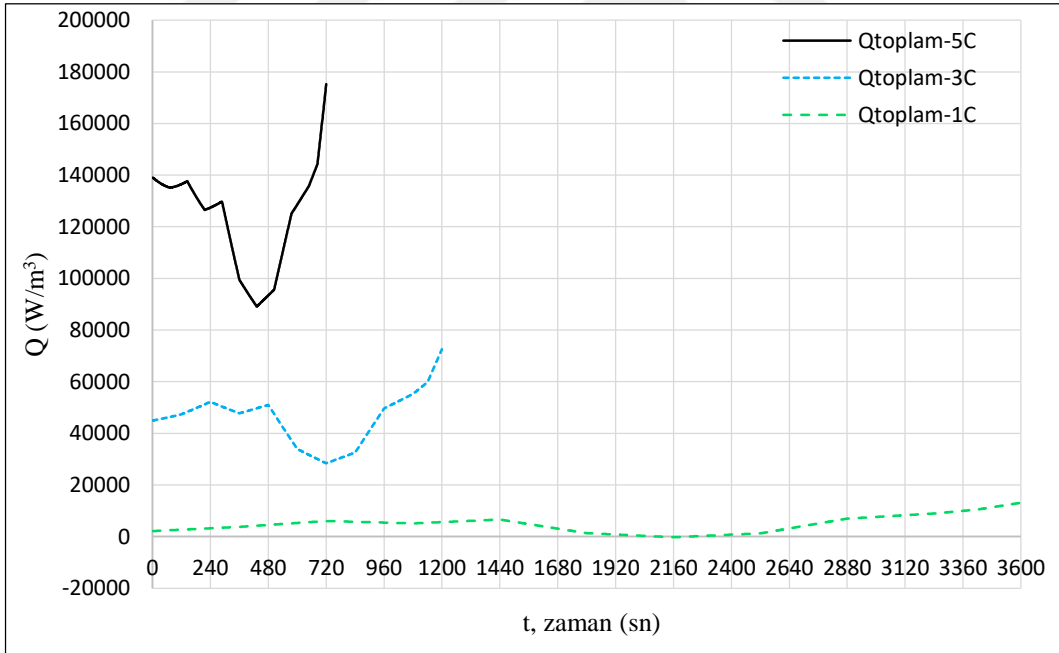
Şekil 3.24 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında bataryada birim hacimde Fluent'te HIKM ile elde edilen joule ısı, entropik ısı ve toplam ısı üretiminin zamana göre değişimi



Şekil 3.25 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında bataryada birim hacimde Fluent'te HIKM ile elde edilen joule ısı, entropik ısı ve toplam ısı üretiminin zamana göre değişimi



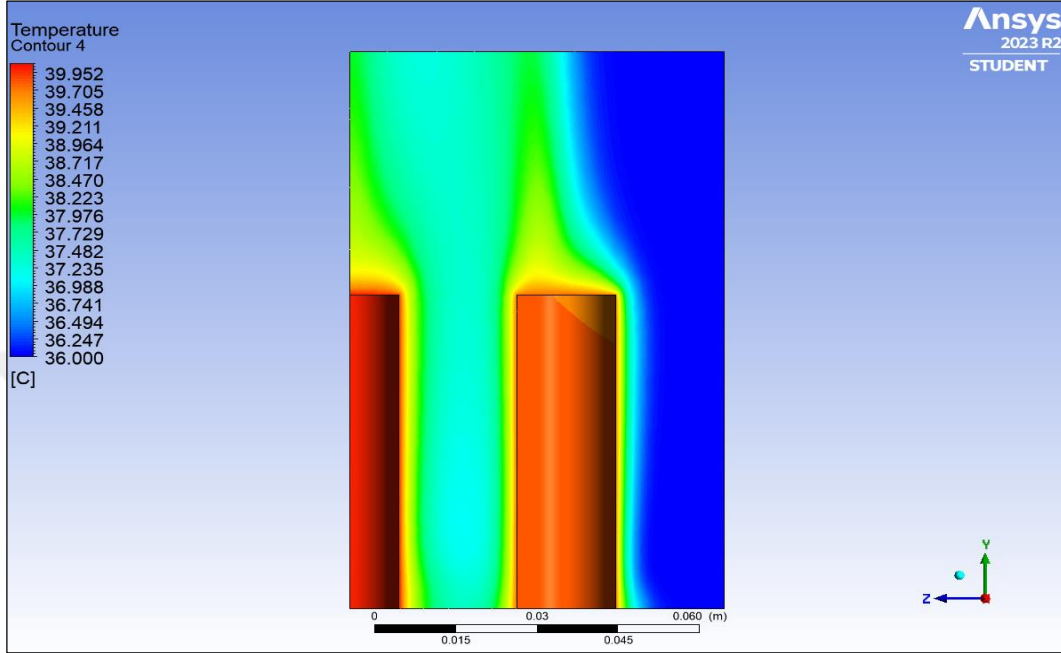
Şekil 3.26 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında bataryada birim hacimde Fluent'te HIKM ile elde edilen joule ısı, entropik ısı ve toplam ısı üretiminin zamana göre değişimi



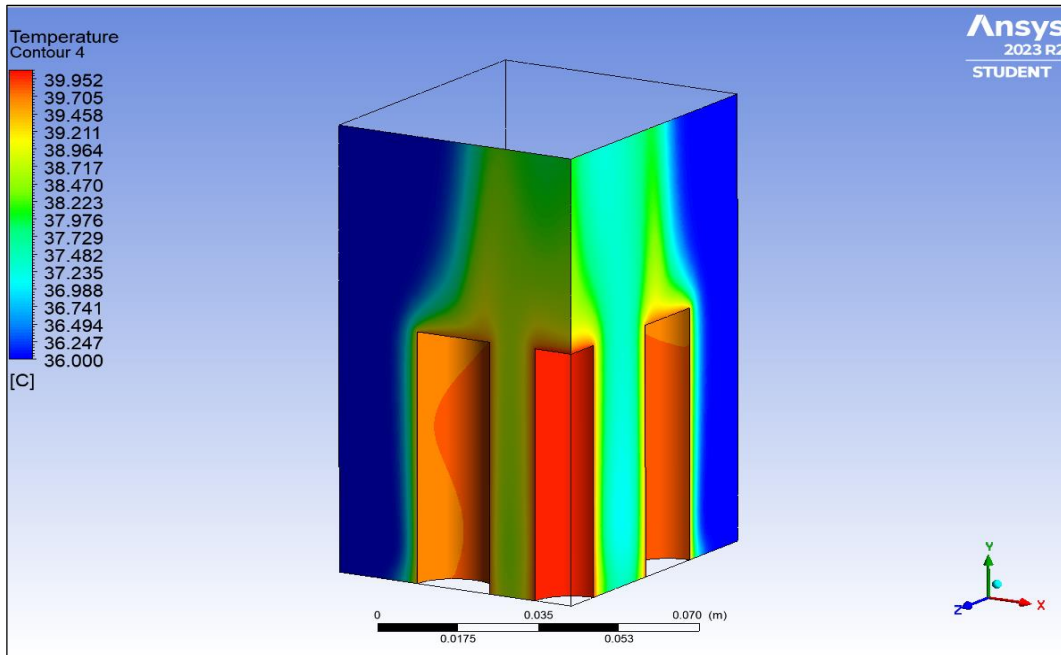
Şekil 3.27 1C, 3C ve 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında bataryada birim hacimde Fluent'te HIKM ile elde edilen toplam ısı üretiminin zamana göre değişimi

Şekil 3.28, Şekil 3.29 ve Şekil 3.30'da S1 batarya modülünün 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında ANSYS Fluent programında hacimsel ısı kaynağı modeli ile elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları görünmekte olup 20°C ortam sıcaklığında yapılan

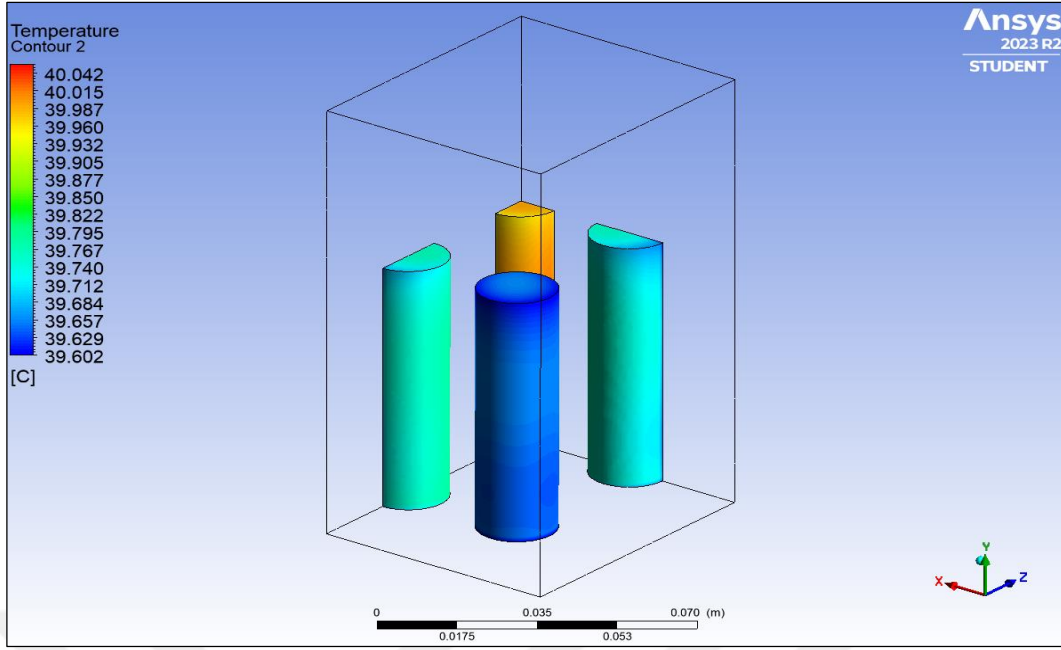
simülasyonlarda olduğu gibi iç ve dış batarya hücreleri arasında sıcaklık farkı bulunduğu, sıcaklığın ortadaki bataryada daha yüksek, dış ortama bakan batarya hücrelerinde daha düşük olduğu, batarya modülü maksimum yüzey sıcaklığının $40,06^{\circ}\text{C}$, minimum yüzey sıcaklığının ise $39,60^{\circ}\text{C}$ olduğu hesaplanmıştır.



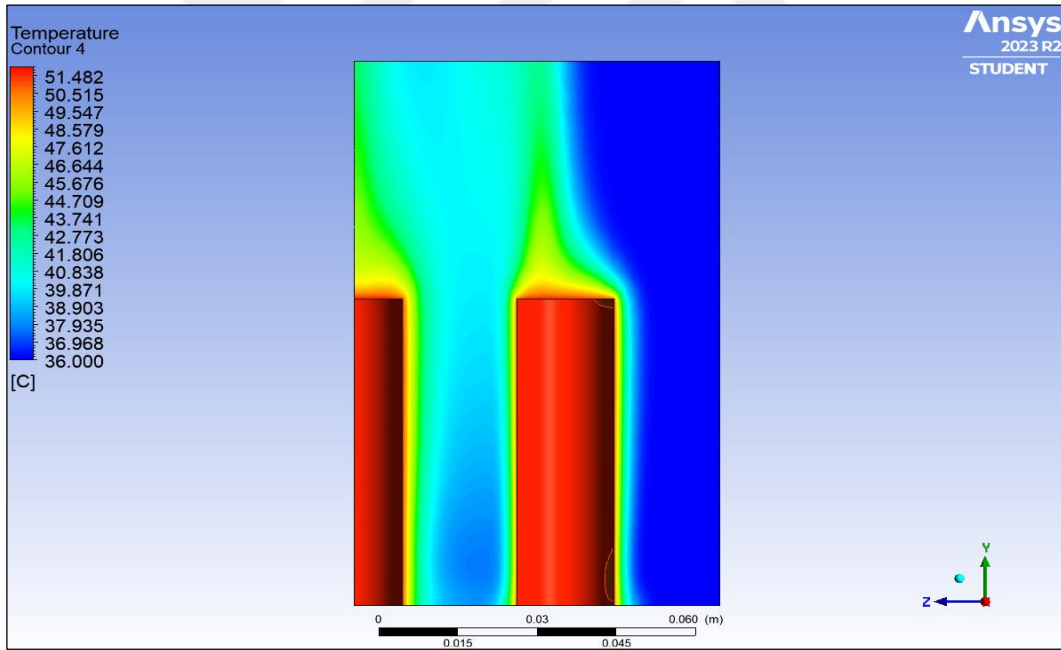
Şekil 3.28 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-1



Şekil 3.29 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-2



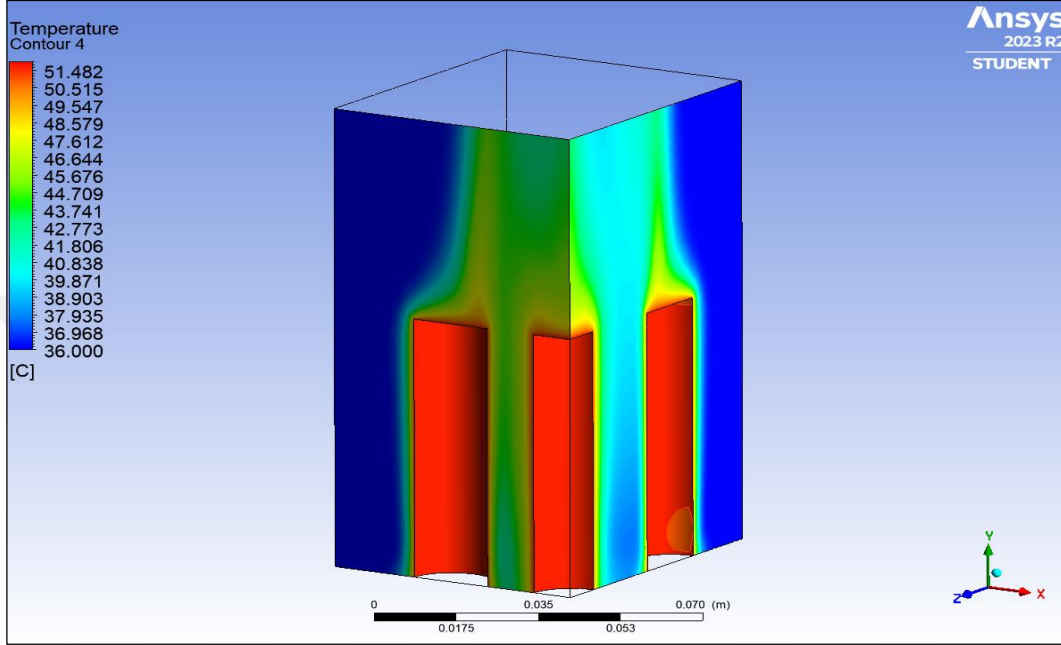
Şekil 3.30 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-3



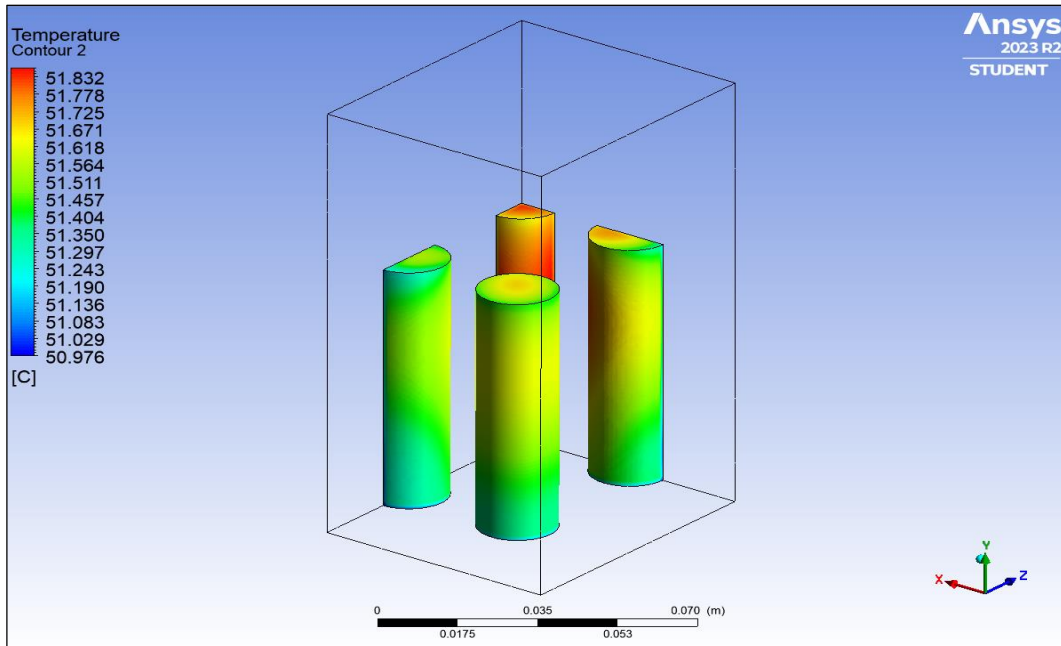
Şekil 3.31 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-1

S1 batarya modülünün 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında ANSYS Fluent programında hacimsel ısı kaynağı modeli ile elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları ise Şekil 3.31, Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'te görünmekte olup 1C deşarj hızındakine benzer bir şekilde sıcaklığın ortadaki bataryada daha yüksek, dış ortama bakan batarya hücrelerinde

sıcaklığın daha düşük olduğu, iç ve dış batarya hücreleri arasında sıcaklık farkı bulunduğu, batarya modülü maksimum yüzey sıcaklığının $51,86^{\circ}\text{C}$, minimum yüzey sıcaklığının ise $51,25^{\circ}\text{C}$ olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca iç ve dış batarya hücreleri arasındaki sıcaklık farkının ($0,61^{\circ}\text{C}$), 1C deşarj hızındaki sıcaklık farkından ($0,46^{\circ}\text{C}$) daha büyük olduğu görülmektedir.



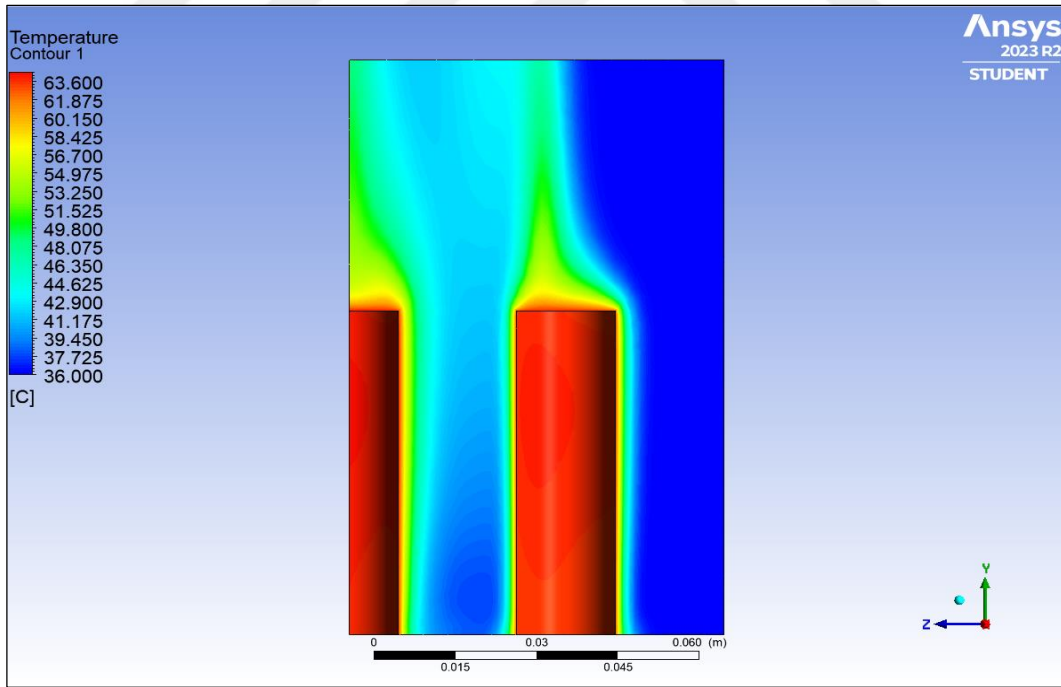
Şekil 3.32 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-2



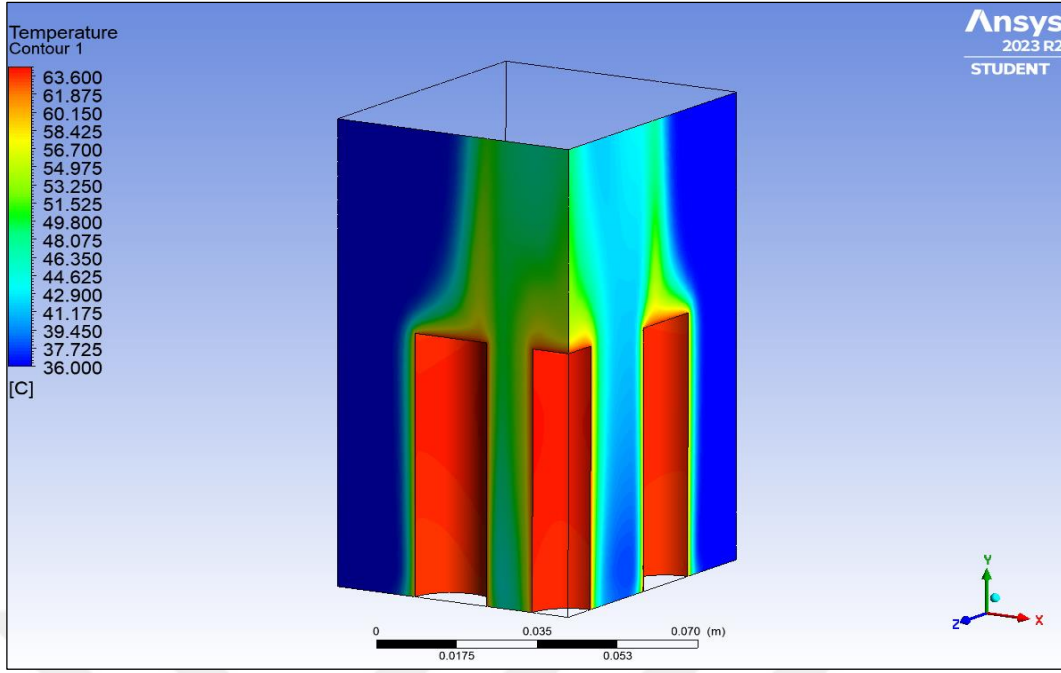
Şekil 3.33 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-3

Diğer bir yandan, Şekil 3.34, Şekil 3.35 ve Şekil 3.36’da ise batarya modülünün 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında ANSYS Fluent programında hacimsel ısı kaynağı modeli ile elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları görünmekte olup 20°C ortam sıcaklığında olduğu gibi 1C ve 3C deşarj hızlarındakine benzer bir şekilde sıcaklığın ortadaki bataryada daha yüksek, dış ortama bakan batarya hücrelerinde sıcaklığın daha düşük olduğu, iç ve dış batarya hücreleri arasında sıcaklık farkı bulunduğu, batarya modülü maksimum yüzey sıcaklığının 64,34°C, minimum yüzey sıcaklığının ise 63,31°C olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca iç ve dış batarya hücreleri arasındaki sıcaklık farkının (1,03°C), 20°C ortam sıcaklığında olduğu gibi 1C (0,46°C) ve 3C (0,61°C) deşarj hızlarındaki sıcaklık farkından daha büyük olduğu görülmektedir.

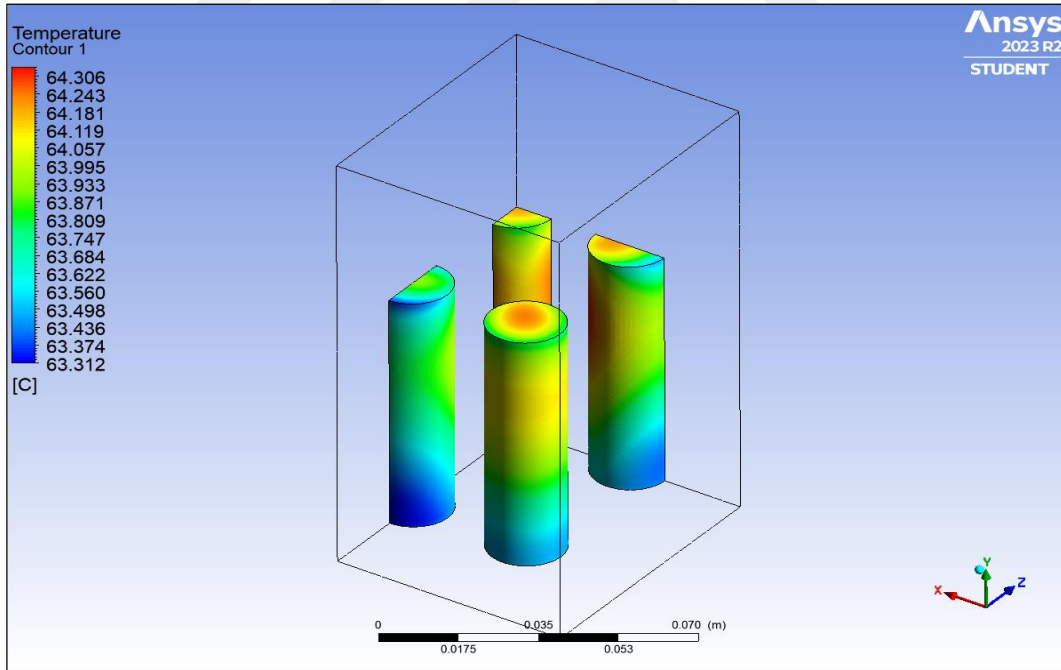
1C, 3C ve 5C deşarj hızlarında 36°C ortam sıcaklığında elde edilen batarya maksimum yüzey sıcaklık farklarının (0,56°C; 0,90°C; 1,45°C), 20°C ortam sıcaklığında elde edilen batarya maksimum yüzey sıcaklık farklarından (0,46°C; 0,61°C; 1,03°C) daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla artan ortam sıcaklığı hem batarya maksimum yüzey sıcaklığının hem de batarya maksimum yüzey sıcaklık farkının artmasına neden olmuştur.



Şekil 3.34 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında Fluent’te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-1



Şekil 3.35 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-2



Şekil 3.36 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında Fluent'te HIKM ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-3

3.2. NTGK Modeli

Lityum iyon bataryaların termal ve elektrokimyasal olarak modellenmesinin zorluğu bataryaların çok ölçekli ve çok boyutlu doğasından kaynaklanmaktadır (Kim vd., 2011).

Bu çok ölçekli ortamda çoklu boyutun karmaşık etkileşimini ele almak için Kim vd. (2011), çok ölçekli ve çok boyutlu bir yöntem (MSMD) geliştirmişlerdir. MSMD yönteminde farklı alanlar, farklı ölçeklerde çözümlenmekte, daha sonra ise bir alandan diğerine gerekli bilgi alışverişi yapılmaktadır. MSMD yöntemindeki anahtar fikir, bir batarya hücresinin sürekli anizotropik gözenekli bir ortam olarak kabul edilmesi ve elektriksel davranışının, aynı yerde bulunan iki potansiyel alanla temsil edilebilmesidir. Gözenekli ortamın etkin taşıma özellikleri, elektrolit ve elektrotların özelliklerinin ortalaması alınarak elde edilmekte ve ikili potansiyel alanları sıcaklıkla aynı alanda çözümlenmekte, iki potansiyel denklemin kaynak terimleri ve enerji denkleminin kaynak terimi bir alt ölçekli elektrokimyasal model aracılığıyla hesaplanmaktadır (Li vd., 2015).

MSMD yönteminde batarya termal ve elektriksel alanları hesaplamalı akışkanlar dinamiği ortamında ve batarya hücresi ölçeğinde herhangi bir kısa devre veya termal kaçak olmadığı durumda aşağıdaki denklemler yardımı ile çözülebilir.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k_\phi}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \sigma_+ |\nabla \phi_+|^2 + \sigma_- |\nabla \phi_-|^2 + \dot{q}_{gen} \quad [3.18]$$

$$\nabla \cdot (\sigma_+ \nabla \phi_+) = -i \quad [3.19]$$

$$\nabla \cdot (\sigma_- \nabla \phi_-) = i \quad [3.20]$$

Denklemlerde σ_+ ve σ_- sırasıyla pozitif ve negatif elektrotlardaki elektrik iletkenliğini (Siemens/m), ϕ_+ ve ϕ_- ise sırasıyla pozitif ve negatif elektrotlardaki gerilim değerlerini (V) ifade etmektedir.

MSMD yöntemi ANSYS Fluent programına 3 farklı alt model olarak yerleştirilmiş olup bunlar; yarı ampirik bir model olan eşdeğer devre modeli (ECM), tam bir elektrokimyasal model olan Newman Pseudo-2D (P2D) modeli ve giriş verisi olarak farklı hızlarda yapılmış batarya deşarj testlerine ihtiyaç duyan ve yarı ampirik bir model olan Newman, Tiedemann, Gu ve Kim (NTGK) modelidir.

Eşdeğer devre modelinde (ECM) bataryanın elektriksel davranışı 3 adet direnç ve 2 adet kapasitörden oluşan elektrik devresi olarak modellenerek belirlenmeye çalışılır. Newman Pseudo-2D (P2D) modeli ise her ne kadar diğer iki modele göre uygulanması zor ve çok fazla parametre ve çözüm süresi gereksinimi de olsa bu model ile lityum iyonlarının transferi ve bataryanın elektro-kimyasal davranışı tam olarak belirlenebilir. NTGK

modeli ise basit ve yarı ampirik bir model olup bu modelde batarya akımı ile batarya gerilim değerleri arasında lineer bir ilişki mevcuttur. NTGK modeli elektrik yükünün çok ani değişmediği şarj/deşarj çevrimlerinde oldukça doğru sonuçlar vermektedir (Vanaclocha, 2021). NTGK modeli ile batarya akımı 2 adet değişken U ve Y ile ifade edilerek bataryanın yük altındaki elektro-termal davranışı tahmin edilebilir. U ve Y değişkenleri için her bir değişkende altı adet olmak üzere (a_n, b_n) ve ayrıca iki adet sıcaklık düzeltme katsayısı (C_1, C_2) olmak üzere toplamda 14 adet parametre gerekmektedir olup bu parametreler sabit referans sıcaklıkta (T_{ref}) ve sabitdeşarj akımında yapılan bataryadeşarj testleriyle belirlenmektedir. NTGK modeline göre bataryanın birim hacmine denk gelendeşarj akımı aşağıdaki ifadeye eşittir.

$$i = \frac{Q_{nominal}}{Q_{ref} \cdot \nabla} Y [U - V] \quad [3.21]$$

Denklemdede Q_{ref} deşarj testlerine tabi tutulan batarya kapasitesini (Ah) ifade etmektedir. U ve Y değişkenleri aynı zamanda bataryadeşarj derinliğinin (DOD) bir fonksiyonudur ve aşağıdaki denklemler ile ifade edilebilirler.

$$DOD = \frac{\nabla}{3600 \cdot Q_{nominal}} \int_0^t i dt \quad [3.22]$$

$$U = \left(\sum_{n=0}^5 a_n (DOD)^n \right) - C_2 (T - T_{ref}) \quad [3.23]$$

$$Y = \left(\sum_{n=0}^5 b_n (DOD)^n \right) \exp \left[-C_1 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad [3.24]$$

NTGK modeli için gerekli U ve Y değişkenlerini belirlemek üzere deney düzeneklerinde kullanılan batarya modülü (S1) kullanılmış ve 36°C ortam sıcaklığında ve 1C, 3C ve 5Cdeşarj testlerinde elde edilen batarya gerilim değerlerinin zamana göre değişimi Fluent modülü parametre tahmin programına girilmiş ve U , Y değişkenlerinin parametreleri ve sıcaklık düzeltme katsayıları bulunmuştur. Çizelge 3.3'de bulunan parametre ve sıcaklık düzeltme katsayıları verilmiş olup diğer termofiziksel özellikler Çizelge 2.1'dekiler ile aynıdır.

Çizelge 3.7 NTGK modelinde kullanılan parametreler

Başlangıç Deşarj Derinliği (DOD)	0.005
Referans Kapasite	2 Ah
<u>U parametreleri</u>	
a0	4,177384
a1	-1,39232
a2	3,670565
a3	-11,7567
a4	16,28306
a5	-7,71687
<u>Y parametreleri</u>	
b0	31,14341
b1	-47,2912
b2	343,0682
b3	-740,504
b4	638,0611
b5	-180,459
<u>Sıcaklık Düzeltme Katsayıları</u>	
C1	0
C2	0

Çizelge 3.8 NTGK modelinde kullanılan hücre malzemesi özellikleri

UDS-0	1,190e+6 kg/ms
UDS-1	0,983e+6 kg/ms

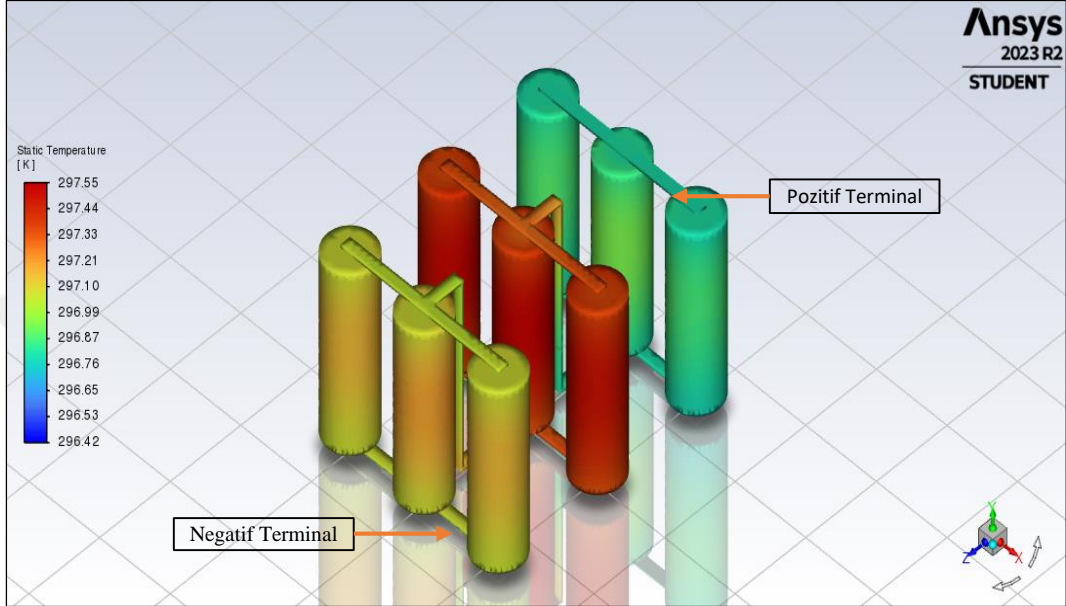
Çizelge 3.9 NTGK modelinde kullanılan kutup malzemesi özellikleri

Malzeme Cinsi	Bakır
Yoğunluk	8978 kg/m ³
Özgül Isı	381 kJ/kgK
Isı iletim katsayısı	387,7 W/mK
Elektriksel İletkenlik	user defined (battery_e_cond::msmsdbatt)

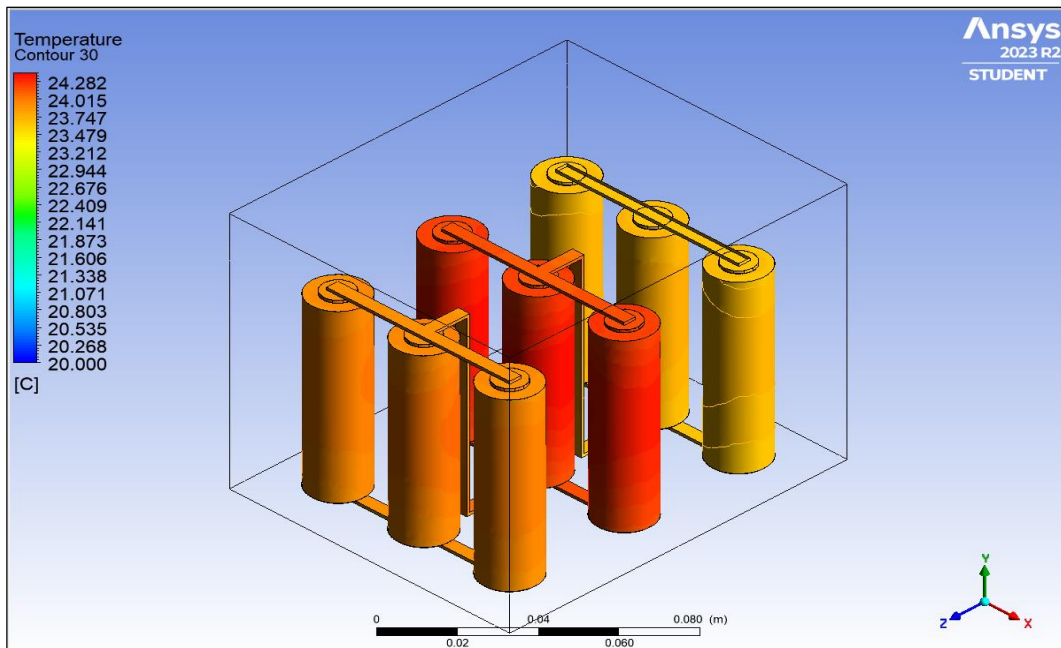
3.2.1. 20°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile elde edilen sonuçlar

S1 batarya modülünün ANSYS Fluent programında NTGK alt modelinde 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları Şekil 3.37, Şekil 3.38, Şekil 3.39 ve Şekil 3.40'da görünmekte olup batarya modülü maksimum yüzey sıcaklığının 24,40°C olduğu hesaplanmıştır. Diğer bir yandan NTGK modelindeki sıcaklık dağılımı ile hacimsel ısı kaynağı modelindeki sıcaklık dağılımı birbirine benzememekte, hacimsel ısı kaynağı modelinde maksimum sıcaklığın batarya modülünün ortasında kalan batarya hücresinde olduğu, modülün dış ortama bakan batarya hücrelerinde sıcaklığın daha düşük olduğu gözlemlenirken NTGK modelinde ise paralel olarak bağlanan batarya gruplarının maksimum yüzey sıcaklıklarının birbirine oldukça

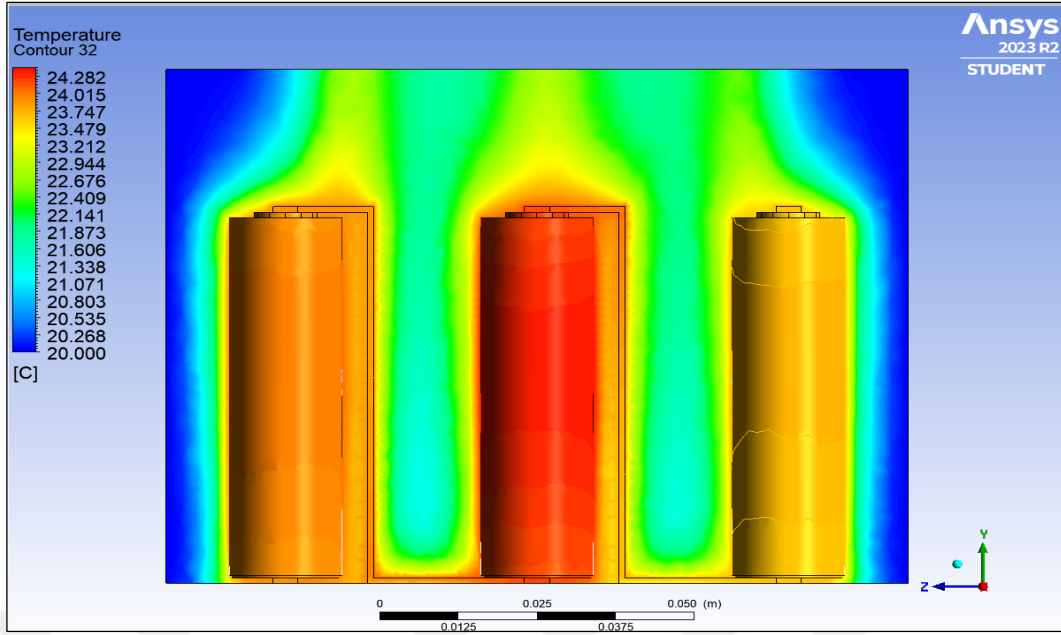
yakın olduğu, seri olarak bağlanan batarya gruplarının ise farklı yüzey sıcaklıklarına sahip olduğu, en yüksek sıcaklığın seri bağlantıda ortada kalan grupta olduğu, negatif kutba bağlı seri grubun yüzey sıcaklığının orta gruptaki batarya sıcaklığından biraz daha düşük olduğu, en düşük sıcaklığın ise modülün pozitif kutbunu oluşturan batarya hücrelerinde olduğu gözlemlenmiştir.



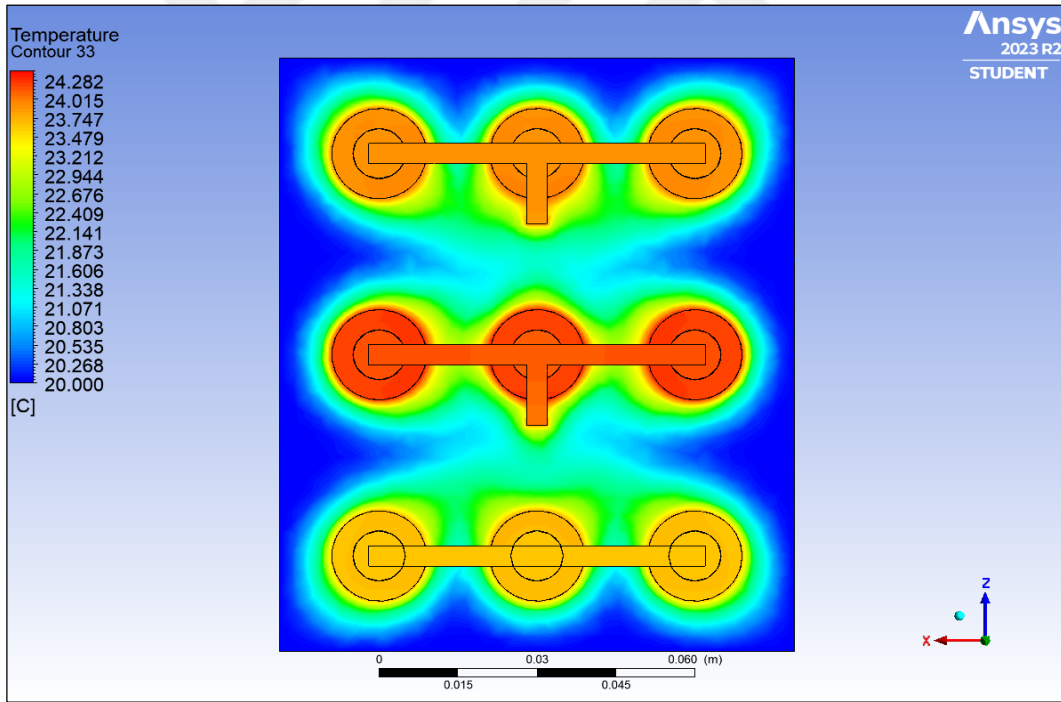
Şekil 3.37 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-1



Şekil 3.38 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-2



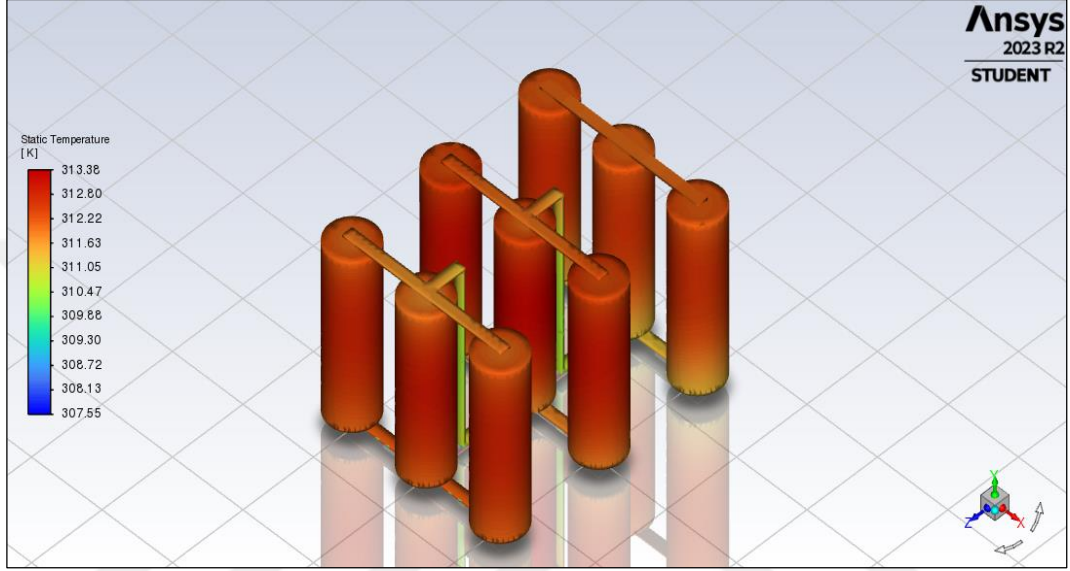
Şekil 3.39 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-3



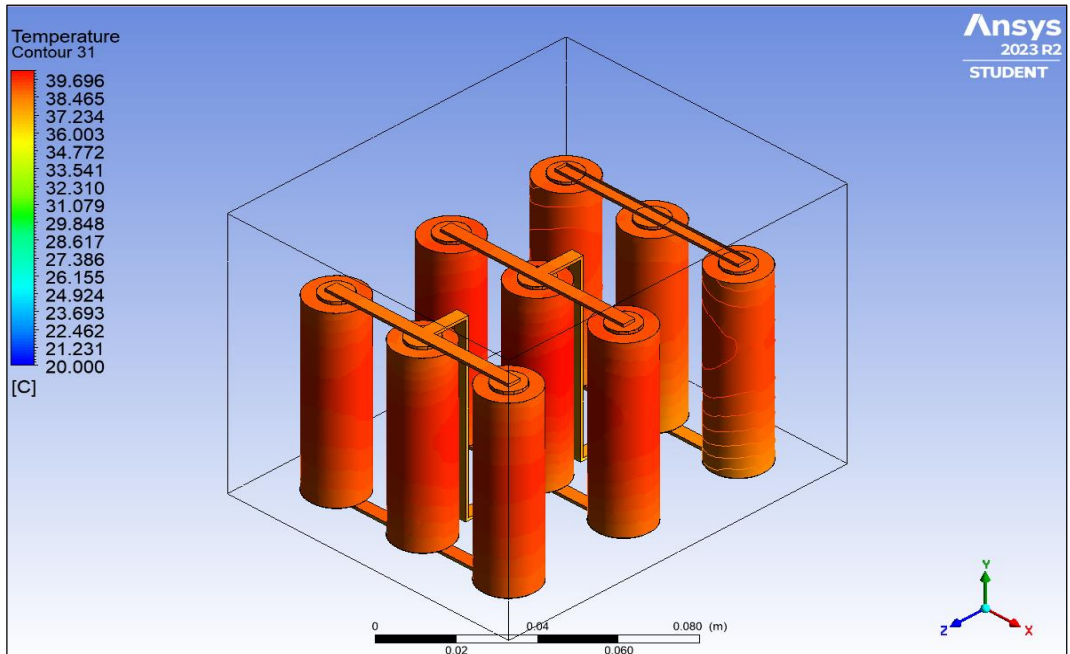
Şekil 3.40 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-4

Batarya modülünün 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında ANSYS Fluent programı NTGK alt modelinde elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları ise Şekil 3.41, Şekil 3.42, Şekil 3.43 ve Şekil 3.44'te görünmekte olup batarya modülü maksimum yüzey sıcaklığının 40,23°C olduğu hesaplanmıştır. 1C deşarj hızındaki sıcaklık dağılımına

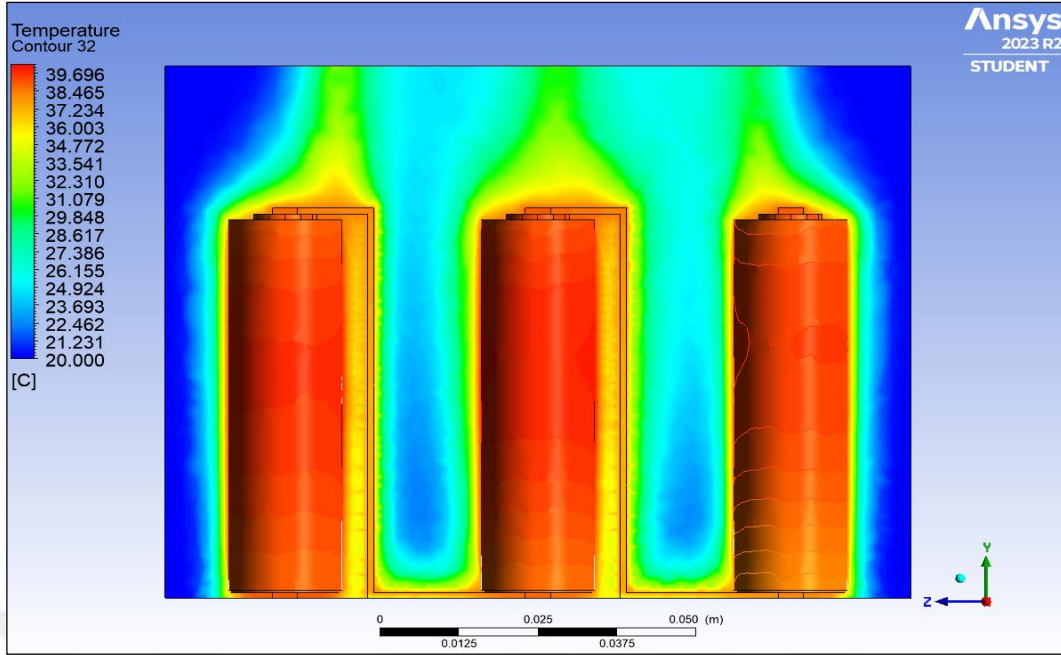
benzer bir şekilde 3C deşarj hızında da paralel olarak bağlanan bataryaların maksimum yüzey sıcaklıklarının birbirine oldukça yakın olduğu, seri olarak bağlanan batarya gruplarının ise farklı yüzey sıcaklıklarında olduğu, en yüksek sıcaklığın seri bağlantıda ortada kalan grupta olduğu, negatif kutba bağlı seri grubun yüzey sıcaklığının orta gruptaki batarya sıcaklığından biraz daha düşük olduğu, en düşük sıcaklığın ise modülün pozitif kutbunu oluşturan batarya hücrelerinde olduğu gözlemlenmiştir.



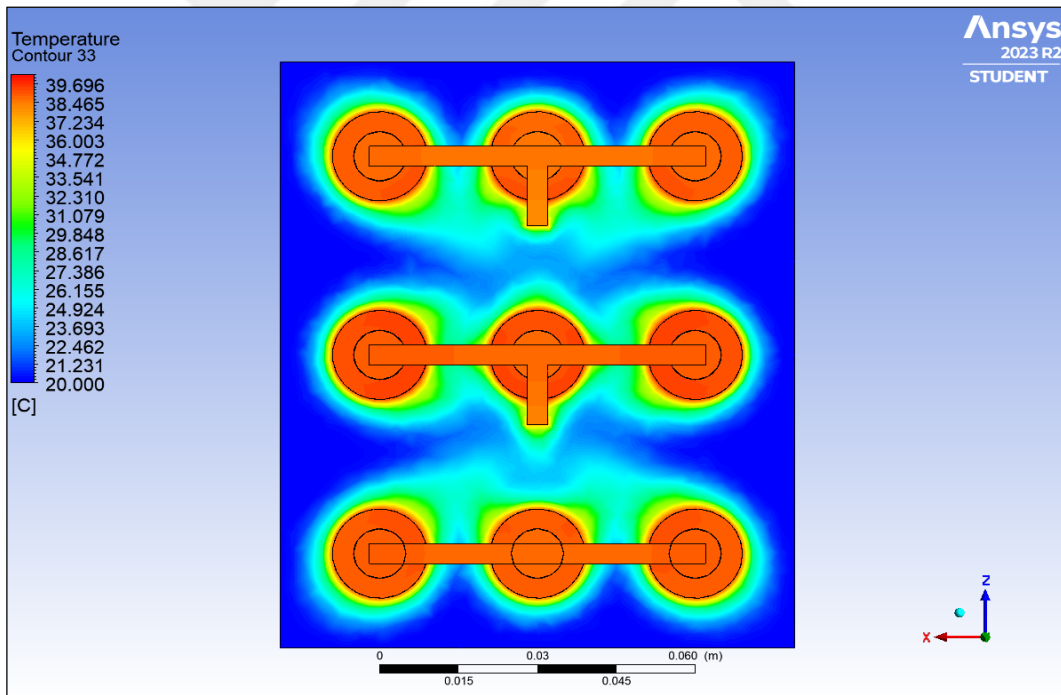
Şekil 3.41 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-1



Şekil 3.42 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-2



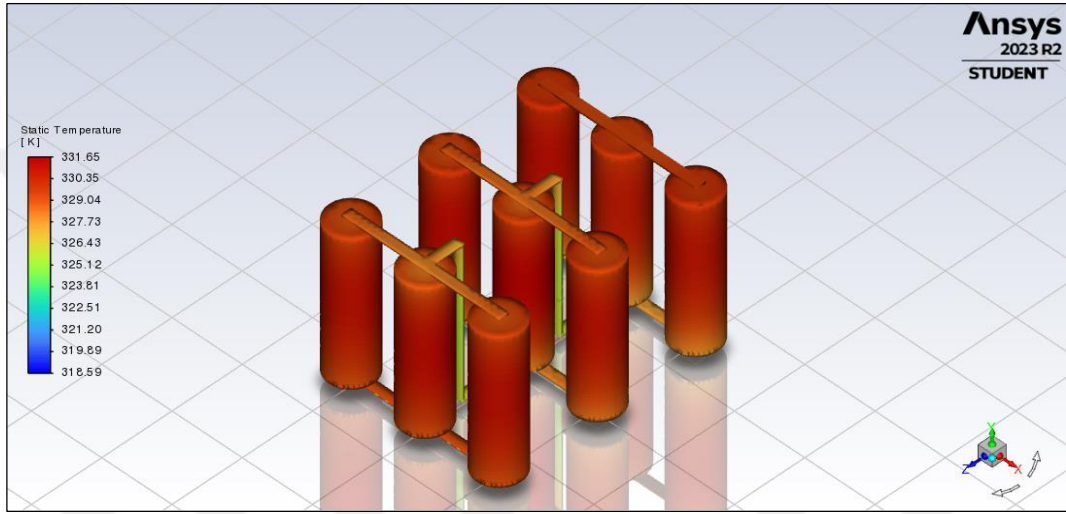
Şekil 3.43 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-3



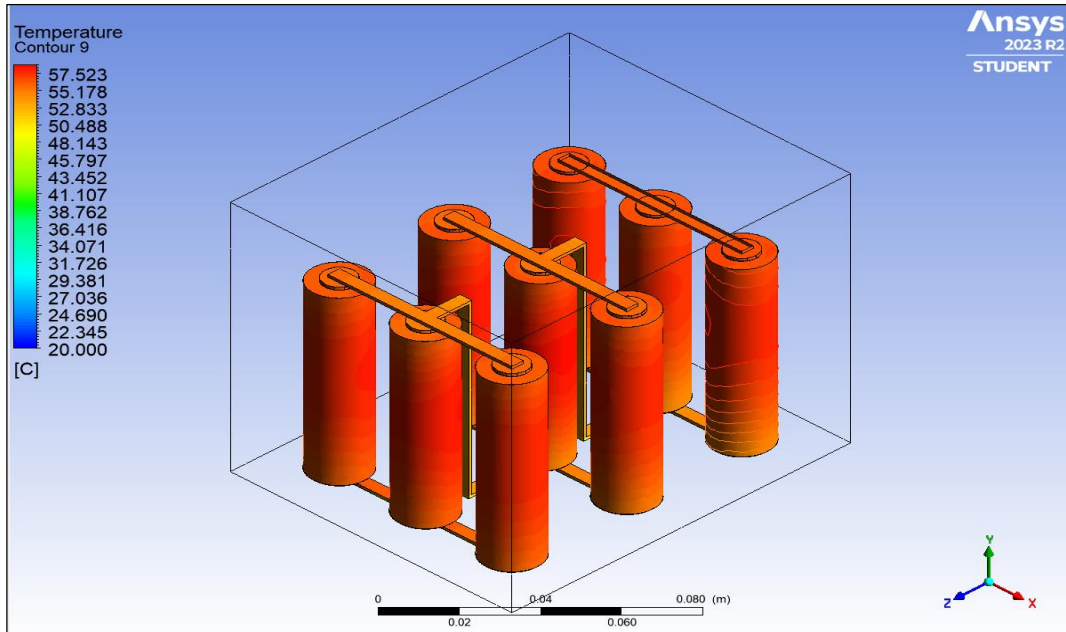
Şekil 3.44 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-4

S1 batarya modülünün ANSYS Fluent programı NTGK alt modelinde 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları ise Şekil 3.45, Şekil 3.46, Şekil 3.47 ve Şekil 3.48'de görünmekte olup batarya modülü maksimum yüzey

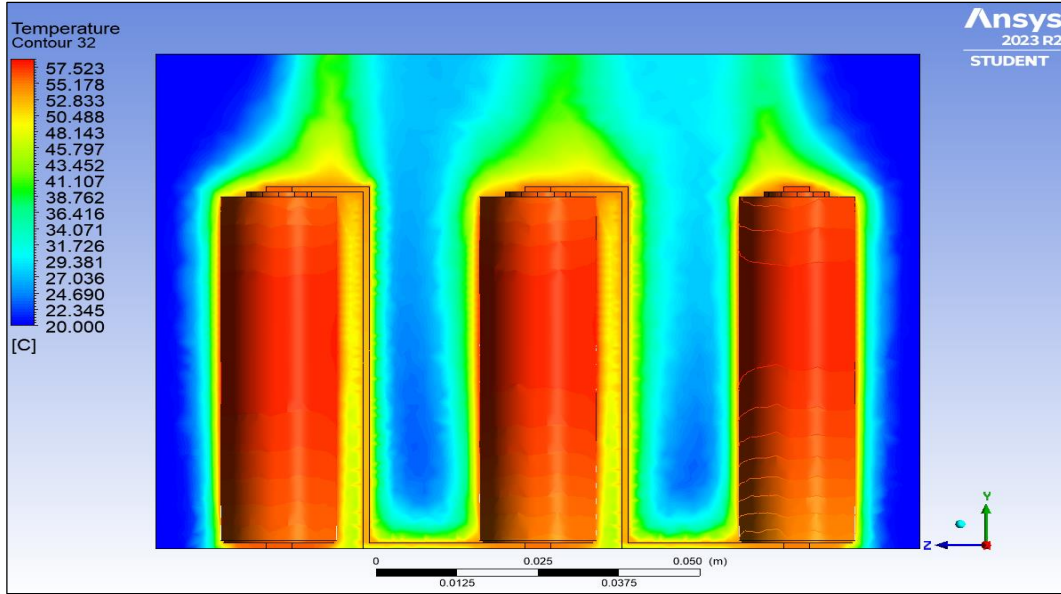
sıcaklığının deşarj işlemi sonunda (SOC=0) 58,50°C olduğu hesaplanmıştır. 1C ve 3C deşarj hızlarındaki sıcaklık dağılımına benzer bir şekilde 5C deşarj hızında da paralel olarak bağlanan bataryaların maksimum yüzey sıcaklıklarının birbirine oldukça yakın olduğu, seri olarak bağlanan batarya gruplarının ise farklı yüzey sıcaklıklarında olduğu, en yüksek sıcaklığın seri bağlantıda ortada kalan grupta olduğu, negatif kutba bağlı seri grubun yüzey sıcaklığının orta gruptaki batarya sıcaklığından biraz daha düşük olduğu, en düşük sıcaklığın ise modülün pozitif kutbunu oluşturan batarya hücrelerinde olduğu gözlemlenmiştir.



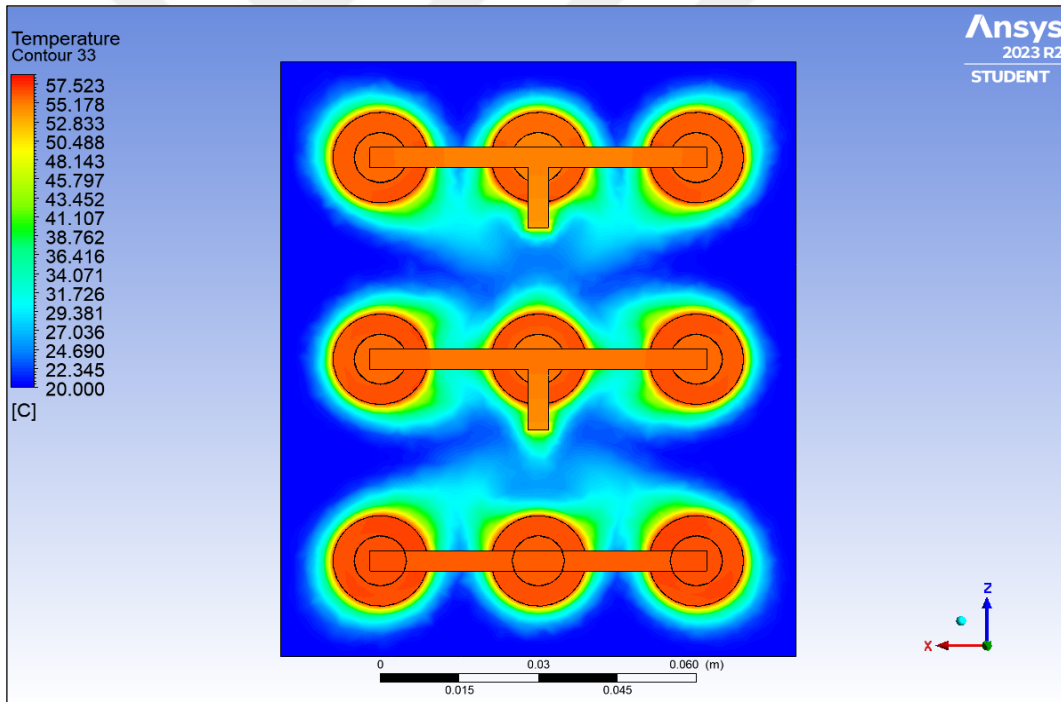
Şekil 3.45 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-1



Şekil 3.46 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-2



Şekil 3.47 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-3

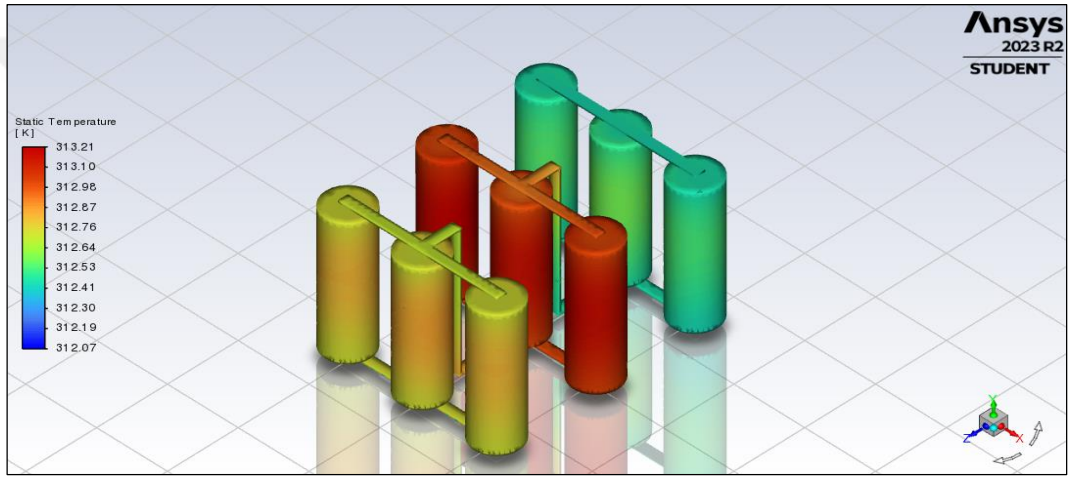


Şekil 3.48 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-4

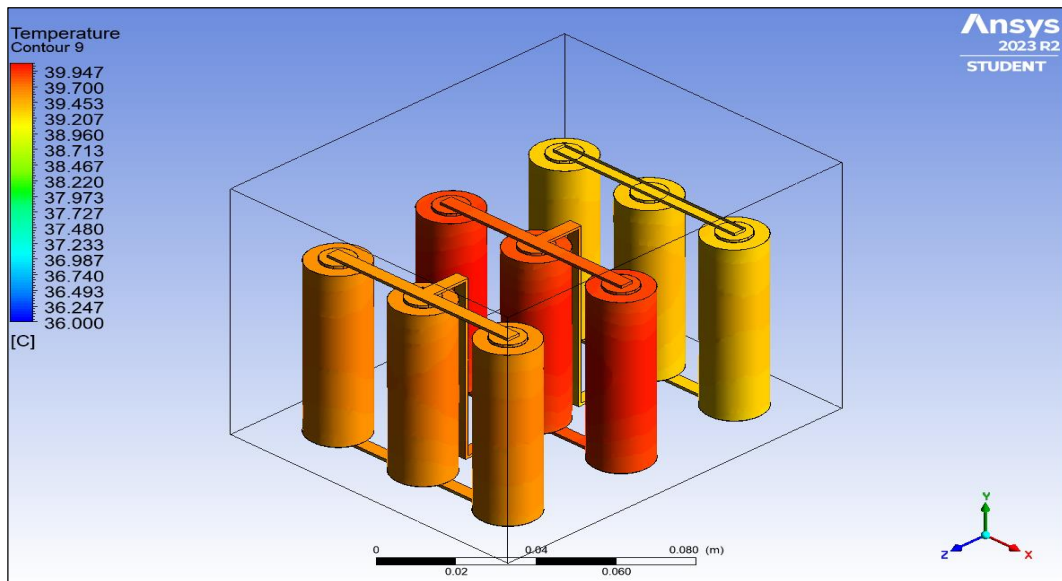
3.2.2. 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile elde edilen sonuçlar

20°C ortam sıcaklığında yapılan sayısal çözümler modelin yaz aylarındaki performansını inceleyebilmek üzere 36°C ortam sıcaklığında da yapılmış, Şekil 3.49, Şekil 3.50, Şekil 3.51 ve Şekil 3.52’de batarya modülünün 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında ANSYS Fluent programında NTGK alt modelinde elde edilen sıcaklık

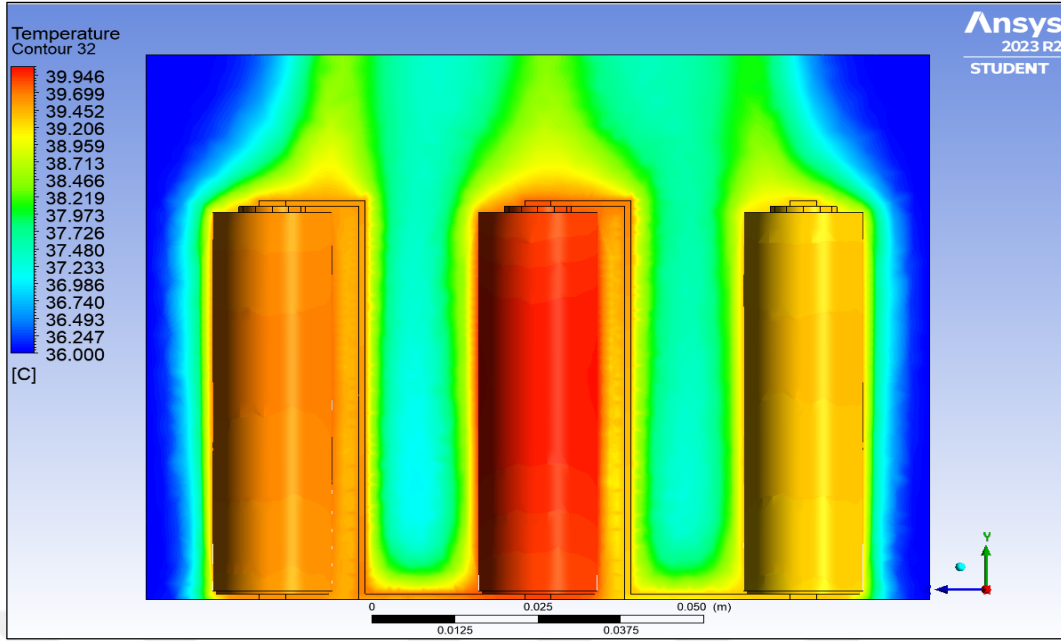
dağılımı sonuçları görünmekte olup batarya modülü maksimum yüzey sıcaklığının $40,06^{\circ}\text{C}$ olduğu sayısal olarak hesaplanmıştır. Diğer bir yandan 20°C ortam sıcaklığında olduğu gibi 36°C ortam sıcaklığında da NTGK modelindeki sıcaklık dağılımı ile hacimsel ısı kaynağı modelindeki sıcaklık dağılımı birbirine benzememekte, NTGK modelinde paralel olarak bağlanan bataryaların maksimum yüzey sıcaklıklarının birbirine oldukça yakın olduğu, seri olarak bağlanan batarya gruplarının ise farklı yüzey sıcaklıklarında olduğu, en yüksek sıcaklığın seri bağlantıda ortada kalan grupta olduğu, negatif kutba bağlı seri grubun yüzey sıcaklığının orta gruptaki batarya sıcaklığından biraz daha düşük olduğu, en düşük sıcaklığın ise modülün pozitif kutbunu oluşturan batarya hücrelerinde olduğu gözlemlenmiştir.



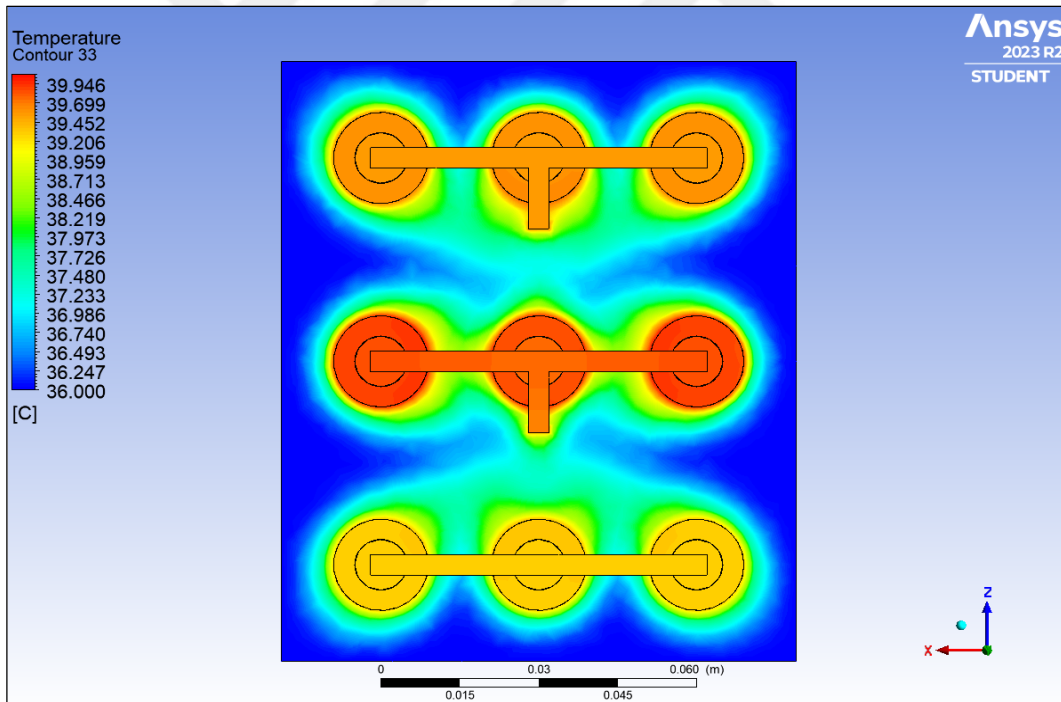
Şekil 3.49 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-1



Şekil 3.50 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-2



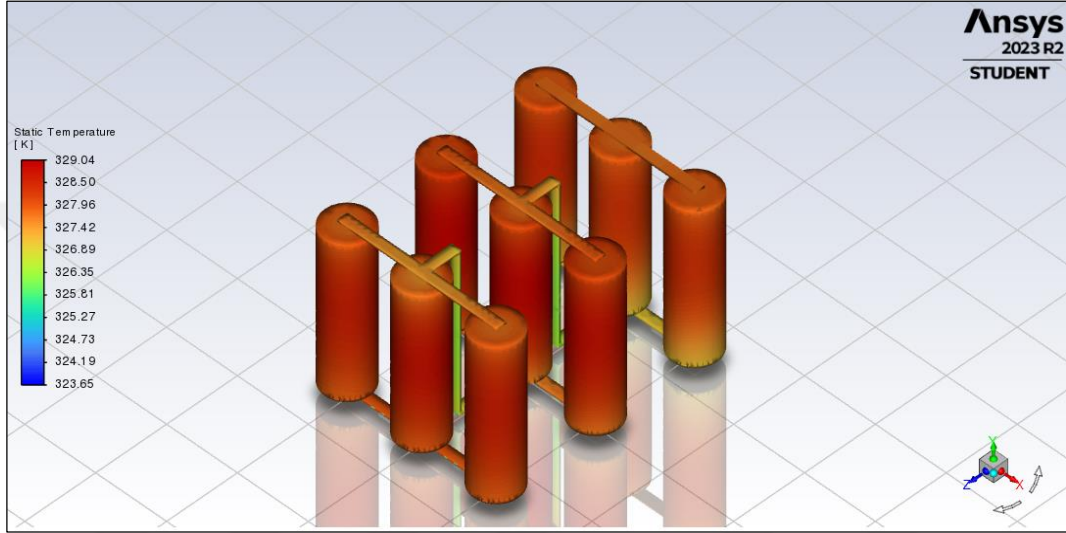
Şekil 3.51 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-3



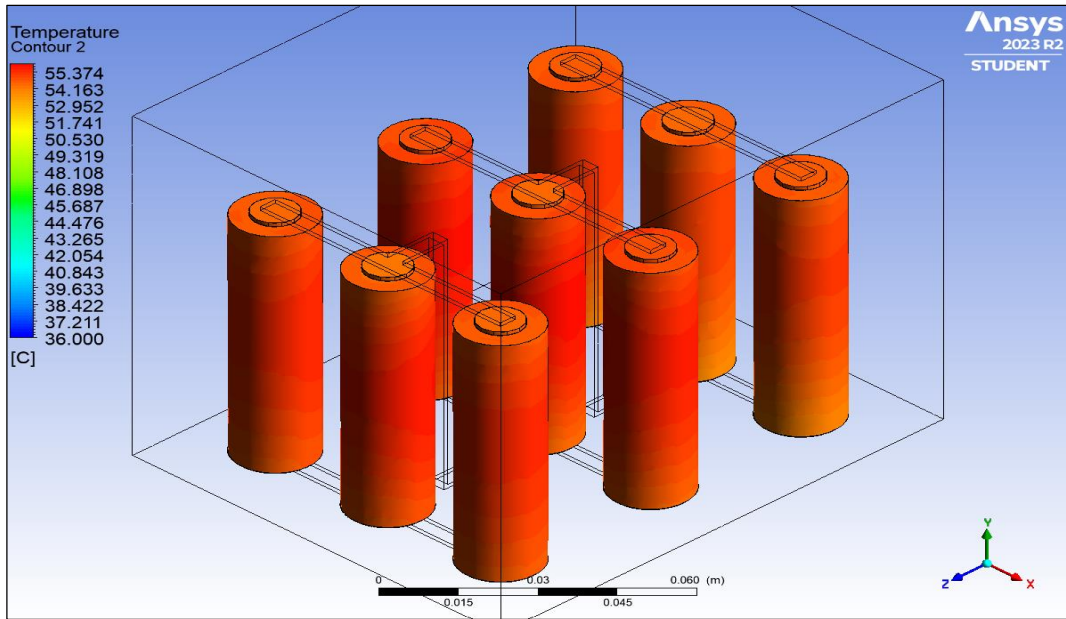
Şekil 3.52 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-4

Benzer şekilde, Şekil 3.53, Şekil 3.54, Şekil 3.55 ve Şekil 3.56’da ise batarya modülünün 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında ANSYS Fluent programı NTGK alt modelinde elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları görünmekte olup batarya modülü maksimum yüzey sıcaklığının 55,90°C olduğu sayısal olarak hesaplanmıştır. 1C deşarj

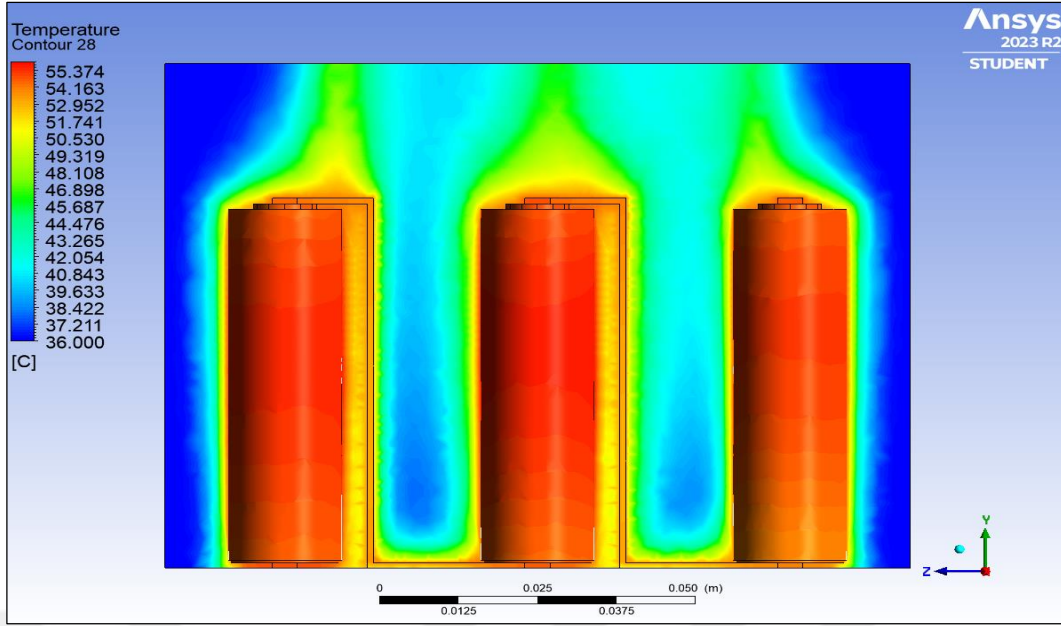
hızındaki sıcaklık dağılımına benzer bir şekilde 3C deşarj hızında da paralel olarak bağlanan bataryaların maksimum yüzey sıcaklıklarının birbirine oldukça yakın olduğu, seri olarak bağlanan batarya gruplarının ise farklı yüzey sıcaklıklarında olduğu, en yüksek sıcaklığın seri bağlantıda ortada kalan grupta olduğu, negatif kutba bağlı seri grubun yüzey sıcaklığının orta gruptaki batarya sıcaklığından biraz daha düşük olduğu, en düşük sıcaklığın ise modülün pozitif kutbunu oluşturan batarya hücrelerinde olduğu gözlemlenmiştir.



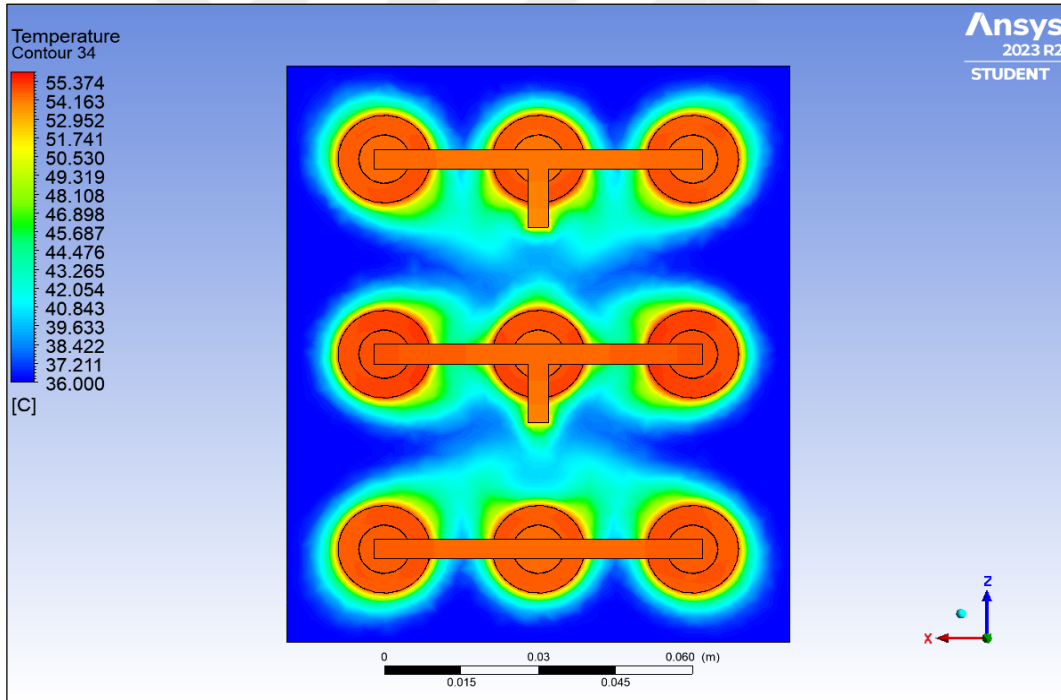
Şekil 3.53 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-1



Şekil 3.54 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-2



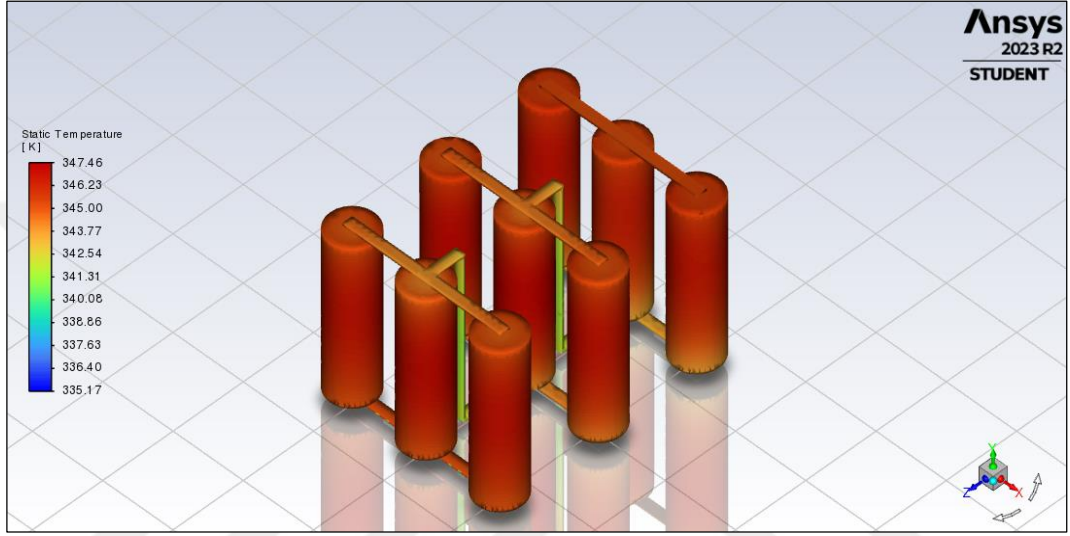
Şekil 3.55 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-3



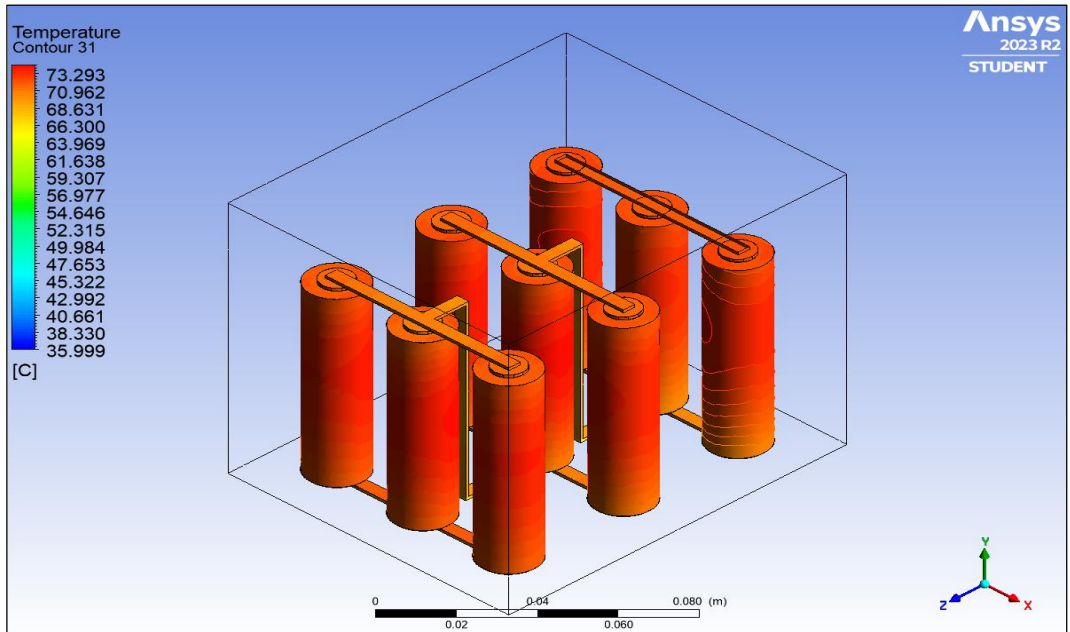
Şekil 3.56 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-4

Diğer bir yandan, batarya modülünün 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında ANSYS Fluent programı NTGK alt modelinde elde edilen sıcaklık dağılımı sonuçları Şekil 3.57, Şekil 3.58, Şekil 3.59 ve Şekil 3.60'da görünmekte olup batarya modülü maksimum yüzey sıcaklığının 74,31°C olduğu hesaplanmıştır. 1C ve 3C deşarj

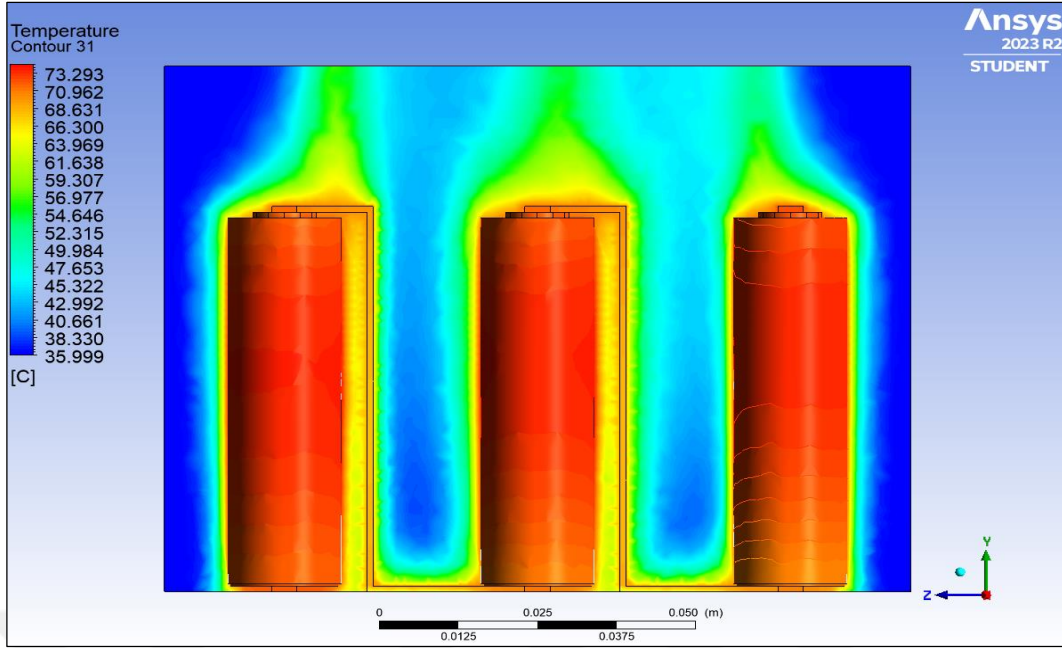
hızlarındaki ve 20°C ortam sıcaklığındaki sayısal analiz sonuçlarına benzer bir şekilde 5C deşarj hızında da paralel olarak bağlanan bataryaların maksimum yüzey sıcaklıklarının birbirine oldukça yakın olduğu, seri olarak bağlanan batarya gruplarının ise farklı yüzey sıcaklıklarında olduğu, en yüksek sıcaklığın seri bağlantıda ortada kalan grupta olduğu, negatif kutba bağlı seri grubun yüzey sıcaklığının orta gruptaki batarya sıcaklığından biraz daha düşük olduğu, en düşük sıcaklığın ise modülün pozitif kutbunu oluşturan batarya hücrelerinde olduğu gözlemlenmiştir.



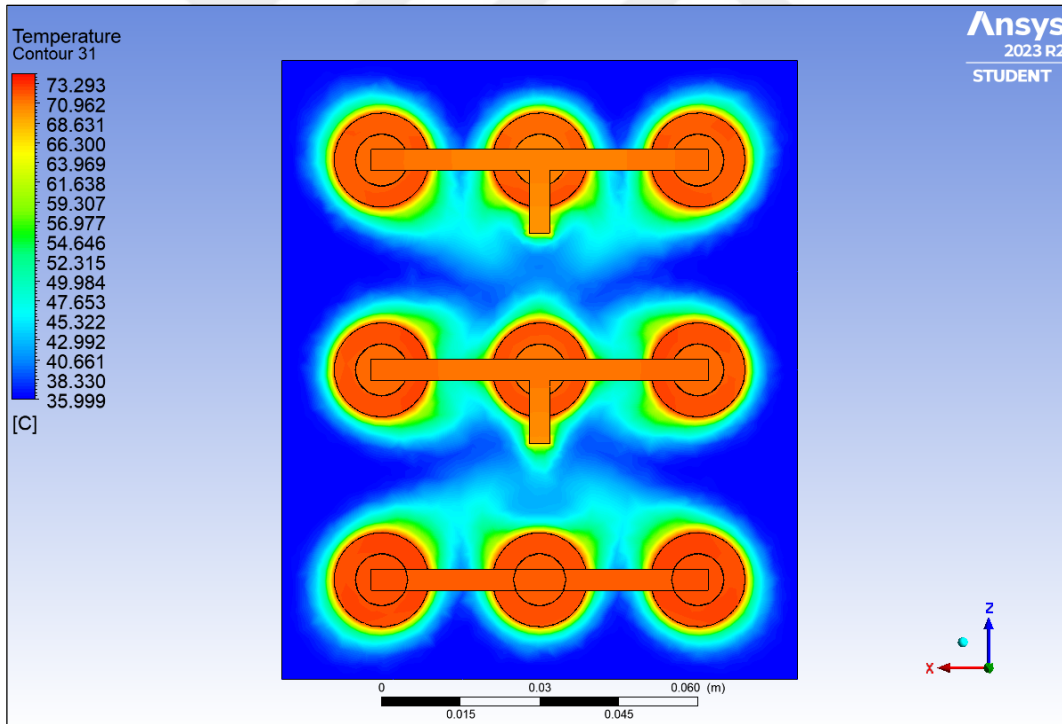
Şekil 3.57 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-1



Şekil 3.58 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-2



Şekil 3.59 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-3

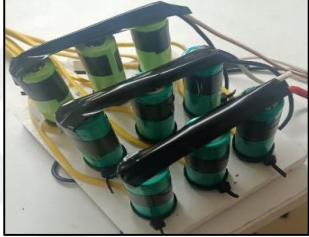
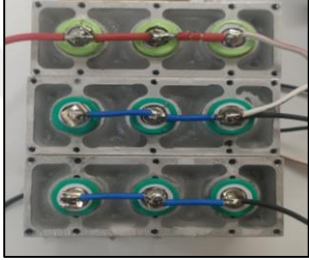

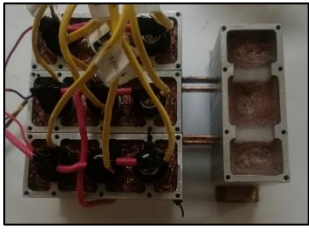



Şekil 3.60 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında NTGK modeli ile deşarj sonunda elde edilen batarya modülü sıcaklık dağılımı-4

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde tasarlanan tüm sistemlerin 20°C ve 36°C olmak üzere iki farklı ortam sıcaklığındaki ve 1C, 3C ve 5C olmak üzere üç farklı deşarj hızındaki testlerinde elde edilen deneysel sonuçları hem kendi aralarında hem de doğal taşınımlı referans sistem ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca S1 nolu referans sistemin deneysel verileri, Fluent modülünde kullanılan iki farklı termal model aracılığıyla elde edilen sayısal sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Çizelge 4.1’de tasarlanan tüm sistemler gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Tasarlanan tüm sistemler

Sistem No	Sistem Tanımı	Sistem Görseli
S1	Doğal Taşınımlı Sistem	
S2	FDM + 1.Alüminyum Blok	
S3	FDM + 1.Alüminyum Blok + Isı Borusu (17cm) + 2.Alüminyum Blok	
S4	Kompozit FDM + 1.Alüminyum Blok + Isı Borusu(17cm) + 2.Alüminyum Blok	
S5	Kompozit FDM + 1.Alüminyum Blok + Isı Borusu(17cm) + 2.Alüminyum Blok + Fan	

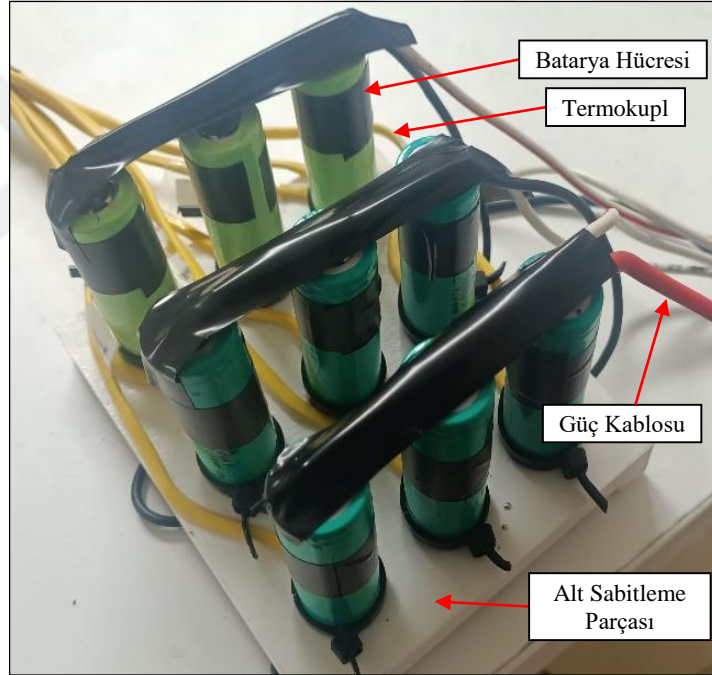
S6

Kompozit FDM +
1.Alüminyum Blok +
Isı Borusu(15cm) +
2.Alüminyum Blok +
Fan



4.1. Doğal Taşınımlı Sistemin (S1) Deneysel ve Sayısal Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 4.1’de gösterildiği gibi S1 sistemi 9 adet 18650 model lityum iyon batarya ile oluşturulmuş olup sistemde soğutma için herhangi bir FDM, alüminyum blok, ısı boruları veya fan kullanılmamış sadece batarya hücreleri çevresinden doğal taşınım ile ısı transferi mevcuttur ve bu çalışmada diğer sistemler ile karşılaştırılmak üzere referans sistem olarak kabul edilmiştir.



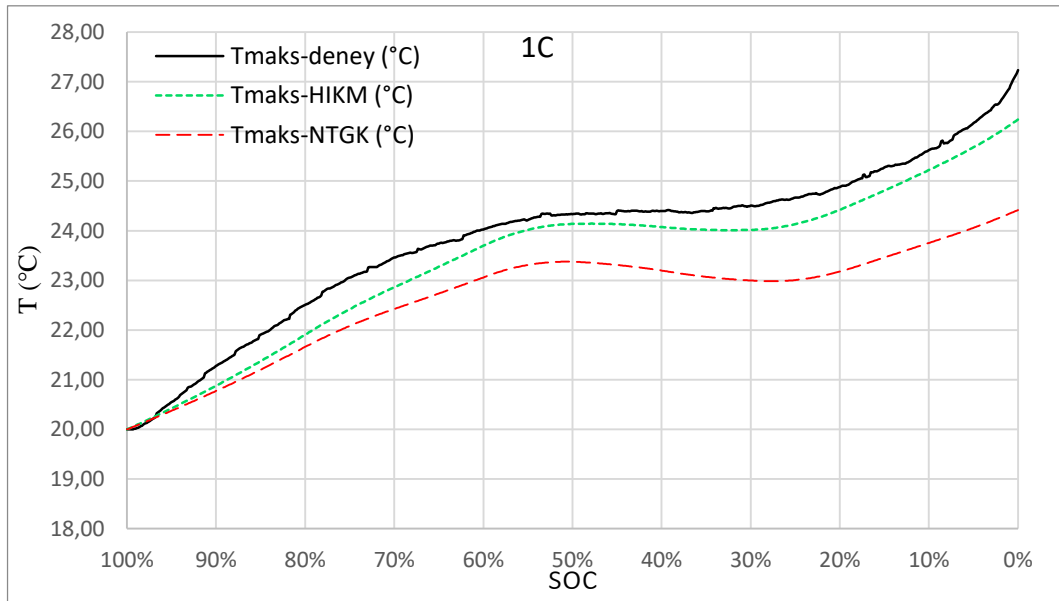
Şekil 4.1 Doğal taşınımlı referans modül (S1)

4.1.1. S1 sisteminin 20°C ortam sıcaklığında deneysel ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

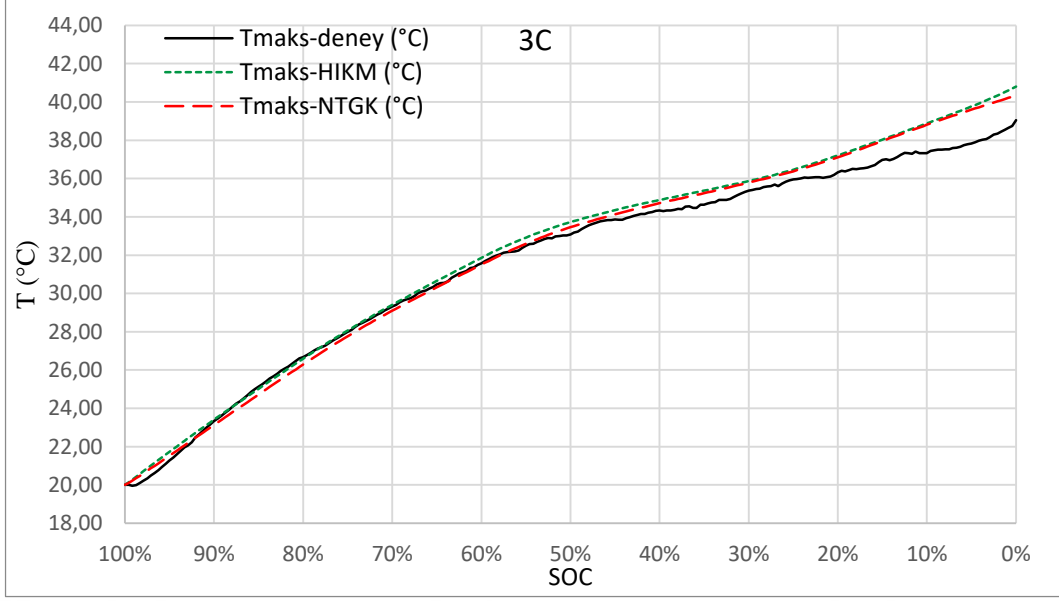
S1 sistemi ilk olarak 20°C ortam sıcaklığında ve 1C, 3C ve 5C deşarj hızlarında test edilmiş, batarya yüzeylerinde oluşan maksimum sıcaklıklar ve maksimum sıcaklık farkları ölçülmüş, elde edilen deneysel sonuçlar Ansys programı Fluent Modülünde sistemin hem UDF yazılarak oluşturulan hacimsel ısı kaynağı modeli ile hem de Fluent’te hazır batarya modüllerinden biri olan NTGK modeli ile modellenerek elde edilen sayısal veriler ile kıyaslanmıştır.

Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4, $T=20^{\circ}\text{C}$ ortam sıcaklığında sırasıyla 1C, 3C ve 5C batarya deşarj hızlarında sayısal ve deneysel olarak elde edilen maksimum yüzey sıcaklıklarının batarya doluluk oranına göre değişimlerini göstermektedir. Genel anlamda deneysel ve sayısal yollarla elde edilen maksimum sıcaklık profillerinin seyrinin birbirine oldukça yakın olduğu, batarya doluluk oranının sifıra yaklaşmasıyla ve batarya deşarj hızının artmasıyla birlikte sıcaklığın da arttığı görülmektedir.

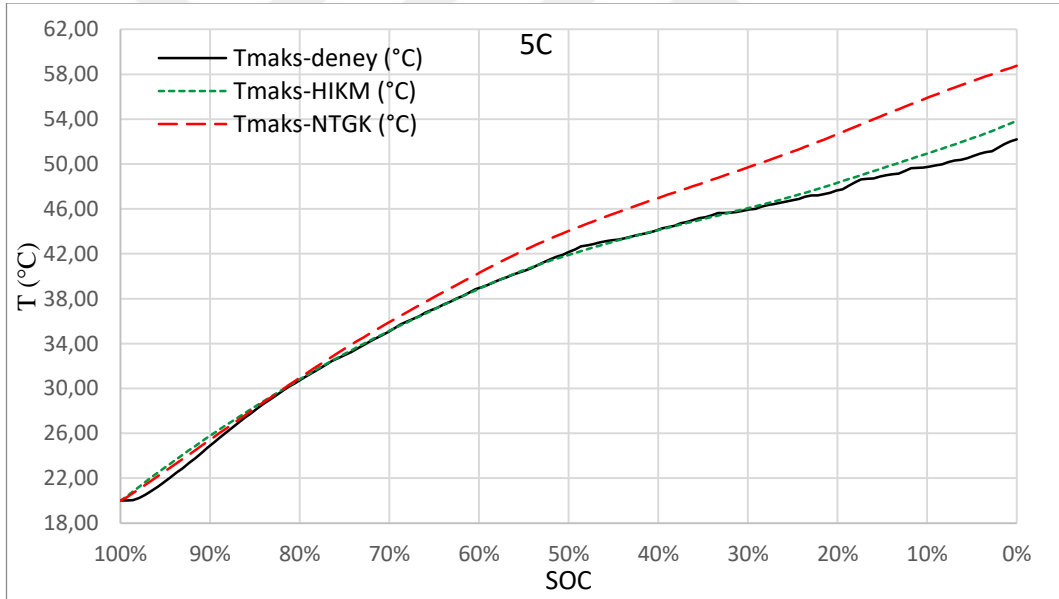
Sayısal modeller karşılaştırıldığında ise 20°C ortam sıcaklığında ve 1C deşarj hızında UDF yazılarak oluşturulan hacimsel ısı kaynağı modeli ile elde edilen sonuçlar, NTGK modeline göre deneysel sonuçlara daha yakın bir seyir izlemiştir. 3C deşarj hızında ise hem hacimsel ısı kaynağı modeli hem de NTGK modeli benzer sonuçlar vermiş olup her iki sayısal sonuç da deşarj işlemi boyunca deneysel sonuçlara oldukça yakındır. Diğer bir yandan 5C deşarj hızındaki sayısal analizlerde, %75 batarya doluluk oranına kadar her iki sayısal modelde benzer ve deneysel sonuçlara yakın sonuçlar verirken ilerleyen batarya deşarj derinliklerinde hacimsel ısı kaynağı modeli NTGK modeline göre deneysel verilere daha yakın sonuçlar vermiş ve NTGK modelinde deşarj sonuna doğru sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasındaki fark da açılmıştır. Dolayısıyla genel olarak S1 modülünün termal olarak modellenmesinde hacimsel ısı kaynağı modeli 20°C ortam sıcaklığında ve farklı deşarj hızlarında NTGK modeline göre deneysel verilere daha yakın sonuçlar vermiştir.



Şekil 4.2 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında batarya modülünde deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum sıcaklıkların batarya doluluk oranına göre değişimi, T_{maks} ($^{\circ}\text{C}$)



Şekil 4.3 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında batarya modülünde deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum sıcaklıkların batarya doluluk oranına göre değişimi, T_{maks} (°C)



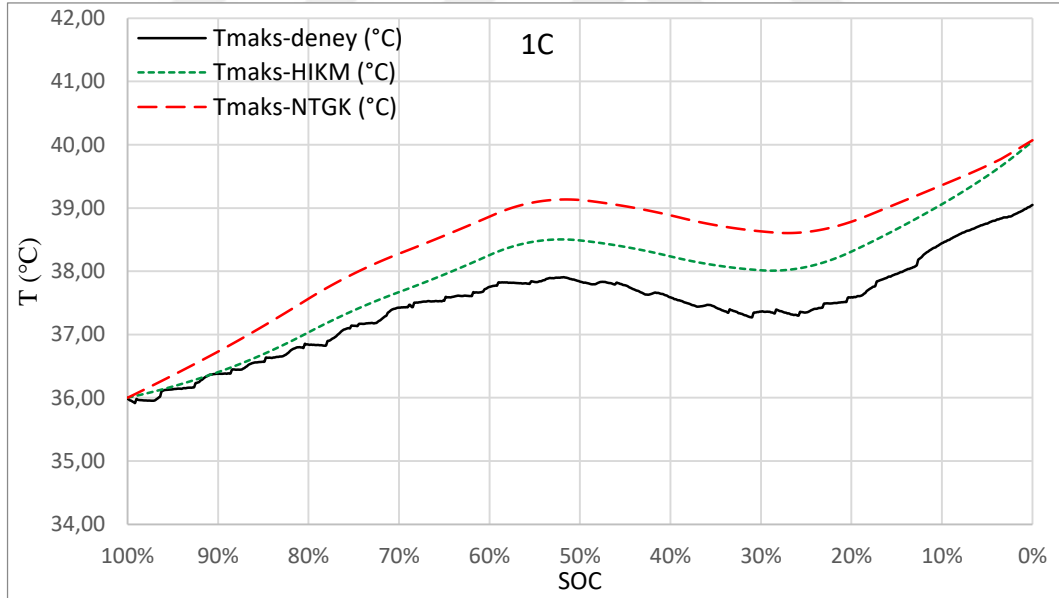
Şekil 4.4 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında batarya modülünde deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum sıcaklıkların batarya doluluk oranına göre değişimi, T_{maks} (°C)

4.1.2. S1 sisteminin 36°C ortam sıcaklığında deneysel ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

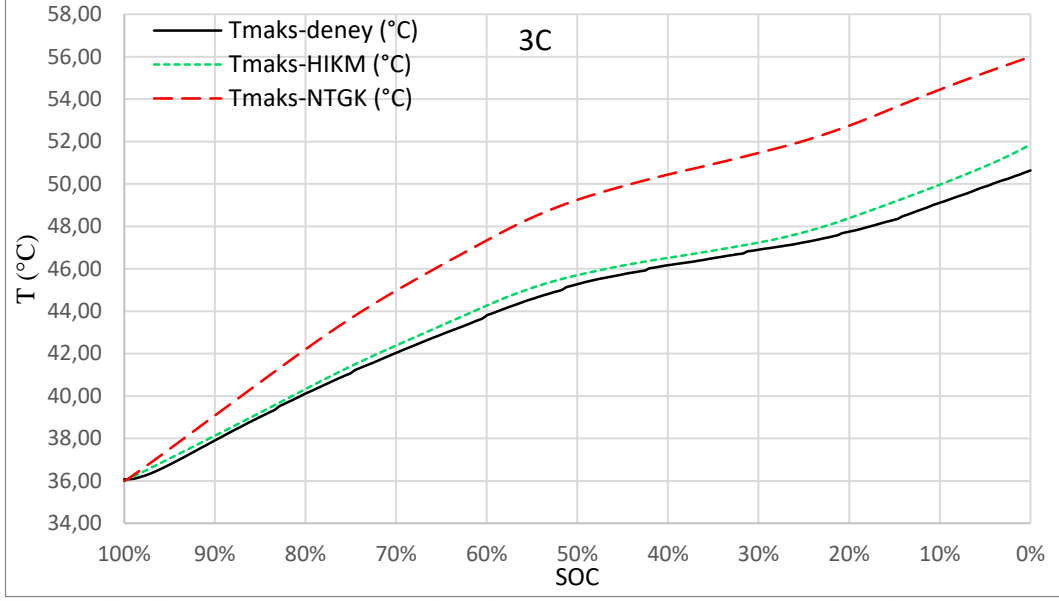
Bu bölümde ise doğal taşımimli referans sistem S1, modülün yaz aylarındaki performansını da değerlendirmek üzere 36°C ortam sıcaklığında ve 1C, 3C ve 5C deşarj hızlarında test edilmiş, elde edilen deneysel sonuçlar 20°C ortam sıcaklığındakine benzer bir şekilde iki farklı sayısal model ile elde edilen veriler ile kıyaslanmıştır.

Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7, $T=36^{\circ}\text{C}$ ortam sıcaklığında sırasıyla 1C, 3C ve 5C batarya deşarj hızlarında sayısal ve deneysel olarak elde edilen maksimum yüzey sıcaklıklarının batarya doluluk oranına göre değişimlerini göstermektedir.

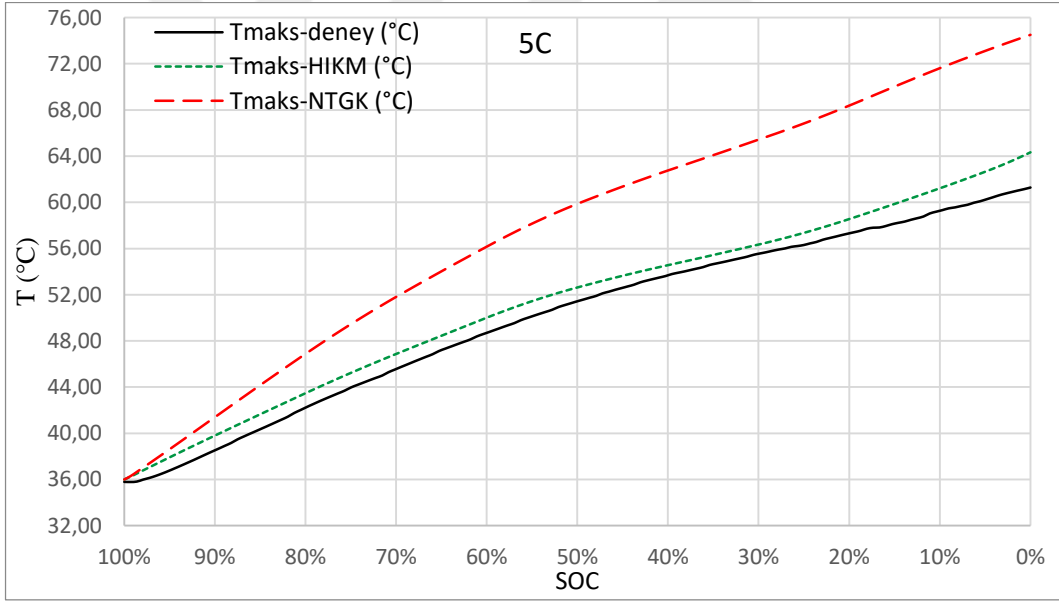
36°C ortam sıcaklığında ve 1C deşarj hızında her iki sayısal modelde de deşarj işlemi sonunda elde edilen maksimum yüzey sıcaklıklarının birbirine eşit olmasına rağmen deşarj işlemi süresince hacimsel ısı kaynağı modeli ile elde edilen sonuçlar NTGK modeline göre deneysel sonuçlara daha yakın bir seyir izlemiştir. Benzer şekilde, 3C deşarj hızında da hacimsel ısı kaynağı modeli ile elde edilen değerler NTGK modeli ile elde edilen değerlere göre deneyselle verilere oldukça yakın sonuçlar ortaya koymuştur. Diğer bir yandan 5C deşarj hızında da hacimsel ısı kaynağı modeli NTGK modeline göre deneysel verilere daha yakın sonuçlar verirken NTGK modelinde özellikle deşarj sonuna doğru sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasındaki fark daha da açılmaktadır. Dolayısıyla genel olarak S1 modülünün termal olarak modellenmesinde farklı deşarj hızlarında ve 20°C ortam sıcaklığında olduğu gibi 36°C ortam sıcaklığında da hacimsel ısı kaynağı modeli, NTGK modeline göre deneysel verilere daha yakın sonuçlar vermiştir.



Şekil 4.5 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında batarya modülünde deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum sıcaklıkların batarya doluluk oranına göre değişimi, T_{maks} ($^{\circ}\text{C}$)



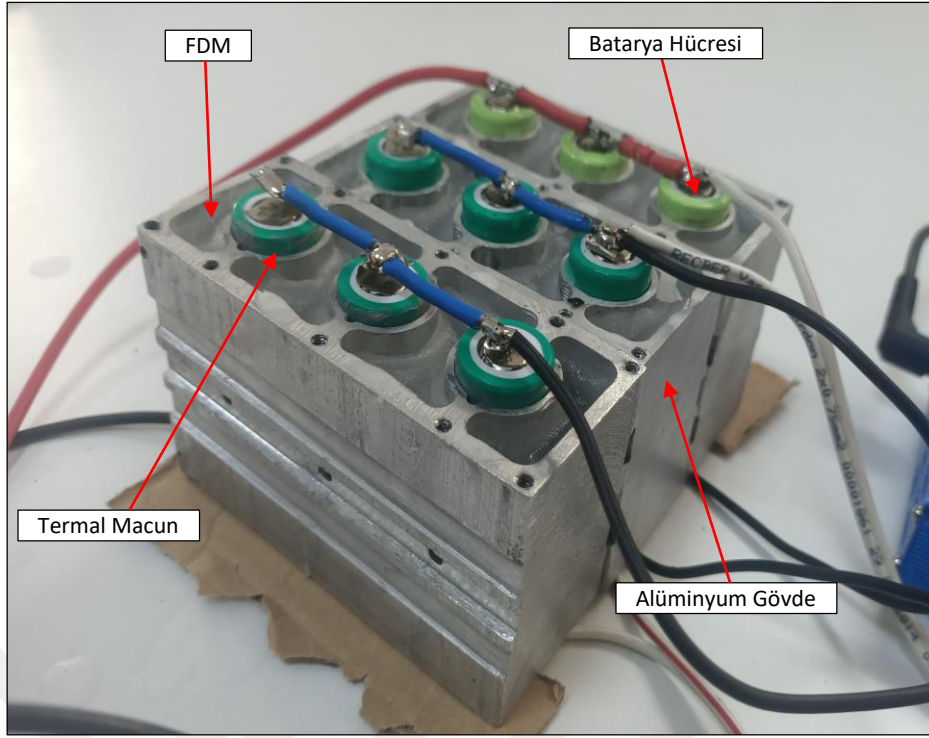
Şekil 4.6 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında batarya modülünde deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum sıcaklıkların batarya doluluk oranına göre değişimi, T_{maks} (°C)



Şekil 4.7 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında batarya modülünde deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum sıcaklıkların batarya doluluk oranına göre değişimi, T_{maks} (°C)

4.2. FDM ve Alüminyum Blok Kullanarak Oluşturulan Pasif Sistemin (S2) Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 4.8’de gösterildiği gibi S2 sistemi 9 adet 18650 tip lityum iyon batarya ve FDM içeren alüminyum blok ile oluşturulmuş olup S1 sisteminden farklı olarak sistemde soğutma için alüminyum blok ve FDM kullanılmıştır.

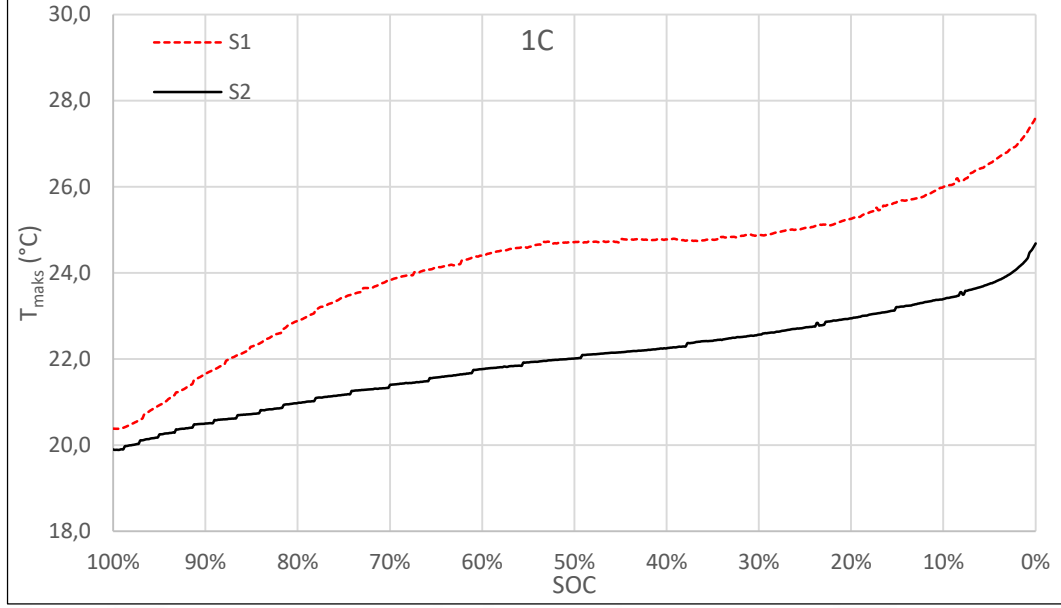


Şekil 4.8 FDM ve alüminyum blok kullanarak oluşturulan pasif sistem (S2)

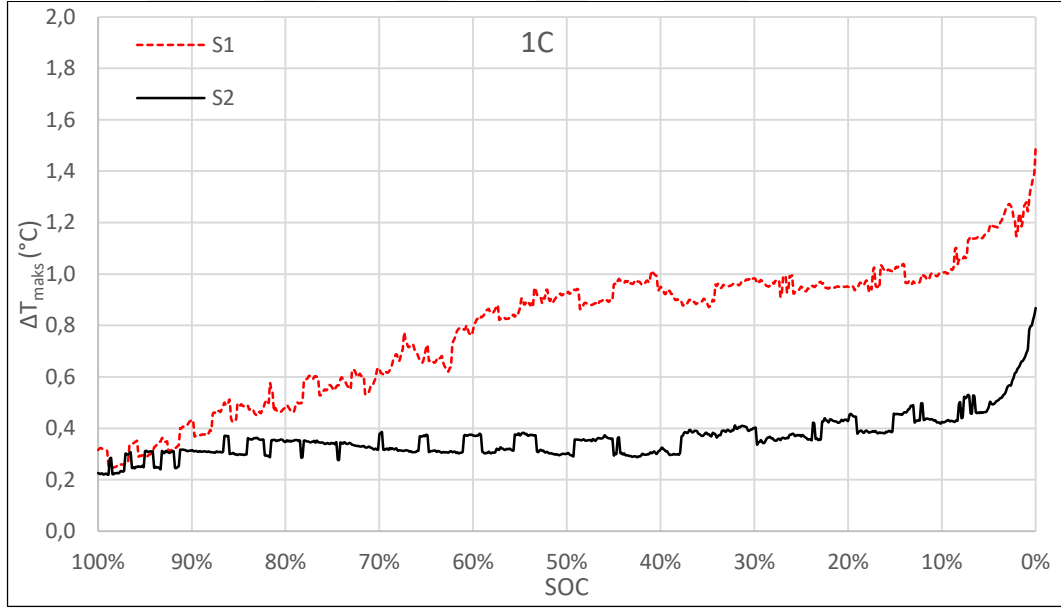
4.2.1. S2 sisteminin 20°C ortam sıcaklığındaki performansı

4.2.1.1. S2 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı

1C deşarj hızında doğal taşınımlı referans modül (S1) ile FDM ve alüminyum blok kullanılarak oluşturulan modülün (S2) 20°C ortam sıcaklığında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir. Tasarlanan S2 modülünün, referans modül S1 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 27,62°C'den yaklaşık %10,6 oranında düşürerek 24,68°C'ye indirdiği görülmüştür. Ayrıca S2 sisteminin referans modül S1 sistemine göre maksimum batarya yüzey sıcaklık farkını ise 1,5°C'den yaklaşık %42 oranında düşürerek 0,87°C'ye indirdiği görülmüştür. Referans sisteme FDM içeren alüminyum blok eklenmesi ile ısı transfer mekanizması doğal taşınımdan iletim ile ısı transferi şekline dönüştürülerek iyileştirilmiş ve böylece S2 sistemi, S1 sistemine göre 20°C ortam sıcaklığında ve 1C deşarj hızında daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin ve maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altındadır. Şekil 4.10'da maksimum yüzey sıcaklık farkları (ΔT_{maks}) değerlerinde görülen salınımlar $\pm 0,1^\circ\text{C}$ olup termokupulların sıcaklık okuma hassasiyeti olan $\pm 0,5^\circ\text{C}$ sınırları içerisinde dir.



Şekil 4.9 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)

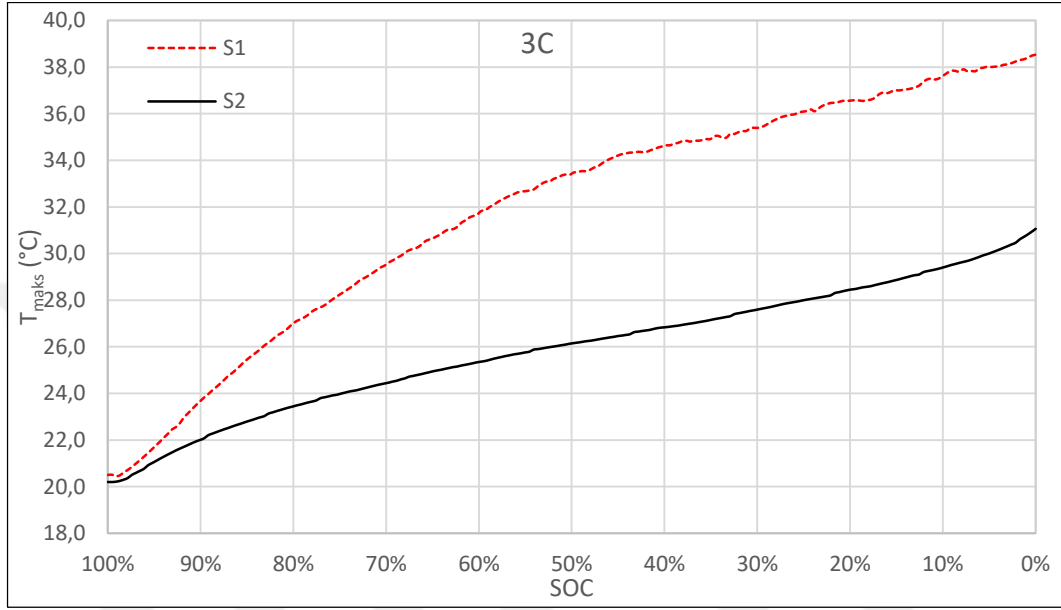


Şekil 4.10 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

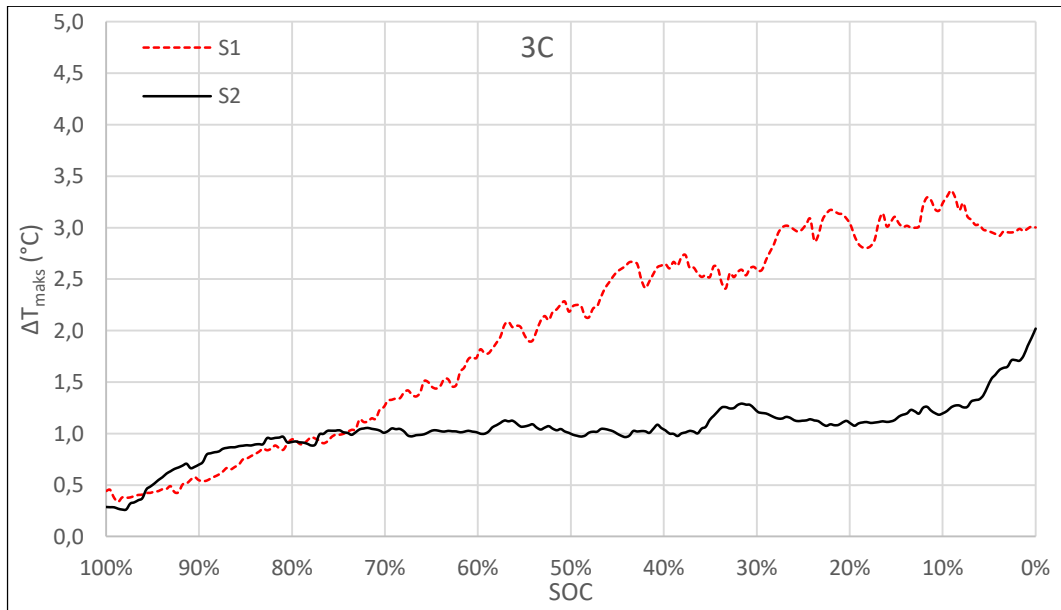
4.2.1.2. S2 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de ise 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında referans modül S1 ile S2 modülünün maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları verilmiştir. Tasarlanan S2 modülünün, referans modül S1 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 38,53°C’den yaklaşık %19,4 oranında düşürerek 31,06°C’ye indirdiği görülmüştür. Ayrıca S2 sisteminin referans modül S1 sistemine göre

maksimum batarya yüzey sıcaklık farkını ise $3,36^{\circ}\text{C}$ 'den yaklaşık %40 oranında düşürerek $2,02^{\circ}\text{C}$ 'ye indirdiği görülmüştür. Dolayısıyla 1C deşarj hızında olduğu gibi, 3C deşarj hızında da S2 sistemi, S1 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C 'nin ve maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C 'nin altındadır.



Şekil 4.11 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} ($^{\circ}\text{C}$)



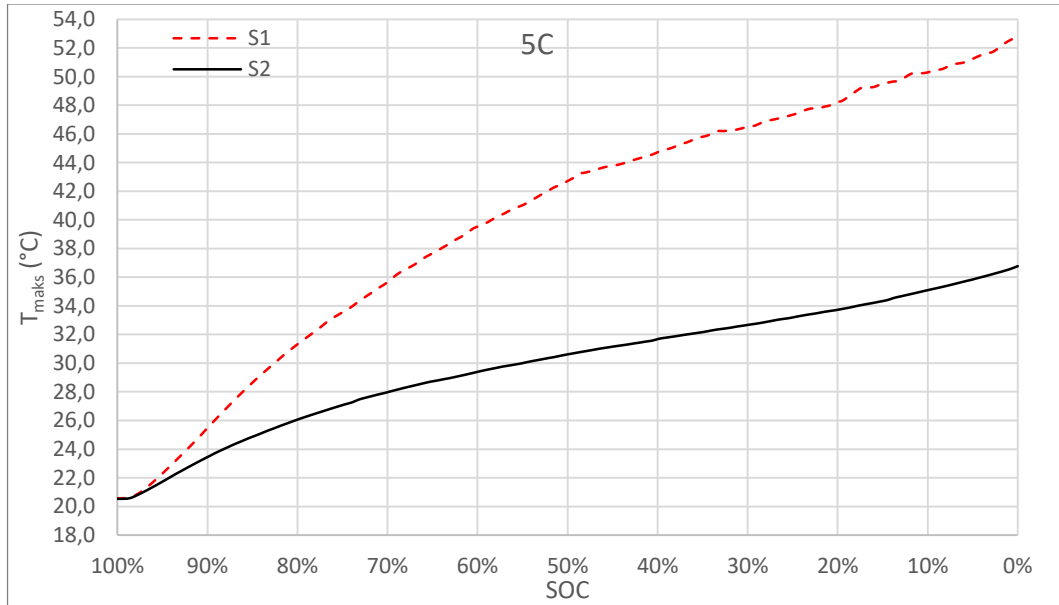
Şekil 4.12 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} ($^{\circ}\text{C}$)

4.2.1.3. S2 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı

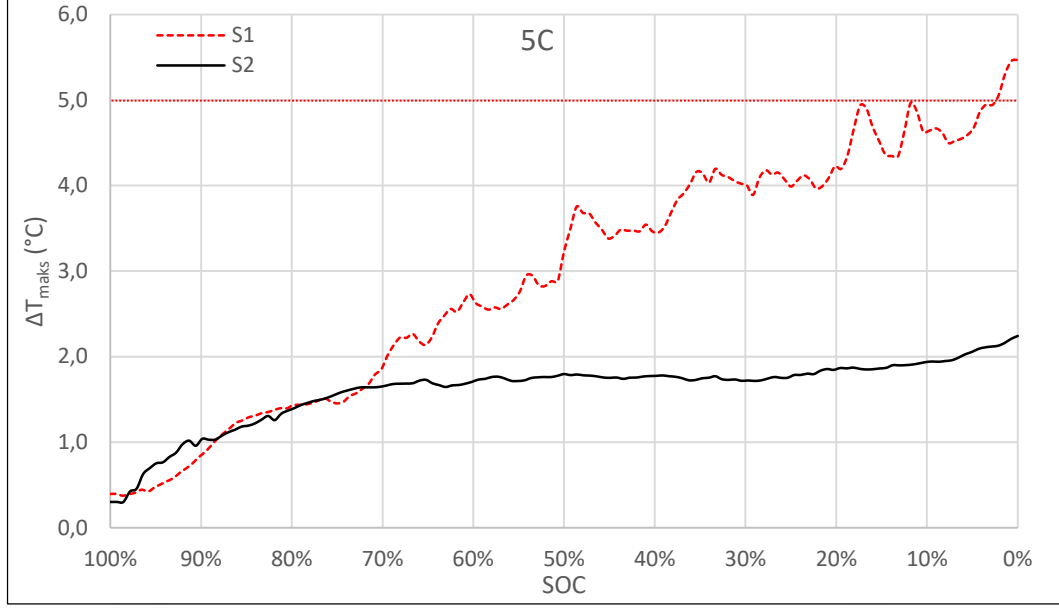
5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında referans modül S1 ile S2 modülünün maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları ise Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te verilmiştir.

Tasarlanan S2 modülünün, referans modül S1 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 52,76°C'den yaklaşık %30 oranında düşürerek 36,78°C'ye indirdiği görülmüştür. Ayrıca S2 sisteminin referans modül S1 sistemine göre maksimum batarya yüzey sıcaklık farkını ise 5,47°C'den yaklaşık %59 oranında düşürerek 2,24°C'ye indirdiği görülmüştür.

Diğer deşarj hızlarından farklı olarak bu deşarj hızında yapılan testlerde referans sistem S1'de maksimum yüzey sıcaklığının bataryalar için izin verilen maksimum çalışma sıcaklığı olan 40°C'yi aştığı ve 52,76°C'ye ulaştığı, ayrıca maksimum batarya yüzey sıcaklık farkının da izin verilen sınırı aştığı ancak S2 sisteminin kullanılmasıyla bu sorunların ortadan kalktığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla 5C deşarj hızında da diğer deşarj hızlarında olduğu gibi S2 sistemi, S1 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiş ve hem batarya maksimum yüzey sıcaklığını hem de batarya maksimum yüzey sıcaklık farkını bataryanın optimum çalışma sıcaklığı aralığına çekmiştir.



Şekil 4.13 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)

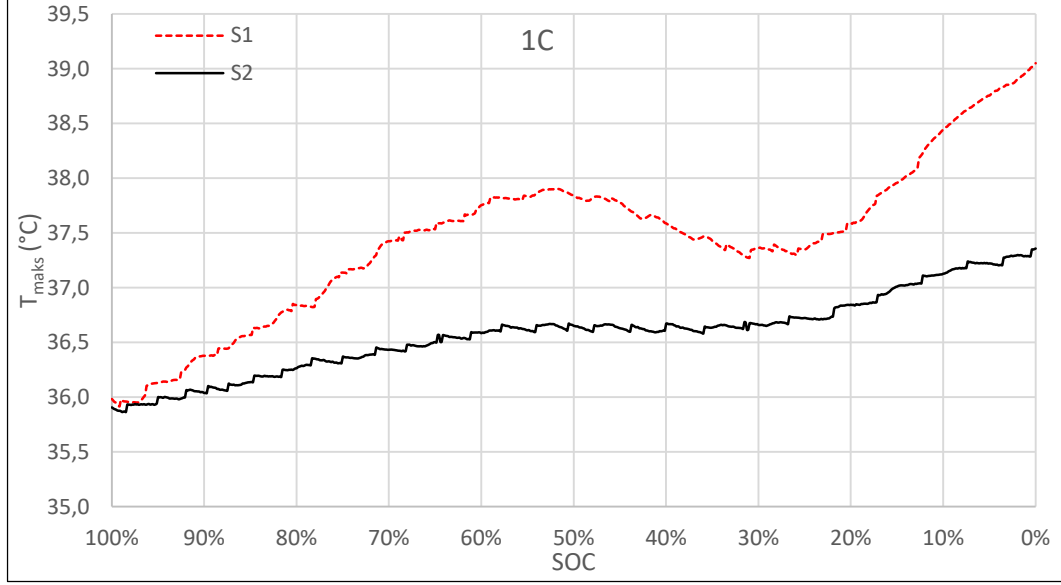


Şekil 4.14 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

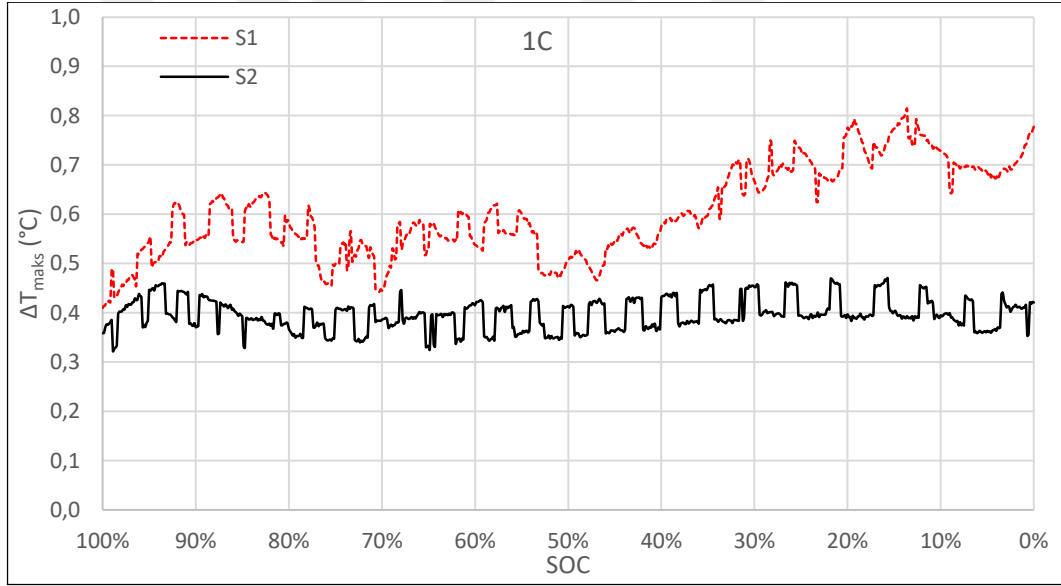
4.2.2. S2 sisteminin 36°C ortam sıcaklığındaki performansı

4.2.2.1. S2 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı

1C deşarj hızında doğal taşınımli referans modül (S1) ile FDM ve alüminyum blok kullanılarak oluşturulan modülün (S2) 36°C ortam sıcaklığında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir. Tasarlanan S2 modülünün, referans modül S1 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 39,05°C'den yaklaşık %4,3 oranında düşürerek 37,36°C'ye indirdiği görülmüştür. Ayrıca S2 sisteminin referans modül S1 sistemine göre maksimum batarya yüzey sıcaklık farkını ise 0,81°C'den 0,47°C'ye indirdiği görülmüştür. Dolayısıyla 20°C ortam sıcaklığında olduğu gibi 36°C ortam sıcaklığında da S2 sistemi S1 sistemine göre 1C deşarj hızında daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin ve maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altındadır. 1C deşarj hızında S2 sisteminde maksimum batarya yüzey sıcaklığı 37,36°C olarak ölçülmüş olup bu sıcaklık FDM'nin erime sıcaklığı olan 38°C'den düşük olduğu için herhangi bir erime meydana gelmemiş, FDM katı halde kalmış ve FDM üzerinden ısı transferi sadece iletim şeklinde gerçekleşmiş, FDM gizli ısı çekemediği için FDM'nin sıcaklığı baskılayıcı etkisinden faydalanılamamıştır.



Şekil 4.15 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)

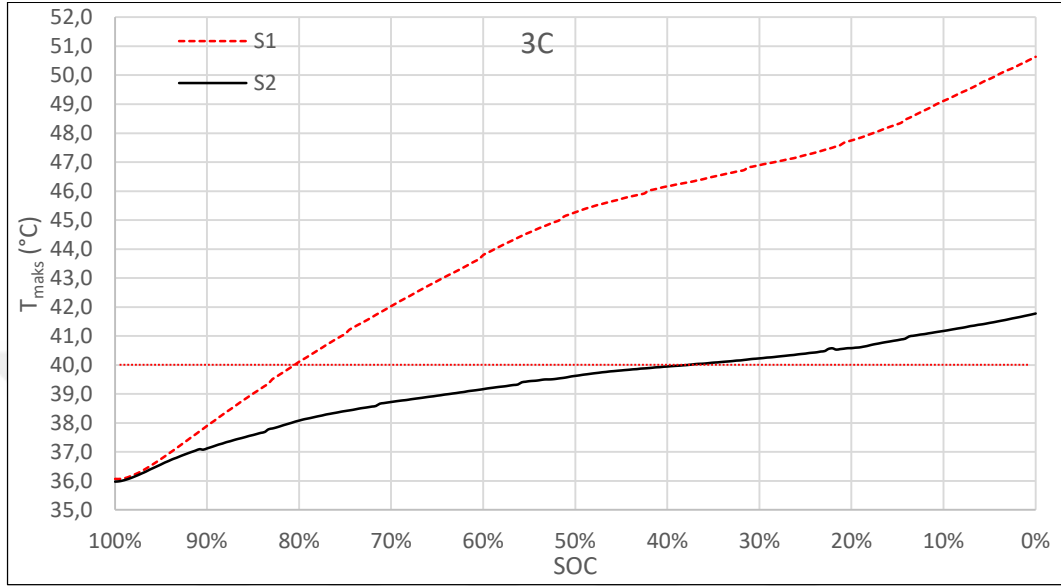


Şekil 4.16 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

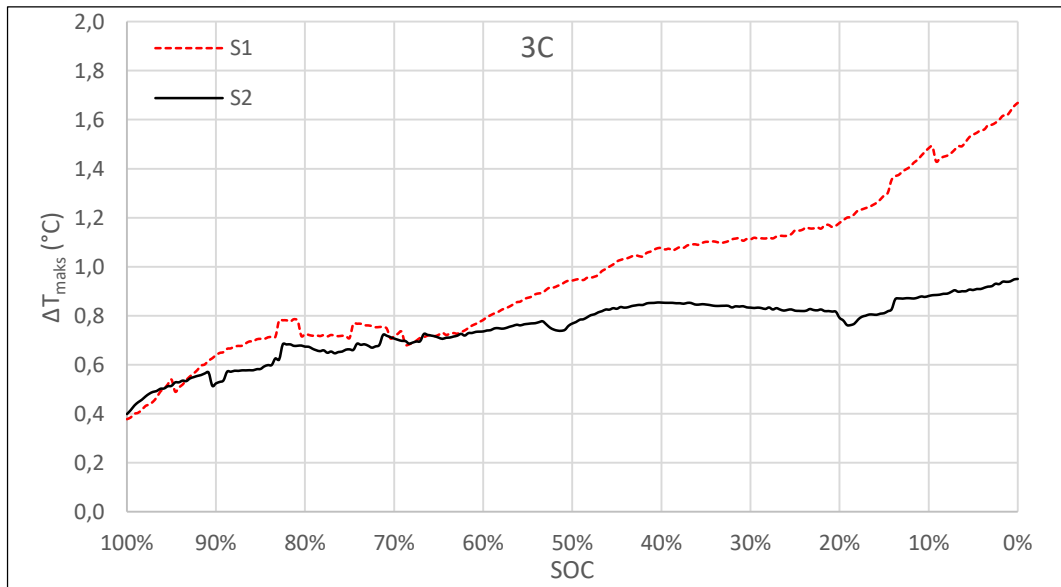
4.2.2.2. S2 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı

3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında referans modül S1 ile S2 modülünün maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları ise Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilmiştir. Tasarlanan S2 modülünün, referans modül S1 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 50,63°C'den yaklaşık %17,5 oranında düşürerek 41,78°C'ye indirdiği görülmüştür. Ayrıca S2 sisteminin referans modül S1 sistemine göre maksimum batarya yüzey sıcaklık farkını ise 1,67°C'den 0,95°C'ye indirdiği

görülmüştür. Dolayısıyla 3C deşarj hızında da S2 sistemi, S1 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin üzerine çıkmış ancak maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen sıcaklık değeri olan 5°C'nin altında kalmıştır.



Şekil 4.17 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



Şekil 4.18 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

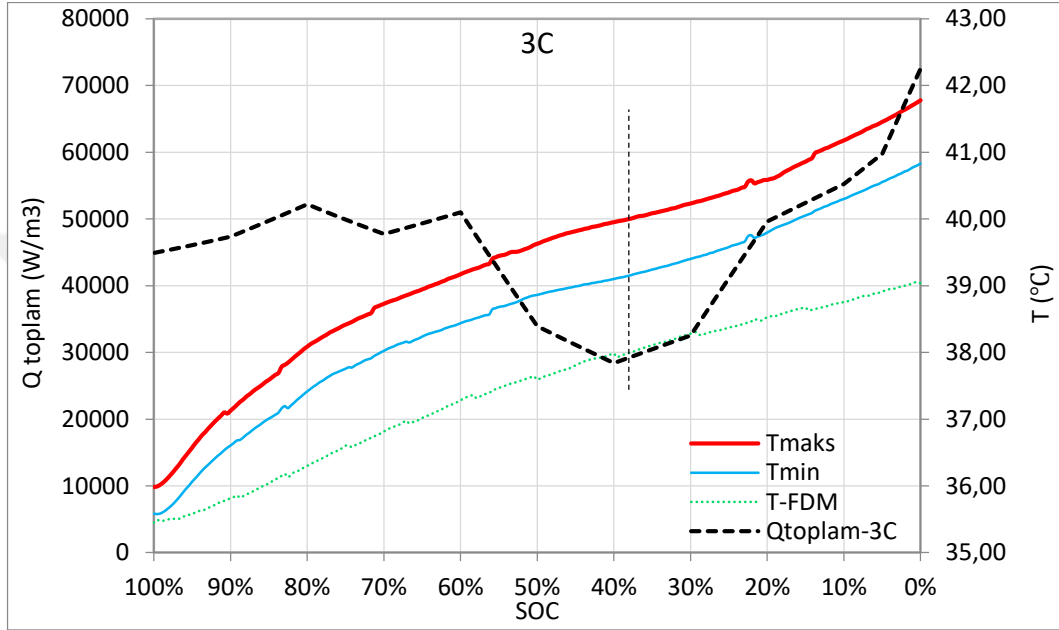
Şekil 4.19'da S2 sisteminde 36°C ortam sıcaklığında 3C deşarj hızında elde edilen batarya maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı

üretimi gösterilmiştir. Grafikte sol taraftaki y eksenini birim hacimdeki toplam ısı üretimini (W/m^3) gösterirken, sağ taraftaki y eksenini ise sıcaklık değerlerini ($^{\circ}C$) göstermektedir. Başlangıçta FDM sıcaklığının batarya yüzeyinde ölçülen minimum sıcaklığa eşit ve maksimum sıcaklığa yakın bir değer olduğu ancak deşarj işleminin başlamasıyla birlikte batarya yüzey sıcaklıklarının FDM sıcaklığına göre daha hızlı arttığı, batarya doluluk oranının azalmaya başlaması ile birlikte batarya maksimum yüzey sıcaklığı ve FDM sıcaklığı arasındaki farkın da arttığı gözlemlenmiştir. FDM sıcaklığının erime sıcaklığı olan $38^{\circ}C$ 'ye ulaştığında (SOC=%38) batarya maksimum yüzey sıcaklığının $40^{\circ}C$ 'ye ulaştığı, FDM'nin erime sıcaklık bölgesine girmesine rağmen hem FDM'nin sıcaklığının hem de batarya yüzey sıcaklığının arttığı ancak FDM'nin erimeye başlaması nedeniyle FDM'nin sıcaklık artış hızında düşme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca deşarj işlemi sonunda FDM sıcaklığı maksimum $39,04^{\circ}C$ 'ye ulaşmış olup erime işlemi tamamen bitmemiş, FDM'nin bir kısmı sıvı bir kısmı ise katı halde kalmış ve gizli ısının tamamı çekilemediği için FDM'nin sıcaklığı baskılayıcı etkisinden tam anlamıyla faydalanılamamıştır.

FDM erime sıcaklığı noktasal değil bölgesel gerçekleşmekte olup erime işlemi devam ederken FDM sıcaklığı da artmaktadır. Bu durum daha önce bahsedildiği gibi organik FDM'yi oluşturan alkanların farklı erime noktalarının olması nedeniyle erime işleminin tek bir sıcaklık değerinde olmayıp daha çok bir erime bölgesinde gerçekleşmesi kavramıyla örtüşmektedir. Kullanılan FDM'nin katalog değerlerinden de erime sıcaklık bölgesinin $38-43^{\circ}C$ aralığında olduğu dolayısıyla erime işlemi devam ederken sıcaklığın sabit kalmayacağı ve artacağı beklenmektedir. Diğer bir yandan FDM'nin ısı iletim katsayısının çok düşük bir değerde olması nedeniyle sıcak çeperlere temas eden FDM'ler daha erken erirken daha iç bölgelerdeki FDM'ler katı halde kalacak ve daha geç erimeye başlayacak, erimekte olan kısımlar gizli ısı çekerek sıcaklığı sabitleme ya da baskılama etkisi gösterirken, çeperlerdeki tamamen erimiş yahut iç bölgelerdeki henüz erimeye başlamamış kısımlar duyulur ısı çekerek sıcaklığın artmasına neden olacaktır.

Ayrıca deşarj işlemi esnasında FDM'nin erime sıcaklığı bölgesine girmesine rağmen batarya yüzey sıcaklığının artması, Şekil 4.19'dan da görülebileceği gibi FDM'nin erimeye başladığı anda batarya toplam ısı üretiminin artışa geçmesi ile açıklanabilir. Normalde deşarj işlemine başladığı andan itibaren %40 batarya doluluk oranına ulaşınca kadar batarya toplam ısı üretimi aşağı yönlü bir seyir izlerken batarya doluluk oranının %40'a ulaşması ile artışa geçmekte, bu artış batarya tamamen boşalınca kadar

sürmekte, ısı üretimindeki bu artış ise her ne kadar FDM'nin erimeye başladığı anda (SOC=%38) gizli ısı çekerek sıcaklığı baskılayıcı etki göstermesi beklenmesine rağmen hem batarya yüzey sıcaklığının hem de sıcaklık artış hızının artmasına neden olmaktadır. Eğer batarya toplam ısı üretim hızında herhangi bir artış gerçekleşmemiş olsa idi FDM erime bölgesine girdiği anda gizli ısı çekerek sıcaklığı sabitleyici yahut baskılayıcı etkisi daha belirgin görülebilirdi.

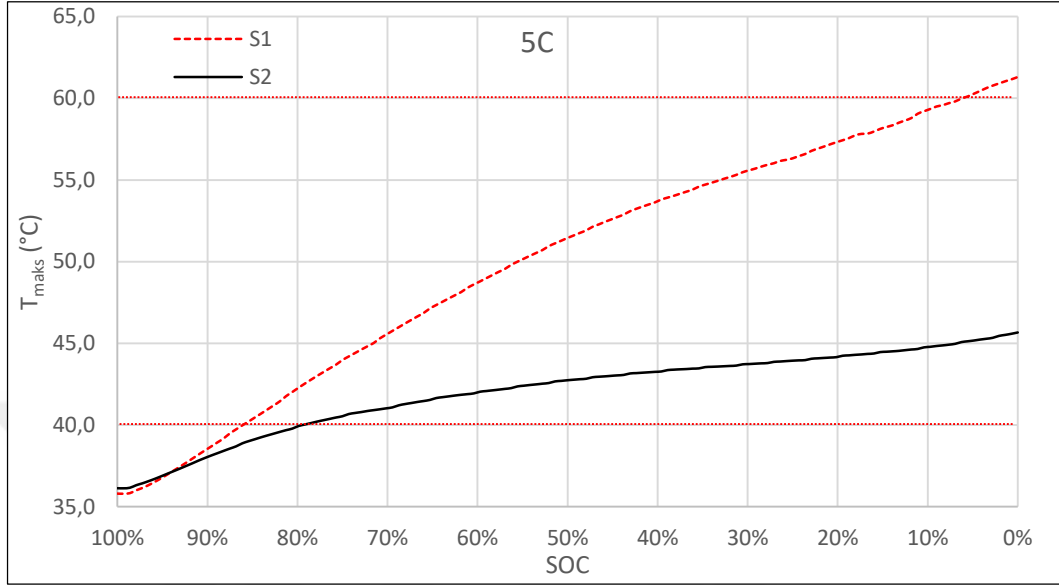


Şekil 4.19 S2 sisteminde 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi

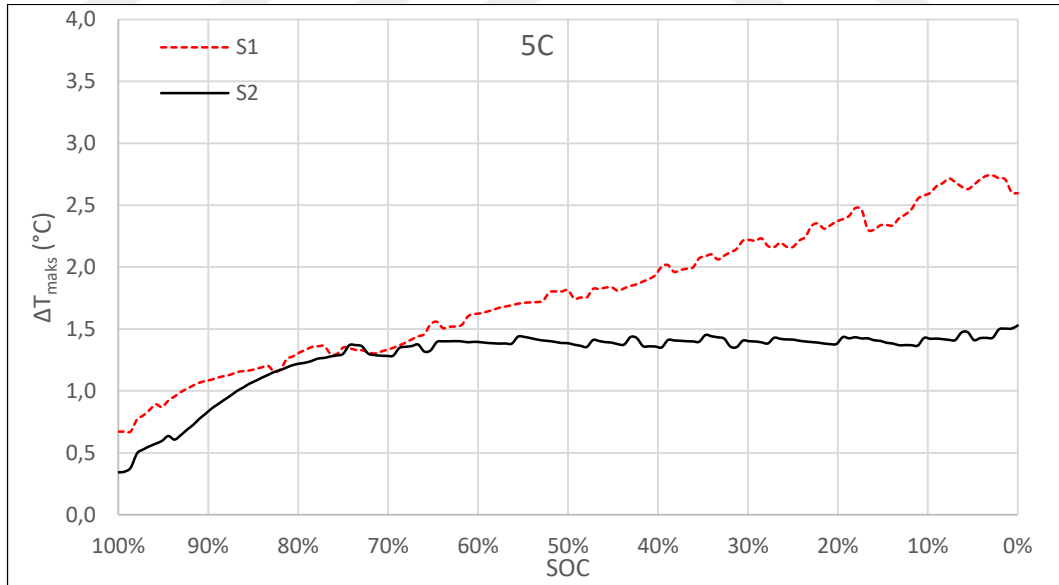
4.2.2.3. S2 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de ise 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında referans modül S1 ile S2 modülünün maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları verilmiştir. Tasarlanan S2 modülünün, referans modül S1 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 61,30°C'den yaklaşık %25,5 oranında düşürerek 45,67°C'ye indirdiği görülmüştür. Ayrıca S2 sisteminin referans modül S1 sistemine göre maksimum batarya yüzey sıcaklık farkını ise 2,74°C'den 1,50°C'ye indirdiği görülmüştür. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin üzerine çıkmış ancak S1 sisteminde elde edilen ve güvenlik sınırlarının dışında olan 61,30°C değeri S2 sisteminin kullanılmasıyla her ne kadar optimum çalışma sıcaklığı bölgesinin üzerine çıkmış olsa da güvenlik sınırları içerisinde kalmıştır. Ayrıca her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altındadır. Dolayısıyla 5C deşarj

hızında da diğer deşarj hızlarında olduğu gibi S2 sistemi, S1 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiş ve batarya maksimum yüzey sıcaklığını güvenli çalışma sıcaklığı aralığına çekmiştir.



Şekil 4.20 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)

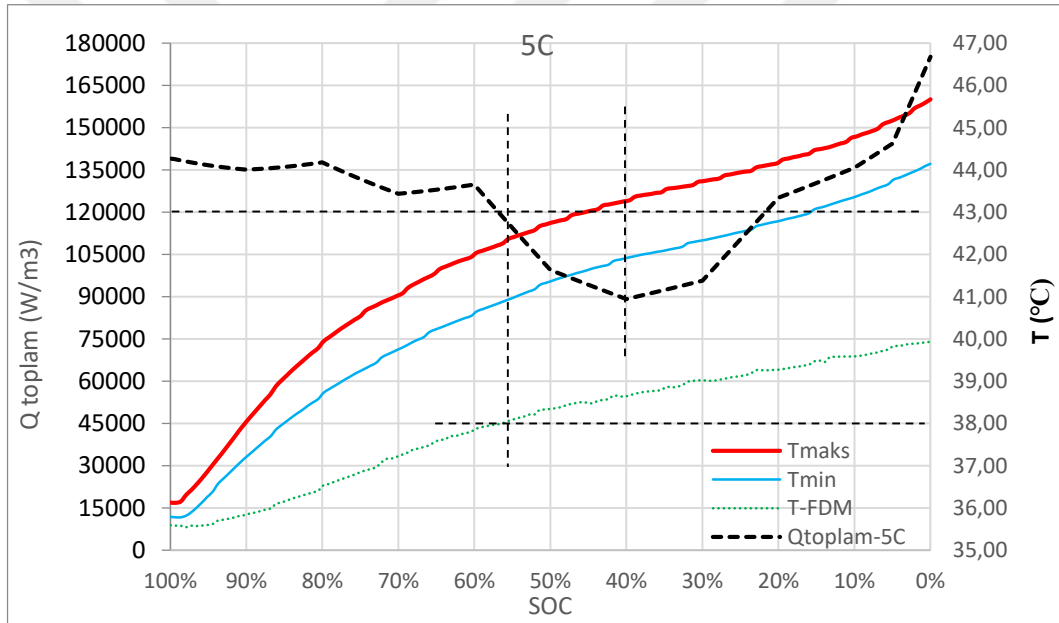


Şekil 4.21 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S1 ve S2 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

S2 sisteminde 36°C ortam sıcaklığında 5C deşarj hızında elde edilen batarya maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi ise Şekil 4.22'de gösterilmiştir. 3C deşarj işlemindekine benzer olarak başlangıçta FDM

sıcaklığının batarya yüzeyinde ölçülen minimum sıcaklığa eşit ve maksimum sıcaklığa yakın bir değer olduğu ancak deşarj işleminin başlamasıyla batarya yüzey sıcaklıklarının FDM sıcaklığına göre daha hızlı arttığı, batarya doluluk oranının azalmaya başlaması ile batarya maksimum yüzey sıcaklığı ve FDM sıcaklığı arasındaki farkın da arttığı gözlemlenmiştir.

FDM sıcaklığının erime sıcaklığı olan 38°C 'ye 3C deşarj işlemine göre daha hızlı ulaştığı ve bu değere ulaştığında batarya maksimum yüzey sıcaklığının $42,37^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaştığı, FDM'nin erime sıcaklık bölgesine girmesine rağmen 3C deşarj hızındaki işlemde olduğu gibi hem FDM'nin sıcaklığının hem de batarya yüzey sıcaklığının arttığı ancak FDM'nin erimeye başlaması nedeniyle FDM'nin sıcaklık artış hızında düşme meydana geldiği gözlemlenmiştir.



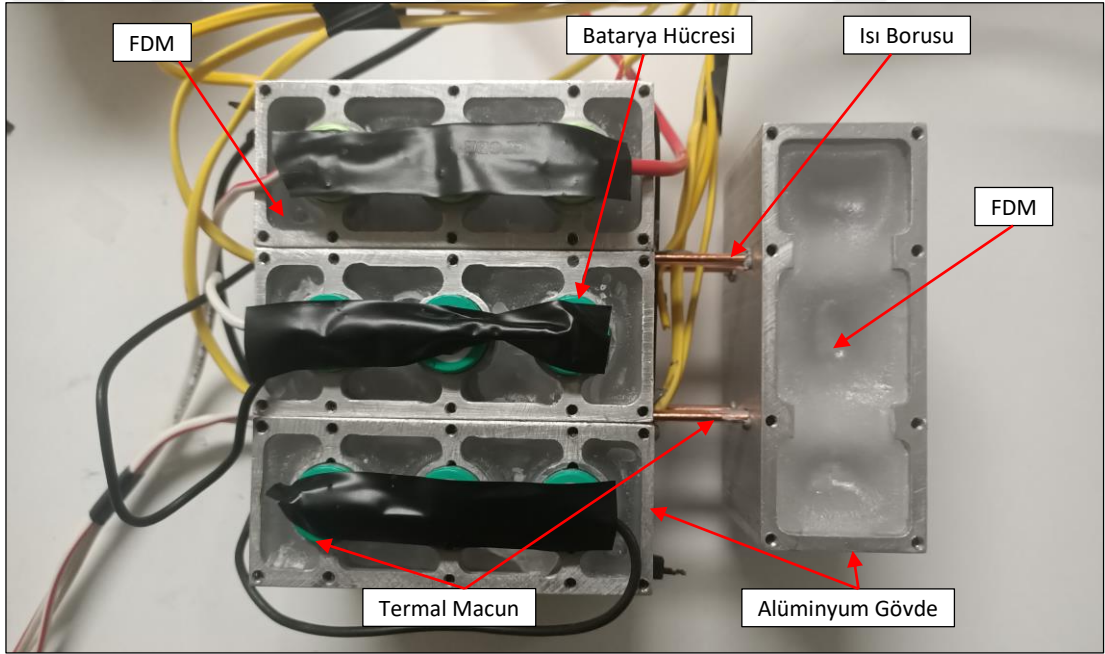
Şekil 4.22 S2 sisteminde 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi

Deşarj işlemi esnasında FDM'nin erime sıcaklığı bölgesine girmesine rağmen Şekil 4.22'den de görülebileceği gibi batarya yüzey sıcaklığı artmış ancak sıcaklık artış hızı farklı bir seyir izlemiştir. İlk olarak, FDM'nin erimeye başladığı ve %56 batarya doluluk oranına tekabül eden noktadan batarya ısı üretiminin aşağı yönlü bir seyir izlediği ve batarya doluluk oranının %40'a tekabül ettiği ana kadar sıcaklık artış hızı, hem toplam batarya ısı üretiminin düşmesi hem de FDM'nin erimesi esnasında gizli ısı çekerek sıcaklığı baskılayıcı etkisi nedeniyle düşmüştür. Sonrasında, batarya doluluk oranı

%40'dan %0 değerine kadar batarya toplam ısı üretiminin hızlı bir şekilde artması nedeniyle batarya sıcaklık artış hızı da yükselişe geçmiştir. Ayrıca deşarj işlemi sonunda FDM sıcaklığı maksimum 39,93°C'ye ulaşmış olup erime işlemi tamamen bitmemiş ve FDM'nin bir kısmı sıvı bir kısmı ise katı halde kalmış ve gizli ısının tamamı çekilemediği için FDM'nin sıcaklığı baskılayıcı etkisinden tam anlamıyla faydalanılamamıştır.

4.3. FDM, Alüminyum Blok ve Isı Boruları Kullanarak Oluşturulan Pasif Sistemin (S3) Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 4.23'te gösterildiği gibi S3 sistemi 9 adet 18650 tip lityum iyon batarya, FDM, alüminyum bloklar ve ısı boruları ile oluşturulmuş olup S2 sisteminden farklı olarak sistemde soğutma için ısı boruları ve FDM içeren ikinci bir alüminyum blok kullanılmıştır.



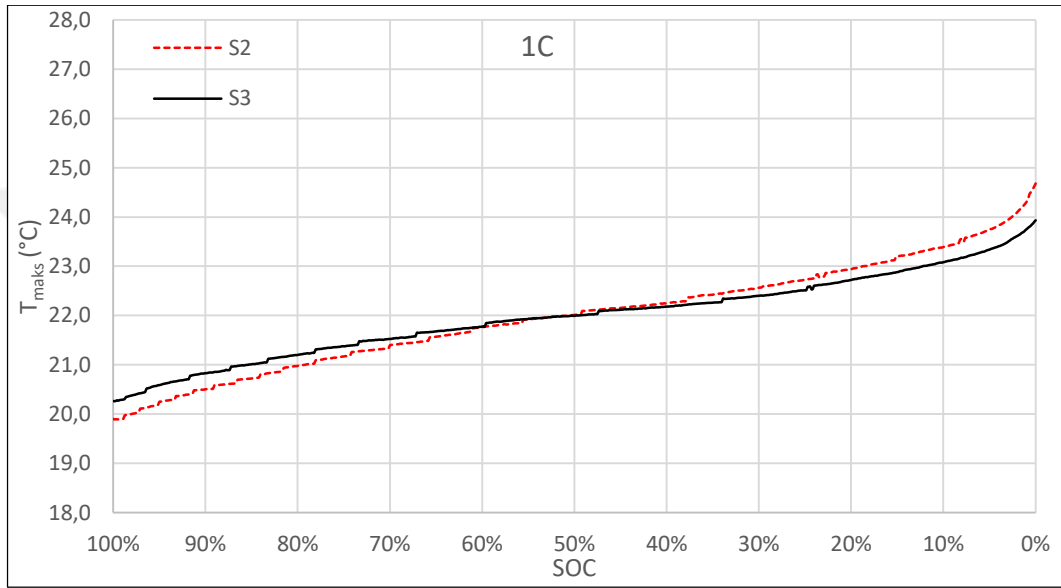
Şekil 4.23 FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanarak oluşturulan sistem (S3)

4.3.1. S3 sisteminin 20°C ortam sıcaklığındaki performansı

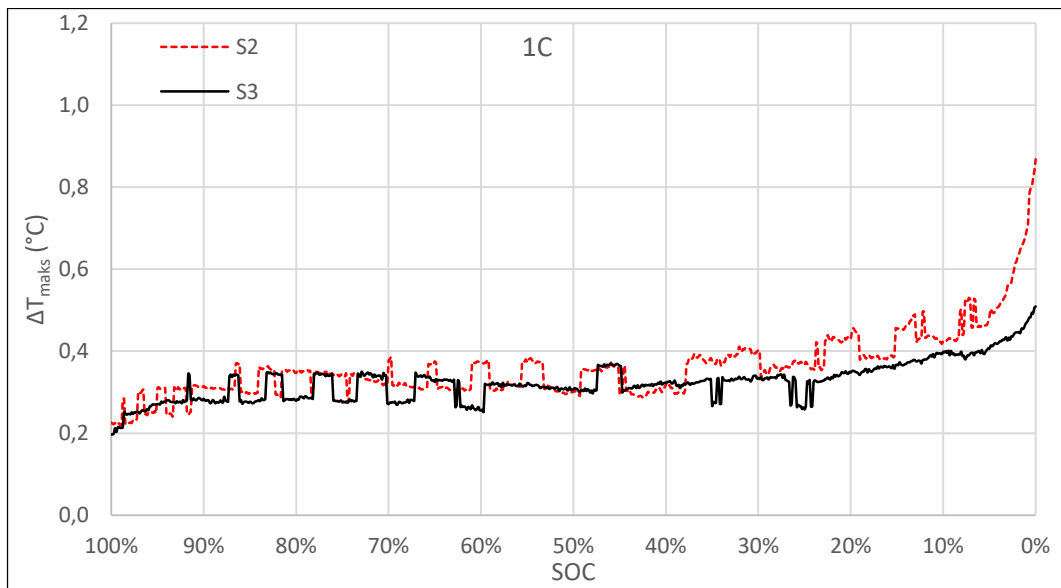
4.3.1.1. S3 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı

1C deşarj hızında FDM ve alüminyum blok kullanılarak oluşturulan modül (S2) ve FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanılarak oluşturulan modülün (S3) 20°C ortam sıcaklığında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'de verilmiştir. S3 modülünün S2 modülünden farkı ısı borusu ve ilave olarak FDM içeren ikinci bir alüminyum blok eklenmesidir.

Tasarlanan S3 modülünün, S2 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 24,68°C'den yaklaşık %3 oranında düşürerek 23,94°C'ye indirdiği görülmüştür. Ayrıca S3 sisteminin S2 sistemine göre maksimum batarya yüzey sıcaklık farkını ise 0,87°C'den 0,51°C'ye indirdiği görülmüştür. Dolayısıyla 1C deşarj hızında S3 sistemi, S2 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin ve maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altındadır.



Şekil 4.24 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



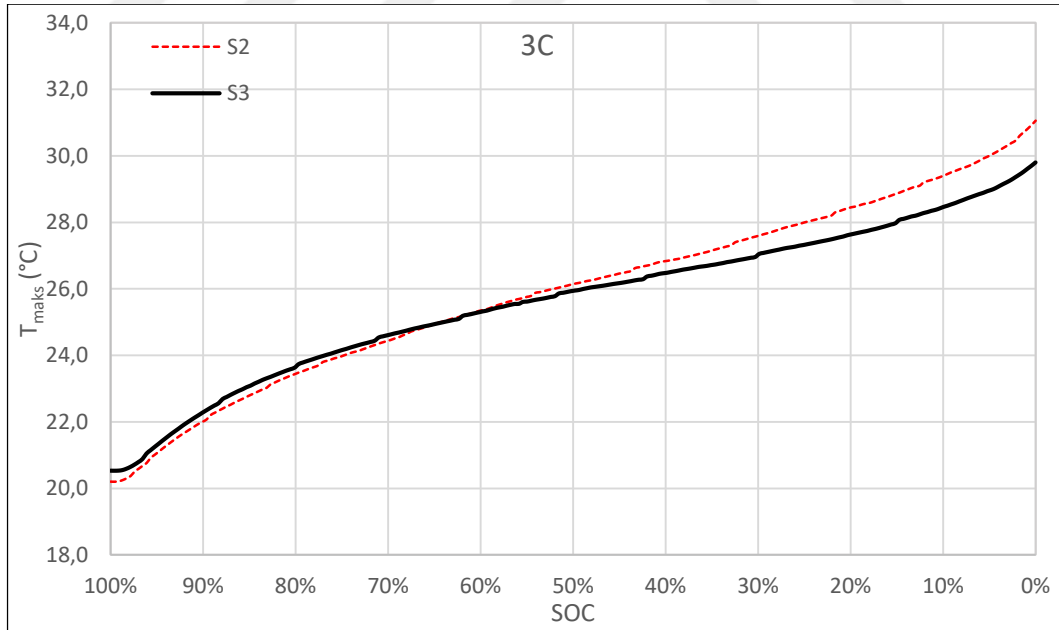
Şekil 4.25 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

Sonuç olarak sisteme ısı boruları ve ikinci alüminyum blok eklenmesi ile birinci alüminyum blokta oluşan ısı iletim yolu ile ikinci bloğa transfer edilmiş, bu işlem batarya maksimum yüzey sıcaklıklarının düşmesine neden olmuş ve böylece daha iyi bir soğutma performansı elde edilmiştir.

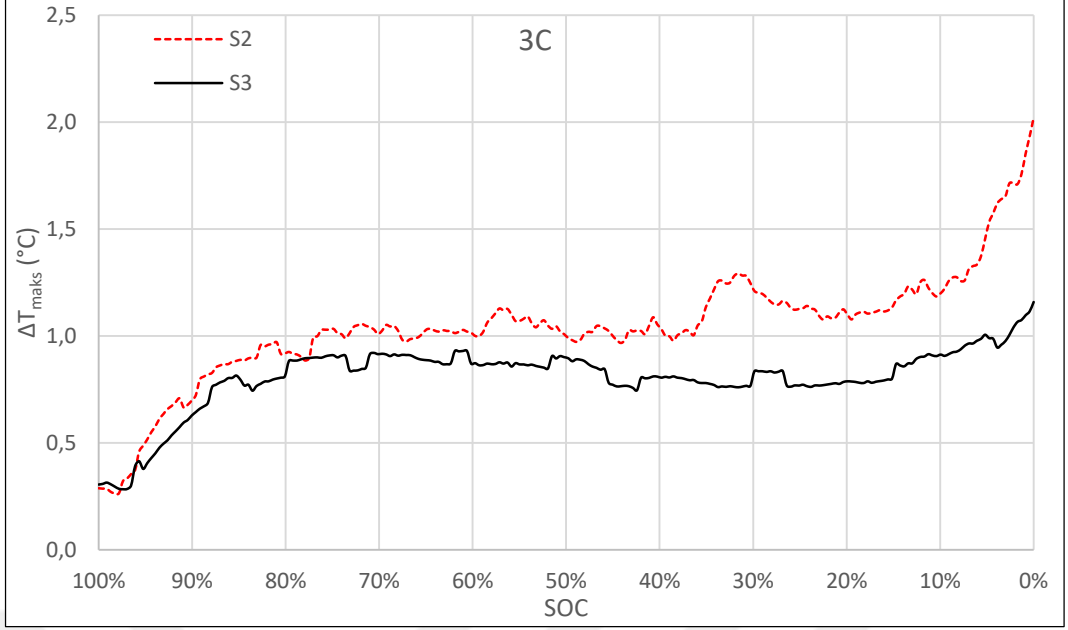
4.3.1.2. S3 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı

Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de ise 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında S2 ile S3 modülünün maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları verilmiştir.

Tasarlanan S3 modülünün, S2 modülüne göre maksimum yüzey sıcaklığını 31,06°C’den yaklaşık %3,7 oranında düşürerek 29,92°C’ye indirdiği görülmüştür. Ayrıca S3 sisteminin S2 sistemine göre maksimum batarya yüzey sıcaklık farkını ise 2,02°C’den 1,21°C’ye indirdiği görülmüştür. Dolayısıyla 20°C ortam sıcaklığında ve 3C deşarj hızında da S3 sistemi, S2 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C’nin ve maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C’nin altındadır.



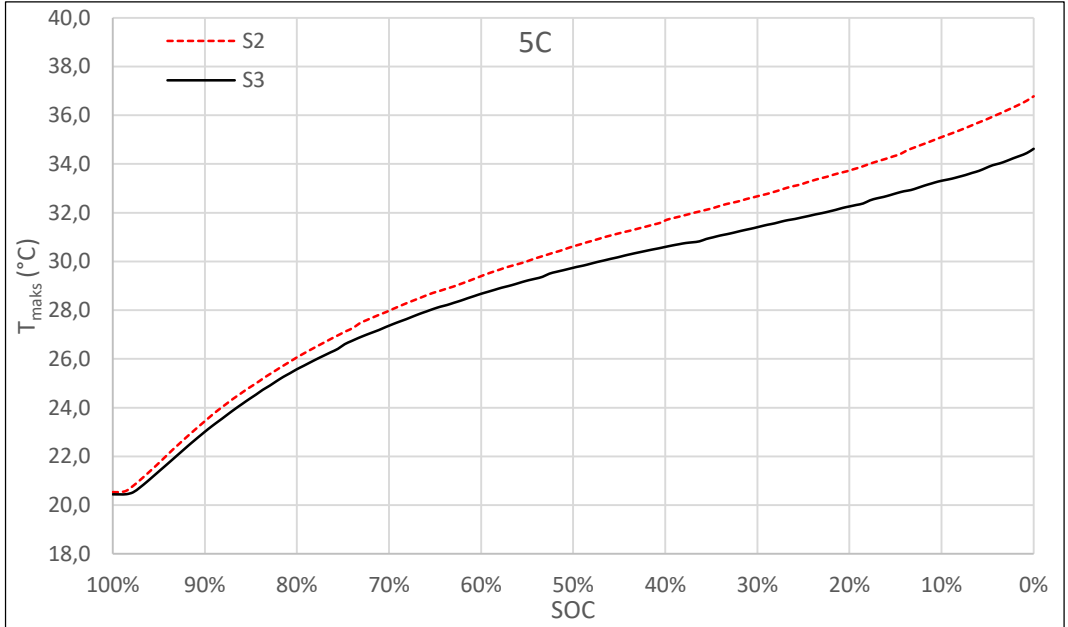
Şekil 4.26 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



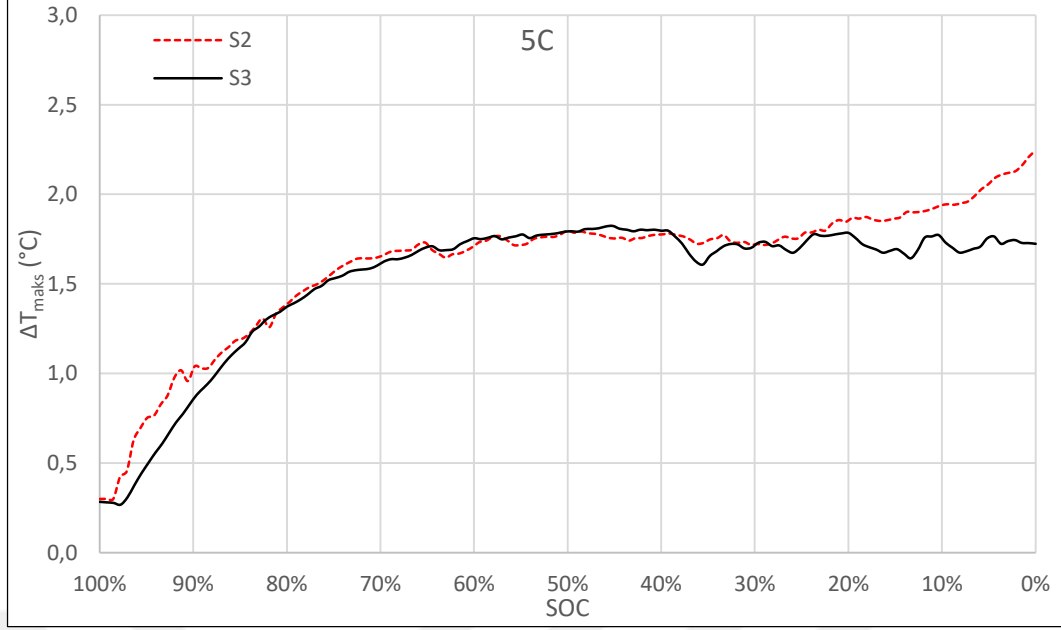
Şekil 4.27 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

4.3.1.3. S3 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı

20°C ortam sıcaklığında ve 5C deşarj hızında S2 ile S3 modülünün maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları ise Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.28 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



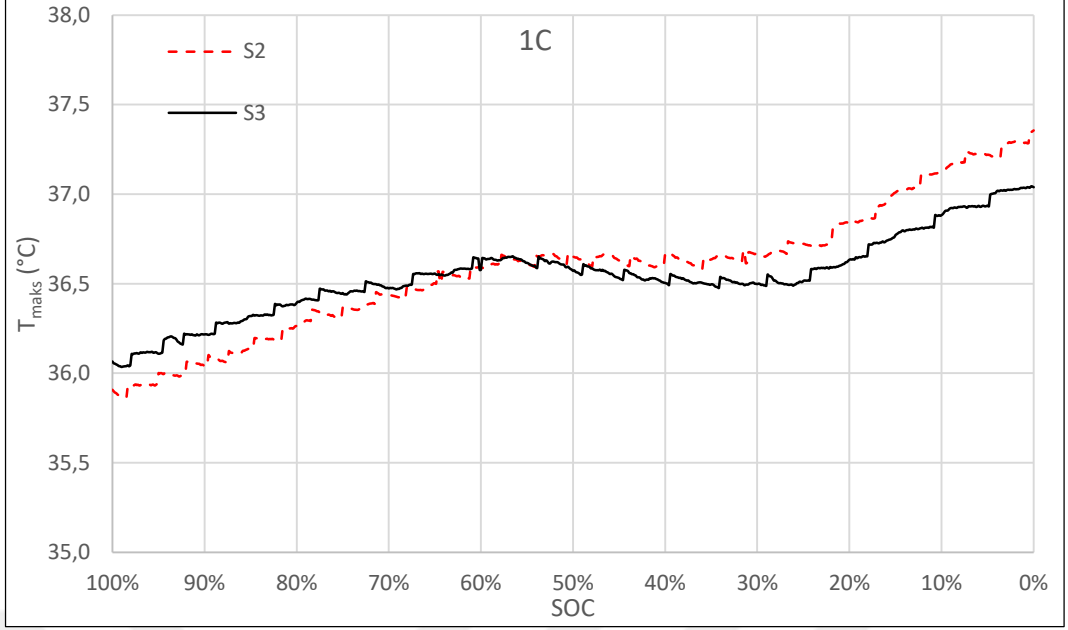
Şekil 4.29 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

Tasarlanan S3 modülünün, S2 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 36,78°C'den yaklaşık %5,8 oranında düşürerek 34,63°C'ye indirdiği görülmüştür. Ayrıca S3 sisteminin S2 sistemine göre maksimum batarya yüzey sıcaklık farkını ise 2,24°C'den 1,82°C'ye indirdiği görülmüştür. Dolayısıyla 20°C ortam sıcaklığında, 1C ve 3C deşarj hızlarında olduğu gibi 5C deşarj hızında da S3 sistemi, S2 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin ve maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altındadır.

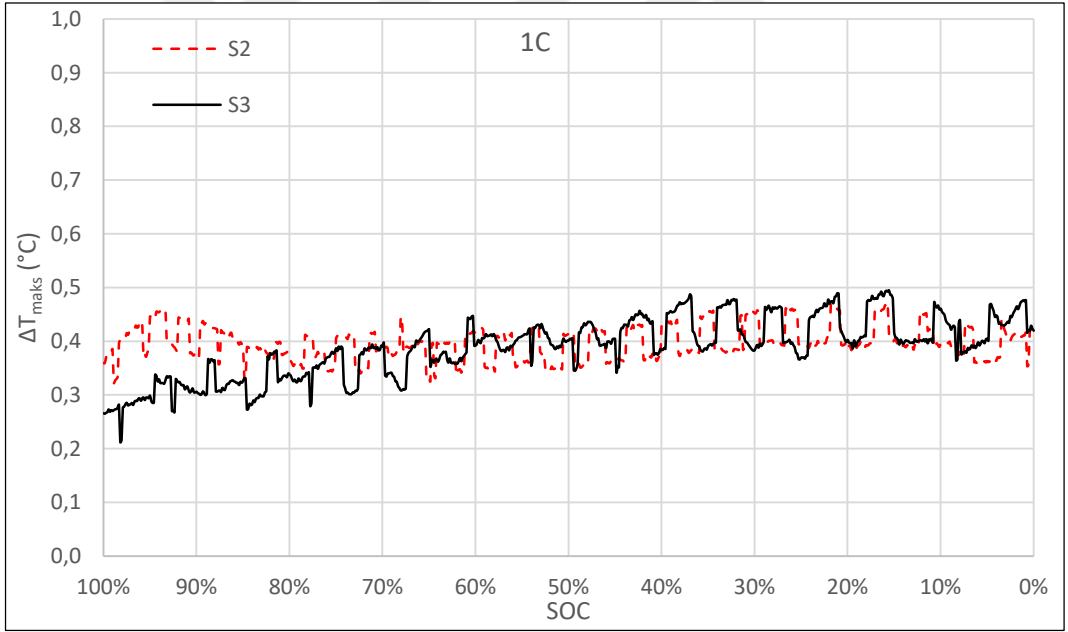
4.3.2. S3 sisteminin 36°C ortam sıcaklığındaki performansı

4.3.2.1. S3 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı

FDM ve alüminyum blok kullanılarak oluşturulan modül (S2) ve FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanılarak oluşturulan modülün (S3) 36°C ortam sıcaklığında ve 1C deşarj hızında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'de verilmiştir.



Şekil 4.30 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



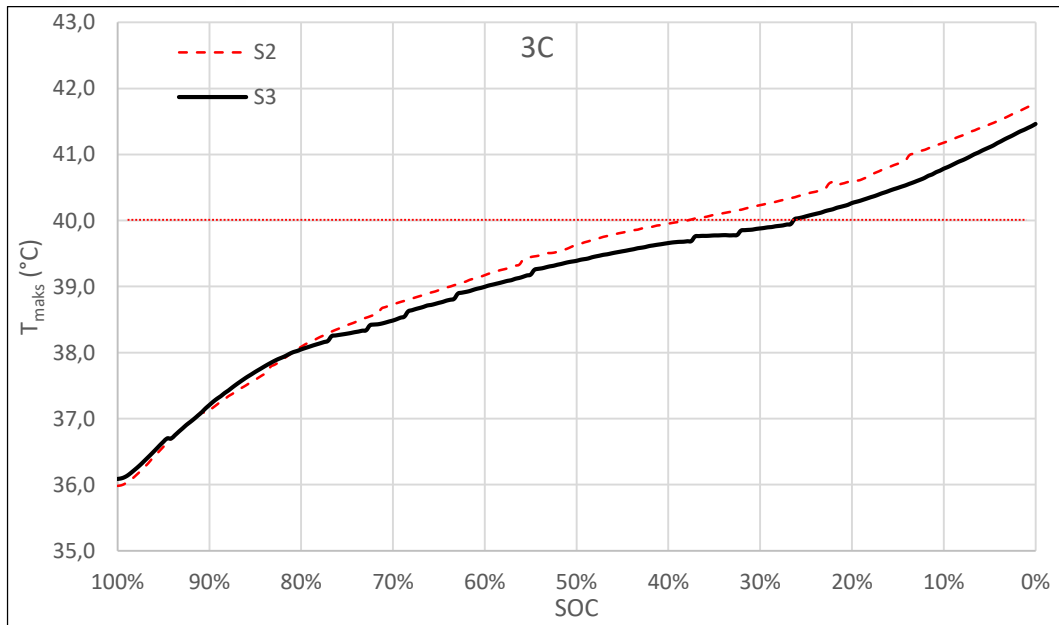
Şekil 4.31 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

Tasarlanan S3 modülünün, S2 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 37,36°C'den 37,04°C'ye indirdiği görülmüştür. Maksimum batarya yüzey sıcaklık farkının ise hem S3 sisteminde hem de S2 sisteminde yaklaşık olarak aynı ve 0,45°C civarında olduğu görülmüştür. Dolayısıyla 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında S3 sistemi, S2 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir. Her iki durumda da

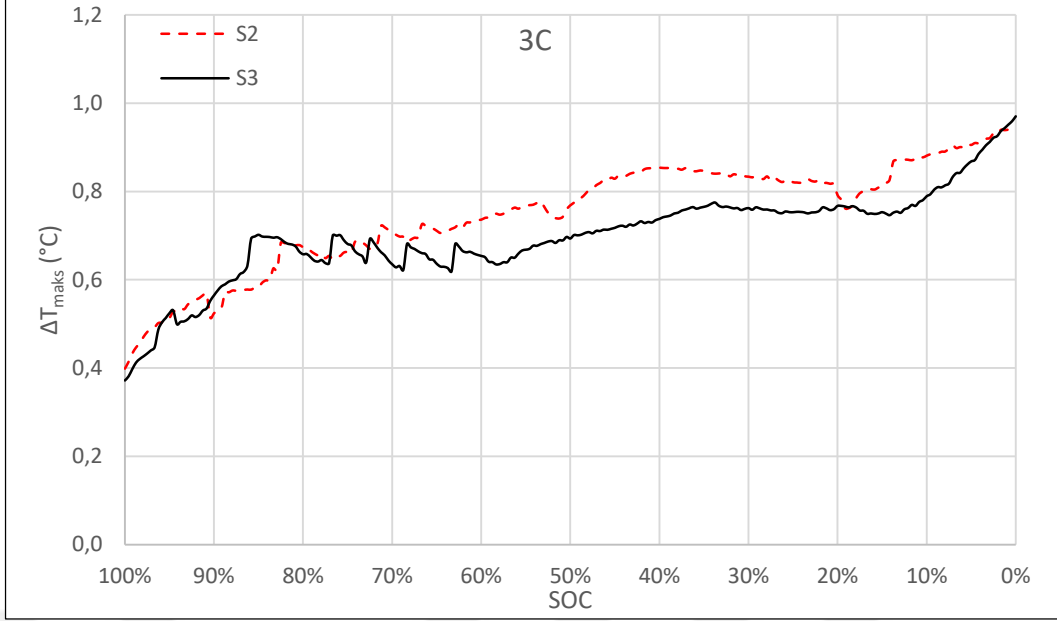
maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin ve maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altındadır. 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında S3 sisteminde maksimum batarya yüzey sıcaklığı 37,04°C olarak ölçülmüş olup bu sıcaklık FDM'nin erime sıcaklığı 38°C'den düşük olduğu için herhangi bir erime meydana gelmemiş, FDM katı halde kalmış ve FDM üzerinden ısı transferi sadece iletim şeklinde gerçekleşmiştir.

4.3.2.2. S3 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı

S2 ile S3 modülünün 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları ise Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te verilmiştir. Yapılan testler sonucunda S3 modülünün, S2 sistemine göre bataryanın maksimum yüzey sıcaklığını 41,78°C'den 41,46°C'ye indirdiği, maksimum batarya yüzey sıcaklık farkının ise her iki sistemde de deşarj işlemi süresince yaklaşık olarak aynı ve ortalama 0,75°C olduğu görülmüştür. Dolayısıyla 36°C ortam sıcaklığında ve 3C deşarj hızında da S3 sistemi, S2 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin üzerine çıkmış ancak maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altında kalmıştır.



Şekil 4.32 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



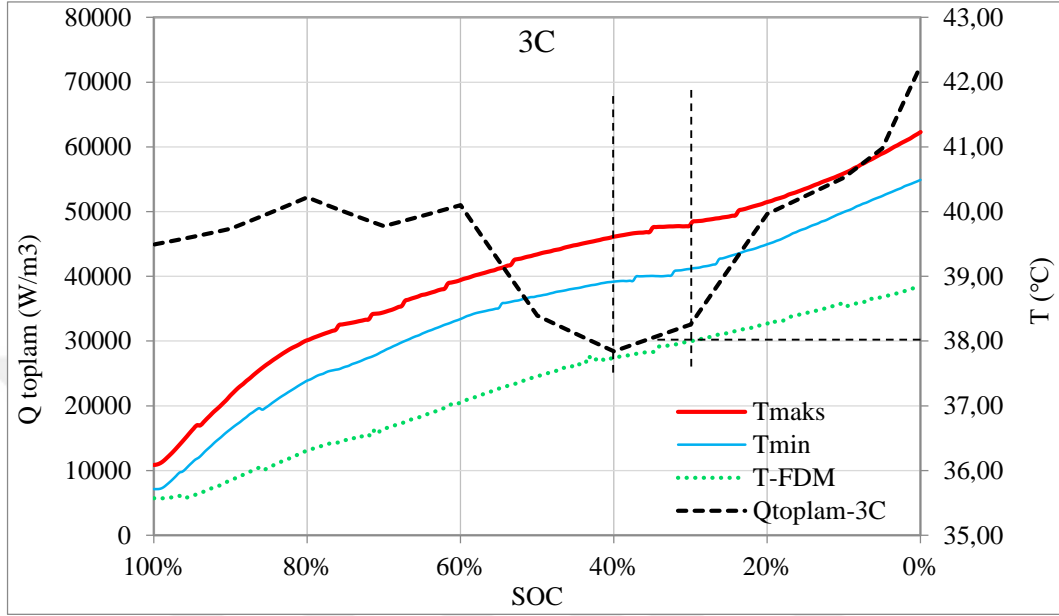
Şekil 4.33 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

S3 sisteminde 36°C ortam sıcaklığında ve 3C deşarj hızında elde edilen batarya maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi ise aynı grafikte ve Şekil 4.34'te gösterilmiştir. Başlangıçta FDM sıcaklığının batarya yüzeyinde ölçülen minimum ve maksimum sıcaklığa yakın bir değer olduğu ancak deşarj işleminin başlamasıyla birlikte batarya yüzey sıcaklıklarının FDM sıcaklığına göre daha hızlı arttığı, batarya doluluk oranının azalmaya başlaması ile batarya maksimum yüzey sıcaklığı ve FDM sıcaklığı arasındaki farkın da arttığı gözlemlenmiştir.

FDM sıcaklığının erime sıcaklığı olan 38°C'ye ulaştığında (SOC=%30) batarya maksimum yüzey sıcaklığının 39,86°C olduğu, FDM'nin erime sıcaklık bölgesine girmesine rağmen hem FDM'nin sıcaklığının hem de batarya yüzey sıcaklığının arttığı ancak FDM'nin erimeye başlaması nedeniyle FDM'nin sıcaklık artış hızında düşme meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Deşarj işlemi esnasında FDM'nin erime sıcaklığı bölgesine girmesine rağmen Şekil 4.34'ten de görülebileceği gibi hem batarya yüzey sıcaklığı hem de sıcaklık artış hızı artmıştır. FDM'nin erimeye başladığı ve %30 batarya doluluk oranına tekabül eden noktada batarya ısı üretimi de yukarı yönlü bir seyir (SOC=%40'tan başlayarak SOC=%0'a kadar) izlemekte olduğu için FDM'nin erimesi esnasında gizli ısı çekerek sıcaklığı baskılayıcı etkisi görülememiş aksine ısı üretiminin artmasıyla birlikte hem batarya yüzeyindeki sıcaklık hem de sıcaklık artış hızı yükselmiştir. Ayrıca deşarj işlemi

sonunda FDM sıcaklığı maksimum $38,83^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşmış ancak FDM erime bölgesinin üst sınırı olan 43°C 'ye ulaşamamış olup erime işlemi tamamen bitmemiş ve FDM'nin bir kısmı sıvı bir kısmı ise katı halde kalmış ve gizli ısının tamamı çekilemediği için FDM'nin sıcaklığı baskılayıcı etkisinden tam anlamıyla faydalanılamamıştır.

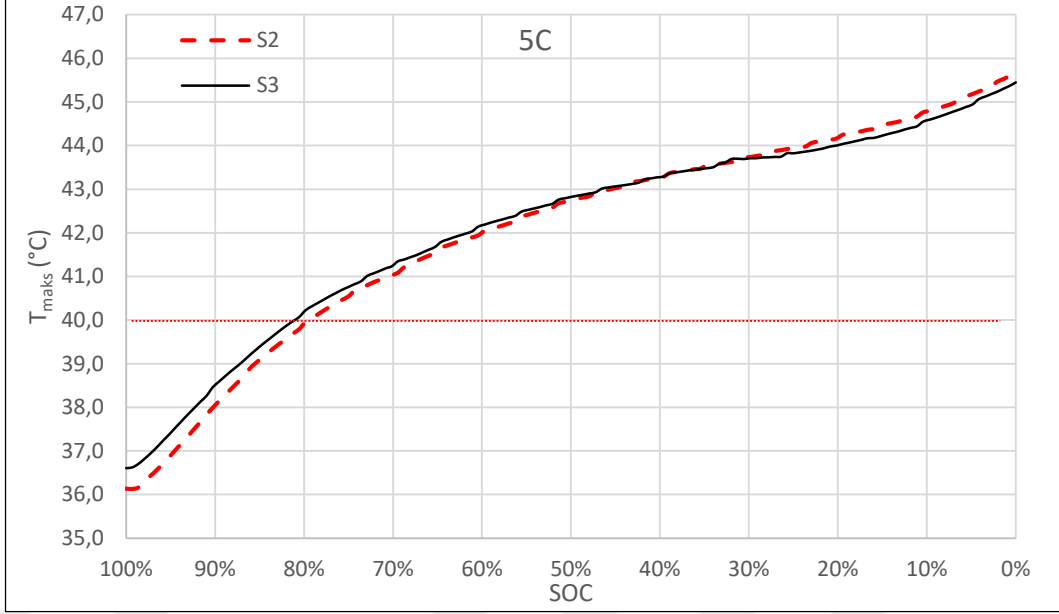


Şekil 4.34 S3 sisteminde 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi

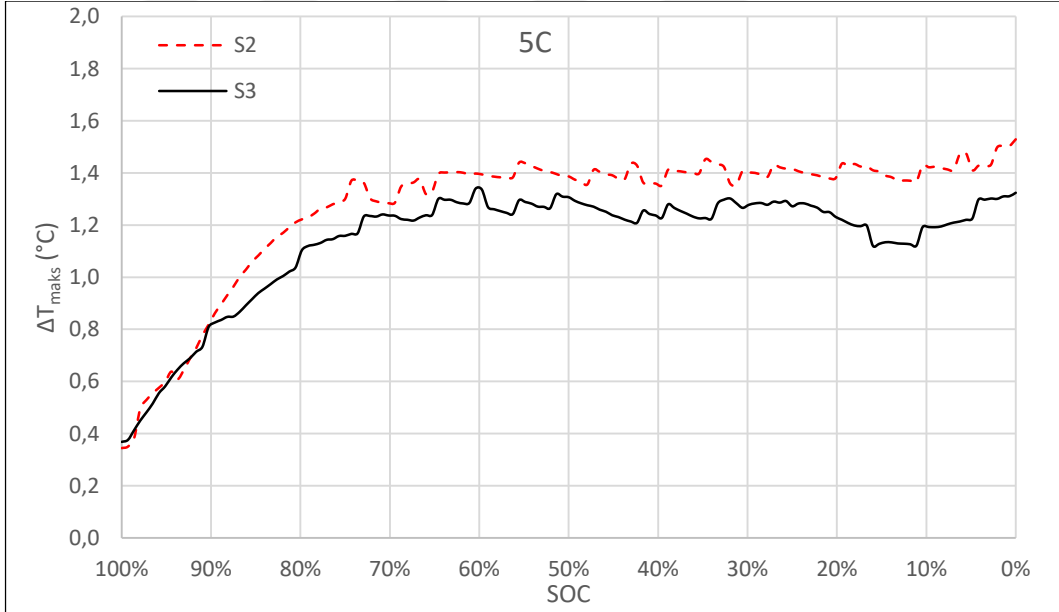
4.3.2.3. S3 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı

Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da ise S2 ile S3 modülünün 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları verilmiştir.

S3 modülünün, S2 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını $45,67^{\circ}\text{C}$ 'den $45,45^{\circ}\text{C}$ 'ye indirdiği ve maksimum batarya yüzey sıcaklık farkını ise $1,53^{\circ}\text{C}$ 'den $1,34^{\circ}\text{C}$ 'ye indirdiği görülmüştür. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C 'nin üzerine çıkmış ancak maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C 'nin altında kalmıştır. Dolayısıyla 36°C ortam sıcaklığında da 20°C ortam sıcaklığında olduğu gibi ve 5C deşarj hızında da diğer deşarj hızlarında olduğu gibi S3 sistemi, S2 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir.



Şekil 4.35 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)

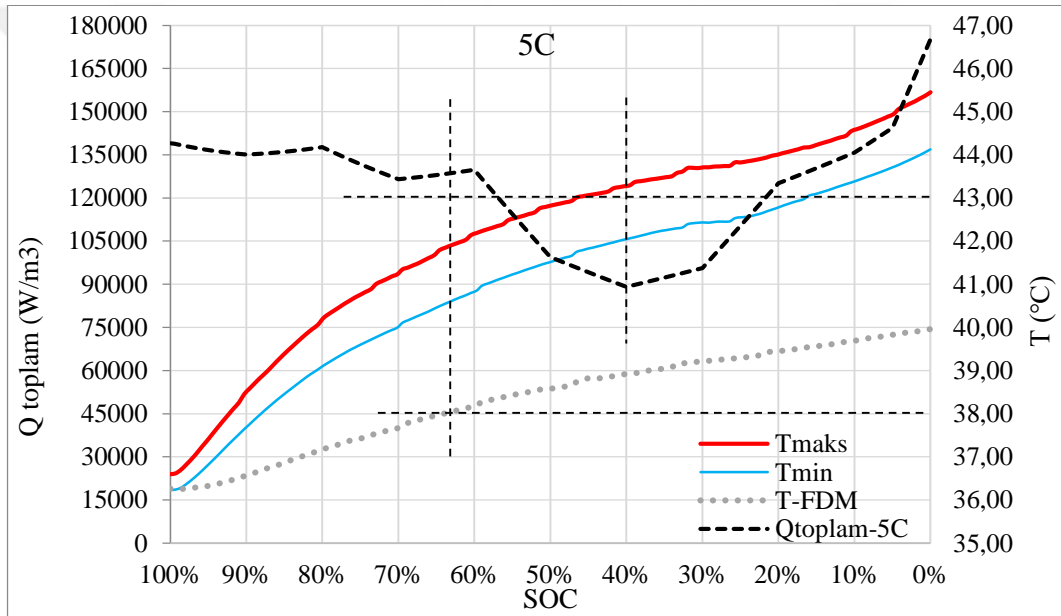


Şekil 4.36 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S2 ve S3 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

S3 sisteminde 36°C ortam sıcaklığında 5C deşarj hızında elde edilen batarya maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi ise Şekil 4.37'de aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. 3C deşarj işlemine benzer olarak başlangıçta FDM sıcaklığının batarya yüzeyinde ölçülen minimum sıcaklığa eşit ve maksimum sıcaklığa yakın bir değer olduğu ancak deşarj işleminin başlamasıyla birlikte

batarya yüzey sıcaklıklarının FDM sıcaklığına göre daha hızlı arttığı, ilerleyen süreçte batarya doluluk oranının azalmaya başlaması ile birlikte batarya maksimum yüzey sıcaklığı ve FDM sıcaklığı arasındaki farkın da arttığı ve bu sıcaklık farkının 3C deşarj işlemindeki sıcaklık farkından daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

FDM sıcaklığının erime sıcaklığı olan 38°C'ye 3C deşarj işlemine göre daha hızlı ulaştığı (SOC=%63) ve bu değere ulaştığında batarya maksimum yüzey sıcaklığının 41,94°C'ye ulaştığı, FDM'nin erime sıcaklık bölgesine girmesine rağmen 3C deşarj hızındaki işlemde olduğu gibi hem FDM'nin sıcaklığının hem de batarya yüzey sıcaklığının arttığı ancak FDM'nin erimeye başlaması nedeniyle FDM'nin sıcaklık artış hızında düşme meydana geldiği gözlemlenmiştir.



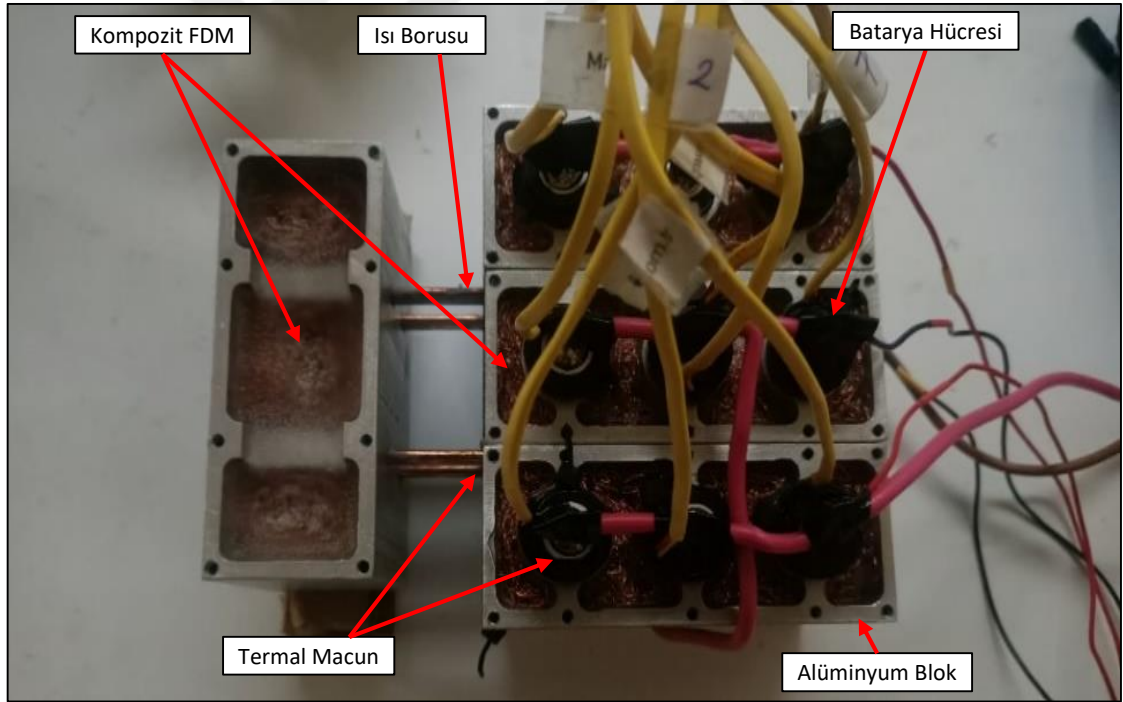
Şekil 4.37 S3 sisteminde 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi

Deşarj işlemi esnasında FDM'nin erime sıcaklığı bölgesine girmesine rağmen Şekil 4.37'den de görülebileceği gibi batarya yüzey sıcaklığı artmış ancak sıcaklık artış hızı batarya toplam ısı üretimine bağlı olarak farklı bir seyir izlemiştir. İlk olarak, FDM'nin erimeye başladığı ve %63 batarya doluluk oranına tekabül eden noktadan batarya ısı üretiminin aşağı yönlü bir seyir izlediği ve batarya doluluk oranının %40'a tekabül ettiği ana kadar hem toplam batarya ısı üretiminin düşmesi hem de FDM'nin erimesi esnasında gizli ısı çekerek sıcaklığı baskılayıcı etkisi nedeniyle batarya yüzeyi sıcaklık artış hızı düşmüştür. Daha sonraki batarya doluluk oranının %40'dan bataryanın tamamen

boşalınca kadar (SOC=%0) geçen süre zarfında erimekte olan FDM'nin gizli ısı çekerek sıcaklığı baskılayıcı etki göstermesi beklenmesine rağmen batarya toplam ısı üretiminin hızlı bir şekilde artması nedeniyle herhangi bir sıcaklık baskılayıcı etki görülemedi ve batarya sıcaklık artış hızı da artmıştır. Ayrıca deşarj işlemi sonunda FDM sıcaklığı maksimum 39,96°C'ye ulaşmış ancak FDM erime bölgesinin üst sınırı olan 43°C'ye ulaşamamış olup erime işlemi tamamen bitmemiş ve FDM'nin bir kısmı sıvı bir kısmı ise katı halde kalmış ve gizli ısının tamamı çekilemediği için FDM'nin sıcaklığı baskılayıcı etkisinden tam anlamıyla faydalanılamamıştır.

4.4. Kompozit FDM, Alüminyum Blok ve Isı Boruları Kullanarak Oluşturulan Pasif Sistemin (S4) Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 4.38'de gösterildiği gibi S4 sistemi 9 adet 18650 tip lityum iyon batarya, kompozit FDM, alüminyum bloklar ve ısı boruları ile oluşturulmuş olup S3 sisteminden farklı olarak sistemde her iki alüminyum blokta da FDM yerine kompozit FDM kullanılmış olmasıdır.



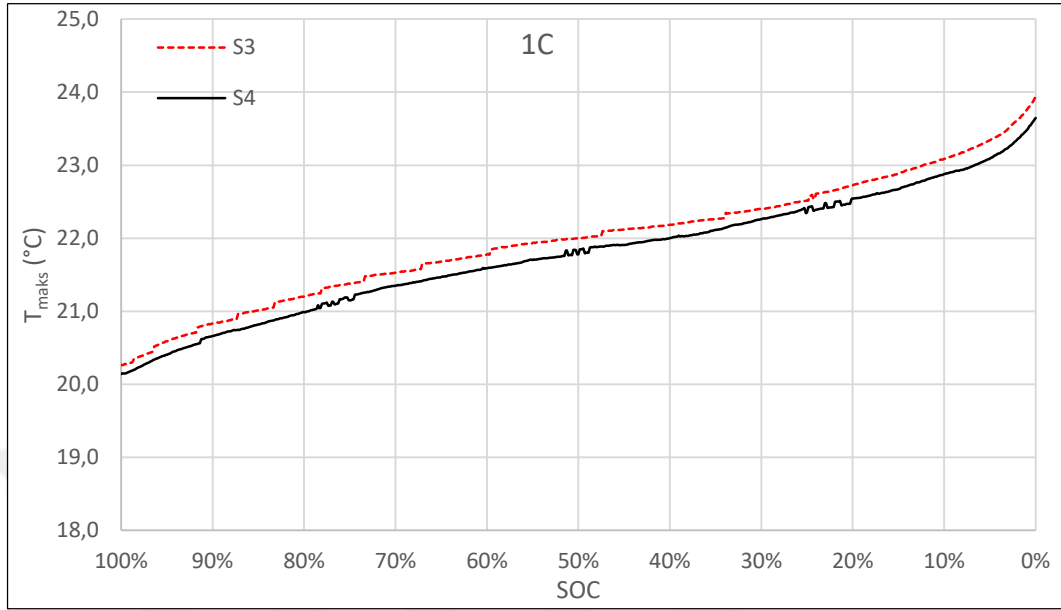
Şekil 4.38 Kompozit FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanarak oluşturulan pasif sistem (S4)

4.4.1. S4 sisteminin 20°C ortam sıcaklığındaki performansı

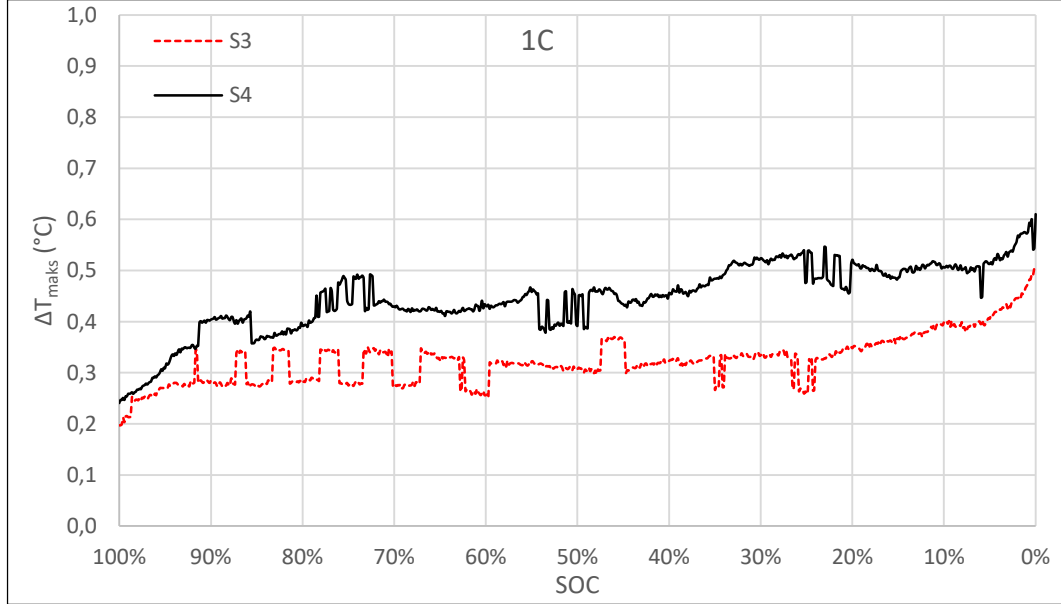
4.4.1.1. S4 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı

FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanılarak oluşturulan modül (S3) ve kompozit FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanılarak oluşturulan modülün (S4) 20°C ortam

sıcaklığında ve 1C deşarj hızında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları Şekil 4.39 ve Şekil 4.40’da verilmiştir.



Şekil 4.39 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



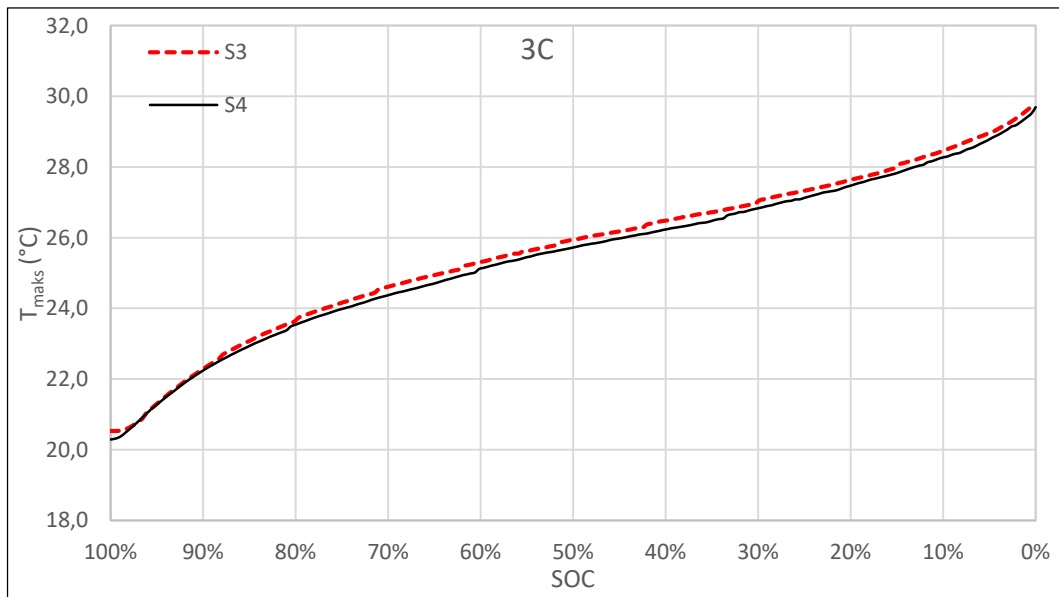
Şekil 4.40 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

Tasarlanan S4 modülünün, S3 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 23,94°C’den yaklaşık %1,2 oranında düşürerek 23,65°C’ye indirdiği görülmüştür. Ayrıca her iki sistemde elde edilen maksimum batarya yüzey sıcaklık farklarının birbirine oldukça yakın

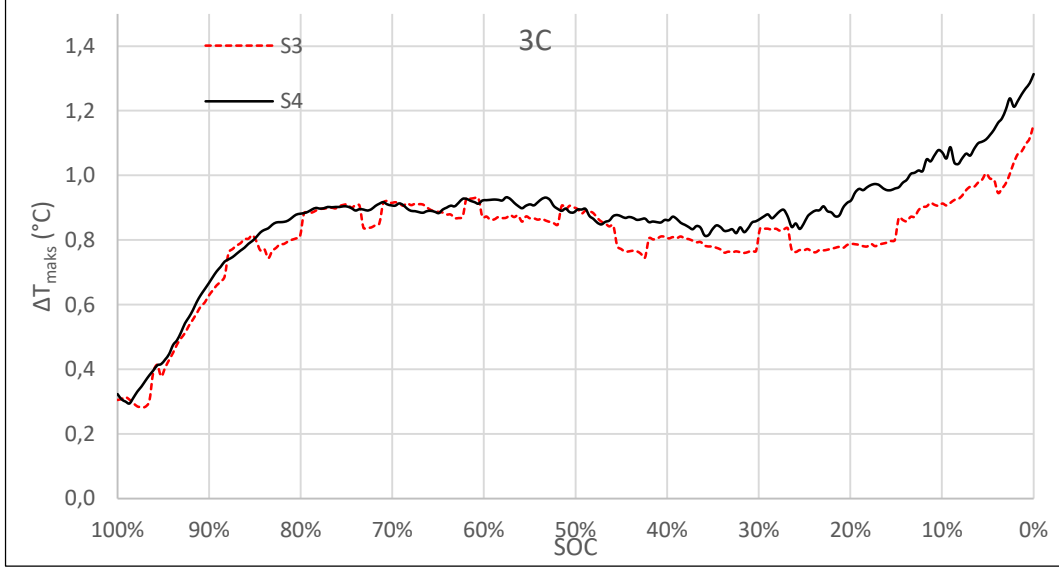
olduğu ve ortalama 0,4°C olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla 20°C ortam sıcaklığında ve 1C deşarj hızında S4 sistemi, S3 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin ve maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altındadır. Sonuç olarak kompozit FDM, saf FDM'ye göre daha yüksek ısı transfer katsayısına sahip olduğu için S4 sistemi S3 sistemine nazaran daha iyi bir soğutma performansı göstermiştir.

4.4.1.2. S4 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı

şekil 4.41 ve şekil 4.42'de S3 ile S4 modülünün 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları verilmiştir. Her iki sistemde de elde edilen maksimum batarya yüzey sıcaklığı ve sıcaklık farklarının birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla 3C deşarj hızında S4 sistemi, S3 sistemi ile benzer bir soğutma performansı sergilemiştir. Bu durum S3 sisteminin de içerdiği alüminyum blok nedeniyle aslında bir nevi kompozit malzeme gibi davranması durumuyla açıklanabilir. Yani hem S3 hem de S4 bir nevi kompozit bir yapıdan oluşmaktadır. Dolayısıyla ilave olarak eklenen bir miktar bakır filenin sonuçlara çok fazla etki etmemesi olağandır. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin ve maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altındadır.



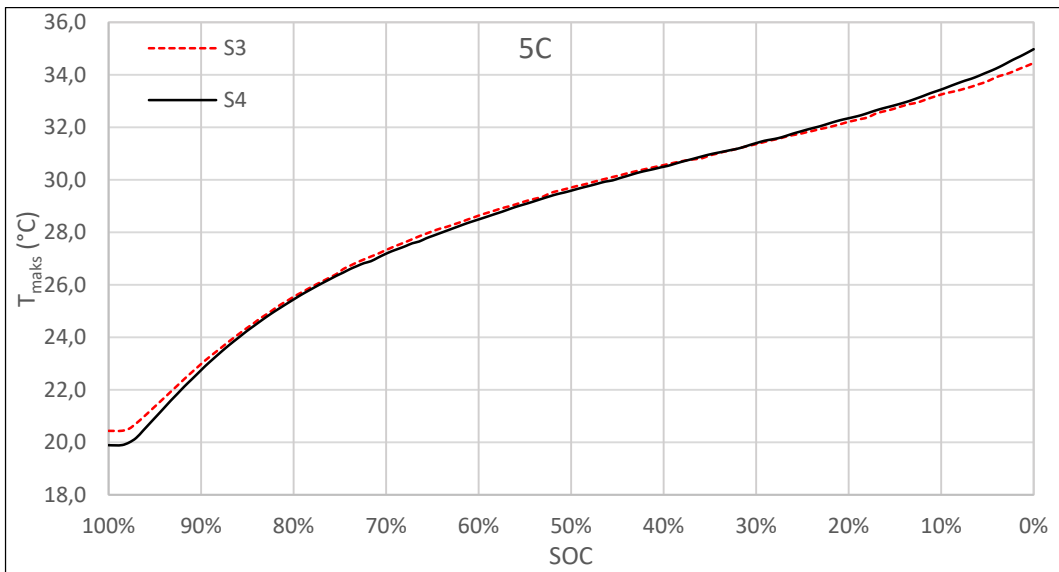
şekil 4.41 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



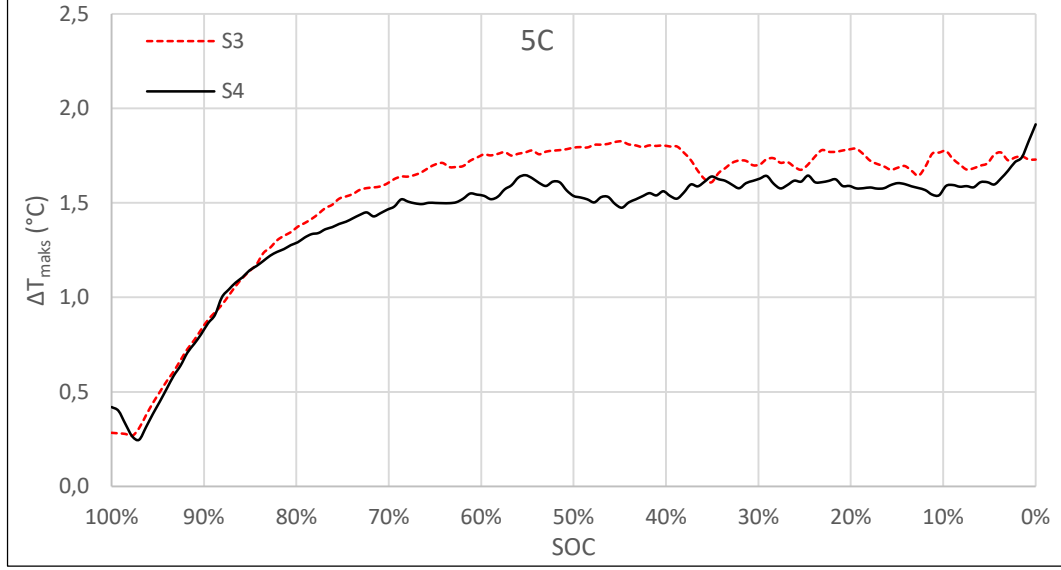
Şekil 4.42 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

4.4.1.3. S4 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı

20°C ortam sıcaklığında, S3 ile S4 modülünün 5C deşarj hızında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları Şekil 4.43 ve Şekil 4.44'te verilmiştir. 3C deşarj hızında olduğu gibi 5C deşarj hızında yapılan testlerde de her iki sistemde 20°C ortam sıcaklığında elde edilen maksimum batarya yüzey sıcaklığı ve sıcaklık farklarının birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Daha önce belirtildiği üzere bu durum aslında her iki sistemin de bir nevi kompozit yapıda olması ile açıklanabilir.



Şekil 4.43 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)

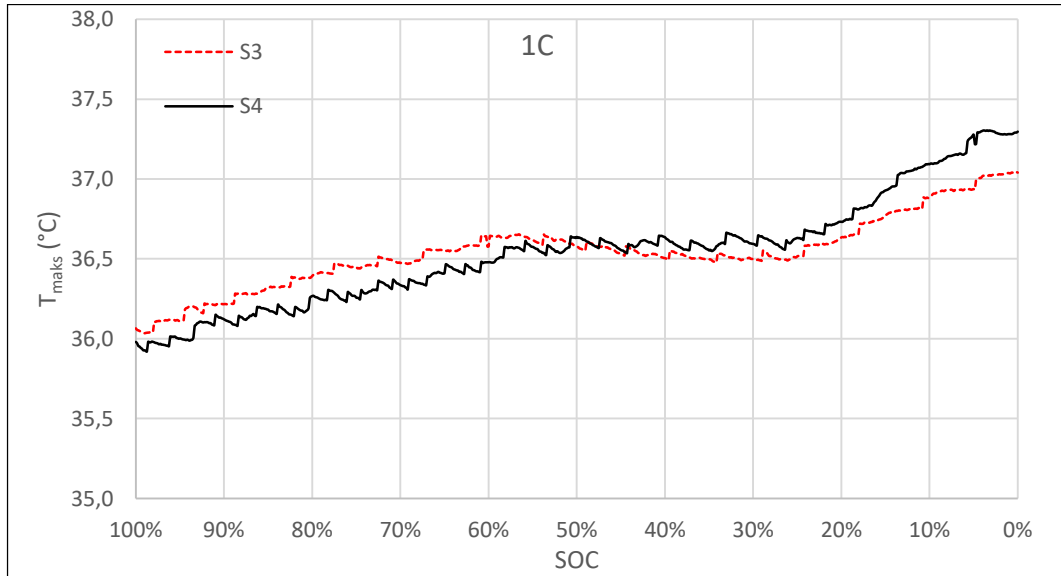


Şekil 4.44 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

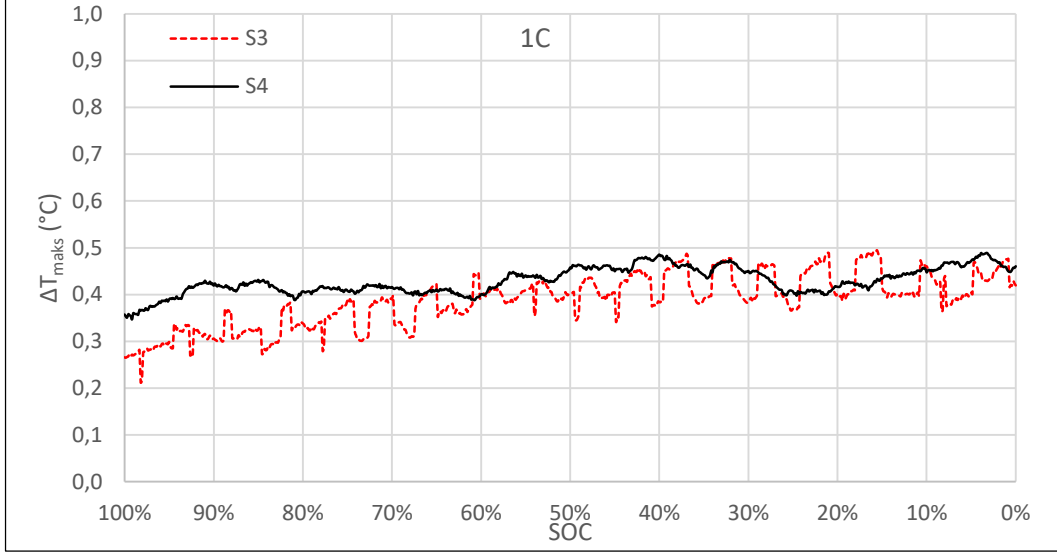
4.4.2. S4 sisteminin 36°C ortam sıcaklığındaki performansı

4.4.2.1. S4 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı

20°C ortam sıcaklığında yapılan testlere benzer bir şekilde FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanılarak oluşturulan modül (S3) ve kompozit FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanılarak oluşturulan modülün (S4) 1C deşarj hızında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'da verilmiştir.



Şekil 4.45 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



Şekil 4.46 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

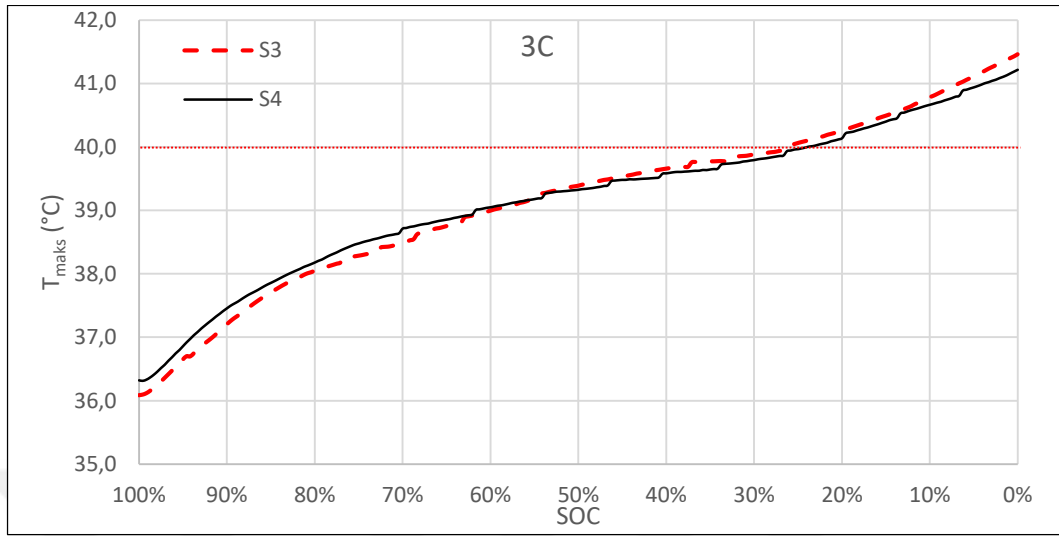
Her iki sistemde elde edilen maksimum batarya yüzey sıcaklığı ve sıcaklık farklarının birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla 20°C ortam sıcaklığında elde edilen sonuçlara benzer bir şekilde 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında da S4 sistemi, S3 sistemi ile benzer bir soğutma performansı sergilemiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin ve maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altındadır. 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında S4 sisteminde maksimum batarya yüzey sıcaklığı 37,30°C olarak ölçülmüş olup bu sıcaklık FDM' nin erime sıcaklığı 38°C'den düşük olduğu için herhangi bir erime meydana gelmemiş, FDM katı halde kalmış ve FDM üzerinden ısı transferi sadece iletim şeklinde gerçekleşmiştir.

4.4.2.2. S4 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı

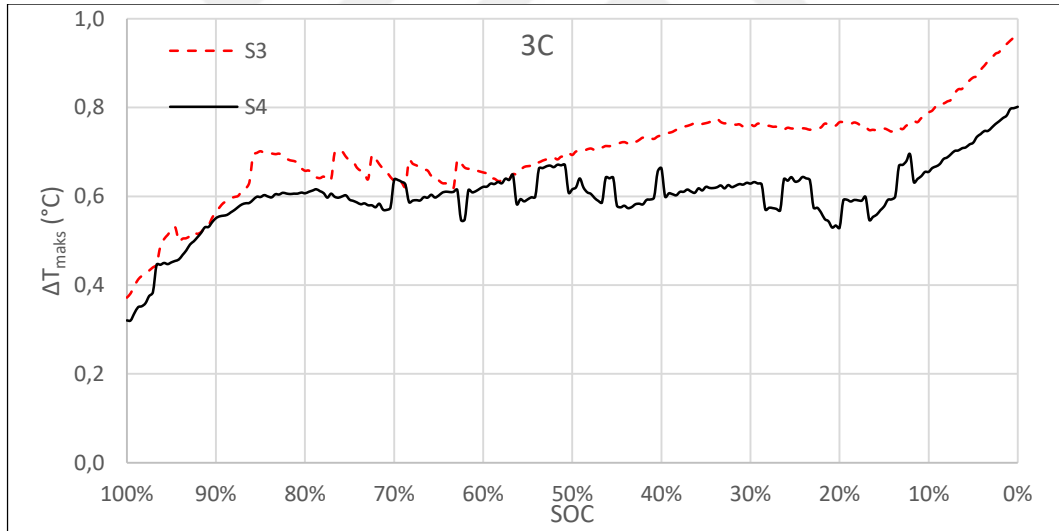
S3 ile S4 modülünde 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları ise Şekil 4.47 ve Şekil 4.48'de verilmiştir.

Tasarlanan S4 modülünün, S3 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 41,46°C'den 41,22°C'ye indirdiği, maksimum batarya yüzey sıcaklık farkının ise her iki sistemde de yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüştür. Dolayısıyla 36°C ortam sıcaklığında ve 3C deşarj hızında S4 sistemi, S3 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma

sıcaklığı 40°C'nin üzerine çıkmış ancak maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altında kalmıştır.



Şekil 4.47 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



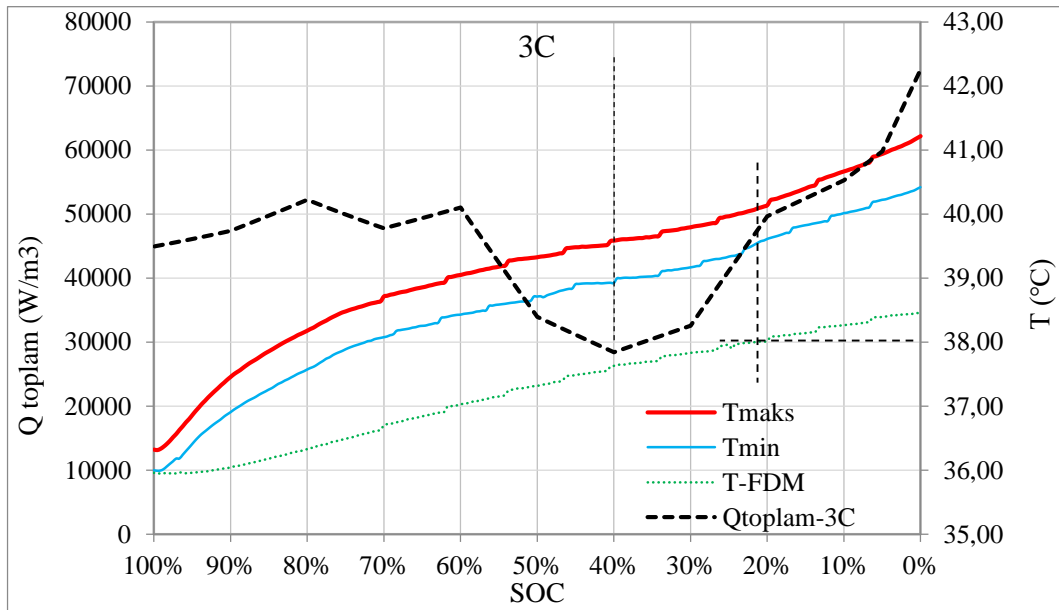
Şekil 4.48 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

Şekil 4.49'da ise S4 sisteminde 36°C ortam sıcaklığında ve 3C deşarj hızında elde edilen batarya maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. S3 sisteminde elde edilen sonuçlara benzer bir şekilde S4 sisteminde de, başlangıçta FDM sıcaklığının batarya yüzeyinde ölçülen minimum ve maksimum sıcaklığa yakın bir değer olduğu ancak deşarj işleminin başlamasıyla birlikte batarya yüzey sıcaklıklarının FDM sıcaklığına göre daha hızlı

arttığı, batarya doluluk oranının azalmaya başlaması ile batarya maksimum yüzey sıcaklığı ve FDM sıcaklığı arasındaki farkın da arttığı gözlemlenmiştir.

FDM sıcaklığının erime sıcaklığı olan 38°C'ye 1C deşarj işlemine göre daha hızlı, lakin S3 sisteminden daha geç ulaştığı (SOC=%21) ve bu değere ulaştığında batarya maksimum yüzey sıcaklığının 40,10°C olduğu, FDM'nin erime sıcaklık bölgesine girmesine rağmen hem FDM'nin sıcaklığının hem de batarya yüzey sıcaklığının arttığı ancak FDM'nin erimeye başlaması nedeniyle FDM'nin sıcaklık artış hızında düşme meydana geldiği gözlemlenmiştir.

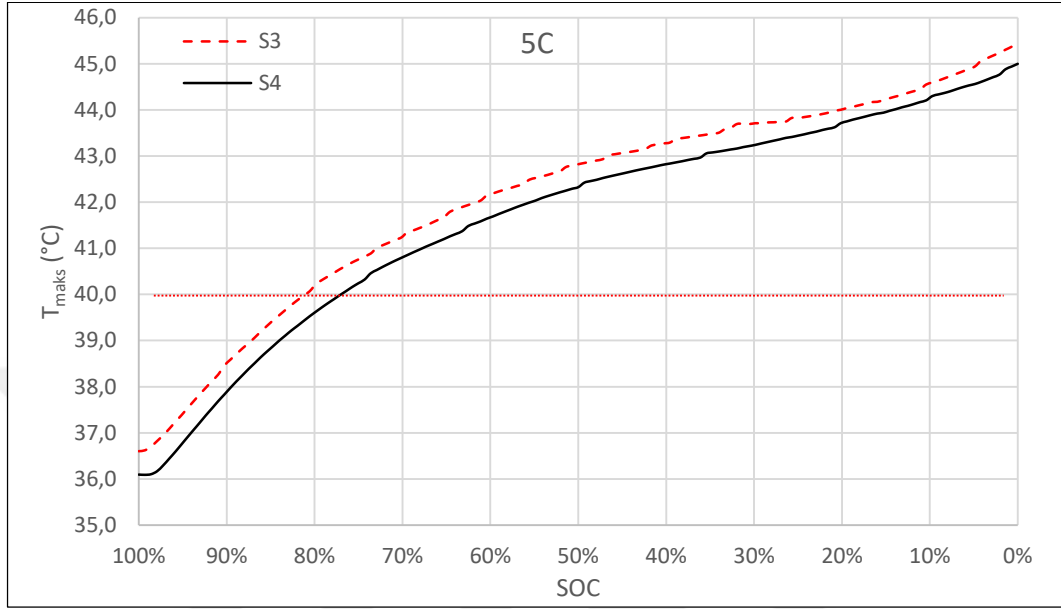
FDM'nin deşarj işlemi esnasında erime sıcaklığı bölgesine girmesine rağmen Şekil 4.49'dan da görülebileceği gibi hem batarya yüzey sıcaklığı hem de sıcaklık artış hızı artmıştır. FDM'nin erimeye başladığı ve %21 batarya doluluk oranına denk gelen anda batarya ısı üretimi de yukarı yönlü bir seyir (SOC=%40'tan başlayarak SOC=%0'a kadar) izlemekte olduğu için FDM'nin erimesi esnasında gizli ısı çekerek sıcaklığı baskılayıcı etkisi görülememiş aksine ısı üretiminin artmasıyla birlikte hem batarya yüzeyindeki sıcaklık hem de sıcaklık artış hızı yükselmiştir. Ayrıca deşarj işlemi sonunda FDM sıcaklığı maksimum 38,43°C'ye ulaşmış ancak FDM erime bölgesinin üst sınırı olan 43°C'ye ulaşamamış olup erime işlemi tamamen bitmemiş ve FDM'nin bir kısmı sıvı bir kısmı ise katı halde kalmış ve gizli ısının tamamı çekilemediği için FDM'nin sıcaklığı baskılayıcı etkisinden tam anlamıyla faydalanılamamıştır.



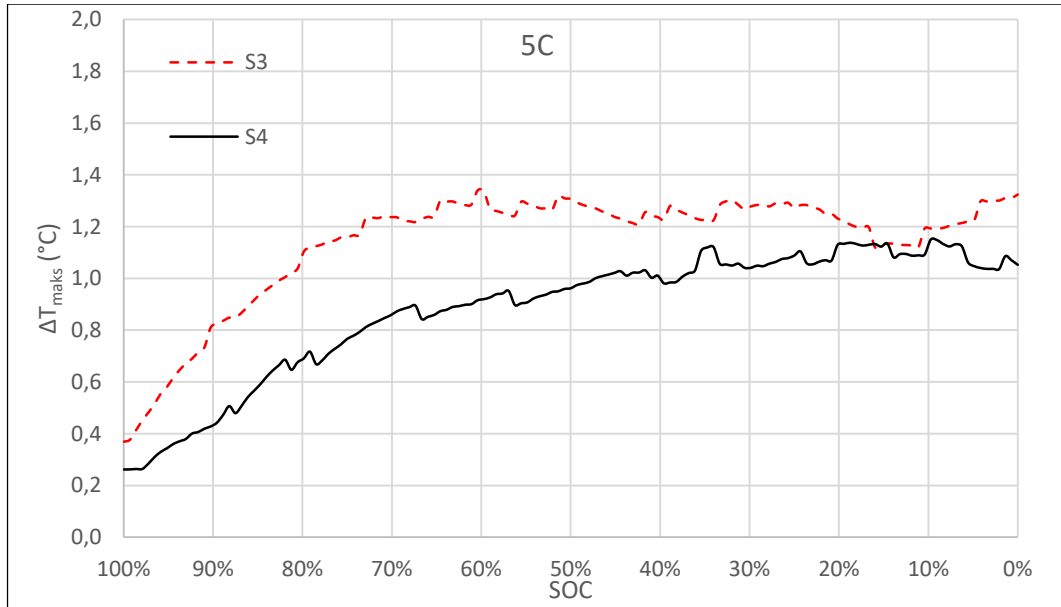
Şekil 4.49 S4 sisteminde 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi

4.4.2.3. S4 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı

S3 ile S4 modülünün 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları ise Şekil 4.50 ve Şekil 4.51’de verilmiştir.



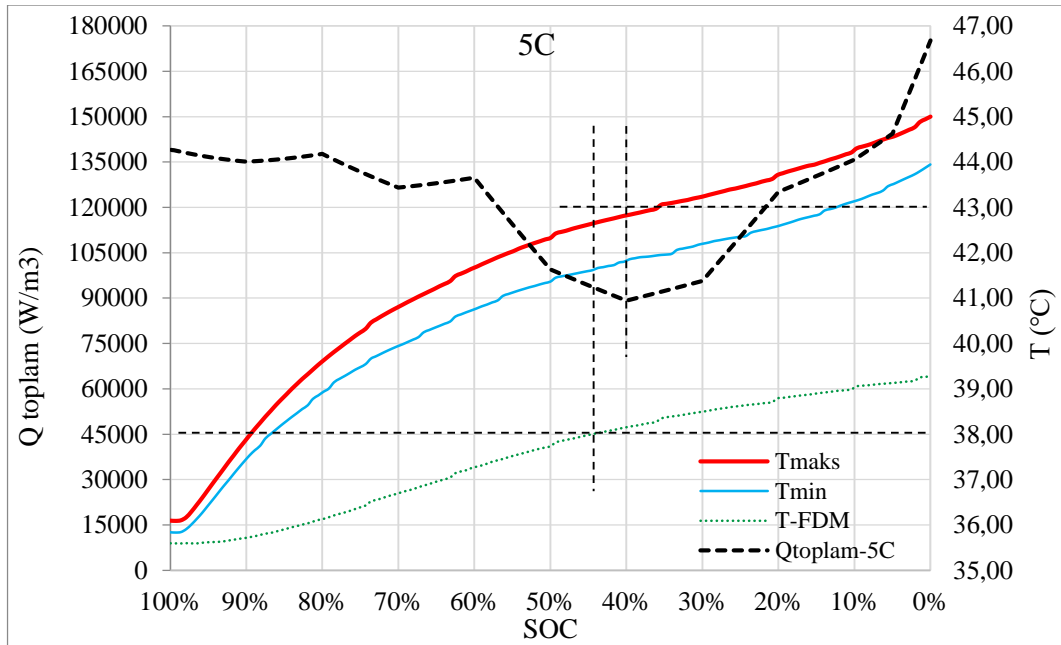
Şekil 4.50 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



Şekil 4.51 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S3 ve S4 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

Tasarlanan S4 modülünün, S3 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 45,45°C'den 45,00°C'ye indirdiği, ayrıca S4 sisteminin S3 sistemine göre maksimum batarya yüzey sıcaklık farkını ise 1,34°C'den 1,15°C'ye indirdiği görülmüştür. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin üzerine çıkmış ancak maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altında kalmıştır. Dolayısıyla 36°C ortam sıcaklığında da 20°C ortam sıcaklığında olduğu gibi ve 5C deşarj hızında da diğer deşarj hızlarında olduğu gibi S4 sistemi, S3 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir.

Şekil 4.52'de ise S4 sisteminde 36°C ortam sıcaklığında 5C deşarj hızında elde edilen batarya maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi aynı grafikte gösterilmiştir. 3C deşarj işlemine benzer olarak başlangıçta FDM sıcaklığının batarya yüzeyinde ölçülen minimum ve maksimum sıcaklığa yakın bir değer olduğu ancak deşarj işleminin başlamasıyla birlikte batarya yüzey sıcaklıklarının FDM sıcaklığına göre daha hızlı arttığı, deşarj işlemi boyunca batarya doluluk oranının azalmaya başlaması ile birlikte batarya maksimum yüzey sıcaklığı ve FDM sıcaklığı arasındaki farkın da arttığı ve bu sıcaklık farkının 3C deşarj işlemindeki sıcaklık farkından daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.



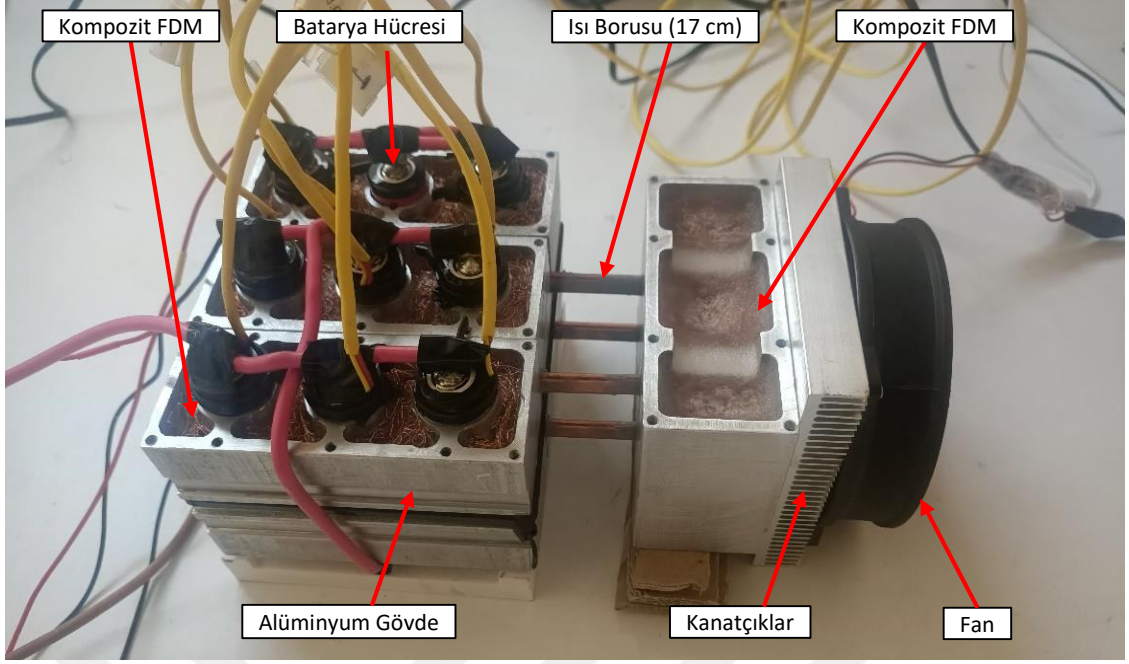
Şekil 4.52 S4 sisteminde 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi

FDM sıcaklığının erime sıcaklığı olan 38°C'ye 3C deşarj işlemine göre daha hızlı ulaştığı (SOC=%43) ve bu değere ulaştığında batarya maksimum yüzey sıcaklığının 42,70°C'ye ulaştığı, FDM'nin erime sıcaklık bölgesine girmesine rağmen 3C deşarj hızındaki işlemde olduğu gibi hem FDM'nin sıcaklığının hem de batarya yüzey sıcaklığının arttığı ancak FDM'nin erimeye başlaması nedeniyle FDM'nin sıcaklık artış hızında düşme meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Deşarj işlemi esnasında FDM'nin erime sıcaklığı bölgesine girmesine rağmen Şekil 4.52'den de görülebileceği gibi batarya yüzey sıcaklığı artmış ancak sıcaklık artış hızı batarya toplam ısı üretimine bağlı olarak farklı bir seyir izlemiş, ilk olarak FDM'nin erimeye başladığı ve %43 batarya doluluk oranına tekabül eden noktadan batarya ısı üretiminin aşağı yönlü bir seyir izlediği ve batarya doluluk oranının %40'a tekabül ettiği ana kadar sıcaklık artış hızı, hem toplam batarya ısı üretiminin aşağı yönlü bir seyir izlemesi hem de FDM'nin erimesi esnasında gizli ısı çekerek sıcaklığı baskılayıcı etkisi nedeniyle düşmüştür. Daha sonraki batarya doluluk oranının %40'dan tamamen boşalınca kadar (SOC=%0) geçen süre zarfında erimekte olan FDM'nin gizli ısı çekerek sıcaklığı baskılayıcı etki göstermesi beklenmesine rağmen batarya toplam ısı üretiminin hızlı bir şekilde artması nedeniyle herhangi bir sıcaklık baskılayıcı etki görülemedi ve batarya sıcaklık artış hızı da yükseliş göstermiştir. Ayrıca deşarj işlemi sonunda FDM sıcaklığı maksimum 39,27°C'ye ulaşmış ancak FDM erime bölgesinin üst sınırı olan 43°C'ye ulaşamamış olup erime işlemi tamamen bitmemiş ve FDM'nin bir kısmı sıvı bir kısmı ise katı halde kalmış ve gizli ısının tamamı çekilemediği için FDM'nin sıcaklığı baskılayıcı etkisinden tam anlamıyla faydalanılamamıştır.

4.5. Kompozit FDM, Alüminyum Blok, Isı Boruları (17cm) ve Fan Kullanarak Oluşturulan Aktif Sistemin (S5) Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 4.53'te gösterildiği gibi S5 sistemi 9 adet 18650 tip iyon batarya, kompozit FDM, alüminyum bloklar, ısı boruları, kanatçık ve fan ile oluşturulmuş olup S4 sisteminden farklı olarak sisteme kanatçık ve fan eklenmiştir.



Şekil 4.53 Kompozit FDM, alüminyum blok, ısı boruları (17cm) ve fan kullanarak oluşturulan aktif sistem (S5)

4.5.1. S5 sisteminin 20°C ortam sıcaklığındaki performansı

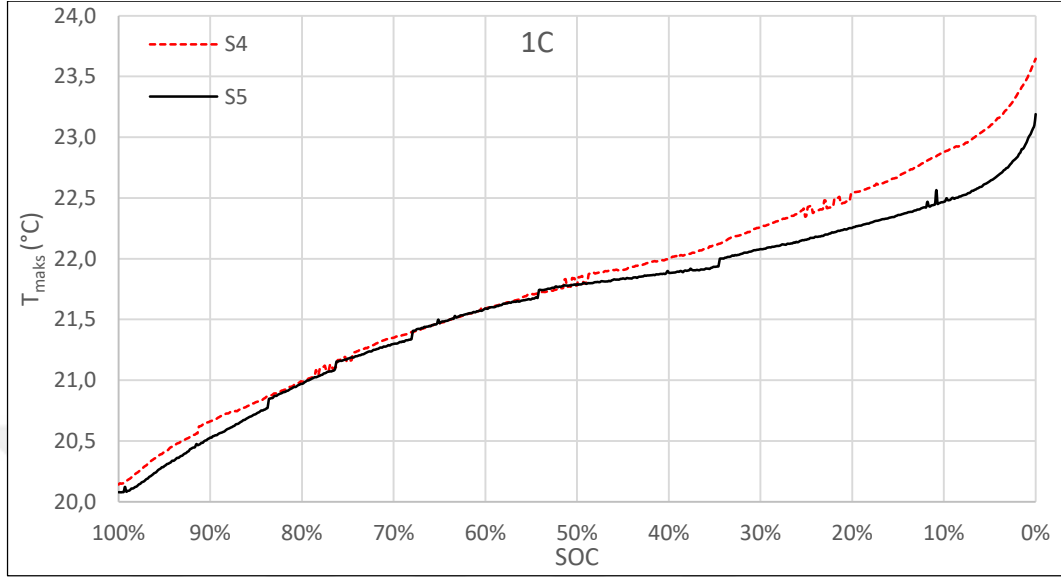
4.5.1.1. S5 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı

Kompozit FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanılarak oluşturulan modül (S4) ve kompozit FDM, alüminyum blok, ısı boruları ve fan kullanılarak oluşturulan modülün (S5) 20°C ortam sıcaklığında ve 1C deşarj hızında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları Şekil 4.54 ve Şekil 4.55’de verilmiştir.

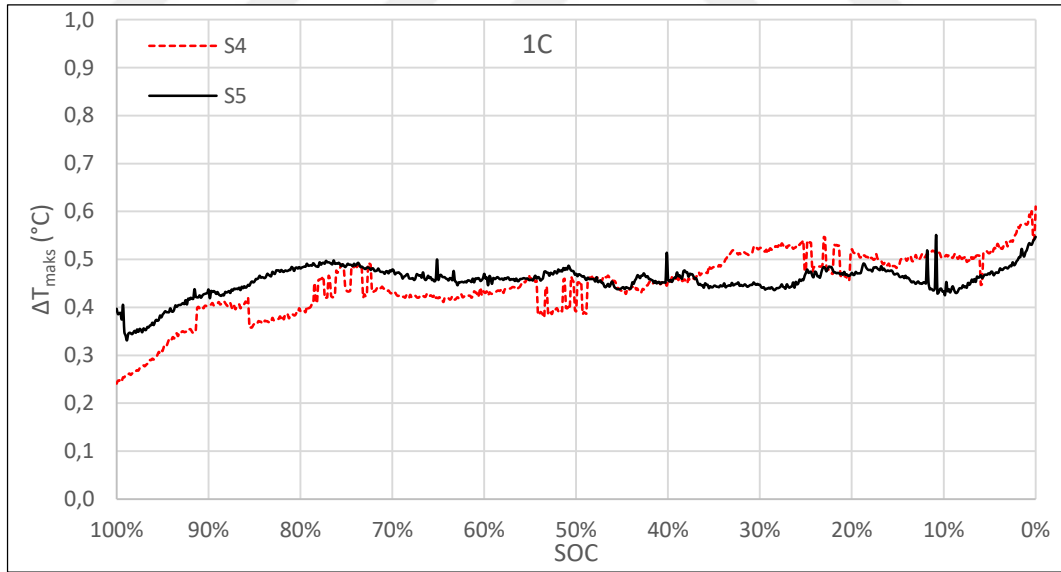
S5 modülünün S4 modülünden farkı sisteme ilave olarak soğutucu fan dâhil edilmiştir. Kullanılan fan tipi eksenel olup dikey pozisyonda 12,116 Volt gerilim ile çalışmakta ve 0,146 amper sabit akım çekmekte olup fan tarafından çekilen güç yaklaşık olarak 1,77 Watt’tır.

Tasarlanan S5 modülünün, S4 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 23,65°C’den yaklaşık %2 oranında düşürerek 23,19°C’ye indirdiği görülmüştür. Ayrıca her iki sistemde elde edilen maksimum batarya yüzey sıcaklık farklarının birbirine oldukça yakın olduğu ve ortalama 0,45°C olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla 1C deşarj hızında S5 sistemi, S4 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C’nin ve maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C’nin altındadır.

Sonuç olarak sisteme ilave edilen fan ısı transferini zorlanmış ısı taşınım mekanizması ile iyileştirdiği için S5 sistemi S4 sistemine nazaran daha iyi bir soğutma performansı göstermiştir.



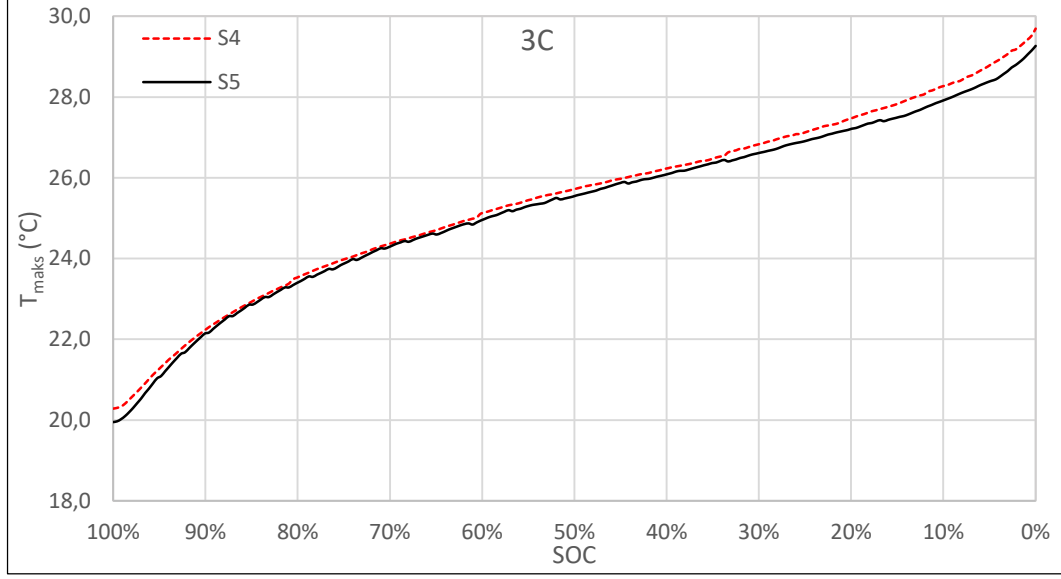
Şekil 4.54 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



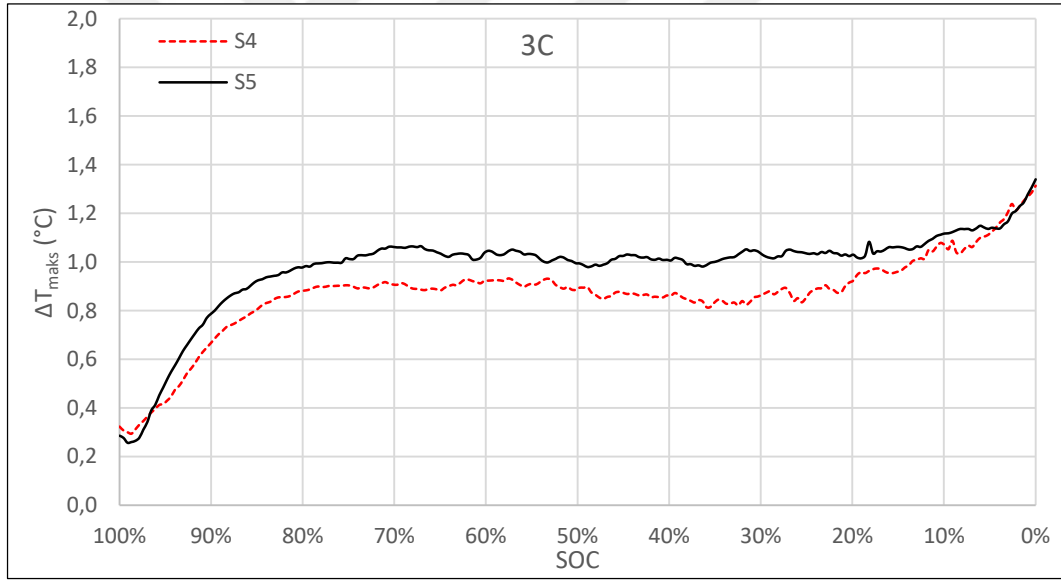
Şekil 4.55 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

4.5.1.2. S5 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı

Şekil 4.56 ve Şekil 4.57'de 3C deşarj hızında S4 ile S5 modüllerinden elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları verilmiştir.



Şekil 4.56 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)

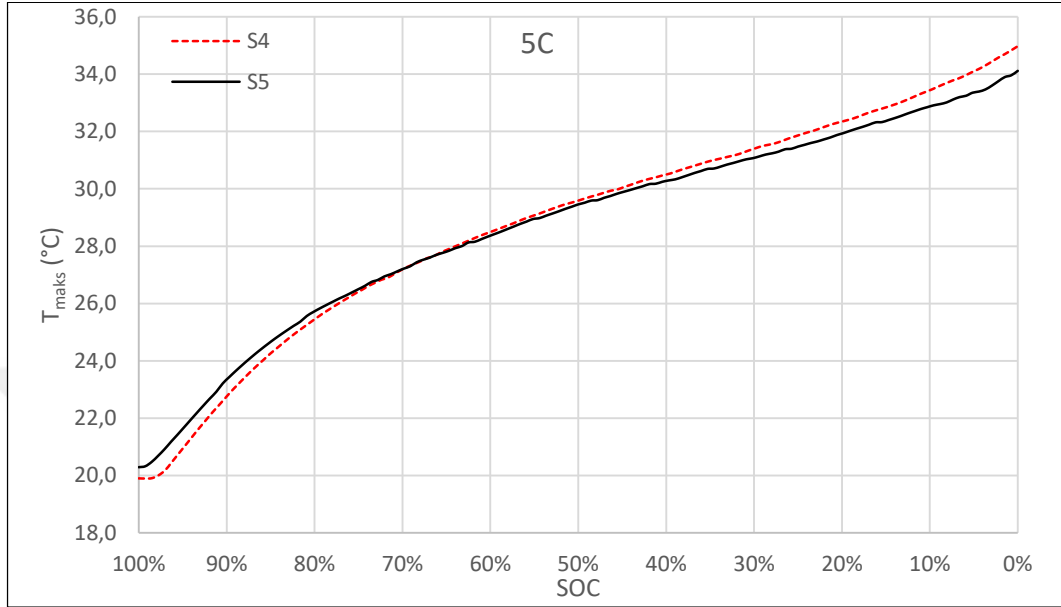


Şekil 4.57 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

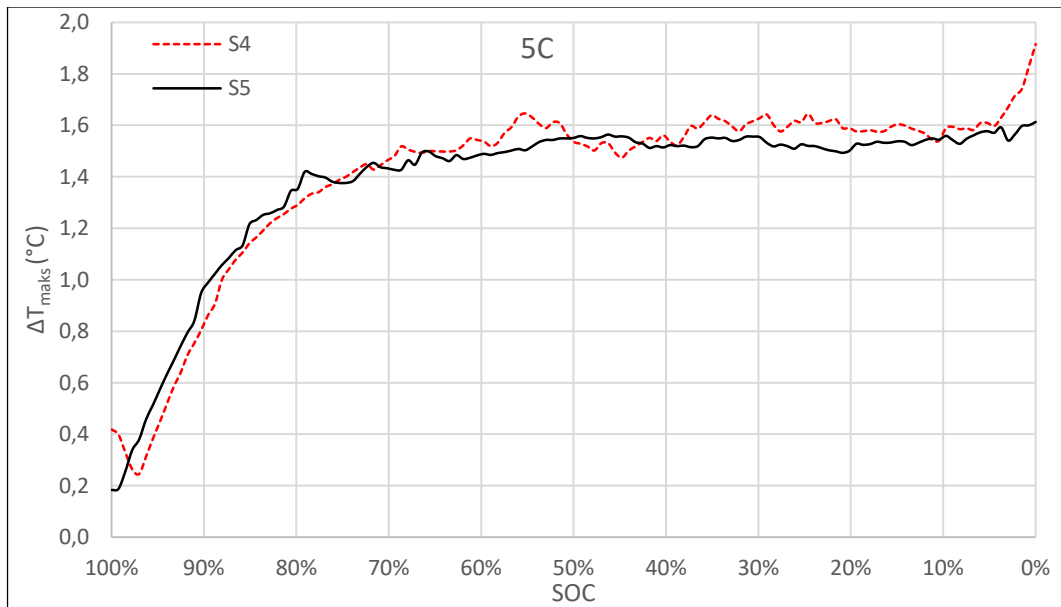
Tasarlanan S5 modülünün, S4 modülüne göre maksimum yüzey sıcaklığını 29,69°C'den 29,26°C'ye indirdiği görülmüştür. Ayrıca her iki sistemde elde edilen maksimum batarya yüzey sıcaklık farklarının birbirine oldukça yakın olduğu ve ortalama 1,0°C olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla 3C deşarj hızında da S5 sistemi, S4 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin ve maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altındadır.

4.5.1.3. S5 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı

Şekil 4.58 ve Şekil 4.59'da ise S4 ile S5 modülünün 20°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları verilmiştir.



Şekil 4.58 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



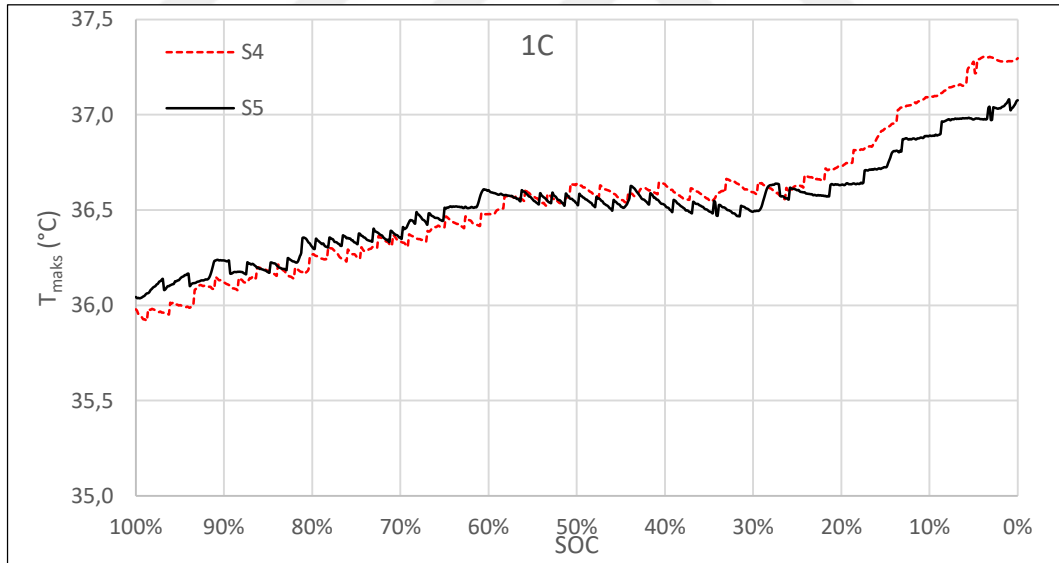
Şekil 4.59 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

Tasarlanan S5 modülünün, S4 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 34,98°C'den yaklaşık %2,5 oranında düşürerek 34,12°C'ye indirdiği görülmüştür. Ayrıca S5 sisteminin S4 sistemine göre maksimum batarya yüzey sıcaklık farkını ise 1,92°C'den 1,66°C'ye indirdiği görülmüştür. Dolayısıyla 20°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızında da diğer deşarj hızlarında olduğu gibi S5 sistemi, S4 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin ve maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altındadır.

4.5.2. S5 sisteminin 36°C ortam sıcaklığındaki performansı

4.5.2.1. S5 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı

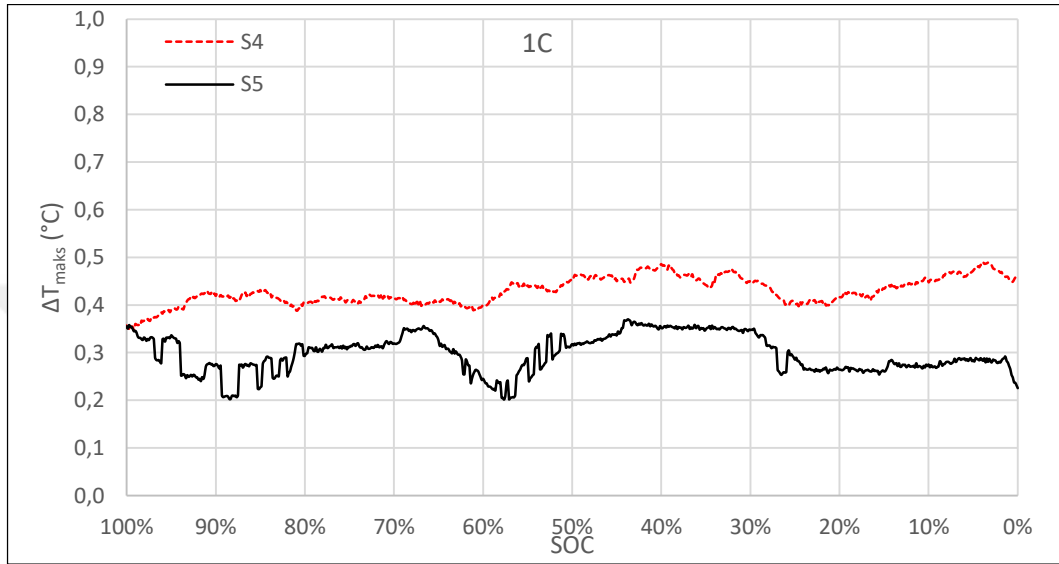
1C deşarj hızında kompozit FDM, alüminyum blok ve ısı boruları kullanılarak oluşturulan modül (S4) ve kompozit FDM, alüminyum blok, ısı boruları ve fan kullanılarak oluşturulan modülün (S5) 36°C ortam sıcaklığında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları sırasıyla Şekil 4.60 ve Şekil 4.61'de verilmiştir.



Şekil 4.60 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)

S5 sisteminde elde edilen maksimum batarya yüzey sıcaklığı S4 sistemine göre 37,30°C'den 37,08°C'ye düşmüş, maksimum sıcaklık farklarının ise birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında S5 sistemi, S4 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin ve

maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altındadır. 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında S5 sisteminde maksimum batarya yüzey sıcaklığı 37,08°C olarak ölçülmüş olup bu sıcaklık FDM'nin erime sıcaklığı 38°C'den düşük olduğu için herhangi bir erime meydana gelmemiş, FDM katı halde kalmış ve FDM üzerinden ısı transferi sadece iletim şeklinde gerçekleşmiştir.

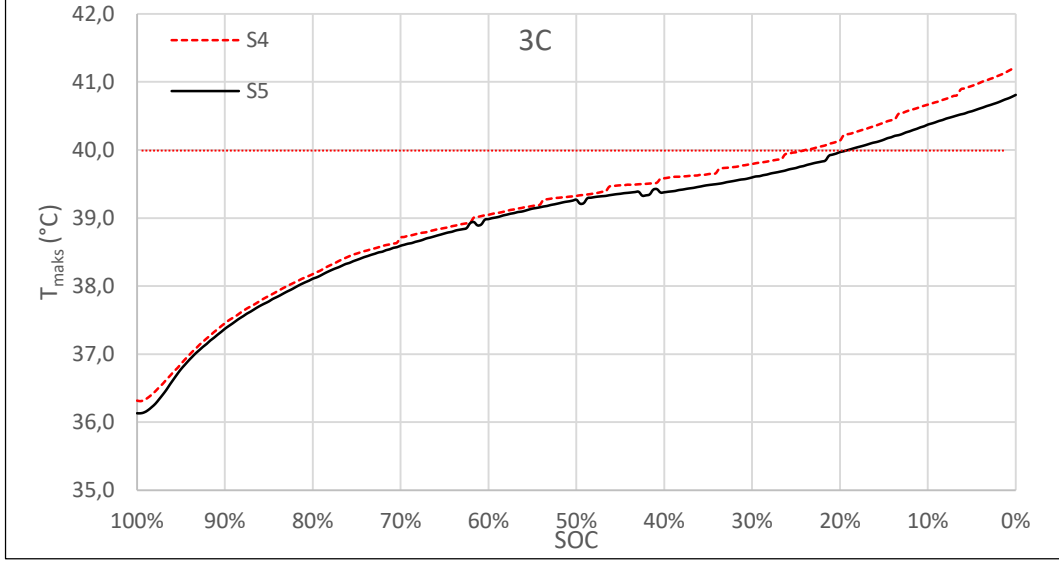


Şekil 4.61 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

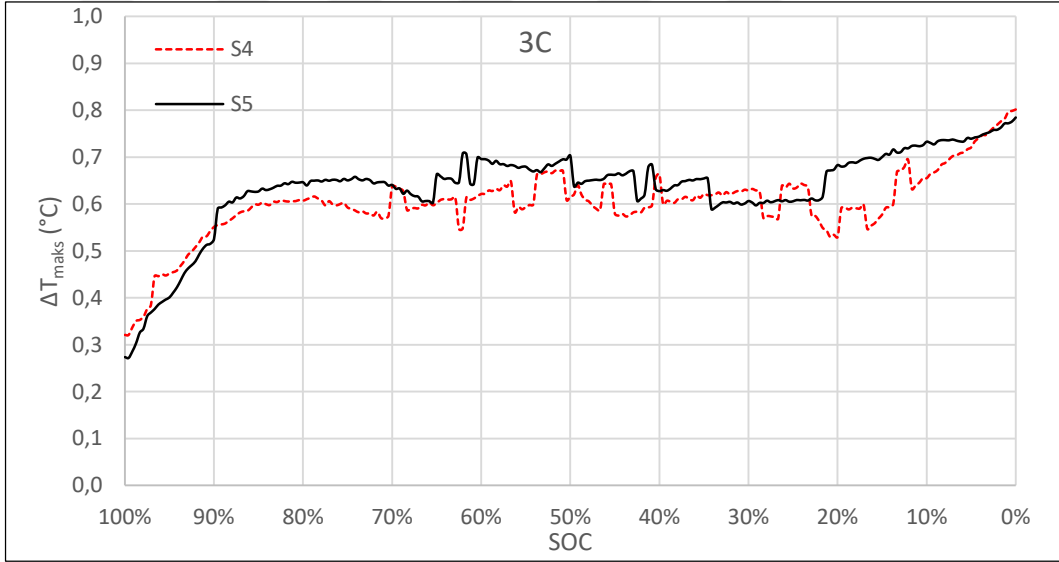
4.5.2.2. S5 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı

S4 ile S5 modülünün 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları ise Şekil 4.62 ve Şekil 4.63'te verilmiştir.

S5 modülünün, S4 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 41,22°C'den 40,81°C'ye indirdiği, maksimum batarya yüzey sıcaklık farkının ise her iki sistemde de yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüştür. Dolayısıyla 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında S5 sistemi, S4 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin üzerine çıkmış ancak maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altında kalmıştır.



Şekil 4.62 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)

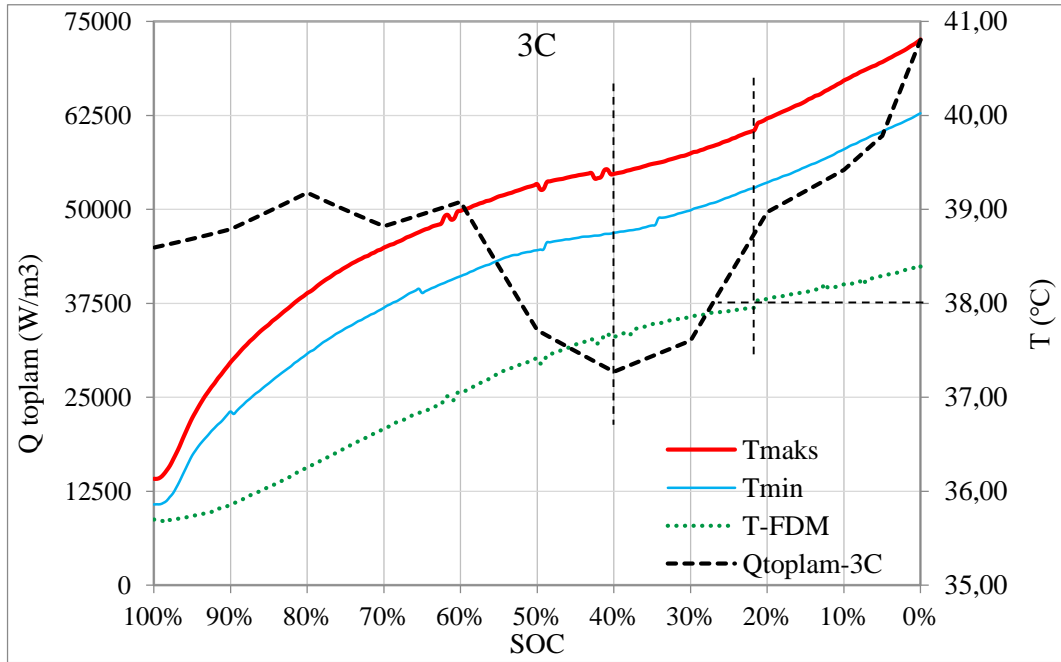


Şekil 4.63 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

S5 sisteminde 36°C ortam sıcaklığında 3C deşarj hızında elde edilen batarya maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi ise aynı grafik üzerinde ve Şekil 4.64'te gösterilmiştir. S4 sistemindekine benzer bir şekilde S5 sisteminde de, başlangıçta FDM sıcaklığının batarya yüzeyinde ölçülen minimum ve maksimum sıcaklığa yakın bir değer olduğu ancak deşarj işleminin başlamasıyla birlikte batarya yüzey sıcaklıklarının FDM sıcaklığına göre daha hızlı arttığı, batarya doluluk oranının azalmaya başlaması ile batarya maksimum yüzey sıcaklığı ve FDM sıcaklığı arasındaki farkın da arttığı gözlemlenmiştir.

FDM sıcaklığının erime sıcaklığı olan 38°C'ye 1C deşarj işlemine göre daha hızlı, lakin aynı deşarj hızındaki S4 sistemi ile hemen hemen aynı anda ulaştığı (SOC=%21) ve bu değere ulaştığında batarya maksimum yüzey sıcaklığının 39,95°C olduğu, FDM'nin erime sıcaklık bölgesine girmesine rağmen hem FDM'nin sıcaklığının hem de batarya yüzey sıcaklığının arttığı ancak FDM'nin erimeye başlaması nedeniyle FDM'nin sıcaklık artış hızında düşme meydana geldiği gözlemlenmiştir.

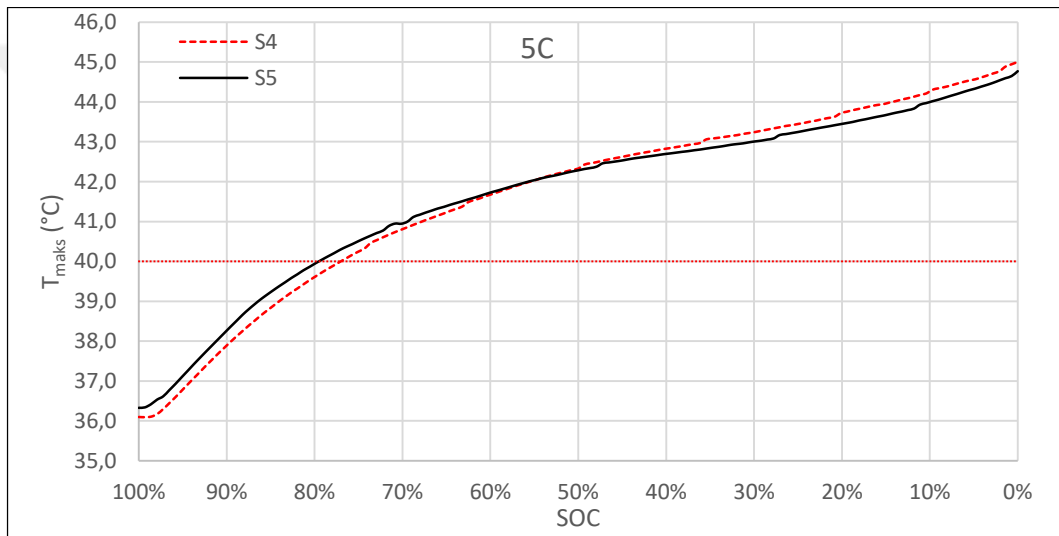
Deşarj işlemi esnasında FDM'nin erime sıcaklığı bölgesine girmesine rağmen Şekil 4.64'ten de görülebileceği gibi hem batarya yüzey sıcaklığı hem de sıcaklık artış hızı artmıştır. Daha önce S4 sistemindekine benzer bir şekilde FDM'nin erimeye başladığı ve %21 batarya doluluk oranına tekabül eden noktada batarya ısı üretimi de yukarı yönlü bir seyir (SOC=%40'tan başlayarak SOC=%0'a kadar) izlemekte olduğu için FDM'nin erimesi esnasında gizli ısı çekerek sıcaklığı baskılayıcı etkisi görülememiş aksine ısı üretiminin artmasıyla birlikte batarya yüzeyindeki sıcaklık artış hızı da yükselmiştir. Ayrıca deşarj işlemi sonunda FDM sıcaklığı maksimum 38,39°C'ye ulaşmış ancak FDM erime bölgesinin üst sınırı olan 43°C'ye ulaşamamış olup erime işlemi tamamen bitmemiş ve FDM'nin bir kısmı sıvı bir kısmı ise katı halde kalmış ve gizli ısının tamamı çekilemediği için FDM'nin sıcaklığı baskılayıcı etkisinden tam anlamıyla faydalanılamamıştır.



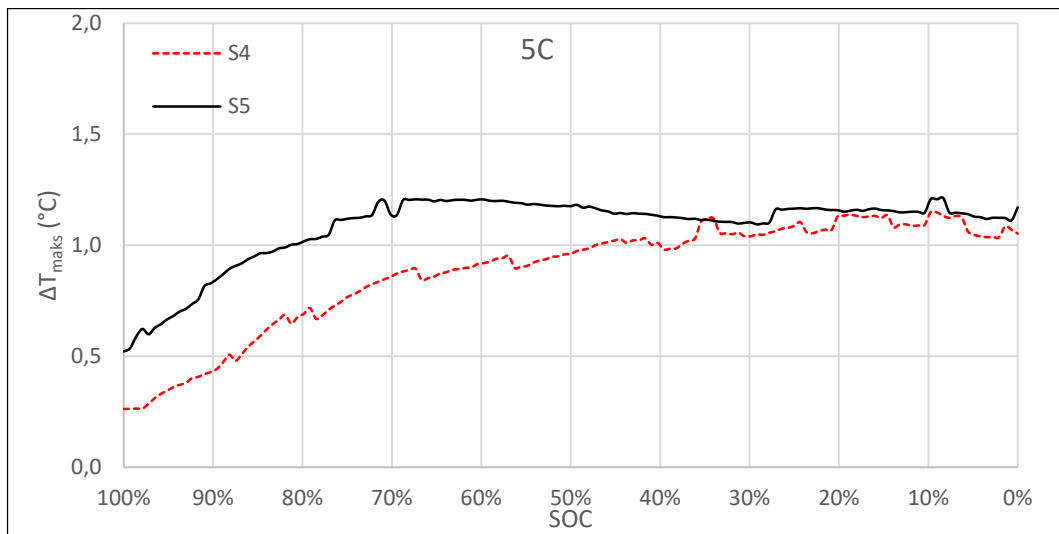
Şekil 4.64 S5 sisteminde 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi

4.5.2.3. S5 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı

Şekil 4.65 ve Şekil 4.66'da ise 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S4 ile S5 modüllerinden elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları verilmiştir. Tasarlanan S5 modülünün, S4 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 45,00°C'den 44,77°C'ye indirdiği, maksimum batarya yüzey sıcaklık farkının ise her iki sistemde de birbirine yakın olduğu görülmüştür. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin üzerine çıkmış ancak maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altında kalmıştır. Dolayısıyla 36°C ortam sıcaklığında ve 5C deşarj hızında da diğer deşarj hızlarında olduğu gibi S5 sistemi, S4 sistemine göre daha iyi bir soğutma performansı sergilemiştir.



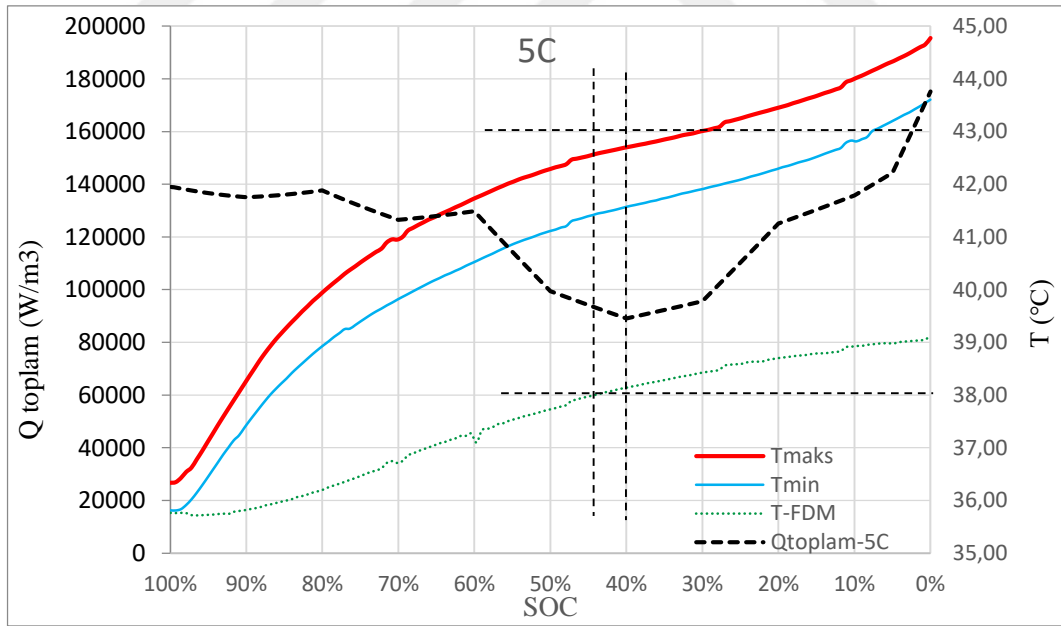
Şekil 4.65 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



Şekil 4.66 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S4 ve S5 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

Şekil 4.67’de ise S5 sisteminde 36°C ortam sıcaklığında 5C deşarj hızında elde edilen batarya maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi gösterilmiştir. S5 sisteminin 3C deşarj işlemindeki sonuçlara benzer olarak başlangıçta FDM sıcaklığının batarya yüzeyinde ölçülen minimum ve maksimum sıcaklığa yakın bir değer olduğu ancak deşarj işleminin başlamasıyla birlikte batarya yüzey sıcaklıklarının FDM sıcaklığına göre daha hızlı arttığı, batarya doluluk oranının azalmaya başlaması ile batarya maksimum yüzey sıcaklığı ve FDM sıcaklığı arasındaki farkın da arttığı ve bu sıcaklık farkının 3C deşarj işlemindeki sıcaklık farkından daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

FDM sıcaklığının erime sıcaklığı olan 38°C’ye 3C deşarj işlemine göre daha hızlı ulaştığı (SOC=%44) ve bu değere ulaştığında batarya maksimum yüzey sıcaklığının 42,58C’ye ulaştığı, FDM’nin erime sıcaklık bölgesine girmesine rağmen 3C deşarj hızındaki işlemde olduğu gibi hem FDM’nin sıcaklığının hem de batarya yüzey sıcaklığının arttığı ancak FDM’nin erimeye başlaması nedeniyle FDM’nin sıcaklık artış hızında düşme meydana geldiği gözlemlenmiştir.



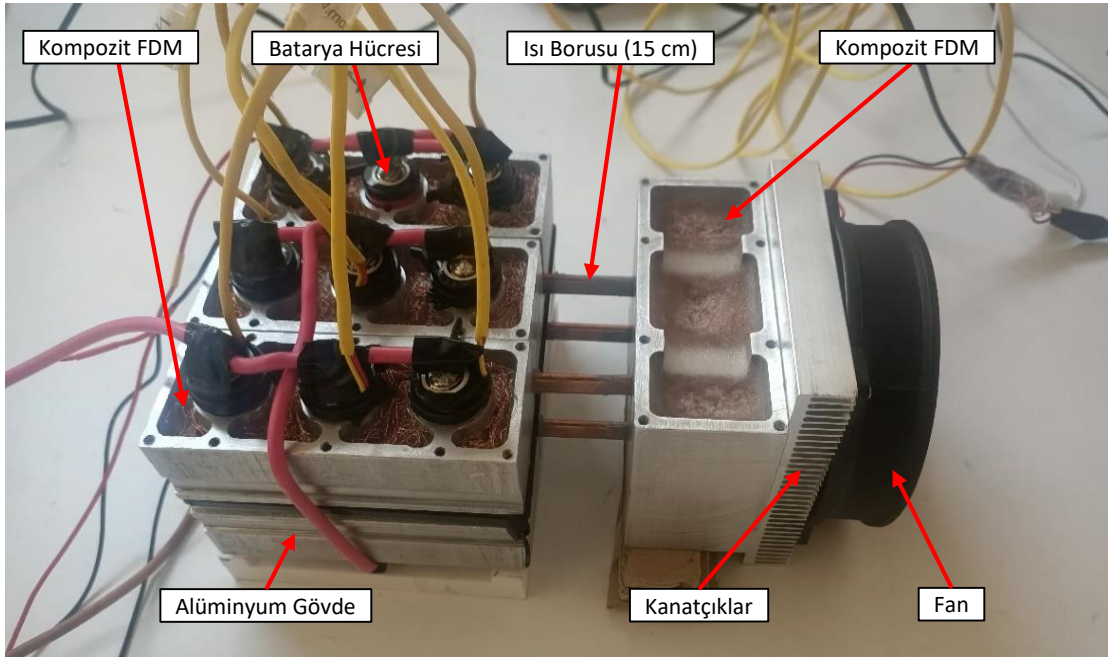
Şekil 4.67 S5 sisteminde 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi

3C deşarj işlemine benzer olarak 5C deşarj işlemi esnasında FDM’nin erime sıcaklığı bölgesine girmesine rağmen Şekil 4.67’den de görülebileceği gibi batarya yüzey

sıcaklığı artmış ancak sıcaklık artış hızı batarya toplam ısı üretimine bağlı olarak farklı bir seyir izlemiş, ilk olarak FDM'nin erimeye başladığı ve %44 batarya doluluk oranına tekabül eden noktadan batarya ısı üretiminin aşağı yönlü bir seyir izlediği ve batarya doluluk oranının %40'a tekabül ettiği ana kadar sıcaklık artış hızı hem toplam batarya ısı üretiminin aşağı yönlü bir eğilim göstermesi hem de FDM'nin erimesi esnasında gizli ısı çekerek sıcaklığı baskılayıcı etkisi nedeniyle düşmüştür. Daha sonraki batarya doluluk oranının %40'dan tamamen boşalınca kadar (SOC=%0) geçen süre zarfında erimekte olan FDM'nin gizli ısı çekerek sıcaklığı baskılayıcı etkisi göstermesi beklenmesine rağmen batarya toplam ısı üretiminin hızlı bir şekilde artması nedeniyle batarya sıcaklık artış hızı da yükseliş göstermiştir. Ayrıca deşarj işlemi sonunda FDM sıcaklığı maksimum 39,12°C'ye ulaşmış ancak FDM erime bölgesinin üst sınırı olan 43°C'ye ulaşamamış olup erime işlemi tamamen bitmemiş ve FDM'nin bir kısmı sıvı bir kısmı ise katı halde kalmış ve gizli ısının tamamı çekilemediği için FDM'nin sıcaklığı baskılayıcı etkisinden tam anlamıyla faydalanılamamıştır.

4.6. Kompozit FDM, Alüminyum Blok, Isı Boruları (15cm) ve Fan Kullanarak Oluşturulan Aktif Sistemin (S6) Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 4.68'de gösterildiği gibi S6 sistemi 9 adet 18650 tip lityum iyon batarya, kompozit FDM içeren iki adet alüminyum blok, ısı boruları, kanatçık ve fan ile oluşturulmuş olup S5 sisteminden farklı 17 cm ısı boruları yerine 15 cm ısı boruları kullanılmıştır.

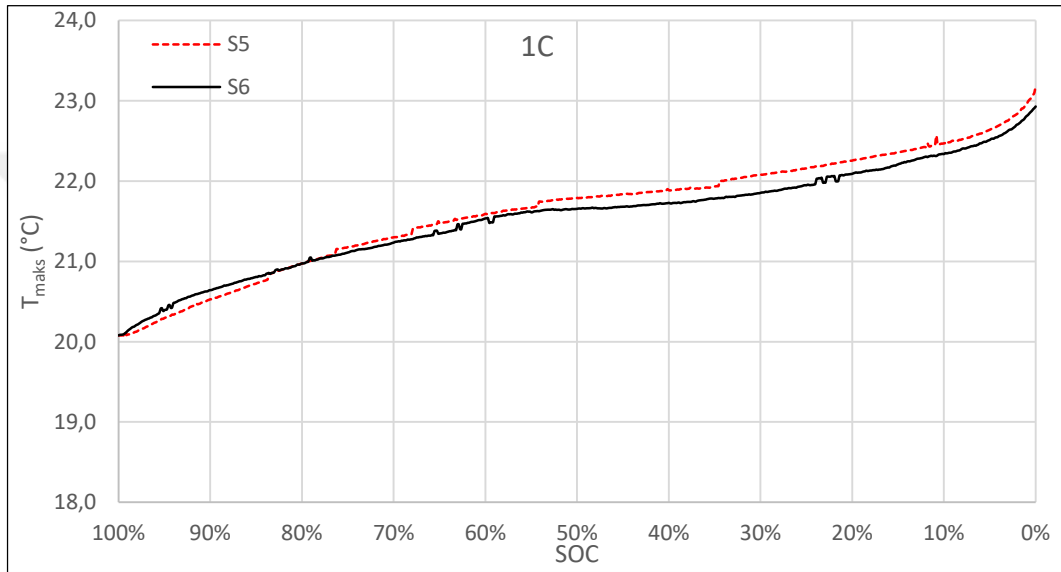


Şekil 4.68 Kompozit FDM, alüminyum blok, ısı boruları (15cm) ve fan kullanarak oluşturulan aktif sistem (S6)

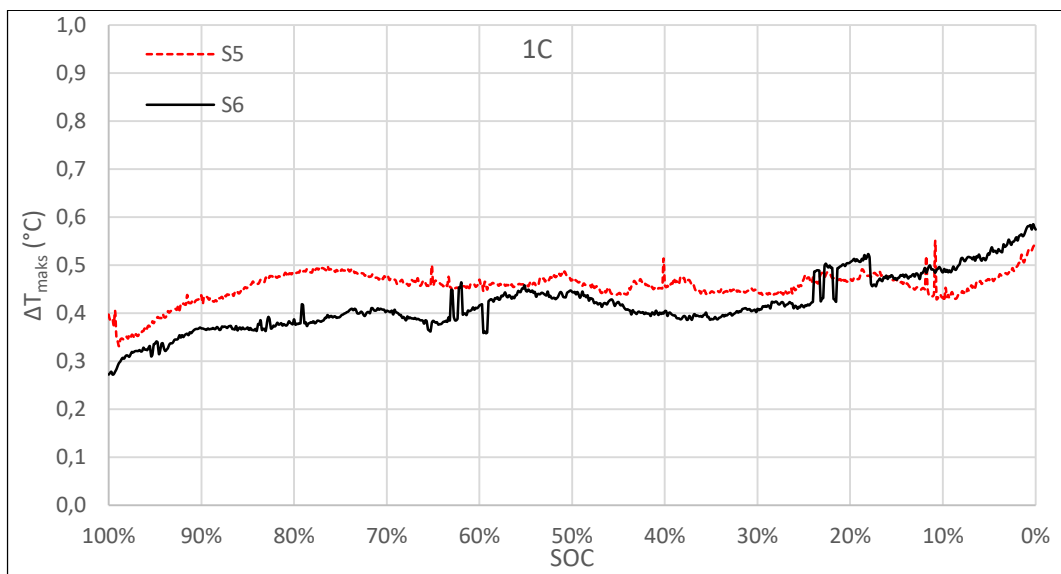
4.6.1. S6 sisteminin 20°C ortam sıcaklığındaki performansı

4.6.1.1. S6 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı

Şekil 4.69 ve Şekil 4.70’de 1C deşarj hızında kompozit FDM, alüminyum blok, 17 cm’lik ısı boruları (3mm x 8 mm) ve fan kullanılarak oluşturulan modül (S5) ve kompozit FDM, alüminyum blok, 15 cm’lik ısı boruları (3mm x 8 mm) ve fan kullanılarak oluşturulan modülün (S6) 20°C ortam sıcaklığında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları verilmiştir. S6 modülünün S5 modülünden farkı aynı özelliklerde fakat daha kısa ısı boruları kullanılmasıdır.



Şekil 4.69 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



Şekil 4.70 1C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

Tasarlanan S6 modülünün, S5 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 23,19°C'den yaklaşık %1 oranında düşürerek 22,93°C'ye indirdiği görülmüştür. Ayrıca her iki sistemde elde edilen maksimum batarya yüzey sıcaklık farklarının birbirine oldukça yakın olduğu ve ortalama 0,45°C olduğu gözlemlenmiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin ve maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altındadır.

Isı boruları üzerinden yapılan ısı transferi (Q) değeri [4.1] nolu denklem, ısı borusu efektif uzunluğu (L_{eff}) değeri [4.2] nolu denklem ve ısı direnç (R_{isl}) değeri ise [4.3] nolu denklem yardımıyla bulunabilir (Ghanbarpourgeravi, 2017). Bu denklemlerde k_{eff} değeri ısı borusu efektif ısı transfer katsayısını, A_{hp} ısı borusu kesit alanını, ΔT ise buharlaşma ve yoğuşma bölümleri arasındaki sıcaklık farkını ifade eder.

$$Q = \frac{k_{eff}.A_{hp}}{L_{eff}}. \Delta T \quad [4.1]$$

$$L_{eff} = L_{adyabatik} + \left(\frac{L_{buharlaşma} + L_{yoğuşma}}{2} \right) \quad [4.2]$$

$$R_{isl} = \frac{L_{eff}}{k_{eff}.A_{hp}} \quad [4.3]$$

S5 sisteminde ısı borusunun adyabatik kısmının uzunluğu 3 cm, yoğuşma kısmının uzunluğu 4 cm ve buharlaşma kısmının uzunluğu 10 cm olmak üzere ısı borusu toplam efektif uzunluğu 10 cm iken S6 sisteminde ise ısı borusunun adyabatik kısmının uzunluğu 1 cm, yoğuşma kısmının uzunluğu 4 cm ve buharlaşma kısmının uzunluğu 10 cm olmak üzere ısı borusu toplam efektif uzunluğu 8 cm'dir. Her iki sistemde de kullanılan ısı boruları kesit alanı eşit olup aynı tip ısı boruları kullanıldığı için efektif ısı transfer katsayıları da eşittir. Isı borusu efektif ısı transfer katsayısı literatürdeki benzer çalışmalarda olduğu gibi 9216 W/mK olarak seçilmiştir (Behi vd., 2020). Kullanılan ısı borularının özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 S5 ve S6 sistemlerinde kullanılan ısı borusu özellikleri

	S5 Sistemi	S6 Sistemi
L_{eff} (m)	0,1	0,08
k_{eff} (W/mK)	9216	9216
A_{hp} (m ²)	2,4e-5	2,4e-5

Batarya modülünde 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında oluşan toplam ısı 3. Bölümde hesaplanmış ve maksimum ısı üretimi 2,30 W olarak bulunmuştur. Daha sonra bataryalarda üretilen tüm ısının ısı boruları aracılığıyla ikinci bloğa iletildiği varsayılarak [4.1] nolu denklem yardımıyla ısı borusunun buharlaştırıcı kısmının bağlı olduğu batarya modülü ve yoğunlaştırıcı kısmının bağlı olduğu ikinci alüminyum bloğun sıcaklık değerleri farkı hesaplanarak Çizelge 4.3'te verilmiştir.

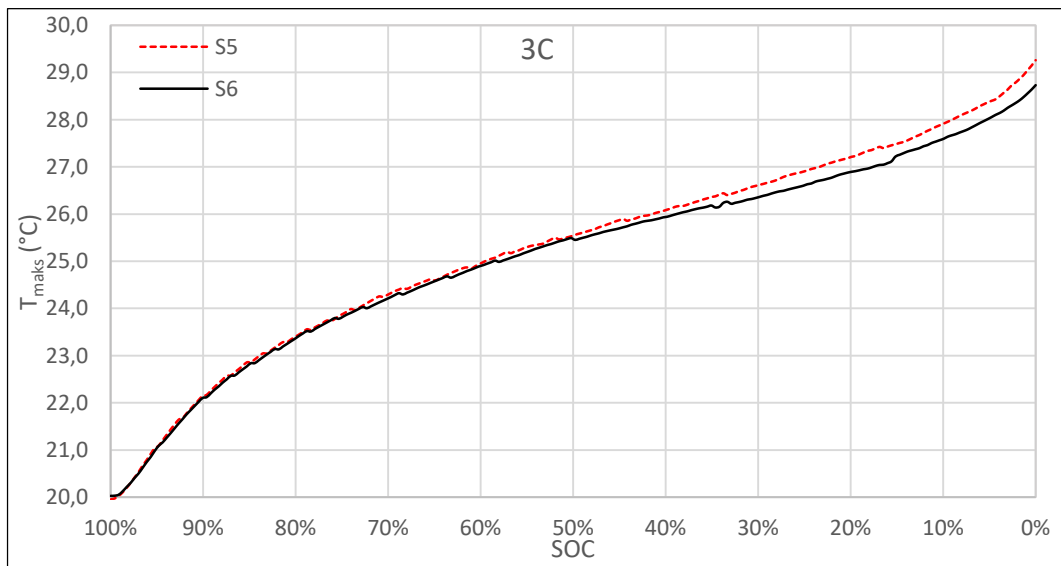
Çizelge 4.3 S5 ve S6 sistemlerinde 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında oluşan maksimum ısı ve sıcaklık farkı değerleri

	S5 Sistemi	S6 Sistemi
Q_{maks} (W)	2,30	2,30
ΔT (K)	1,04	0,83

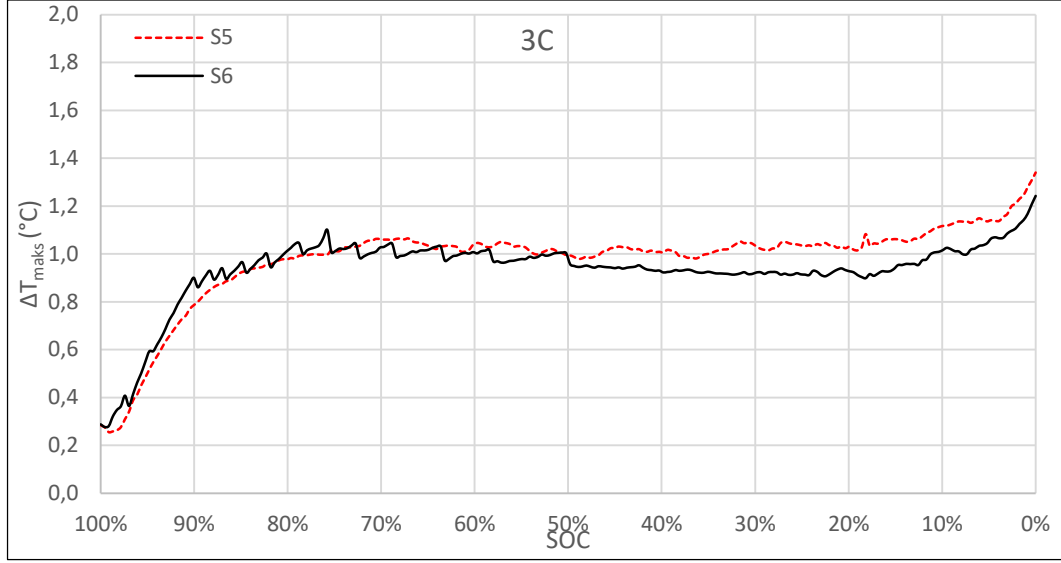
Sonuç olarak 20°C ortam sıcaklığında ve 1C deşarj hızında S6 sisteminde daha kısa ısı borusu kullanılması nedeniyle birinci alüminyum blok ve ikinci alüminyum blok arasındaki sıcaklık farkı düşmüş ve daha kısa ısı borusuna sahip olan S6 sistemi S5 sistemine nazaran bataryalarda üretilen ısıyı ikinci bloğa daha hızlı iletterek daha iyi bir soğutma performansı göstermiştir.

4.6.1.2. S6 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı

S5 ile S6 modülünün 20°C ortam sıcaklığında ve 3C deşarj hızında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları Şekil 4.71 ve Şekil 4.72'de verilmiştir.



Şekil 4.71 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



Şekil 4.72 3C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

Tasarlanan S6 modülünün, S5 modülüne göre maksimum yüzey sıcaklığını 29,26°C'den 28,94°C'ye indirdiği görülmüştür. Ayrıca her iki sistemde elde edilen maksimum batarya yüzey sıcaklık farklarının birbirine oldukça yakın olduğu ve ortalama 1,0°C olduğu gözlemlenmiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin ve maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altındadır.

Batarya modülünde 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında oluşan toplam ısı 3. Bölümde 11,86 W olarak hesaplanmış ve bataryalarda üretilen tüm ısının ısı boruları aracılığıyla ikinci bloğa iletildiği varsayılarak [4.1] nolu denklem yardımıyla ısı borusunun buharlaştırıcı kısmının bağlı olduğu batarya modülü ve yoğuşturucu kısmının bağlı olduğu ikinci alüminyum bloğun sıcaklık değerleri farkı hesaplanarak Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 S5 ve S6 sistemlerinin 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında oluşan maksimum ısı ve sıcaklık farkı değerleri

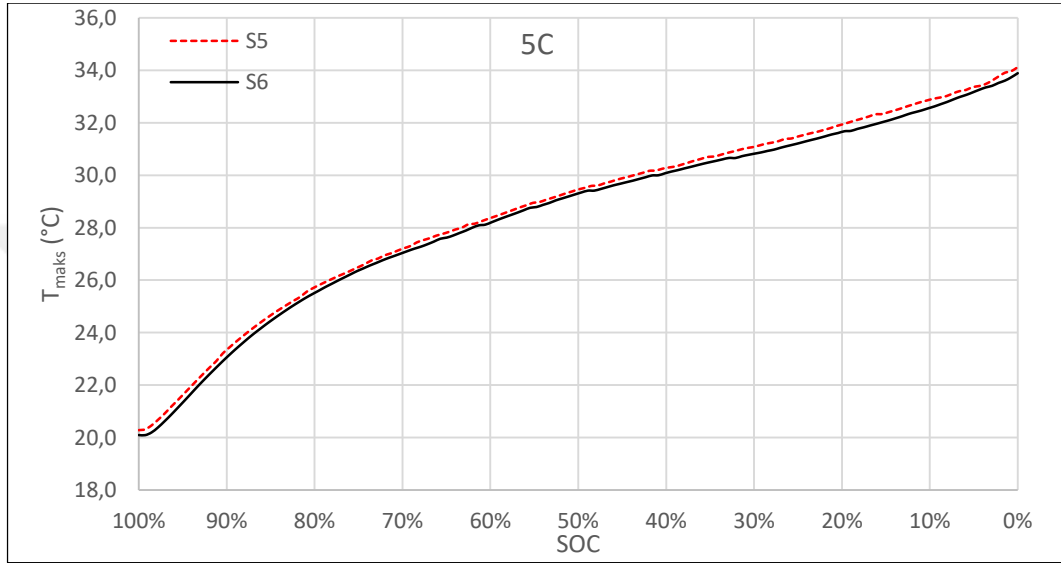
	S5 Sistemi	S6 Sistemi
Q_{maks} (W)	11,86	11,86
ΔT (K)	5,36	4,29

Sonuç olarak 20°C ortam sıcaklığında ve 3C deşarj hızında S6 sisteminde daha kısa ısı borusu kullanılması nedeniyle birinci alüminyum blok ve ikinci alüminyum blok arasındaki sıcaklık farkı düşmüş ve daha kısa ısı borusuna sahip olan S6 sistemi S5

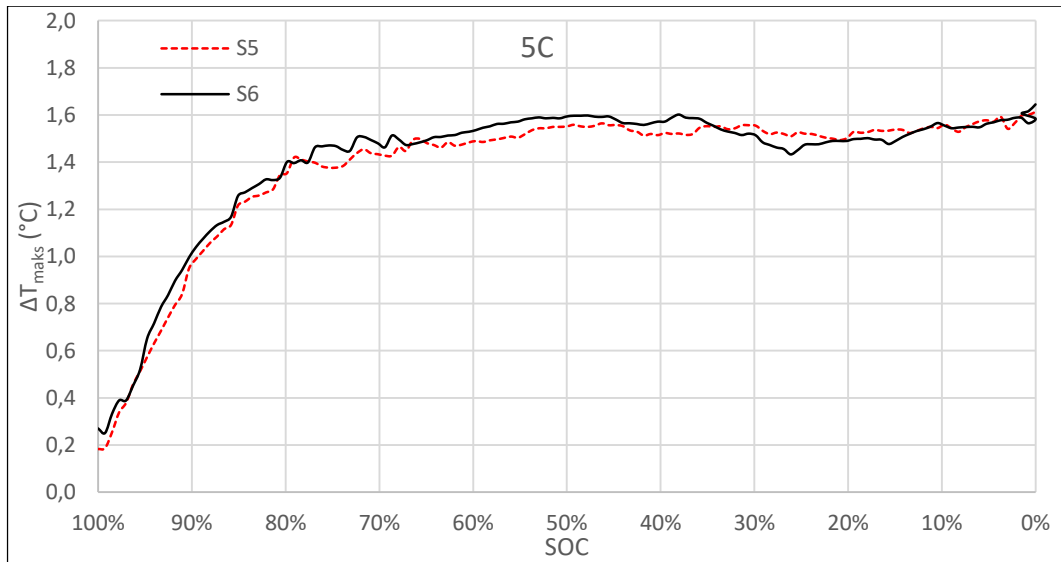
sistemine nazaran bataryalarda üretilen ısıyı ikinci bloğa daha hızlı ileterek daha iyi bir soğutma performansı göstermiştir.

4.6.1.3. S6 sisteminin 20°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı

Şekil 4.73 ve Şekil 4.74'te ise 20°C ortam sıcaklığında ve 5C deşarj hızında S5 ile S6 modüllerinden elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları verilmiştir.



Şekil 4.73 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



Şekil 4.74 5C deşarj hızında 20°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

Tasarlanan S6 modülünün, S5 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 34,12°C'den 33,89°C'ye indirdiği görülmüştür. Ayrıca her iki sistemde elde edilen maksimum batarya yüzey sıcaklık farklarının birbirine oldukça yakın olduğu ve ortalama 1,5°C olduğu gözlemlenmiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin ve maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altındadır.

Batarya modülünde 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında oluşan toplam ısı 3. Bölümde 32,98 W olarak hesaplanmış ve bataryalarda üretilen tüm ısının ısı boruları aracılığıyla ikinci bloğa iletiildiği varsayılarak [4.1] nolu denklem yardımıyla ısı borusunun buharlaştırıcı kısmının bağlı olduğu batarya modülü ve yoğuşturucu kısmının bağlı olduğu ikinci alüminyum bloğun sıcaklık değerleri farkı hesaplanarak Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5 S5 ve S6 sistemlerinin 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında oluşan maksimum ısı ve sıcaklık farkı değerleri

	S5 Sistemi	S6 Sistemi
Q_{maks} (W)	32,98	32,98
ΔT (K)	14,91	11,93

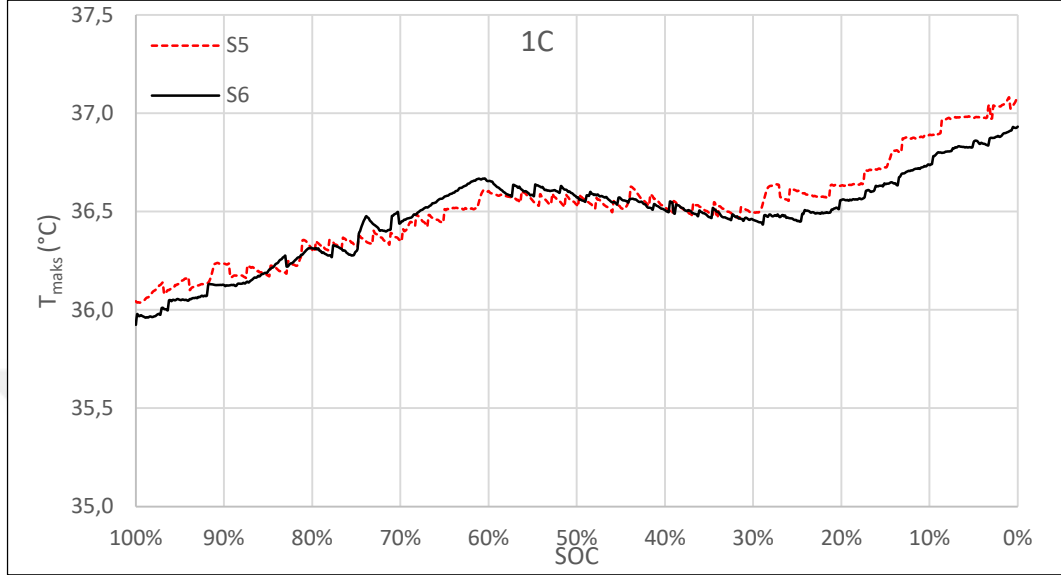
Sonuç olarak 20°C ortam sıcaklığında ve 5C deşarj hızında S6 sisteminde daha kısa ısı borusu kullanılması nedeniyle birinci alüminyum blok ve ikinci alüminyum blok arasındaki sıcaklık farkı düşmüş ve daha kısa ısı borusuna sahip olan S6 sistemi S5 sistemine nazaran bataryalarda üretilen ısıyı ikinci bloğa daha hızlı ileterek daha iyi bir soğutma performansı göstermiştir.

4.6.2. S6 sisteminin 36°C ortam sıcaklığındaki performansı

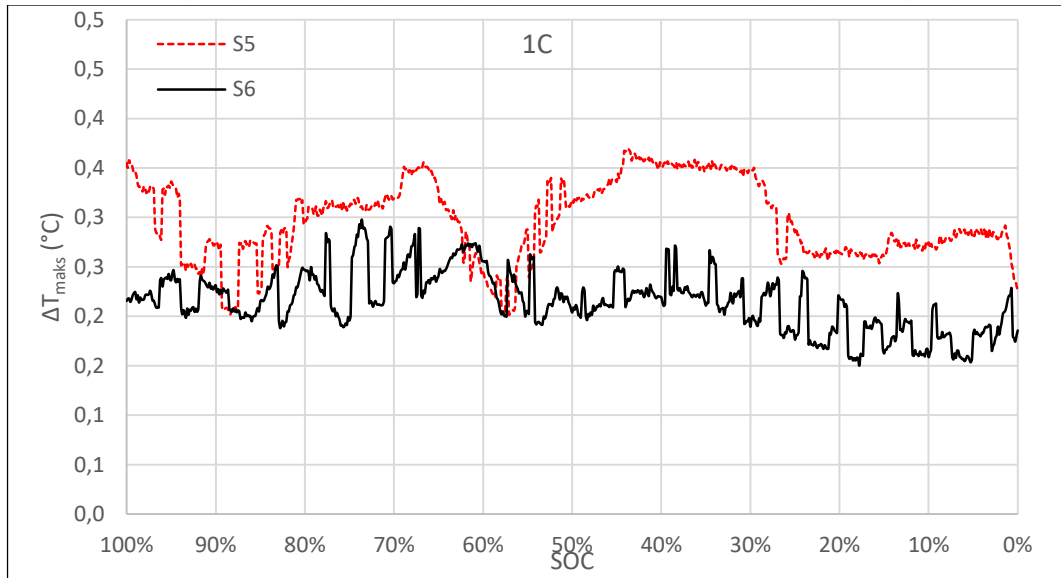
4.6.2.1. S6 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 1C deşarj hızındaki performansı

Kompozit FDM, alüminyum blok, 17 cm'lik ısı boruları ve fan kullanılarak oluşturulan modül (S5) ve kompozit FDM, alüminyum blok, 15 cm'lik ısı boruları ve fan kullanılarak oluşturulan modülün (S6) 36°C ortam sıcaklığında ve 1C deşarj hızında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları Şekil 4.75 ve Şekil 4.76'da verilmiştir. S6 sisteminde elde edilen maksimum batarya yüzey sıcaklığı S5 sistemine göre 37,08°C'den 36,93°C'ye düşmüş, maksimum sıcaklık farklarının ise birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin ve maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altındadır. 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında S6

sisteminde maksimum batarya yüzey sıcaklığı 36,93°C olarak ölçülmüş olup bu sıcaklık FDM'nin erime sıcaklığı 38°C'den düşük olduğu için herhangi bir erime meydana gelmemiş, FDM katı halde kalmış ve FDM üzerinden ısı transferi sadece iletim şeklinde gerçekleşmiştir.



Şekil 4.75 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



Şekil 4.76 1C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

Batarya modülünde 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında oluşan toplam ısı 3. Bölümde 1,94 W olarak hesaplanmış ve bataryalarda üretilen tüm ısının ısı boruları

aracılığıyla ikinci bloğa ileildiği varsayılarak [4.1] nolu denklem yardımıyla ısı borusunun buharlaştırıcı kısmının bağlı olduğu batarya modülü ve yoğuşturucu kısmının bağlı olduğu ikinci alüminyum bloğun sıcaklık değerleri farkı hesaplanarak Çizelge 4.6'da verilmiştir.

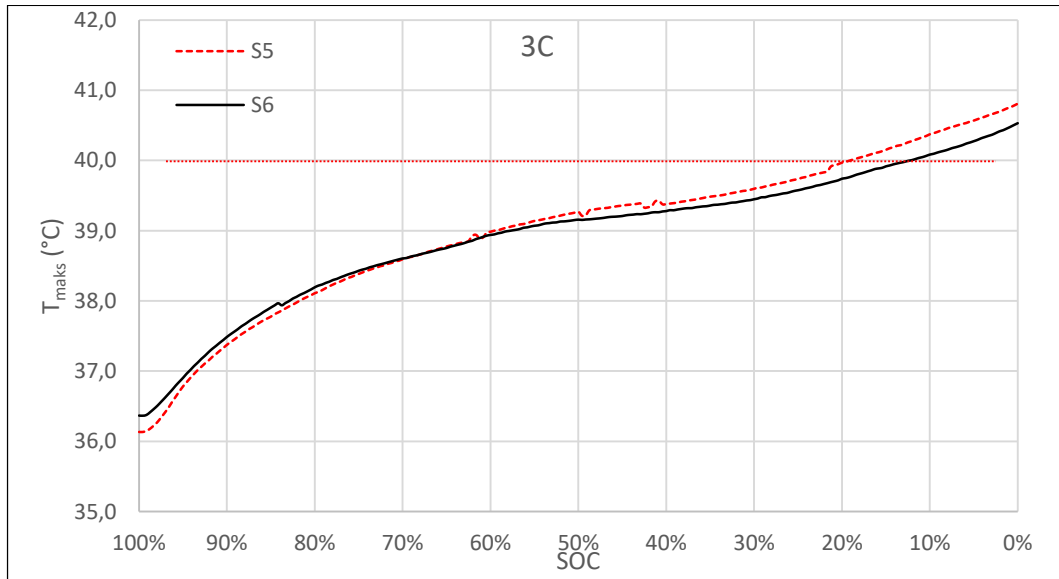
Çizelge 4.6 S5 ve S6 sistemlerinin 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında oluşan maksimum ısı ve sıcaklık farkı değerleri

	S5 Sistemi	S6 Sistemi
Q_{maks} (W)	1,94	1,94
ΔT (K)	0,88	0,70

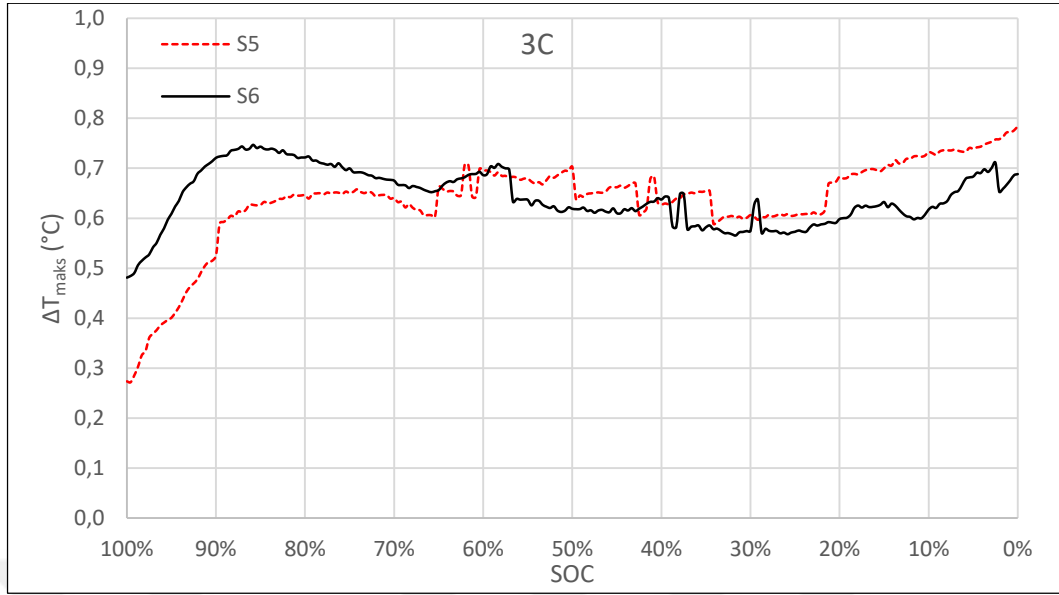
Sonuç olarak 36°C ortam sıcaklığında ve 1C deşarj hızında S6 sisteminde daha kısa ısı borusu kullanılması nedeniyle birinci alüminyum blok ve ikinci alüminyum blok arasındaki sıcaklık farkı düşmüş ve daha kısa ısı borusuna sahip olan S6 sistemi S5 sistemine nazaran bataryalarda üretilen ısıyı ikinci bloğa daha hızlı ileterek daha iyi bir soğutma performansı göstermiştir.

4.6.2.2. S6 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 3C deşarj hızındaki performansı

S5 ile S6 modülünün 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları ise Şekil 4.77 ve Şekil 4.78'de verilmiştir.



Şekil 4.77 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



Şekil 4.78 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

Tasarlanan S6 modülünün, S5 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 40,81°C'den 40,53°C'ye indirdiği görülmüştür. Maksimum batarya yüzey sıcaklık farkının ise her iki sistemde de yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüştür. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin üzerine çıkmış ancak maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altında kalmıştır.

Batarya modülünde 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında oluşan toplam ısı 3. Bölümde 10,74 W olarak hesaplanmış ve bataryalarda üretilen tüm ısının ısı boruları aracılığıyla ikinci bloğa iletiildiği varsayılarak [4.1] nolu denklem yardımıyla ısı borusunun buharlaştırıcı kısmının bağlı olduğu batarya modülü ve yoğuşturucu kısmının bağlı olduğu ikinci alüminyum bloğun sıcaklık değerleri farkı hesaplanarak Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7 S5 ve S6 sistemlerinin 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında oluşan maksimum ısı ve sıcaklık farkı değerleri

	S5 Sistemi	S6 Sistemi
Q_{maks} (W)	10,74	10,74
ΔT (K)	4,86	3,88

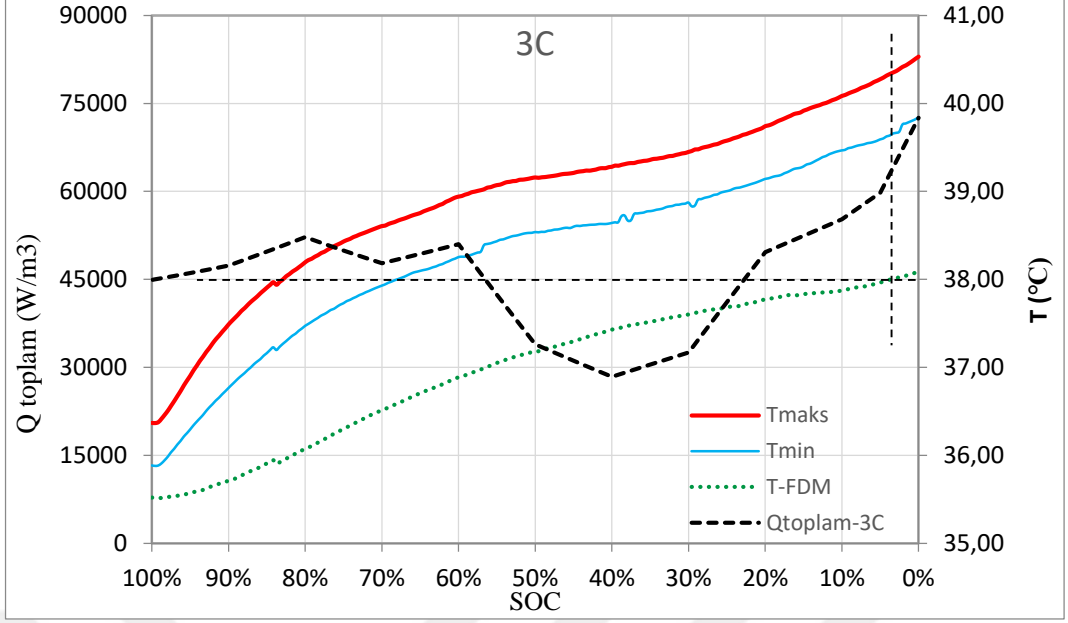
Sonuç olarak 36°C ortam sıcaklığında ve 3C deşarj hızında S6 sisteminde daha kısa ısı borusu kullanılması nedeniyle birinci alüminyum blok ve ikinci alüminyum blok

arasındaki sıcaklık farkı düşmüş ve daha kısa ısı borusuna sahip olan S6 sistemi S5 sistemine nazaran bataryalarda üretilen ıyıyı ikinci bloğa daha hızlı ileterek daha iyi bir soğutma performansı göstermiştir.

S6 sisteminde 36°C ortam sıcaklığında 3C değarj hızında elde edilen batarya maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi ise Şekil 4.79’da gösterilmiştir. S5 sistemindekine benzer bir şekilde S6 sisteminde de, başlangıçta FDM sıcaklığının batarya yüzeyinde ölçülen minimum ve maksimum sıcaklığa yakın bir değer olduğu ancak değarj işleminin başlamasıyla birlikte batarya yüzey sıcaklıklarının FDM sıcaklığına göre daha hızlı arttığı, batarya doluluk oranının azalmaya başlaması ile batarya maksimum yüzey sıcaklığı ve FDM sıcaklığı arasındaki farkın da arttığı gözlemlenmiştir.

FDM sıcaklığının erime sıcaklığı olan 38°C’ye 1C değarj işlemine göre daha hızlı, lakin S5 sisteminden daha geç ulaştığı (SOC=%4) ve bu değere ulaştığında batarya maksimum yüzey sıcaklığının 40,33°C olduğu, FDM’nin erime sıcaklık bölgesine girmesine rağmen hem FDM’nin sıcaklığının hem de batarya yüzey sıcaklığının arttığı ancak FDM’nin erimeye başlaması nedeniyle FDM’nin sıcaklık artış hızında düşme meydana geldiği gözlemlenmiştir.

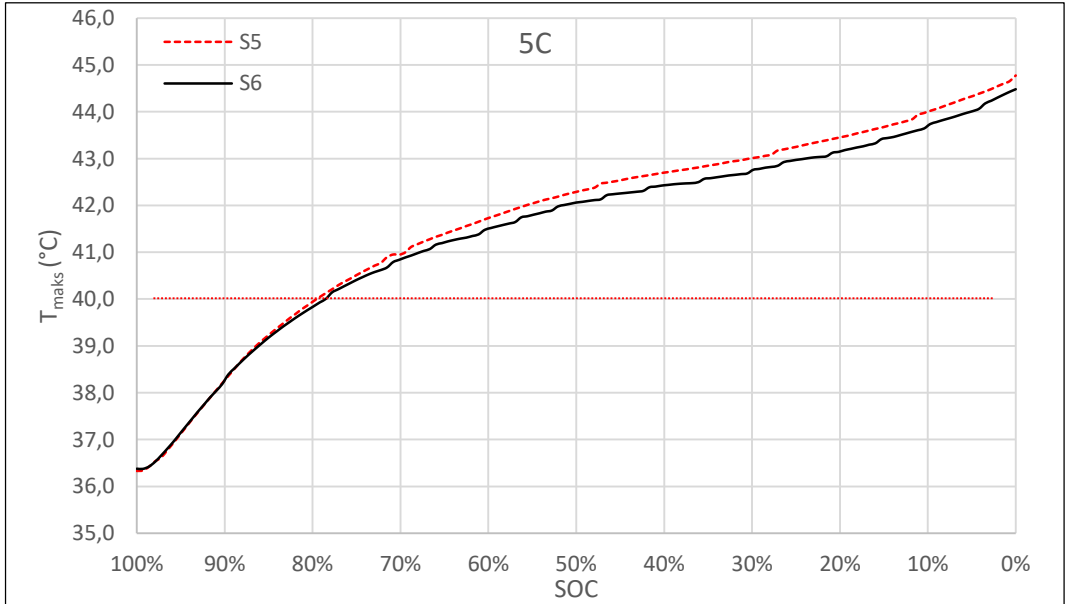
Değarj işlemi esnasında FDM’nin erime sıcaklığı bölgesine girmesine rağmen Şekil 4.79’dan da görülebileceği gibi hem batarya yüzey sıcaklığı hem de sıcaklık artış hızı artmıştır. Daha önce S5 sistemindekine benzer bir şekilde FDM’nin erimeye başladığı ve %4 batarya doluluk oranına tekabül eden noktada batarya ısı üretimi de yukarı yönlü bir seyir (SOC=%40’tan başlayarak SOC=%0’a kadar) izlemekte olduğu için FDM’nin erimesi esnasında gizli ısı çekerek sıcaklığı baskılayıcı etkisi görülememiş aksine ısı üretiminin artmasıyla birlikte hem batarya yüzeyindeki sıcaklık hem de sıcaklık artış hızı yükselmiştir. Ayrıca değarj işlemi sonunda FDM sıcaklığı maksimum 38,09°C’ye ulaşmış ancak FDM erime bölgesinin üst sınırı olan 43°C’ye ulaşamamış olup erime işlemi tamamen bitmemiş ve FDM’nin büyük bir kısmı katı halde küçük bir kısmı ise sıvı hale dönüşmüştür.



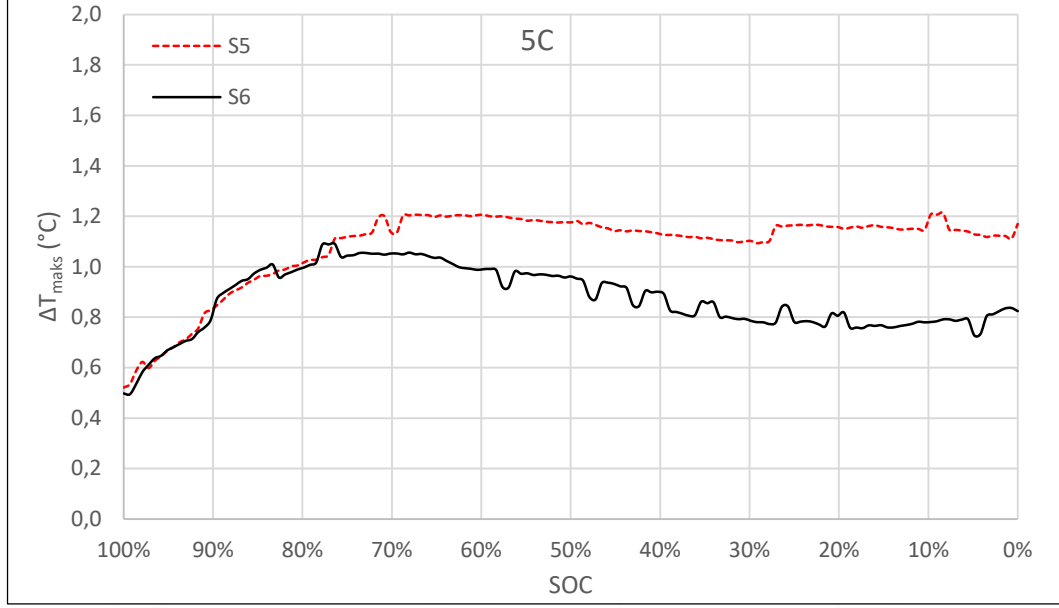
Şekil 4.79 S6 sisteminde 3C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi

4.6.2.3. S6 sisteminin 36°C ortam sıcaklığı ve 5C deşarj hızındaki performansı

Şekil 4.80 ve Şekil 4.81'de ise S5 ile S6 modülünün 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları verilmiştir.



Şekil 4.80 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



Şekil 4.81 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında S5 ve S6 sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

Tasarlanan S6 modülünün, S5 sistemine göre maksimum yüzey sıcaklığını 44,77°C'den 44,48°C'ye indirdiği, maksimum batarya yüzey sıcaklık farkının ise ilk anlarda her iki sistemde de birbirine yakın olduğu ancak batarya doluluk oranının düşmesiyle birlikte S6 sistemindeki sıcaklık farkının azaldığı gözlemlenmiştir. Her iki durumda da maksimum yüzey sıcaklıkları izin verilen çalışma sıcaklığı 40°C'nin üzerine çıkmış ancak maksimum yüzey sıcaklık farkları izin verilen 5°C'nin altında kalmıştır.

Batarya modülünde 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında oluşan toplam ısı 3. Bölümde 25,95 W olarak hesaplanmış ve bataryalarda üretilen tüm ısının ısı boruları aracılığıyla ikinci bloğa iletiildiği varsayılarak [4.1] nolu denklem yardımıyla ısı borusunun buharlaştırıcı kısmının bağlı olduğu batarya modülü ve yoğuşturucu kısmının bağlı olduğu ikinci alüminyum bloğun sıcaklık değerleri farkı hesaplanarak Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8 S5 ve S6 sistemlerinin 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında oluşan maksimum ısı ve sıcaklık farkı değerleri

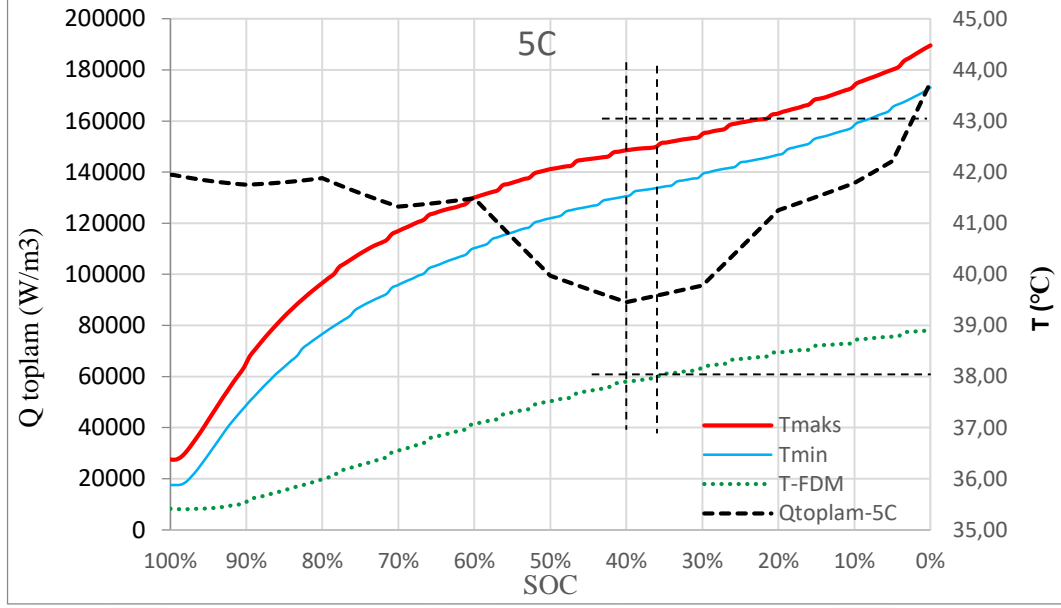
	S5 Sistemi	S6 Sistemi
Q_{maks} (W)	25,95	25,95
ΔT (K)	11,73	9,39

Sonuç olarak 36°C ortam sıcaklığında ve 5C deşarj hızında S6 sisteminde daha kısa ısı borusu kullanılması nedeniyle birinci alüminyum blok ve ikinci alüminyum blok arasındaki sıcaklık farkı düşmüş ve daha kısa ısı borusuna sahip olan S6 sistemi S5 sistemine nazaran bataryalarda üretilen ısıyı ikinci bloğa daha hızlı ileterek daha iyi bir soğutma performansı göstermiştir.

Şekil 4.82’de ise S6 sisteminde 36°C ortam sıcaklığında 5C deşarj hızında elde edilen batarya maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi verilmiştir. Başlangıçta FDM sıcaklığının batarya yüzeyinde ölçülen minimum ve maksimum sıcaklığa yakın bir değer olduğu ancak deşarj işleminin başlamasıyla birlikte batarya yüzey sıcaklıklarının FDM sıcaklığına göre daha hızlı arttığı, batarya doluluk oranının azalmaya başlaması ile batarya maksimum yüzey sıcaklığı ve FDM sıcaklığı arasındaki farkın da arttığı ve bu sıcaklık farkının 3C deşarj işlemindeki sıcaklık farkından daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

FDM sıcaklığının erime sıcaklığı olan 38°C’ye 3C deşarj işlemine göre daha hızlı ulaştığı (SOC=%35) ve bu değere ulaştığında batarya maksimum yüzey sıcaklığının 42,58C’ye ulaştığı, FDM’nin erime sıcaklık bölgesine girmesine rağmen 3C deşarj hızındaki işlemde olduğu gibi hem FDM’nin sıcaklığının hem de batarya yüzey sıcaklığının arttığı ancak FDM’nin erimeye başlaması nedeniyle FDM’nin sıcaklık artış hızında düşme meydana geldiği gözlemlenmiştir.

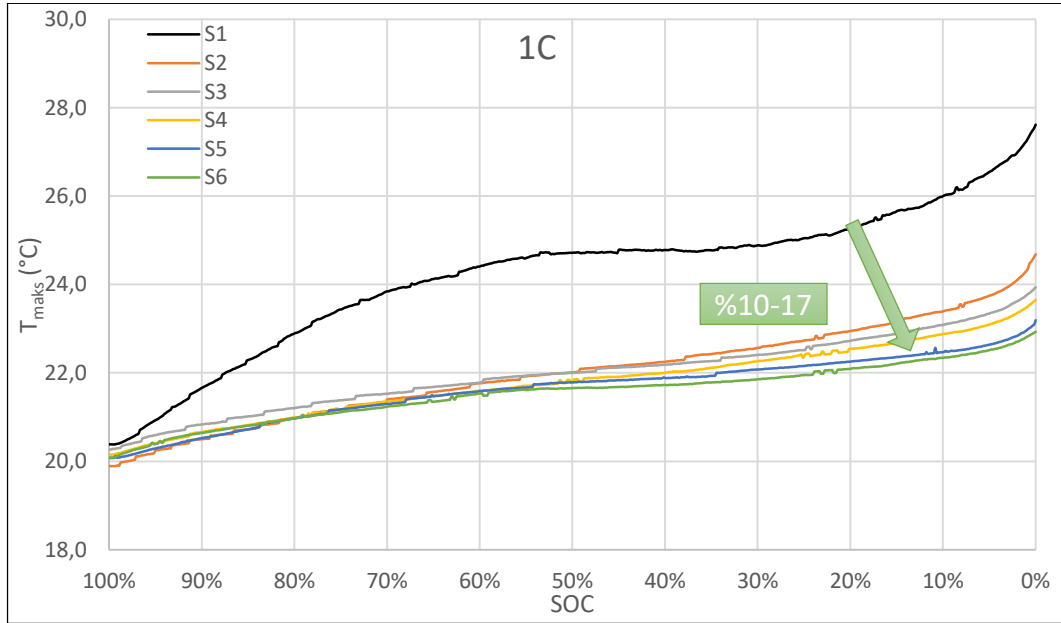
5C deşarj işlemi esnasında 3C deşarj işlemine benzer olarak FDM’nin erime sıcaklığı bölgesine girmesine rağmen Şekil 4.82’den de görülebileceği gibi batarya yüzey sıcaklığı artmış ancak sıcaklık artış hızı batarya toplam ısı üretimine bağlı olarak FDM’nin erimeye başladığı ve %35 batarya doluluk oranına tekabül eden noktadan tamamen boşalınca kadar (SOC=%0) geçen süre zarfında erimekte olan FDM’nin gizli ısı çekerek sıcaklığı baskılayıcı etkisine rağmen batarya toplam ısı üretiminin hızlı bir şekilde artması nedeniyle batarya sıcaklık artış hızı da yükseliş göstermiştir. Ayrıca deşarj işlemi sonunda FDM sıcaklığı maksimum 38,89°C’ye ulaşmış ancak FDM erime bölgesinin üst sınırı olan 43°C’ye ulaşamamış olup erime işlemi tamamen bitmemiş ve FDM’nin bir kısmı sıvı bir kısmı ise katı halde kalmış ve gizli ısının tamamı çekilemediği için FDM’nin sıcaklığı baskılayıcı etkisinden tam anlamıyla faydalanılamamıştır.



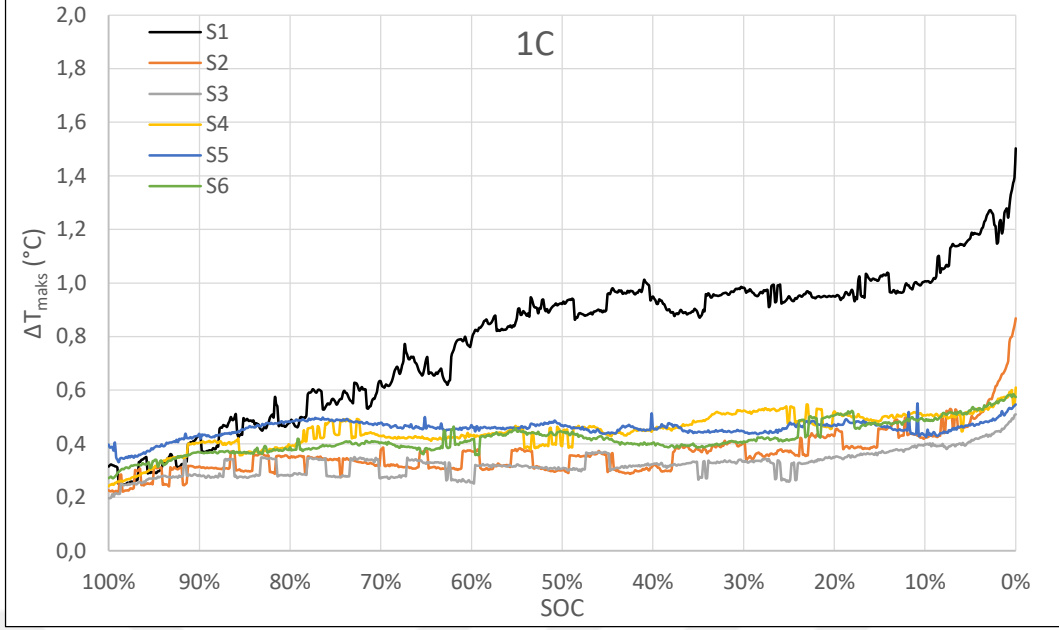
Şekil 4.82 S6 sisteminde 5C deşarj hızında 36°C ortam sıcaklığında bataryanın maksimum, minimum yüzey sıcaklıkları, FDM sıcaklığı ve batarya toplam ısı üretimi

4.7. Tüm Sistemlerin 20°C Ortam Sıcaklığındaki Soğutma Performanslarının Karşılaştırılması

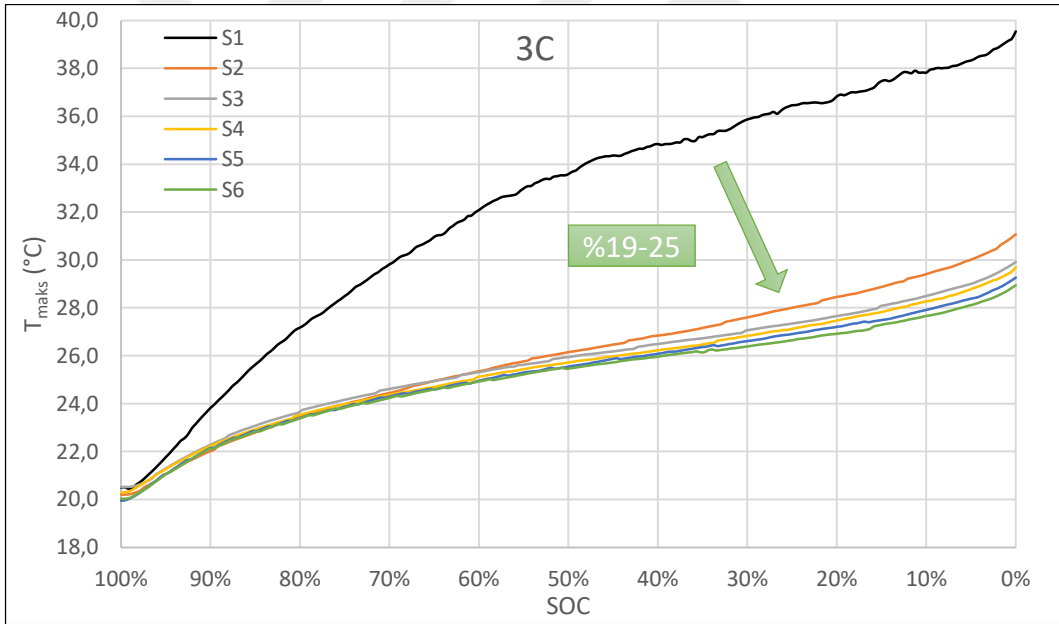
Şekil 4.83 ve Şekil 4.84'te 1C deşarj hızında, Şekil 4.85 ve Şekil 4.86'da 3C deşarj hızında ve Şekil 4.87 ve Şekil 4.88'de 5C deşarj hızında S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 modüllerinin 20°C ortam sıcaklığında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları verilmiştir.



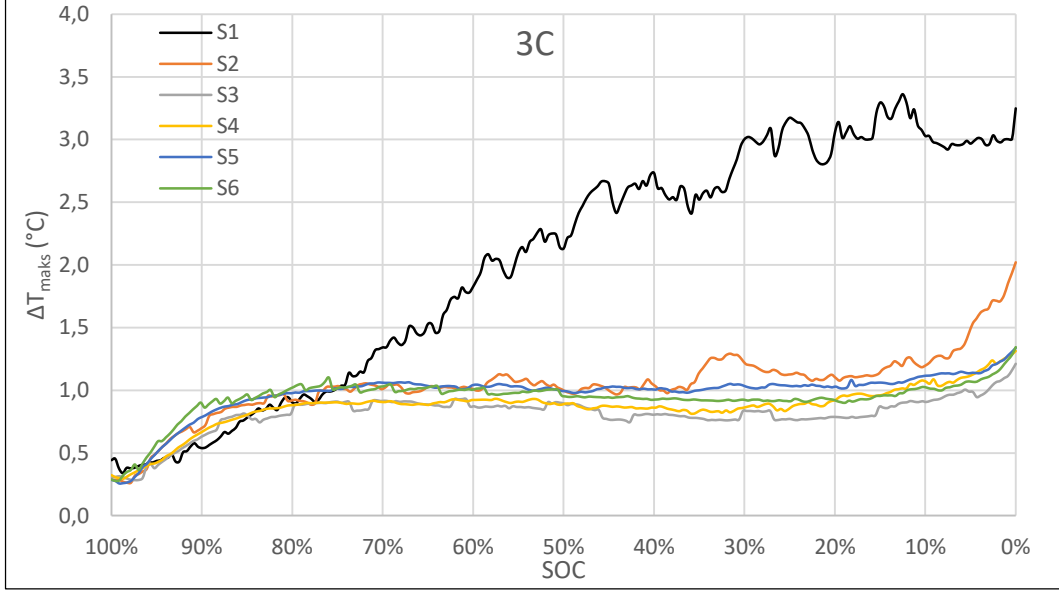
Şekil 4.83 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



Şekil 4.84 1C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

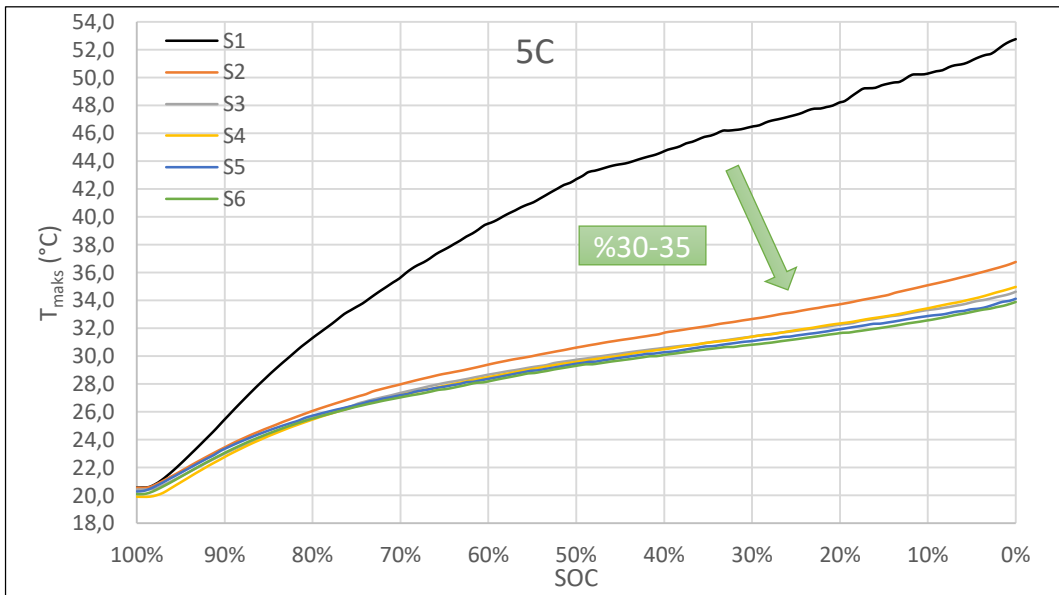


Şekil 4.85 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)

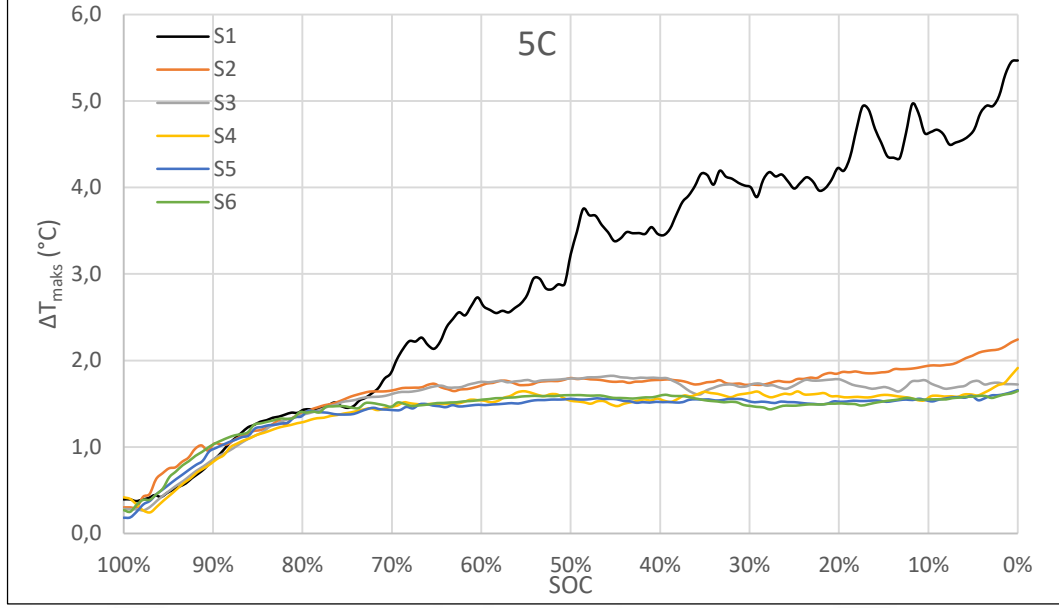


Şekil 4.86 3C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

S2, S3, S4, S5 ve S6 modüllerinin referans modül S1 sistemine göre maksimum batarya yüzey sıcaklığını, 1C deşarj hızında %10 ile %17 arasında düşürdüğü, 3C deşarj hızında %19 ile %25 arasında düşürdüğü, 5C deşarj hızında %29 ile %34 arasında düşürdüğü görülmüştür. Ayrıca tasarlanan sistemlerin referans modül S1 sistemine göre maksimum sıcaklık farkını ise 1C deşarj hızında 1°C, 3C deşarj hızında 2,2°C ve 5C deşarj hızında 3,4°C düşürdüğü tespit edilmiştir. Çizelge 4.9'da her bir sistemde görülen maksimum yüzey sıcaklık değerleri ve maksimum sıcaklık farkı değerleri listelenmiştir.



Şekil 4.87 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



Şekil 4.88 5C deşarj hızında ve 20°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

Çizelge 4.9 Her bir sistemde 20°C ortam sıcaklığında görülen maksimum yüzey sıcaklık değerleri ve maksimum sıcaklık farkı değerleri

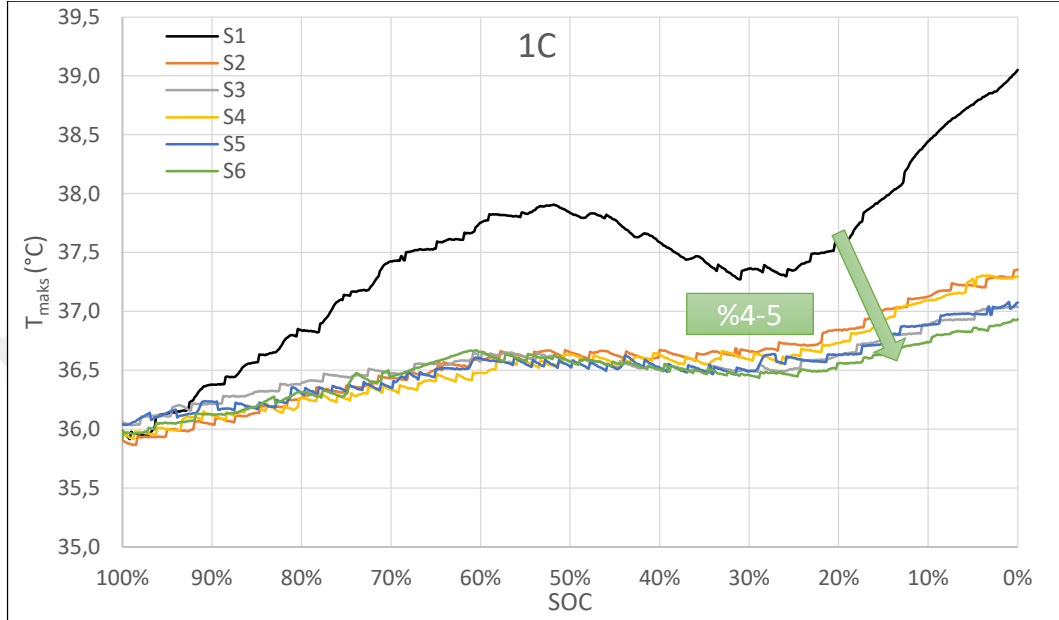
Deşarj Hızı		S1	S2	S3	S4	S5	S6
1C	T_{maks} (°C)	27,62	24,68	23,94	23,65	23,19	22,93
	ΔT_{maks} (°C)	1,50	0,87	0,51	0,61	0,55	0,58
3C	T_{maks} (°C)	38,53	31,06	29,92	29,69	29,26	28,94
	ΔT_{maks} (°C)	3,36	2,02	1,21	1,31	1,34	1,34
5C	T_{maks} (°C)	52,76	36,78	34,63	34,98	34,12	33,89
	ΔT_{maks} (°C)	5,47	2,24	1,82	1,92	1,66	1,65

4.8. Tüm Sistemlerin 36°C Ortam Sıcaklığındaki Soğutma Performanslarının Karşılaştırılması

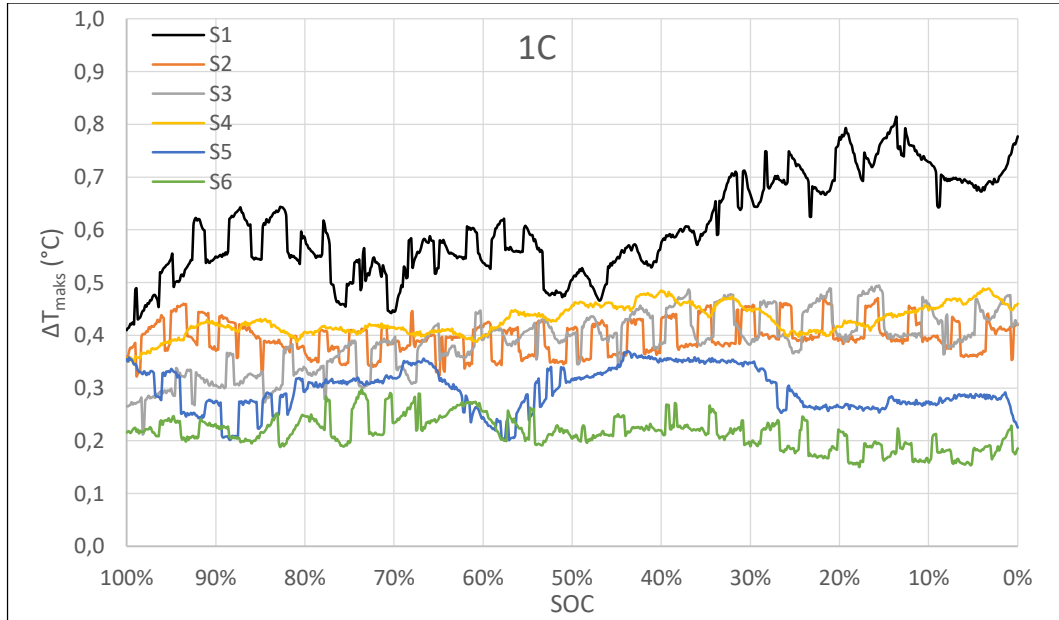
Şekil 4.89 ve Şekil 4.90'da 1C deşarj hızında, Şekil 4.91 ve Şekil 4.92'de 3C deşarj hızında ve Şekil 4.93 ve Şekil 4.94'te 5C deşarj hızında S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 modüllerinin 36°C ortam sıcaklığında elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkları verilmiştir.

S2, S3, S4, S5 ve S6 modüllerinin referans modül S1 sistemine göre maksimum batarya yüzey sıcaklığını 36°C ortam sıcaklığında yapılan testlerde, 1C deşarj hızında %4 ile %5 arasında düşürdüğü, 3C deşarj hızında %17 ile %20 arasında düşürdüğü, 5C deşarj hızında %25 ile %27 arasında düşürdüğü görülmüştür. Ayrıca tasarlanan sistemlerin

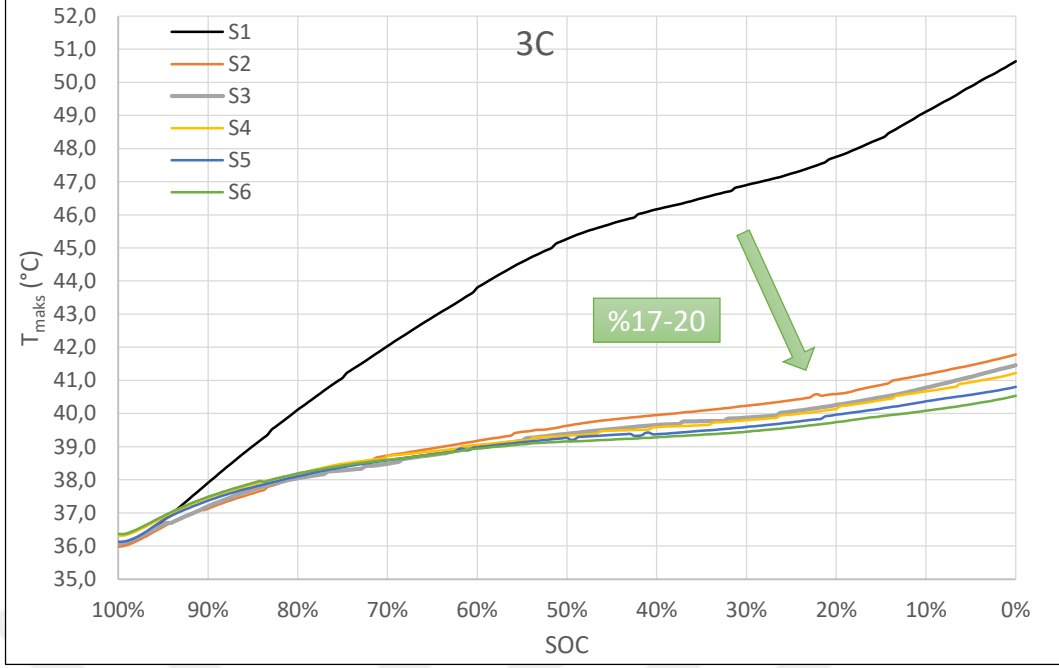
referans modül S1 sistemine göre maksimum sıcaklık farkını ise 1C deşarj hızında 0,4°C'ye, 3C deşarj hızında 0,7°C'ye ve 5C deşarj hızında 1,1°C'ye düşürdüğü tespit edilmiştir. Çizelge 4.10'da her bir sistemde görülen maksimum yüzey sıcaklık değerleri ve maksimum sıcaklık farkı değerleri listelenmiştir.



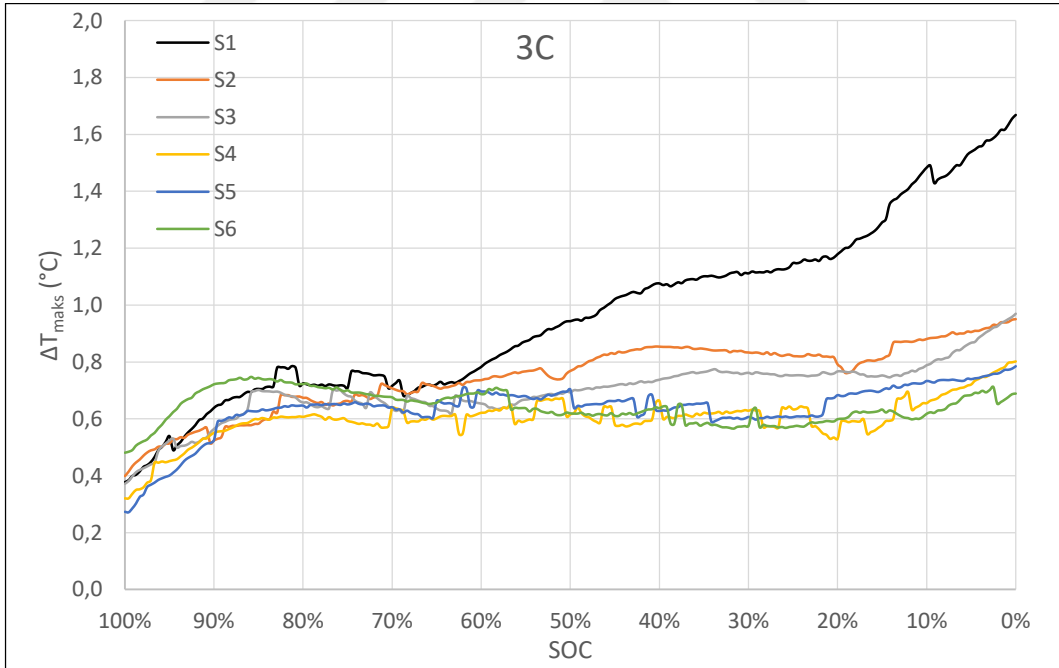
Şekil 4.89 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



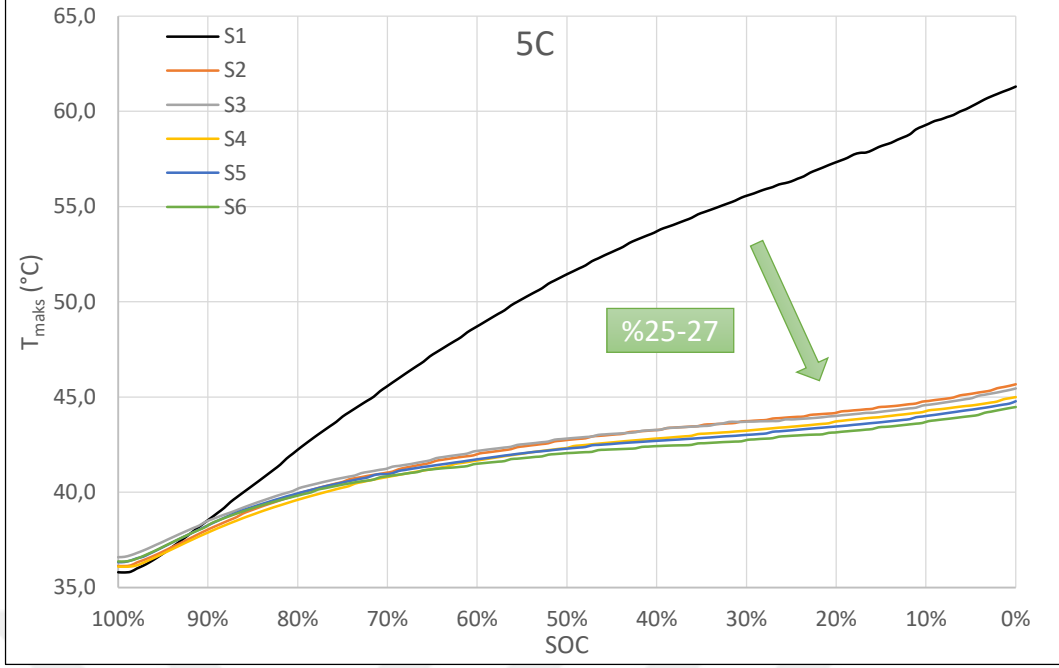
Şekil 4.90 1C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)



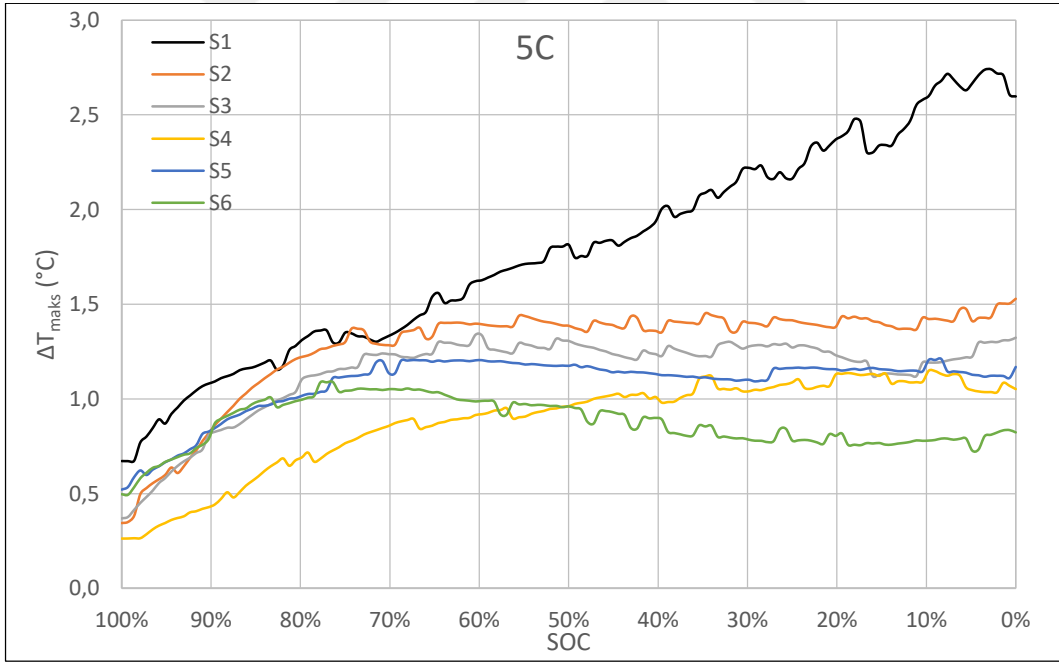
Şekil 4.91 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



Şekil 4.92 3C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)



Şekil 4.93 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklıkları, T_{maks} (°C)



Şekil 4.94 5C deşarj hızında ve 36°C ortam sıcaklığında tüm sistemlerinin maksimum yüzey sıcaklık farkları, ΔT_{maks} (°C)

Çizelge 4.10 Her bir sistemde 36°C ortam sıcaklığında görülen maksimum yüzey sıcaklık değerleri ve maksimum sıcaklık farkı değerleri

Deşarj Hızı		S1	S2	S3	S4	S5	S6
1C	T_{maks} (°C)	39,05	37,36	37,04	37,30	37,08	36,93
	ΔT_{maks} (°C)	0,80	0,47	0,49	0,49	0,37	0,30
3C	T_{maks} (°C)	50,63	41,78	41,46	41,22	40,81	40,53
	ΔT_{maks} (°C)	1,67	0,95	0,97	0,80	0,78	0,75
5C	T_{maks} (°C)	61,30	45,67	45,45	45,00	44,77	44,48
	ΔT_{maks} (°C)	2,74	1,53	1,34	1,15	1,21	1,09

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1. Sonuçlar

Lityum iyon bataryalar gerek yüksek ortam sıcaklıklarında gerekse ağır çalışma şartlarında çalışırken yüksek miktarda ısı enerjisi açığa çıkarırlar. Açığa çıkan ısı aynı zamanda batarya hücrelerinin ve batarya modülünün de sıcaklığının artmasına neden olur. Lityum iyon bataryalarda maksimum verimlilik elde edebilmek için bataryalar optimum sıcaklık aralığı olan (15°C) – (40°C) çalışma aralığında çalışmalı ve batarya modülünü oluşturan batarya hücreleri arasındaki maksimum sıcaklık farkının 5°C'yi geçmemesi gerekmektedir. Bu çalışmada bu amaçlar doğrultusunda 3 seri ve 3 paralel batarya hücresi içeren batarya modülü baz alınarak FDM, kompozit FDM, ısı boruları, fan ve kanatçıklar ile farklı tasarımlar oluşturulmuş ve oluşturulan her bir tasarım 1C, 3C ve 5C gibi farklı deşarj hızlarında ve 20°C ve 36°C olmak üzere iki farklı ortam sıcaklığında test edilmiş ve elde edilen batarya yüzey sıcaklıkları ve maksimum batarya yüzey sıcaklık farkları değerlendirilerek sistemlerin soğutma performansları incelenmiştir.

İlk sistem olarak doğal taşınımlı durum (S1) referans olarak kabul edilmiş, daha sonrasında sırasıyla FDM ve Alüminyum blok içeren sistem (S2); FDM, Alüminyum blok ve ısı boruları içeren sistem (S3); Kompozit FDM, Alüminyum blok ve ısı boruları içeren sistem (S4); Kompozit FDM, Alüminyum blok, ısı boruları ve soğutma fanı içeren sistem (S5) ve Kompozit FDM, Alüminyum blok, daha kısa ısı boruları ve soğutma fanı içeren sistem (S6) oluşturulmuştur. Ayrıca S1 nolu sistem aynı zamanda ANSYS Fluent modülünde hem UDF yazılarak oluşturulan hacimsel ısı kaynağı modeli ile hem de ANSYS Fluent programında hazır batarya modüllerinden biri olan NTGK alt modeli ile modellenmiş ve elde edilen sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

- Doğal taşınımlı referans sistemin 1C, 3C ve 5C deşarj hızlarında ve farklı ortam sıcaklıklarında deneysel olarak elde edilen maksimum yüzey sıcaklık değerleri, sistemin ANSYS Fluent programında hem UDF kullanılarak oluşturulan hacimsel ısı kaynağı modeli şeklinde hem de NTGK modeli şeklinde iki farklı model ile modellenmesiyle elde edilen sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmış, artan deşarj hızlarında batarya maksimum yüzey sıcaklığının da arttığı, deşarj işlemi boyunca deneysel veriler ile hacimsel ısı kaynağı modeli ile elde edilen sayısal verilerin

birbirlerine oldukça yakın ve uyumlu bir seyir izlediği, hacimsel ısı kaynağı modeli ile elde edilen sonuçların NTGK modeli ile elde edilen sonuçlara göre deneysel verilere daha yakın olduğu görülmüştür. Diğer bir yandan NTGK modelinde ortam sıcaklığının artması ile birlikte deneysel veriler ile sayısal veriler arasındaki farkın da açıldığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak batarya iç direncinin batarya doluluk oranına ve batarya sıcaklığına göre değişimi ve batarya entropi katsayısının batarya doluluk oranına göre değişimi doğru bir şekilde tespit edildiği takdirde önerilen hacimsel ısı kaynağı modelinin gerçeğe oldukça yakın sonuçlar vereceği belirlenmiştir.

- Aynı deşarj hızında daha yüksek ortam sıcaklığında bataryada üretilen toplam ısının daha düşük ortam sıcaklığında üretilen toplam ısıya göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum artan ortam sıcaklığında batarya iç direncinin azalması olgusuyla açıklanabilir. Artan ortam sıcaklığı batarya iç direncini azaltmakta bu da bataryada üretilen joule ısısının azalmasına ve dolayısıyla üretilen toplam ısının azalmasına neden olmaktadır.
- Artan deşarj hızlarında joule ısının deşarj akımının karesi ile doğru orantılı olarak artması nedeniyle entropik ısıya göre daha baskın olduğu, düşük deşarj hızlarında ise toplam ısı üretiminde entropik ısının daha belirleyici olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca özellikle düşük deşarj hızlarında sıcaklık dağılımına daha büyük etkisi olan entropik ısının belirli batarya doluluk oranlarında negatif olması bataryanın sıcaklık artışında baskılayıcı etki oluşturduğu gözlemlenmiştir.
- 20°C ortam sıcaklığında yapılan testlerde FDM hiçbir deşarj hızında ve hiçbir tasarımda erime sıcaklığına ulaşmamış, katı halde kalmış ve FDM üzerinden ısı transferi ise sadece iletim şeklinde gerçekleşmiştir. FDM 20°C ortam sıcaklığında yapılan tüm testlerde erime sıcaklığına ulaşmadığı için FDM'nin gizli ısı çekerek erime sıcaklığında sistem sıcaklığını baskılayıcı etkisi görülememiş sadece duyulur ısı çekerek genel anlamda sistem sıcaklığını FDM kullanılmayan duruma göre düşürdüğü tespit edilmiştir. Genel anlamda FDM kullanmak batarya modülü maksimum yüzey sıcaklığını ve maksimum yüzey sıcaklık farkını düşürerek soğutma performansına olumlu katkıda bulunmuştur.

- 36°C ortam sıcaklığında yapılan testlerde ise FDM, 1C deşarj hızında erime sıcaklığına ulaşamayıp katı halde kalmış ve FDM üzerinden ısı transferi ise sadece iletim şeklinde gerçekleşmiştir. 1C deşarj hızında FDM erime sıcaklığına ulaşmadığı için FDM'nin gizli ısı çekerek erime sıcaklığında sistem sıcaklığını baskılayıcı etkisi görülememiş sadece duyulur ısı çekerek genel anlamda sistem sıcaklığını FDM kullanılmayan duruma göre düşürdüğü tespit edilmiştir. Diğer bir yandan 36°C ortam sıcaklığında yapılan 3C ve 5C deşarj hızlarındaki testlerde ise FDM kısmen erimiştir. Deşarj işlemi boyunca FDM erirken hem FDM'nin sıcaklığının hem de batarya yüzey sıcaklığının arttığı gözlemlenmiş ancak erime işlemi esnasında FDM'nin sıcaklık artışının azaldığı batarya yüzey sıcaklığı artışının ise batarya da üretilen toplam ısının o anki değerine göre değişmekte olduğu görülmüştür. FDM erimeye başladığında eğer bataryada üretilen toplam ısı yukarı yönlü bir seyir izliyorsa hem batarya yüzey sıcaklığının hem de sıcaklık artış hızının arttığı, eğer bataryada üretilen toplam ısı sabit yahut aşağı yönlü bir seyir izliyorsa batarya yüzey sıcaklığının arttığı ancak sıcaklık artış hızının azaldığı gözlemlenmiştir. Diğer bir ifade ile FDM'nin erimesi esnasında sıcaklığı baskılayıcı etkisi sadece batarya toplam ısı üretiminin sabit ya da aşağı yönlü seyir izlediği durumlarda sıcaklık azalışı olarak değil sadece sıcaklık artış hızında düşüş olarak görülmüştür.
- Seçilen FDM organik FDM olduğu için erime işlemi tekil bir sıcaklık değeri yerine bölgesel olarak gerçekleşmiş ve erime işlemi sırasında FDM sıcaklığı artmıştır. FDM'nin erimesi esnasında sıcaklığının artması aynı zamanda batarya hücrelerindeki maksimum yüzey sıcaklığının da artmasına neden olmuştur. Dolayısıyla FDM seçimi yapılırken FDM'nin erime sıcaklığının bölgesel değil de noktasal olacak şekilde seçilmesi, maksimum yüzey sıcaklığının baskılayıcı etkisini görebilmek adına büyük önem arz etmektedir.
- Sistemlerde kullanılan FDM sızıntı problemi nedeniyle tek başına kullanılmamış, erimesi durumunda sızıntıyı engelleyecek şekilde alüminyum blok içindeki haznelere yerleştirilmiş olup aslında bir nevi kompozit malzeme oluşturulmuştur. Dolayısıyla bakır file ilave edilerek oluşturulan sistemde ve bakır file kullanılmadan oluşturulan sistemde benzer maksimum yüzey sıcaklıkları ve maksimum yüzey sıcaklık farkı değerleri görülmüş ve sonuç olarak her iki sistemde benzer soğutma performansı sergilemişlerdir. Sonuç olarak sisteme ilave

bakır file eklenerek ikinci bir kompozit malzemeli sistem oluşturulması sistemin soğutma performansında çok ciddi bir iyileştirme sağlamamıştır.

- Sisteme ısı borusu eklenmesi durumunda ilk alüminyum blokta oluşan ısının ikinci alüminyum bloğa aktarılması sonucu batarya maksimum yüzey sıcaklığı ve yüzey sıcaklık farkının gözle görülür derecede düştüğü tespit edilmiştir. Isı borusunun alüminyum bloklara temas eden yüzey büyüklüğünün çok büyük olmamasına rağmen özellikle yüksek deşarj hızlarında sıcaklığı yaklaşık %5 kadar düşürdüğü gözlemlenmiştir. Isı borularının bataryadaki maksimum yüzey sıcaklığı farkında gözle görülür bir iyileştirme sağladığı bu iyileştirmenin özellikle düşük batarya doluluk oranlarında daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak sisteme ısı borusu eklenmesi sistemin soğutma performansına olumlu katkıda bulunmuş sistem çalıştırılırken herhangi bir dış enerji ihtiyacı olmadığı için de ilave bir enerji kaybına neden olmamıştır.
- Bu çalışmada aynı zamanda ısı borusu uzunluğunun sistemin soğutma performansına olan etkisi incelenmiş olup bu kapsamda uzunluğu 15 cm ve 17 cm olan ısı boruları ile oluşturulan sistemlerde elde edilen maksimum yüzey sıcaklık değerleri ve maksimum yüzey sıcaklık farkları karşılaştırılmış daha kısa ısı borusuna sahip sistemin soğutma performansının diğer sisteme nazaran daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum herhangi bir ortamdan geçen ısı transfer hızının geçtiği ortamın uzunluğunun tersi ile orantılı olması ile açıklanabilir. Dolayısıyla daha kısa ısı borusuna sahip sistem ısıyı daha hızlı bir şekilde dış ortama ve FDM içeren ikinci alüminyum bloğa iletmiş ve batarya maksimum yüzey sıcaklığının daha etkin bir şekilde düşürülmesi ile daha iyi bir soğutma performansı elde edilmiştir.
- Çalışmada ayrıca fan kullanılarak oluşturulan aktif soğutma sisteminin soğutma performansı da incelenmiştir. Fan tarafından çekilen güç yaklaşık olarak 1,77 Watt'tır. Batarya modülü 3S3P şeklinde 9 bataryadan oluşmakta ve toplam gücü ise 1C deşarj hızında 66,6 Watt iken 5C deşarj hızında 333 Watt'tır. Fan kullanılarak oluşturulan sistemin; 1C deşarj hızında batarya modülünün maksimum yüzey sıcaklığını yaklaşık olarak %2 oranında düşürebildiği, bu sıcaklık düşüşünü elde etmek için batarya modülü gücünün yaklaşık %2,7 sinin harcandığı, 5C deşarj hızında ise batarya modülünün maksimum yüzey sıcaklığını

yaklaşık olarak %3 oranında düşürebildiği, bu sıcaklık düşüşünü elde etmek için batarya modülü gücünün yaklaşık %0,9 unun harcandığı gözlemlenmiştir. Bu kapsamda düşük deşarj hızlarında fan kullanımının verim açısından çok uygun olmadığı özellikle artan deşarj hızlarında fan kullanımının daha verimli olduğu ve sistemin soğutma performansını iyileştirdiği görülmüştür.

5.2. Önerilen Çalışmalar

- Bu çalışma kapsamında sadece tekil deşarj testleri yapılmış olup ilerleyen çalışmalarda ardışık şarj/deşarj testleri yapılarak bataryaların soğutma performansı ayrıca incelenebilir. Özellikle FDM kullanılan sistemlerde ardışık şarj/deşarj işleminde önceki çevrimlerden gelen ısı birikmesinin sonraki çevrimlere olan termal etkisi incelenebilir.
- Ticari olarak çok fazla sayıda batarya markası ve çok değişik performansta bataryalar mevcuttur. Bazı bataryalar yüksek ve ani güç çekişlerine uygunken bazı bataryalarda uzun süre güç çekişlerine uygundur. İlerleyen çalışmalarda farklı markalardaki farklı performanslardaki bataryalar test edilerek batarya iç dirençleri ve batarya ısı üretimleri karşılaştırılabilir.
- Bu çalışmada sayısal modelleme sadece doğal taşınımlı sisteme (S1) uygulanmış olup ilerleyen çalışmalarda FDM içeren model sayısal olarak hesaplanıp deneysel veriler ile karşılaştırılabilir. Ayrıca sayısal modelleme aracılığıyla FDM' nin faz değiştirme durumu belirlenerek deşarj işlemi sonunda ne kadarlık bir kısmın katı ne kadarlık bir kısmın ise sıvı olarak kaldığı belirlenebilir.
- Sayısal çalışmalarda batarya ısı iletim katsayısı ve batarya özgül ısısı değerleri literatürdeki benzer çalışmalardan alınmış olup deneysel verilere daha yakın sonuçlar elde edebilmek için bu değerler ölçülerek sayısal modellemede kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Abhat, A.** (1983). Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. *Solar energy*, 30(4), 313-332.
- Al Hallaj, S., Maleki, H., Hong, J. S. ve Selman, J. R.** (1999). Thermal modeling and design considerations of lithium-ion batteries. *Journal of power sources*, 83(1-2), 1-8.
- An, Z., Chen, X., Zhao, L. ve Gao, Z.** (2019). Numerical investigation on integrated thermal management for a lithium-ion battery module with a composite phase change material and liquid cooling. *Applied Thermal Engineering*, 163, 114345.
- Behi, H., Karimi, D., Behi, M., Ghanbarpour, M., Jaguemont, J., Sokkeh, M. A., ... ve Van Mierlo, J.** (2020). A new concept of thermal management system in Li-ion battery using air cooling and heat pipe for electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 174, 115280.
- Bai, F., Chen, M., Song, W., Feng, Z., Li, Y. ve Ding, Y.** (2017). Thermal management performances of PCM/water cooling-plate using for lithium-ion battery module based on non-uniform internal heat source. *Applied Thermal Engineering*, 126, 17-27.
- Bai, F., Chen, M., Song, W., Yu, Q., Li, Y., Feng, Z. ve 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.
- Bandhauer, T. M., Garimella, S. Ve Fuller, T. F.** (2011). A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries. *Journal of the electrochemical society*, 158(3), R1.
- Barai, A., Uddin, K., Widanage, W. D., McGordon, A. ve Jennings, P.** (2018). A study of the influence of measurement timescale on internal resistance characterisation methodologies for lithium-ion cells. *Scientific reports*, 8(1), 21.
- Basu, S., Hariharan, K. S., Kolake, S. M., Song, T., Sohn, D. K. ve Yeo, T.** (2016). Coupled electrochemical thermal modelling of a novel Li-ion battery pack thermal management system. *Applied Energy*, 181, 1-13.
- Belov, D., Yang, M. H.** (2008). Failure mechanism of Li-ion battery at overcharge conditions. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 12, 885-894.
- Bernardi, D., Pawlikowski, E. ve Newman, J.** (1985). A general energy balance for battery systems. *Journal of the electrochemical society*, 132(1), 5.
- Bialoń, T., Niestrój, R., Skarka, W. ve Korski, W.** (2023). HPPC Test Methodology Using LFP Battery Cell Identification Tests as an Example. *Energies*, 16(17), 6239.
- Chen, K.** (2013). *Heat Generation Measurements of Prismatic Lithium Ion Batteries* (Master's thesis, University of Waterloo).
- Chen, Y., Evans, J. W.** (1993). Heat transfer phenomena in lithium/polymer-electrolyte batteries for electric vehicle application. *Journal of the Electrochemical Society*, 140(7), 1833.
- Choi, K. W., Yao, N. P.** (1979). Heat Transfer in Lead-Acid Batteries Designed for Electric-Vehicle Propulsion Application. *Journal of the Electrochemical Society*, 126(8), 1321.
- Deng, Y., Feng, C., Jiaqiang, E., Zhu, H., Chen, J., Wen, M. ve 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, 10-29.

- Etacheri, V., Marom, R., Elazari, R., Salitra, G. ve Aurbach, D.** (2011). Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: a review. *Energy & Environmental Science*, 4(9), 3243-3262.
- Faghri, A.** (1995). Heat Pipe Science and Technology, *Taylor & Francis*. 32-35.
- Fan, L., Khodadadi, J. M. ve Pesaran, A.A.** (2013). A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 238, 301-312.
- Finden, E.** (2012). *A homogenized thermal model for lithium ion batteries* (Master's thesis, Norwegian University of Life Sciences, Ås).
- Fleischer, A. S.** (2015). Thermal energy storage using phase change materials: fundamentals and applications. *Springer*, 1-5,
- Forgez, C., Do, D. V., Friedrich, G., Morcrette, M., & Delacourt, C.** (2010). Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄/graphite lithium-ion battery. *Journal of power sources*, 195(9), 2961-2968.
- Gao, H., Chen, M., Hong, J., Song, Y. ve Yan, Y.** (2021). Investigation on battery thermal management based on phase change energy storage technology. *Heat and Mass Transfer*, 1-14.
- Ghanbarpourgeravi, M.** (2017). Investigation of Thermal Performance of Cylindrical Heatpipes Operated with Nanofluids (Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology).
- Gou, J., Liu, W.** (2019a). Feasibility study on a novel 3D vapor chamber used for Li-ion battery thermal management system of electric vehicle. *Applied Thermal Engineering*, 152, 362-369.
- Gou, J., Liu, W. ve Luo, Y.** (2019b). The thermal performance of a novel internal cooling method for the electric vehicle battery: An experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 161, 114102.
- Greco, A., Jiang, X. ve Cao, D.** (2015). An investigation of lithium-ion battery thermal management using paraffin/porous-graphite-matrix composite, *J. Power Sources*, 278, 50–68.
- Han, U., Choi, H., Lee, H., & Lee, H.** (2023). Inverse Heat Transfer Analysis Method to Determine the Entropic Coefficient of Reversible Heat in Lithium-Ion Battery. *International Journal of Energy Research*, 2023.
- Haghjoo, Y. ve Khaburi, D. A.** (2022, February). Modeling, simulation, and parameters identification of a lithium-ion battery used in electric vehicles. In *2022 9th Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG)* (pp. 1-7). IEEE.
- Heubner, C., Schneider, M., Lämmel, C. ve Michaelis, A.** (2015). Local heat generation in a single stack lithium ion battery cell. *Electrochimica Acta*, 186, 404-412.
- Hosseinzadeh, E., Barai, A., Marco, J. ve Jennings, P. A.** (2017, March). A comparative study on different cooling strategies for lithium-ion battery cells. In *The European battery, hybrid and fuel cell electric vehicle congress (EEVC 2017) proceedings* (pp. 1-9).
- Huang, Q., Li, X., Zhang, G., Zhang, J., He, F. ve Li, Y.** (2018). Experimental investigation of the thermal performance of heat pipe assisted phase change material for battery thermal management system. *Applied thermal engineering*, 141, 1092-1100.
- Huang, K., Wang, Y. ve Juqiang, F. E. N. G.** (2020, December). Research on equivalent circuit Model of Lithium-ion battery for electric vehicles. In *2020 3rd World*

- Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM)* (pp. 492-496). IEEE.
- Huo, Y., 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.
- Huria, T.** (2012). Rechargeable lithium battery energy storage systems for vehicular applications.
- Inui, Y., Kobayashi, Y., Watanabe, Y., Watase, Y. ve Kitamura, Y.** (2007). Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries. *Energy Conversion and Management*, 48(7), 2103-2109.
- Jarrett, A., Kim, I.Y.** (2011). Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance, *J. Power Sources*. 196, 10359–10368.
- Jeon, D. H. ve Baek, S. M.** (2011). Thermal modeling of cylindrical lithium ion battery during discharge cycle. *Energy Conversion and Management*, 52(8-9), 2973-2981.
- Jiang, G., Huang, J., Liu, M. ve Cao, M.** (2017). Experiment and simulation of thermal management for a tube-shell Li-ion battery pack with composite phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 120, 1-9.
- Jiang, Z. Y. ve Qu, Z. G.** (2019). Lithium-ion battery thermal management using heat pipe and phase change material during discharge-charge cycle: A comprehensive numerical study. *Applied Energy*, 242, 378-392.
- Jilte, R. D., Kumar, R., Ahmadi, M. H. ve Chen, L.** (2019). Battery thermal management system employing phase change material with cell-to-cell air cooling. *Applied Thermal Engineering*, 161, 114199.
- Jouhara, H., Khordehgah, N., Serey, N., Almahmoud, S., Lester, S. P., Machen, D. ve Wrobel, L.** (2019). Applications and thermal management of rechargeable batteries for industrial applications. *Energy*, 170, 849-861.
- Karimi, G., Li, X.** (2013). Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *International Journal of Energy Research*, 37(1), 13-24.
- Kim, G. H., Smith, K., Lee, K. J., Santhanagopalan, S. ve 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.
- Lei, S., Shi, Y. ve Chen, G.** (2020). A lithium-ion battery-thermal-management design based on phase-change-material thermal storage and spray cooling. *Applied thermal engineering*, 168, 114792.
- Li, G. ve Li, S.** (2015). Physics-based CFD simulation of lithium-ion battery under the FUDS driving cycle. *ECS Transactions*, 64(33), 1.
- Li, Z., Shi, X., Shi, M., Wei, C., Di, F. ve Sun, H.** (2020, May). Investigation on the impact of the HPPC Profile on the battery ECM parameters' offline identification. In *2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES)* (pp. 753-757). IEEE.
- Lin, C., Wang, F., Fan, B., Ren, S., Zhang, Y., Han, L. ve Xu, S.** (2017). Comparative study on the heat generation behavior of lithium-ion batteries with different cathode materials using accelerating rate calorimetry. *Energy Procedia*, 142, 3369-3374.
- Linden, D.** (2001). Handbook of batteries, **Reddy, T. B.**, (Ed.), McGraw Hill, New York.
- Ling, Z., Wang, F., Fang, X., Gao, X. ve Zhang, Z.** (2015). A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling. *Applied energy*, 148, 403-409.
- Liu, G., Ouyang, M., Lu, L., Li, J. ve Han, X.** (2014). Analysis of the heat generation of lithium-ion battery during charging and discharging considering different influencing factors. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 116, 1001-1010.

- Mahamud, R., Park, C.** (2011). Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity. *Journal of Power Sources*, 196(13), 5685-5696.
- Maleki, H., Howard, J. N.** (2006). Effects of overdischarge on performance and thermal stability of a Li-ion cell. *Journal of power sources*, 160(2), 1395-1402.
- Mehrabi-Kermani, M., Houshfar, E. ve Ashjaee, M.** (2019). A novel hybrid thermal management for Li-ion batteries using phase change materials embedded in copper foams combined with forced-air convection. *International Journal of Thermal Sciences*, 141, 47-61.
- Motloch, C. G., Christophersen, J. P., Belt, J. R., Wright, R. B., Hunt, G. L., Sutula, R. A., ... ve Miller, T. J.** (2002). High-power battery testing procedures and analytical methodologies for HEV's. *SAE Transactions*, 797-802.
- Onda, K., Kameyama, H., Hanamoto, T. ve Ito, K.** (2003). Experimental study on heat generation behavior of small lithium-ion secondary batteries. *Journal of the Electrochemical Society*, 150(3), A285.
- Paccha-Herrera, E., Calderón-Muñoz, W. R., Orchard, M., Jaramillo, F. ve Medjaher, K.** (2020). Thermal modeling approaches for a lithium-ion battery—a comparative study with experimental validation. *Batteries*, 6(3), 40.
- Park, C., Jaura, A. K.** (2003). *Dynamic thermal model of li-ion battery for predictive behavior in hybrid and fuel cell vehicles* (No. 2003-01-2286). SAE Technical Paper.
- Patel, J. R., Rathod, M. K.** (2020). Recent developments in the passive and hybrid thermal management techniques of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 480, 228820.
- Pesaran, A. A.** (2001). Battery thermal management in EV and HEVs: issues and solutions. *Battery Man*, 43(5), 34-49.
- Pesaran, A. A.** (2002). Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *Journal of power sources*, 110(2), 377-382.
- Putra, N., Sandi, A. F., Ariantara, B., Abdullah, N. ve Mahlia, T. M. I.** (2020). Performance of beeswax phase change material (PCM) and heat pipe as passive battery cooling system for electric vehicles. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, 100655.
- Qu, J., Ke, Z., Zuo, A. ve Rao, Z.** (2019). Experimental investigation on thermal performance of phase change material coupled with three-dimensional oscillating heat pipe (PCM/3D-OHP) for thermal management application. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 773-782.
- Qin, P., Liao, M., Zhang, D., Liu, Y., Sun, J. ve Wang, Q.** (2019). Experimental and numerical study on a novel hybrid battery thermal management system integrated forced-air convection and phase change material. *Energy Conversion and Management*, 195, 1371-1381.
- Ramadass, P. H. B. W. R. P. B., Haran, B., White, R. ve Popov, B. N.** (2002). Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures: Part I. Cycling performance. *Journal of power sources*, 112(2), 606-613.
- Ratnakumar, B. V., Smart, M. C., Whitcanack, L. D. ve Ewell, R. C.** (2006). The impedance characteristics of Mars Exploration Rover Li-ion batteries. *Journal of power sources*, 159(2), 1428-1439.
- Rao, Z., Qian, Z., Kuang, Y. ve Li, Y.** (2017). Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface. *Applied Thermal Engineering*, 123, 1514-1522.

- Rao, Z., Wang, Q. ve Huang, C.** (2016). Investigation of the thermal performance of phase change material/mini-channel coupled battery thermal management system. *Applied energy*, 164, 659-669.
- Sabbah, R., Kizilel, R., Selman, J. R. ve Al-Hallaj, S.** (2008). Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution. *Journal of power sources*, 182(2), 630-638.
- Schweiger, H. G., Obeidi, O., Komesker, O., Raschke, A., Schiemann, M., Zehner, C., ... ve Birke, P.** (2010). Comparison of several methods for determining the internal resistance of lithium ion cells. *Sensors*, 10(6), 5604-5625.
- Seyed Ehsan, S.** (2015). Modeling of lithium-ion battery performance and thermal behavior in electrified vehicles.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R. ve Buddhi, D.** (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2), 318-345.
- Song, L., Zhang, H. ve Yang, C.** (2019). Thermal analysis of conjugated cooling configurations using phase change material and liquid cooling techniques for a battery module. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 133, 827-841.
- Tiari, S., Qiu, S. ve Mahdavi, M.** (2016). Discharging process of a finned heat pipe–assisted thermal energy storage system with high temperature phase change material. *Energy Conversion and Management*, 118, 426-437.
- Thanagasundram, S., Arunachala, R., Makinejad, K., Teutsch, T. ve Jossen, A.** (2012, November). A cell level model for battery simulation. In *European Electric Vehicle Congress* (pp. 1-13).
- Thomas, K. E., Newman, J.** (2003). Thermal modeling of porous insertion electrodes. *Journal of the Electrochemical Society*, 150(2), A176.
- Torun E., Buyruk E.** (2023) Elektrikli araçlarda kullanılan pasif, aktif ve hibrit batarya soğutma sistemlerine ait bir çalışma. 3. *Rumeli Sürdürülebilir Çevre için Enerji ve Tasarım Sempozyumu*, 2-3 Şubat, 1-6, İstanbul.
- Tran, M. K., Mathew, M., Janhunen, S., Panchal, S., Raahemifar, K., Fraser, R. ve Fowler, M.** (2021). A comprehensive equivalent circuit model for lithium-ion batteries, incorporating the effects of state of health, state of charge, and temperature on model parameters. *Journal of Energy Storage*, 43, 103252.
- Trinuruk, P., Onnuam, W., Senanuch, N., Sawatdeejui, C., Jenyongsak, P. ve Wongwises, S.** (2022). Experimental and Numerical Studies on the Effect of Lithium-Ion Batteries' Shape and Chemistry on Heat Generation. *Energies*, 16(1), 264.
- Uddin, K., Picarelli, A., Lyness, C., Taylor, N. v Marco, J.** (2014). An acausal Li-ion battery pack model for automotive applications. *Energies*, 7(9), 5675-5700.
- Url-1** <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>>, alındığı tarih: 05.11.2022.
- Url-2** <<https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58145.pdf>>, alındığı tarih: 20.12.2022
- Url-3** <<https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>>, alındığı tarih: 03.02.2024
- Url-4** <<https://cfdflowengineering.com/battery-cooling-techniques-in-electric-vehicle/>>, alındığı tarih: 27.03.2024
- Vanaclocha Hervas, C.** (2021). *Comparative study of three electrochemical cell models for the CFD simulation of a battery module* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).

- Wang, Q., Rao, Z., Huo, Y. ve Wang, S.** (2016). Thermal performance of phase change material/oscillating heat pipe-based battery thermal management system. *International Journal of Thermal Sciences*, 102, 9-16.
- Wikner, E.** (2017). Lithium ion battery aging: Battery lifetime testing and physics-based modeling for electric vehicle applications. *Chalmers Tekniska Hogskola* (Sweden), 5-6.
- Wilke, S., Schweitzer, B., Khateeb, S., & Al-Hallaj, S.** (2017). Preventing thermal runaway propagation in lithium ion battery packs using a phase change composite material: An experimental study. *Journal of Power Sources*, 340, 51-59.
- Wu, W., Wang, S., Wu, W., Chen, K., Hong, S. ve Lai, Y.** (2019). A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. *Energy conversion and management*, 182, 262-281.
- Wu, W., Yang, X., Zhang, G., Chen, K. ve Wang, S.** (2017a). 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.
- Wu, W., Yang, X., Zhang, G., Ke, X., Wang, Z., Situ, W., Li, X. ve Zhang, J.** (2016). An experimental study of thermal management system using copper mesh-enhanced composite phase change materials for power battery pack. *Energy*, 113, 909-916.
- Wu, M. S., Wang, Y. Y. ve Wan, C. C.** (1998). Thermal behaviour of nickel/metal hydride batteries during charge and discharge. *Journal of power sources*, 74(2), 202-210.
- Wu, X., Lv, S. ve Chen, J.** (2017b). Determination of the optimum heat transfer coefficient and temperature rise analysis for a lithium-ion battery under the conditions of Harbin city bus driving cycles. *Energies*, 10(11), 1723.
- Xie, Y., Li, W., Yang, Y. ve Feng, F.** (2018). A novel resistance-based thermal model for lithium-ion batteries. *International Journal of Energy Research*, 42(14), 4481-4498.
- Xie, Y., Tang, J., Shi, S., Xing, Y., Wu, H., Hu, Z. ve Wen, D.** (2017). Experimental and numerical investigation on integrated thermal management for lithium-ion battery pack with composite phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 154, 562-575.
- Yamada, T., Koshiyama, T., Yoshikawa, M., Yamada, T. ve Ono, N.** (2017). Analysis of a lithium-ion battery cooling system for electric vehicles using a phase-change material and heat pipes. *Journal of Thermal Science and Technology*, 12(1), JTST0011-JTST0011.
- Yang, W., Zhou, F., Zhou, H. ve Liu, Y.** (2020). Thermal performance of axial air cooling system with bionic surface structure for cylindrical lithium-ion battery module. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 161, 120307.
- Yang, X. H., Tan, S. C. ve Liu, J.** (2016). Thermal management of Li-ion battery with liquid metal. *Energy conversion and management*, 117, 577-585.
- Zhang, H., Wu, X., Wu, Q. ve Xu, S.** (2019). Experimental investigation of thermal performance of large-sized battery module using hybrid PCM and bottom liquid cooling configuration. *Applied Thermal Engineering*, 159, 113968.
- Zhang, W., Qiu, J., Yin, X. ve Wang, D.** (2020). A novel heat pipe assisted separation type battery thermal management system based on phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 165, 114571.
- Zhao, J., Lv, P. ve Rao, Z.** (2017). Experimental study on the thermal management performance of phase change material coupled with heat pipe for cylindrical power battery pack. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 82, 182-188.

- Zhao, J., Rao, Z., Liu, C. ve Li, Y.** (2016). Experiment study of oscillating heat pipe and phase change materials coupled for thermal energy storage and thermal management. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 99, 252-260.
- Zhao, Y., Zou, B., Li, C. ve Ding, Y.** (2019). Active cooling based battery thermal management using composite phase change materials. *Energy Procedia*, 158, 4933-4940.
- Zheng, Y., Shi, Y. ve Huang, Y.** (2019). Optimisation with adiabatic interlayers for liquid-dominated cooling system on fast charging battery packs. *Applied Thermal Engineering*, 147, 636-646.

