



**T.C.  
BATMAN ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**LİTYUM İYON PİLLERİNİN DÜŞÜK SICAKLIKLARDA PASİF  
TERMAL KONTROLÜ İÇİN ÜRETİLEN ISI YALITIM  
MALZEMELERİNİN PİL DEŞARJ PERFORMANS ÜZERİNE  
ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**Zülal ARCA BATI**

**Temmuz-2024  
BATMAN**

**T.C.  
BATMAN ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**LİTYUM İYON PİLLERİNİN DÜŞÜK SICAKLIKLARDA PASİF  
TERMAL KONTROLÜ İÇİN ÜRETİLEN ISI YALITIM  
MALZEMELERİNİN PİL DEŞARJ PERFORMANS ÜZERİNE  
ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**Zülal ARCA BATI**

**Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Hasan OKTAY**

**Temmuz-2024  
BATMAN**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Zülal ARCA BATI tarafından hazırlanan “Lityum İyon Pillerinin Düşük Sıcaklıklarda Pasif Termal Kontrolü İçin Üretilen Isı Yalıtım Malzemelerinin Pil Deşarj Performans Üzerine Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması 10/07/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Zeki ARGUNHAN

.....

#### Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Hasan OKTAY

.....

#### Üye

Prof. Dr. Bahattin İŞCAN

.....

#### Üye

Prof. Dr. Hüseyin AYDIN

.....

#### Üye

Doç. Dr. Faruk ORAL

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

Bu tez çalışması Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BTÜBAP) tarafından BTÜBAP-2023-Doktora-03 nolu proje ile desteklenmiştir.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Zülal ARCA BATI

10.07.2024

## ÖZET

### DOKTORA TEZİ

# LİTYUM İYON PİLLERİNİN DÜŞÜK SICAKLIKLARDA PASİF TERMAL KONTROLÜ İÇİN ÜRETİLEN ISI YALITIM MALZEMELERİNİN PİL DEŞARJ PERFORMANS ÜZERİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Zülal ARCA BATI

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hasan OKTAY

2024, 132 Sayfa

Jüri

Danışmanın Dr. Öğr. Üyesi Hasan OKTAY

Prof. Dr. Zeki ARGUNHAN

Prof. Dr. Bahattin İŞCAN

Prof. Dr. Hüseyin AYDIN

Doç. Dr. Faruk ORAL

Bu çalışmada, bataryaların soğuk hava koşulların bataryalar üzerindeki olumsuz etkilerini ve bataryalardaki performans kaybını azaltmak amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Yerli kaynaklardan temin edilen hammaddeler kullanılarak yanmayan, hafif, mekanik ve ısı yalıtım özellikleri yüksek yeni malzemeler üretilmiş ve test edilmiştir. Optimum özelliklere sahip üç numune, batarya kabınının iç yüzeyine kaplanmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında, düşük sıcaklık şartlarında batarya sıcaklık ve performans testlerini gerçekleştirmek için bir test düzeneği oluşturulmuştur. 24V nominal voltaj ve 20Ah nominal kapasiteye sahip batarya paketi üzerinde testler gerçekleştirmek amacıyla üç farklı sürüş profili geliştirilmiştir. Bu testler, 0°C, -5°C ve -10°C sıcaklıklarda, yalıtımlı ve yalıtımsız durumlarda batarya deşarj deneyleri yapılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bataryanın optimum çalışma sıcaklığında yapılan testlerle karşılaştırılmıştır.

Sonuçlar, yalıtım numunelerinin bataryanın ısınmasında önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Düşük ısı iletkenliği ve düşük ısı yayılımı özelliklerine sahip yalıtım numuneleri sayesinde, bataryanın çalışma süreci sırasında üretilen ısı büyük ölçüde tutulmuş ve yavaşça batarya kabin ortamına salınmıştır. Termal kontrol yöntemiyle batarya performans verimliliği, yalıtımsız duruma göre 0°C’de %5, -5°C’de %10 ve -10°C’de %10 artmıştır. Pratik elektrokimyasal enerji kullanım verimliliği çoğu deşarj süresi için %90’ın üzerinde bulunmuştur. Ayrıca, yalıtım numunelerinin deşarj performansının yalıtım kalınlığıyla ilişkili olduğu tespit edilmiştir. 1,5 cm, 2,5 cm ve 4 cm kalınlıklarda EPWSO yalıtım malzemesi ile kaplama durumu incelenmiş ve yalıtımsız duruma göre her yalıtım kalınlığı için batarya verimliliği artmıştır. Sonuçlar, yalıtımlı batarya kabinlerinde daha fazla termal enerjinin mevcut olduğunu ve bunun da bataryanın elektrokimyasal performansını iyileştirdiğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Batarya performansı, elektrokimyasal verim, soğuk hava koşulları

## **ABSTRACT**

### **Ph.D THESIS**

# **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF THERMAL INSULATION MATERIALS PRODUCED FOR PASSIVE THERMAL CONTROL OF LITHIUM-ION BATTERIES AT LOW TEMPERATURES ON BATTERY DISCHARGE PERFORMANCE**

**Zülal ARCA BATI**

**Batman University Graduate Education Institute**

**Mechanical Engineering Department of Science**

**Advisor: Asst. Prof. Dr. Hasan OKTAY**

**2024, 132 Pages**

**Jury**

**Advisor Asst. Prof. Dr. Hasan OKTAY**

**Prof. Dr. Zeki ARGUNHAN**

**Prof. Dr. Bahattin İŞCAN**

**Prof. Dr. Hüseyin AYDIN**

**Assoc. Prof. Dr. Faruk ORAL**

In this study, studies were carried out to reduce the negative effects of cold weather conditions on batteries and the loss of performance in batteries. Using locally sourced raw materials, new materials with non-flammability, lightweight, and high mechanical and thermal insulation properties were produced and tested. Three samples with optimal properties were selected and coated on the inner surface of the designed battery enclosure.

In the second phase of the study, a test setup was created to conduct battery temperature and performance tests under low-temperature conditions. To perform tests on a battery pack with a nominal voltage of 24V and a nominal capacity of 20Ah, three different driving profiles were developed. These tests were conducted at 0°C, -5°C, and -10°C, with and without insulation, and compared with the results obtained at the battery's optimal operating temperature.

The results showed that the insulation samples significantly impacted the battery's heating process. The insulation materials, characterized by low thermal conductivity and low heat dissipation, effectively retained the heat generated during the battery's operation and gradually released it into the battery enclosure. Thermal control improved battery performance efficiency by 5% at 0°C, 10% at -5°C, and 10% at -10°C compared to the uninsulated condition. Practical electrochemical energy usage efficiency was found to be over 90% for most discharge durations. Additionally, the discharge performance of the insulation samples was found to be related to the insulation thickness. Coating with EPWSO insulation material in thicknesses of 1.5 cm, 2.5 cm, and 4 cm was examined, and battery efficiency increased for each insulation thickness compared to the uninsulated condition. The results indicated that the insulated battery enclosures provided more thermal energy to heat the batteries, thus restoring their electrochemical performance.

**Keywords:** Battery performance, cold weather conditions, electrochemical efficiency

## ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, tezimin olgunlaşması için bana her anlamda katkı sunan değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hasan OKTAY’a, tez sürecim boyunca bana yol gösteren değerli hocalarım Prof. Dr. Bahattin İŞCAN ve Prof. Dr. Hüseyin AYDIN’a teşekkürü borç bilirim.

Bu tez çalışmasını BTÜBAP-2023-Doktora-03 nolu proje ile finansal olarak katkı sağlayan Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırmaları Proje Birimine teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince deneysel anlamda yaşadığım her aksaklıkta benden yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Adem YILMAZ, Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Zerrakki IŞIK ve Arş. Gör. Ferhat AKKUŞ’a teşekkür ederim.

Bu uzun ve zorlu süreç boyunca her koşulda yanımda olup desteğini cömertçe sunan eşim Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI’ya ve varlığı benim için en büyük güç olan biricik oğlum Rüzgar Miran’ a teşekkür ederim. Tüm hayatım boyunca her zaman yanımda olan sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Zülal ARCA BATI  
BATMAN-2024

## İÇİNDEKİLER

|                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖZET .....                                                        | i         |
| ABSTRACT.....                                                     | ii        |
| ÖNSÖZ .....                                                       | iii       |
| İÇİNDEKİLER.....                                                  | iv        |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                            | vi        |
| TABLolar LİSTESİ .....                                            | x         |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                      | xi        |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>                                              | <b>1</b>  |
| 1.1. Yalıtım Teknikleri.....                                      | 3         |
| 1.1.1. Isı yalıtımı .....                                         | 3         |
| 1.1.2. Ses yalıtımı .....                                         | 3         |
| 1.1.3. Yangın yalıtımı .....                                      | 4         |
| 1.1.4. Su yalıtımı.....                                           | 5         |
| 1.2. Elektrikli Araçlar ve Li-ion Bataryalar .....                | 6         |
| 1.2.1. Elektrikli araçlar .....                                   | 6         |
| 1.2.2. Elektrikli araçların sınıflandırılması .....               | 9         |
| 1.2.3. Li-ion bataryalar .....                                    | 13        |
| <b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>                                | <b>19</b> |
| <b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>                                 | <b>24</b> |
| 3.1. Agrega Esaslı Yalıtım Kompozitini Oluşturan Malzemeler ..... | 24        |
| 3.1.1. Agrega (Perlit) .....                                      | 24        |
| 3.1.2. Yapıştırıcılar (Bağlayıcılar) .....                        | 25        |
| 3.1.3. Dolgu (filler) malzemeleri .....                           | 28        |

|                          |                                                                                     |            |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.1.4.                   | Sertleştiriciler.....                                                               | 31         |
| 3.2.                     | Karışım Oranlarının Belirlenmesi ve Hazırlanışı.....                                | 33         |
| 3.2.1.                   | Üretim aşaması .....                                                                | 33         |
| 3.2.2.                   | Karışımların hazırlanması.....                                                      | 34         |
| 3.2.3.                   | Numunelerin şekillendirilmesi.....                                                  | 36         |
| 3.2.4.                   | Numunelerin isimlendirilmesi .....                                                  | 37         |
| 3.2.5.                   | Numunelerin kurutulması .....                                                       | 37         |
| 3.2.6.                   | Kütleme .....                                                                       | 38         |
| 3.3.                     | Yalıtım Malzemelerine Uygulanan Testler .....                                       | 39         |
| 3.3.1.                   | Tek eksenli basınç dayanım testi .....                                              | 39         |
| 3.3.2.                   | Üç nokta eğme testi.....                                                            | 40         |
| 3.3.3.                   | Isıl özellik testleri.....                                                          | 41         |
| 3.3.4.                   | Yanmazlık testi .....                                                               | 42         |
| 3.4.                     | Batarya Kabin Test Düzenekinin Hazırlanması .....                                   | 43         |
| <b>4.</b>                | <b>ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>                                         | <b>49</b>  |
| 4.1.                     | Üretilen Yalıtım Numunelerin Özellikleri .....                                      | 49         |
| 4.1.1.                   | Mekanik ve termofiziksel özellik test sonuçları .....                               | 50         |
| 4.2.                     | Yalıtımın ve Sürüş Profilinin Sıcaklığa Etkisi .....                                | 60         |
| 4.2.1.                   | Kabin ortamının 0°C olduğu durumda sıcaklık değişimi .....                          | 60         |
| 4.2.2.                   | Kabin ortamının -5°C olduğu durumda sıcaklık değişimi .....                         | 68         |
| 4.2.3.                   | Kabin ortamının -10°C olduğu durumda sıcaklık değişimi .....                        | 75         |
| 4.3.                     | Yalıtımın ve Sürüş Profilinin Verimlilik ve Güç Üzerine Etkisi .....                | 81         |
| 4.4.                     | Yalıtım Kalınlığının Sıcaklık Üzerine Etkilerinin İncelenmesi .....                 | 109        |
| 4.5.                     | Yalıtım Kalınlığının Batarya Deşarj Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi ..... | 114        |
| <b>5.</b>                | <b>SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>                                                    | <b>120</b> |
| 5.1.                     | Sonuçlar.....                                                                       | 120        |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>   | <b>125</b>                                                                          |            |
| <b>6. ÖZGEÇMİŞ .....</b> | <b>132</b>                                                                          |            |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Hafif hibrit elektrikli araçların bileşenleri (Gürbüz, 2021). ....                                                                                                                         | 11 |
| Şekil 1.2. Plug-in hibrit elektrikli araçların bileşenleri (Gürbüz, 2021). ....                                                                                                                       | 12 |
| Şekil 1.3. Tamamen elektrikli araçların iç yapısı (Gürbüz, 2021). ....                                                                                                                                | 12 |
| Şekil 1.4. Li-ion bataryalarda çalışma sıcaklıkları (Dursun, 2024). ....                                                                                                                              | 14 |
| Şekil 1.5. Li-ion bataryaların iç yapısı ve çalışma prensibi (Jones, 2024). ....                                                                                                                      | 15 |
| Şekil 3.1. Ham, kırılmış ve genişletilmiş perlit (Jamei ve ark., 2011). ....                                                                                                                          | 25 |
| Şekil 3.2. Karışımların kalıplara doldurulması. ....                                                                                                                                                  | 36 |
| Şekil 3.3. Numunelerin genel olarak görünümü. ....                                                                                                                                                    | 38 |
| Şekil 3.4. Tek eksenli küp basınç dayanımı deneyi. ....                                                                                                                                               | 40 |
| Şekil 3.5. Üç nokta eğme dayanım deneyi. ....                                                                                                                                                         | 41 |
| Şekil 3.6. Isıl özelliklerin tayini. ....                                                                                                                                                             | 42 |
| Şekil 3.7. Batarya paketinin görünümü. ....                                                                                                                                                           | 44 |
| Şekil 3.8. Termocupların bağlandığı çok girişli datalogger. ....                                                                                                                                      | 45 |
| Şekil 3.9. Batarya yük test cihazı. ....                                                                                                                                                              | 46 |
| Şekil 3.10. Batarya yük test cihazı bilgisayar arayüzü. ....                                                                                                                                          | 46 |
| Şekil 3.11. Yeni Avrupa sürüş profili. ....                                                                                                                                                           | 47 |
| Şekil 3.12. Kullanılan sürüş profillerindeki amper ve süre değerleri. ....                                                                                                                            | 47 |
| Şekil 3.13. Soğuk çalışma şartları için batarya test kabinin genel görünümü. ....                                                                                                                     | 48 |
| Şekil 4.1. Seçilen yalıtım malzemelerinin basma kuvveti-uzama değişim grafiği. ....                                                                                                                   | 51 |
| Şekil 4.2. Üretilen yalıtım malzemelerinin basınç dayanımı değerleri. ....                                                                                                                            | 51 |
| Şekil 4.3. Seçilen yalıtım malzemelerinin eğme kuvveti-uzama değişim grafiği. ....                                                                                                                    | 53 |
| Şekil 4.4. Üretilen yalıtım malzemelerinin üç nokta eğme dayanımı değerleri. ....                                                                                                                     | 54 |
| Şekil 4.5. Üretilen yalıtım malzemelerinin kuru yığınsal yoğunluklarının değişimi. ....                                                                                                               | 56 |
| Şekil 4.6. Üretilen yalıtım malzemelerinin ısı iletkenlik değerleri. ....                                                                                                                             | 57 |
| Şekil 4.7. Üretilen yalıtım malzemelerinin özgül ısı değerleri. ....                                                                                                                                  | 58 |
| Şekil 4.8. Üretilen yalıtım malzemelerinin ısı yayılım değerleri. ....                                                                                                                                | 59 |
| Şekil 4.9. ASTM E84 ateş testine tabi tutulan CXSIX numunesinin farklı sürelerdeki termal kamera görüntüleri:(a,b) 5. dk. arka-ön yüzey (c,d) 10. dk. arka-ön yüzey (e,f) 10. dk. arka-ön yüzey. .... | 60 |
| Şekil 4.10. 0°C sıcaklıkta PVWSO numunesinin 1. profil için sıcaklık değişimi. ....                                                                                                                   | 61 |

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.11. 0°C sıcaklıkta EPWSO numunesinin 1. profil için sıcaklık değişimi. ....   | 62 |
| Şekil 4.12. 0°C sıcaklıkta CXSIX numunesinin 1. profil için sıcaklık değişimi. ....   | 63 |
| Şekil 4.13. 0°C sıcaklıkta PVWSO numunesinin 2. profil için sıcaklık değişimi. ....   | 63 |
| Şekil 4.14. 0°C sıcaklıkta EPWSO numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi. ....   | 64 |
| Şekil 4.15. 0°C sıcaklıkta CXSIX numunesinin 2. profil için sıcaklık değişimi. ....   | 65 |
| Şekil 4.16. 0°C sıcaklıkta PVWSO numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi. ....   | 65 |
| Şekil 4.17. 0°C sıcaklıkta EPWSO numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi. ....   | 66 |
| Şekil 4.18. 0°C sıcaklıkta CXSIX numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi. ....   | 67 |
| Şekil 4.19. -5°C sıcaklıkta PVWSO numunesinin 1. profil için sıcaklık değişimi. ....  | 68 |
| Şekil 4.20. -5°C sıcaklıkta EPWSO numunesinin 1. profil için sıcaklık değişimi. ....  | 69 |
| Şekil 4.21. -5°C sıcaklıkta CXPIX numunesinin 1. profil için sıcaklık değişimi. ....  | 70 |
| Şekil 4.22. -5°C sıcaklıkta PVWSO numunesinin 2. profil için sıcaklık değişimi. ....  | 70 |
| Şekil 4.23. -5°C sıcaklıkta EPWSO numunesinin 2. profil için sıcaklık değişimi. ....  | 71 |
| Şekil 4.24. -5°C sıcaklıkta CXPIX numunesinin 2. profil için sıcaklık değişimi. ....  | 72 |
| Şekil 4.25. -5°C sıcaklıkta PVWSO numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi. ....  | 73 |
| Şekil 4.26. -5°C sıcaklıkta EPWSO numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi. ....  | 73 |
| Şekil 4.27. -5°C sıcaklıkta CXPIX numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi. ....  | 74 |
| Şekil 4.28. -10°C sıcaklıkta PVWSO numunesinin 1. profil için sıcaklık değişimi. .... | 75 |
| Şekil 4.29. -10°C sıcaklıkta EPWSO numunesinin 1. profil için sıcaklık değişimi. .... | 76 |
| Şekil 4.30. -10°C sıcaklıkta CXPIX numunesinin 1. profil için sıcaklık değişimi. .... | 76 |
| Şekil 4.31. -10°C sıcaklıkta PVWSO numunesinin 2. profil için sıcaklık değişimi. .... | 77 |
| Şekil 4.32. -10°C sıcaklıkta EPWSO numunesinin 2. profil için sıcaklık değişimi. .... | 78 |
| Şekil 4.33. -10°C sıcaklıkta PXCIX numunesinin 2. profil için sıcaklık değişimi. .... | 78 |
| Şekil 4.34. -10°C sıcaklıkta PVWSO numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi. .... | 79 |
| Şekil 4.35. -10°C sıcaklıkta EPWSO numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi. .... | 80 |
| Şekil 4.36. -10°C sıcaklıkta CXPIX numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi. .... | 80 |
| Şekil 4.37. 0°C sıcaklıkta 1. profilde PVWSO numunesinin deşarj performansı. ....     | 84 |
| Şekil 4.38. 0°C sıcaklıkta 1. profilde EPWSO numunesinin deşarj performansı. ....     | 85 |
| Şekil 4.39. 0°C sıcaklıkta 1. profilde CXPIX numunesinin deşarj performansı. ....     | 86 |
| Şekil 4.40. -5°C sıcaklıkta 1. profilde PVWSO numunesinin deşarj performansı. ....    | 87 |
| Şekil 4.41. -5°C sıcaklıkta 1. profilde EPWSO numunesinin deşarj performansı. ....    | 88 |
| Şekil 4.42. -5°C sıcaklıkta 1. profilde CXPIX numunesinin deşarj performansı. ....    | 89 |
| Şekil 4.43. -10°C sıcaklıkta 1. profilde PVWSO numunesinin deşarj performansı. ....   | 90 |

|                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.44. -10°C sıcaklıkta 1. profilde EPWSO numunesinin deşarj performansı. ....              | 91  |
| Şekil 4.45. 0°C sıcaklıkta 2. profilde PVWSO numunesinin deşarj performansı. ....                | 91  |
| Şekil 4.46. 0°C sıcaklıkta 2. profilde EPWSO numunesinin deşarj performansı. ....                | 92  |
| Şekil 4.47. 0°C sıcaklıkta 2. profilde CXSIX numunesinin deşarj performansı. ....                | 93  |
| Şekil 4.48. -5°C sıcaklıkta 2. profilde PVWSO numunesinin deşarj performansı. ....               | 94  |
| Şekil 4.49. -5°C sıcaklıkta 2. profilde EPWSO numunesinin deşarj performansı. ....               | 95  |
| Şekil 4.50. -5°C sıcaklıkta 2. profilde CXPIX numunesinin deşarj performansı. ....               | 96  |
| Şekil 4.51. -10°C sıcaklıkta 2. profilde PVWSO numunesinin deşarj performansı. ....              | 97  |
| Şekil 4.52. -10°C sıcaklıkta 2. profilde EPWSO numunesinin deşarj performansı. ....              | 98  |
| Şekil 4.53. -10°C sıcaklıkta 2. profilde CXPIX numunesinin deşarj performansı. ....              | 99  |
| Şekil 4.54. 0°C sıcaklıkta 3. profilde PVWSO numunesinin deşarj performansı. ....                | 100 |
| Şekil 4.55. 0°C sıcaklıkta 3. profilde EPWSO numunesinin deşarj performansı. ....                | 101 |
| Şekil 4.56. 0°C sıcaklıkta 3. profilde CXPIX numunesinin deşarj performansı. ....                | 102 |
| Şekil 4.57. -5°C sıcaklıkta 3. profilde PVWSO numunesinin deşarj performansı. ....               | 103 |
| Şekil 4.58. -5°C sıcaklıkta 3. profilde EPWSO numunesinin deşarj performansı. ....               | 104 |
| Şekil 4.59. -5°C sıcaklıkta 3. profilde CXPIX numunesinin deşarj performansı. ....               | 105 |
| Şekil 4.60. -10°C sıcaklıkta 3. profilde PVWSO numunesinin deşarj performansı. ....              | 106 |
| Şekil 4.61. -10°C sıcaklıkta 3. profilde EPWSO numunesinin deşarj performansı. ....              | 107 |
| Şekil 4.62. -10°C sıcaklıkta 3. profilde CXPIX numunesinin deşarj performansı. ....              | 108 |
| Şekil 4.63. 0°C sıcaklıkta 2. profilde EPWSO numune kalınlığının sıcaklık üzerine etkisi. ....   | 109 |
| Şekil 4.64. 0°C sıcaklıkta 3. profilde EPWSO numune kalınlığının sıcaklık üzerine etkisi. ....   | 109 |
| Şekil 4.65. 0°C sıcaklıkta 5. profilde EPWSO numune kalınlığının sıcaklık üzerine etkisi. ....   | 110 |
| Şekil 4.66. -5°C sıcaklıkta 1. profilde EPWSO numune kalınlığının sıcaklık üzerine etkisi. ....  | 111 |
| Şekil 4.67. -5°C sıcaklıkta 2. profilde EPWSO numune kalınlığının sıcaklık üzerine etkisi. ....  | 111 |
| Şekil 4.68. -5°C sıcaklıkta 3. profilde EPWSO numune kalınlığının sıcaklık üzerine etkisi. ....  | 112 |
| Şekil 4.69. -10°C sıcaklıkta 1. profilde EPWSO numune kalınlığının sıcaklık üzerine etkisi. .... | 112 |

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.70. -10°C sıcaklıkta 2. profilde EPWSO numune kalınlığının sıcaklık üzerine etkisi..... | 113 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|



## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo 1.1. Yangın anında yangın merkezindeki sıcaklığın zamana bağlı değişimi (İnce, 2024). ..... | 4   |
| Tablo 3.1. Bazı termoset reçinelerin tipik özellikleri (Kar, 2016). .....                         | 26  |
| Tablo 3.2. Ülkemizde bulunan kaolinin kimyasal özellikleri (DPT, 2001). .....                     | 28  |
| Tablo 3.3. Borik asitin fiziksel özellikleri (Kırbaş, 2021). .....                                | 31  |
| Tablo 3.4. Kullanılan malzemeler ve isimlendirmeleri. ....                                        | 37  |
| Tablo 3.5. Kullanılan yüzdelik oranlar ve isimlendirilmeleri. ....                                | 37  |
| Tablo 3.6. Numunelerin son isimlendirilmiş halleri. ....                                          | 37  |
| Tablo 3.7. Batarya paketinin özellikleri.....                                                     | 44  |
| Tablo 3.8. Datalogger cihazının teknik özellikleri. ....                                          | 45  |
| Tablo 4.1. Üretilen yalıtım malzemelerinin mekanik, termofiziksel ve ısı özellikleri. .           | 49  |
| Tablo 4.2. Yalıtımlı, yalıtımsız ve normal oda koşullarında güç ve verimlilik değerleri. ....     | 82  |
| Tablo 4.3. Verimlilik değerlerinin kıyaslanması. ....                                             | 83  |
| Tablo 4.4. Yalıtımlı, yalıtımsız ve normal oda koşullarında güç ve verimlilik değerleri. ....     | 114 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|            |                                              |
|------------|----------------------------------------------|
| $b$        | : numune genişliği, mm                       |
| $d$        | : numune kalınlığı, mm                       |
| $G_s$      | : karışımındaki toplam su miktarı, kg        |
| $G_T$      | : karışımın toplam ağırlığı, kg              |
| $L$        | : destek aralığı, mm                         |
| $m_{dky}$  | : doymuş kuru yüzey halindeki su oranı, %    |
| $M_{gp}$   | : genişletilmiş perlitinin kuru ağırlığı, kg |
| $m_{ys}$   | : yapıştırıcının su içeriği, %               |
| $P$        | : yük, N                                     |
| $\eta_s$   | : numune su emme sabiti (0,5 ila 1 alınır)   |
| $\sigma_b$ | : eğme gerilmesi, MPa                        |

### Kısaltmalar

|      |                                     |
|------|-------------------------------------|
| BEV  | : Tamamen elektrikli araçlar        |
| EV   | : Elektrikli araç                   |
| FCEV | : Yakıt hücresel elektrikli araçlar |
| HESS | : Hibrit enerji depolama sistemi    |
| HEV  | : Hibrit elektrikli araçlar         |
| HRR  | : Isı yayma oranı                   |
| LIB  | : Li-ion pil                        |
| MHEV | : Hafif hibrit elektrikli araçlar   |
| PCM  | : Faz değiştiren malzeme            |
| PHEV | : Plug-in Hibrit Elektrikli araçlar |
| Rb   | : Yığın direnci                     |
| Rct  | : Yük aktarım direnci               |
| Rsl  | : Yüzey katmanı direnci             |
| SC   | : Süper kapasitör                   |

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda artan karbon nötrlüğü önerisi temiz ve yenilenebilir enerjinin gelişimini teşvik etmektedir. Elektrikli araçlar, sera gazı emisyonlarını ve karbondioksit salınımını azaltmak için geleneksel içten yanmalı araçlar yerine uygun bir alternatif olarak üretilmekte ve bu konudaki araştırmalar devam etmektedir (S. Chen ve ark., 2023). Elektrikli araçlara yönelim gün geçtikçe artmaktadır. Elektrikli araç sektörü Çin, Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde hızla büyümektedir ve sadece Almanya'da Ağustos 2022'de 50,5 GWh'lık kümülatif batarya kapasitesi olduğu tahmin edilmektedir (Hecht ve ark., 2022).

Günümüzde kurşun asit aküler, nikel metal hidrür piller, nikel kadmiyum piller ve lityum polimer piller gibi farklı tipte şarj edilebilir pil teknolojileri bulunmaktadır. Ancak yüksek enerji yoğunluğu, uzun kullanım ömrü gibi büyük avantajlarından dolayı Lityum iyon piller günümüzde kullanım alanı giderek artan piller olarak göze çarpmaktadır.

Elektrikli araçlardaki akü sistemleri genellikle yüzlerce veya binlerce tek hücreden oluşur. Bu nedenle akü yönetim sistemleri, akülerin çalışmasını iyileştirecek izleme, kontrol ve koruma işlevleri sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

Lityum-iyon piller 1990'ların başında Sony tarafından piyasaya sürülmelerinden bu yana muazzam bir başarı elde ederek piyasadaki rakiplerinin çoğunun yerini almış ve taşınabilir elektronik aletler ve elektrikli ulaşım gibi birçok modern uygulamaların da yolunu açmıştır (Faber ve ark., 2023). Elektrikli araçların batarya sistemleri seri ve paralel şekilde bağlanmış yüzlerce hatta binlerce tek hücreden oluşmaktadır ve akü yönetim sistemleri, akülerin çalışmasını iyileştirecek izleme, kontrol ve koruma işlevleri sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır (Wang ve ark., 2019; Xiong ve ark., 2020). Akü yönetim sisteminin ana görevi, gerçek zamanlı akü durumu tahmini, akü termal yönetimi, hücre dengeleme, yerleşik arıza teşhisi ve diğer kontrol ve yönetim fonksiyonlarını içerir. Akü yönetim sisteminin temel görevlerinden biri akülerin güvenliğini sağlamak ve aküleri güvenli olmayan işlemlerden korumaktır.

Genel olarak, Lityum İyon Pil'lerin (LIB) çalışma ortamları, yüksek sıcaklık, düşük sıcaklık, aşırı şarj ve aşırı deşarj vb. gibi aşırı koşulların genellikle dahil olduğu karmaşık ortamlardır. Sıcaklık, lityum iyon pillerin ömrünü etkileyen önemli bir yaşlanma parametresidir.

Düşük sıcaklıklarda, LIB'ler şarj verimliliğinin azalmasına, önemli güç kaybına ve hızlandırılmış yaşlanmaya maruz kalır, bu da sürüş menzili önemli ölçüde sınırlamaktadır. Amerikan Otomobil Birliği tarafından bildirildiği üzere, elektrikli otomobilin sürüş menzili 23,9 °C'de 105 mil iken, -6,7 °C'de %57 düşüşle 43 mile düşmektedir (X.-G. Yang ve ark., 2016) Bu nedenle, gelişmiş akü ve araç performansı için düşük sıcaklıktaki işlemler altında etkili akü iklimlendirme tekniklerinin geliştirilmesine güçlü bir ihtiyaç vardır. Soğuk iklimlerde lityum iyon pillerin zayıf performans göstermesinin dört ana nedeni bulunmaktadır: (1) elektrot yüzeyinde elektrolitin ve katı elektrolit arayüzünün düşük iletkenliği; (2) katı hal Li yayılımının azalması; (3) grafit anodun yüksek polarizasyonu; ve (4) elektrot arayüzlerindeki yüksek yük aktarım direncinin neden olduğu yavaş kinetik (Babu ve ark., 2022).

Düşük sıcaklıkta çalışma koşullarındaki zorlukların üstesinden gelmek için hem deneysel hem de numerik olarak farklı stratejiler araştırılmıştır. Pil ısıtma, LIB'lerin düşük sıcaklık performansını iyileştirmek için kapsamlı bir şekilde incelenen uygulanabilir bir yaklaşımdır (Higuchi ve ark., 2017; Ji ve Wang, 2013; Zhiguo Lei ve ark., 2018). Ayrıca düşük ortam sıcaklıklarında çalışırken batarya paketinin yalıtılmasının faydalı olabileceğini gösteren numerik ve deneysel bazı spesifik çalışmalarda mevcuttur (Faber ve ark., 2023; Ouyang ve ark., 2019).

Etkin termal yönetim yapılmazsa, lityum iyon pilin çalışma ortamı aşırı ısınabilir ve bu da bazı tehlikelere neden olabilir. Termal kaçak bu tehlikelerin en yaygın olanıdır ve büyük kazalara neden olabilmektedir. Bir pil termal kaçağa maruz kaldığında, dahili malzemeler ve elektrolit reaksiyona girer, bu da önemli miktarda ısı açığa çıkarır ve bunun sonucunda yanmaya ve hatta patlamaya sebep olabilmektedir (F. Liu ve ark., 2022).

Elektrikli araçlarda termal kaçak, bir veya daha fazla akü hücresindeki sıcaklığın kendi kendine devam eden ve kontrolsüz bir artışını ifade eder. Bu, bir pil hücresi veya bir grup hücre, sıcaklıkta bir artışa yol açan, potansiyel olarak hücre hasarına, performansın düşmesine veya aşırı durumlarda yangın veya patlama gibi termal tehlikelere yol açan olayların zincirleme reaksiyonuna maruz kaldığında meydana gelebilir.

## 1.1. Yalıtım Teknikleri

Yalıtım, bir malzeme veya sistem kullanarak enerji transferini (elektriksel, gaz, sıvı, ses, nem, ısı vb.) kontrol etme veya sınırlama işlemidir. Temelde iç ve dış ortamlar arasındaki enerji değişimini azaltarak, iç ortamları dış etkilerden korumayı amaçlar. Yalıtım özellikle binalarda, araçlarda ve endüstriyel tesislerde çeşitli formlarda uygulanabilir. Yalıtım yapılar için iç ve dış etkilerden korumayı sağlarken, kullanıcı için de konfor ve güvenlik sağlamalıdır. Tüm bu amaçlar doğrultusunda, yalıtımı ısı, yangın, ses ve su yalıtımı olarak dört temel farklı grupta ele almak mümkündür.

### 1.1.1. Isı yalıtımı

Isı yalıtımı, bir yapıyı dış etkenlerin olumsuz etkilerinden korumak ve iç ortamlardaki enerjiyi daha verimli hale getirmek için uygulanan bir yalıtım tekniğidir. Temel olarak ısı yalıtımı iç ortamdaki sıcaklığı dış ortamdan gelen soğuk veya sıcak havanın etkilerinden korumayı hedefler. Bunun için genellikle yalıtım malzemeleri kullanılır. Bu malzemeler, ısı transferini (ısı iletimi, taşıma ve ışıınım) azaltarak enerjiden tasarruf edilmesini sağlar. Ancak ısı yalıtımı sadece yalıtım malzemelerinin kullanımıyla yapılan bir işlem değildir. Isı kaybına doğrudan etki eden en önemli parametreler, yapının içinde bulunduğu çevresel faktörler, coğrafi özellikler ve iklim özellikleridir.

### 1.1.2. Ses yalıtımı

Ses tanım olarak; her türlü ortam içerisinde moleküllerin titreşmesiyle dalgalar oluşturarak yayılması sonucu ortaya çıkan bir enerji türüdür. Gürültü ise, farklı frekans bileşenlerine sahip olan ve genellikle zamana bağlı rahatsız edici ses topluluğudur. Ses yalıtımı, bir ortamdan diğerine sesin geçişini azaltmak amacıyla uygulanan bir dizi teknik ve malzeme kullanımudur. Bu dış ortamdan gelen gürültüleri engellemek ve iç ortamdaki sesin dışarı sızmasını önlemek için yapılır. Ses yalıtımı uygulamaları:

Duvar yalıtımı

Tavan ve zemin yalıtımı

Pencere ve kapı yalıtımı

## Ses yalıtım panelleri

### 1.1.3. Yangın yalıtımı

Yangının oluşması için gerekli olan üç bileşen yanıcı materyal, yakıcı ve ısı kaynağıdır. Yangın meydana geldiği ortamda sıcaklık zamanla artar. İnsanın dayanabileceği maksimum sıcaklık 177 °C iken dayanma süresi ise sadece 1 dakikadır. Bu nedenle de yangın esnasında saniyelerin bile önemi çok yüksektir (İnce, 2024).

**Tablo 1.1.** Yangın anında yangın merkezindeki sıcaklığın zamana bağlı değişimi (İnce, 2024).

|                      |     |     |     |     |     |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>Sıcaklık (°C)</b> | 555 | 660 | 720 | 820 | 927 |
| <b>Zaman (dk)</b>    | 5   | 10  | 15  | 30  | 60  |

Yangın yalıtımı, bir yapıdaki yangının yayılmasını kontrol altına almak ve yangının yayılmasını belli bir süre geciktirmek için kullanılan önlemler bütünüdür. Yangın yalıtımı, can güvenliğini artırmak, mal kayıplarını en aza indirmek ve yangının kontrol altına alınmasını kolaylaştırmak amacıyla uygulanır. Yangın yalıtımının temel unsurları şunlardır:

- **Yangın Bariyerleri:** Yapıların farklı bölgelerini birbirinden ayıran yangın dayanımı yüksek duvarlar, kapılar ve zeminler gibi bariyerler kullanılır. Bu yapı elemanları, yangının yayılmasını sınırlandırarak diğer bölgelere sıçramasını engeller.
- **Yangına Dayanıklı Malzemeler:** Yangına dayanıklı malzemeler, yapı elemanlarını yangına karşı daha dirençli hale getirir. Bu malzemeler, özellikle taşıyıcı elemanlar, duvar kaplamaları ve izolasyon malzemeleri için kullanılır.
- **Yangın Yalıtım Kapıları ve Pencereleer:** Yangın yalıtım kapıları ve pencereler, belirli bir süre boyunca yangının geçişini engelleyen özel tasarımlara sahiptir.
- **Yangın Yalıtım Malzemeleri:** Yangın yalıtımı için özel olarak tasarlanmış izolasyon malzemeleri kullanılır. Bu malzemeler, yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır ve yangın sırasında yapı elemanlarını korur.
- **Yangın Algılama ve Söndürme Sistemleri:** Yangın algılama sistemleri, yangın başladığında erken uyarı sağlar. Ayrıca, otomatik yangın söndürme sistemleri yangını kontrol altına almaya yardımcı olur.

Yangın yalıtımı, yapılarda güvenli bir ortam oluşturmak için hayati bir rol oynar ve yangının hızlı bir şekilde kontrol altına alınmasına yardımcı olur. Bu önlemler, yangın sırasında can güvenliğini artırır ve mülkiyet kayıplarını en aza indirir.

#### 1.1.4. Su yalıtımı

Su yalıtımı, bir yapıyı suyun neden olduğu zararlardan koruma amacıyla uygulanan bir dizi önlemi içerir. Bu zararlar arasında su sızıntıları, rutubet, küf oluşumu, ahşap çürümesi ve yapısal hasarlar bulunabilir. Su yalıtımının tarihçesi oldukça eski dönemlere dayanmaktadır. İnsanlar, suyun sızmasını önlemek ve suya dayanıklı yapılar inşa etmek için çeşitli yöntemlere başvurmuşlardır. Günümüzde, su yalıtımı önlemleri modern teknoloji ve daha çeşitli malzemelerin kullanımıyla daha etkili bir hale gelmiştir. Su yalıtımının temel unsurları:

- Su Yalıtım Malzemeleri: Özel su yalıtım malzemeleri, binaları su geçirmez hale getirmek için kullanılır. Bu malzemeler genellikle çatılar, zeminler, duvarlar ve banyo gibi suya maruz kalan bölgelerde kullanılır.

- Su Yalıtım Membranları: Su yalıtım membranları, özellikle çatı ve zemin gibi alanlarda su sızıntısını engellemek için kullanılır. Genellikle esnek ve dayanıklı malzemelerden yapılır ve su geçirmez bir bariyer oluştururlar.

- Su Yalıtımı için Kaplama ve Boyalar: Su itici kaplama ve boyalar, yüzeylere uygulandığında suyun geçişini önleyen veya sınırlayan malzemelerdir. Özellikle beton yüzeylerde kullanılır.

- Su Yalıtımlı Duvar ve Zemin Kaplamaları: Özellikle banyo, mutfak ve bodrum gibi suya maruz kalan alanlarda kullanılan su yalıtımlı duvar ve zemin kaplamaları, suyun içeri sızmasını önler.

- Su Yalıtım Bantları: Su yalıtım bantları, birleşim noktalarında ve çatlaklarda su sızıntısını önlemek için kullanılır. Genellikle çatı, pencere veya kapı kenarlarında tercih edilir.

Su yalıtımı, binaları nem, küf ve çürüme gibi su kaynaklı sorunlardan korur. Özellikle yağışlı iklimlerde veya suyun yoğun olarak kullanıldığı bölgelerde, su yalıtımı önlemleri büyük önem taşır.

## 1.2. Elektrikli Araçlar ve Li-ion Bataryalar

### 1.2.1. Elektrikli araçlar

Sanayi devriminin gerçekleşmesi neticesinde artan üretim kapasitesiyle beraber, dünya nüfusunun hızlı bir şekilde artması enerji ve hammaddeye olan talebi arttırmıştır. İhtiyaç duyulan enerjinin karşılanmasında birincil olarak fosil enerji kaynakları kullanılmaktadır. Birincil enerji kaynağı olarak fosil kaynakların kullanılması hem tükenmekte olan enerji rezervleri yüzünden sürdürülebilirlik açısından kısıtlı olması hem de kullanımıyla beraber ortaya çıkan çevresel problemler nedeniyle birtakım zorluklar oluşturmaktadır. Bu nedenle toplumlar temiz ve sürdürülebilir enerji arayışlarına yönelmişlerdir. Güneş, rüzgar, hidroelektrik ve biyokütle gibi yenilenebilir yöntemlerle birlikte emisyon salınımı açısından en önemli kaynaklardan olan araç teknolojisinde de içten yanmalı motorlar yerine hibrit ve elektrikli araç teknolojilerine yönelim olmuştur.

Elektrikli araçlar (EV'ler), sürdürülebilirlik zorluklarının ele alınmasında ve karayolu taşımacılığının çevresel etkisinin azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Elektrikli araçlar, çalışma sırasında sıfır karbon emisyonu, daha yüksek verimlilik, daha düşük bakım gereksinimleri ve şebeke entegrasyonu potansiyeli gibi avantajlar sunar (Daulatabad ve ark., 2022; Hanssen ve Hasan, 2023; Sendek-Matysiak, 2020). EV'lerin, özellikle Araçtan Şebekeye (V2G) sistemleri aracılığıyla akıllı şebeke teknolojisiyle entegrasyonu, EV'lerin dağıtılmış enerji kaynakları olarak hizmet etme fırsatları sunarak şebeke istikrarına ve verimliliğine katkıda bulunmaktadır (Patel ve ark., 2022). Ayrıca EV'ler, akıllı şarj ve enerji depolama yeteneklerini etkinleştirerek, araç şarj davranışını yenilenebilir enerji üretimiyle uyumlu hale getirerek hem ulaşımın hem de elektrik tedarikinin karbondan arındırılmasına yardımcı olabilir (Corliss, 2020). Genel olarak elektrikli araçların önemi, sera gazı emisyonlarını azaltma, iklim değişikliğiyle mücadele etme ve ulaşım sektöründe sürdürülebilir kalkınmayı destekleme potansiyellerinde yatmaktadır.

Elektrikli araç teknolojisinin gelişimi, son yıllarda pazar talebi, kamu-özel sektör ortaklıkları ve çeşitli endüstrilerden gelen yeniliklerin bir araya gelmesiyle önemli ilerlemeler kaydetmiştir (Gage ve Helliker, 1995). Bu ilerlemeler, gelişmiş enerji kaynaklarına, hızlı şarj cihazlarına ve yerleşik enerji yöneticilerine yol açarak elektrikli

araçları daha pratik ve pazarlanabilir hale getirmektedir. Elektrikli araçların kentsel trafiği iyileştirme ve çevresel etkiyi azaltma potansiyeli (Magetto, 1998). Elektrikli araçlarda, enerji depolama cihazları ve elektrikli tahrik gibi temel teknolojiler, ticari uygulanabilirlik, performans ve güvenliğe odaklanılarak belirlenmiştir (Kumar ve Revankar, 2017). Sürüş mesafesini en üst düzeye çıkarmak ve emisyonları azaltmak için verimli güç yönetimi ihtiyacıyla birlikte elektrikli tahrik teknolojisinin entegrasyonu da vurgulanmıştır (Yu ve ark., 2020).

Elektrikli araçlar içten yanmalı motorlu araçlara göre bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bunları şu şekilde sıralayabiliriz;

#### Avantajlar:

- Çevre dostu: Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlara göre çok daha az karbon emisyonu üretirler. Bu durum, hava kalitesini iyileştirme ve iklim değişikliğiyle mücadele etme çabalarında önemli bir rol oynar. Elektrikli araçlar genellikle yerel hava kalitesini artırarak şehirlerdeki hava kirliliğini azaltırlar (Requia ve ark., 2018).

- Daha düşük işletme maliyeti: elektrikli araçların yakıt maliyeti genellikle benzinli veya dizel araçlara göre daha düşüktür. Bir elektrikli aracın kilometre başına maliyeti, elektriğin litre başına maliyetinden hesaplandığında genellikle daha ekonomiktir. Elektrikli araç sahipleri genellikle enerji maliyetlerini azaltmak için daha uygun elektrik tarifelerini seçebilirler. Ayrıca, elektrikli araçlar içten yanmalı motorlara göre daha az hareketli parça içerirler. Bu durum, bakım maliyetlerinin genellikle daha düşük olmasına yol açar. Örneğin, motor yağı değişimleri, filtre değişimleri, egzoz sistemleri gibi rutin bakım işlemleri elektrikli araçlarda gereksizdir veya çok daha az sıklıkta yapılır. Bu da elektrikli araç sahiplerinin bakım ve onarım maliyetlerinden tasarruf etmelerini sağlar (Lyons ve ark., 2023).

- Yüksek verimlilik: Elektrikli motorlar, içten yanmalı motorlara göre genellikle daha yüksek bir verimlilik sağlarlar. İçten yanmalı motorlarda, yakıtın kimyasal enerjisinin sadece küçük bir kısmı harekete dönüşürken geri kalanı ısı ve diğer kayıplar olarak ortaya çıkar. Bu nedenle, içten yanmalı motorlu araçlarda enerjinin kullanım verimliliği daha düşüktür. Öte yandan, elektrikli motorlar çok daha yüksek bir enerji dönüşüm verimliliği sağlarlar. Elektrik enerjisi doğrudan mekanik harekete dönüşür ve bu süreçte enerji kayıpları oldukça azdır. Elektrikli araçların motorları genellikle %85 ila %95 arasında bir verimlilikle çalışabilirler. Bu durum, daha az enerji tüketimi ve daha uzun menzil sağlamalarını mümkün kılar (Ünlü ve ark., 2003)

- Sessiz Çalışma: elektrikli araçlar genellikle benzinli veya dizel motorlu araçlara göre çok daha sessiz çalışırlar. İçten yanmalı motorların patlama ve silindirlerdeki hareketleri nedeniyle oluşan gürültü, elektrikli araçlarda bulunan elektrik motorlarına kıyasla çok daha belirgindir. Elektrikli araçların sessiz çalışması, özellikle şehir içi ortamlarda önemli bir avantaj sağlar. Bu durum, şehir içi gürültü kirliliğini azaltır ve çevre dostu bir yaşam ortamı yaratılmasına katkıda bulunur. Özellikle yoğun trafiğin ve insanların yoğun olduğu bölgelerde, elektrikli araçların sessizliği daha rahat bir yaşam ve çalışma ortamı sunar (Ünlü ve ark., 2003).

- Devlet teşvikleri: Birçok ülke, elektrikli araçların satın alınmasını teşvik etmek için vergi indirimleri, sübvansiyonlar ve diğer mali teşvikler sunar. Ancak, Y. Liu ve ark. (2023), mali teşviklerin EV'nin erken benimsenmesinde etkili olduğunu buna rağmen sürdürülebilir olmadığını ve daha geniş çapta benimsenmesi için başka politika önlemlerine ve mali olmayan teşviklere ihtiyaç duyulduğunu, ayrıca şarj stratejisi, pil ve davranışla ilgili zorlukların da önemli olduğunu belirtti.

- Daha iyi performans: Elektrikli araçlar anında tork sağlar ve bu özellikleri hızlanma ve genel performans açısından büyük bir avantaj sağlar. Tork, bir motorun döndürme gücünü ifade eder ve elektrikli motorlar bu gücü anında üretebilirler. Bu özellik, elektrikli araçların hızlanma sürelerini kısaltır ve trafikte daha dinamik bir sürüş deneyimi sunar (Mohanty ve ark., 2023).

- Enerji çeşitliliği: Elektrikli araçlar enerjiyi sadece geleneksel fosil yakıtlardan değil, yenilenebilir enerji kaynaklarından da alabilirler (Richardson, 2013). Bu özellikleri, enerji bağımlılığını azaltma ve çevresel etkileri minimize etme açısından büyük bir avantaj sağlar.

- Yenilikçi teknolojiler: Elektrikli araçlar, genellikle en son teknoloji ve özelliklerle donatılmıştır. Bu, sürüş deneyimini artırır ve güvenlik, konfor gibi alanlarda avantaj sağlar (Kumar ve Revankar, 2017).

#### Dezavantajlar:

- Menşei maliyeti: Elektrikli araçların satın alma maliyeti genellikle içten yanmalı motorlu araçlardan daha yüksektir (Gärling ve Thøgersen, 2001). Bu durum, bazı tüketiciler için yatırım yapılabilirlik açısından önemli bir engel teşkil edebilmektedir.

- Şarj altyapısı: Elektrikli araçlar için şarj altyapısının yeterince gelişmemiş olması, kullanıcılar için önemli bir zorluk olabilir. Elektrikli araçlar, şarj altyapısı

ihtiyacını karşılamak için şebeke bağlantılı şarj istasyonlarına ve ev şarj ünitelerine bağımlıdır (Delucchi ve Lipman, 2001). Ancak, bu şarj istasyonlarının ve uygun şarj noktalarının yeterli sayıda ve kullanıcıların erişimine açık olması gerekmektedir. Birçok bölgede, şehir içi ve şehirlerarası yolculuklar için güvenilir şarj altyapısı hala yeterli düzeyde değildir. Bu durum, elektrikli araç sahiplerinin seyahat planlarını yaparken şarj noktaları konusunda önceden plan yapmalarını ve bazen de uzun sıralar beklemelerini gerektirebilir.

- Şarj süresi ve menzil endişesi: Şu anda kullanılan batarya teknolojileri nedeniyle, elektrikli araçların şarj süreleri ve menzilleri hala içten yanmalı motorlu araçlarla kıyaslandığında sınırlı olabilir (Gärting ve Thøgersen, 2001). Bazı kullanıcılar için bu durum, uzun mesafe seyahatlerinde planlama gerektirebilir.

- Batarya ömrü ve maliyeti: Elektrikli araç bataryalarının belirli bir kullanım süresinden sonra kapasiteleri azaltabilir ve şarj sürelerinde uzamalar, menzil azalmaları gibi performans kayıpları meydana gelebilir. Bu durum, özellikle aracın çok sık şarj edilmesi veya yüksek sıcaklık veya soğuk gibi çevresel faktörlere maruz kalması durumunda daha hızlı olabilir.ve bu durumun değiştirilmesi maliyetli olabilir. Batarya teknolojisinin gelişmesiyle bu sorun azalmakta olsa da hala dikkate alınması gereken bir faktördür.

- Ağırlık ve tasarım kısıtlamaları: Elektrikli araçlar genellikle daha ağır olabilirler ve bu da bazı durumlarda viraj alma performansı ve manevra kabiliyeti gibi sürüş dinamikleri veya taşıma kapasitesi açısından kısıtlamalara neden olabilir.

- Ses ve alışkanlık: Elektrikli araçlar sessiz çalıştıkları için bazı sürücüler alışık olmadıkları bir sürüş deneyimi yaşayabilirler. Ayrıca, bu sessizlik yayalar ve diğer sürücüler için fark edilme güçlüğü yaratabilir.

## **1.2.2. Elektrikli araçların sınıflandırılması**

Elektrikli araçlar, kullanılan motor ve batarya tiplerine göre sınıflandırılırlar:

### **1.2.2.1. Yakıt hücresi elektrikli araçlar (FCEV)**

Yakıt hücresi elektrikli araçlar (FCEV), hidrojeni yakıt olarak kullanarak elektrik üreten araçlardır. Bu tür araçlar, yakıt hücresi aracılığıyla hidrojeni havadaki oksijenle

reaksiyona sokarak su ve elektrik enerjisi üretirler. Üretilen elektrik enerjisi, motoru çalıştırmak ve hareket sağlamak için kullanılır (Kuşdoğan, 2009).

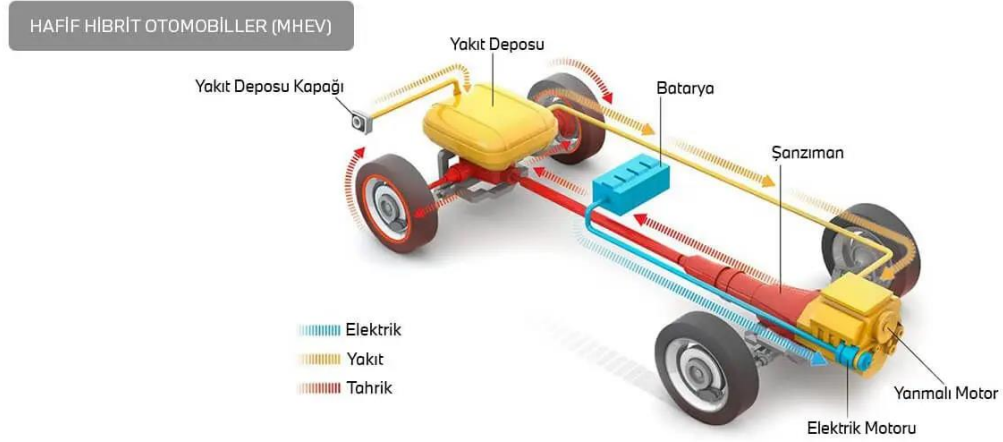
Yakıt hücreli araçlar düşük emisyonlu ve sessiz çalışma, uzun menzil ve hızlı dolum süresi gibi avantajlara sahiptir. Ancak, yakıt hücreli araçların yaygın olarak kullanılması için bazı engeller vardır. Bunlar arasında yüksek maliyetler, hidrojenin depolanması ve dağıtımıyla ilgili altyapı zorlukları ve hidrojen üretimi için büyük miktarda elektrik gerekir. Sonuç olarak, yakıt hücreli elektrikli otomobiller, sıfır emisyonlu ve uzun menzilli alternatif bir taşıma çözümü olarak potansiyel sunmaktadır, ancak teknolojinin gelişmesi ve altyapının genişlemesi gerekmektedir.

#### **1.2.2.2. Hibrit elektrikli araçlar (HEV)**

Hibrit elektrikli araçlar hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru kullanarak çalışan ve bu sayede yakıt tüketimini azaltan araçlardır. Genellikle iki tür hibrit elektrikli araçtan bahsedilir:

##### **1.2.2.2.1. Hafif hibrit elektrikli araçlar (MHEV)**

Hafif hibrit araçlarda elektrikli motor, genellikle içten yanmalı motorla birlikte çalışarak performansı artırır ve yakıt tüketimini azaltmaya yardımcı olur. Özellikle kalkış ve hızlanma gibi durumlarda elektrikli motor devreye girer ve içten yanmalı motora destek sağlar. Bu şekilde, içten yanmalı motor daha verimli çalışabilir veya daha küçük bir motor kullanılabilir, bu da yakıt ekonomisini artırırken emisyonları azaltabilir (Öztürk, 2013).

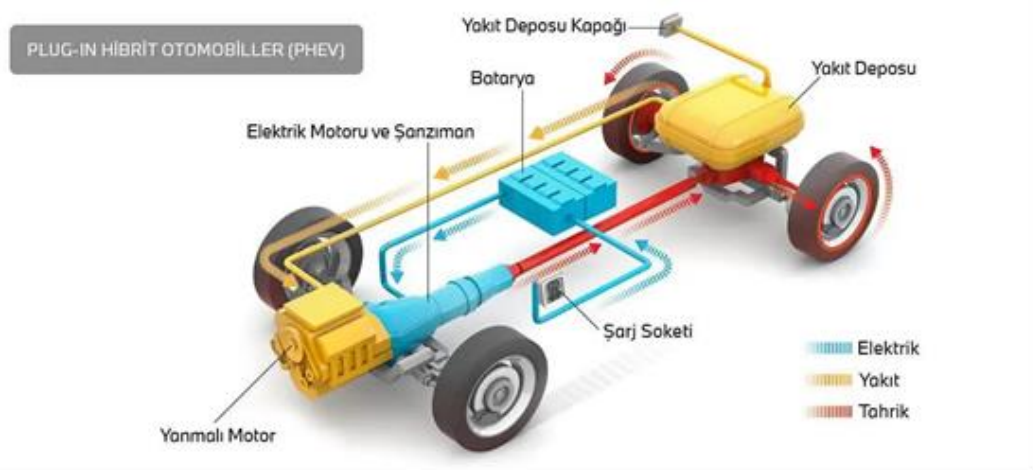


**Şekil 1.1.** Hafif hibrit elektrikli araçların bileşenleri (Gürbüz, 2021).

Bataryalar ise genellikle rejeneratif frenleme sistemi sayesinde şarj edilir. Araç frenlendiğinde veya yavaşladığında, kinetik enerji geri kazanılır ve elektrikli motor tarafından bataryalara enerji olarak geri gönderilir. Bu sayede bataryalar otomatik olarak şarj edilir ve ekstra şarj istasyonlarına ihtiyaç duyulmaz. Hafif hibrit otomobiller, tamamıyla elektrikli araçlara (BEV) veya plug-in hibrit araçlara (PHEV) göre daha basit bir elektrifikasyon seviyesi sunar. Bu tür araçlar, yakıt ekonomisi ve emisyonları azaltırken, şehir içi ve banliyö kullanımlarında pratik bir çözüm sunabilirler.

#### 1.2.2.2.2. Plug-in Hibrit Elektrikli araçlar (PHEV)

Plug-in hibrit elektrikli araçlarda (PHEV) hem içten yanmalı hem de elektrikli motor mevcuttur. Araç her iki motorla da ayrı ayrı çalıştırılabilir. Bu otomobiller, enerji kaynağı olarak geri kazanımlı frenlemeyi kullandıkları gibi; bataryanın yeniden şarj edilmesi için bir prize de bağlanabilir. Plug-in hibrit otomobil (PHEV) bir şarj istasyonuna park edildiğinde de bataryasını yeniden şarj etme kapasitesine sahiptir. Bu özellik, tam olarak şarj edilmiş bir bataryayla tamamen elektrikli olarak 45 km yol kat edebilen bir plug-in hibrit otomobilin elektrikli menzili önemli ölçüde artırır. Bu özellikleri nedeniyle hem içten yanmalı motorlu araçlara hem de elektrikli araçlara göre daha karmaşık yapıya sahiptirler (Gaton, 2018).

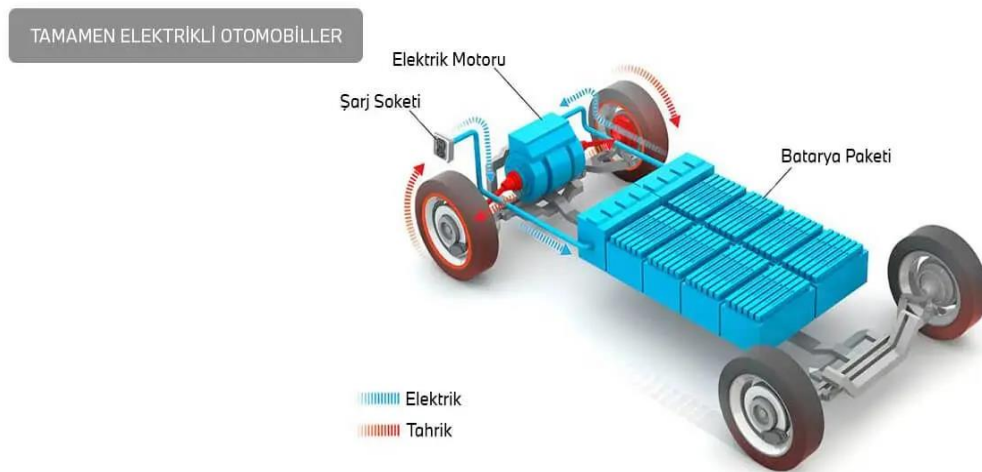


Şekil 1.2. Plug-in hibrit elektrikli araçların bileşenleri (Gürbüz, 2021).

### 1.2.2.3. Tamamen elektrikli araçlar (BEV)

Tamamen elektrikli araçlar (BEV'ler), içten yanmalı motorların aksine, motoru çalıştırmak için yakıtın yanmasına ihtiyaç duymak yerine bataryadan aldıkları elektrik enerjisiyle çalışırlar ve bu bataryaların kapasitesi, aracın tek bir şarjla gidebileceği mesafeyi belirler. Günümüzde çoğu BEV, 300 km veya daha fazla menzile sahiptir ve bu menzil, birçok sürücü için günlük ihtiyaçları karşılamak için yeterlidir.

Ancak, bazı sürücüler için uzun mesafe seyahatleri veya gün içinde daha uzun yolculuklar gerekebilir. Bu durumlarda, şarj altyapısının gelişimi önemlidir. Şehir içi ve otoyol üzerindeki şarj istasyonları sayısı artmaktadır ve bu durum, elektrikli araç sahiplerinin günlük yaşamlarında ve uzun mesafe seyahatlerinde daha fazla rahatlıkla kullanabilecekleri anlamına gelmektedir (Demir, 2011).



Şekil 1.3. Tamamen elektrikli araçların iç yapısı (Gürbüz, 2021).

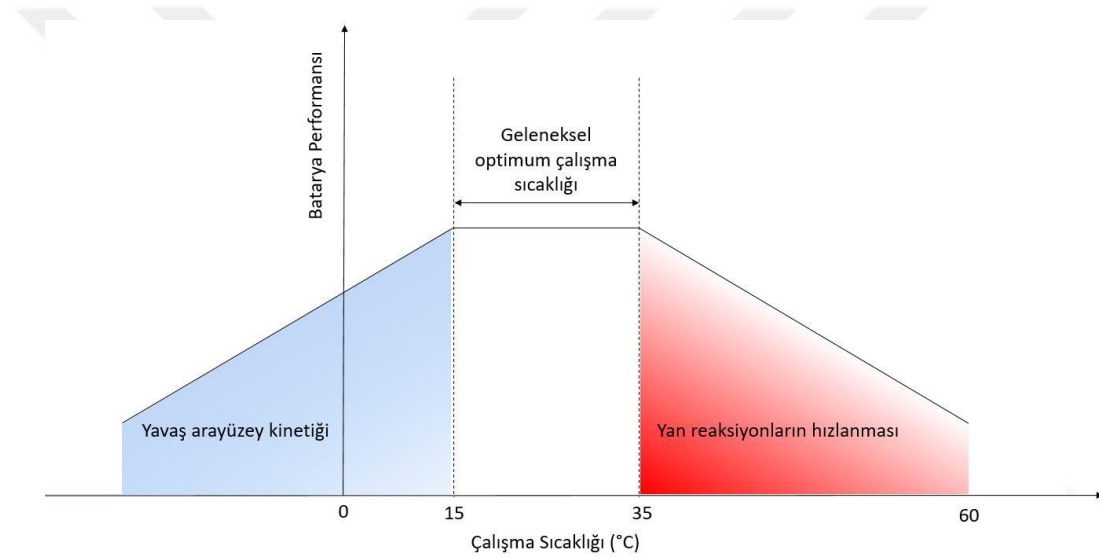
Menzil endişesi genellikle gerçekten kullanım alışkanlıkları ve günlük ihtiyaçlarla ilgilidir. Çoğu sürücü için günlük kullanım için sağlanan menzil yeterli olmakla birlikte, uzun mesafe seyahatlerinde bataryanın bitme riski olması sürücülerini endişelendirebilir. Bu noktada, menzil artırıcılar veya hızlı şarj imkanları (rapid charger) önem kazanır. Menzil artırıcılar, örneğin benzinle çalışan jeneratörler gibi, bir BEV için doğrudan güç sağlamazlar, çünkü bu durum bir hibrit otomobil oluşturmazdı.

Şarj altyapısının gelişmesiyle birlikte, elektrikli otomobillerin uzun mesafe yolculukları daha kolay ve erişilebilir hale gelmektedir. Bu nedenle, BEV'lerin gelecekte uzun mesafeli yolculuklar için daha uygun hale geleceği söylenebilir, çünkü şarj istasyonları ağı genişledikçe ve teknoloji ilerledikçe menzil endişesi azalacaktır.

### 1.2.3. Li-ion bataryalar

Li-ion piller, lityum iyonlarının elektrokimyasal hareketleri sonucu enerji üreten ve ürettiği enerjiyi depolayabilen şarj edilebilir bataryalardır. Verimli ve güvenilir enerji ve enerji depolama sistemleri modern toplumumuz için çok önemlidir. Lityum iyon pillere (LIB'lere) olan ilgi, verimli enerji depolama ve çevresel sürdürülebilirlik sağlama konusundaki yüksek potansiyelleri nedeniyle her geçen gün artmaktadır. LIB'ler şu anda yalnızca bilgisayarlar ve cep telefonları gibi taşınabilir elektronik cihazlarda değil, aynı zamanda elektrikli veya hibrit araçlarda da kullanılmaktadır. Li-ion pillerin çok sayıda avantaja sahip olması onların çok çeşitli alanlarda kullanılmasına uygun hale getirmektedir. Bunlar arasında özellikle otomotiv uygulamalarında önemli olan yüksek enerji ve güç yoğunluğu yer almaktadır (Adnan, 2023). Ayrıca yüksek enerji verimliliğine, hafıza etkisi eksikliğine, uzun çevrim ömrüne ve yüksek güç yoğunluğuna sahiptirler ve bu da onları diğer geleneksel şarj edilebilir pillerden daha küçük ve daha hafif kılmaktadır (Ding ve ark., 2019). Yenilenebilir enerji sistemlerinde kullanılan Li-ion piller, kurşun asitli pillere göre daha uygun fiyatlı ve daha uzun ömürlü bir alternatif olma potansiyeline sahiptir (Diouf ve Avis, 2019). Ayrıca LIB'ler sahip oldukları yüksek özgül kapasite ve voltaj, hafızanın olmaması, mükemmel döngü performansı, deşarj süresinin uzun olması ve geniş sıcaklık aralığı gibi diğer pil sistemlerine göre doğal avantajları nedeniyle, şu anda taşınabilir elektronik cihazlar için pil pazarına hakimdirler. Ancak pillerin maliyeti ve geri dönüşüm sorunları, aşırı şarj-deşarj ve

soğuk-sıcak iklim koşullarında termal bozunma ve performans kaybı yaşaması gibi dezavantajlar bataryalarla ilgili kritik konulardan birinin batarya grubunun termal yönetiminin olduğunu göstermektedir. Li-ion pillerinin performansı pillerin çalışma sıcaklığı ile doğrudan ilişkilidir. Pil üreten firmalar tarafından belirlenen sıcaklık değerleri şarj için 0–45 °C, deşarj için ise -20 – 60 °C arasındadır. Ancak bu değerler belirlenen en uç değerlerdir. Bataryalarla ilgili yapılan çalışmalar sonucunda farklı değerler söz konusu olsa da genel olarak bataryaların verimli çalışması için gerekli sıcaklık değerleri 15-35 °C aralığındadır (Pesaran ve ark., 2013). Düşük sıcaklıklarda çalışmak bataryanın kapasitesini düşürürken yüksek sıcaklıklar patlama riskinin yanı sıra bataryanın ömrünü kısaltıp bozulmaya neden olmaktadır.



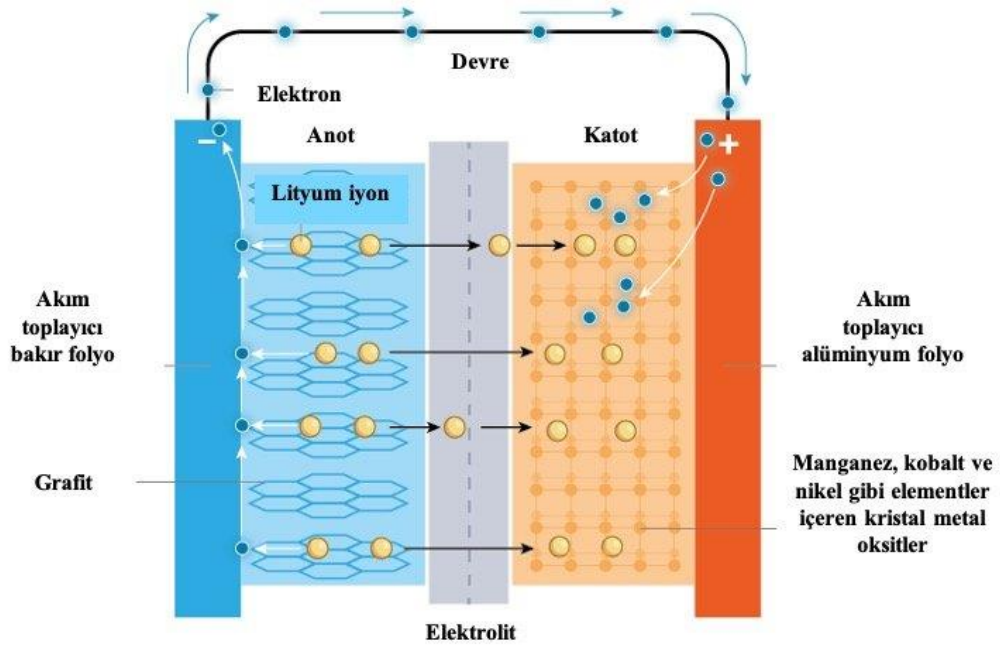
Şekil 1.4. Li-ion bataryalarda çalışma sıcaklıkları (Dursun, 2024).

#### 1.2.3.1. Düşük sıcaklık şartlarının Li-ion bataryalar üzerindeki etkisi

Lityum iyon piller daha yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömür gibi üstün özelliklere sahip olmalarından dolayı kurşun asit piller, nikel bazlı piller ve sodyum bazlı piller gibi farklı pil teknolojilerine kıyasla elektrikli araç endüstrisinde ve enerji depolama endüstrisinde en çok tercih edilen pil türü olarak karşımıza çıkmaktadırlar.

Ancak bu endüstriler gelecek nesil uygulamalarda daha düşük maliyet, hızlı şarj oranları ve geliştirilmiş sıfır altı sıcaklık performansı/termal stabiliteye sahip daha iyi pillere ihtiyaç duymaktadırlar.

Her ne kadar LIB'ler günümüzde birçok gereksinimi karşılıyor olsa da çalışma ortamındaki sıcaklık, basınç ve titreşim gibi belirli faktörlere karşı duyarlıdırlar. Ortam sıcaklığı, LIB'lerin kapasitesi, mevcut gücü, şarj/deşarj verimliliği, güvenliği ve kullanım ömrü gibi genel performansını önemli ölçüde etkiler. LIB'lerde meydana gelen sorunları anlayabilmek için öncelikle LIB'leri meydana getiren bileşenleri ve LIB'lerin çalışma prensibini bilmek gerekmektedir.



Şekil 1.5. Li-ion bataryaların iç yapısı ve çalışma prensibi (Jones, 2024).

Şekil 1.5’de gösterildiği gibi LIB’ler katot (pozitif elektrot), anot (negatif elektrot), ayrılcı ve elektrolit (sıvı veya jel) olmak üzere 4 ana parçadan oluşmaktadır. Bu bileşenlerin her biri, bataryanın işleyişinde önemli bir rol oynar.

Temel bileşenler anot genellikle grafit (karbon) malzemelerden yapılır, katot ise genellikle lityum metal oksitlerden ( $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiFePO}_4$  gibi) yapılır. Ayrılcı anot ve katot arasında yer alır ve kısa devreyi önlerken lityum iyonlarının geçişine izin verir. Gözenekli bir membran olan ayrılcının birincil işlevi hücre içerisinde iyon transferini mümkün kılarken, anot ve katodun fiziksel temasını önlemektir. Elektrolit ise lityum iyonlarının anot ve katot arasında hareket etmesini sağlayan iletken bir sıvı veya jelden meydana gelir.

Anot ve katot bir şarj cihazına bağlandığında, elektrotlar bir indirgeme-oksidasyon (redoks) reaksiyonuna girer. Şarj sırasında katotta oksidasyon meydana

gelir, bu da elektronların kaybolmasına (oksidasyon durumunun artması) ve bu elektronların harici bir devre yoluyla anoda gitmesine neden olur. 7

Pil şarj edildiğinde, pilin pozitif elektrotunda lityum iyonları üretilir ve üretilen lityum iyonları, elektrolit yoluyla negatif elektrotta doğru hareket eder. Anot olarak karbon katmanlıdır. Çok sayıda mikro gözenekleri vardır. Negatif elektrotta ulaşan lityum iyonları, karbon tabakasının mikro gözeneklerine gömülür. Ne kadar çok lityum iyonu gömülü olursa, şarj kapasitesi de o kadar yüksek olur.



Katottan gelen lityum iyonları, elektrolit tarafından ayırıcı aracılığıyla anoda iletilir. Anot, indirgeme adı verilen bir işlemle (oksidasyon durumunun azalması) elektronları katottan alır.



Bu süreçte lityum iyonları ve elektronlar anotta birleşir. Şarj sırasında lityum iyonları katottan anoda doğru hareket ederken, elektronlar harici devreden geçerek aynı yönde akar. Lityum iyonları çok sayıda mikro gözeneğe sahip olan karbon tabakasının mikro gözeneklerine gömülür bu durum anotta lityum iyonlarının depolanmasına yol açar.

Deşarj sırasında, anot oksidasyona uğrarken, daha öncesinde oksidasyona uğramış olan katot lityum iyonları ve elektronlar ile birleşerek bir indirgeme reaksiyonuna uğrar ve elektronlar cihazın çalışmasını sağlamak için harici devre boyunca akar. Bu indirgeme-oksidasyon reaksiyonları, lityum iyon bataryaların enerji depolama ve serbest bırakma süreçlerini yönetir, böylece şarj ve deşarj döngüleri gerçekleşir.

Anot Oksidasyonu:



Katot İndirgenmesi:



Standart bir anot ve katot sistemi aracılığıyla çalışan, Li<sup>+</sup> iyonlarından elektronların şarj ve deşarj kolaylığı büyük miktarda enerji üretilmesine olanak tanır.

Çin'deki toplam toprakların %38'inde kış sıcaklığı -20 °C'nin altına düşmektedir. Düşük sıcaklık etkileri çoğunlukla Rusya, Kanada ve Grönland gibi soğuk ülkelerde

LIB'ler ile çalışan elektrikli ve hibrit araçlarda sorun teşkil etmektedir. Yüksek enleme sahip ülkelerde bu sıcaklık  $-40^{\circ}\text{C}$ 'lere kadar düşebilmektedir bu yüzden LIB'lerin  $-40^{\circ}\text{C}$  gibi düşük sıcaklıklara dayanabilmesi gerekmektedir (Piao ve ark., 2022). Ayrıca Mars'ta sıcaklık  $-120^{\circ}\text{C}$ 'lere kadar düşebilmektedir bu durum LIB'Lerin uzay araştırmalarında kullanımını kısıtlamaktadır (Shuai Ma ve ark., 2018). Sıfırın altındaki sıcaklıklarda LIB'lerin elektrokimyasal performansı ciddi şekilde bozulur ve bu durum şarj/deşarj kapasitesinin düşmesi, enerji ve güç kapasitesinin düşmesi, daha kısa ömür gibi negatif etkilere sebep olmaktadır (Piao ve ark., 2022). Düşük sıcaklıklarda elektrolit iletkenliği ve lityum iyonunun anot içerisine difüzyonu yavaşlar. Bu tür bir azalma, enerji ve güç kapasitesinin azalmasına ve hatta bazen performansın düşmesine neden olacaktır (Shuai Ma ve ark., 2018). Ayrıca grafitin lityum-iyon interkalasyon kapasitesi de azalır (MMC). İnterkalasyon işlemi, moleküllerin veya iyonların katmanlı katıların ara katmanına eklenmesine denir (Laipan ve ark., 2020). Yani lityum iyon bataryalar bağlamında, interkalasyon lityum iyonlarının anot ve katot materyallerinin kristal yapıları arasına girip çıkması anlamına gelir.

Sıfırın altındaki sıcaklık değerleri için, kabinin ısıtılması için ek enerji tüketilir. Ancak buna rağmen li-ion pillerde menzil kaybı oluşur. Bu durum soğuk şartlarda li-ion pillerde azalan enerji ve gücün yanısıra bataryanın şarj edilmesi sırasında lityum kaplama nedeniyle de kapasitesinin azalmasıyla doğrudan ilişkilidir (Fan ve Tan, 2006). Temel olarak li-ion pillerin soğuk şartlarda performansında meydana gelen azalma, yük aktarımının yavaş olmasından, düşük elektrolit iletkenliğinden ve azaltılmış katı li yayılımından kaynaklanmaktadır (Huang ve ark., 2000). Bu zorlukların üstesinden gelebilmek için uygun elektrolit malzemesi seçmek bir seçenektir. Ayrıca başka bir seçenek de pilin normal çalışma sıcaklığına hızlı bir şekilde ısıtılmasını sağlayan pil termal yönetimi sistemleridir (Pesaran ve ark., 2003). Sıfırın altındaki sıcaklık değerlerinde pil performansında meydana gelen azalma iç dirençte önemli bir artış olduğunun göstergesidir.  $-20^{\circ}\text{C}$  sıcaklık ve oda sıcaklığındaki iç direnç değerleri karşılaştırılan bir pil hücresi için,  $-20^{\circ}\text{C}$ 'de 10 kat artış olduğu gözlemlenmiştir. İç direncin yüksek olması, hücre enerjisinin ve güç kapasitesinin azalmasına neden olur, ancak daha fazla dahili ısı üretimi nedeniyle hücrenin ısınması açısından faydalıdır, bu da kayda değer bir sıcaklık artışına neden olabilir ve böylece hücre performansını geri kazanabilir (Zhang ve ark., 2006). Li-iyon hücrelerin sıfırın altındaki sıcaklıklarda çalışması sırasında, elektrokimyasal ve termal işlemler arasında güçlü bir etkileşim

vardır. Bir yandan, elektrokimyasal işlemlerden üretilen ısı ve çevreye yayılan ısı, hücre sıcaklığının gelişimini belirler. Öte yandan hücre sıcaklığı, yüksek derecede sıcaklığa bağlı kinetik ve taşıma özellikleri yoluyla elektrokimyasal süreçleri etkiler.



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Nagasubramanian (2001) A&T, Moli ve Panasonic 18650 marka Li-ion hücrelerinin düşük sıcaklıktaki elektriksel performans özellikleri açıklayabilmek için, 25 °C'den -40 °C'ye kadar farklı sıcaklıklar için hücrelerin özgül enerji ve özgül güç verilerinin Ragone grafiklerini karşılaştırmıştır. Çalışması sonucunda örneğin Panasonic hücrelerin 25°C derecede güç ve enerji yoğunluklarının sırasıyla yaklaşık olarak 800W 1-1 ve 100Wh 1-1 iken, -40°C 'de <10 W 1-1 ve yaklaşık 5 Wh 1-1 'e düşerek ciddi bir performans kaybına uğradığını belirtmiştir.

Zhang ve ark. (2002) LiPF<sub>6</sub> yerine LiBF<sub>4</sub> bazlı elektrolite sahip bir pil hücresi kullanarak düşük sıcaklık altında elektrolitin etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları testler sonucunda, LiBF<sub>4</sub> bazlı elektrolite sahip bir hücre için, sıcaklık 20 °C'nin altına düştüğünde Li-iyon hücresindeki yük aktarım sürecinin direncinin önemli ölçüde arttığını dolayısıyla daha gelişmiş bir düşük sıcaklık performansına sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Zhang ve ark. (2003) Li-ion pilin düşük sıcaklıklarda performansını incelemek amacıyla Li-ion hücrelerin empedanslarının yığın direncinden ( $R_b$ ), yüzey katmanı direncinden ( $R_{sl}$ ) ve yük aktarım direncinden ( $R_{ct}$ ) oluştuğunu göstermişlerdir. Sıcaklık -10 °C'nin altına düştüğünde  $R_{ct}$  değerinin belirgin bir şekilde arttığını ve baskın hale geldiğini, bu nedenle de Li-ion pilin düşük sıcaklık performansının düşük olmasını, grafit ve katodun oldukça yüksek  $R_{ct}$ 'sine bağlanabileceğini belirtmişlerdir.

Bugga ve ark. (2007) NASA görevlerinde istenen, yüksek özgül enerjiye ve geniş çalışma sıcaklığı aralığına sahip gelişmiş lityum iyon piller geliştirmek amacıyla testler yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda aynı akım değeri için bir Li-ion pilin -20 °C'deki mevcut enerjisinin oda sıcaklığı değerinin %60'ı kadar kayba uğradığını belirtmişlerdir.

H. S. Song ve ark. (2012) bir simülasyon sistemi kullanarak soğuk başlatma uygulamaları için bir hava ısıtma stratejisi araştırmışlardır ve deneysel sonuçları, düşük sıcaklıktaki bir ortamda, etrafındaki havanın oda sıcaklığına kadar ısıtılması durumunda pilin daha fazla kapasiteyi koruduğunu çalışmalarında göstermişlerdir.

Ji ve Wang (2013), Li-ion pillerin sıfırın altındaki sıcaklıklarda ısıtılması sürecini ilk kez simüle etmek için elektrokimyasal-termal bağlı bir model kullanmışlardır. Çalışmada batarya gücü kullanılarak üç ısıtma stratejisi önerilmiş ve

karşılaştırılmıştır; kendi kendine ısıtma, konvektif ısıtma ve karşılıklı darbeli ısıtma ve ayrıca harici güç kullanan bir strateji (AC ısıtma). Avantajları ve dezavantajları kapasite kaybı, ısıtma süresi, sistem dayanıklılığı ve maliyet açısından tartışılmıştır. Çalışma sonucunda pil gücünü kullanarak ısıtma için Li-ion pillerin, yüksek verimli DC-DC dönüştürücüyle karşılıklı darbeli ısıtma kullanılarak yalnızca %5 pil kapasitesi kaybı pahasına -20°C'den 20°C'ye ısıtılabilceğini ortaya koymuşlardır.

Zhinguo Lei ve ark. (2014) soğuk koşulların elektrikli araçlarda li-ion pillerin performansı üzerindeki etkilerini araştırmak için 35 Ah gücünde bir li-ion pilin soğuk ve sıcak koşullarda şarj-deşarj özelliklerine ilişkin deneyler gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, 10A'da -10°C'de, nominal kapasitenin %60,23 ü iletilebilirken 10A -40°C de yalnızca %22'si iletilebildiğini göstermiştir.

Petzl ve ark. (2015) düşük sıcaklık ve yüksek şarj hızında uzun süreli çevrim sırasında pillerin yaşlanma davranışının tahribatsız karakterizasyonunu incelemişlerdir. Çalışmalarında pillerin ömrünün 45 °C'de 2000 döngüden fazla iken, -22 °C'de yalnızca 90–140 döngü arasında olduğunu belirtmişlerdir.

Waldmann ve ark. (2015) düşük sıcaklığın pilin ciddi şekilde zayıflamasına nasıl neden olduğunu araştırmak için ticari 18650 pillerin bir dizi ortam sıcaklığı altında kapasitelerinin azalmasını test etmişlerdir. 0-25 °C aralığında sıcaklık azaldıkça kapasite sönüm oranının arttığını çalışmaları sonucunda belirtmişlerdir.

Z. Song ve ark. (2015) çalışmalarında, elektrikli araçlarda (EV'ler) kullanılan yarı aktif pil/süper kapasitör (SC) hibrit enerji depolama sisteminin (HESS) sıfırın altındaki sıcaklıklarda termal analizini yapmışlardır. HESS'in sıfırın altındaki sıcaklıklarda çoklu Çin Otobüs Sürüş Döngüsü (CBDC) üzerinden gerekli ısıtılması, sistem işletme maliyeti değerlendirilerek analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları, sürüş mesafesinin, akü fiyatının ve ısıtma verimliliğinin artmasının yanı sıra ortam sıcaklığının azalmasıyla birlikte ısıtma işleminin giderek daha gerekli hale geldiğini göstermektedir.

Azizi ve Sadrameli (2016) çalışmalarında yüksek sıcaklık bölgelerinde (50–55 °C) pillerin sıcaklık artışını kontrol etmek için LiFePO<sub>4</sub> paketinin termal yönetim sistemi için bir faz değiştiren malzeme ve alüminyum tel örgü plakalardan oluşan bir bileşik kullanarak testler yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda, hücreler arasında PCM ve alüminyum tel örgü plakaların kullanılmasının yüzey sıcaklığını önemli ölçüde azaltılabileceğini ve pil takımı için daha iyi performansa neden olduğunu belirtmişlerdir.

Ling ve ark. (2016) çalışmalarında RT28/füme silika kompozit faz değiştirme malzemesi içeren ve içermeyen bir li-ion pilin 5 °C'nin altındaki sıcaklıklarda performansını incelemişlerdir. Pili kısa bir süre soğuk bir ortama koyduktan sonra, PCM'li pilin daha sıcak olduğunu ve dolayısıyla daha küçük bir iç dirence ve daha iyi malzeme özelliklerine sahip olduğunu ve yüksek terminal voltajını koruduğunu gözlemlenmiştir. Ancak pil performansı, soğuk ortamda uzun süre bekletildikten sonra PCM'nin varlığı nedeniyle düşmüştür. PCM'nin daha büyük termal kütlesi, pilin kendi kendine ısınmasını önleyerek güç ve kapasite kaybına neden olmuştur.

Ghadbeigi ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada Li-ion pillerin pasif termal yönetim sisteminin soğuk ortamda performansını değerlendirmek amacıyla, saf parafin ve parafin-grafit kompozitlerinden oluşan iki farklı faz değişim malzemesini ele almış (PCM) ve PCM malzemesinin bulunmadığı bir pil modülü ile karşılaştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda, termal yönetim sistemleri aşırı ısınmayı önlemeye çalışıldığında normalde yüksek sıcaklıklarda bir zarar olarak kabul edilen parafin mumunun düşük termal iletkenliğinin, modülü sıcak tutarak ve dolayısıyla enerjiyi artırarak kısa (10 dakikalık) soğuk bekletmeler sırasında aslında hafif bir avantaj sağlayabileceğini göstermişlerdir. Öte yandan parafin mumunu uzun süre soğukta beklettikten sonra parafin PCM'nin ısınma hızının, ticari PCM'ye veya PCM içermeyen modüllere kıyasla %29 daha yavaş ve bunun da önemli bir enerji kaybına neden olduğunu belirtmişlerdir.

Ouyang ve ark. (2019) düşük sıcaklıkta farklı döngü hızlarının LIB üzerindeki etkisini ölçmek ve aynı zamanda düşük sıcaklığın piller üzerinde meydana getirdiği hasarı önlemek için bir ticari yalıtım malzemesi kullanarak bir dizi deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, voltaj, kapasite ve pil yüzey sıcaklığı gibi spesifik parametreler ölçmüştür; sıcaklık ve voltaj da dahil olmak üzere pilin tekdüzeliğini tartışmışlardır.

Xu ve ark. (2019) LIBlerin düşük sıcaklıklarda çalışma sınırlarını genişletmek amacıyla LI<sup>+</sup> ile solvent molekülü arasında düşük bağlanma enerjisine sahip 1,3-dioksolan bazlı bir elektrolit seçmişlerdir. Ayrıca, ultra düşük sıcaklıkta elektrot malzemesinin azaltılmış difüzyon katsayısını telafi etmek için, elektrot malzemesi olarak nano ölçekli lityum titanat kullanarak -80°C'de oda sıcaklığı kapasitesinin yaklaşık %60'ını sağlayan bir LIB olabileceğini göstermişlerdir.

M. Chen ve ark. (2019) iki farklı konfigürasyondaki (6x6 ve 10x10) paketteki çoklu LIB'lerin termal ve yangın yayılım davranışlarını analiz etmek için deneyler

yapmışlardır. LIB'lerin termal tehditlerini karakterize eden kritik parametreler sıcaklık, ısı yayma oranı (HRR) ve ısı akışıdır. Ayrıca patlama tehlikelerini değerlendirmek için basınç darbesini de deneysel olarak ölçmüş ve analiz etmişlerdir.

Wu ve ark. (2020) çeşitli ortam sıcaklıklarının, farklı deşarj akımlarının ve farklı aerjel kalınlıklarının pilin elektriksel ve termal davranışı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Doğrudan düşük sıcaklığa maruz kalan pille karşılaştırıldığında termal kontrol yöntemiyle  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 3,0A akım altında voltaj %24,95 oranında arttı. ek olarak elektrokimyasal enerji kullanım verimliliğinin çoğu deşarj süresi için %90'dan yüksek olduğu belirtilmiştir.

Fly ve ark. (2021) çeşitli lityum iyon, nikel metal hidrit ve kurşun asit pillerin  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  arasındaki sıcaklıklarda deşarj davranışlarını incelemiş ve karşılaştırma yapmışlardır. Sonuçlar, sıcaklık düşüşüyle birlikte performansta en büyük kaybı sergilemesine rağmen, test edilen lityum iyon pillerin daha yüksek kapasite ve çalışma voltajı nedeniyle  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar en yüksek enerji ve güç yoğunluklarını sağladığını göstermektedir.

F. Liu ve ark. (2022) pillerde termal kaçak tetikleyici olan aşırı şarj durumunun, pil modülünün ısı yalıtımsız ve çeşitli ısı yalıtım malzemeleri kullanılarak yalıtılması sonucu oluşan kaçak tepkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında, ısı yalıtımının batarya modülünün ısı yayılmasını durdurma ve maksimum sıcaklığı düşürme etkisine sahip olduğunu göstermişlerdir. Pillerde meydana gelen sıcaklık değişimini karşılaştırdıklarında, fiber bazlı yalıtım malzemesinin %71,83'lük bir sıcaklık düşürme etkinliğine sahip olduğunu, aerjel malzemelerin ise lifli malzemelere göre sıcaklık düşürmede en az %13 daha verimli olduğunu gözlemlemişlerdir.

K. Yang ve ark. (2023) kapsamlı pil termal yönetimi için doğal kauçuk, genleşmiş grafit ve OP44E PCM arasında esnek bir yalıtım ağı oluşturarak yeni bir kompozit faz değişim malzemesi (CPCM) sentezlemişlerdir. Sentezledikleri CPCM yüksek enerji depolama yoğunluğuna ( $156,5\text{ J/g}$ ), yüksek düzeyde geliştirilmiş dirence ( $2700\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ ) ve çok iyi termal iletkenliğe ( $3,4\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) sahip olmakla beraber, elde edilen CPCM'ler  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  yüksek hızlı deşarj döngüleri altında pil takımının çalışma sıcaklığını  $45^{\circ}\text{C}$  ve sıcaklık farkını  $2^{\circ}\text{C}$  içinde tutarak termal yönetimin yüksek verimliliğini ve güvenilirliğini göstermişlerdir.

Düşük sıcaklıkların lityum iyon (Li-ion) pillerin performansı üzerindeki etkilerini araştıran bu literatür taraması, Li-ion pillerin düşük sıcaklıklarda performans

kaybının özellikle yük aktarım direncinin (R<sub>ct</sub>) artması nedeniyle olduğunu göstermektedir. Araştırmacılar, bu durumu önlemek için elektrolit ve malzeme modifikasyonları, termal yönetim sistemleri, deneysel ve simülasyon çalışmaları, ısıtma ve yalıtım stratejileri gibi çeşitli yöntemler kullanmışlardır.

Bu çalışmada, daha önceki çalışmalardan farklı olarak, batarya kabinlerinde kullanılmak üzere yüksek ısı yalıtım özelliğine sahip, mekanik özellikleri uygun, petrol kökenli olmayan, kolay tedarik edilebilen ve yerli kaynakların kullanımıyla yanmayan yalıtım malzemelerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Çalışmanın ana hedefi, bu yalıtımlı kabin sayesinde batarya verimini ve deşarj süresini artırmaktır.

Bu çalışmalar sonucunda, batarya teknolojilerinde kullanılmak üzere geliştirilecek yeni yalıtım malzemelerinin yüksek performanslı ve çevre dostu olmasının yanı sıra ekonomik ve yerli kaynaklardan üretilebilecek özellikte olması amaçlanmıştır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

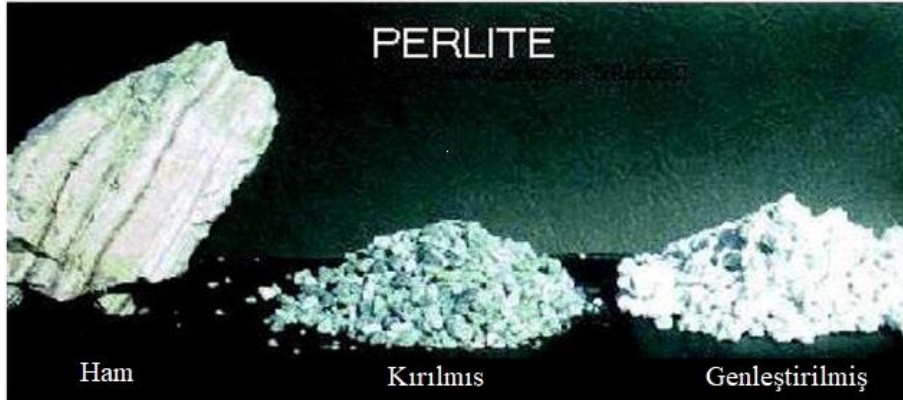
Bu çalışmada batarya teknolojilerinde kullanılmak amacıyla, yüksek ısı yalıtım özelliği olan, mekanik özellikleri uygun olmakla birlikte petrol kökenli olmayan ve kolay tedarik edilebilen ve yerli kaynakların kullanımıyla yanmayan yalıtım malzemeleri geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu amaç doğrultusunda birçok deney ve teorik araştırma yapılmıştır. Bu bölümde, agrega esaslı yalıtım malzemelerinin geliştirilmesi için kullanılan yöntemler ve bu ürünlerin hazırlanmasında kullanılan malzemeler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, kullanılan malzemelerin özellikleri açıklanmış ve üretilen örneklerin mekanik ve ısıl özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan testler detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Tez çalışması 3 ana aşamada gerçekleştirilecektir. Bu aşamalar; 1. yeni yalıtım numunelerin üretilmesi, ısı, mekanik ve malzeme karakterizasyon test çalışmalarının yapılması, 2. kabin-pil deney düzeneğinin oluşturulması ve 3. farklı sıcaklık koşullarında yalıtım numunelerinin pilin deşarj performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi olarak ifade edilebilir.

#### 3.1. Agrega Esaslı Yalıtım Kompozitini Oluşturan Malzemeler

##### 3.1.1. Agrega (Perlit)

Agrega inşaat sektöründe kullanılan çeşitli yapay veya geri dönüştürülmüş, beton, asfalt ve harç gibi yapı malzemelerin üretiminde kullanılan temel bileşenlere verilen genel bir isimdir. Perlit esasında bir tür volkanik camdır ve ısıyla genleşebilme özelliğine sahiptir. Genleştiğinde gözenekli bir hale geçmesinden dolayı oldukça hafiftir. Perlit içerisinde %2 ile %6 arasında değişen su bulunur ve su sayesinde perlit kararlı bir hal almaktadır (DPT, 2004). Genleşmiş perlit çok hafif olmasının yanı sıra yangına dayanıklı ve mükemmel yalıtım özelliğine sahip bir malzemedir. Çoğu perlitin içeriğinde genellikle %70'den daha fazla silika bulunur.

Ham perlitin 0,0 – 2,5 mm aralıklarında kırılarak, farklı aralıklardaki eleklerden geçirilmesi işlemine "kırılmış-elenmiş" denir. Kırılmış-elenmiş bir perlit, 850°C-1150°C arasındaki alev şokunda içerisindeki suyu kaybedip patlayarak hacminin 10 ile 35 katına kadar genişler ve bu duruma genleştirilmiş perlit adı verilir (Alkan ve Doğan, 2001).



Şekil 3.1. Ham, kırılmış ve genleştirilmiş perlit (Jamei ve ark., 2011).

### 3.1.2. Yapıştırıcılar (Bağlayıcılar)

Kompozit malzemelerde yapıştırıcılar önemli bir rol oynar. Bu nedenle, kompozit malzemeyi oluşturmada önce kullanılacak yapıştırıcıya dikkatlice karar verilmelidir. Kompozit yalıtım sistemlerinde yapıştırıcılar organik ve inorganik olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılır. Bu çalışmada üretmeyi hedeflediğimiz malzemede yanmazlığın yanı sıra esneklik de hedeflediğimiz için hem organik hem de inorganik bağlayıcılar kullanılmıştır. Yapılan literatür çalışması sonucunda ana bileşen olarak sodyum silikat kullanımına karar verilmiş olup tez çalışmasında kullanılan diğer inorganik ve organik bağlayıcılar ve özellikleri şu şekildedir:

#### 3.1.2.1. Sodyum Silikat (Cam Suyu)

Yüksek yangın dayanımı ve düşük ısıl değer gibi özelliklerinden dolayı birçok alanda yaygın olarak kullanımı bulunan silikatlar bu tez çalışmasında da ana inorganik bağlayıcı olarak tercih edilmiştir.

Sodyum, potasyum ve lityum silikat gibi piyasada çok sayıda farklı silikat bulunmaktadır. Agregasız yalıtım malzemelerinin özellikleri (yalıtım, mukavemet, yangına ve suya dayanım vb.) büyük oranda yapıştırıcı özelliğine bağlıdır. Bu yüzden uygun yapıştırıcı için literatür taranması yapılmış ve sodyum silikatın en uygun yapıştırıcı olduğuna karar verilmiştir.

### 3.1.2.2. Sodyum Hidroksit

Diğer adı kostik olan Sodyum hidroksit birçok endüstride kullanılan önemli temel bir birleşiktir. Beyaz renkte olup nem çekici özelliği olan bir maddedir. Suda kolaylıkla çözülmemektedir. Suda çözünmesi ekzotermik bir reaksiyondur. Yüksek bağlayıcılık özelliğinden dolayı bu çalışmada agrega esaslı yalıtım malzemelerinin üretiminde farklı oranlarda kullanılmıştır.

### 3.1.2.3. Termoset reçineler

Termoset reçineler, reçineler ile sertleştiricilerin ve/veya katalizörlerin reaksiyonları sonucu önce jel sonra katı hale gelmesiyle oluşurlar ve bir daha ısıtılarak şekillendirilemezler. Kimyasal yapılarını oluşturan çapraz bağlar sayesinde üstün termal ve mekanik özelliklerin yanı sıra üstün boyutsal kararlılık gösterirler ve bu yüzden kompozitlerde matris malzemesi olarak, yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcı olarak, elektronik ambalajlar gibi uygulamaların yanı sıra kaplama olarak da kullanılmaktadırlar (Songqi Ma ve Webster, 2018).

**Tablo 3.1.** Bazı termoset reçinelerin tipik özellikleri (Kar, 2016).

| Reçine            | Çekme Mukavemeti (MPa) | Çekme Modülü (GPa) | Sertleşme Büzülmesi (%) | Yük Altında Eğilme Sıcaklığı (°C) | Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C) | Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------------------|------------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Fenolik           | 30–50                  | 3,6                | 0–0,01                  | 165–175                           | 260                        | 1,00–1,25                     |
| Poliimid (PMR-15) | 38,6                   | 3,9                | 0–0,006                 | –                                 | 320–330                    | 1,32                          |
| Poliüretan        | 1–69                   | 0,069–0,69         | 0,02                    | 50–205                            | 135                        | 1,1–1,5                       |
| Epoksi            | 55–130                 | 2,75–4,10          | 1–5                     | 48                                | 100–270                    | 1,2–1,3                       |
| Polyester         | 34,5–103,5             | 2,1–3,45           | 5–12                    | 60–205                            | 70–120                     | 1,1–1,43                      |
| Vinilester        | 73–81                  | 3,0–3,5            | 5,4–10,3                | 93–135                            | 102–150                    | 1,12–1,32                     |

Yaygın olarak kullanılan termoset reçineler fenolik, epoksi, polyester, poliüretan, poliamid ve vinilesterdir. Polimer ürün pazarında büyük bir markete sahip

olan termoset reçineler dünyadaki polimer üretiminin %10'unu oluşturmaktadır (Vidil ve ark., 2016). Bazı termoset reçinelerin  zellikleri Tablo 3.1.'de gösterilmiştir.

### **3.1.2.3.1. Polyester reçineler**

Polyester reçineler, birçok endüstriyel ve ticari uygulama için kullanılır ve geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Polyester reçineler genellikle doymamış (veya polimerle tirilmemi ) ve doymuş (polimerle tirilmi ) olmak üzere iki ana türde bulunur. Doymamış polyester reçineler içerdikleri doymamış çift ba lar nedeniyle "doymamış" olarak adlandırılır. Bu  ift ba lar, reçinenin çapraz ba lar oluşturmasına ve sertle tiriciler (monomer veya polimer bazlı) eklenerek polimerle tirilmesine izin verir. Bu tip reçineler genellikle termoset malzemeler olarak sertle irler, yani bir kez sertle tikten sonra geri d n  mezler. Doymuş polyesterler, doymamış çift ba lar içermez ve genellikle daha esnek ve termoplastik özelliklere sahiptir. Ancak, doymuş polyesterler genellikle termoset özelliklere sahip olmayabilir ve sertleştirme işlemi gerektirmez.

### **3.1.2.3.2. Vinilester reçineler**

Bisfenol-A epoksi bazlı vinilester reçineler yapısal olarak polyester ve epoksi reçinelerin en iyi özelliklerini bir arada ihtiva eden bir termoset reçine türüdür. Epoksi reçinelerin üstün mekanik özelliklerinin yanı sıra polyesterlerin kolay işlenebilirlik özelliklerine de sahiptirler. Sıcaklık altında iyi ısıl dayanım gösteren bu reçineler darbe ve yorulmaya karşı dirençli ve su absorpsiyonu düşüktür. M kemmek kimyasal direnç gösterirken ayrıca gıda temasına da uygundurlar. Kimyasal dayanım gerektiren tekne, otomotiv parçaları ve boru gibi uygulamalarda kullanılmaktadırlar.

### **3.1.2.3.3. Epoksi reçineler**

Epoksi reçineler, epoksi monomerlerin polimerizasyonu yoluyla elde edilen polimerik malzemelerdir. Bu reçineler genellikle iki ana bileşeni içerir: epoksi reçine ve sertleştirici. Epoksi reçine ve sertleştirici oranı üreticiden üreticiye değişmektedir. Bu iki bileşen karı tırıldı ında kimyasal reaksiyon ba lar ve malzeme sertleşir. Polyester ve

vinilester reçinelerle kıyaslandığında en büyük avantajı kokusuz ve renksiz olmasıdır. Ancak polyester ve vinilester reçinelerle kıyaslandığında çok yüksek maliyetli olmalarından dolayı kullanım alanları kısıtlıdır. Epoksi reçineler genellikle yüksek performanslı uygulamalarda tercih edilirken, vinilester reçineler kimyasal dirence odaklanan uygulamalarda kullanılır ve polyester reçineler geniş bir kullanım yelpazesi için uygundur ancak diğerleriyle kıyaslandığında genellikle daha düşük performansa sahiptirler.

#### 3.1.2.4. Kaolin

Kaolin ülkemizde bulunan doğal killerin en önemli kısmını oluşturan feldspat kayaçlarının parçalanması sonucu oluşan bir kil türüdür. Isı ve elektrik iletkenliğinin düşük olması, ekonomik olması, aşındırıcı özelliğe sahip olması gibi özelliklerinden dolayı endüstride çok tercih edilmektedir (Özhan, 2017).

**Tablo 3.2.** Ülkemizde bulunan kaolinin kimyasal özellikleri (DPT, 2001).

| Kimyasal bileşik               | Ağırlıkça % |
|--------------------------------|-------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 45,0-47,0   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 37,0-40,0   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,01-0,8    |
| CaO                            | 0,05-0,6    |
| MgO                            | 0,1-0,3     |
| Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,1-0,3     |
| K <sub>2</sub> O               | 0,2-0,5     |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,5-0,3     |
| H <sub>2</sub> O               | 0,2-14,0    |

#### 3.1.3. Dolgu (filler) malzemeleri

0,075 mm'lik elekten geçen küçük agrega malzemelerine mineral filler denir. Filler malzeme toplam agrega miktarının çok küçük yüzdesini oluşturmaktadır. Buna rağmen boşlukları doldurarak stabiliteyi etkilemesi, yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı artırması ve boşluk miktarını azaltması gibi özellikleri sayesinde karışımların

özelliklerinin geliştirilmesi için önem arz etmektedirler (Çelik ve ark., 2007). Aşağıda kullanılan filler malzemelerle ilgili bilgi verilmiştir:

### **3.1.3.1. Feldispar (feldispat)**

Feldispat, seramik ve cam gibi sanayi endüstrilerinde yaygın olarak kullanımı olan, ülkemizde ve dünyada çok geniş rezervlere sahip olan, sodyum, potasyum, kalsiyum ve toprak bileşenlerine sahip susuz alkali alümina silikatlarıdır. İçeriğinde bulunan Na, K veya Ca oranına göre isimlendirilmektedir. Ülkemizde rezervleri çok yaygın olmasına rağmen feldispatların alkali içeriklerinin zenginleştirilmesi gerekmektedir. Genellikle feldispatlar demir ve titan içeren mika, rutil ve sfen gibi mineraller tarafından kirletilmiş olmaktadır. Feldispatlar, parlak cam benzeri bir görünüme sahip olup beyaz, kahverengi, pembe, kırmızı, gri, yeşil ve mavimsi gibi çeşitli renklerde bulunabilirler; ayrıca renksiz veya sütümsü de olabilirler. Düzgün olmayan bir yapıya sahiptirler ve Mohs sertlik skalasında 6-6.5 aralığında sertlik değerine sahiptirler. Yoğunlukları ise 2,5 ile 2,76 g/cm<sup>3</sup> arasında değişir (Kılıç, 2023).

### **3.1.3.2. Mika tozu**

Mika yaygın bir şekilde bulunan ve kolay elde edilebilen ekonomik bir tabakalı silikattır. Yüksek kimyasal dayanıklılık, yüksek elektrik yalıtımı ve toksik madde içermemesi gibi özellikleri sayesinde polimer matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanımı oldukça yaygındır. Spesifik yoğunluğu 2.8 g/cm<sup>3</sup> ve Mohs sertlik değerine göre 2.5-3 arasında sertlik derecesine sahiptirler. Mikayı karakterize eden en önemli özellik, yüksek en-boy oranlarıdır, bu durum onları polimerlerde dolgu ve takviye olarak tercih edilmesini sağlar. İyi bir ısı direncine sahip olduğu için yüksek sıcaklık fırınlarının pencere yapımında kullanılırlar. İyi yalıtım göstermelerinden dolayı elektronik devre kartlarında kullanılırlar (Sezer, 2022).

### 3.1.3.3. Bentonit

Bentonit doğada yaygın olarak bulunan, ucuz ve toksik olmayan bir silikattır. İçeriğinde bulunan mineral oranı ve çeşidine göre çeşitli renklerde bulunmaktadır. En önemli özelliklerinden biri suda şişerek hacminin 15-20 kat artmasıdır. Bentonitin su emerek jelimsi bir yapı oluşturur. Oluşturduğu bu jel yapı su geçirmezlik ve yüksek oranda su emme özelliklerinden dolayı inşaat sektöründe geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır. Ayrıca beton ve harçlara işlenme kabiliyetini arttırmak ve plastisitesini arttırmak için belirli oranlarda bentonit katılabilmektedir (Çinku, 2008).

### 3.1.3.4. Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın cürufu, demir ve çelik üretiminde, yüksek fırınlarda demir cevherinin indirgenmesi sonucu oluşan bir yan üründür. İndirgenme sürecinde demir cevheri, kok kömürü ve kireç taşıyla birlikte eritilir ve bu indirgenme ve saflaştırma süreci sırasında silika, alümina, kireç ve magnezyum oksit gibi demir dışındaki maddeler eriyerek cürufu oluştururlar. Bu cüruf ergiyik haldeyken fırından çıkarılır ve hızlı bir şekilde soğutularak cam benzeri bir yapıya dönüşür. Cüruf miktarı içeriğindeki hammaddeye bağlıdır. Yüksek fırın cürufu bağlayıcılık özelliğe sahiptir.

### 3.1.3.5. Kuvars

Kuvars kumu sanayinin birçok dalında ihtiyaç duyulan ve çok fazla tüketim alanı olan kuvarsça zengin kayaçların ayrışması neticesinde oluşan boyutları 2 mm'den daha küçük ince taneli bir malzemedir. Kuvars, içerisinde bir silikon iki oksijen atomu ( $\text{SiO}_2$ ) bulunan kimyasal bir bileşiktir. Genellikle beyaz renkli olup içeriğindeki mineral çeşidine göre renkleri değişebilmektedir. Kuvars, Mohs sertlik skalası 7, yoğunluğu 2,65 gr/cm<sup>3</sup> ve ergime sıcaklığı ise 1785 °C olan bir mineraldir. Kuvars kumu, cam üretiminde, metal döküm sürecindeki kum kalıp üretiminde, beton ve harç gibi yapı malzemelerinde dolgu malzemesi olarak, seramik ve refrakter malzemelerin üretiminde, su arıtma sistemlerinde filtrasyon, kumlama işleminde aşındırıcı olarak ve yer altından petrol çıkarılmasında kullanılan çok yönlü bir malzemedir (Han ve ark., 2019).

### 3.1.4. Sertleştiriciler

#### 3.1.4.1. Borik asit

Borasis asit veya ortoborik asit gibi farklı adlandırmaları olan borik asit içerisinde bor elementi olan zayıf bir asit türüdür. Beyaz toz halinde bulunur. Kimyasal formülü  $H_3BO_3$  tür. Suda çözünür. Kolemanitin sülfürik asit ile tepkimesinden meydana gelir.

Bor çok geniş kullanım alanına sahiptir ve farklı bileşiklerinin her birinin farklı özellikleri vardır. Hafif ve gerilmeye dirençli olması ve dayanıklı olması gibi özellikleri nedeniyle plastik, kağıt endüstrisinde, tarımda ve daha birçok alanda kullanılmaktadır. Borun alev geciktirici olarak kullanımına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Alev geciktirici olarak kullanıldığında toksik etkiye neden olmazlar (Topçu ve Soyhan, 2022).

**Tablo 3.3.** Borik asitin fiziksel özellikleri (Kırbaş, 2021).

|                    |                                         |
|--------------------|-----------------------------------------|
| Formülü            | $H_3BO_3$                               |
| Özgül ağırlık      | 1,435 g/cm <sup>3</sup>                 |
| Molekül ağırlığı   | 61,83 g/mol                             |
| Erime noktası      | 170,9° C                                |
| Kaynama noktası    | 300° C                                  |
| Isı kapasitesi     | 24,7 J/g ° C                            |
| Isıl iletkenlik    | 0,407 W/mK                              |
| Özgül yüzey alanı  | <1 m <sup>2</sup> /g                    |
| Difüzyon katsayısı | 1,1x10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /s |
| Yüzey gerilimi     | 63,83 mN/m (Ağ. %1,0 sulu çözelti)      |

#### 3.1.4.2. Kolemanit

Bor mineralinin Ca kökenli olan bileşenlerine kolemanit denir. Kolemanit mineral açısından oldukça zengin ve yaygın olarak bulunan bir bor çeşidi olup, kimyasal formülü  $Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$  tür. Mohs sertlik skalasına göre sertliği 4 ile 4,5 arasında değişirken, yoğunluğu 2,42 gr/cm<sup>3</sup>'tür (Cosansu ve Cogun, 2012). Doğada genellikle büyük kristaller halinde bulunur ve beyaz veya gri renklidir. Saf Kolemanitin

suda çözünmesi yavaş olurken, HCl' de çözünmesi oldukça hızlıdır. Çalışmada kullanılan kolemanit dünya bor lideri Eti Maden İşletmelerinden temin edilmiştir.

#### 3.1.4.3. Çinko oksit

Çinko oksit bir çinko (Zn) ve bir oksijen atomundan (O) oluşan kimyasal bir bileşiktir. Fiziksel olarak beyaz ve sarımsı renkte, katı veya toz halinde bulunur. UV ışınlarına karşı koruyucu etkisi nedeniyle güneş kremlerinde, kozmetik ürünlerde, seramik ve cam sanayinde kullanımı yaygındır. Yüksek sıcaklıklara karşı oldukça dayanıklıdır. Bu nedenle yüksek sıcaklık gereken uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca çinko oksit metallerin kaplanması ve korozyona dayanımını arttırdığı için ağır metal sanayiinde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

#### 3.1.4.4. Asetik asit

Asetik asit kimyasal formülü  $\text{CH}_3\text{COOH}$  olan bir karboksilik asittir. Bu asit, sirke tadını verir. Kimya ve gıda endüstrisinde kullanımı oldukça yaygındır. Ayrıca asetik asit, birçok temel kimyasal reaksiyonda önemli bir rol oynar. Temizlik malzemelerinin içeriğinde de bulunabilir. Saf asetik asit renksiz bir sıvı görünümündedir. Suda iyi çözünen zayıf bir asittir. Yaklaşık olarak  $1,05 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğa sahiptir. Erime noktası  $16,6^\circ\text{C}$  ve kaynama noktası yaklaşık olarak  $118,1^\circ\text{C}$ 'dir (Moosavi-Zare ve ark., 2014).

#### 3.1.4.5. Fosforik asit

Fosforik asit kimyasal formülü  $\text{H}_3\text{PO}_4$  olan bir inorganik asittir. Fosforik asit birçok endüstriyel, gıda ve tarım uygulamasında önemli kullanım alanlarına sahiptir. Fosforik asitin fiziksel özellikleri şu şekildedir:

- Görünüm: Saf fosforik asit renksiz şeffaf bir sıvı görünümündedir.
- Yoğunluk: Yoğunluğu yaklaşık olarak  $1,88 \text{ g/cm}^3$  tür.
- Kokusuzdur.
- Erime noktası yaklaşık  $42^\circ\text{C}$ 'dir.
- Kaynama noktası  $158^\circ\text{C}$ 'dir.

Fosforik asit, güçlü bir asittir. Suda çözündüğünde ortama birden fazla hidrojen iyonu serbest bırakabilir. Bu nedenle çoklu asidik özelliklere sahiptir. İyi bir pas önleyici olduğu için metal yüzeylerde paslanmanın önlenmesi ve pasın temizlemesinde kullanılır.

#### **3.1.4.6. Alüminyum hidroksit**

Alüminyum hidroksit boksit minerallerinin toz haline getirildikten sonra Bayer prosesi ile sıcak sodyum hidroksit NaOH ile kimyasal tepkimesinden meydana gelir. Kimyasal formülü  $Al(OH)_3$ 'tür. Alüminyum hidroksit, beyaz veya hafif gri renkte toz halinde bulunur. Katı bir madde olarak genelde kristal yapıdadır. Yangın geciktirici, alev yavaşlatıcı etkiye sahiptir. Bu nedenle yangın güvenliği uygulamalarında önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca cam, seramik, emaye, arıtma, boya ve kaplama sektörlerinde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Antiasit ilaçların üretiminde ve suda çözünmeme özelliğinden dolayı da kozmetik sektöründe de kullanılmaktadır.

### **3.2. Karışım Oranlarının Belirlenmesi ve Hazırlanışı**

#### **3.2.1. Üretim aşaması**

Yalıtım malzemesi üretimi sırasında, malzemenin sadece yalıtım özelliklerini değil aynı zamanda yüksek mekanik dayanıklılığı da sağlaması beklenir. Bu beklentileri karşılamak için perlit esaslı yalıtım malzemesinin belirli parametrelerinin dikkatlice ayarlanması gerekmektedir. Bu parametreler arasında, karışımda kullanılacak perlit oranı, silikat bağlayıcıların türü ve yapıştırıcı/agrega oranı, kullanılacak su miktarı, diğer bağlayıcılar ve mineraller, uygun sertleştiricinin seçimi ve kullanım oranı, presleme sırasında uygulanacak basınç veya sıkıştırma oranı, kurutma ve kürlenme süreleri ile sıcaklıkları yer almaktadır. Bu faktörlerin dikkatlice kontrol edilmesi hem yalıtım özelliklerini hem de mekanik dayanıklılığı optimize etmek için önemlidir. Tüm bu parametreler dikkate alınarak üretilcek yalıtım numuneleri için, uygun karışımın hazırlanması, şekillendirilmesi, uygun kurutma ve kürlenme aşamaları bu bölümde detaylı şekilde anlatılmıştır.

### 3.2.2. Karışımların hazırlanması

Yalıtım malzemelerinde karışım, yalıtım numunelerini üretmek için daha önce yapılan araştırmalara uygun olarak agrega ve diğer bileşenlerin oranlarının doğru seçilmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Karışım hesabı yapılırken öncelikle kullanılacak agrega, sertleştirici, bağlayıcı ve diğer katkı malzemelerine karar verilir. Ardından, bir yalıtım malzemesinden beklenen ısı ve mekanik özelliklerin kazandırılması amacıyla en uygun yapıştırıcı/agrega oranı belirlenir. Son olarak da üretilcek numune boyutları için ıslak ve kuru karışım hesabı yapılır. 1 m<sup>3</sup> bir numune için kuru karışım ağırlığı kg olarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$V_k = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\delta_i} \cdot 100 \quad (3.1)$$

$$G_k = \left( \frac{S}{V_k} \right) \sum_{i=1}^n P_i \cdot 100 \quad (3.2)$$

Perlit agregalı yalıtım malzemelerinin üretiminde su miktarı çok önemlidir. Çünkü yapıştırıcı ve agrega arasındaki bağlar su ile oluşmaktadır. Ancak kullanılan su miktarının az olması numune yüzeylerinin pürüzlü ve kolay dağılabilir olmasına neden olurken, fazla su miktarı ise kalıplama ve presleme aşamasında perlitin dağılmasına ve katmanların ayrışmasına neden olur. Tüm bu koşullar dikkate alınarak gerekli su miktarı hesaplanmıştır. Buna göre 1 metreküp numune için gerekli ağırlıkça su miktarı ve numune ağırlığının hesabı aşağıdaki gibidir:

$$G_T = G_k + G_s = G_k + M_{gp} W_{dky} \eta_s + G_{ys} W_{ys} \quad (3.3)$$

Burada:

$G_s$ : karışımdaki toplam su miktarı, kg

$M_{gp}$ : genleştirilmiş perlitinin kuru ağırlığı, kg

$m_{dky}$ : genleştirilmiş perlitin doygun kuru yüzey halindeki su emme oranı, %

$m_{ys}$ : yapıştırıcının su içeriği, %

$\eta_s$ : numune su emme sabiti (0,5 ila 1 alınır)

$G_T$ : karışımın toplam ağırlığı, kg olarak alınmaktadır.

Tüm bu hesaplamaların ardından numunelerin miktarları belirlenmiş olup 3 farklı yöntemle aşağıdaki aşamalar takip edilerek numuneler hazırlanmıştır. Karışım içerisinde termoset reçineler kullanılmadan hazırlanan numunelerin üretimi için,

- Öncelikle kuru halde bulunan agrega ve diğer dolgu malzemeleri bir araya getirilir.
- Kullanılacak olan toplam su miktarının üçte biri ile bağlayıcılar manyetik karıştırıcıda karıştırılır.
- Daha sonra kalan su miktarı ile sertleştirici malzeme manyetik karıştırıcıda karıştırılır.
- Hazırlanan kuru malzeme karışımının içerisine öncelikle bağlayıcı-su karışımı yavaşça ilave edilir ve karıştırılır. Ardından sertleştirici-su karışımı eklenir ve homojen bir karışım elde edilene kadar yaklaşık 2-3 dakika arasında karıştırma işlemi tamamlanır.

Karışım içerisinde termoset reçinelerin kullanıldığı numunelerin üretimi için;

- İlk olarak kuru haldeki perlit agregası karıştırma kabı içerisine alınır.
- Daha sonra numune üretiminde kullanılacak termoset reçine aseton içerisinde çözdürülür ve hazırlanan karışım perlit agregası üzerine püskürtülür.
- Karışım içerisinde yer alan asetonun buharlaşması için periyodik aralıklarla karıştırılmak suretiyle 2-3 saat aralığında beklenir. Aseton tamamen uçtuktan sonra yukarıdaki aşamalar sırasıyla takip edilerek karışımların hazırlanma işlemi tamamlanır.

Termoset reçinelerin kaplama olarak kullanıldığı numunelerin üretimi için,

- İlk yöntemde anlatıldığı gibi karışımlar hazırlanıp kalıplarda şekillendirilen numuneler kurutma ve kütleme aşamalarından geçtikten sonra aseton içerisinde çözdürülen termoset reçineler numuneler üzerine püskürtülerek asetonun uçması için 12-24 saat aralığında kurumaya bırakılır.

Karıştırma yapılırken narin bir karıştırma işlemi yapılmasına dikkat edilmelidir aksi durumda perlit parçaları kırılarak yalıtım özelliğini kaybeder.

### 3.2.3. Numunelerin şekillendirilmesi

Karışımın kalıplardan kolay ayrılması için monteli kalıplar kullanılmış olup yapışmayı engellemek için kalıplar plastikle kaplanmıştır. Daha sonra numuneler 10×10×10 cm ve 30×8×2,5 cm boyutlarındaki kalıplarda hassas terazide tartıldıktan sonra doldurulmuştur. 27 farklı karışım oluşturulmuş olup her seriye ait 4'er numune hazırlanarak toplamda 108 tane yalıtım numunesi üretimi yapılmıştır.



Şekil 3.2. Karışımların kalıplara doldurulması.

Karışımlar kalıplara döküldükten sonra, istenilen formu elde etmek amacıyla kalıplara 1 ile 2 hacimsel sıkıştırma oranında (0,14 MPa – 0,36 MPa basınç aralığında) presleme uygulanır. Bu aşamada kritik olan, yalıtım numunelerinde uygun dayanımda en üst düzey yalıtım özelliğini sağlamaktır. Örneğin, 2,5 sıkıştırma oranında daha yoğun numuneler elde edilmesi nedeniyle malzemenin yalıtım performansının olumsuz etkilenebileceği göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle, numunelerde uygulanan sıkıştırma oranının titizlikle ayarlanması gereklidir. Presleme işlemi tamamlandıktan sonra, kalıp içindeki numunelerin üzerine yaklaşık 1 dakika süresince karbondioksit gazı püskürtülmüştür.

### 3.2.4. Numunelerin isimlendirilmesi

Numunelerin içeriğindeki malzeme ve oranların ağırlıkça yüzdeleri içeren bir formülle isimlendirilmişlerdir. İsimlendirmede kullanılan harflerin açıklamaları ve numunelerin isimleri aşağıda verilmiştir.

**Tablo 3.4.** Kullanılan malzemeler ve isimlendirmeleri.

| Malzeme adı    | Kısaltması | Malzeme adı                   | Kısaltması |
|----------------|------------|-------------------------------|------------|
| Sodyum Silikat | <i>S</i>   | Sodyum karbonat ve bikarbonat | <i>C</i>   |
| Polyester      | <i>PE</i>  | Kaolin                        | <i>K</i>   |
| Polivinilester | <i>PV</i>  | Sodyum hidroksit              | <i>H</i>   |
| Epoksi         | <i>EP</i>  |                               |            |

**Tablo 3.5.** Kullanılan yüzdelik oranlar ve isimlendirilmeleri.

| Simge    | %  | Simge    | %   | Simge     | %  |
|----------|----|----------|-----|-----------|----|
| <i>O</i> | 0  | <i>Z</i> | 25  | <i>IX</i> | 95 |
| <i>X</i> | 5  | <i>T</i> | 50  | <i>IY</i> | 90 |
| <i>Y</i> | 10 | <i>W</i> | 100 | <i>IZ</i> | 75 |

**Tablo 3.6.** Numunelerin son isimlendirilmiş halleri.

| No | Numune ismi   | No | Numune ismi   | No | Numune ismi   | No | Numune ismi     |
|----|---------------|----|---------------|----|---------------|----|-----------------|
| 1  | <i>SW</i>     | 8  | <i>PVYSİY</i> | 15 | <i>EPTST</i>  | 22 | <i>KYSİY</i>    |
| 2  | <i>PEXSIX</i> | 9  | <i>PVZSİZ</i> | 16 | <i>EPWSO</i>  | 23 | <i>PEZKHZST</i> |
| 3  | <i>PEYSİY</i> | 10 | <i>PVTST</i>  | 17 | <i>CKZSİZ</i> | 24 | <i>PVZKHZST</i> |
| 4  | <i>PEZSİZ</i> | 11 | <i>PVWSO</i>  | 18 | <i>CXSIX</i>  | 25 | <i>EPZKHZST</i> |
| 5  | <i>PETST</i>  | 12 | <i>EPXSIX</i> | 19 | <i>KHZSİZ</i> | 26 | <i>SWPE</i>     |
| 6  | <i>PEWSO</i>  | 13 | <i>EPYSİY</i> | 20 | <i>CKTST</i>  | 27 | <i>SWPV</i>     |
| 7  | <i>PVXSIX</i> | 14 | <i>EPZSİZ</i> | 21 | <i>HXSIX</i>  | 28 | <i>SWEP</i>     |

### 3.2.5. Numunelerin kurutulması

Numuneler CO<sub>2</sub> gazına maruz bırakıldıktan sonra kalıplardan çıkarılmıştır. Çıkarılan numuneler içerisindeki nem oranı %10'un altına düşene kadar tercihen 78 °C (74 ile 105 °C arasında) de %40 ile %60 bağıl nem arasında kurutma işlemi yapılır.

Bu aşamada dikkate alınması gereken önemli bir nokta, 1 atmosfer basınç altında 99 °C'nin altında kurutma işlemidir. Bu seçim, 99 °C sıcaklığın üzerinde suyun kaynama noktasına ulaşmasıyla, kaynayan suyun numune iskeletine zarar verip dayanımı düşürebileceği gerçeğinden kaynaklanmaktadır.

### 3.2.6. Kürleme

Kürleme işlemi, numunelerin yüksek dayanıklılığa ulaşabilmesi için kritik öneme sahiptir. Yalıtım numunelerinin yüksek yalıtım özelliği göstermesi beklenirken aynı zamanda yeterince yüksek mekanik özelliklere de sahip olması gerekmektedir. Kürleme sıcaklığının yüksek olması, daha yoğun ve dayanıklı malzemelerin oluşmasına neden olurken, kürleme sıcaklığının düşük olması daha hafif ve yalıtım özelliği yüksek malzemelerin oluşumuna katkıda bulunur. Ayrıca, perlit bazlı yalıtım malzemeleri üretilirken kullanılan katkı maddeleri, sertleştiricilerin türü ve özelliklerinin yanı sıra kürleme sıcaklığına bağlı olarak yalıtım malzemesinin özellikleri değişiklik gösterir. Tüm bu çalışmalar sonucunda üretilen yalıtım numuneleri aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Numunelerin genel olarak görünümü.

### 3.3. Yalıtım Malzemelerine Uygulanan Testler

Bu bölüm, üç ana kısımdan oluşmaktadır: mekanik testler, ısı testler ve malzeme karakterizasyon testleri. Mekanik testler arasında tek eksenli basınç dayanımı, üç nokta eğme dayanımı tayini ve yanmazlık testleri yer almaktadır. Isı testler ise ısı iletkenlik, özgül ısı ve ısı yayılım tayini testlerini içermektedir. Yalıtım malzemelerinin karakterizasyonu için ise XRD (X-ışını kırınımı) ve SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) testleri kullanılmaktadır.

#### 3.3.1. Tek eksenli basınç dayanım testi

Mekanik malzemelerin çeşitli yükler altında göstermiş olduğu davranışları inceleyen bilim dalıdır. Mekanik özellik ise malzemenin dayanıklılığı, esnekliği, tokluğu, sertliği, şekil değiştirme kabiliyeti gibi fiziksel özelliklerini kapsar. Bu özellikler, malzemenin bir yük altında nasıl davrandığını, dış kuvvetlere karşı direncini ve deformasyonunu gösterir. Yapı sektöründe basınç dayanımı terimi malzemenin eksenel basınç yükü altında kırılmamak için gösterebileceği direnme kabiliyetini ifade eder. Bu sebeple, özellikle yüksek basınç dayanımı testi, malzemenin kalite kontrolü ve kullanılacak malzeme belirlenmesi gibi durumlarda en yaygın kullanılan özelliklerden biridir. Tek eksenli yük altında basınç dayanım testine tabi tutulmak üzere her seri için, 10×10×10 cm boyutlarındaki 2 adet kübik numune kullanılmıştır. Küp basınç dayanımı deneyleri Batman üniversitesi laboratuvarlarında 250 kN kapasiteli Shimadzu marka universal test cihazında 5 kN yük hücresinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4.)



**Şekil 3.4.** Tek eksenli küp basınç dayanımı deneyi.

Test ASTM C165-07 (2017) standardına uygun olarak yapılırken, yükleme hızı bu standarda uygun bir şekilde 1.27 mm/dk seçilmiştir. Numune boyutları ve yükleme hızı cihaz ekranında ayarlandıktan sonra test başlatılmış ve ulaşılan en büyük yük ile o andaki uzama miktarı bilgisayar tarafından kN ve MPa cinsinden okunmuştur. Önemli olan bir diğer husus ise uzama miktarının 100 mm'de 5 mm'yi geçmemesidir. Testler tamamlandıktan sonra, elde edilen sonuçların ortalaması alınarak deney sonlandırılmıştır.

### 3.3.2. Üç nokta eğme testi

Boyutları 30×8×2,5 cm olan her seriye ait 2 adet numuneye üç nokta eğme dayanım testi uygulanmıştır. Eğme dayanım testleri de tek eksenli küp basınç dayanımı testinde kullanılan cihazda ASTM C203-05a (2017) standartlarına uygun yapılmıştır.



Şekil 3.5 Üç nokta eğme dayanım deneyi.

Eğme testinde ASTM C203-05a (2017) standartlarına göre de yükleme hızı 4,71 mm/dk olarak hesaplanmıştır. Numune boyutları ve yükleme hızı cihaz ekranında girildikten sonra test başlatılmış ve numuneler kırıldıktan sonra ulaşılan maksimum yük ve o andaki uzama değerleri bilgisayardan okunmuştur. Sonrasında elde edilen değerler aşağıdaki formülde yerleştirilerek eğme dayanım sonuçları hesaplanmıştır.

$$\sigma_b = 3PL / 2bd^2 \quad (3.5)$$

$\sigma_b$ =eğme gerilmesi, MPa

$P$  = yük, N

$L$  = destek aralığı, mm

$b$  = numune genişliği, mm

$d$  = numune kalınlığı, mm

Hesaplamalar tamamlandıktan sonra her serinin sonuçlarının ortalaması alınarak testler tamamlanmıştır.

### 3.3.3. Isıl özellik testleri

30 × 8 × 2,5 cm boyutlarındaki her bir seriye ait numune için ISO 22007-2 standartlarına uygun ısı özellik testleri uygulanmıştır. Yalıtım numunelerinin ısı iletkenlik, özgül ısı ve ısı yayılım testleri Hot Disk 2500S cihazında yapılmıştır. Cihaz katı, sıvı, toz ve macunların termal iletkenliklerinin hassas analizi için tasarlanmış olup,

milimetrenin altındaki kalınlıktaki toplu numuneleri işler, 0,005 ila 1800 W/m/K Termal İletkenlik aralığına sahiptir.



Şekil 3.6. Isıl özelliklerin tayini.

### 3.3.4. Yanmazlık testi

LIB pazarının daha da genişletilmesi ve bunun elektrikli araçlardaki büyük ölçekli etkileri şu anda sınırlı güvenlik performansları nedeniyle önemli ölçüde engellenmektedir. Son yıllarda, patlama ve yangın kazaları nedeniyle tonlarca LIB piyasadan geri çekilmiştir, bu da ilgili pazar sektörleri için ciddi ekonomik sorunlara yol açmış ve LIB'lerin itibarına önemli ölçüde zarar vermiştir. Sonuç olarak, LIB güvenlik konularına ilgi artmakta ve çok sayıda güvenlik stratejisi geliştirilmektedir. Bu yüzden özellikle batarya ile ilgili uygulamalarda yanmayan, duman çıkartmayan ve çok yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemelerin kullanılması gerekmektedir.

Yalıtım numunelerinin yanma karakteristiklerini tespit etmek ve yanmaya karşı direncini ölçmek amacıyla bu test yapılmıştır. Test yapılırken yakıcı olarak pürmüz, yakma plakası ve temassız sıcaklık ölçer kullanılmıştır.

Bu kapsamda üretilen numunelerin ateşe karşı direncini ölçmek, şekil bozunma ve yanma karakteristiklerini tespit etmek amacıyla bir dizi testler gerçekleştirilmiştir. Yanmazlık testi tayini için ASTM E84 (2017) standartlarına uygun olarak yakma tipi tek kaynaklı olan bütan gazlı test düzeneği hazırlanmıştır. Testi yapılacak 2,5 cm

kalınlıktaki numuneler yakıcı pürümüzden 5 cm mesafede olacak şekilde konumlandırılmıştır. Test boyunca süreleri kaydetmek için kronometre kullanılarak, 5, 10 ve 15'er dakika olacak şekilde süreler ayarlanmıştır. Verilen süreler boyunca numune ön yüzeyindeki anlık sıcaklık ölçümü tayini için Testo 8211-2 markalı termal kamera ve numunenin arka yüzeyindeki sıcaklık ise bir lazer termometresi kullanılarak anlık olarak kaydedilmiştir. Test sırasında duman ve is oluşumunun takibi için test altındaki numunenin anlık video kaydı alınmıştır. Numune yüzeyindeki ısı dağılımı ve haritalamayı tespit etmek için test süresi boyunca Testo 8211-2 markalı termal kamera sistemi ile görüntü kaydı alınmıştır. Test tamamlandıktan sonra numuneler üzerinde yüzey aşınması olup olmadığı incelenmiştir.

#### **3.4. Batarya Kabin Test Düzenekinin Hazırlanması**

Lityum bazlı pil hücreleri; diğer pil hücrelerinde olduğu gibi enerjiyi muhafaza etmek için eksi elektrot olan anot, artık elektrot katot ve elektrolit bileşenlerinden meydana gelmektedir. Elektrolit olarak katı polimer kullanılan pil çeşitlerine Katı polimer elektrolit Lityum-iyon pil denir. Bu çalışmada kullanılan piller 2600 mA h kapasiteli silindirik 26650 Li-ion pillerdir. Batarya paketinin nominal voltajı 28v nominal kapasitesi 21 ah tır. Araç bataryalarının seri bağlanması gerilimin artmasına neden olurken, paralel bağlanması da akımın yükselmesini sağlar. Batarya paketleri hazırlanırken ihtiyaç duyulan gerilim ve akıma göre bağlantı şekilleri oluşturulur (Ramonı ve Zhang, 2013). Bu tez çalışmasında kullanılan batarya paketi ihtiyaçlar dahilinde 7P ve 4S hücreden oluşmaktadır. Testlere başlanmadan önce pillerde orijinal olarak depolanan enerji tamamen boşalana kadar batarya paketine sabit akımda yükleme yapılmıştır.

**Tablo 3.7.** Batarya paketinin özellikleri

|                  |                                  |
|------------------|----------------------------------|
| Pil modeli       | 24V 20 Ah                        |
| Nominal voltaj   | 24V                              |
| Nominal kapasite | 20 Ah                            |
| Hücre şartnamesi | 3,7 V 26650 hücre                |
| Kompoze türü     | 7S 4P                            |
| Şarj modu        | CC7CV (Sabit akım Sabit gerilim) |
| Deşarj sıcaklığı | -20 ile +65 °C                   |
| Şarj sıcaklığı   | 0 ile +45 °C                     |
| Boyutlar         | 14×17×7,5 cm                     |

**Şekil 3.7.** Batarya paketinin görünümü.

Sistemde bataryanın içerisinde bulunduğu kabin ve pil ortam sıcaklık değerlerini ölçmek için yerleştirilen termokupplardan alınan bilgilerin gösterilmesi, bilgisayar ortamına aktarılması ve kayıt alınması amacıyla Elimko E-680 serisi çok girişli gelişmiş tarayıcı cihazı kullanılmıştır. Bu sayede aynı anda birden fazla noktadan ölçülen sıcaklık değerlerinin aynı iletişim hattı üzerinden bilgisayara bağlama olanağı elde edilmiştir. Cihaza ait teknik özellikler Tablo XX te verilmiştir.

**Tablo 3.8.** Datalogger cihazının teknik özellikleri.

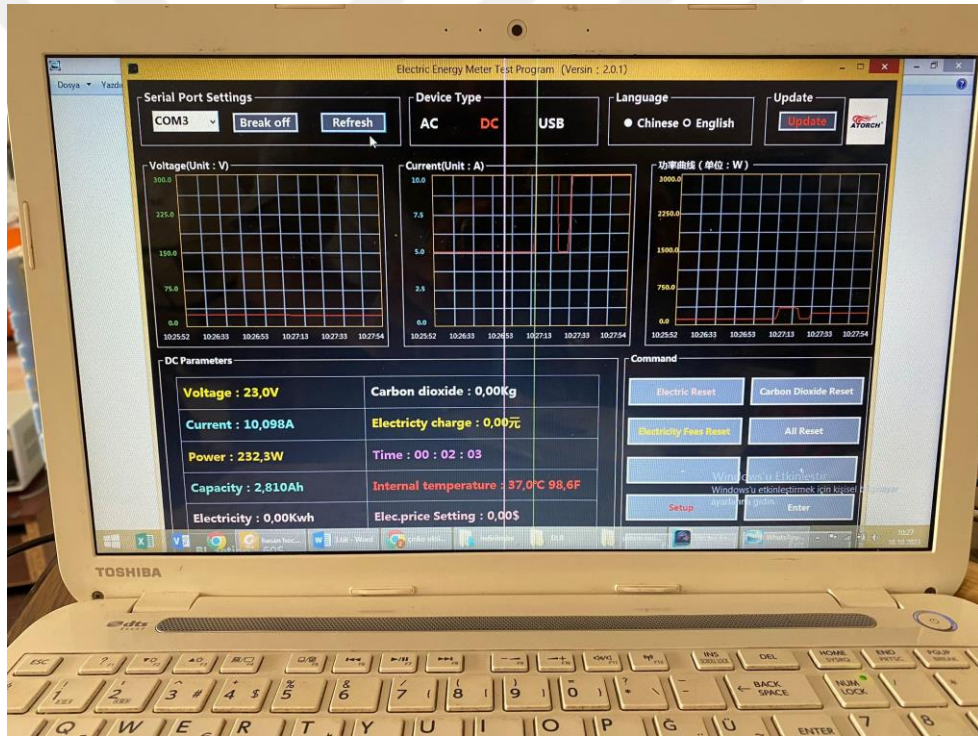
|                         |                                                                                                      |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Doğruluk Sınıfı         | 0.5                                                                                                  |
| Gösterge                | 9 Digit LED (14 mm)                                                                                  |
| A/S Çevirim             | 16 bit                                                                                               |
| S/A Çevirim             | 12 bit                                                                                               |
| Giriş Seçme Aralığı     | 0.2-9.9 Saniye / Kanal                                                                               |
| Gösterge Tarama Aralığı | 1-99 Saniye / Kanal                                                                                  |
| Çalışma Ortam Sıcaklığı | -10 ... 55°C                                                                                         |
| Ölçü Elemanı            | Termokupl Rezistans termometre<br>Diğerleri = Standart ve özel çıkışlı<br>transmitter ve çeviriciler |

**Şekil 3.8.** Termocupların bağlandığı çok girişli datalogger.

Batarya paketine ait V (Voltaj), I (Akım) ve P (Güç) gibi bataryaya ait parametreler anlık takip edilerek batarya modülünün deşarj edilmesi ve bu bilgilerin bilgisayar ortamına aktarılması için DLB-300 elektronik yük test cihazı kullanılmıştır. DLB-300 cihazının test cihazının gerilim aralığı 2-200V çalışma akım aralığı ise 0.2-40A arasındadır. Test cihazı pilin sabit akımda deşarj edilmesini sağlar.



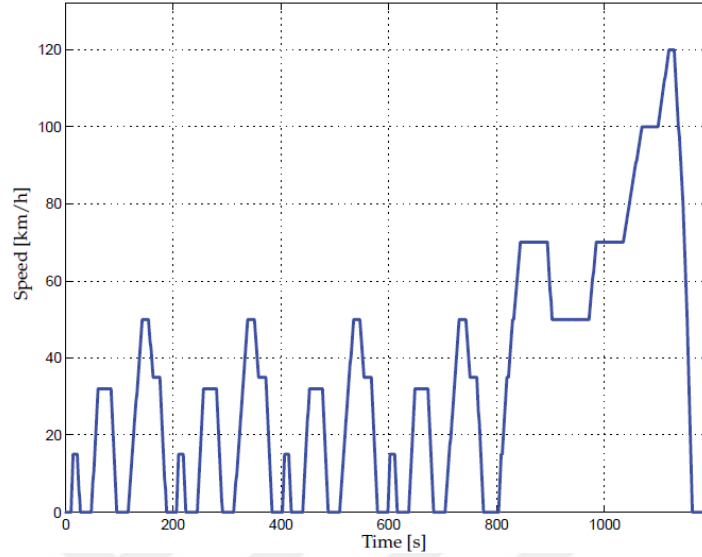
Şekil 3.9. Batarya yük test cihazı.



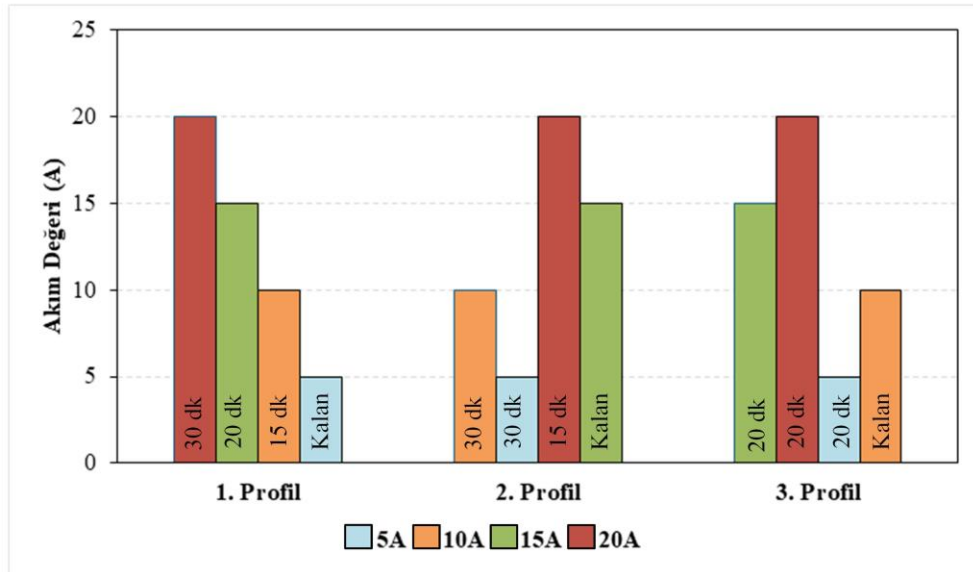
Şekil 3.10. Batarya yük test cihazı bilgisayar arayüzü.

Batarya kabin test düzeneğinde yapılacak deneyler bataryalar için soğuk koşullarda gerçekleştirilmiştir. Soğuk şartlar altında deneyler yapılmadan önce bataryaya sabit akımda yükleme yapılmış ve bataryanın şarj ömrü hesaplanmıştır. Daha sonra Avrupa sürüş profiline (Şekil 3.11) uygun olacak şekilde 5 farklı sürüş profili oluşturulmuş ve optimum sıcaklık (20-25 °C) aralığında batarya deneyleri yapılmıştır.

Burada amaç optimum sıcaklık şartlarında batarya performans testlerini gerçekleştirerek soğuk ve sıcak şartlar altında yapılan deneylerle karşılaştırmaktır.



Şekil 3.11. Yeni Avrupa sürüş profili.



Şekil 3.12. Kullanılan sürüş profillerindeki amper ve süre değerleri.

Avrupa sürüş profiline uygun olarak hazırlanan tabloda belirtilen akım değerleri bir elektrikli aracın günlük trafik içerisindeki durumunu gözlemlemek amacıyla farklı sürelerde uygulanarak testler gerçekleştirilmiştir

Soğuk şartlar için oluşturulan deney düzeneği bir adet kompresör, 1 adet evaporatör, 1 adet kondenser, batarya yükleme cihazı, batarya paketi ve batarya paketi kabininden oluşmaktadır.



**Şekil 3.13.** Soğuk çalışma şartları için batarya test kabinin genel görünümü.

Soğuk çalışma şartları için ortam sıcaklığından izole olacak şekilde tamamen yalıtımlı kabin düzeneği tasarlanmıştır. Sistem yalıtımı tamamlandıktan sonra termal kamerayla gerekli kontroller sağlanmıştır. Soğuk çalışma koşulları olarak 0 °C, 5 °C ve -5 °C olarak belirlenmiştir. Deneyler her bir sıcaklık değeri için batarya kabinin yalıtımsız ve üretilen yalıtım numuneleri içerisinde ısı ve mekanik özellikleri en iyi olan 3 ayrı numune ve bu numunelerden en iyi yalıtım özelliklerine sahip olan numunenin farklı izolasyon kalınlıklarıyla yalıtılarak bataryanın performansının test edilmesiyle gerçekleştirilmiştir.

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Üretilen Yalıtım Numunelerin Özellikleri

Üretilen numunelerin yalıtım malzemesi olarak değerlendirilebilmesi ve fiziksel özelliklerinin belirlenebilmesi için ısı, termofiziksel ve mekanik testler uygulanmıştır.

**Tablo 4.1.** Üretilen yalıtım malzemelerinin mekanik, termofiziksel ve ısı özellikleri.

| Numune No | Malzeme  | Basınç dayanım testi<br>$\sigma_c$ (kPa) | Kırılma modülü testi<br>$\sigma_b$ (kPa) | Yığınsal yoğunluk testi<br>$\rho_k$ (kg/m <sup>3</sup> ) | Isıl iletkenlik testi<br>$\lambda$ (W/m.K) | Özgül ısı testi<br>$C_p$ (J/kg.K) | Isıl yayılım testi<br>$\alpha$ (mm <sup>2</sup> /s) |
|-----------|----------|------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1         | SW       | 151.455                                  | 150.268                                  | 195.348                                                  | 0.0536                                     | 1339.906                          | 0.2069                                              |
| 2         | PEXSIX   | 203.537                                  | 119.330                                  | 198.288                                                  | 0.0597                                     | 1311.727                          | 0.2297                                              |
| 3         | PEYSİY   | 246.616                                  | 132.589                                  | 199.274                                                  | 0.0554                                     | 1338.903                          | 0.2077                                              |
| 4         | PEZSİZ   | 289.545                                  | 149.531                                  | 202.234                                                  | 0.0585                                     | 1028.163                          | 0.2812                                              |
| 5         | PETST    | 154.219                                  | 130.379                                  | 207.166                                                  | 0.0611                                     | 1001.959                          | 0.2943                                              |
| 6         | PEWSO    | 171.391                                  | 146.585                                  | 215.946                                                  | 0.0523                                     | 1118.580                          | 0.2167                                              |
| 7         | PVXSIX   | 201.797                                  | 107.545                                  | 195.932                                                  | 0.0584                                     | 1147.640                          | 0.2599                                              |
| 8         | PVYSİY   | 244.692                                  | 127.433                                  | 196.907                                                  | 0.0597                                     | 1187.912                          | 0.2551                                              |
| 9         | PVZSİZ   | 262.719                                  | 129.643                                  | 199.831                                                  | 0.0621                                     | 1026.257                          | 0.3026                                              |
| 10        | PVTST    | 291.693                                  | 151.004                                  | 204.705                                                  | 0.0566                                     | 920.516                           | 0.3001                                              |
| 11        | PVWSO    | 148.770                                  | 111.964                                  | 213.380                                                  | 0.0533                                     | 920.561                           | 0.2714                                              |
| 12        | EPXSIX   | 257.548                                  | 145.848                                  | 200.447                                                  | 0.0606                                     | 1162.228                          | 0.2601                                              |
| 13        | EPYSİY   | 326.673                                  | 165.737                                  | 201.444                                                  | 0.0655                                     | 1156.923                          | 0.2811                                              |
| 14        | EPZSİZ   | 333.653                                  | 184.152                                  | 204.436                                                  | 0.0592                                     | 1403.564                          | 0.2064                                              |
| 15        | EPTST    | 363.065                                  | 297.589                                  | 209.422                                                  | 0.0616                                     | 918.800                           | 0.3201                                              |
| 16        | EPWSO    | 433.801                                  | 416.183                                  | 218.298                                                  | 0.0568                                     | 1079.465                          | 0.2411                                              |
| 17        | CKZSİZ   | 252.567                                  | 160.580                                  | 207.267                                                  | 0.0594                                     | 1309.652                          | 0.2190                                              |
| 18        | CXSIX    | 375.295                                  | 315.268                                  | 203.364                                                  | 0.0639                                     | 897.610                           | 0.3502                                              |
| 19        | KHZSİZ   | 288.133                                  | 181.942                                  | 199.026                                                  | 0.0582                                     | 1049.723                          | 0.2787                                              |
| 20        | CKTST    | 336.408                                  | 163.527                                  | 230.576                                                  | 0.0669                                     | 1067.708                          | 0.2717                                              |
| 21        | HXSIX    | 323.551                                  | 255.603                                  | 194.234                                                  | 0.0593                                     | 1343.326                          | 0.2274                                              |
| 22        | KYSİY    | 339.102                                  | 153.141                                  | 220.185                                                  | 0.0657                                     | 1548.040                          | 0.1929                                              |
| 23        | PEZKHZST | 318.729                                  | 200.357                                  | 214.466                                                  | 0.0640                                     | 972.522                           | 0.3069                                              |
| 24        | PVZKHZST | 306.300                                  | 160.300                                  | 211.918                                                  | 0.0572                                     | 1288.401                          | 0.2094                                              |
| 25        | EPZKHZST | 373.068                                  | 271.071                                  | 216.801                                                  | 0.0629                                     | 1201.140                          | 0.2415                                              |
| 26        | SWPE     | 288.801                                  | 169.420                                  | 213.348                                                  | 0.0535                                     | 2047.691                          | 0.1225                                              |
| 27        | SWPV     | 305.548                                  | 198.884                                  | 209.348                                                  | 0.0532                                     | 1984.747                          | 0.1281                                              |
| 28        | SWEP     | 398.268                                  | 392.612                                  | 217.348                                                  | 0.0509                                     | 2156.165                          | 0.1085                                              |

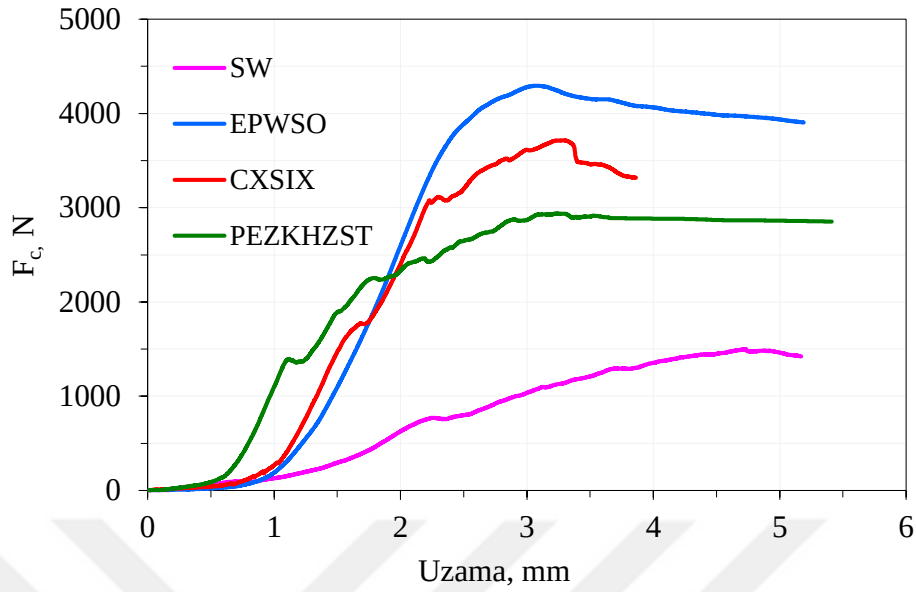
Mekanik özelliklerin belirlenmesi için tek eksenli basma dayanımı, üç nokta eğme dayanımı ve yığinsal yoğunluk testleri yapılmıştır. Isıl özelliklerin belirlenmesi için ise ısı iletkenlik, özgül ısı ve ısı yayılım testleri gerçekleştirilmiştir. Nemin ısı 1 özellikleri değıştirmesinden dolayı etiv kuru numuneler ısı 1 özellik testlerinde kullanılırken, dayanım testleri hava-kuru numuneler üzerinde yapılmış olup, sonuçlar Çizelge 6.1'de sunulmuştur.

#### **4.1.1. Mekanik ve termofiziksel özellik test sonuçları**

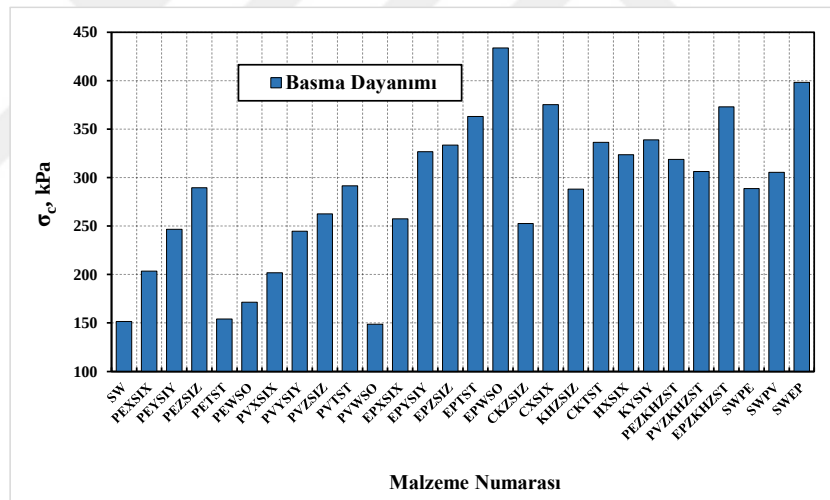
##### **4.1.1.1. Mekanik özellik test sonuçları**

Üretilen yalıtım numuneleri üzerinde yapılan tek eksenli basma ve üç nokta eğme dayanımı testlerinin sonuçlarına göre, numunelerin basma dayanımları 148.77 kPa ile 433.801 kPa arasında, üç nokta eğme dayanımları ise 107.545 kPa ile 416.183 kPa arasında değışmektedir. Üretilen yalıtım malzemelerinde basma ve eğme dayanımına etki eden parametreler arasında numunelerin hava/kuru yoğunlukları, karışımında kullanılan perlit yüzdesi, toplam bağlayıcı yüzdesi, inorganik/termoset bağlayıcı oranları ve yüzdeleri, bağlayıcı/perlit oranı, karışımında kullanılan su miktarı ve yüzdesi, farklı katkı maddelerinin kullanım miktarı ve yüzdesi, kürleme sıcaklığı ve süresi yer almaktadır. Bu parametrelerin numunelerin dayanımına etkisi farklı oranlarda olup, detaylı incelemeleri aşağıda verilmiştir.

10 × 10 cm<sup>2</sup> bindirme alanına sahip seçilen 4 farklı numuneye ait basma dayanımı için uygulanan kuvvet-yer değıştirme grafiğı Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi farklı içeriklere sahip numunelere basma kuvveti uygulandığında farklı kuvvet-uzama özellikleri göstermiştir. En yüksek kuvvet EPWSO numunesinde 4294,63 N olarak 3.076 mm uzama miktarında görülmüştür. Sırasıyla; CXSIX numunesinde 3715,43 N basma kuvveti ve 3.293 mm uzama miktarında, PEZKHZST numunesinde 2940,5 N basma kuvveti ve 3.23 mm uzama miktarında, son olarak referans numunesinde ise 1499,41 N basma kuvveti ve 4.728 mm uzama miktarında maksimum kuvvet değeri tespit edilmiştir. Yalıtım numunelerinde maksimum basma kuvvetinde referans numunelerine göre yüksek miktarlarda artış görülmüş olup, eklenen katkı malzeme ve termoset bağlayıcı miktarı değışimine bağli olarak malzeme dayanımında yüksek miktarlarda iyileşme olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.1. Seçilen yalıtım malzemelerinin basma kuvveti-uzama değişim grafiği.



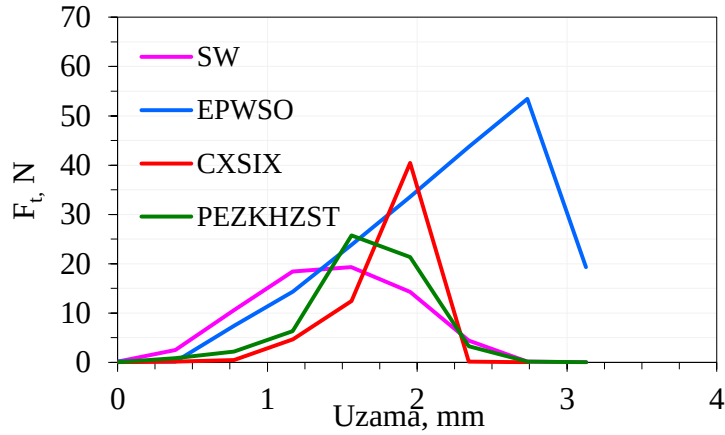
Şekil 4.2. Üretilen yalıtım malzemelerinin basınç dayanımı değerleri.

Şekil 4.2’de üretilen 6 farklı içeriğe sahip yalıtım malzemelerinin tek eksenli basma dayanım değerleri verilmiştir. Polyester termoset bağlayıcısı kullanılan numuneler (PEXSIX- PEWSO) içinde basınç dayanım değeri en yüksek olan malzeme 289,545 kPa ile PEZSIZ malzemesi, basınç dayanımı en düşük olan malzeme ise 154,219 kPa ile PETST malzemesi olduğu tespit edilmiştir. Polyester termoset ile sodyum silikatın birlikte kullanıldığı numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde, %25’e kadar artan polyester oranlarında dayanımın arttığı, %50 kullanım oranında

dayanımın %25 oranına nazaran azaldığı, toplam yapıştırıcının tamamında (%100) polyester termoset bağlayıcısı kullanılan numunelerde ise %50 kullanımına göre %11,05 dayanım değerinde artış olduğu hesaplanmıştır. %25 polyester termoset bağlayıcısı kullanılan PEZSIZ numunesinin basınç dayanım değeri referans (SW) numuneden %91,18 fazla olduğu görülmüştür. Sonuç olarak sodyum silikat-polyester bağlayıcı arasında yüksek bir uyum olmasa da oluşturulan karışımların referans yalıtım numunesine göre yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 4.2’de üretilen 6 farklı içeriğe sahip yalıtım malzemelerinin tek eksenli basma dayanım değerleri verilmiştir. Polivinilester termoset bağlayıcısı kullanılan numuneler (PVXSIX- PVWSO) içerisinde basınç dayanım değeri en yüksek olan malzeme 291.693 kPa ile PVTST malzemesi, basınç dayanımı en düşük olan malzeme ise 148.770 kPa ile PVWSO malzemesi olduğu tespit edilmiştir. Basınç dayanımları arasında karşılaştırma yapıldığında %50’ye kadar artan polivinilester oranlarında dayanım arttığı, toplam yapıştırıcının tamamında (%100) polivinilester termoset bağlayıcısı kullanılan PVWSO numunesinde ise tüm numunelere göre en düşük basınç dayanımı olan 148.770 kPa dayanım değeri tespit edilmiştir. %50 polivinilester termoset bağlayıcısı kullanılan PVTST numunesinin basınç dayanım değeri referans numuneden %92,6 fazla olduğu görülmüştür. Sonuç olarak sodyum silikat-polivinilester bağlayıcı arasında sodyum silikat-polyester bağlayıcısına göre daha yüksek bir uyum olduğu tespit edilmiş olup %100 polivinilester ile perlit arasında zayıf bir bağ olduğu kanaatine varılmıştır.

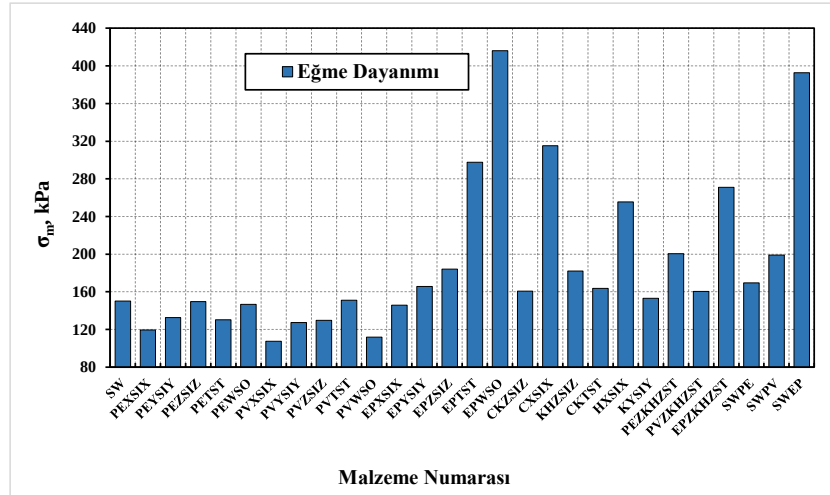
Şekil 4.2’de epoksi termoset bağlayıcısı kullanılan numunelerin (EPXSIX - EPWSO) tek eksenli basınç dayanım değerleri arasında karşılaştırma yapıldığında %100’e kadar artan epoksi kullanım oranlarında dayanımın sürekli olarak arttığı görülmüş olup, toplam yapıştırıcının %5 oranında epoksi termoset kullanılan EPXSIX numunesinde diğer epoksi kullanılan numunelere göre en düşük basınç dayanımı meydana geldiği ve bu değer (257.548 kPa) referans numunenin dayanım değerinden %70.05 fazla olduğu tespit edilmiştir. %100 epoksi termoset bağlayıcısı kullanılan EPWSO numunesinin basınç dayanımı (433.801 kPa) tez çalışmasında üretilen tüm numunelerin basınç dayanımından yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak epoksi-perlit arasında yüksek bir uyum olduğu görülmüş bu ise dayanım artışını etkilemiştir. Epoksi bağlayıcıların yüksek dayanımlarına rağmen diğer termoset bağlayıcılarına nazaran daha pahalı olmaları kullanım miktarlarını sınırlamaktadır.



Şekil 4.3. Seçilen yalıtım malzemelerinin eğme kuvveti-uzama değişim grafiği.

Şekil 4.3'te ise 300 mm bindirme uzunluğuna sahip 4 farklı numuneye ait üç nokta eğme dayanımı için uygulanan kuvvet-uzama grafiği verilmiştir. Şekilde görüldüğü numuneler farklı içeriklere sahip numunelere eğme kuvveti uygulandığında farklı kuvvet-uzama özellikleri göstermiştir. En yüksek kuvvet EPWSO numunesinde 53.41 N olarak 2.736 mm uzama miktarında görülmüştür. Sırasıyla; CXSIX numunesinde 40.46 N eğme kuvveti ve 1.953 mm uzama miktarında, PEZKHZST numunesinde 25.712 N eğme kuvveti ve 1.561 mm uzama miktarında, son olarak referans numunesinde ise 19.28 N eğme kuvveti ve 1.561 mm uzama miktarında maksimum kuvvet değerleri tespit edilmiştir. Basma dayanımındakine benzer olarak yalıtım numunelerinde maksimum eğme kuvvetinde referans malzemeye göre yüksek miktarlarda iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 4.4'te üretilen farklı içeriklere sahip yalıtım malzemelerinin üç nokta eğme dayanım (kopma modülü) değerleri verilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde tüm numunelerde üç nokta eğme dayanım değerlerinin tek eksenli basınç değerleri ile doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.4. Üretilen yalıtım malzemelerinin üç nokta eğme dayanımı değerleri.

Polyester termoset bağlayıcısı kullanılan numuneler (PEXSIX - PEWSO) arasından en yüksek basınç dayanımına sahip olan malzeme 149,531 kPa ile PEZSIZ malzemesi, en düşük basınç dayanımına sahip olan malzeme ise 119,330 kPa ile PEXSIX malzemesi olduğu tespit edilmiştir. Polyester termoset ile sodyum silikatın birlikte kullanıldığı numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde, %25'e kadar artan polyester oranlarında dayanımın arttığı, %50 kullanım oranında dayanımın %25 oranına nazaran azaldığı, toplam yapıştırıcının tamamında (%100) polyester termoset bağlayıcısı kullanılan numunelerde ise %50 kullanımına göre %11,05 dayanım değerinde artış olduğu hesaplanmıştır. Referans numuneden daha yüksek uzama değerlerine sahip olmasına rağmen polyester termoset bağlayıcısı kullanılan tüm numunelerin üç nokta eğme dayanım değeri referans (SW) numuneden daha az olduğu tespit edilmiştir. Sodyum silikat-polyester bağlayıcı kullanılan numunelerde düşük kopma modülü değerleri elde edilmişinde malzemenin sünek olmasına rağmen sadece silikat kullanılan numunelere göre basma kuvvetine karşı dirençli, buna karşın eğme kuvvetine karşı daha az dirençli olduğu görülmüştür.

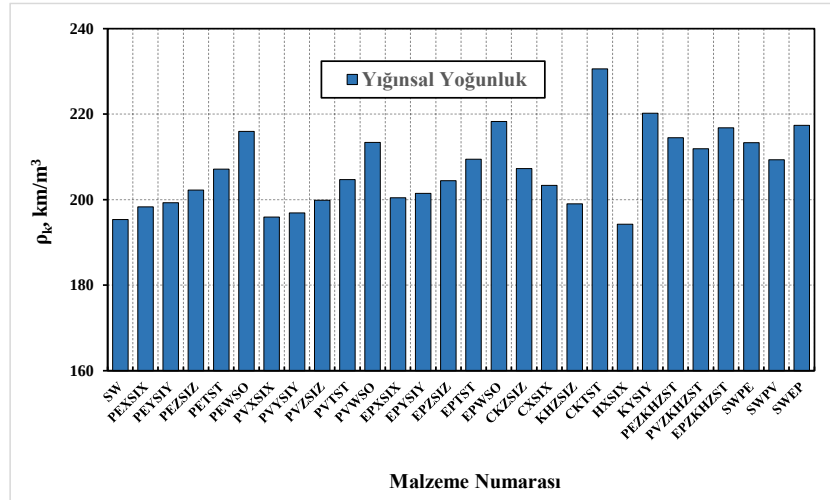
Polivinilester termoset bağlayıcısı kullanılan numuneler (PVXSIX- PVWSO) arasından en yüksek üç nokta eğme dayanımına sahip olan malzeme 151,004 kPa ile PVTST malzemesi, en düşük basınç dayanımına sahip olan malzeme ise 107,545 kPa ile PVXSIX malzemesi olduğu tespit edilmiştir. Eğme dayanımları arasında karşılaştırma yapıldığında %50'ye kadar artan polivinilester oranlarında dayanım arttığı, toplam yapıştırıcının tamamında (%5) polivinilester termoset bağlayıcısı kullanılan

PVXSIX numunesinde ise tüm numunelere göre en düşük basınç dayanımı olan 107,545 kPa dayanım değeri tespit edilmiştir. (%50) polivinilester termoset bağlayıcısı kullanılan PVTST numunesi dışında geri kalan tüm polivinilester bağlayıcı numunelerin eğme dayanımlarının referans numunesinden daha düşük değerde olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak sodyum silikat-polivinilester bağlayıcılı numunelerin eğme kuvvetine karşı daha az direnç gösterdiği tespit edilmiştir.

Epoksi termoset bağlayıcısı kullanılan numunelerin (EPXSIX - EPWSO) üç nokta eğme dayanım değerleri arasında karşılaştırma yapıldığında %100'e kadar artan epoxy kullanım oranlarında dayanımın sürekli olarak arttığı görülmüş olup, toplam yapıştırıcının %5 oranında epoksi termoset kullanılan EPXSIX numunesinde diğer epoxy kullanılan numunelere göre en düşük eğme dayanımı meydana geldiği ve bu değer (145,848 kPa) referans numunenin dayanım değerinden %2,96 daha az olduğu tespit edilmiştir. %100 epoksi termoset bağlayıcısı kullanılan EPWSO numunesinin eğme dayanımı (416,183 kPa) tez çalışmasında üretilen tüm numunelerin eğme dayanımından yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak epoksi-perlit arasında yüksek bir uyum olduğu görülmüş bu ise eğme kuvvetine karşı yüksek dirence sahip numuneler elde edilmesine imkân sağlamıştır.

Yalıtım numunelerinde kullanılan kaolin, sodyum hidroksit ve mikro silika gibi katkı maddeleri malzeme içerisindeki gözenek miktarını azalttığından malzemenin dayanım değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. SWPE, SWPV ve SWEP numunelerinin dış yüzeyinde kullanılan termoset kaplamalar malzeme üzerinde ikincil bir direnç oluşturduğundan bu malzemelerin hem basınç hem de eğme dayanımlarının artmasını sağlamıştır.

Şekil 4.5'te üretilen farklı içeriklere sahip yalıtım malzemelerinin kuru yığmsal yoğunluk değerleri verilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen kuru yoğunluk testleri sonuçlarına göre, kuru yoğunluk değerleri  $195,348 \text{ kg/m}^3$  ile  $230,576 \text{ kg/m}^3$  arasında değişiklik göstermiştir. Grafik incelendiğinde yoğunluk değerlerinin birbirine yakın olup en düşük ile en yüksek arasında %15,3 olduğu tespit edilmiştir. Malzemelerin ağırlıklarının birbirine yakın olması malzemelerin gösterdiği özelliklerin (mekanik ve ısı) yoğunluktan bağımsız ve yalın biçimde incelenmesine olanak sağlamıştır.

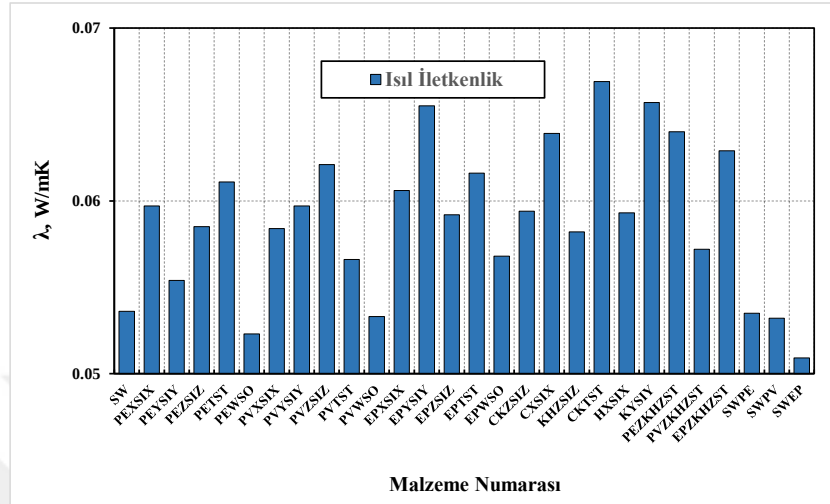


Şekil 4.5. Üretilen yalıtım malzemelerinin kuru yığımsal yoğunluklarının değişimi.

#### 4.1.1.2. Termofiziksel özellik test sonuçları

Şekil 4.6' da yalıtım numunelerinin ısı iletkenlik değerleri ve Şekil 4.7'de özgül ısı değerleri sunulmuştur. Yapılan testlere göre, numunelerin ısı iletkenlikleri 0,0509 W/mK ile 0,0669 W/mK arasında değişim göstermiştir. Grafik incelendiğinde ısı iletkenlik değerlerinin birbirine yakın olup en düşük ile en yüksek arasında %23,9 fark olduğu tespit edilmiştir. Perlit esaslı yalıtım malzemelerinde genişletilmiş perlit agreganın sahip olduğu yüksek boşluk sayesinde 0.05 W/mK'e varan ısı iletkenlik değerlerine ulaşılmıştır. Bunun dışında üretilen yalıtım malzemelerinde ısı iletkenliği etkileyen parametreler genel olarak şunlardır: malzemenin sahip olduğu dayanım ve yoğunluk değerleri, yapıştırıcı/agrega oranı, sodyum silikat/termoset oranı, kullanılan termoset cinsi, kürlenme sıcaklığı, diğer katkıların miktarı, kullanılan dolgu ve sertleştirme ajanının miktarı ve cinsi. Malzemenin mekanik özelliklerinde olan dayanım ve yoğunluk değerlerinin artması malzeme içerisindeki gözenek miktarının azalmasına neden olduğundan ısı iletkenlik değerlerinin artmasına yol açmıştır. Termoset/sodyum silikat yapıştırıcılarının birlikte kullanılması ve buna orantılı olarak oranının artması ısı iletkenlik değerinin artmasına sebebiyet vermiş olup yalnız termoset bağlayıcıların kullanıldığı numunelere göre daha yüksek ısı iletkenlik değerlerine de sahip olmalarını sağlamıştır. Karışımlarda kullanılan kaolin, bentonit, sodyum hidroksit gibi bağlayıcılar malzemenin dayanım ve yoğunluğunu arttırdığı gibi malzeme içerisindeki gözenek miktarının azalmasına ve ısı iletkenlik değerlerinin artmasına sebebiyet vermiştir.

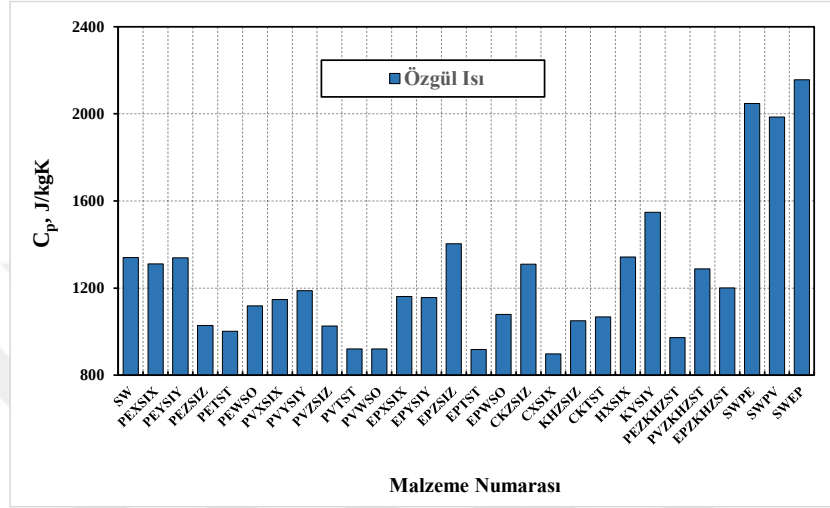
SWPE, SWPV ve SWEP numunelerinin dış yüzeyinde kullanılan termoset kaplamalar malzeme üzerinde ısı direnç oluşturarak malzemenin ısı iletkenlik değeri azalmasını ve yalıtım özelliğinin artmasını sağlamıştır.



Şekil 4.6. Üretilen yalıtım malzemelerinin ısı iletkenlik değerleri.

Şekil 4.7'de malzemelerin özgül ısı değerleri sunulmuştur. Yapılan testlere göre, numunelerin özgül ısı değerleri 897,610 J/kgK ile 2156,165 J/kgK arasında değişim göstermiştir. Özgül ısı, malzemelerin ısı depolama özelliği açısından önemli bir parametredir. Malzeme, ısıyı ne kadar iyi hapsederse, yalıtım özelliği de o kadar yüksek olmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar genel olarak yoğunluğun azalmasıyla birlikte malzeme içindeki boşluk miktarının artmasıyla özgül ısının arttığını ve bu nedenle özgül ısı ile yoğunluk arasında ters bir orantı olduğunu göstermektedir. Üretilen malzemelerin özgül ısı ve yoğunluk değerlerini karşılaştırıldığında, yoğunluğun etkili bir parametre olduğu ancak özgül ısıyı tek başına doğrudan etkilemediği tespit edilmiştir. Bu durum, perlit esaslı yalıtım malzemelerine etki eden kimyasal ve mineral katkıların özgül ısı üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte termoset/sodyum silikat yapıştırıcılarının birlikte kullanılması ve buna orantılı olarak oranının artması genelde özgül ısı değerinin artmasına sebebiyet vermiş olup yalnız termoset bağlayıcıların kullanıldığı numunelere göre daha yüksek özgül ısı değerlerine de sahip olmalarını sağlamıştır. Epoksi termoset bağlayıcılı numunelerdeki özgül ısı değerlerinin diğer termoset bağlayıcıların kullanıldığı malzemelerden daha yüksek değerde olması epoksinin daha yüksek ısı tutmasından kaynaklanmaktadır. Buna paralel olarak malzemelerin dış yüzeylerinde kullanılan termoset kaplamalar,

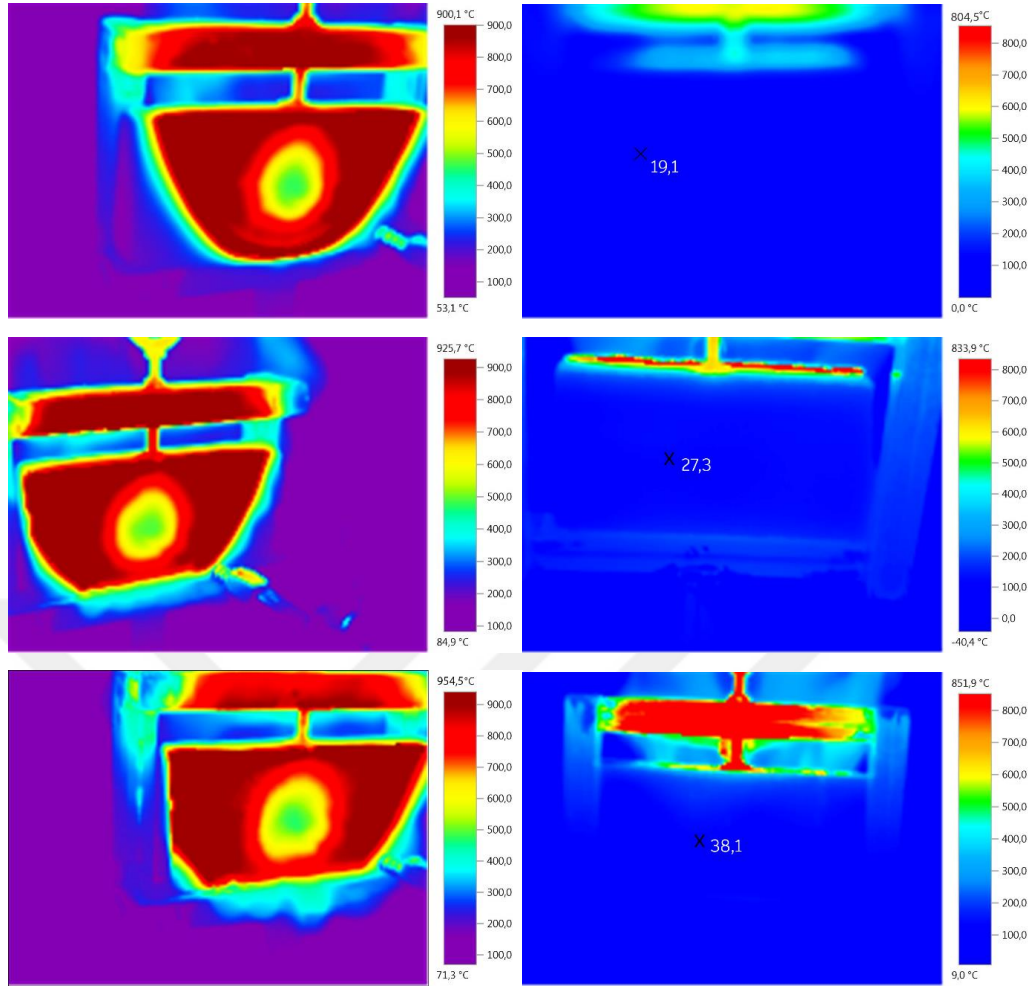
malzemenin ısı tutma kapasitesini arttırdığı için özgül ısı değerlerinin de artmasına olanak sağlamıştır. Bunun yanı sıra bazı inorganik katkılar yüksek sıcaklıkta parçalanarak ısıyı absorbe etmektedir. Özellikle kaolin, sodyum hidroksit ve sodyum karbonat katkıların yalıtım malzemelerinin özgül ısılarını arttırdığı görülmüştür (CKZSIZ, HXSIX ve KYSIY).



Şekil 4.7. Üretilen yalıtım malzemelerinin özgül ısı değerleri.

Isıl yayılım hızı, bir malzemenin ısı iletkenliğinin o malzemenin yoğunluğu ve özgül ısısının çarpımına (ısı kapasitesi) bölünmesiyle hesaplanır. Yüksek ısı kapasiteli ve düşük ısı iletkenlik özelliğine sahip malzemeler, düşük ısı yayılım değerlerine sahiptirler. Şekil 4.8'de, üretilen numunelerinin ısı yayılım hızları 0,1085 mm<sup>2</sup>/s ile 0,3502 mm<sup>2</sup>/s arasında değişim göstermiştir. Termoset/sodyum silikat yapıştırıcılarının birlikte kullanıldığı numunelerde en düşük ısı yayılım değerleri %10 polyester ve polivinilesterli PEYSIY ve PVYSIY numuneleri ile %25 epoksili EPZSIZ numunesinde görülmüştür. Epoksinin daha yüksek ısı tutmasından kaynaklı olarak epoksi termoset bağlayıcılı numunelerdeki özgül ısı değerlerinin yüksek olması aynı zamanda bu malzemelerin ısı yayılım değerlerinin de düşmesini sağlamıştır. Buna paralel olarak malzemelerin dış yüzeylerinde kullanılan termoset kaplamalar, malzemenin ısı tutma kapasitesini arttırdığı için ısı yayılım değerlerinin de azalmasına olanak sağlamıştır. İnorganik katkı malzemelerin (kaolin, sodyum hidroksit ve sodyum karbonat) kullanıldığı yalıtım malzemelerinin özgül ısılarını arttırdığı gibi ısı yayılım değerlerinin de azalmasına yol açmıştır.





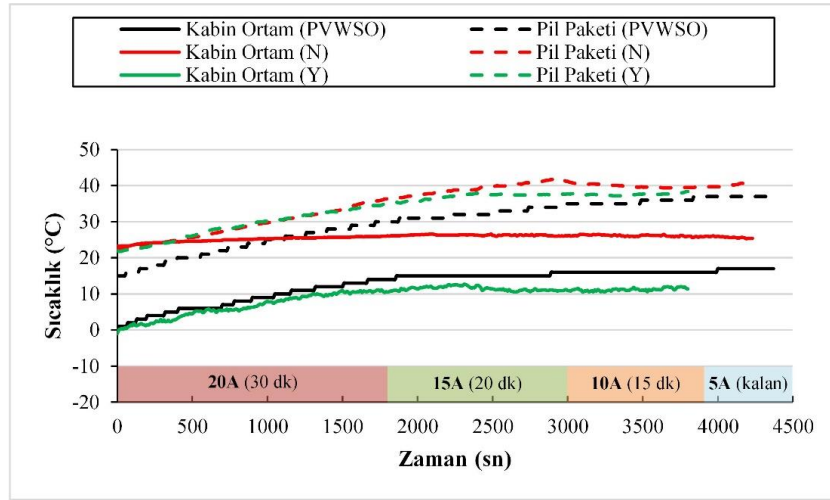
**Şekil 4.9.** ASTM E84 ateş testine tabi tutulan CXSIX numunesinin farklı sürelerdeki termal kamera görüntüleri:(a,b) 5. dk. arka-ön yüzey (c,d) 10. dk. arka-ön yüzey (e,f) 10. dk. arka-ön yüzey.

## 4.2. Yalıtımın ve Sürüş Profiline Sıcaklığa Etkisi

Bu kısımda farklı sürüş profillerinin, farklı ortam sıcaklıklarının ve farklı yalıtım malzemelerinin zamana bağlı kabin ortam ve pil paketi sıcaklığına etkileri incelenmiştir. Bunun yanı sıra bu değişkenlerin pil paketinin deşarj süresine etkilerinden de bahsedilmiştir.

### 4.2.1. Kabin ortamının 0°C olduğu durumda sıcaklık değişimi

Ortam sıcaklığının 0°C olduğu durumda PVWSO, EPWSO ve CXSIX ile yalıtılan kabinin 1, 2 ve 3 numaralı sürüş profillerinde ortam ve pil paketi sıcaklıklarının zamana bağlı değişimleri Şekil 4.10-4.18’de görülmektedir.

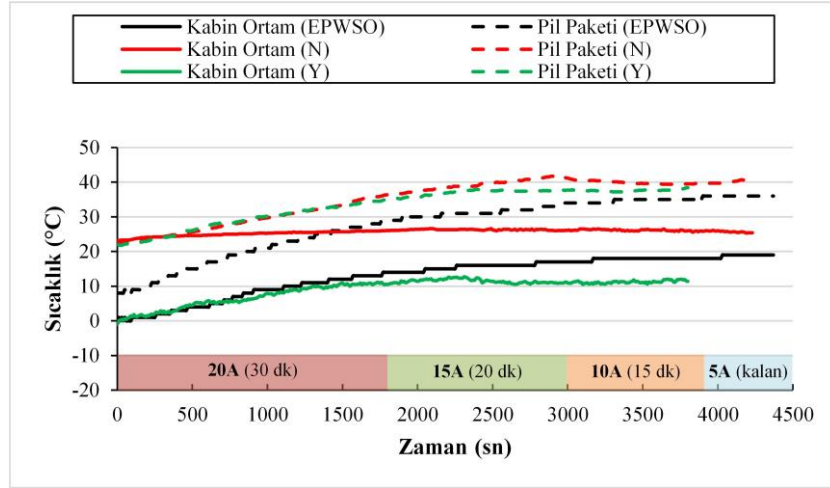


**Şekil 4.10.** 0°C sıcaklıkta PVWSO numunesinin 1. profil için sıcaklık değişimi.

Yalıtılan kabin ortamında sıcaklığın pil sıcaklığının artmasıyla birlikte yalıtımsız ortama göre daha sıcak olması beklenmektedir. 0°C kabin sıcaklığında ve 1. sürüş profilini incelediğimizde şekilde de görüldüğü üzere PVWSO ile yalıtılan kabinin yalıtımsıza oranla daha sıcak olduğu görülmektedir. 0 °C’de başlayan teste kabin ortam sıcaklığının yalıtımlı deneyde bir süre sonra 20 °C civarına geldiği görülürken bu değer yalıtımsız ortamda 10 °C civarında olmuştur.

Pil paketinin sıcaklığına baktığımızda ise PVWSO ile yalıtılan kabin içerisindeki pil paketinin normal şartlar ve yalıtımsız şartlara oranla daha az ısındığı görülmektedir. Daha düşük sıcaklığın pil performansını artırması beklenmektedir. (Buraya destekleyici atıf).

20 amper akım altında başlayan deney hem pil paketinde hem de kabin ortam sıcaklığını lineer bir şekilde artırmıştır. Sadece normal şartlar altında kabin ortamı bulunmadığı için sıcaklıkta belirgin bir değişiklik olmamıştır. 1. profil deney şartlarında 20 amperden sonra akımın sırasıyla 15, 10 ve 5 ampere düşürülmesi sıcaklık artışının azalmasına hatta değişimin durmasına sebep olmuştur.

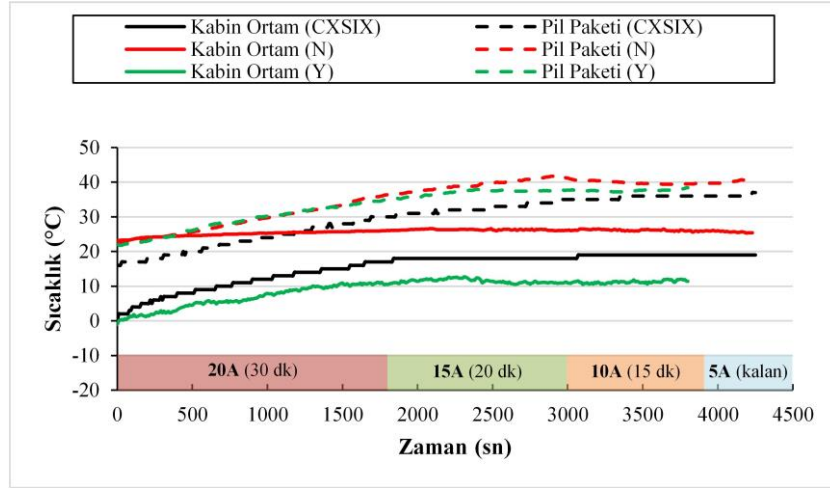


**Şekil 4.11.** 0°C sıcaklıkta EPWSO numunesinin 1. profil için sıcaklık değişimi.

0°C kabin sıcaklığında ve 1 numaralı sürüş profilini incelediğimizde şekilde de görüldüğü üzere EPWSO ile yalıtılan kabinin yalıtımsız kabine oranla daha sıcak olduğu görülmektedir. 0 °C'de başlayan testte kabin ortam sıcaklığının yalıtımlı deneyde bir süre sonra 20 °C civarına geldiği görülürken bu değer yalıtımsız ortamda 10 °C civarında olmuştur.

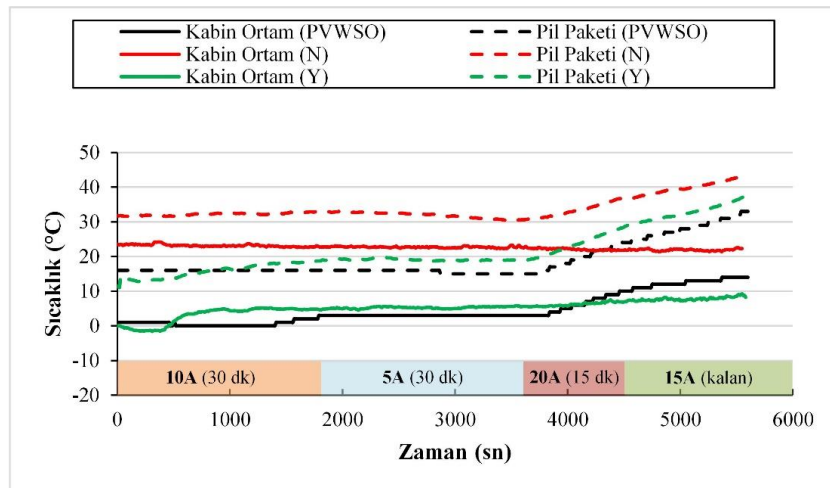
Pil paketinin sıcaklığına baktığımızda ise EPWSO ile yalıtılan kabin içerisindeki pil paketinin normal şartlar ve yalıtımsız şartlara oranla daha az ısındığı görülmektedir. Daha düşük sıcaklığın pil performansını artırması beklenmektedir. Dolayısıyla deşarj süresine bakıldığında bu durum açık bir şekilde görülmektedir. Benzer şekilde Wu ve ark. (2020), aerogel ile yalıtıktıkları ortamda yüksek deşarj akımında pil deşarj verimliliğinin arttığını belirtmişlerdir.

20 amper akım altında başlayan deneyde hem pil paketinde hem de kabin ortam sıcaklığında lineer bir şekilde artırmıştır. Sadece normal şartlar altında kabin ortamı bulunmadığı için sıcaklıkta belirgin bir değişiklik olmamıştır. 2 numaralı deşarj profilinde 20 amperden sonra akımın 15, 10 ve 5 ampere düşürülmesi sıcaklık artışının azalmasına hatta bir süre sonra değişimin durmasına sebep olmuştur.



Şekil 4.12. 0°C sıcaklıkta CXSiX numunesinin 1. profil için sıcaklık değişimi.

CXSiX ile yalıtılan ve 0°C ortamda yapılan deneyde en göze çarpan durum deşarj süresinin yalıtımsız ortama göre daha uzun olmasıdır. Ayrıca deneyin 20 amper akımla başlayıp 15 amper akımla devam etmesi kabin ortam ve pil paketi sıcaklığını hızlı bir şekilde artırmıştır. Ortam sıcaklığı 20 amperden 15 ampere düştüğünde artış göstermezken pil paketi sıcaklıkları artışa devam etmiştir. Yalıtımsız ortamda 5 amper akımda pil paketinin tamamen deşarj olmasından dolayı deney yapmak mümkün olmamıştır.

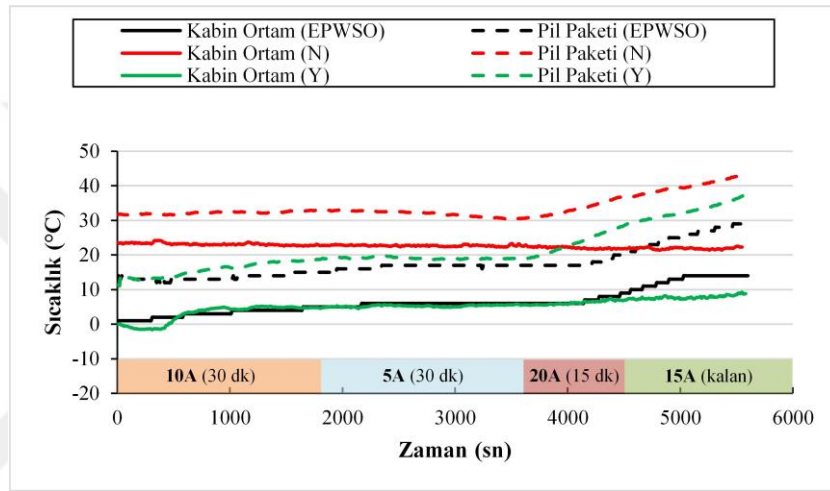


Şekil 4.13. 0°C sıcaklıkta PVWSO numunesinin 2. profil için sıcaklık değişimi.

0°C kabin sıcaklığında ve 2. sürüş profilini incelediğimizde pil paketinde sıcaklığın uzun bir süre çok fazla değişim göstermeden devam ettiği daha sonrasında

görece daha yüksek olan 20 A akıma geçildiğinde sıcaklıkta belirgin bir artışın olduğu görülmüştür. Bu artış 15 A akımda da devam etmiştir. Genel olarak yalıtımlı ortamda pil paketi sıcaklığının yalıtımsız ve normal ortama göre daha düşük olduğu görülmüştür.

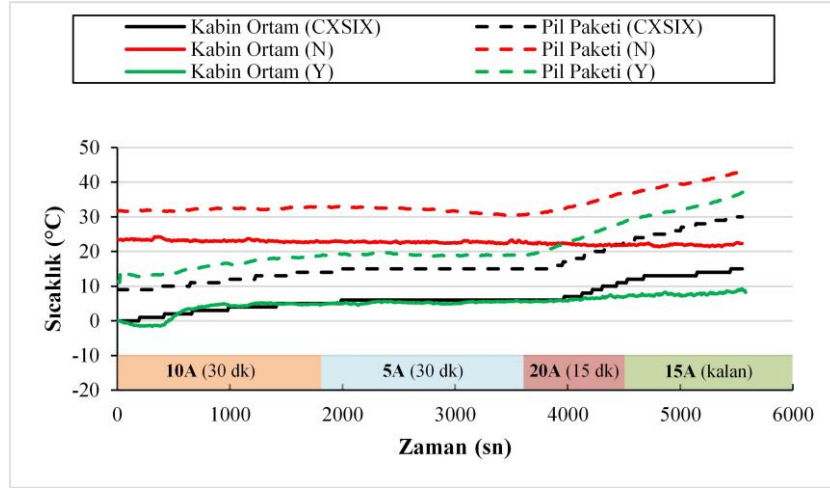
Akımın çok fazla yüksek olmaması pil paketi sıcaklığını etkilemediği için dolaylı yoldan kabin ortam sıcaklığını da etkilememiştir. Ancak 20 A sonrası kabin ortamında da sıcaklığın belirgin bir şekilde arttığı özellikle beklendiği üzere yalıtımlı kabinin daha sıcak olduğu görülmüştür.



Şekil 4.14. 0°C sıcaklıkta EPWSO numunesinin 3.profil için sıcaklık değişimi.

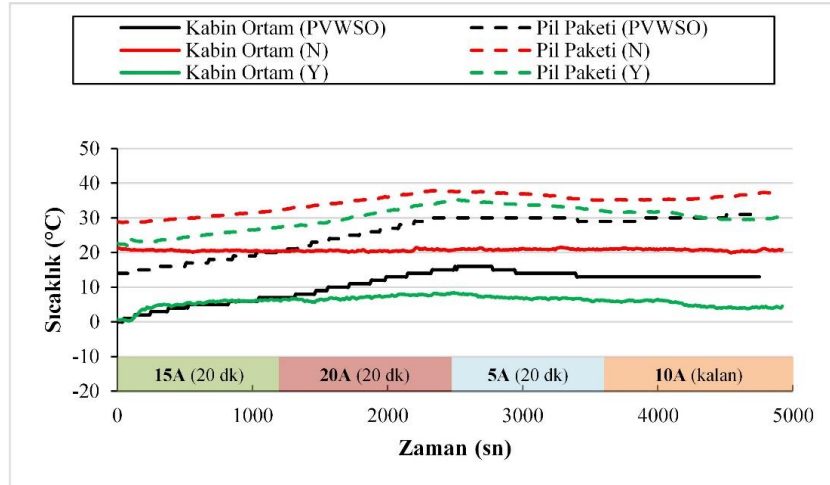
2 numaralı deşarj profiline bağlı olarak sıcaklıkta zamana bağlı meydana gelen değişim incelendiğinde ise 10 amper deşarj akımında sıcaklık her ne kadar artsa da bu artışın hızlı bir şekilde olduğundan söz etmek mümkün değildir. Ancak 20 amper deşarj akımına gelindiğinde sıcaklığın hızlı bir artış eğilimi gösterdiği görülmektedir. Bu artış pil tamamen boşalana kadar devam etmiştir.

Yalıtımsız ortamda pil paketi sıcaklığının EPWSO ile yalıtılan ortama göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumdan dolayı her ne kadar pil deşarj süresini kısaltması beklense de hemen hemen aynı sürede deşarj oldukları görülmektedir. Bu durum PVWSO ile yalıtılan ortamla benzer özellik göstermiştir.



Şekil 4.15. 0°C sıcaklıkta CXSIX numunesinin 2. profil için sıcaklık değişimi.

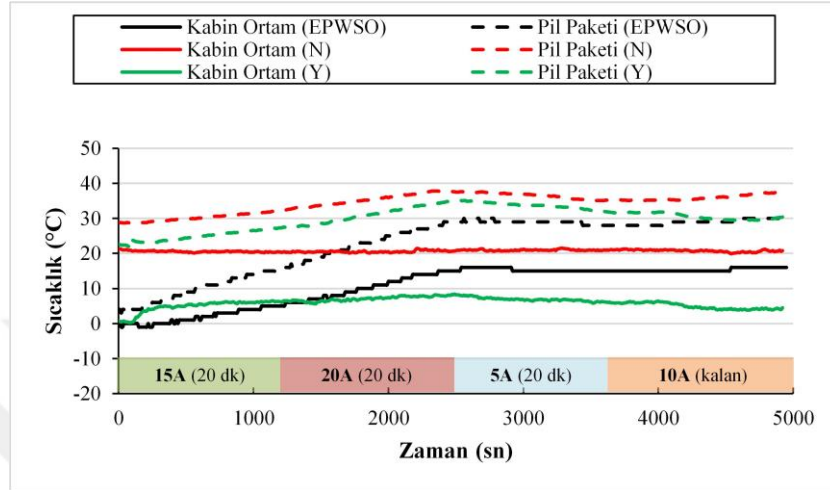
2 numaralı sürüş profilinde CXSIX ile yalıtılan kabin ortamında sıcaklık beklendiği üzere yalıtımsız kabin sıcaklığından daha yüksek olurken pil paketi sıcaklığı ise daha düşük olmuştur. 10 amperle başlayan ve 5 amperle devam eden deneyde sıcaklıklarda artış olsa da bu artışın hızlı olduğu söylenemez. Ancak 20 amper ile deşarj edildiğinde pil paketinin yalıtımlı ve yalıtımsız ortamda hızlı bir şekilde arttığı görülmüştür.



Şekil 4.16. 0°C sıcaklıkta PVWSO numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi.

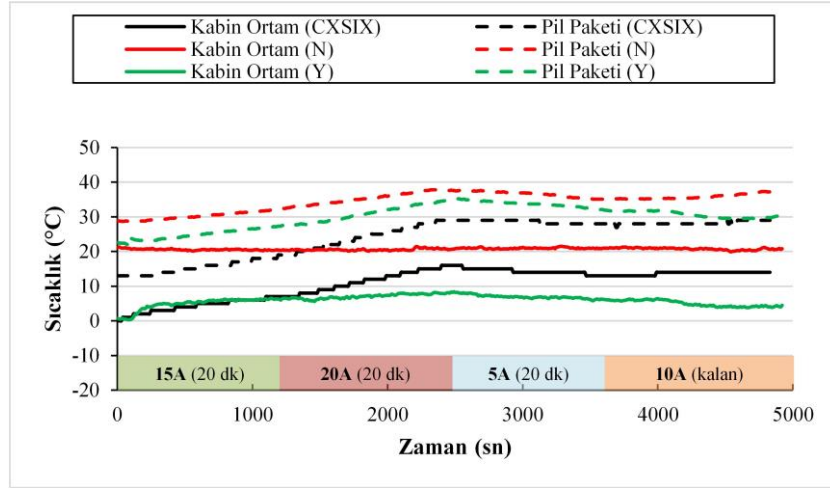
0°C kabin sıcaklığında 3. sürüş profilindeki sıcaklık değişimleri incelendiğinde ise pil paketi içerisindeki sıcaklığın yine PVWSO ile yalıtılan ortamda normal ve yalıtımsız ortama göre daha düşük olduğu görülmektedir. Deney başlangıcında 15 A ve

sonrasında 20 A ile devam edilmesi pil paketinin hızlı bir şekilde ısınmasına dolayısıyla da kabin ortamı sıcaklığının da artmasına sebep olmuştur. Daha sonrasında 5A akıma düşülmesi sıcaklığın bir miktar azalmasını sağlarken daha sonrasında 10 A akıma geçilmesi sıcaklığı bir miktar artırmıştır.



Şekil 4.17. 0°C sıcaklıkta EPWSO numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi.

0°C kabin sıcaklığında 3 numaralı sürüş profilindeki sıcaklık değişimleri incelendiğinde ise pil paketi içerisindeki sıcaklığın yine EPWSO ile yalıtılan ortamda normal ve yalıtımsız ortama göre daha düşük olduğu görülmektedir. Deney başlangıcında 15 A ve sonrasında 20 A ile devam edilmesi pil paketinin hızlı bir şekilde ısınmasına dolayısıyla da kabin ortamı sıcaklığının da artmasına sebep olmuştur. Daha sonrasında 5A akıma düşülmesi sıcaklığın bir miktar azalmasını sağlarken daha sonrasında 10 A akıma geçilmesi sıcaklığı bir miktar artırmıştır. Pil paketi başlangıç sıcaklıklarının farklı olmasının temel sebebi yalıtımlı ortamın dengeye ulaşmasının uzun sürmesi ve bu durumdan dolayı pil paketinin soğumasındandır. Bu durum deşarj süresinin her ne kadar yalıtılmış olsa da yalıtımsız ortamlarla benzer olmasına neden olmuştur.

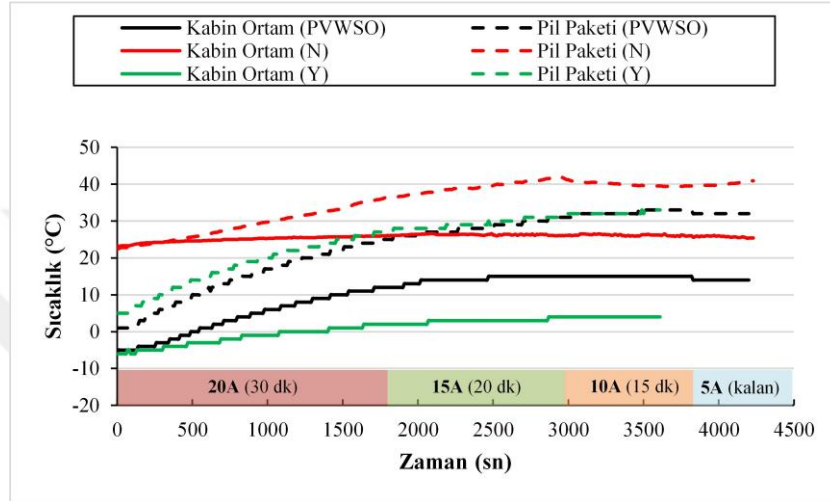


**Şekil 4.18.** 0°C sıcaklıkta CXsIX numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi.

0°C kabin sıcaklığında 3 numaralı sürüş profilindeki sıcaklık değişimleri CXPIX yalıtım numunesi için incelendiğinde ise, pil paketi içerisindeki sıcaklığın yine CXPIX ile yalıtılan ortamda normal ve yalıtımsız ortama göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bataryanın 15A ve 20A gibi yüksek akımlarda bataryanın deşarj edilmeye başlanması pil paketinin ısınmasına buna bağlı olarak da kabin ortam sıcaklığının hızlı bir şekilde artmasına ve batarya için istenen optimum aralığa ulaşmasına neden olmuştur. Sonrasında batarya deşarj akımının 5A ya düşürülmesi hem kabin ortamı hem de pil paketinin içerisinde sıcaklıkta düşüşe neden olsa da deşarj hızının 10A ya yükseltilmesiyle sıcaklıklarda tekrar artış gözlenmiştir. Pil paketi başlangıç sıcaklıklarının farklı olmasının temel sebebi yalıtımlı ortamın dengeye ulaşmasının uzun sürmesi ve bu durumdan dolayı pil paketinin soğumasındandır. Bu durum deşarj süresinin her ne kadar yalıtılmış olsa da yalıtımsız ortamla benzer olmasına neden olmuştur.

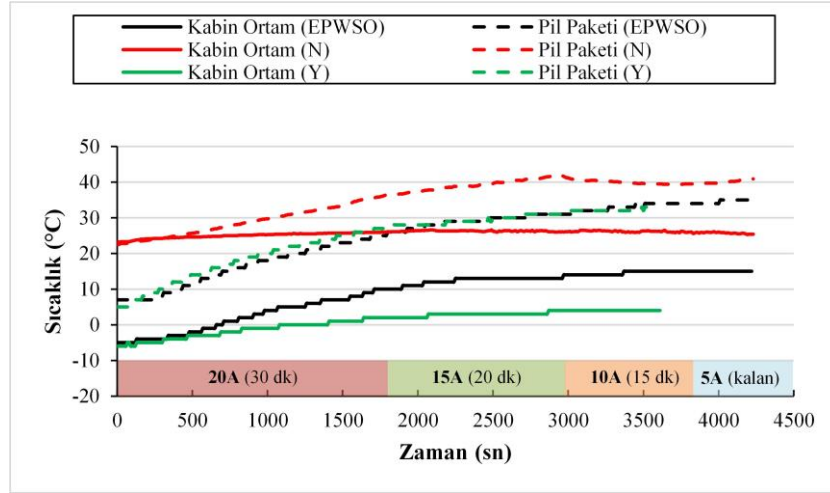
#### 4.2.2. Kabin ortamının -5°C olduğu durumda sıcaklık değişimi

Ortam sıcaklığının -5°C olduğu durumda PVWSO, EPWSO ve CXSIX ile yalıtılan kabinin 1, 2 ve 3 numaralı sürüş profillerinde ortam ve pil paketi sıcaklıklarının zamana bağlı değişimleri Şekil 4.19-4.27’de görülmektedir.



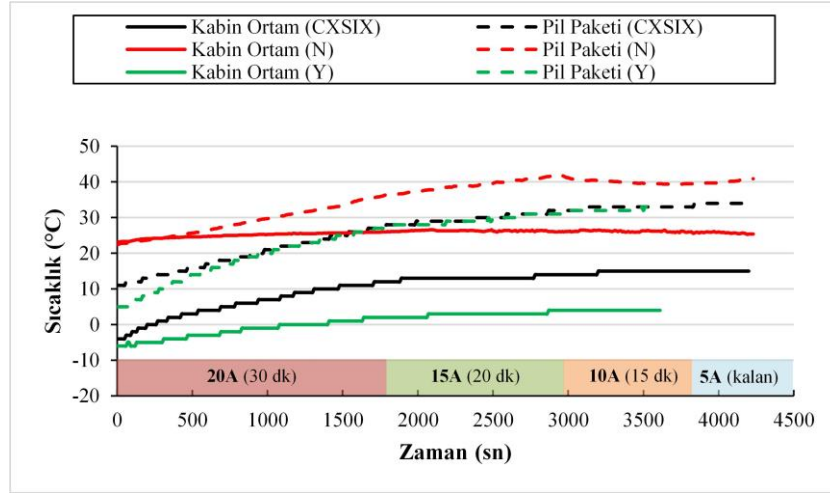
Şekil 4.19. -5°C sıcaklıkta PVWSO numunesinin 1. profil için sıcaklık değişimi.

Öncelikle Şekil 4.19’deki sıcaklık değişimlerini incelersek 1 numaralı sürüş profilinde 30 dakika boyunca 20 amper akım çekilmesi doğrudan hem kabin ortam sıcaklığını hem de pil paketi sıcaklığını yükseltmiştir. Daha sonrasında 20 dakika boyunca 15 amper akımla devam edilmiş ve sıcaklık artışı devam ederken sıcaklık artış hızında biraz düşüş yaşanmıştır. Daha sonrasında 10 amper akıma geçilmesi özellikle PVWSO ile yalıtılan ortamda kabin sıcaklığı üzerinde herhangi bir etkisi olmamıştır. Bu profilde her ne kadar yalıtımlı ortamda pil paketi sıcaklığı yalıtımsız ortama oranla yüksek olsa da bu durum pil paketinden alınan akımın süresini düşürmemiştir. Yalıtımlı ortamda akım süresi neredeyse normal ortam ile aynı olmuştur.



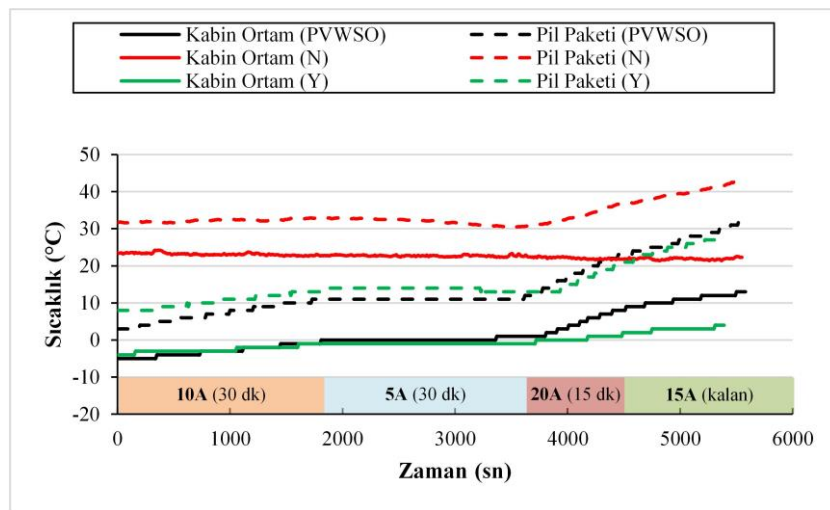
Şekil 4.20. -5°C sıcaklıkta EPWSO numunesinin 1. profil için sıcaklık değişimi.

-5°C kabin sıcaklığında ve 1 numaralı sürüş profilini incelediğimizde şekilde de görüldüğü üzere EPWSO ile yalıtılan kabinin yalıtımsız kabine oranla daha sıcak olduğu görülmektedir. -5 °C'de başlayan deşarj süresince kabin ortam sıcaklığının yalıtımlı deneyde bir süre sonra 20 °C civarına geldiği görülürken bu değer yalıtımsız ortamda 10 °C civarında olmuştur. Batarya kabinin EPWSO ile yalıtılması sonucunda batarya optimum çalışma sıcaklık aralığına ulaşmış Şekil 4.19' da da görüldüğü gibi bu durum bataryanın performansında iyileşme meydana getirerek deşarj süresini uzamasını sağlamıştır. Bu profilde her ne kadar yalıtımlı ortamda pil paketi sıcaklığı yalıtımsız ortama oranla yüksek başlasa da bu durum pil paketinden alınan akımın süresini düşürmemiştir. Yalıtımlı ortamda bataryanın deşarj süresi yalıtımsız ortamdan daha uzun olmuştur.



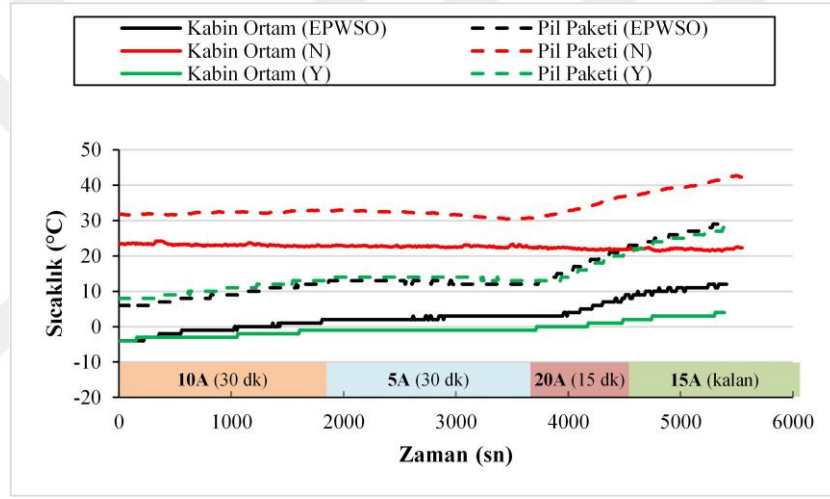
Şekil 4.21. -5°C sıcaklıkta CXPIX numunesinin 1. profil için sıcaklık değişimi.

-5°C kabin sıcaklığında ve 1 numaralı sürüş profilini incelemeye devam ettiğimizde Şekil 4.21'de de görüldüğü üzere CXPIX ile yalıtılan kabinin yalıtımsız kabine oranla daha sıcak olduğu görülmektedir. -5 °C'de başlayan deşarj süresince kabin ortam sıcaklığının yalıtımlı deneyde bir süre sonra hızla artarak optimum sıcaklık koşullarına ulaştığı görülmürken, bu artış yalıtımsız ortamda optimum koşulların dışında kalmıştır. Bataryanın başlangıçta 20A gibi yüksek bir akımla uzun süre deşarj edilmesi hem batarya kabini hem de pil paketinin sıcaklığını artırmıştır. CXPIX yalıtım numunesi için de durum değişmemiş, batarya kabini yalıtılmasıyla deşarj süresi yalıtımsız ortamdaki daha uzun olmuştur.



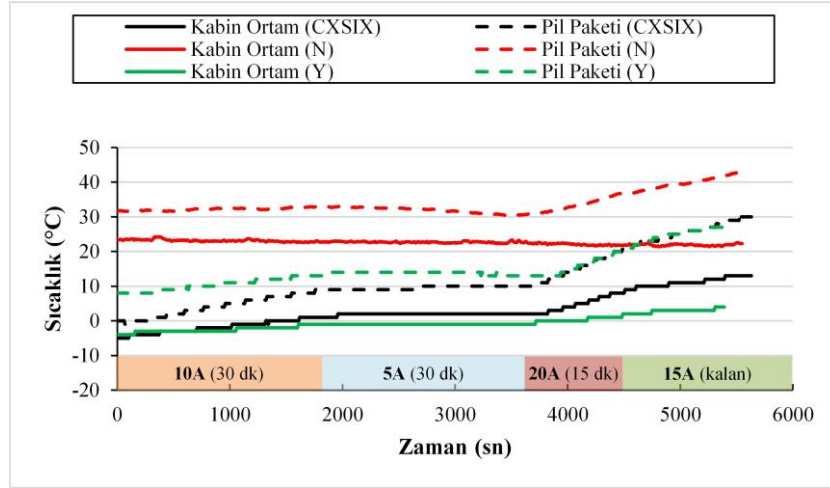
Şekil 4.22. -5°C sıcaklıkta PVWSO numunesinin 2. profil için sıcaklık değişimi.

Şekil 4.22’de 2 numaralı sürüş profiline ait sıcaklık-zaman değişim grafiğini incelediğimizde yalıtımsız ortamda yapılan deneyin PVWSO ile yalıtılan ortama oranla daha kısa sürede deşarj olduğu görülmektedir. Kabin sıcaklığı yine yalıtımsız kabine göre daha yüksek olurken pil sıcaklığı ise uzun bir süre yalıtımsız ortamda yapılan deneyin pil sıcaklığından düşük olmuştur. Sırasıyla 10 ve 5 amper akımda 30’ar dakika yürütülen deneyde pil sıcaklığı ve kabin sıcaklığının arttığı ancak bu artışın şiddetli olmadığı görülmüştür. Buna rağmen 20 amper akım çekilmeye başlandığında ve 15 amper ile devam edildiğinde sıcaklık ani ve şiddetli bir şekilde yükselmeye başlamıştır. Bu durum normal şartlarda yapılan deneylerde de aynıdır. 2 numaralı sürüş profilinin deşarj süresi 1 ve 3 numaralı profile göre daha uzun olmuştur.



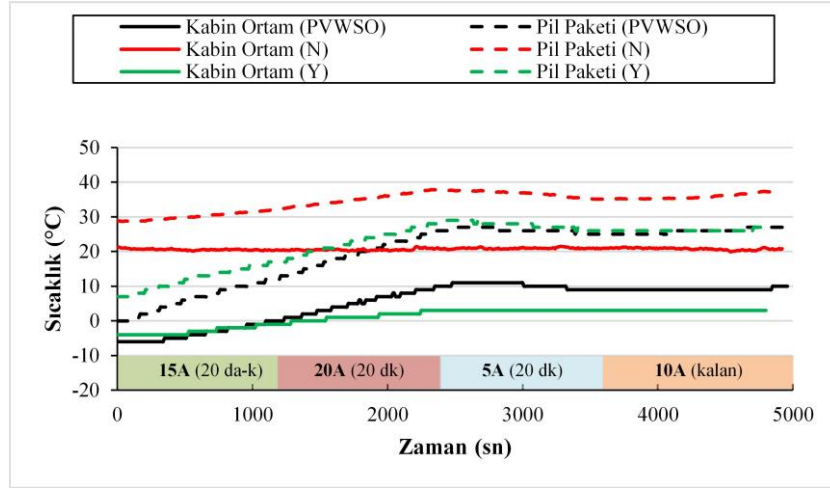
Şekil 4.23. -5°C sıcaklıkta EPWSO numunesinin 2. profil için sıcaklık değişimi.

Şekil 4.23’de 3 numaralı sürüş profiline ait sıcaklık-zaman değişim grafiği verilmiştir. Kabin ortam sıcaklıkları, 10A ve 5A deşarj akımlarında EPWSO ile yalıtılmış ve yalıtımsız durum arasında yüksek farklılıklar söz konusu olmasa da deşarj akımı 20A’ya yükseltildiğinde yalıtımlı durumda yalıtımsız duruma göre sıcaklık daha çok yükselmiştir. Pil paketi sıcaklığına baktığımızda ise bataryaya deşarj edilmeye başladığında yalıtımsız durum için sıcaklık yüksek olsa da akım yükseldikçe yalıtımın ısıyı tutmasının bir sonucu olarak yalıtımlı durum için sıcaklık artışı daha fazla olmuştur.



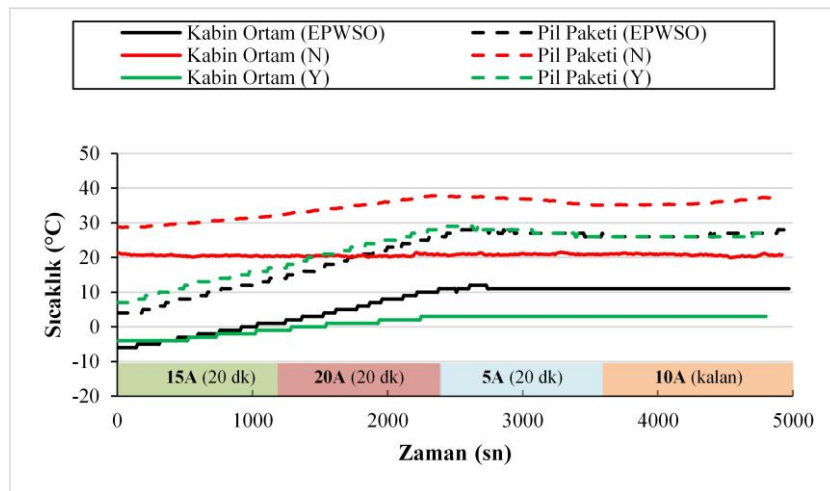
**Şekil 4.24.** -5°C sıcaklıkta CXPIX numunesinin 2. profil için sıcaklık değişimi.

-5°C kabin sıcaklığı ve 2 numaralı sürüş profiline ait CXPIX ile yalıtılan ortama sıcaklık-zaman değişim grafiğini incelediğimizde yalıtımsız ortamda yapılan deneyin CXPIX ile yalıtılan ortama oranla daha kısa sürede deşarj olduğu görülmektedir. Kabin sıcaklığı tüm deşarj hızları için yalıtımsız kabine göre daha yüksek olurken pil sıcaklığı ise uzun bir süre yalıtımsız ortamda yapılan deneyin pil sıcaklığından düşük olmuştur. Sırasıyla 10 ve 5 amper deşarj hızında pil sıcaklığı ve kabin sıcaklığının arttığı ancak bu artışın şiddetli olmadığı görülmüştür. Buna rağmen 20 amper akımla batarya deşarj edilmeye başlandığında ve 15 amper ile devam edildiğinde sıcaklık ani ve şiddetli bir şekilde yükselmeye başlamıştır. Bu durum normal şartlarda yapılan deneylerde de aynıdır. 2 numaralı sürüş profilinin deşarj süresi 1 ve 3 numaralı profile göre daha uzun olmuştur.



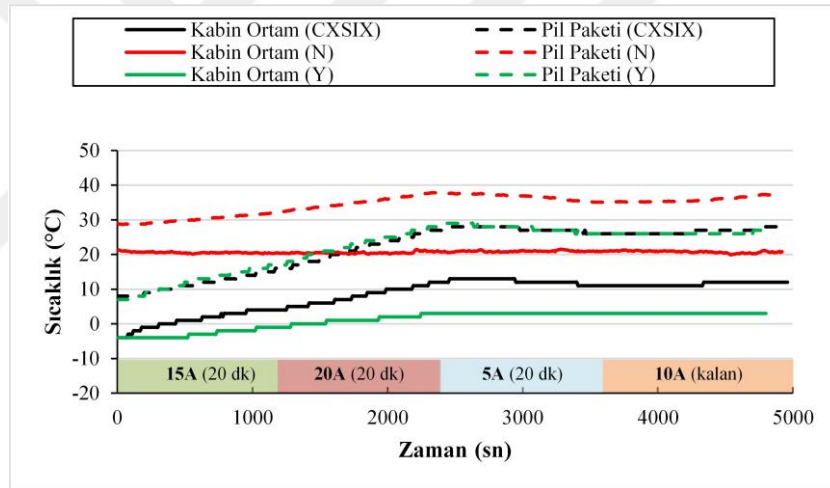
Şekil 4.25. -5°C sıcaklıkta PVWSO numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi.

Şekil 4.25'de 3 numaralı sürüş profiline ait sıcaklık-zaman değişim grafiğini incelediğimizde pil paketinin 20 dakika 15 amper ve 20 dakika 20 amper akım ile deşarj edilmesi ilk kısımda pil paketi ve kabin ortam sıcaklığını doğrudan artırmıştır. Daha sonrasında 20 dakika 5 amper akım ile deşarj edilmesi sıcaklık artışını durdurmuş hatta bir miktar düşmesine sebep olmuştur. Deşarj süresine baktığımızda PVWSO ile yalıtılan kabinde pil paketinin sıcaklığının yalıtımsız ortamdaki pil paketi sıcaklığından hep düşük olduğu görülmüştür. Bu durumun pil ömrünü etkilediği düşünülmektedir. Ayrıca kabin ortam sıcaklığı beklenildiği üzere PVWSO ile yalıtılan kabinde yalıtımsız kabine göre daha yüksek seyretmiştir.



Şekil 4.26. -5°C sıcaklıkta EPWSO numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi.

Şekil 4.26’da  $-5^{\circ}\text{C}$  ortam sıcaklığında batarya kabininin EPWSO numunesiyle yalıtılmasının 3. sürüş profili için sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Bataryanın 15 ve 20A gibi yüksek hızlarda deşarj edilmesiyle hem kabin içi hem de pil paketi içi sıcaklıklarda hızlı bir artış meydana gelmiştir. Sonrasında deşarj hızının 5A’ye düşmesiyle sıcaklık artışı kabin içinde durmuş pil paketi içi için ise bir miktar azalma söz konusu olmuştur. Deşarj süresince pil paketi sıcaklığının yalıtımsız durumda daha yüksek devam ettiği görülmektedir. Ancak yalıtımlı durumda sıcaklık artış hızı yalıtımsız duruma göre daha yüksek olduğundan deşarj bitiminde pil paketi sıcaklığı iki durum için de çok yakın değerlerdedir. Ortam sıcaklığının pilin ideal çalışma sıcaklığına ulaşması EPWSO ile yalıtımlı durumda mümkün olduğundan deşarj süresi yalıtımsız duruma göre daha uzun sürmüş ve normal koşullara daha yakın sürede sonuçlanmıştır.



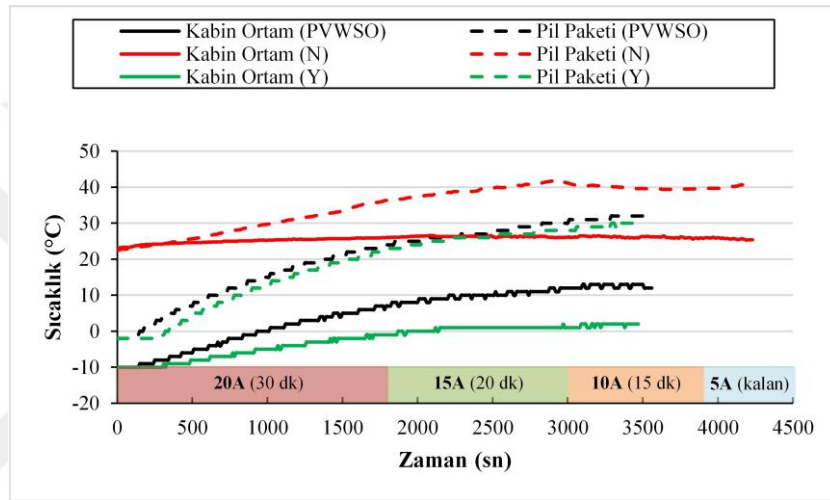
Şekil 4.27.  $-5^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta CXPIX numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi.

Şekil 4.27’de  $-5^{\circ}\text{C}$  ortam sıcaklığında batarya kabininin CXPIX numunesiyle yalıtılmasının 3. sürüş profili için sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Diğer yalıtım numunelerinde olduğu gibi burada da 15 ve 20A gibi yüksek akımlarda bataryanın deşarj edilmesiyle hem kabin içi hem de pil paketi içi sıcaklıklarda hızlı bir artış meydana gelmiştir. Sonrasında deşarj hızının 5A’ye düşmesiyle sıcaklık artışı kabin içinde durmuş pil paketi içi için ise bir miktar azalma söz konusu olmuştur. Deşarj süresince pil paketi sıcaklığının yalıtımsız durumla çok yakın olduğu görülmektedir. Ancak kabin sıcaklığı yalıtımlı durum için yalıtımsız durumdan daha kısa sürede

optimum çalışma sıcaklık aralığına ulaştığı için deşarj süresi yalıtımsız duruma göre daha uzun sürmüştür.

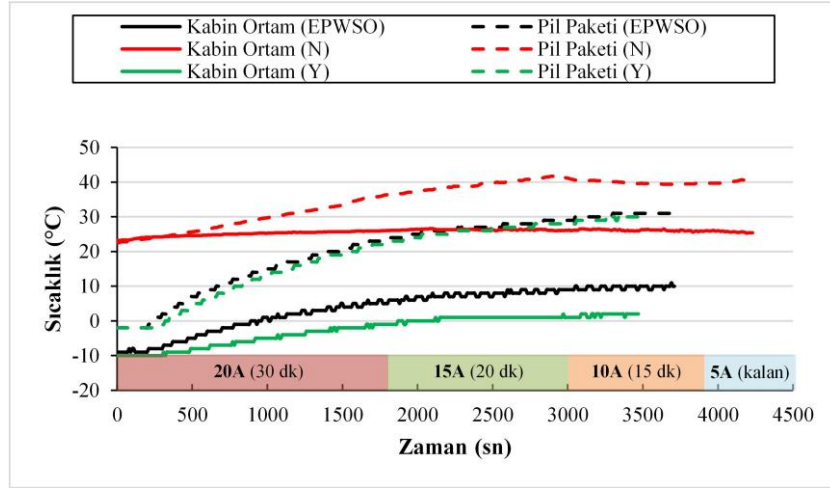
#### 4.2.3. Kabin ortamının -10°C olduğu durumda sıcaklık değişimi

Ortam sıcaklığının -10°C olduğu durumda PVWSO, EPWSO ve CXPIX ile yalıtılan kabinin 1, 2 ve 3 numaralı sürüş profillerinde ortam ve pil paketi sıcaklıklarının zamana bağlı değişimleri Şekil 4.28-4.36’da görülmektedir.



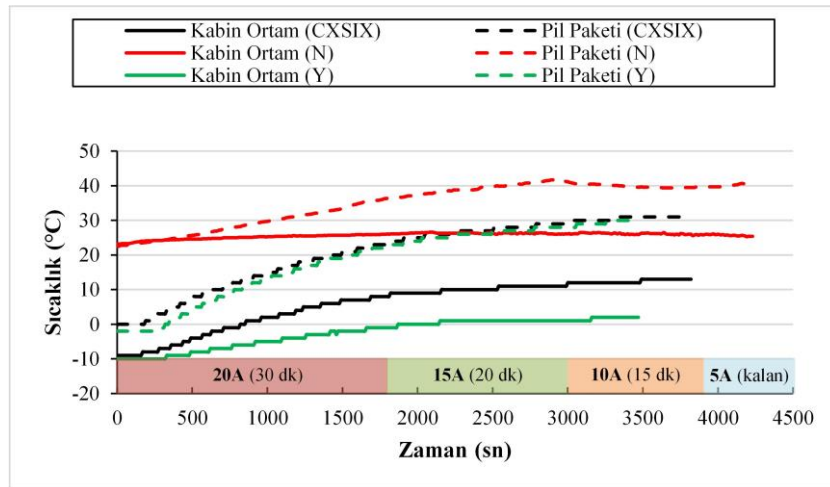
Şekil 4.28. -10°C sıcaklıkta PVWSO numunesinin 1. profil için sıcaklık değişimi.

Şekilde 4.28’de 1 numaralı sürüş profilinde ve kabin ortam sıcaklığının -10 °C olduğu durumda batarya deşarj süresinin oldukça kısaldığı hatta 5 amper ile deşarj edilmeden pilin tamamen tükendiği görülmektedir. PVWSO ile yalıtılan kabin ortamında hem kabin ortam hem de pil paketi sıcaklığının yalıtımsız kabin ortamının pil paketi ve kabin ortam sıcaklığından daha yüksek seyrettiği görülmektedir. Bu durum pil deşarj süresinin daha yüksek olmasını sağlamıştır. Bu durumun temel sebebi, yalıtımlı kabinde pil paketinin ideal çalışma sıcaklığına yalıtımsız ortama göre daha çabuk ulaşması olabilir.



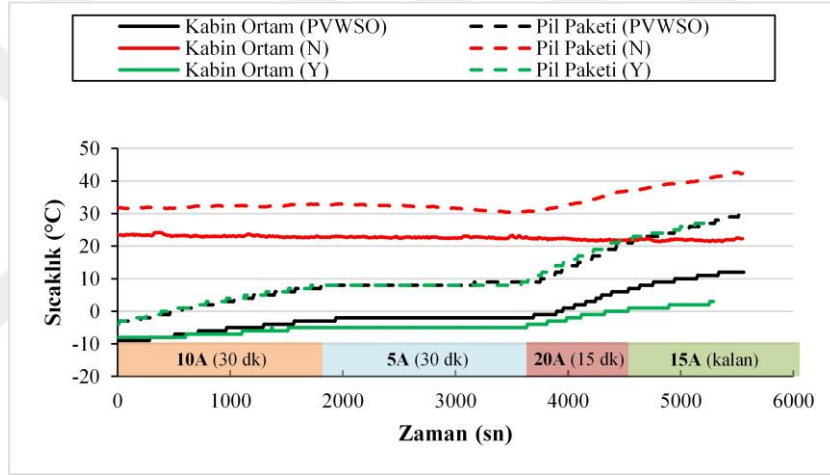
Şekil 4.29. -10°C sıcaklıkta EPWSO numunesinin 1. profil için sıcaklık değişimi.

-10 °C ortam sıcaklığında 1 numaralı sürüş profilinde EPWSO ile yalıtılan kabin ortamının sıcaklık değişimi Şekil 4.29'da incelenmiştir. Ortam sıcaklığının -10 °C olduğu durumda batarya deşarj süresinin oldukça kısaldığı hatta sürüş profilinin son deşarj hızı olan 5 amper ile deşarj edilmeden pilin tamamen tükendiği görülmektedir. EPWSO yalıtım numunesiyle yalıtılan kabin ortamında hem kabin ortam hem de pil paketi sıcaklığının yalıtımsız kabin ortamının pil paketi ve kabin ortam sıcaklığından daha yüksek seyrettiği görülmektedir. Bu durumun temel sebebi, yalıtımlı durumda pil paketinin ideal çalışma sıcaklığına yalıtımsız duruma göre daha çabuk ulaşması ve bu sayede düşük sıcaklıkta pil içerisinde meydana gelen iç direnç artışının ortadan kalkması ve pilin ideal koşullarına dönmesi olarak yorumlanabilir.



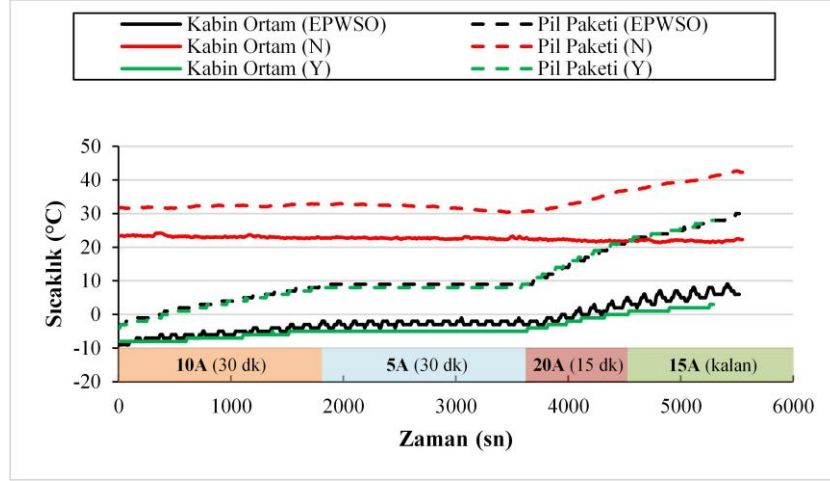
Şekil 4.30. -10°C sıcaklıkta CXPIX numunesinin 1. profil için sıcaklık değişimi.

-10 °C ortam sıcaklığında 1 numaralı sürüş profilinde CXPIX ile yalıtılan kabin ortamının sıcaklık değişimi Şekil 4.30'da incelenmiştir. Ortam sıcaklığının -10 °C olduğu durumda batarya deşarj süresinin oldukça kısaldığı hatta sürüş profilinin son deşarj hızı olan 5 amper ile deşarj edilmeden pilin tamamen tükendiği görülmektedir. EPSWSO yalıtım numunesiyle yalıtılan kabin ortamında hem kabin ortam hem de pil paketi sıcaklığının yalıtımsız kabin ortamının pil paketi ve kabin ortam sıcaklığından daha yüksek seyrettiği görülmektedir. Bu durumun temel sebebi, yalıtımlı durumda pil paketinin ideal çalışma sıcaklığına yalıtımsız duruma göre daha çabuk ulaşması ve bu sayede düşük sıcaklıkta pil içerisinde meydana gelen iç direnç artışının ortadan kalkması ve pilin ideal koşullarına dönmesi olarak yorumlanabilir.



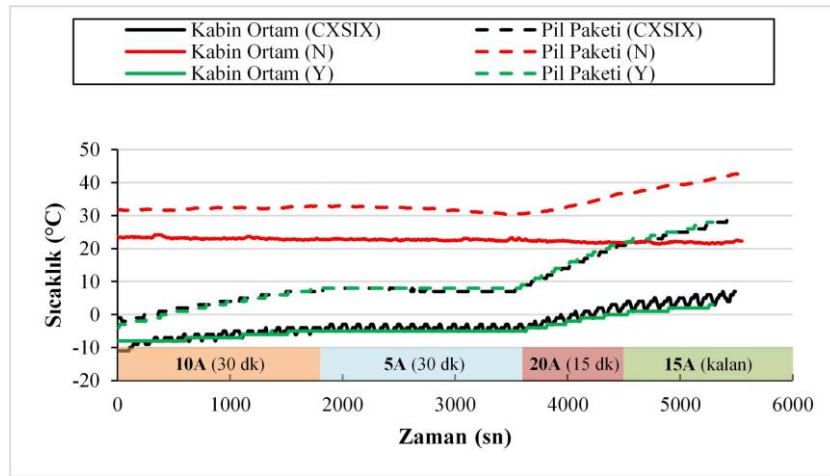
Şekil 4.31. -10°C sıcaklıkta PVWSO numunesinin 2. profil için sıcaklık değişimi.

Şekil 4.31'de 2 numaralı sürüş profilinde ve kabin ortam sıcaklığının -10 °C olduğu durumda kabin sıcaklığının deşarj akımının 10 amper olduğu durumda sıcaklığın yükselme eğiliminde olduğu daha sonrasında 5 amper deşarj akımında sıcaklığın her ne kadar artmış olsa da çok fazla değişmediği görülmektedir. Daha sonrasında gelen 20 amper ve 15 amper deşarj akımlarında sıcaklığın hızlı bir şekilde arttığı görülmüştür. Genel olarak PVWSO ile yalıtılan ortamda hem kabin ortam hem pil sıcaklığı yalıtımsız ortama göre daha yüksek olmuştur. Bu durumun temel sebebi, yalıtımlı kabinde pil paketinin ideal çalışma sıcaklığına yalıtımsız ortama göre daha çabuk ulaşması olabilir. 2 numaralı sürüş profilinde deşarj süresi 1 ve 3 numaralı profile göre daha uzun olmuştur.



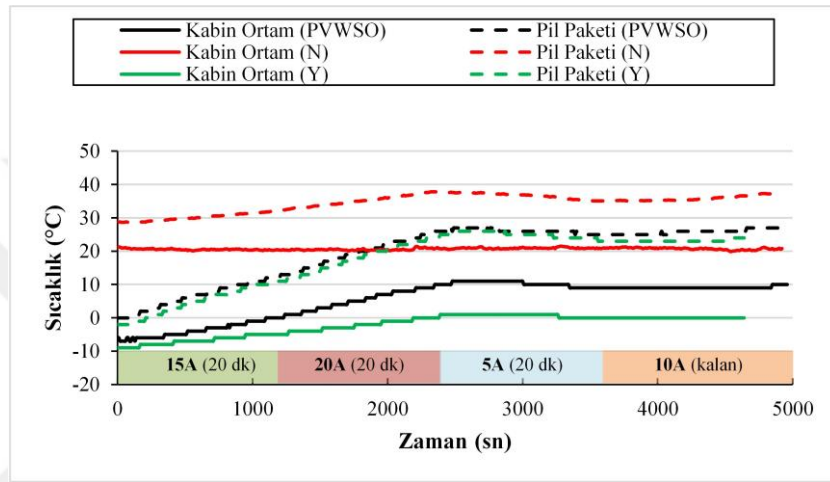
Şekil 4.32. -10°C sıcaklıkta EPWSO numunesinin 2. profil için sıcaklık değişimi.

Şekil 4.32'de 2 numaralı sürüş profilinde ve kabin ortam sıcaklığının -10 °C olduğu durumda kabin sıcaklığının deşarj akımının 10 amper ve 5 amper deşarj akımında sıcaklıkta artış olsa da çok fazla değişmediği görülmektedir. Daha sonrasında gelen 20 amper ve 15 amper deşarj akımlarında sıcaklığın hızlı bir şekilde arttığı görülmüştür. Genel olarak EPWSO ile yalıtılan ortamda hem kabin ortam hem pil sıcaklığı neredeyse aynı değerlerde seyretmiştir. EPWSO ile yalıtılan kabinin 10 °C'de aynı sıcaklıktaki diğer yalıtım numunelerinin sıcaklık değerleriyle karşılaştırıldığında sıcaklık artışı olarak geride kalsa da bu durum pilin optimum sıcaklık değerlere ulaşması nedeniyle pilin performansını etkilememiş ve deşarj süresinde azalmaya neden olmamıştır.



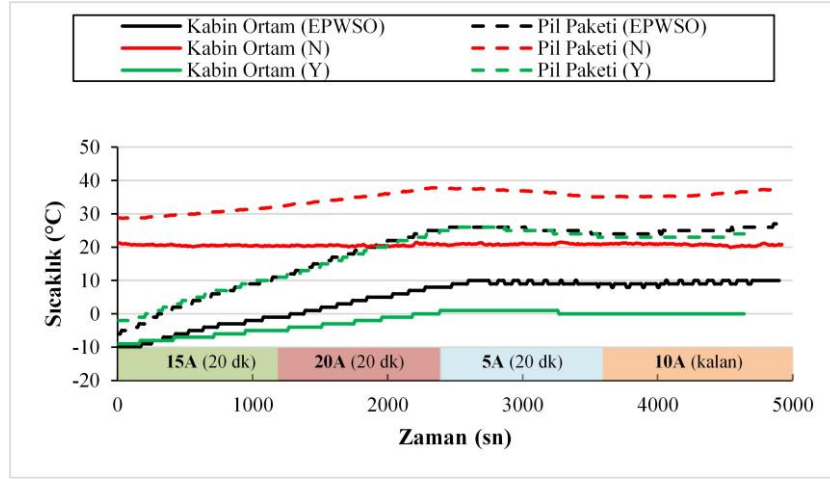
Şekil 4.33. -10°C sıcaklıkta PXCIX numunesinin 2. profil için sıcaklık değişimi.

Şekil 4.33’de de Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de olduğu gibi kabin sıcaklığının deşarj akımının 10 amper ve 5 amper olduğu durumda sıcaklıkta artış olsa da çok belirgin bir değişiklik olmamıştır. 20 amper ve 15 amper deşarj akımlarında ise sıcaklığın hızlı bir şekilde arttığı görülmüştür. Genel olarak sıcaklık değerlerindeki artış ve yalıtımsız durumla paralel değişiklik göstermiş olsa da yalıtımlı durumda deşarj süresi daha uzun sürmüştür.



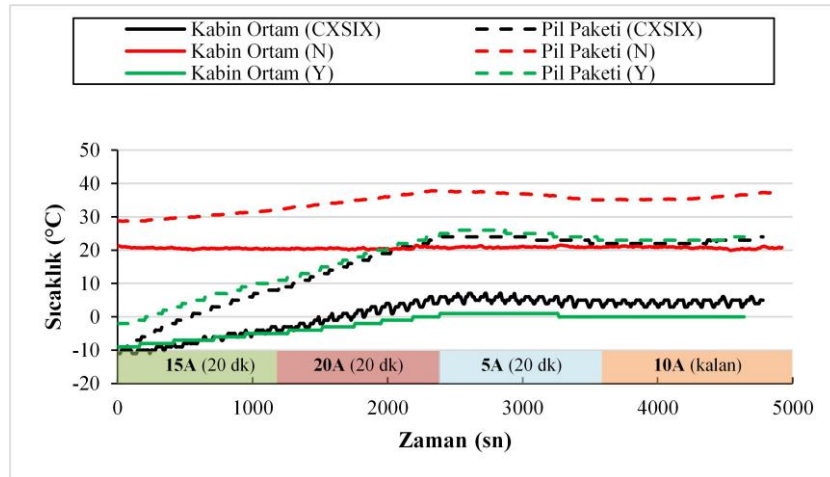
Şekil 4.34. -10°C sıcaklıkta PVWSO numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi.

Şekil 4.34’te 3 numaralı sürüş profilinde ve kabin ortam sıcaklığının -10 °C olduğu durumda kabin sıcaklığının deşarj akımının 15 amper olduğu durumda sıcaklığın hızlı bir yükseliş eğiliminde olduğu daha sonrasında 20 amper deşarj akımında sıcak artışının devam ettiği, 5 amper akımda ise sıcaklık artışının durduğu hatta bir miktar düşüş eğimi gösterdiği görülmektedir. PVWSO ile yalıtılan ortamda hem kabin ortam sıcaklığı hem de pil sıcaklığı daha yüksek olmuş ve ideal sıcaklığa daha çabuk ulaşılması pil deşarj süresini artırmıştır.



Şekil 4.35. -10°C sıcaklıkta EPWSO numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi.

Şekil 4.35'te 3 numaralı sürüş profilinde ve kabin ortam sıcaklığının -10 °C olduğu batarya kabininin EPWSO ile yalıtıldığı durumda kabin sıcaklığının deşarj akımının 15 amper olduğu durumda sıcaklığın hızlı bir yükseliş eğiliminde olduğu daha sonrasında 20 amper deşarj akımında sıcak artışının devam ettiği, ancak deşarj hızının 5 ampere düştüğünde sıcaklık artışının durduğu hatta bir miktar düştüğü görülmektedir. EPWSO ile yalıtılan ortamda hem kabin ortam sıcaklığı hem de pil sıcaklığı daha yüksek olmuş ve ideal sıcaklığa daha çabuk ulaşılması pil deşarj süresinin uzamasını sağlamıştır.



Şekil 4.36. -10°C sıcaklıkta CXPIX numunesinin 3. profil için sıcaklık değişimi.

Şekil 4.36'da 5 numaralı sürüş profilinde ve kabin ortam sıcaklığının  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  olduğu durumda kabin sıcaklığının deşarj akımının 15 amper ve 20 amper olduğu durumda sıcaklıkta artış hızlı bir artış görülmektedir. Daha sonrasında gelen 5 amper ve 10 amper deşarj akımlarında sıcaklığın yatayda sabit bir şekilde devam ettiği görülmektedir. Genel olarak CXPIX ile yalıtılan ortamda hem kabin ortam hem pil sıcaklığı birbirlerine yakın değerlerde seyretmiştir. Buna rağmen kabin ortam sıcaklığında gelen sıcaklık artışı nedeniyle bataryanın deşarj süresi yalıtımsız duruma kıyasla daha uzun sürmüştür.

#### **4.3. Yalıtımın ve Sürüş Profilinin Verimlilik ve Güç Üzerine Etkisi**

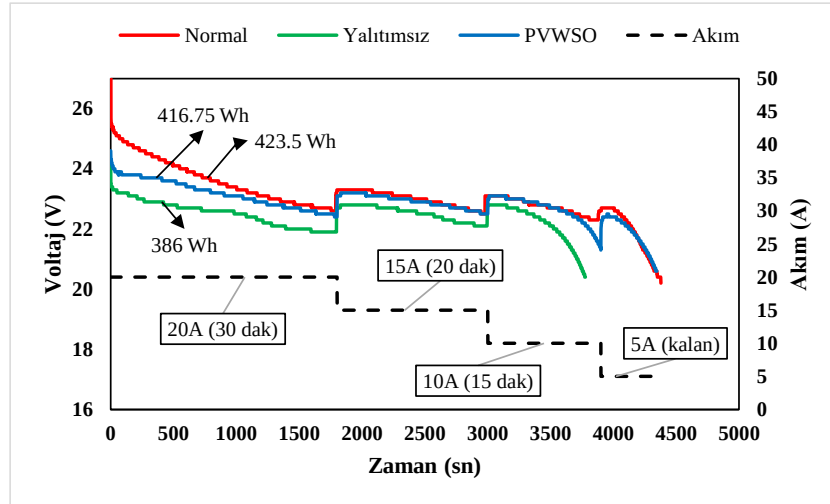
Bu kısımda sürüş profilinin, yalıtımın ve farklı kabin ortam sıcaklıklarının bir pil paketindeki güç ve verimlilik üzerine etkilerini inceledik. Öncelikle tüm verimlilik ve güç değerleri Tablo 4.2'de verilmiş olup daha sonrasında ait oldukları şekillerdeki verimlilik ve güç değerlerinden bahsedilmiştir. Pilin mevcut gücü, hücre içinde elektrokimyasal reaksiyonun ne kadar hızlı gerçekleştiğine bağlı olarak sıcaklığa dayalı empedans değişimi nedeniyle sıcaklık değişiminden etkilenir (Vidal ve ark., 2019).

**Tablo 4.2.** Yalıtımlı, yalıtımsız ve normal oda koşullarında güç ve verimlilik değerleri.

|           |            | 0°C         |                   | -5°C        |                   | -10°C       |                   |
|-----------|------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|
|           |            | Güç<br>(Wh) | Verimlilik<br>(%) | Güç<br>(Wh) | Verimlilik<br>(%) | Güç<br>(Wh) | Verimlilik<br>(%) |
| 1. profil | Normal     | 423,53      | 88,23             | 423,53      | 88,23             | 423,53      | 88,23             |
|           | PVWSO      | 416,76      | 86,82             | 403,54      | 84,07             | 386,41      | 80,50             |
|           | EPWSO      | 417,40      | 86,96             | 412,96      | 86,03             | 392,45      | 81,76             |
|           | CXSIX      | 412,31      | 85,90             | 390,04      | 81,26             | 373,95      | 77,91             |
|           | Yalıtımsız | 386,01      | 80,42             | 372,58      | 77,62             | 354,12      | 73,78             |
|           |            | 0°C         |                   | -5°C        |                   | -10°C       |                   |
|           |            | Güç<br>(Wh) | Verimlilik<br>(%) | Güç<br>(Wh) | Verimlilik<br>(%) | Güç<br>(Wh) | Verimlilik<br>(%) |
| 2. profil | Normal     | 427,24      | 89,01             | 427,24      | 89,01             | 427,24      | 89,01             |
|           | PVWSO      | 400,11      | 83,36             | 393,49      | 81,98             | 383,98      | 80,00             |
|           | EPWSO      | 405,14      | 84,40             | 396,56      | 82,62             | 386,05      | 80,43             |
|           | CXSIX      | 396,56      | 82,62             | 393,34      | 81,95             | 370,14      | 77,11             |
|           | Yalıtımsız | 377,83      | 78,71             | 367,02      | 76,46             | 355,19      | 74,00             |
|           |            | 0°C         |                   | -5°C        |                   | -10°C       |                   |
|           |            | Güç<br>(Wh) | Verimlilik<br>(%) | Güç<br>(Wh) | Verimlilik<br>(%) | Güç<br>(Wh) | Verimlilik<br>(%) |
| 3. profil | Normal     | 412,23      | 85,88             | 412,23      | 85,88             | 412,23      | 85,88             |
|           | PVWSO      | 402,75      | 83,91             | 394,48      | 82,18             | 381,40      | 79,46             |
|           | EPWSO      | 404,84      | 84,34             | 397,02      | 82,71             | 385,18      | 80,25             |
|           | CXSIX      | 397,30      | 82,77             | 393,10      | 81,90             | 377,60      | 78,67             |
|           | Yalıtımsız | 387,61      | 80,75             | 371,22      | 77,34             | 351,26      | 73,18             |

**Tablo 4.3.** Verimlilik değerlerinin kıyaslanması.

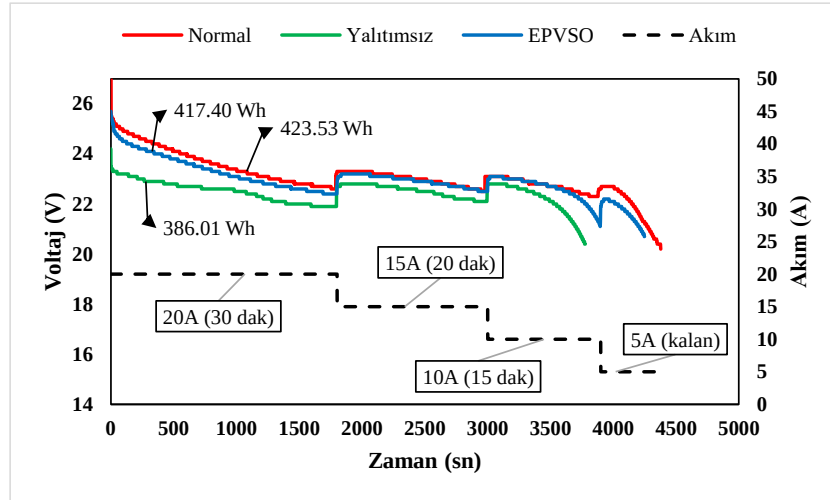
|           |                   | 0°C            | -5°C           | -10°C          |
|-----------|-------------------|----------------|----------------|----------------|
|           |                   | Verimlilik (%) | Verimlilik (%) | Verimlilik (%) |
| 1. profil | <i>Normal</i>     | <i>100,00</i>  | <i>100,00</i>  | <i>100,00</i>  |
|           | <b>PVWSO</b>      | 98,40          | 95,29          | 91,24          |
|           | <b>EPVSO</b>      | 98,56          | 97,51          | 92,67          |
|           | <b>CXSIX</b>      | 97,36          | 92,10          | 88,30          |
|           | <b>Yalıtımsız</b> | 91,15          | 87,97          | 83,62          |
|           |                   |                |                |                |
|           |                   | 0°C            | -5°C           | -10°C          |
|           |                   | Verimlilik (%) | Verimlilik (%) | Verimlilik (%) |
| 2. profil | <i>Normal</i>     | <i>100,00</i>  | <i>100,00</i>  | <i>100,00</i>  |
|           | <b>PVWSO</b>      | 93,65          | 92,10          | 89,88          |
|           | <b>EPVSO</b>      | 94,82          | 92,82          | 90,36          |
|           | <b>CXSIX</b>      | 92,82          | 92,07          | 86,63          |
|           | <b>Yalıtımsız</b> | 88,43          | 85,90          | 83,14          |
|           |                   |                |                |                |
|           |                   | 0°C            | -5°C           | -10°C          |
|           |                   | Verimlilik (%) | Verimlilik (%) | Verimlilik (%) |
| 3. profil | <i>Normal</i>     | <i>100,00</i>  | <i>100,00</i>  | <i>100,00</i>  |
|           | <b>PVWSO</b>      | 97,71          | 95,69          | 92,52          |
|           | <b>EPVSO</b>      | 98,21          | 96,31          | 93,44          |
|           | <b>CXSIX</b>      | 96,38          | 95,37          | 91,60          |
|           | <b>Yalıtımsız</b> | 94,03          | 90,06          | 85,21          |
|           |                   |                |                |                |



Şekil 4.37. 0°C sıcaklıkta 1. profile PVWSO numunesinin deşarj performansı.

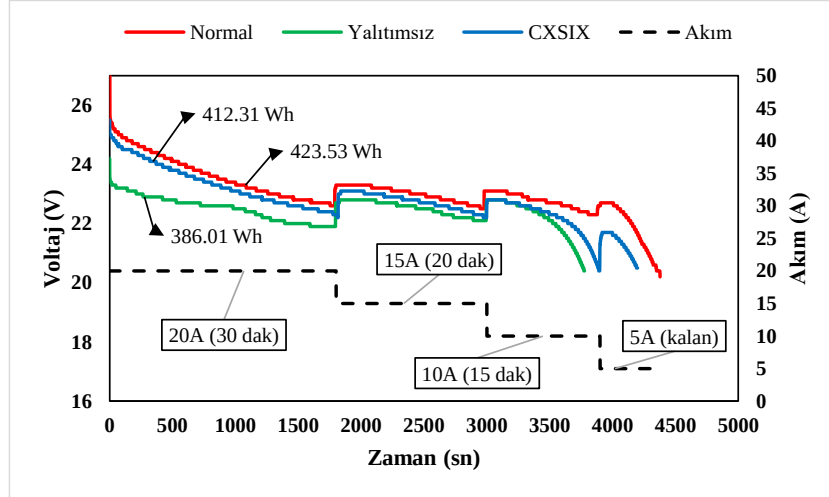
Şekilde 4.37’de görüldüğü 1 numaralı sürüş profilinde çekilen akım ve zamana bağlı olarak voltaj değerlerindeki değişimi gösterilmektedir. Kırmızı ile gösterilen voltaj değerleri normal oda sıcaklığında bataryanın en verimli şekilde çalıştığı durumu göstermektedir. Deney sırasında ölçülen voltaj değerlerinden yapılan hesaplama verimliliğin normal şartlarda %88,23 ve gücün 423,5 Wh olduğu hesaplanmıştır. Bu durum kabin ortam sıcaklığını 0°C’ye indirdiğimizde şekilde görülen mavi ve yeşil voltaj değerlerini elde etmekteyiz.

Sistemden çekilen voltaj değerlerini incelediğimizde yalıtımlı kabin ortamında öncelikle çekilebilen voltajın sistemin soğuk olmasından kaynaklı düşük olduğu görülmektedir. Sistem ısındıkça voltaj değerleri artmış ve sistemin deşarj süresi neredeyse normal şartlarla aynı sürede bitmiştir. Oysa yalıtımsız ortam sıcaklık artışı bataryanın ideal çalışma koşulları dışında kaldığı için bataryada soğuk şartlarda meydana gelen iç direnç artışı ortadan kalkmamış ve 20 amper hızla deşarj edildiğinde voltaj değerlerinde hızlı düşüşler meydana gelmiştir bu durum hem deşarj süresinin az olmasına hem de verim ve gücün düşük olmasına sebep olmuştur. Yalıtımlı ve yalıtımsız ortamda güç değerleri sırasıyla 416.75 Wh ve 386 Wh olurken, verimlilik ise sırasıyla %86,82 ve %80,42 olmuştur.



Şekil 4.38. 0°C sıcaklıkta 1. profilde EPWSO numunesinin deşarj performansı.

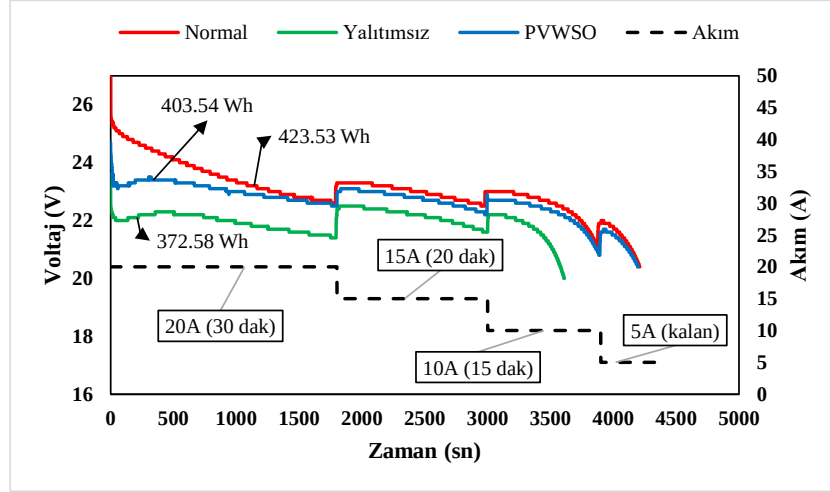
Batarya kabini EPWSO yalıtım numunesiyle yalıtıldıktan sonra 0 °C sıcaklıkta 1. sürüş profili boyunca batarya deşarj edilmiştir. Şekil 4.38’den görülebileceği gibi yalıtımsız durumda pilin kapasitesi akım arttıkça azalmakta, aksine batarya kabininin EPWSO numunesi ile yalıtılması durumunda pilin kapasitesi deşarj akımı arttıkça artmaktadır. Deşarj devam ettikçe gerilim toparlanma düzenine geçerek deşarj sürecini “düşme-geri tepme-düşme” sürecine sokar (Ouyang ve ark., 2019). Şekil 4.38’de görülen deşarj akımının profildeki geçiş noktalarında gerilim artışlarının bir nedeni de budur. Batarya kabininde sıcaklık arttıkça bataryanın voltaj geri kazanımının da daha güçlü olduğu ve aynı deşarj kapasitesi durumunda batarya deşarj sürelerinde yalıtımsız duruma göre uzamalar meydana geldiği gözlemlenmiştir bu sıcaklığın elektrokimyasal reaksiyonları hızlandırmasının ve iç direnci azaltmasının bir sonucu olarak yorumlanabilmektedir. Yalıtımlı ve yalıtımsız ortamda güç değerleri sırasıyla 417,40 ve 386,01 Wh olurken, verimlilik ise sırasıyla %86,96 ve %80,42 olmuştur.



Şekil 4.39. 0 °C sıcaklıkta 1. profilde CXPIX numunesinin deşarj performansı.

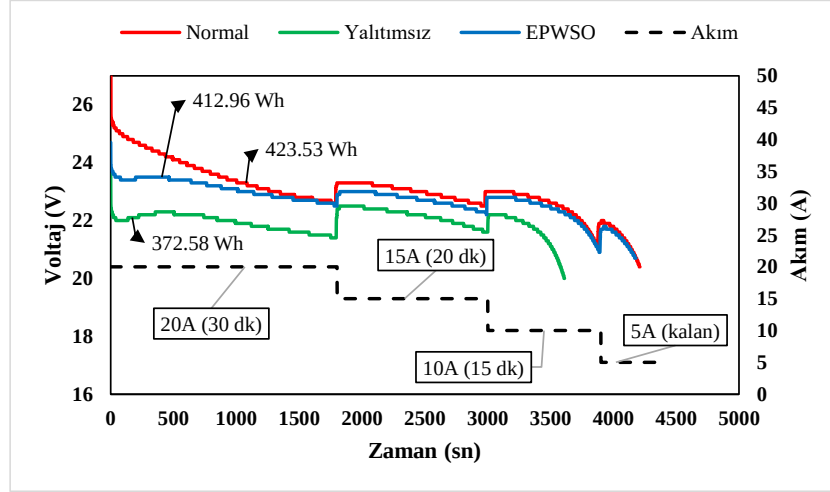
Şekilde 4.39’da 0 °C sıcaklıkta 1. sürüş profili için batarya kabini için CXPIX yalıtım numunesiyle yalıtılması sonucu gerilim ve akım değerlerindeki değişimi görmekteyiz. Diğer yalıtım numunelerinde de olduğu gibi CXPIX numunesinde de yalıtımsız duruma göre bataryanın deşarj süresi ve bataryanın gücü normal şartlar altında deşarj edilen bataryanın performans verilerine oldukça yaklaşmıştır. Bu durum yalıtımın pilin performansına olumlu katkıda bulunduğunun bir göstergesidir. Yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 412,31 ve 386,01 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %85,90 ve %80,42 olmuştur.

0 °C sıcaklıkta 1. sürüş profili için her bir yalıtım numunesinin performans sonuçlarının yalıtımsız durumdan daha iyi çıktığı görülmektedir. PVWSO, EPWSO ve CXPIX yalıtım numunelerini kendi içlerinde karşılaştırdığımızda en iyi verim sonuçları EPWSO numunesine ait olsa da PVWSO numunesinin deşarj süresinin sıcaklığın etkisiyle Normal şartlara daha yakın olmuştur.



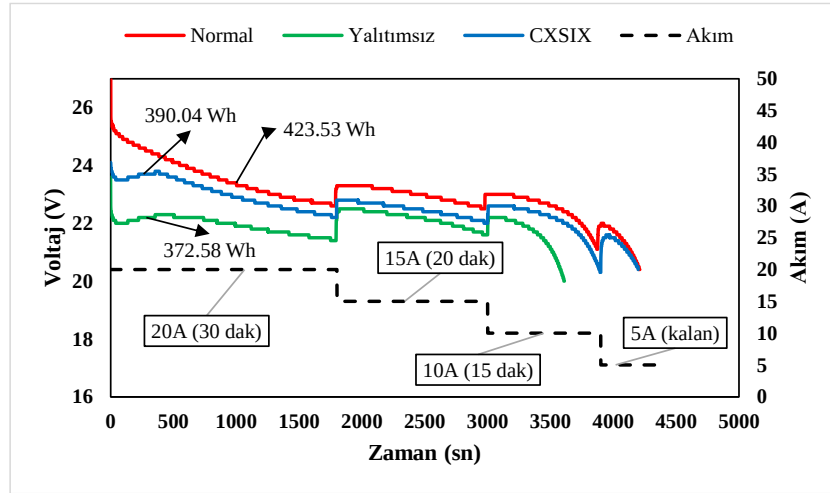
Şekil 4.40. -5°C sıcaklıkta 1. profilde PVWSO numunesinin deşarj performansı.

Şekilde 4.40'da -5 °C sıcaklıkta 1. sürüş profili için batarya kabininin PVWSO yalıtım numunesiyle yalıtılması sonucu gerilim ve akım değerlerindeki değişim verilmiştir. Hem yalıtımlı hem yalıtımsız durumda deşarjın başladığı zaman aralığında voltaj değerlerinde kararsızlık gözlenmektedir. Bunun nedeni bataryanın düşük sıcaklıkta uzun süre beklemesi sonucu gerilimde oluşan kararsızlık nedeniyle bataryanın stabil olmamasıdır. 20 A deşarj hızında yalıtımlı durumda bataryanın voltaj değeri yalıtımsız durumdan daha yüksek olmuştur. Ancak her iki durumda da düşük sıcaklığın etkisiyle başlangıç voltaj değeri normal şartlardan daha düşüktür. Batarya deşarj edilmeye devam edildikçe batarya stabil hale gelmiş ve yalıtımlı durumdaki voltaj değeri ve buna bağlı olarak deşarj süresi normal şartlara yaklaşmıştır. Yalıtımsız durumda batarya 2. Sürüş profilinin son deşarj akım değeri olan 5A ya ulaşmadan tamamen deşarj olmuştur. Yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 403,53 ve 372,58 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %84,07 ve %77,62 olmuştur.



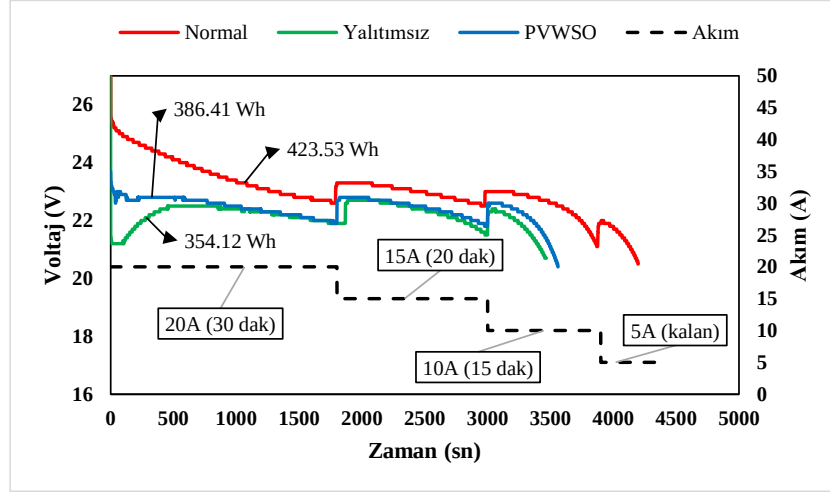
Şekil 4.41. -5°C sıcaklıkta 1. profilde EPWSO numunesinin deşarj performansı.

Şekilde 4.41’de -5 °C sıcaklıkta 1. sürüş profili için batarya kabının EPWSO yalıtım numunesiyle yalıtılması sonucu gerilim ve akım değerlerindeki değişim verilmiştir. Burada da Şekil 4.39’ da olduğu gibi hem yalıtımlı hem yalıtımsız durumda deşarjın başladığı zaman aralığında bataryanın uzun süre düşük sıcaklığa maruz kalmasından dolayı voltaj değerlerinde kararsızlık gözlenmektedir. 20A deşarj hızında düşük sıcaklığın etkisiyle voltaj değerlerinde hızlı bir düşüş olmuştur. 5A deşarj hızına düşüldüğünde voltaj değerinde geri tepmenin etkisiyle artış meydana gelmiş sonrasında düşüş devam etmiştir. Deşarj boyunca yalıtımlı durumun voltaj ve güç değerleri normal şartlara yaklaşmış ve bu durum deşarj süresinin yalıtımsız duruma göre daha uzun olmasını sağlamıştır. Yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 412,96 ve 372,58 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %86,03 ve %77,62 olmuştur.



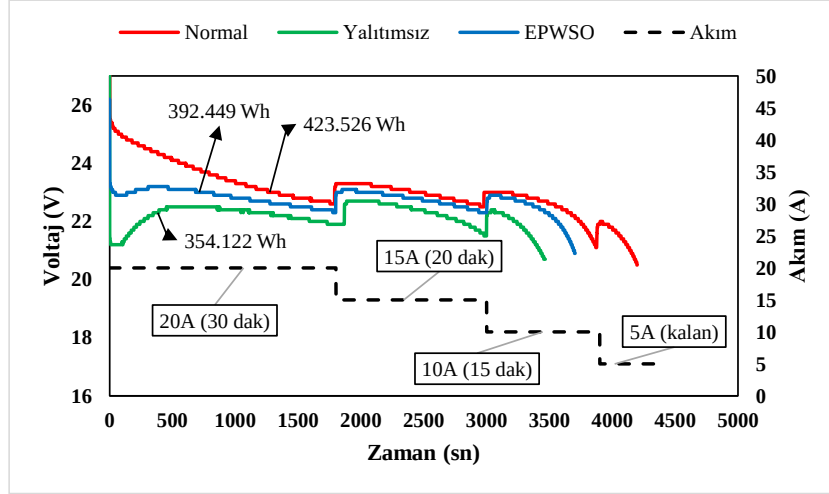
Şekil 4.42. -5°C sıcaklıkta 1. profilde CXPIX numunesinin deşarj performansı.

Şekilde 4.42’de -5 °C sıcaklıkta 1. sürüş profili için batarya kabini CXPIX yalıtım numunesiyle yalıtılması sonucu gerilim ve akım değerlerindeki değişim verilmiştir. Hem yalıtımlı hem yalıtımsız durumda deşarjın başladığı zaman aralığında voltaj değerlerinde kararsızlık gözlenmektedir. Bunun nedeni bataryanın düşük sıcaklıkta uzun süre beklemesi sonucu gerilimde oluşan kararsızlık nedeniyle bataryanın stabil olmamasıdır. 20 A ve 15A deşarj hızlarında yalıtımlı ve yalıtımsız durumda voltajda meydana gelen düşüş hızı 10A ve 5A deşarj hızlarından daha yüksektir. Bu durumda bataryanın voltaj değeri yalıtımsız durumdan daha yüksek olmuştur. Ancak her iki durumda da düşük sıcaklığın etkisiyle başlangıç voltaj değeri normal şartlardan daha düşüktür. Batarya deşarj süreleri yalıtımlı durumda normal şartlara yaklaştı ancak yalıtımsız durumda batarya 2. Sürüş profilinin son deşarj akım değeri olan 5A ya ulaşmadan tamamen deşarj olmuştur. Yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 390,02 ve 372,58 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %81,26 ve %77,62 olmuştur.



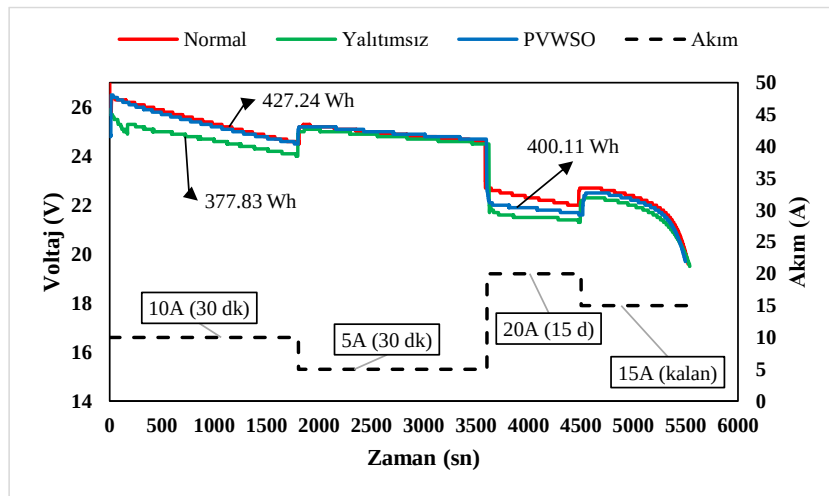
Şekil 4.43. -10°C sıcaklıkta 1. profilde PVWSO numunesinin deşarj performansı.

Batarya kabininin PVWSO yalıtım numunesiyle yalıtıldıktan sonra -10 °C sıcaklıkta 1. sürüş profili boyunca batarya deşarj edilmiştir. Şekil 4.43'den görülebileceği gibi -10 °C ortam sıcaklığında hem yalıtımlı hem de yalıtımsız durum için deşarj başlangıcında voltajda dalgalanmalar oluşmuştur. Sıcaklığın düşük olmasının bataryada kararsızlık meydana getirmesi bu durumun sebepleri arasında sayılmaktadır. Sıcaklık azaldıkça bataryanın üretebileceği max güç olarak tanımlanan voltaj değerinin de azalması söz konusudur. Deşarj devam ettikçe gerilim toparlanma düzenine geçmiştir. Ancak buna rağmen her iki durumda da normal şartlarda oluşan voltaj ve güç değerlerine ulaşamamıştır. Çünkü batarya ortam sıcaklığı optimum sıcaklık değerlerine ulaşamadığı için bataryada iç direnç artmış ve elektrokimyasal reaksiyonlar olması gerektiği gibi gerçekleşmemiştir. Yalıtımlı ve yalıtımsız durumda da 2. sürüş profilinin son deşarj hızı olan 5A deşarj akımına ulaşmadan batarya tamamen deşarj olmuştur. Ancak yine de yalıtımlı durumun deşarj süresi yalıtımsız durumdan daha uzundur. Yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 386,41 ve 354,12 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %80,50 ve %73,78 olmuştur.



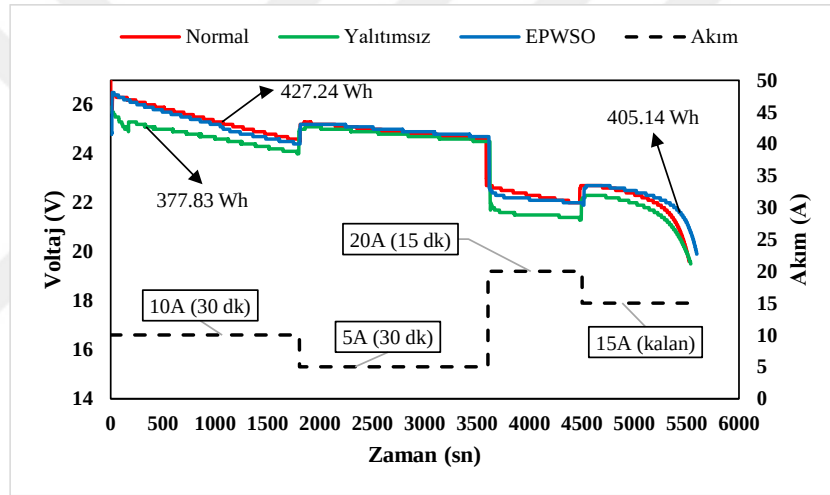
Şekil 4.44. -10°C sıcaklıkta 1. profilde EPWSO numunesinin deşarj performansı.

Şekilde 4.44’de -10 °C sıcaklıkta 1. sürüş profili için batarya kabininin EPWSO yalıtım numunesiyle yalıtılması sonucu gerilim ve akım değerlerindeki değişim verilmiştir. Düşük sıcaklığın etkisiyle 20A ve 15A gibi yüksek deşarj akımlarında yalıtımlı ve yalıtımsız durumların her ikisi için de voltajda hızlı düşüşler olmuştur. 10A’ da voltaj düşüş hızı azalmaya başlasa da sürüş profilinin son deşarj akımı olan 5A ulaşamadan batarya deşarj olmuştur. Yalıtımlı durum için deşarj süresi ve batarya gücü yalıtımsız durumdan daha yüksek olmuştur. Yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 392,45 ve 354,12 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %81,76 ve %73,78 olmuştur.



Şekil 4.45. 0°C sıcaklıkta 2. profilde PVWSO numunesinin deşarj performansı.

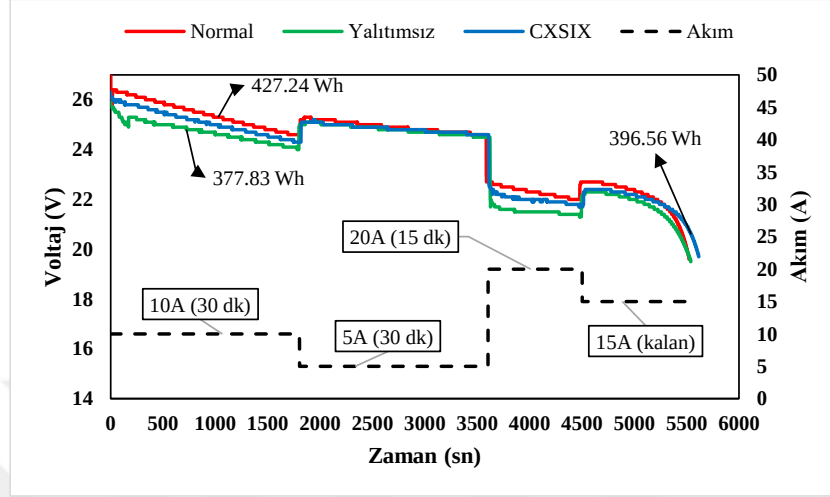
Batarya kabini PVWSO yalıtım numunesiyle yalıtıldıktan sonra 0 °C sıcaklıkta 2. sürüş profili boyunca batarya deşarj edilmiştir. Şekil 4.45'ten görülebileceği gibi 10A ve 5A hızlarında batarya deşarj edilirken yalıtımlı durumdaki voltaj değerleri normal şartlarla neredeyse aynı değerdedir. Deşarj akımı 20A e yükseltildiğinde voltaj değerinde ciddi bir düşüş olmuştur. Yalıtımlı durumdaki voltaj değerleri normal şartlardan daha hızlı düşmüştür. Bu düşük sıcaklığın bir sonucu olarak yorumlanabilir. Deney sırasında ölçülen voltaj değerlerinden yapılan hesapla verimliliğin normal şartlarda %89,01 ve gücün 427,24 Wh olduğu hesaplanmıştır. Bu durum kabin ortam sıcaklığını 0°C'ye indirdiğimizde şekilde görüldüğü gibi yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 400,11 ve 377,83 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %83,36 ve %78,71 olmuştur.



Şekil 4.46. 0°C sıcaklıkta 2. profilde EPWSO numunesinin deşarj performansı.

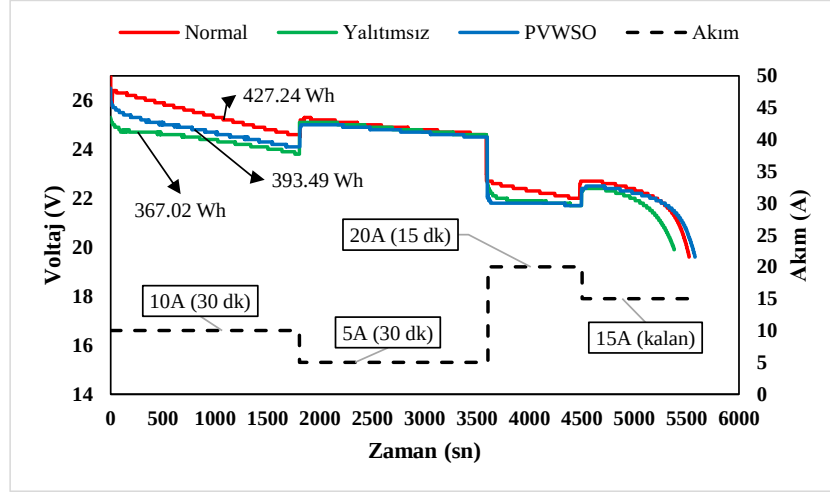
Batarya kabini EPWSO yalıtım numunesiyle yalıtıldıktan sonra 0 °C sıcaklıkta 2. sürüş profili boyunca batarya deşarj edilmiştir. Şekil 4.46'dan görülebileceği gibi 10A ve 5A hızlarında batarya deşarj edilirken yalıtımlı durumdaki voltaj değerleri normal şartlarla neredeyse aynı değerdedir. Deşarj akımı 20A e yükseltildiğinde voltaj değerinde ciddi bir düşüş olmuştur. Yalıtımlı durumdaki voltaj değerleri normal şartlardan daha hızlı düşmüştür. Bu düşük sıcaklığın bir sonucu olarak yorumlanabilir. Deşarj süresine baktığımızda yalıtımlı durumdaki deşarj süresi her ne kadar normal şartlardan daha uzun sürse de normal şartların gücü ve verimi yalıtımlı durumdan daha yüksektir. Deney sırasında ölçülen voltaj değerlerinden yapılan hesapla verimliliğin normal şartlarda %89,01 ve gücün 427,24 Wh olduğu hesaplanmıştır. Bu durum kabin

ortam sıcaklığını 0°C'ye indirdiğimizde şekilde görüldüğü gibi yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 405,14 ve 377,83 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %84,40 ve %78,71 olmuştur.



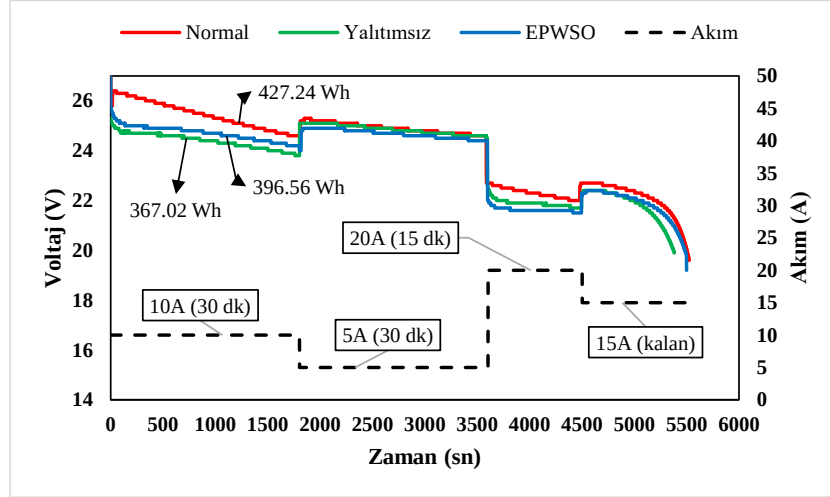
Şekil 4.47. 0°C sıcaklıkta 2. profilde CXSIX numunesinin deşarj performansı.

Batarya kabini CXPIX yalıtım numunesiyle yalıtıldıktan sonra 0 °C sıcaklıkta 2. sürüş profili boyunca batarya deşarj edilmiştir. Şekil 4.47'den görülebileceği gibi 10A ve 5A hızlarında batarya deşarj edilirken yalıtımlı durumdaki voltaj değerleri normal şartlarla neredeyse aynı değerdedir. Deşarj akımı 20A'ya yükseltildiğinde voltaj değerinde ciddi bir düşüş olmuştur. Yalıtımlı durumdaki voltaj değerleri normal şartlardan daha hızlı düşmüştür. Bu düşük sıcaklığın bir sonucu olarak yorumlanabilir. Deşarj süresine baktığımızda yalıtımlı durumdaki deşarj süresi her ne kadar normal şartlardan daha uzun sürse de normal şartların gücü ve verimi yalıtımlı durumdan daha yüksektir. Yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 396,56 ve 377,83 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %82,62 ve %78,71 olmuştur.



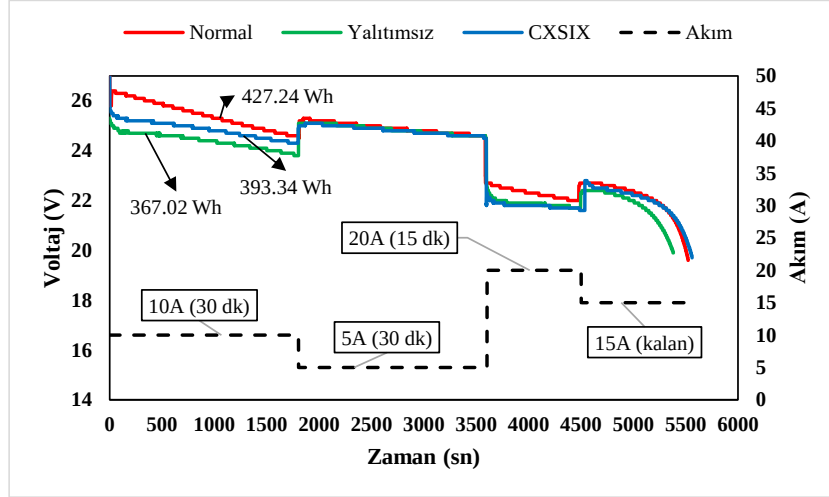
Şekil 4.48. -5°C sıcaklıkta 2. profilde PVWSO numunesinin deşarj performansı.

Şekilde 4.48’de -5 °C sıcaklıkta 2. sürüş profili için batarya kabininin PVWSO yalıtım numunesiyle yalıtılması sonucu gerilim ve akım değerlerindeki değişim verilmiştir. Batarya 10A deşarj edilmeye başlandığında yalıtımlı numunenin voltaj değeri normal şartlardan düşükken akım 5A’ ya düştüğünde yalıtımın etkisiyle bataryada üretilen ısı kabin içerisinde kalmış bu durum yalıtımlı durumda voltajın yükselerek normal şartlardaki değerlerle neredeyse aynı olmasını sağlamıştır. Akım 5A’dan 20A’ ya yükseltildiğinde düşük sıcaklığın etkisiyle yalıtımlı ve yalıtımsız durumdaki voltaj düşüşü normal şartlardan daha hızlı ve büyük olmuştur. Son deşarj amperi 15A ile batarya tamamen deşarj edildiğinde yalıtımsız durum en düşük deşarj süresine sahip olmuştur. Yalıtımlı durumun deşarj süresi normal şartlardan uzun olsa da normal şartlarda bataryanın gücü yalıtımlı durumdan daha yüksektir. Bu da aynı zamanda bataryanın veriminin normal şartlarda daha yüksek olduğunu gösterir. Normal şartlar, yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 427,24, 393,49 ve 367,02 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %89,01, %81,98 ve %76,46 olmuştur.



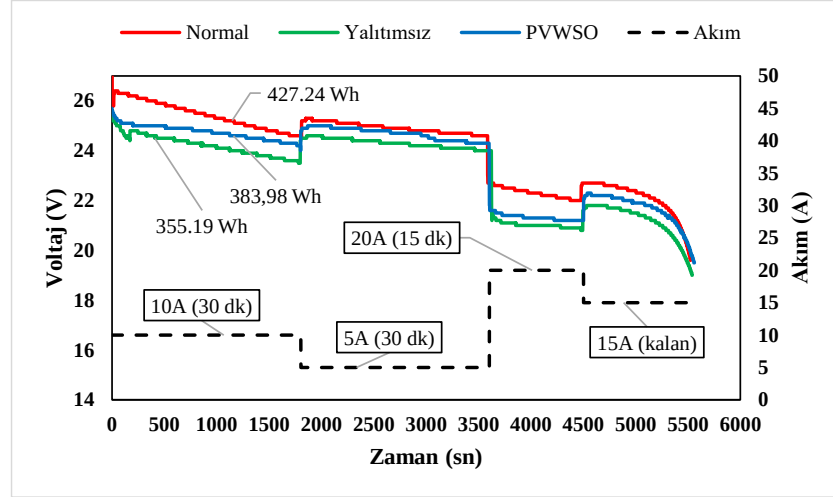
Şekil 4.49. -5°C sıcaklıkta 2. profilde EPWSO numunesinin deşarj performansı.

Şekilde 4.49’da -5 °C sıcaklıkta 2. sürüş profili için batarya kabininin EPWSO yalıtım numunesiyle yalıtılması sonucu gerilim ve akım değerlerindeki değişim verilmiştir. Batarya 10A deşarj edilmeye başlandığında yalıtımlı numunenin voltaj değeri normal şartlardan düşükken akım 5A’ ya düştüğünde yalıtımsız ve yalıtımlı durumun normal şartlardaki değerlerle neredeyse aynı olmuştur Akım 5A’dan 20A’ ya yükseltildiğinde düşük sıcaklığın etkisiyle yalıtımlı ve yalıtımsız durumdaki voltaj düşüşü normal şartlardan daha hızlı ve büyük olmuştur. Son deşarj amperi 15A ile batarya tamamen deşarj edildiğinde yalıtımsız durum en düşük deşarj süresine sahip olmuştur. Yalıtımlı durumun deşarj süresi normal şartların deşarj süresine oldukça yakındır. Normal şartlar, yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 427,24, 393,49 ve 367,02 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %89,01, %82,62 ve %76,46 olmuştur.



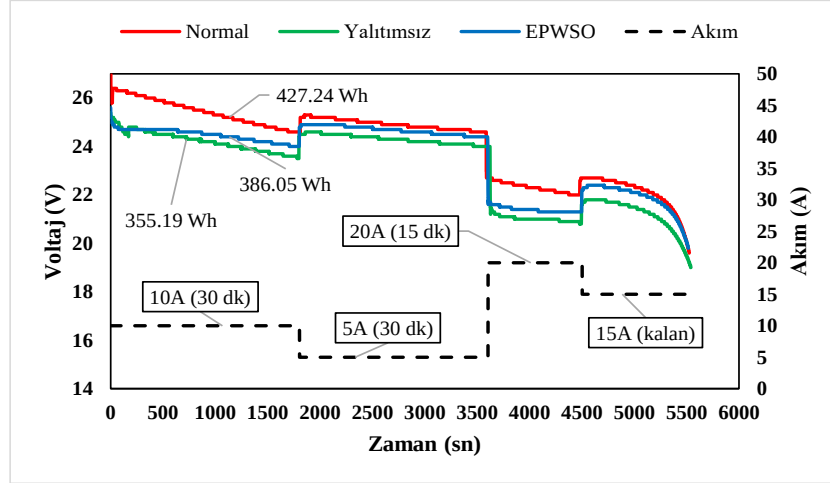
Şekil 4.50. -5°C sıcaklıkta 2. profilde CXPIX numunesinin deşarj performansı.

Şekilde 4.50’de -5 °C sıcaklıkta 2. sürüş profili için batarya kabınınin CXPIX yalıtım numunesiyle yalıtılması sonucu gerilim ve akım değerlerindeki değişim verilmiştir. Batarya 10A deşarj edilmeye başlandığında yalıtımlı numunenin voltaj değeri normal şartlardan düşükken akım 5A’ ya düştüğünde yalıtımsız ve yalıtımlı durumun normal şartlardaki değerlerle neredeyse aynı olmuştur Akım 5A’dan 20A’ ya yükseltildiğinde düşük sıcaklığın etkisiyle yalıtımlı ve yalıtımsız durumdaki voltaj düşüşü normal şartlardan daha hızlı ve büyük olmuştur. Son deşarj amperi 15A ile batarya tamamen deşarj edildiğinde yalıtımsız durum en düşük deşarj süresine sahip olmuştur. Yalıtımlı durumun deşarj süresi normal şartların deşarj süresine oldukça yakındır. Normal şartlar, yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 427,24, 393,34 ve 367,02 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %89,01, %81,95 ve %76,46 olmuştur.



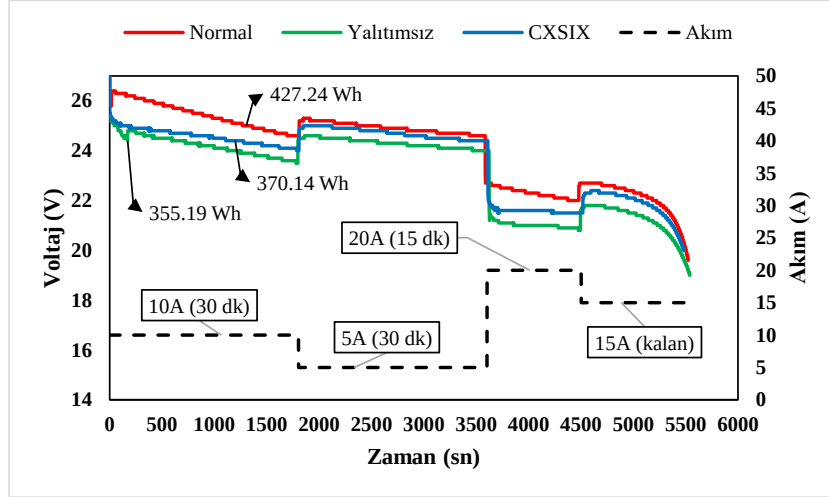
Şekil 4.51. -10°C sıcaklıkta 2. profilde PVWSO numunesinin deşarj performansı.

Batarya kabini PVWSO yalıtım numunesiyle yalıtıldıktan sonra -10 °C sıcaklıkta 2. sürüş profili boyunca batarya deşarj edilmiştir. 10A ve 5A deşarj akım değerleriyle deşarj edildiğinde voltaj değerleri arasında 3 durum için de büyük farklılıklar söz konusu değildir. Ancak deşarj akımı 20A'ya yükseltildiğinde yalıtımlı ve yalıtımsız durumda voltaj değerlerinde ciddi ve hızlı bir düşüş olmuştur. Batarya deşarj süresi 3 durum için de çok yakın değerlerdedir. Ancak normal şartlarda sıcaklığın etkisiyle elektrokimyasal reaksiyonların optimum sıcaklık aralığında gerçekleşmesi neticesinde güç ve verim değerleri yalıtımlı ve yalıtımsız durumdan daha yüksektir. Normal şartlar, yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 427,24, 383,98 ve 367,02 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %89,01, %80,00 ve %74,00 olmuştur.



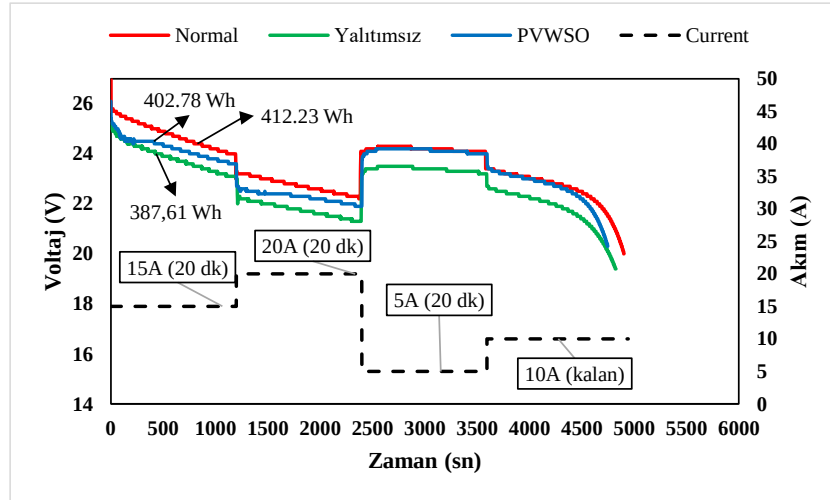
Şekil 4.52. -10°C sıcaklıkta 2. profilde EPWSO numunesinin deşarj performansı.

Batarya kabini EPWSO yalıtım numunesiyle yalıtıldıktan sonra -10 °C sıcaklıkta 2. sürüş profili boyunca batarya deşarj edilmiştir. 10A ve 5A deşarj akım değerleriyle deşarj edildiğinde voltaj değerleri arasında yalıtımlı ve yalıtımsız durum için büyük farklılıklar söz konusu değildir. Ancak deşarj akımı 20A'ya yükseltildiğinde yalıtımlı ve yalıtımsız durumda voltaj değerlerinde ciddi ve hızlı bir düşüş olmuştur. Batarya deşarj süresi 3 durum için de çok yakın değerlerdedir. Ancak normal şartlarda sıcaklığın etkisiyle elektrokimyasal reaksiyonların optimum sıcaklık aralığında gerçekleşmesi neticesinde güç ve verim değerleri yalıtımlı ve yalıtımsız durumdan daha yüksektir. Normal şartlar, yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 427,24, 386,05 ve 367,02 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %89,01, %80,43 ve %74,00 olmuştur.



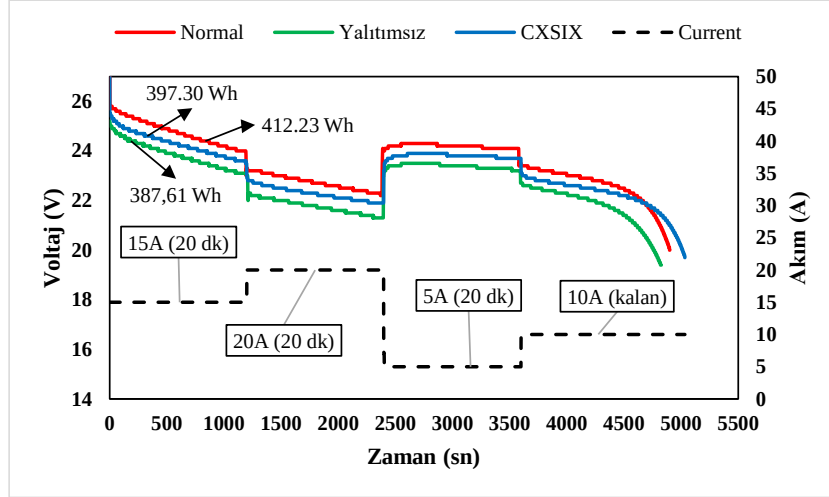
Şekil 4.53. -10°C sıcaklıkta 2. profile CXPIX numunesinin deşarj performansı.

Batarya kabini EPWSO yalıtım numunesiyle yalıtıldıktan sonra -10 °C sıcaklıkta 2. sürüş profili boyunca batarya deşarj edilmiştir. Şekil 4.53’de görüldüğü gibi 10A ve 5A deşarj akım değerleriyle deşarj edildiğinde voltaj değerleri arasında yalıtımlı ve yalıtımsız durum için büyük farklılıklar söz konusu değildir. Ancak deşarj akımı 20A’ya yükseltildiğinde yalıtımlı ve yalıtımsız durumda voltaj değerlerinde ciddi ve hızlı bir düşüş olmuştur. Yalıtımlı durumdaki voltaj değeri batarya kabininin yalıtımın etkisiyle ısınması ve sıcaklığını koruması neticesinde yalıtımsız durumun voltaj değerlerinden yüksek olmuştur. Batarya deşarj süresi 3 durum için de çok yakın değerlerdedir. Ancak normal şartlarda sıcaklığın etkisiyle elektrokimyasal reaksiyonların optimum sıcaklık aralığında gerçekleşmesi neticesinde güç ve verim değerleri yalıtımlı ve yalıtımsız durumdan daha yüksektir. Normal şartlar, yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 427,24, 370,14 ve 367,02 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %89,01, %77,11 ve %74,00 olmuştur.



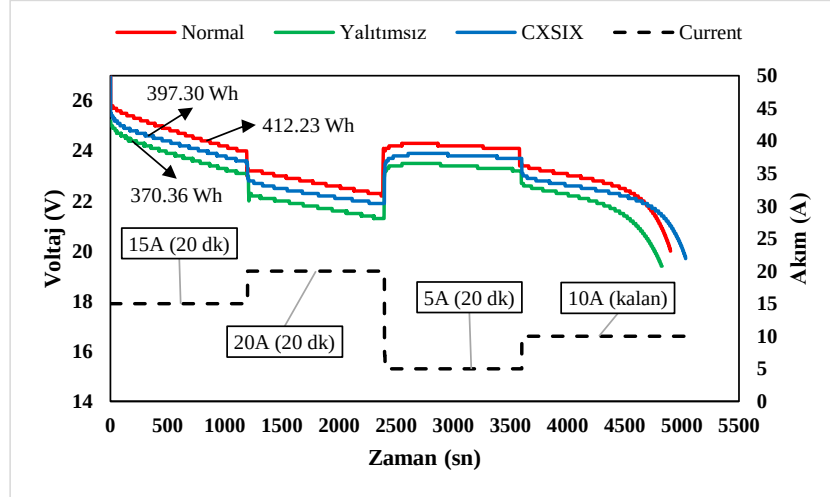
**Şekil 4.54.** 0°C sıcaklıkta 3. profilde PVWSO numunesinin deşarj performansı.

Batarya kabini PVWSO yalıtım numunesiyle yalıtıldıktan sonra 0 °C sıcaklıkta 3. sürüş profili boyunca batarya deşarj edilmiştir. Şekil 4.54'ten görülebileceği gibi 15A ve 20A deşarj akımlarında voltaj hızlı bir şekilde düşmüştür. Düşüş her 3 durum için de geçerlidir ancak yalıtımsız durumdaki düşüş değerleri en yüksektir. Akımın 5A' ya düşmesiyle aynı zamanda batarya kabininin yalıtım neticesinde sıcaklığının artmasıyla yalıtımlı durumun voltaj değerleri normal şartlarla neredeyse aynı değerlere ulaşmıştır. 5. Sürüş profili boyunca yalıtımsız durumun voltaj değerleri yalıtımlı duruma göre düşüktür. Bu da aynı zamanda güç ve verim değerlerinin de yalıtımlı durumdan düşük olmasına neden olmuştur. Normal şartlar, yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 412,23, 402,78 ve 370,36 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %85,88, %83,91 ve %77,16 olmuştur.



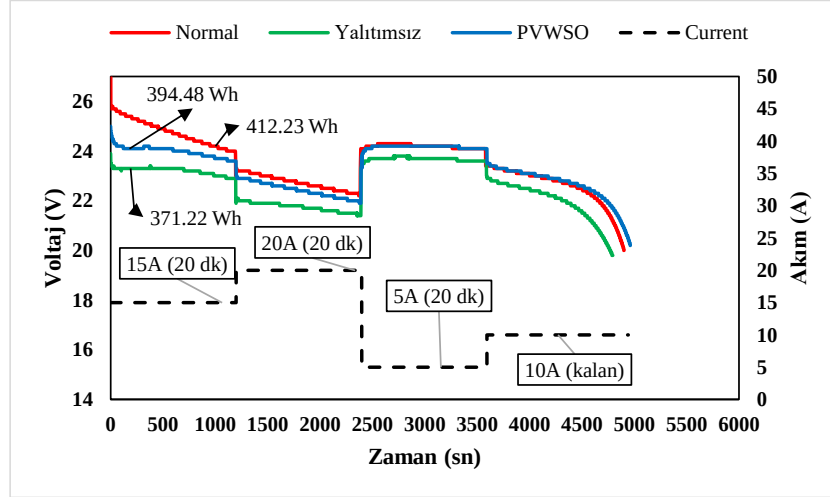
Şekil 4.55. 0°C sıcaklıkta 3. profilde EPWSO numunesinin deşarj performansı.

Şekilde 4.55'te 0°C sıcaklıkta 3. sürüş profili için batarya kabininin EPWSO yalıtım numunesiyle yalıtılması sonucu gerilim ve akım değerlerindeki değişim verilmiştir. Şekilde görülebileceği gibi 15A ve 20A deşarj akımlarında voltaj hızlı bir şekilde düşmüştür. Düşüş her 3 durum için de geçerlidir ancak yalıtımsız durumdaki düşüş değerleri en yüksektir. Akımın 5A' ya düşmesiyle aynı zamanda batarya kabininin yalıtım neticesinde sıcaklığının artmasıyla yalıtımlı durumun voltaj değerleri normal şartlarla neredeyse aynı değerlere ulaşmıştır. 5. Sürüş profili boyunca yalıtımsız durumun voltaj değerleri yalıtımlı duruma göre düşüktür. Bu da aynı zamanda güç ve verim değerlerinin de yalıtımlı durumdan düşük olmasına neden olmuştur. Normal şartlar, yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 412,23, 404,23 ve 370,36 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %85,88, %85,34 ve %77,16 olmuştur.



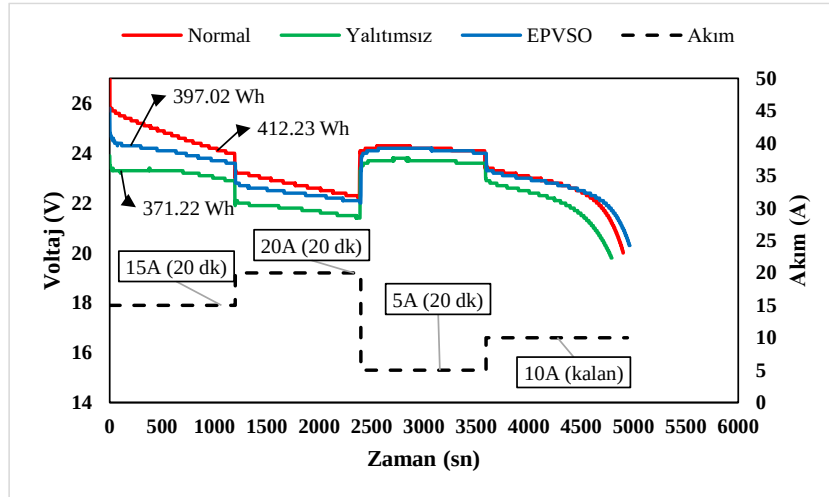
Şekil 4.56. 0°C sıcaklıkta 3. profilde CXPIX numunesinin deşarj performansı.

Şekilde 4.56'da 0°C sıcaklıkta 3. sürüş profili için batarya kabininin CXPIX yalıtım numunesiyle yalıtılması sonucu gerilim ve akım değerlerindeki değişim verilmiştir. Şekil 4.54'ten görülebileceği gibi 15A ve 20A deşarj akımlarında voltaj hızlı bir şekilde düşmüştür. Düşüş her 3 durum için de geçerlidir ancak yalıtımsız durumdaki düşüş değerleri en yüksektir. Akımın 5A'ya düşmesiyle aynı zamanda batarya kabininin yalıtım neticesinde sıcaklığının artmasıyla voltaj değerli yalıtımlı ve yalıtımsız durum için de artış göstermiştir. 5. Sürüş profili boyunca yalıtımsız durumun voltaj değerleri yalıtımlı duruma göre düşüktür. Bu da aynı zamanda güç ve verim değerlerinin de yalıtımlı durumdan düşük olmasına neden olmuştur. Normal şartlar, yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 412,23, 397,30 ve 370,36 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %85,88, %82,77 ve %77,16 olmuştur.



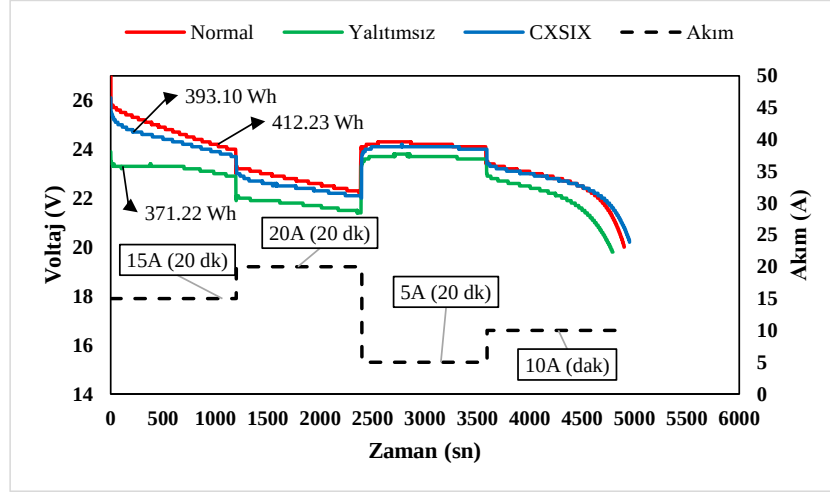
Şekil 4.57. -5°C sıcaklıkta 3. profilde PVWSO numunesinin deşarj performansı.

Batarya kabini PVWSO yalıtım numunesiyle yalıtıldıktan sonra -5 °C sıcaklıkta 3. sürüş profili boyunca batarya deşarj edilmiştir. Şekil 4.57’den görülebileceği gibi 15A ve 20A deşarj akımlarında voltaj hızlı bir şekilde düşmüştür. Düşüş her 3 durum için de geçerlidir ancak yalıtımsız durumdaki düşüş değerleri en yüksektir. Akımın 5A’ ya düşmesiyle aynı zamanda batarya kabininin yalıtım neticesinde sıcaklığının artmasıyla yalıtımlı durumun voltaj değerleri normal şartlarla neredeyse aynı değerlere ulaşmıştır. 10A deşarj akımıyla bataryanın deşarj edilmesine devam edildiğinde batarya deşarj süresinin yalıtımsız durum için en kısa sürdüğü, yalıtımlı durum ile normal şartlarda sürenin nerdeyse aynı olduğu görülmektedir. Normal şartlar, yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 412,23, 394,48 ve 370,36 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %85,88, %82,18 ve %77,34 olmuştur.



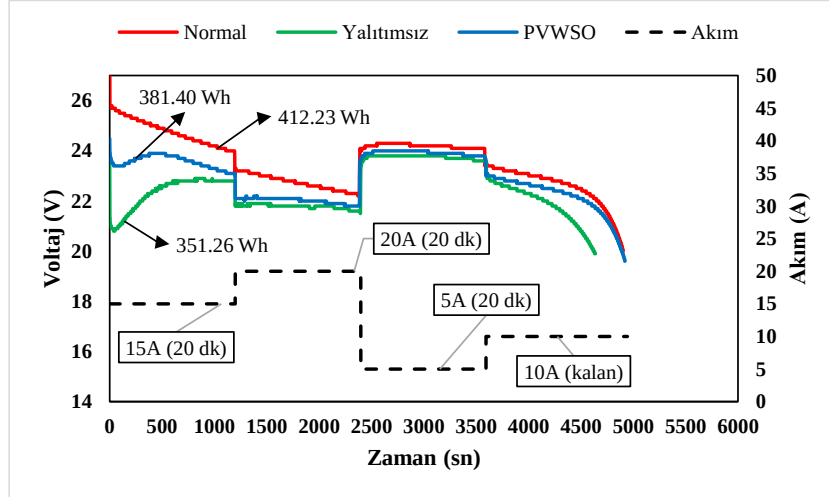
Şekil 4.58. -5°C sıcaklıkta 3. profilde EPWSO numunesinin deşarj performansı.

Batarya kabini EPWSO yalıtım numunesiyle yalıtıldıktan sonra -5 °C sıcaklıkta 3. sürüş profili boyunca batarya deşarj edilmiştir. Şekil 4.58'den görülebileceği gibi 15A ve 20A deşarj akımlarında voltaj hızlı bir şekilde düşmüştür. Düşüş her 3 durum için de geçerlidir ancak yalıtımsız durumdaki düşüş değerleri en yüksektir. Akımın 5A'ya düşmesiyle aynı zamanda batarya kabininin yalıtım neticesinde sıcaklığının artmasıyla yalıtımlı durumun voltaj değerleri normal şartlarla neredeyse aynı değerlere ulaşmıştır. 10A deşarj akımıyla bataryanın deşarj edilmesine devam edildiğinde batarya deşarj süresinin yalıtımsız durum için en kısa sürdüğü, yalıtımlı durum ile normal şartlarda sürenin neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Normal şartlar, yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 412,23, 397,02 ve 370,36 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %85,88, %82,71 ve %77,34 olmuştur.



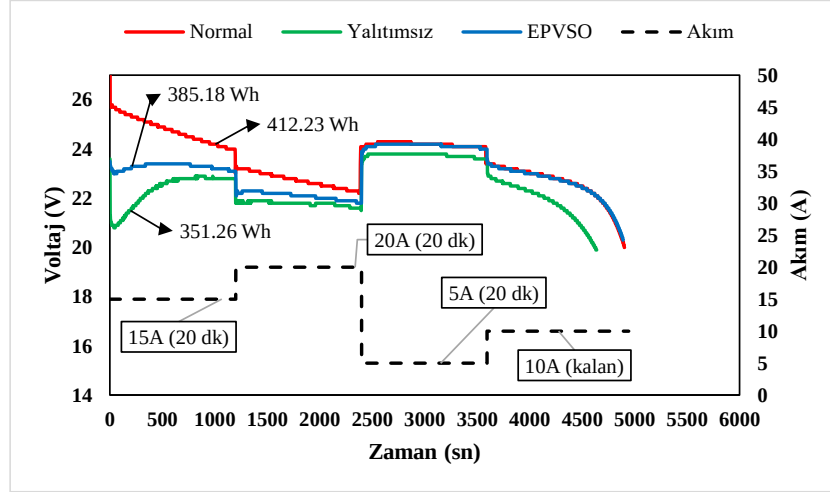
Şekil 4.59. -5°C sıcaklıkta 3. profilde CXPIX numunesinin deşarj performansı.

Batarya kabini CXPIX yalıtım numunesiyle yalıtıldıktan sonra -5 °C sıcaklıkta 3. sürüş profili boyunca batarya deşarj edilmiştir. Şekil 4.59'dan görülebileceği gibi 15A ve 20A deşarj akımlarında voltaj hızlı bir şekilde düşmüştür. Düşüş her 3 durum için de geçerlidir ancak yalıtımsız durumdaki düşüş değerleri en yüksektir. Akımın 5A'ya düşmesiyle aynı zamanda batarya kabininin yalıtım neticesinde sıcaklığının artmasıyla yalıtımlı durumun voltaj değerleri normal şartlarla neredeyse aynı değerlere ulaşmıştır. 10A deşarj akımıyla bataryanın deşarj edilmesine devam edildiğinde batarya deşarj süresinin yalıtımsız durum için en kısa sürdüğü, yalıtımlı durum ile normal şartlarda sürenin nerdeyse aynı olduğu görülmektedir. Normal şartlar, yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 412,23, 393,10 ve 370,36 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %85,88, %81,90 ve %77,34 olmuştur.



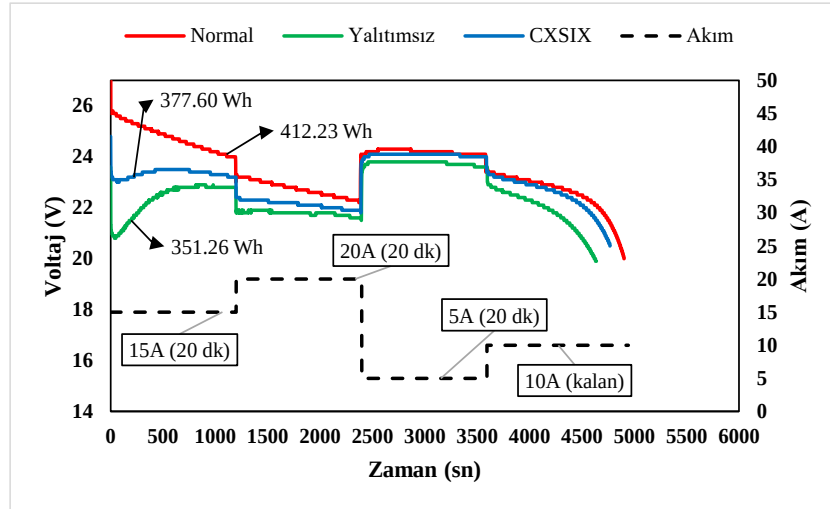
Şekil 4.60. -10°C sıcaklıkta 3. profilde PVWSO numunesinin deşarj performansı.

Şekilde 4.60'da -10°C sıcaklıkta 3. sürüş profili için batarya kabininin PVWSO yalıtım numunesiyle yalıtılması sonucu gerilim ve akım değerlerindeki değişim verilmiştir. Şekil 4.59'dan görülebileceği gibi batarya düşük sıcaklığa uzun süre maruz kaldığından dolayı bataryada iç direnç artışı meydana gelmiş elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleşmemesinden kaynaklı olarak voltajda 15A deşarj hızında dalgalanmalar olmuştur. Batarya 20A ile deşarj edildiğinde kararsızlık ve dalgalanmalar kısmen devam etmiştir. Bataryanın çalışmasından kaynaklı iç sıcaklığının artması ve yalıtım sayesinde kabinin ısınması neticesinde yalıtımlı durumun voltaj değerleri normal şartların voltaj değerlerine yaklaşmıştır. Yalıtımsız durumda batarya deşarj süresi yalıtımlı durumdan kısa sürmüştür. Normal şartlar, yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 412,23, 381,40 ve 351,26 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %85,88, %79,46 ve %73,18 olmuştur.



Şekil 4.61. -10°C sıcaklıkta 3. profilde EPWSO numunesinin deşarj performansı.

Şekilde 4.61’de -10°C sıcaklıkta 3. sürüş profili için batarya kabininin EPWSO yalıtım numunesiyle yalıtılması sonucu gerilim ve akım değerlerindeki değişim verilmiştir. Şekil 4.61’de görülebileceği gibi batarya düşük sıcaklığa uzun süre maruz kaldığından dolayı bataryada iç direnç artışı meydana gelmiş elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleşememesinden kaynaklı olarak voltajda 15A deşarj hızında dalgalanmalar olmuştur. Batarya 20A ile deşarj edildiğinde kararsızlık ve dalgalanmalar kısmen devam etmiştir. Bataryanın çalışmasından kaynaklı iç sıcaklığının artması ve yalıtım sayesinde kabinin ısınması neticesinde yalıtımlı durumun voltaj değerleri normal şartların voltaj değerlerine yaklaşmıştır. Yalıtımsız durumda batarya deşarj süresi yalıtımlı durumdan kısa sürmüştür. Normal şartlar, yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 412,23, 385,18 ve 351,26 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %85,88, %80,25 ve %73,18 olmuştur.

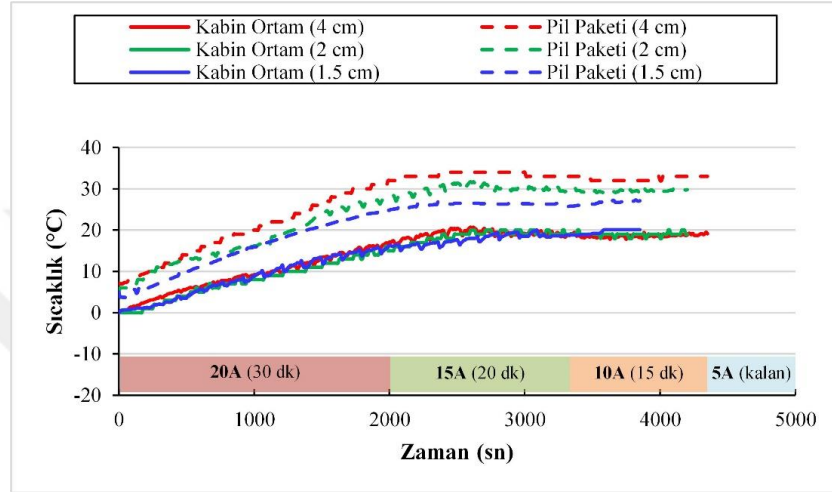


Şekil 4.62. -10°C sıcaklıkta 3. profilde CXPIX numunesinin deşarj performansı.

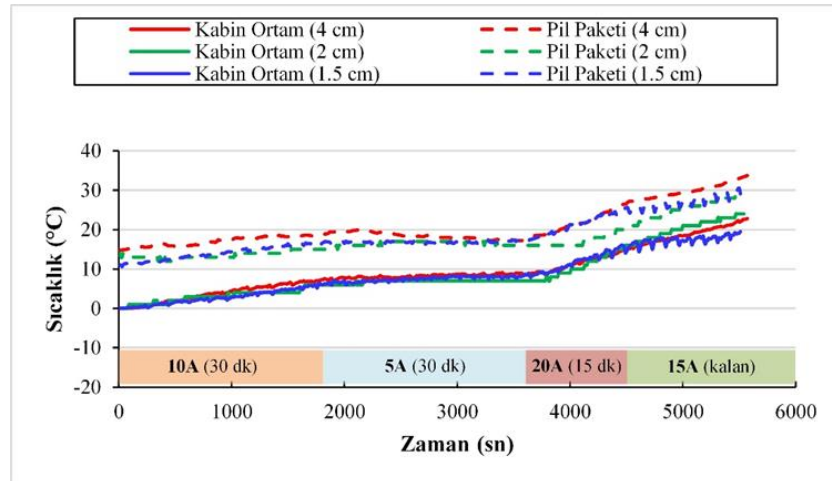
Şekilde 4.62’de -10°C sıcaklıkta 3. Sürüş profili için batarya kabininin CXPIX yalıtım numunesiyle yalıtılması sonucu gerilim ve akım değerlerindeki değişim verilmiştir. Şekil 4.62’den görülebileceği gibi batarya düşük sıcaklığa uzun süre maruz kaldığından dolayı bataryada iç direnç artışı meydana gelmiş elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleşememesinden kaynaklı olarak voltajda 15A deşarj hızında dalgalanmalar olmuştur. Batarya 20A ile deşarj edildiğinde kararsızlık ve dalgalanmalar kısmen devam etmiştir. Bataryanın çalışmasından kaynaklı iç sıcaklığının artması ve yalıtım sayesinde kabinin ısınması neticesinde yalıtımlı durumun voltaj değerleri normal şartların voltaj değerlerine yaklaşmıştır. Yalıtımsız durumda batarya deşarj süresi yalıtımlı durumdan kısa sürmüştür. Normal şartlar, yalıtımlı ve yalıtımsız durumda bataryanın gücü sırasıyla 412,23, 377,6 ve 351,26 Wh olarak hesaplanmıştır. Verimlilik ise sırasıyla %85,88, %78,67 ve %73,18 olmuştur.

#### 4.4. Yalıtım Kalınlığının Sıcaklık Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

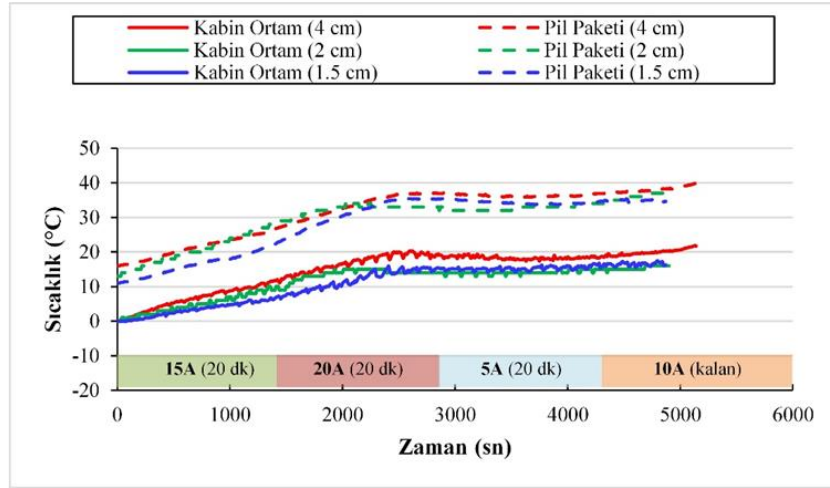
Bu bölümde EPWSO yalıtım numunesinin 1,5cm, 2,5cm ve 4 cm yalıtım kalınlıklarında 0, -5 ve -10 °C ortam sıcaklığında 2., 3. ve 5. Sürüş profili boyunca deşarj edilmesi sonucunda kabin ortam ve pil paketinin içinde meydana gelen sıcaklık değişimleri incelenmiştir.



Şekil 4.63. 0°C sıcaklıkta 2. profile EPWSO numune kalınlığının sıcaklık üzerine etkisi.

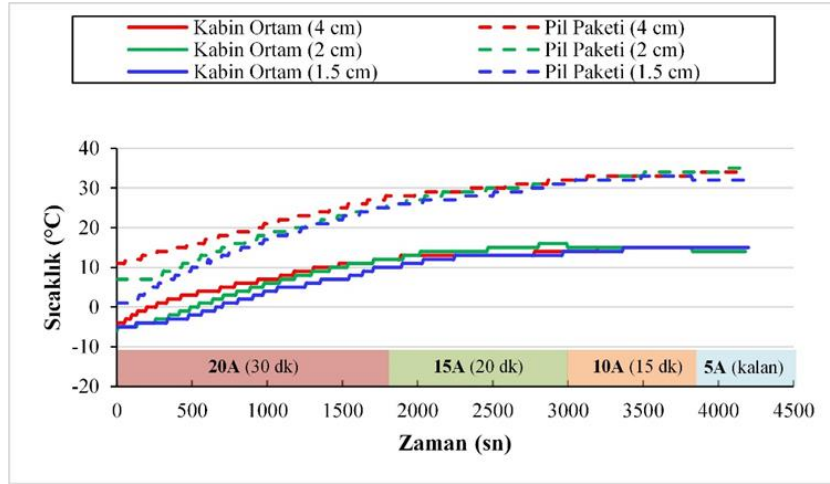


Şekil 4.64. 0°C sıcaklıkta 3. profile EPWSO numune kalınlığının sıcaklık üzerine etkisi.

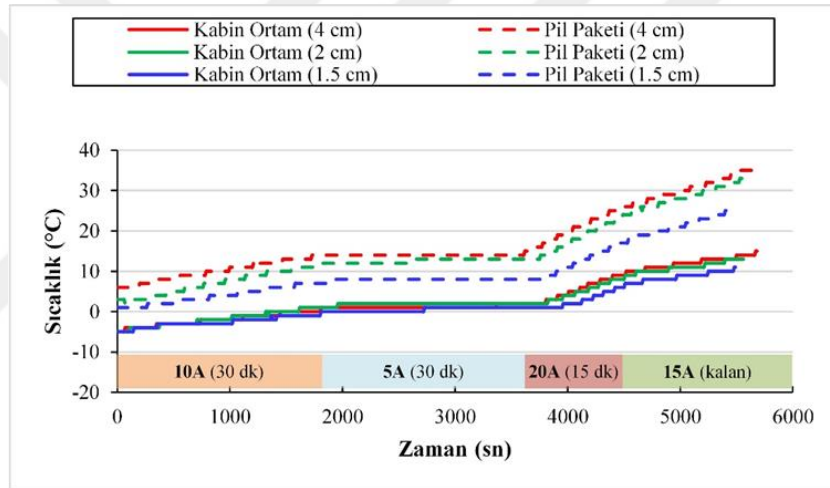


Şekil 4.65. 0°C sıcaklıkta 5. profilde EPWSO numune kalınlığının sıcaklık üzerine etkisi.

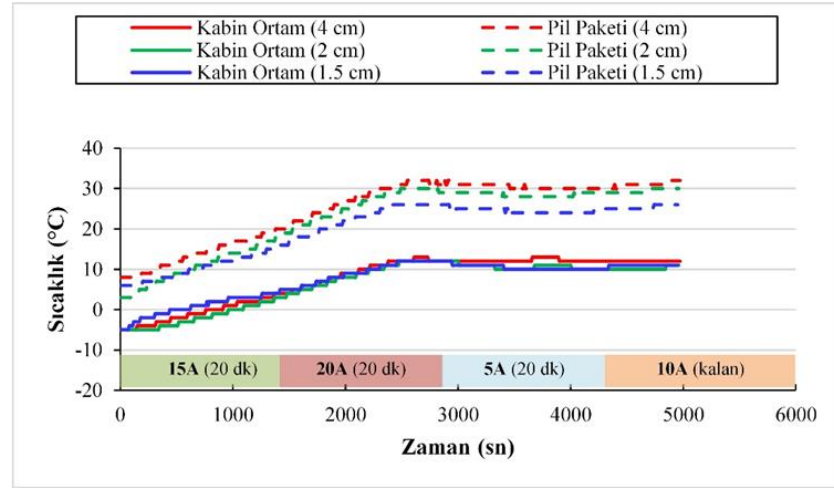
0 °C ortam sıcaklığında EPWSO yalıtım numunesine ait farklı kalınlıklara ait sıcaklık değişimleri 3 farklı sürüş profili için Şekil 4.63-4.65 arasında incelenmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi kabin içi sıcaklık her üç kalınlık için neredeyse aynı olsa da pil içi sıcaklık farklılık göstermektedir. Yalıtımın kabin ortam sıcaklığına etkisi kalınlığıyla ilişkili olup, olgular batarya performansını üst düzeye çıkarmak amacıyla spesifik deşarj akımı için kritik bir yalıtım kalınlığının mevcut olduğunu göstermektedir. Daha yüksek deşarj akımı, daha kalın kritik yalıtım kalınlığına yöneliktir. Kritik yalıtım kalınlığının, en iyi yalıtım performansını geliştiren optimum termal dirençle ilgili olduğu söylenebilir. Batarya düşük deşarj akımıyla deşarj edildiğinde kabin ortam sıcaklığı üç farklı kalınlık için de benzer eğilimlere sahiptir. Yalıtım kalınlığı arttıkça kabin ortam sıcaklığının ölçüm yapılan sıcaklık değerlerine düşmesi için geçen sürenin uzaması bu durumun nedenleri arasında söylenebilir. Aralarındaki sıcaklık farkı ihmal edilecek kadar düşüktür. Bu sayede üç farklı yalıtım kalınlığı için de ortam sıcaklığı, daha uzun bir süre boyunca optimum çalışma sıcaklığı aralığında kaldığı için, pilin düşük sıcaklık nedeniyle alacağı olumsuz etkiler iyileşebilmektedir (Wu ve ark., 2020).



Şekil 4.66. -5°C sıcaklıkta 1. profile EPWSO numune kalınlığının sıcaklık üzerine etkisi.

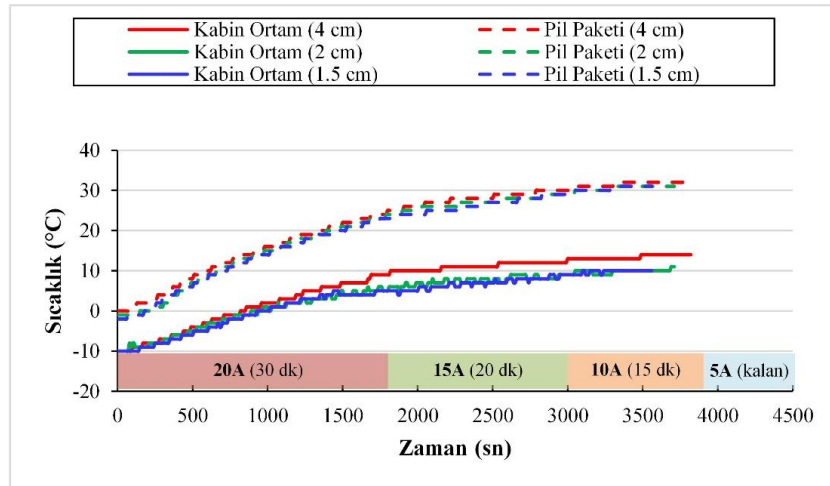


Şekil 4.67. -5°C sıcaklıkta 2. profile EPWSO numune kalınlığının sıcaklık üzerine etkisi.

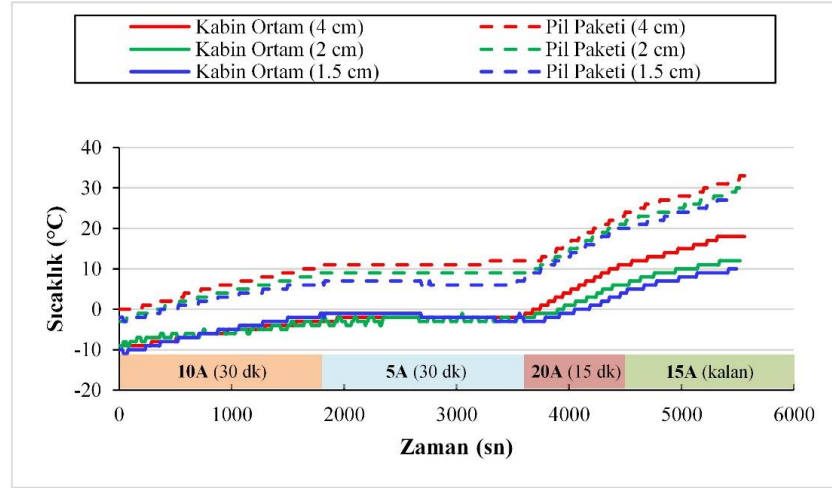


Şekil 4.68. -5°C sıcaklıkta 3. profilde EPWSO numune kalınlığının sıcaklık üzerine etkisi.

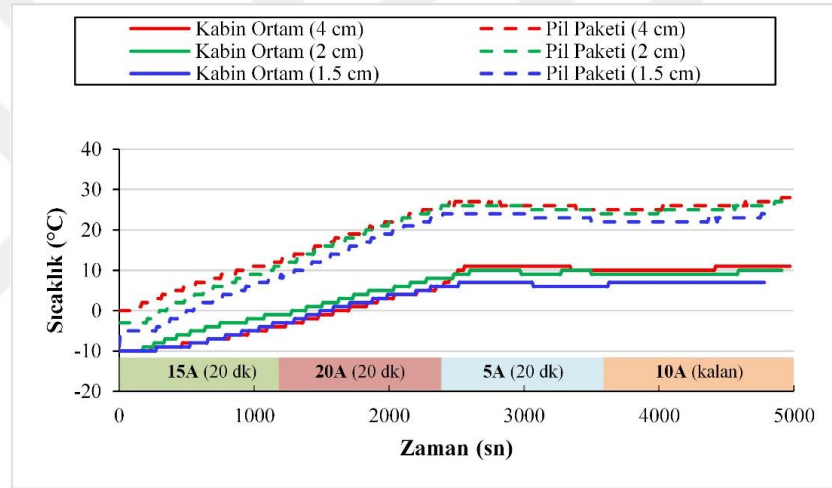
EPWSO yalıtım numunesinin kalınlığının -5 °C sıcaklıkta batarya kabin ve pil sıcaklığı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için 1,5cm, 2,5cm ve 4cm EPWSO ile yalıtılan batarya kabini, 0, -5 ve -10 °C sıcaklıklarda deşarj edilmiştir. Şekillerde de görüldüğü üzere yüksek deşarj akımı altında deşarj edildiğinde 3 kalınlık içinde hem kabin ortam hem de sıcaklık değerlerinde artış olmuştur. Pil içi sıcaklık artışında yalıtım kalınlığı ve yüksek deşarj akımının etkili olduğu görülmektedir. Kabin ortam sıcaklıkları kıyaslandığında sıcaklık değerleri için 3 farklı kalınlık da aynı etkiye sahiptir.



Şekil 4.69. -10°C sıcaklıkta 1. profilde EPWSO numune kalınlığının sıcaklık üzerine etkisi.



Şekil 4.70. -10°C sıcaklıkta 2. profilde EPWSO numune kalınlığının sıcaklık üzerine etkisi.



Şekil 4.71. -10°C sıcaklıkta 3. profilde EPWSO numune kalınlığının sıcaklık üzerine etkisi.

EPWSO yalıtım numunesinin kalınlığının -10 °C sıcaklıkta batarya kabin ve pil sıcaklığı üzerindeki etkileri Şekil 4.69-4.71.'de verilmiştir. Şekillerde de görüldüğü üzere yüksek deşarj akımı altında deşarj edildiğinde 3 kalınlık içinde hem kabin ortam hem de sıcaklık değerlerinde artış olmuştur. Pil içi sıcaklık artışında yalıtım kalınlığı ve yüksek deşarj akımının etkili olduğu görülmektedir. Kabin ortam sıcaklıkları kıyaslandığında sıcaklık değerleri için 3 farklı kalınlık da aynı etkiye sahiptir. Batarya 15A ve 20A gibi yüksek deşarj akımlarıyla deşarj edildiğinde hem kabin ortam hem de pil içi sıcaklıklarında her 3 kalınlık için de yükseliş söz konusudur. Ancak deşarj akımı düştükçe sıcaklık artışlarında azalma meydana gelmiştir. Durum 10A ve 5A gibi düşük deşarj akımlarıyla deşarj edilmeye başlanan 3. sürüş profili için de farksızdır. Batarya paketi 10A ve 5A deşarj akımıyla deşarj edildiğinde sıcaklık başlangıçta artış gösterse

de sonrasında sabit bir şekilde devam etmiştir. Deşarj akımı arttıkça sıcaklıklar da artmıştır.

#### 4.5. Yalıtım Kalınlığının Batarya Deşarj Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi

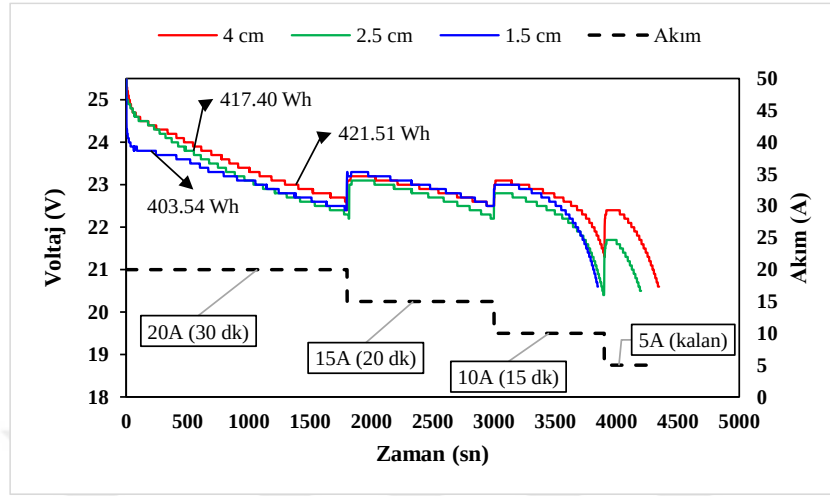
Bu bölümde EPWSO yalıtım numunesinin 1,5cm, 2,5cm ve 4 cm yalıtım kalınlıklarında 0, -5 ve -10 °C ortam sıcaklığında 1., 2. ve 3. sürüş profili boyunca deşarj edilmesi sonucunda bataryanın güç ve verim değişimleri incelenmiştir.

**Tablo 4.4.** Yalıtımlı, yalıtımsız ve normal oda koşullarında güç ve verimlilik değerleri.

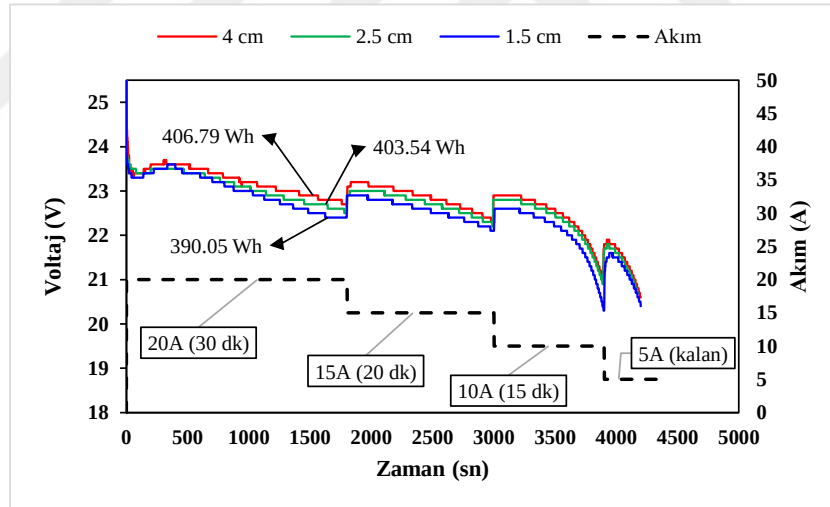
|           | Kalınlık<br>(cm) | 0°C         |                   | -5°C        |                   | -10°C       |                   |
|-----------|------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|
|           |                  | Güç<br>(Wh) | Verimlilik<br>(%) | Güç<br>(Wh) | Verimlilik<br>(%) | Güç<br>(Wh) | Verimlilik<br>(%) |
| 2. Profil | 1,5              | 403,536     | 84,07             | 390,045     | 81,26             | 373,95      | 77,91             |
|           | 2,5              | 417,403     | 86,96             | 403,536     | 84,07             | 386,408     | 80,51             |
|           | 4                | 421,506     | 87,81             | 406,786     | 84,75             | 387,862     | 80,81             |
|           |                  | 0°C         |                   | -5°C        |                   | -10°C       |                   |
|           |                  | Güç<br>(Wh) | Verimlilik<br>(%) | Güç<br>(Wh) | Verimlilik<br>(%) | Güç<br>(Wh) | Verimlilik<br>(%) |
| 3. Profil | 1,5              | 396,56      | 82,62             | 383,983     | 80                | 377,595     | 78,67             |
|           | 2,5              | 405,139     | 84,40             | 393,490     | 82                | 383,983     | 80                |
|           | 4                | 412,659     | 86                | 397,681     | 82,85             | 386,138     | 80,44             |
|           |                  | 0°C         |                   | -5°C        |                   | -10°C       |                   |
|           |                  | Güç<br>(Wh) | Verimlilik<br>(%) | Güç<br>(Wh) | Verimlilik<br>(%) | Güç<br>(Wh) | Verimlilik<br>(%) |
| 5. Profil | 1,5              | 392,029     | 81,67             | 389,715     | 81,19             | 353,526     | 78,75             |
|           | 2,5              | 404,838     | 84,34             | 394,485     | 82,18             | 381,404     | 79,46             |
|           | 4                | 406,252     | 84,64             | 395,612     | 82,42             | 381,897     | 79,57             |

Tablo 4.4'te EPWSO yalıtım numunesinin 1,5 cm, 2,5 cm ve 4 cm yalıtım kalınlıklarının bataryanın deşarj verim değerleri verilmiştir. Aynı sürüş profili için her bir sıcaklık değerindeki verimlilikler incelendiğinde sıcaklık düştükçe verimin düştüğü görülmektedir. Ancak yine tablodan görüleceği üzere yalıtım kalınlığının arttıkça verimde az da olsa artış söz konusudur. Bu da yalıtım kalınlığının pil sıcaklığını

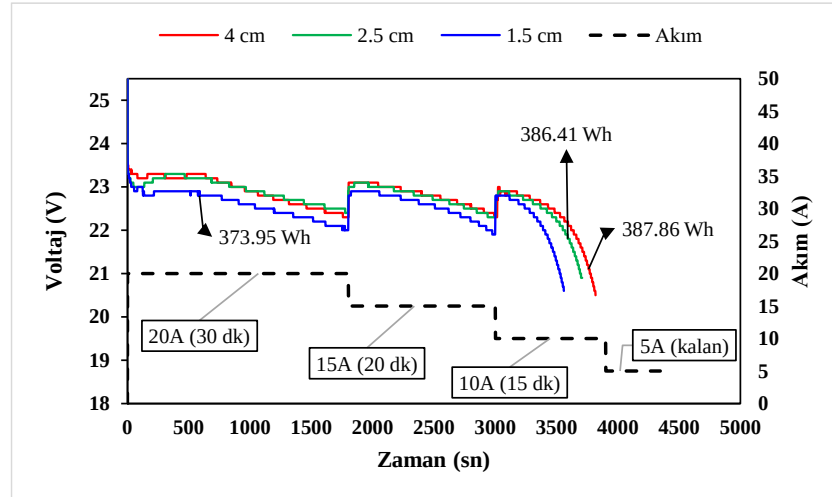
arttırarak pilin verimli çalışma sıcaklıklarına daha hızlı ulaşmasının etkisi olarak yorumlanabilir.



Şekil 4.72. 0°C sıcaklıkta 1. profilde EPWSO numune kalınlığının batarya deşarj performansı üzerine etkisi.

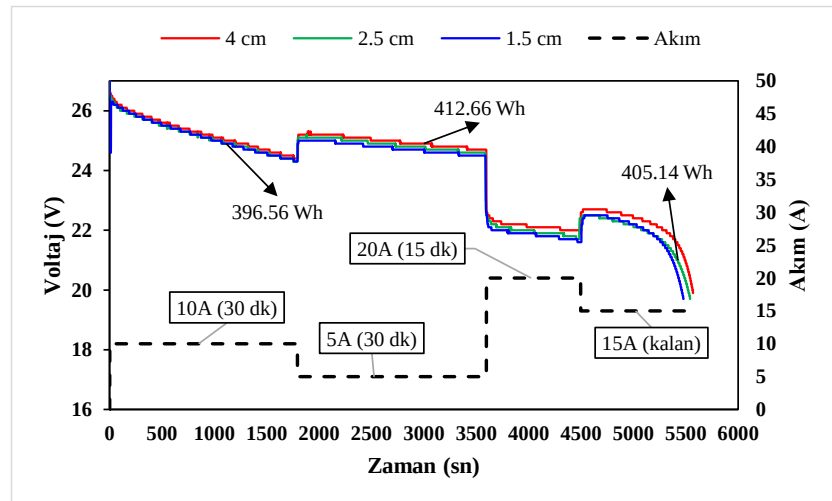


Şekil 4.73. -5 °C sıcaklıkta 1. profilde EPWSO numune kalınlığının batarya deşarj performansı üzerine etkisi.

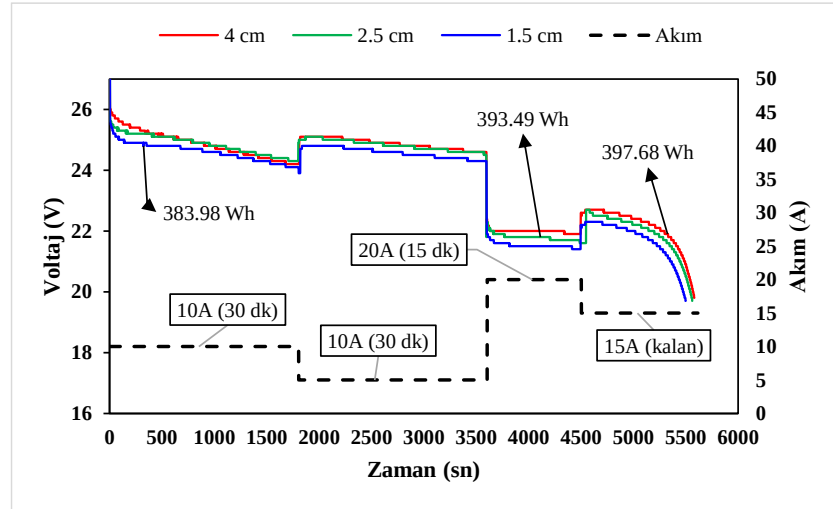


Şekil 4.74. -10°C sıcaklıkta 1. profilde EPWSO numune kalınlığının batarya deşarj performansı üzerine etkisi.

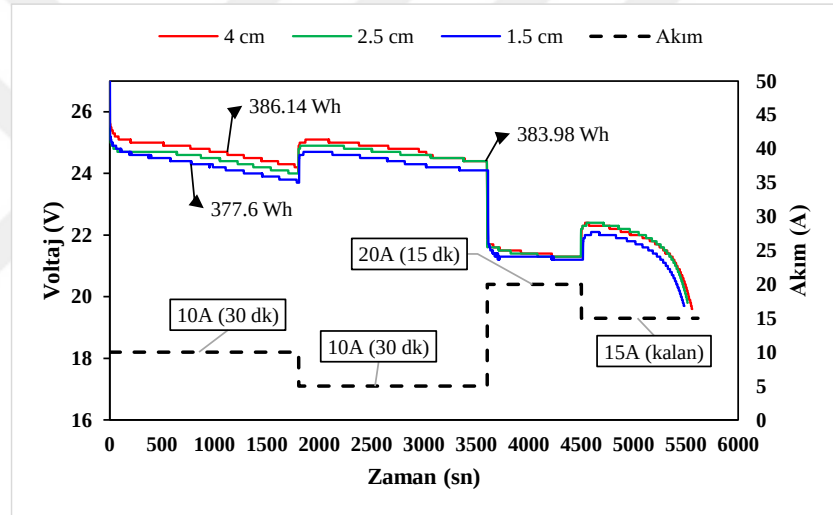
EPWSO yalıtım numunesi kalınlığının bataryanın düşük sıcaklık deşarj performansı üzerindeki etkileri Şekil 4.72-4.74’de incelenmiştir. 0°C ortam sıcaklığında 2. Sürüş profili boyunca bataryanın deşarj performansı incelendiğinde yalıtım kalınlığı arttıkça bataryanın güç ve verim değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Batarya 20A deşarj akımıyla deşarj edilmeye başladığında bataryada meydana gelen voltaj düşüşü kalınlık arttıkça azalmaktadır. Bu durum aynı sürüş profili için -5 ve -10 °C sıcaklıklar için de geçerlidir. 4 cm yalıtım kalınlığında bataryanın güç ve verim değerlerinde artış olmuştur. Daha yüksek yalıtım kalınlığı daha yüksek deşarj akımlarına yöneliktir.



Şekil 4.75. 0°C sıcaklıkta 2. profilde EPWSO numune kalınlığının batarya deşarj performansı üzerine etkisi.



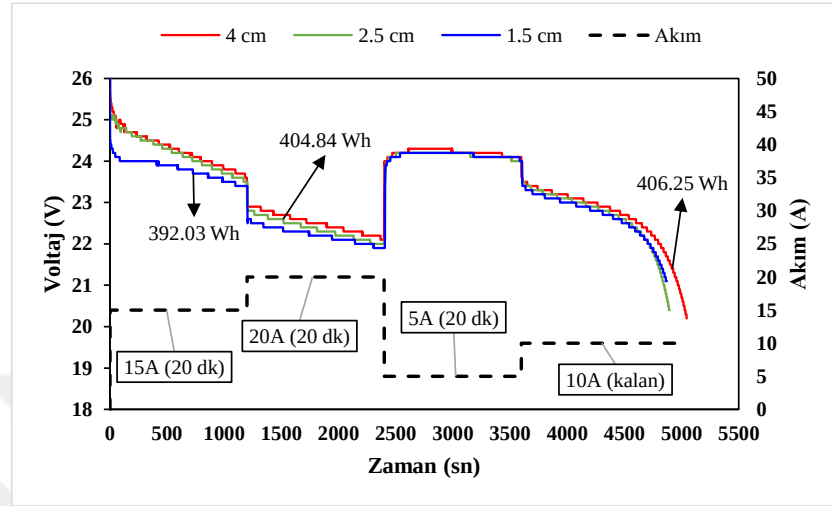
Şekil 4.76. -5°C sıcaklıkta 2. profilde EPWSO numune kalınlığının batarya deşarj performansı üzerine etkisi.



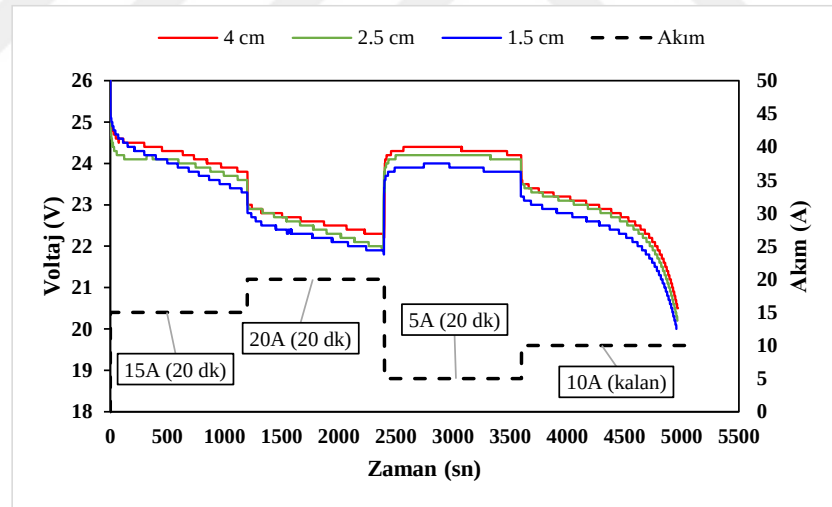
Şekil 4.77. -10°C sıcaklıkta 2. profilde EPWSO numune kalınlığının batarya deşarj performansı üzerine etkisi.

EPWSO yalıtım numunesi kalınlığının 2. sürüş profili boyunca bataryanın düşük sıcaklıklarda deşarj performansı üzerindeki etkileri Şekil 4.75-4.77'de incelenmiştir. 0°C ortam sıcaklığında 2. sürüş profili boyunca bataryanın deşarj performansı incelendiğinde deşarj akımı 20A ve 15A değerine yükselene kadar yalıtım kalınlığının bataryanın performansı üzerinde farklı etkisi olmadığı görülmektedir. Batarya deşarj akımı yükseldiğinde yalıtım kalınlığı arttıkça bataryanın deşarj performansında iyileşmeler olmuştur. Bu durum yüksek deşarj akımlarında batarya sıcaklığının daha fazla yükselmesinin bir sonucu olarak yorumlanabilir. Ortam sıcaklığı -5 ve -10 °C' ye düştüğünde yalıtım kalınlığı arttıkça bataryanın güç ve verim değerlerinin arttığı

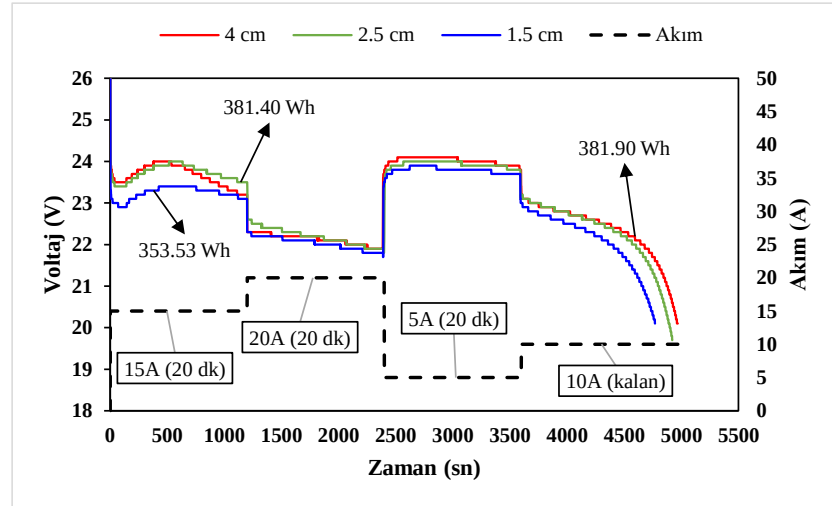
görülmektedir. Bu durum kritik yalıtım kalınlığının, en iyi yalıtım performansını verebilmesi için optimum termal direnç aralığına ulaşabilmesiyle ilgili olduğu açıklanabilir.



Şekil 4.78. 0°C sıcaklıkta 3. profilde EPWSO numune kalınlığının batarya deşarj performansı üzerine etkisi.



Şekil 4.79. -5°C sıcaklıkta 3. profilde EPWSO numune kalınlığının batarya deşarj performansı üzerine etkisi.



Şekil 4.80. -10°C sıcaklıkta 3. profilde EPWSO numune kalınlığının batarya deşarj performansı üzerine etkisi.

EPWSO yalıtım numunesi kalınlığının 3. sürüş profili boyunca bataryanın düşük sıcaklıklarda deşarj performansı üzerindeki etkileri Şekil 4.78-80’de incelenmiştir. 3. sürüş profilinde 15A ve 20A gibi yüksek deşarj akımlarında batarya deşarj edilmeye başlandığı için 4cm yalıtım kalınlığı 0, -5 ve -10°C için de en iyi güç ve verim değerlerine sahiptir. Bu durum yüksek deşarj akımlarında pil sıcaklığının hızlı bir şekilde artıp batarya çalışma sıcaklığını optimum sıcaklık koşullarına ulaştırmasına ve böylelikle bataryada meydana gelen termal direncin optimum koşullara dönmesine nedeni olarak açıklanabilir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bu tez kapsamında Li-İon bataryaların farklı mevsimsel şartlarında meydana gelen performans ve menzil kayıplarını minimize etmek, güç verimliliğini arttırmak ve daha uzun ömürlü çalışmasını sağlayacak teknolojilerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Tez kapsamında elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

1. Üretilen yalıtım numunelerinin basınç dayanımları 148.77 kPa ile 433.801 kPa arasında, üç nokta eğme dayanımları ise 107.545 kPa ile 416.183 kPa arasında değişmektedir. Polyester ve polivinilester termoset bağlayıcılara göre epoksi termoset bağlayıcı ile perlit arasında yüksek bir uyum olduğu görülmüş bu ise dayanım artışını etkilemiştir. Epoksi bağlayıcıların yüksek dayanımlarına rağmen diğer termoset bağlayıcılarına nazaran daha pahalı olmaları kullanım miktarlarını sınırlamaktadır. SWPE, SWPV ve SWEP numunelerinin dış yüzeyinde kullanılan termoset kaplamalar malzeme üzerinde ikincil bir direnç oluşturduğundan bu malzemelerin hem basınç hem de eğme dayanımlarının artmasını sağlamıştır.
2. Üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen kuru yoğunluk testleri sonuçlarına göre, kuru yoğunluk değerleri  $195.348 \text{ kg/m}^3$  ile  $230.576 \text{ kg/m}^3$  arasında değişiklik göstermiştir. Grafik incelendiğinde yoğunluk değerlerinin birbirine yakın olup en düşük ile en yüksek arasında % fark olduğu tespit edilmiştir. Malzemelerin ağırlıklarının birbirine yakın olması malzemelerin gösterdiği özelliklerin (mekanik ve ısı) yoğunluktan bağımsız ve yalın biçimde incelenmesine olanak sağlamıştır.
3. Yapılan ısı özellik test sonuçlarına göre, numunelerin ısı iletkenlikleri 0.0509 W/mK ile 0.0669 W/mK arasında, özgül ısı değerleri  $897.610 \text{ J/kgK}$  ile  $2156.165 \text{ J/kgK}$  arasında ve ısı yayılım hızları ise  $0.1085 \text{ mm}^2/\text{s}$  ile  $0.3502 \text{ mm}^2/\text{s}$  arasında değişim göstermiştir. Test edilen numunelerin ısı yayılım ve ısı iletkenlik değerleri birbirine yakın oranda değişim göstermiştir. Perlit esaslı yalıtım malzemelerinde geliştirilmiş perlit agreganın sahip olduğu yüksek boşluk sayesinde 0.05 W/mK'e varan ısı iletkenlik değerlerine ulaşılmıştır. Termoset/sodyum silikat yapıştırıcılarının birlikte kullanılması ve buna orantılı

olarak oranının artması ısı iletkenlik değeri artmasına sebebiyet vermiş olup yalnız termoset bağlayıcıların kullanıldığı numunelere göre daha yüksek ısı iletkenlik değerlerine de sahip olmalarını sağlamıştır. Epoksinin daha yüksek ısı tutmasından kaynaklı olarak epoksi termoset bağlayıcılı numunelerdeki özgül ısı değerlerinin yüksek olması aynı zamanda bu malzemelerin ısı yayılım değerlerinin de düşmesini sağlamıştır. SWPE, SWPV ve SWEP numunelerinin dış yüzeyinde kullanılan termoset kaplamalar malzeme üzerinde ısı direnç oluşturarak malzemenin ısı iletkenlik değeri azalmasını ve yalıtım özelliğinin artmasını sağlamıştır.

4. ASTM E84 yanma testine tabi tutulan numunelerde yapılan gözlemlerde, numunenin ön sıcaklığı 955 °C'yi buluyorken arka yüzey sıcaklığı 38.1 °C olmuştur. Test sırasında malzemenin herhangi bir duman ve is çıkarmaması, aynı zamanda yüzeyinde herhangi bir deformenin dahi bulunmaması numunelerin yüksek sıcaklığa karşı hassas bölgelerde uygulamalarda yer almasıyla birlikte, yangın ve patlamaların önüne geçilmesi hedeflenmektedir.
5. Li-ion pillerin farklı sıcaklık ve yükleme profilleri altında performans parametrelerinin incelenmesi amacıyla batarya-kabin deney düzeneği hazırlanmış ve batarya-kabin ortam sıcaklığının 22 °C 'den sırasıyla 0 °C, -5 °C ve -10 °C sıcaklıklara düşürülmesi sonucunda oluşan sıcaklık değişimleri gözlemlenmiştir. Kabinin EPWSO ile yalıtılması sonucunda batarya optimum çalışma sıcaklık aralığına ulaşmış bu durum bataryanın performansında iyileşme meydana getirerek deşarj süresini uzamasını sağlamıştır. Bu profilde her ne kadar yalıtımlı ortamda pil paketi sıcaklığı yalıtımsız ortama oranla yüksek başlasa da bu durum pil paketinden alınan akımın süresini düşürmemiştir. Tüm profillerde yalıtımlı ortamda bataryanın deşarj süresi yalıtımsız ortamdan daha uzun olmuştur.
6. Li-ion pillerin farklı sürüş profili, farklı yalıtım malzemesi, farklı kalınlık değerleri ile farklı kabin ortam sıcaklıklarının bir pil paketindeki güç ve verimlilik üzerine etkileri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.
7. 2. yükleme profili altında 22 °C kabin ortam sıcaklığında 423.53 Wh güç kapasitesi ile %88.23 verim elde edilen batarya-kabin deney düzeneğinde; 0°C sıcaklık dış ortam sıcaklığında, PVWSO, EPWSO ve CXPIX malzemesi ile kaplanmış kabin ile yalıtımsız kabin arasındaki performans değerleri

karşılaştırılmıştır. PVWSO, EPWSO ve CXPIX malzemesi ile kaplanmış kabinlerde bataryadan elde edilen güç değerleri sırasıyla 416.76 Wh, 417.4 Wh ve 412.31 Wh olurken yalıtımsız kabinde bu değer 386 Wh olmuştur. Elde edilen verimlilik ise sırasıyla %86.82, %86.96 ve %85.9 olurken yalıtımsız kabinde bu değer %80.42 olmuştur. -5°C sıcaklık dış ortam sıcaklığında, PVWSO, EPWSO ve CXPIX malzemesi ile kaplanmış kabin ile yalıtımsız kabin arasındaki performans değerleri karşılaştırılmıştır. PVWSO, EPWSO ve CXPIX malzemesi ile kaplanmış kabinlerde bataryadan elde edilen güç değerleri sırasıyla 403.54 Wh, 412.96 Wh ve 390.05 Wh olurken yalıtımsız kabinde bu değer 372.6 Wh olmuştur. Elde edilen verimlilik ise sırasıyla %84.07, %86.03 ve %81.26 olurken yalıtımsız kabinde bu değer %77.62 olmuştur. -10°C sıcaklık dış ortam sıcaklığında, PVWSO, EPWSO ve CXPIX malzemesi ile kaplanmış kabin ile yalıtımsız kabin arasındaki performans değerleri karşılaştırılmıştır. PVWSO, EPWSO ve CXPIX malzemesi ile kaplanmış kabinlerde bataryadan elde edilen güç değerleri sırasıyla 386.41 Wh, 392.45 Wh ve 374 Wh olurken yalıtımsız kabinde bu değer 354.1 Wh olmuştur. Elde edilen verimlilik ise sırasıyla %80.5, %81.77 ve %77.9 olurken yalıtımsız kabinde bu değer %73.77 olmuştur.

8. 3. yükleme profili altında 22 °C kabin ortam sıcaklığında 427.24 Wh güç kapasitesi ile %89 verim elde edilen batarya-kabin deney düzeneğinde; 0°C sıcaklık dış ortam sıcaklığında, PVWSO, EPWSO ve CXPIX malzemesi ile kaplanmış kabin ile yalıtımsız kabin arasındaki performans değerleri karşılaştırılmıştır. PVWSO, EPWSO ve CXPIX malzemesi ile kaplanmış kabinlerde bataryadan elde edilen güç değerleri sırasıyla ve 400.11 Wh, 405.14 Wh, 396.56 Wh olurken yalıtımsız kabinde bu değer 377.83 Wh olmuştur. Elde edilen verimlilik ise sırasıyla %84.4, %89 ve %82.6 olurken yalıtımsız kabinde bu değer %78.71 olmuştur. -5°C sıcaklık dış ortam sıcaklığında, PVWSO, EPWSO ve CXPIX malzemesi ile kaplanmış kabin ile yalıtımsız kabin arasındaki performans değerleri karşılaştırılmıştır. PVWSO, EPWSO ve CXPIX malzemesi ile kaplanmış kabinlerde bataryadan elde edilen güç değerleri sırasıyla 403.54 Wh, 412.96 Wh ve 390.05 Wh olurken yalıtımsız kabinde bu değer 372.6 Wh olmuştur. Elde edilen verimlilik ise sırasıyla %81.98, %82.62 ve %81.95 olurken yalıtımsız kabinde bu değer %76.46 olmuştur. -10°C sıcaklık

dış ortam sıcaklığında, PVWSO, EPWSO ve CXPIX malzemesi ile kaplanmış kabin ile yalıtımsız kabin arasındaki performans değerleri karşılaştırılmıştır. PVWSO, EPWSO ve CXPIX malzemesi ile kaplanmış kabinlerde bataryadan elde edilen güç değerleri sırasıyla 383.98 Wh, 386.05 Wh ve 370.15 Wh olurken yalıtımsız kabinde bu değer 355.2 Wh olmuştur. Elde edilen verimlilik ise sırasıyla %80, %80.43 ve %77.1 olurken yalıtımsız kabinde bu değer %74 olmuştur.

9. 5. yükleme profili altında 22 °C kabin ortam sıcaklığında 412.23 Wh güç kapasitesi ile %85.89 verim elde edilen batarya-kabin deney düzeneğinde; 0°C sıcaklık dış ortam sıcaklığında, PVWSO, EPWSO ve CXPIX malzemesi ile kaplanmış kabin ile yalıtımsız kabin arasındaki performans değerleri karşılaştırılmıştır. PVWSO, EPWSO ve CXPIX malzemesi ile kaplanmış kabinlerde bataryadan elde edilen güç değerleri sırasıyla 403.54 Wh, 412.96 Wh ve 390.05 Wh olurken yalıtımsız kabinde bu değer 371.22 Wh olmuştur. Elde edilen verimlilik ise sırasıyla %83.91, %84.34 ve %82.77 olurken yalıtımsız kabinde bu değer %77.34 olmuştur. -5°C sıcaklık dış ortam sıcaklığında, PVWSO, EPWSO ve CXPIX malzemesi ile kaplanmış kabin ile yalıtımsız kabin arasındaki performans değerleri karşılaştırılmıştır. PVWSO, EPWSO ve CXPIX malzemesi ile kaplanmış kabinlerde bataryadan elde edilen güç değerleri sırasıyla 394.46 Wh, 397.02 Wh ve 393.1 Wh olurken yalıtımsız kabinde bu değer 370.36 Wh olmuştur. Elde edilen verimlilik ise sırasıyla %83.91, %84.34 ve %82.77 olurken yalıtımsız kabinde bu değer %77.16 olmuştur. -10°C sıcaklık dış ortam sıcaklığında, PVWSO, EPWSO ve CXPIX malzemesi ile kaplanmış kabin ile yalıtımsız kabin arasındaki performans değerleri karşılaştırılmıştır. PVWSO, EPWSO ve CXPIX malzemesi ile kaplanmış kabinlerde bataryadan elde edilen güç değerleri sırasıyla 381.40 Wh, 385.2 Wh ve 377.6 Wh olurken yalıtımsız kabinde bu değer 351.26 Wh olmuştur. Elde edilen verimlilik ise sırasıyla %79.46, %80.25 ve %78.67 olurken yalıtımsız kabinde bu değer %73.18 olmuştur.
10. Düşük ısı iletkenliği ve düşük ısı yayılımı ile üretilen yalıtım numuneleri çevreye karşı bir ısı direnci görevi görür; pilin deşarj işlemi sırasında üretilen ısı etkili bir şekilde korunur ve çok yavaş bir şekilde ortama salınır; bu da pilleri ısıtmak için daha fazla termal enerjinin mevcut olduğunu ve arttığını gösterir.

Sıcaklıklar artarsa, ısınma sırasında pilin elektrokimyasal performansı geri kazanılacaktır.



## KAYNAKLAR

- Adnan, M., 2023, The future of energy storage: advancements and roadmaps for lithium-ion batteries, *International Journal of Molecular Sciences*, 24 (8), 7457.
- Alkan, M. and Doğan, M., 2001, Adsorption of copper (II) onto perlite, *Journal of Colloid and Interface Science*, 243 (2), 280-291.
- Azizi, Y. and Sadrameli, S., 2016, Thermal management of a LiFePO<sub>4</sub> battery pack at high temperature environment using a composite of phase change materials and aluminum wire mesh plates, *Energy Conversion and Management*, 128, 294-302.
- Babu, A. R., Minovski, B. and Sebben, S., 2022, Thermal encapsulation of large battery packs for electric vehicles operating in cold climate, *Applied Thermal Engineering*, 212, 118548.
- Bugga, R., Smart, M., Whitacre, J. and West, W. 2007. Lithium ion batteries for space applications. Paper presented at the 2007 IEEE Aerospace Conference.
- Chen, M., Dongxu, O., Liu, J. and Wang, J., 2019, Investigation on thermal and fire propagation behaviors of multiple lithium-ion batteries within the package, *Applied Thermal Engineering*, 157, 113750.
- Chen, S., Wei, X., Zhang, G., Wang, X., Zhu, J., Feng, X., Dai, H. and Ouyang, M., 2023, All-temperature-area battery application mechanism, performance and strategies, *The Innovation*.
- Corliss, A., 2020, Electric vehicles and their role in the energy system: Decarbonising transport and electricity in Great Britain, *Johnson Matthey Technology Review*, 64 (3), 307-319.
- Cosansu, G. and Cogun, C., 2012, An investigation on use of colemanite powder as abrasive in abrasive waterjet cutting (AWJC), *Journal of mechanical science and technology*, 26, 2371-2380.
- Çelik, O. N., Yonar, F. and Ceylan, S., 2007, Bitümlü sıcak karışımların performansına filler etkisi. 7, *Ulaştırma Kongresi*, 196-204.
- Çinkü, K., 2008. Aktivasyon yöntemleri ile bentonitten su bazlı kıvamlaştırıcı üretiminin araştırılması. *Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul*,
- Daulatabad, N. A., Rajatha, M., Maheshwari, B., Hemanth, H. and Shankar, S. 2022. Smart grid and the importance of electric vehicles. Paper presented at the 2022 IEEE International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE).
- Delucchi, M. A. and Lipman, T. E., 2001, An analysis of the retail and lifecycle cost of battery-powered electric vehicles, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 6 (6), 371-404.

- Demir, A., 2011, Güncel ve gelecekteki otomobil ve otopark trendleri, *Uluslararası Otopark Politikaları ve Uygulamaları Sempozyumu*, Mayıs, 25.
- Ding, Y., Cano, Z. P., Yu, A., Lu, J. and Chen, Z., 2019, Automotive Li-ion batteries: current status and future perspectives, *Electrochemical Energy Reviews*, 2, 1-28.
- Diouf, B. and Avis, C., 2019, The potential of Li-ion batteries in ECOWAS solar home systems, *Journal of Energy Storage*, 22, 295-301.
- DPT. 2001, *Endüstriyel hammaddeler alt komisyonu toprak sanayii hammaddeleri I (seramik killeri-kaolen-feldspat-pirofillit-wollastonit-talk) çalışma grubu raporu* [Online], <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/kaolen.pdf> [Ziyaret Tarihi: 07.05.2024]
- DPT. 2004, *Yapı malzemeleri III pomza-perlit-vermikülit-flogopit-genleşen killeri, 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı ÖİK Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyon Raporu* [Online], <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2022/08/Sekizinci-Bes-Yillik-Kalkinma-Plani-Madencilik-OIK-Raporu-EndustriyelHammaddelerAltKomisyonu-YapiMalzemeleri-III-CalismaGrubuRaporu.pdf> [Ziyaret Tarihi: 03.04.2024]
- Dursun, H., 2024, Elektrikli taşıtlarda kullanılan batarya modülünün ısı performansının sayısal ve deneysel araştırılması.
- Faber, M., Buitkamp, O., Ritz, S., Börner, M., Berger, J., Friedrich, J., Arzberger, A. and Sauer, D. U., 2023, A method to determine the specific heat capacity of lithium-ion battery cells using thermal insulation, *Journal of Power Sources*, 583, 233499.
- Fan, J. and Tan, S., 2006, Studies on charging lithium-ion cells at low temperatures, *Journal of The Electrochemical Society*, 153 (6), A1081.
- Fly, A., Kirkpatrick, I. and Chen, R., 2021, Low temperature performance evaluation of electrochemical energy storage technologies, *Applied Thermal Engineering*, 189, 116750.
- Gage, M. and Helliker, P., 1995, Electric vehicle technology advances, *IEEE Vehicular Technology Society News*, 42 (1).
- Gärling, A. and Thøgersen, J., 2001, Marketing of electric vehicles, *Business Strategy and the Environment*, 10 (1), 53-65.
- Gaton, B., 2018, The ICE age is over: why battery cars will beat hybrids and fuel cells, *The Driven*.
- Ghadbeigi, L., Day, B., Lundgren, K. and Sparks, T. D., 2018, Cold temperature performance of phase change material based battery thermal management systems, *Energy Reports*, 4, 303-307.
- Gürbüz, H., 2021, Yerli elektrikli aracın elektrik sarfiyatını güneş ve rüzgâr enerjisi ile karşılama potansiyeli, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (25), 58-69.

- Han, D., Yu, W., Luo, K. and Cao, Z., 2019, Study on the process of oil recovery from oil sludge and tailing oil sands by blending extraction, *Petroleum Science and Technology*.
- Hanssen, T.-E. and Hasan, S., 2023, Electric vehicles: An assessment of consumer perceptions using importance-performance analysis, *Danish Journal of Transportation Research–Dansk Tidsskrift for Transportforskning*, 5.
- Hecht, C., Spreuer, K. G., Figgenger, J. and Sauer, D. U., 2022, Market review and technical properties of electric vehicles in germany, *Vehicles*, 4 (4), 903-916.
- Higuchi, Y., Kobayashi, H., Shan, Z., Kuwahara, M., Endo, Y. and Nakajima, Y. (2017). *Efficient heat pump system for PHEV/BEV* (0148-7191). Retrieved from
- Huang, C. K., Sakamoto, J., Wolfenstine, J. and Surampudi, S., 2000, The limits of low-temperature performance of Li-ion cells, *Journal of The Electrochemical Society*, 147 (8), 2893.
- İnce, A., 2024, *Yangın Yerindeki Tehlikeler* [Online], <http://abdurrahmanince.net/yyt.pdf> [Ziyaret Tarihi: 01.01.2024]
- Jamei, M., Guiras, H., Chtourou, Y., Kallel, A., Romero, E. and Georgopoulos, I., 2011, Water retention properties of perlite as a material with crushable soft particles, *Engineering Geology*, 122 (3-4), 261-271.
- Ji, Y. and Wang, C. Y., 2013, Heating strategies for Li-ion batteries operated from subzero temperatures, *Electrochimica Acta*, 107, 664-674.
- Jones, N., 2024, The new car batteries that could power the electric vehicle revolution, *Nature*, 626 (7998), 248-251.
- Kar, K. K., 2016, Composite materials: processing, applications, characterizations, *Springer*, Berlin, 5-9.
- Kılıç, D., 2023, *Dünyada ve Türkiye’de Feldispat* [Online], <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/Feldispat.pdf> [Ziyaret Tarihi: 06.05.2024]
- Kırbaş, İ., 2021, Improving the structural and physical properties of boric acid-doped rigid polyurethane materials, *Composites and Advanced Materials*, 30, 26349833211010819.
- Kumar, M. S. and Revankar, S. T., 2017, Development scheme and key technology of an electric vehicle: An overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1266-1285.
- Kuşdoğan, Ş., 2009, Elektrikli otomobillerde enerji depolama sistemlerindeki gelişmeler, *Engineer & the Machinery Magazine*, (596).
- Laipan, M., Xiang, L., Yu, J., Martin, B. R., Zhu, R., Zhu, J., He, H., Clearfield, A. and Sun, L., 2020, Layered intercalation compounds: Mechanisms, new

- methodologies, and advanced applications, *Progress in Materials Science*, 109, 100631.
- Lei, Z., Zhang, C.-n. and Li, J.-q. 2014. Research on the low performance of power lithium-ion battery in electric vehicle. Paper presented at the *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*.
- Lei, Z., Zhang, Y. and Lei, X., 2018, Improving temperature uniformity of a lithium-ion battery by intermittent heating method in cold climate, *International journal of heat and mass transfer*, 121, 275-281.
- Ling, Z., Wen, X., Zhang, Z., Fang, X. and Xu, T., 2016, Warming-up effects of phase change materials on lithium-ion batteries operated at low temperatures, *Energy Technology*, 4 (9), 1071-1076.
- Liu, F., Wang, J., Yang, N., Wang, F., Chen, Y., Lu, D., Liu, H., Du, Q., Ren, X. and Shi, M., 2022, Experimental study on the alleviation of thermal runaway propagation from an overcharged lithium-ion battery module using different thermal insulation layers, *Energy*, 257, 124768.
- Liu, Y., Zhao, X., Lu, D. and Li, X., 2023, Impact of policy incentives on the adoption of electric vehicle in China, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 176, 103801.
- Lyons, T., Chu, K.-C. and Smart, J., 2023, The Current State of Light-Duty Electric Vehicle Supply Equipment Costs: An Assessment of Contemporary Understanding, *Sustainability*, 15 (23), 16373.
- Ma, S., Jiang, M., Tao, P., Song, C., Wu, J., Wang, J., Deng, T. and Shang, W., 2018, Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review, *Progress in Natural Science: Materials International*, 28 (6), 653-666.
- Ma, S. and Webster, D. C., 2018, Degradable thermosets based on labile bonds or linkages: A review, *Progress in Polymer Science*, 76, 65-110.
- Magetto, G. 1998. Electric vehicle technology: a worldwide perspective. Paper presented at the *IEE Colloquium on Electric Vehicles-A Technology Roadmap for the Future (Digest No. 1998/262)*.
- Mohanty, A. K., Vivekanandhan, S., Tripathi, N., Roy, P., Snowdon, M. R., Drzal, L. T. and Misra, M., 2023, Sustainable composites for lightweight and flame retardant parts for electric vehicles to boost climate benefits: A perspective, *Composites Part C: Open Access*, 12, 100380.
- Moosavi-Zare, A. R., Zolfigol, M. A., Khaledian, O. and Khakyzadeh, V., 2014, Condensation of 2-naphthol with arylaldehydes using acetic acid functionalized ionic liquids as highly efficient and reusable catalysts, *Chinese Journal of Catalysis*, 35 (4), 573-578.

- Nagasubramanian, G., 2001, Electrical characteristics of 18650 Li-ion cells at low temperatures, *Journal of applied electrochemistry*, 31, 99-104.
- Ouyang, D., He, Y., Weng, J., Liu, J., Chen, M. and Wang, J., 2019, Influence of low temperature conditions on lithium-ion batteries and the application of an insulation material, *RSC advances*, 9 (16), 9053-9066.
- Özhan, H. O., 2017, Anyonik polimerin kaolin kilinin mühendislik özelliklerine etkileri.
- Öztürk, T., 2013, Asenkron motor ile sürülen elektrikli aracın modellenmesi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, Karabük.
- Patel, A. J., Mehta, C., Sharma, O. A., Sant, A. V. and Harish, V. (2022). Electric vehicle technology *Renewable Energy Integration with Building Energy Systems* (pp. 113-128): CRC Press.
- Pesaran, A., Santhanagopalan, S. and Kim, G. (2013). *Addressing the impact of temperature extremes on large format li-ion batteries for vehicle applications (presentation)*. Retrieved from
- Pesaran, A., Vlahinos, A. and Stuart, T. 2003. Cooling and preheating of batteries in hybrid electric vehicles. Paper presented at the *6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*.
- Petzl, M., Kasper, M. and Danzer, M. A., 2015, Lithium plating in a commercial lithium-ion battery—A low-temperature aging study, *Journal of Power Sources*, 275, 799-807.
- Piao, N., Gao, X., Yang, H., Guo, Z., Hu, G., Cheng, H.-M. and Li, F., 2022, Challenges and development of lithium-ion batteries for low temperature environments, *Etransportation*, 11, 100145.
- Ramoni, M. O. and Zhang, H.-C., 2013, End-of-life (EOL) issues and options for electric vehicle batteries, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15, 881-891.
- Requia, W. J., Mohamed, M., Higgins, C. D., Arain, A. and Ferguson, M., 2018, How clean are electric vehicles? Evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants, greenhouse gas emissions and human health, *Atmospheric Environment*, 185, 64-77.
- Richardson, D. B., 2013, Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 247-254.
- Sendek-Matysiak, E. 2020. The role and importance of electric cars in shaping a sustainable road transportation system. Paper presented at the *Research Methods and Solutions to Current Transport Problems: Proceedings of the International Scientific Conference Transport of the 21st Century*, 9–12th of June 2019, Ryn, Poland 15.

- Sezer, K., 2022. Mika takviyeli epoksi matrisli kompozitler üzerine uygulanan hidrofofik kaplamaların koruyucu performansının değerlendirilmesi. (Yüksek Lisans Tezi), *Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mersin, 5.
- Song, H. S., Jeong, J. B., Lee, B. H., Shin, D. H., Kim, B. H., Kim, T. H. and Heo, H. 2012. Experimental study on the effects of pre-heating a battery in a low-temperature environment. Paper presented at the *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*.
- Song, Z., Hofmann, H., Li, J., Hou, J., Zhang, X. and Ouyang, M., 2015, The optimization of a hybrid energy storage system at subzero temperatures: Energy management strategy design and battery heating requirement analysis, *Applied Energy*, 159, 576-588.
- Topçu, U. and Soyhan, H. S., 2022, Bor mineralini yangın geciktirici etkileri, *Uluslararası Yakıtlar Yanma Ve Yangın Dergisi*, 10 (1), 28-37.
- Ünlü, N., Karahan, Ş., Tür, O., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A., Turhan, L., Akgün, F. and Tırıs, M., 2003, Elektrikli araçlar, *TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü*, Gebze, 2, 75-82.
- Vidal, C., Gross, O., Gu, R., Kollmeyer, P. and Emadi, A., 2019, xEV Li-ion battery low-temperature effects, *IEEE transactions on vehicular technology*, 68 (5), 4560-4572.
- Vidil, T., Tournilhac, F., Musso, S., Robisson, A. and Leibler, L., 2016, Control of reactions and network structures of epoxy thermosets, *Progress in Polymer Science*, 62, 126-179.
- Waldmann, T., Kasper, M. and Wohlfahrt-Mehrens, M., 2015, Optimization of charging strategy by prevention of lithium deposition on anodes in high-energy lithium-ion batteries—electrochemical experiments, *Electrochimica Acta*, 178, 525-532.
- Wang, Y., Tian, J., Chen, Z. and Liu, X., 2019, Model based insulation fault diagnosis for lithium-ion battery pack in electric vehicles, *Measurement*, 131, 443-451.
- Wu, H., Zhang, X., Wang, C., Cao, R. and Yang, C., 2020, Experimental study on aerogel passive thermal control method for cylindrical lithium-ion batteries at low temperature, *Applied Thermal Engineering*, 169, 114946.
- Xiong, R., Sun, W., Yu, Q. and Sun, F., 2020, Research progress, challenges and prospects of fault diagnosis on battery system of electric vehicles, *Applied Energy*, 279, 115855.
- Xu, J., Wang, X., Yuan, N., Ding, J., Qin, S., Razal, J. M., Wang, X., Ge, S. and Gogotsi, Y., 2019, Extending the low temperature operational limit of Li-ion battery to− 80 C, *Energy Storage Materials*, 23, 383-389.
- Yang, K., Ling, Z., Fang, X. and Zhang, Z., 2023, Introducing a flexible insulation network to the expanded graphite-based composite phase change material to

- enhance dielectric and mechanical properties for battery thermal management, *Journal of Energy Storage*, 66, 107486.
- Yang, X.-G., Zhang, G. and Wang, C.-Y., 2016, Computational design and refinement of self-heating lithium ion batteries, *Journal of Power Sources*, 328, 203-211.
- Yu, Y., Jiang, J., Min, Z., Wang, P. and Shen, W., 2020, Research on energy management strategies of extended-range electric vehicles based on driving characteristics, *World Electric Vehicle Journal*, 11 (3), 54.
- Zhang, S., Xu, K. and Jow, T., 2002, A new approach toward improved low temperature performance of Li-ion battery, *Electrochemistry communications*, 4 (11), 928-932.
- Zhang, S., Xu, K. and Jow, T., 2003, The low temperature performance of Li-ion batteries, *Journal of Power Sources*, 115 (1), 137-140.
- Zhang, S., Xu, K. and Jow, T., 2006, Charge and discharge characteristics of a commercial LiCoO<sub>2</sub>-based 18650 Li-ion battery, *Journal of Power Sources*, 160 (2), 1403-1409.