



**ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA BATARYA HÜCRELERİ
ARASINDA FARKLI KÖPÜK MALZEME
KULLANIMININ BATARYA HÜCRESİ YÜZEY
SICAKLIĞINA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

Merve KARTIN BÜRÜMLÜ



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA BATARYA HÜCRELERİ ARASINDA FARKLI
KÖPÜK MALZEME KULLANIMININ BATARYA HÜCRESİ YÜZEY
SICAKLIĞINA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

Merve KARTIN BÜRÜMLÜ
502225052

Prof. Dr. Gökhan SEVİLGİN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA BATARYA HÜCRELERİ ARASINDA FARKLI KÖPÜK MALZEME KULLANIMININ BATARYA HÜCRESİ YÜZEY SICAKLIĞINA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Merve KARTIN BÜRÜMLÜ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Gökhan SEVİLGİN

Günümüzde çevre bilincinin artması, hükümet politikalarındaki değişiklikler, fosil yakıtlı araçların yakıt fiyatı ve bakım masraflarının artması, hızlı kentleşme ile artan mobilite ihtiyaçları ile elektrikli araçlara karşı talepler artmıştır. Elektrikli araçların fosil yakıtlı araçlara kıyasla dezavantajlı görünen menzil kısıtı ve ısı yangın probleminin aşılması için, bataryanın performansı üzerinde verimlilik çalışmaları yapılmaktadır. Batarya performansının ve verimliliğinin artırılması ve güvenli çalışması için, Batarya Isıl Yönetim Sistemi (BIMS) üzerinde yapılan eniyileme çalışmaları ile bataryanın uygun sıcaklık aralığında çalışması amaçlanmaktadır. Etkili BIMS yaklaşımlarından biri olan, batarya hücreleri arasına yerleştirilen ısıl özellikli malzemelerin kullanımı optimize edilmektedir. Bu tez çalışmasında, ticari olarak üretilen ısıl özellikli farklı silikon ve poliüretan bazlı termal köpük malzemeleri kullanılmıştır. Farklı kalınlıkta ve farklı kimyasal yapıda olan bu köpük malzemelere uygulanan farklı sıkıştırma kuvvetleri gibi temel parametreler ile, köpük malzemelerin hücreler arasındaki ısıl performansa ve elektriksel özelliklerine etkileri değerlendirilmiştir.

Çalışma, etkisini değerlendirmek için hücreler arasındaki termal köpük malzemelere uygulanan kuvvetin değiştirilmesine vurgu yapılmıştır. Daha sonra her iki termal köpük malzeme üzerinde karşılaştırmalı bir çalışma yapılarak hem farklı termal köpük malzemenin hem de kuvvetin hücreler üzerindeki ısıl performansı ve elektriksel özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu ısıl malzemelerin hücrelerin ısıl özelliklerinin değişip değişmediğinin etkisini anlamak için hücreler tekil olarak farklı sıcaklıklarda şarj-deşarj testlerine tabii tutulmuştur. Sonuçlarda, termal köpük malzemelere uygulanan sıkıştırma kuvvetinin artırılmasıyla, hücrelerin elektriksel özelliklerinin iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Silikon bazlı köpük, yüksek sıcaklık ortamında PU köpüğe göre ısıl ve elektriksel performans özelliklerinde daha kararlı değerler sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, kese tipi hücre, termal köpük
2025, xiv + 51 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF USING DIFFERENT FOAM MATERIALS BETWEEN BATTERY CELLS ON BATTERY SURFACE TEMPERATURE IN ELECTRIC VEHICLES

Merve KARTIN BÜRÜMLÜ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Gökhan SEVİLGİN

With growing environmental awareness, shifts in government policies, rising costs of fossil-fuel vehicles, and increasing mobility needs due to urbanization, the demand for electric vehicles (EVs) has surged. To address EV challenges such as range limitations and thermal fire risks, studies focus on improving battery performance and efficiency. Battery Thermal Management Systems (BTMS) are optimized to ensure batteries operate within safe temperature ranges.

This study investigates the effects of thermal foam materials, specifically silicone- and polyurethane-based foams, on thermal performance and electrical properties between battery cells. Various parameters, including foam thickness, chemical composition, and applied compression forces, were examined.

The study emphasizes altering the force applied to thermal foam materials between cells to evaluate its effect. Subsequently, a comparative study was conducted on both thermal foam materials to investigate the impact of both the different thermal foam materials and the applied force on the thermal performance and electrical properties of the cells. To understand whether these thermal materials influence the thermal properties of the cells, individual cells were subjected to charge-discharge tests at different temperatures. The results showed that increasing the compression force applied to the thermal foam materials improved the electrical properties of the cells. The silicone-based foam demonstrated more stable thermal and electrical performance characteristics in high-temperature environments compared to PU foam.

Key words: Electric vehicle, pouch cell, thermal foam
2025, xiv + 51 pages.

TEŞEKKÜR

Her şeyden önce tez sürecimde, beni her zaman destekleyen ve değerli katkılarını esirgemeyen, bana rehberlik eden danışman hocam Prof. Dr. Gökhan SEVİLGİN'e teşekkürlerimi sunarım. Tüm çalışmalarımı finansal olarak destekleyen TÜBİTAK 1004 Mükemmeliyet Merkezi Destek Programı kapsamında desteklenen 22AG001 numaralı Elektrikli Taşıtlar İçin Batarya Teknolojileri Araştırma ve Geliştirme Platformu'na (BATEG) teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmada kullanılan batarya hücrelerini sağlayan, benim de profesyonel hayatımı sürdürdüğüm Siro Silk Road Temiz Enerji Depolama Teknolojileri San. ve Tic. A.Ş.'ye ve yöneticim Doç. Dr. Halil Sadettin HAMUT'a teşekkür ederim.

Laboratuvardaki tez çalışmalarım süresince fiziksel ve manevi desteğini her zaman gördüğüm değerli Ar. Gör. Berkay TAHİRAĞAOĞLU'na teşekkür ederim.

Aynı zamanda tezimin ilerlemesi konusunda bilgi ve deneyimlerini paylaşan değerli arkadaşım Serhat Soyer'e teşekkürlerimi sunarım.

Benim bugünlere gelmemde büyük emekleri olan, sevgili anneme, babama ve ağabeyime en içten teşekkürlerimi sunarım. Hayatım boyunca yanımda olarak bana güç verdikleri, her anımda sevgilerini ve desteklerini hissettirdikleri için aileme ve değerli eşime teşekkür ederim.

Merve KARTIN BÜRÜMLÜ
24/01/2025

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
TEŞEKKÜR.....	x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Lityum İyon Bataryalar	4
2.1.1. Lityumun kullanım amacı	4
2.1.2. Lityum-iyon batarya çalışma prensibi.....	5
2.1.3. Lityum-iyon batarya tipleri	7
2.1.4. Temel batarya parametreleri	9
2.2. Lityum-İyon Batarya Üretim Yöntemi.....	11
2.2.1. Batarya hücresinden modül üretimi	12
2.2.2. Modülden batarya paketi üretimi	15
2.3. Li-İyon Bataryalarda Isıl Yönetim Sistemi	17
2.4. Termal Malzemeler	20
2.4.1. Termal malzemeler nedir?.....	20
2.4.2. Termal malzeme tipleri	21
2.4.3. Termal arayüz malzemesi seçimi	24
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	26
3.1. Deney	27
3.2. Deney Kurulumu.....	27
3.3. Deneyin Gerçekleştirilmesi.....	33
3.4. Deney Prosedürü	35
3.4.1. Deney şartları	35
3.4.2. Deney adımları	36
4. BULGULAR.....	38
4.1. PU Köpük Malzeme Deney Sonuçları	38
4.1.1. 1,5 kN sıkıştırma kuvveti altında	40
4.1.2. 3 kN sıkıştırma kuvveti altında	41
4.2. Silikon Köpük Malzeme Deney Sonuçları.....	42
4.2.1. 1,5 kN sıkıştırma kuvveti altında	44
4.2.2. 3 kN sıkıştırma kuvveti altında	45
4.3. Köpük Malzemelerin Karşılaştırması	46
4.4. Tekil Hücre Sonuçları ve Karşılaştırması	47
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	49
KAYNAKLAR	50
ÖZGEÇMİŞ	51

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

<i>A</i>	Akım [Amper]
<i>Ccell</i>	Hücrenin kapasitesi [Ah]
<i>C</i>	Charge
<i>g</i>	Gram [mm]
<i>k</i>	Isıl iletkenlik [W/m.K]
<i>P</i>	Güç
<i>T</i>	Yerel sıcaklık [°C]
<i>V</i>	Gerilim

Kısaltmalar

Açıklama

BEV	Battery Electric Vehicle (Bataryalı Elektrikli Araç)
BIYS	Batarya Isıl Yönetim Sistemi
BYS	Batarya Yönetim Sistemi
CSC	Cell Supervisory Circuit (Hücre Gözetim Devresi)
DC	Direct Current (Doğru Akım)
EV	Electric Vehicle (Elektrikli Araç)
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Hibrit Elektrikli Araç)
HV	High Voltage (Yüksek Gerilim)
LCO	Lityum Kobalt Oksit
LFP	Lityum Demir Fosfat
LMO	Lityum Manganez Oksit
LTO	Lityum Titanat Oksit
LV	Low Voltage (Düşük Gerilim)
NMC	Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit
OCV	Open Circuit Voltage (Açık Devre Gerilimi)
PCB	Printed Circuit Board (Baskılı Devre Kartı)
SOC	State of Charge (Şarj Doluluk Oranı)
SOH	State of Health (Batarya Sağlık Durumu)
SOL	State of Life (Batarya Ömrü)
TCA	Thermal Conductive Adhesives (Termal Yapıştırıcılar)
TIM	Thermal Interface Material (Termal Arayüz Malzemesi)
PCM	Phase Change Material (Faz Değiştiren Malzeme)
PU	Poliüretan

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Lityum-iyon batarya hücresinin çalışma prensibi	6
Şekil 2.2.	Elektrikli araçlarda kullanılan farklı tipte batarya hücreleri	8
Şekil 2.3.	Batarya hücresi üzerine yapıştırıcı uygulaması	14
Şekil 2.4.	Batarya paketi-modül yerleştirme uygulaması	15
Şekil 2.5.	0,5 C’de deşarj edildikten sonraki li-ion batarya hücresinin sıcaklık dağılımı	20
Şekil 3.1.	Modül ve modül içinde yer alan hücre-köpük grubu	25
Şekil 3.2.	Test düzeneğinin şematik gösterimi	27
Şekil 3.3.	Hücre ve hücrenin yerleştirildiği alüminyum hücre kasetinin montajı	28
Şekil 3.4.	Hücre ve hücre kaseti ikilisinin üzerine yerleştirilen köpük malzeme	29
Şekil 3.5.	Isıl çiftlerin batarya üzerindeki yerleşimi	30
Şekil 3.6.	Hücre sıkıştırma makinesi	31
Şekil 3.7.	Batarya hücrelerinin birleştirilmiş hali	33
Şekil 3.8.	İklimlendirme kabindeki mini modül yerleşimi	34
Şekil 4.1	1,5 kN ve 3 kN sıkıştırma kuvvetlerindeki zamana bağlı gerilim değişimini	39
Şekil 4.2.	10 °C ortam koşullarında 2 C oranındaki deşarj akımında hücre sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi	40
Şekil 4.3.	10 °C ortam koşullarında 2 C oranındaki deşarj akımında mini modüldeki zamana bağlı gerilim değişimi	41
Şekil 4.4.	10 °C ortam koşullarında 2 C oranındaki deşarj akımında hücre sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi	41
Şekil 4.5.	10 °C ortam koşullarında 2 C oranındaki deşarj akımında mini modüldeki zamana bağlı gerilim değişimi	42
Şekil 4.6	1,5 kN ve 3 kN sıkıştırma kuvvetlerindeki zamana bağlı gerilim değişimi	43
Şekil 4.7.	20 °C ortam koşullarında 1,8 C oranındaki şarj akımında C hücresinin sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi	44
Şekil 4.8.	20 °C ortam koşullarında 1,8 C oranındaki şarj akımında mini modüldeki zamana bağlı gerilim değişimi	45
Şekil 4.9.	20 °C ortam koşullarında 1,8 C oranındaki şarj akımında C hücresinin sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi	45
Şekil 4.10.	20 °C ortam koşullarında 1,8 C oranındaki şarj akımında mini modüldeki zamana bağlı gerilim değişimi	46
Şekil 4.11	20 °C dış ortam sıcaklığında mini modül ve tekil hücre gerilim değişiminin karşılaştırılması	47
Şekil 4.12	10 °C dış ortam sıcaklığında mini modül ve tekil hücre gerilim değişiminin karşılaştırılması	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Batarya hücresi özellikleri	28
Çizelge 3.2. Termal köpük malzeme özellikleri	30
Çizelge 3.3. Hücre ve üzerindeki ısıtıcı çiftlerin ve voltaj sensörünün gösterimi	32
Çizelge 3.4. Deney parametreleri	35

1. GİRİŞ

19. yüzyıldan itibaren fosil yakıt kullanımının artması, iklim değişikliğinin ana sebebi olmaya başlamıştır. İklim değişikliği, uzun yıllar boyunca yaşanan sıcaklık ve hava koşullarındaki değişiklik olarak tanımlansa da, iklim değişikliğinin ana sebebi doğal koşullardan insan faaliyetlerine doğru kaymıştır. Doğal gaz, kömür ve petrol gibi fosil yakıtlardan üretilen sera gazları, dünyanın dış tabakasını kaplayarak güneş ışınlarının atmosferimizde kalmasına sebep olur. Bu olay da dünya genelinde sıcaklıkların artmasına dolayısıyla iklim değişikliğine yol açar. Bu sera gazlarından insan kaynaklı olanları büyük oranda karbondioksit ve metan gazıdır. Ve bu gazlar, karayolu araçlarındaki içten yanmalı motorların kullanımı, kömürün kullanıldığı işlemler olarak belirtilebilir.

Tüm bu nedenlerle birlikte, elektrikli araçların (EV'ler) kullanımı büyük oranda artmıştır. Bunun sebepleri arasında teknolojiadaki gelişmeler, batarya maliyetlerinin ve ağırlıklarının giderek azalması, yeni şarj altyapılarının oluşturulması ve iklim değişikliğine farkındalık seviyesinin artması gösterilebilir.

Elektrikli araçlar, doğrudan elektrik motorlarına enerji sağlayan şarj edilebilir bir batarya ile hareket eden bir yapıdadır. Bu bataryalar günümüzde iki tür elektrikli araç için kullanılabilir. Bataryalı elektrikli araçlar (BEV) ve hibrit elektrikli araçlar (HEV). Günümüz teknolojisinde, bataryalar için lityum-iyon batarya türü yaygındır. Bu bataryalar, elektrik motorlarının istediği yüksek enerji yoğunluğu ihtiyacını karşılamak için geliştirilmektedir. Bu bataryaların olumsuz bir yönü, benzin veya dizel yakıtla karşılaştırıldığında, aynı enerji seviyelerine ulaşmak için daha fazla batarya ağırlığına sebep olmasıdır. Yüksek ağırlık ile tasarlansalar dahi, aynı menzile ulaşmaları zordur.

Lityum-iyon bataryalar arasında, NMC (Nikel-Manganez-Kobalt) katod içeriği bulunan tür, elektrikli araçlarda en çok tercih edilen türdür. Bunun sebebi, şarj-deşarj ömrünün uzun olabilmesi ve güvenli sürüş sağlayabilmesidir. Bataryadan talep edilen, elektriksel özellikler, yanmaya karşı güvenli olması ve şarj-deşarj döngü ömürlerinin uzun olması gibi istekleri sağlamaları için NMC dışında batarya türleri de geliştirilmektedir. Bunlar,

Lityum Demir Fosfat (LFP), Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA) ve Lityum Titanat Oksit (LTO) gibidir. Bu yüksek lisans tezinde ise Lityum NMC bataryalarının belirli bir türünün ısı ve elektriksel davranışı incelenecektir.

Lityum-iyon bataryalar, çeşitli uygulama alanlarına ve müşteri özel isteklerine göre birçok farklı tasarım ile önümüze çıkmaktadır. Bu uygulamalar, elektrikli araçlar için hücrelerin seri ve/veya paralel olarak bağlanması ile hücrelerin önce modüllere, modüllerin batarya paketinine dönüştürüldüğü tasarımlar olarak karşımıza çıkabilir. Özellikle yaygın olarak kullanılan bu tasarıma ilişkin uygulama ve montaj adımları tezdeki Bölüm 2.2. 'de detaylıca ele alınmıştır. Bazı uygulamalarda ise hücrelerin doğrudan batarya paketini oluşturduğu yapılar da görülmektedir.

Elektrikli araç batarya paketleri, yine müşteri isteklerine ve uygulama alanlarına göre mekanik, ısı ve elektriksel özellikleri sağlayan, uzun ömürlü, arıza ve kaza durumlarındaki güvenlik standartlarını ve regülasyonlarını karşılayan tasarım metriklerini içerir. Bu tasarım metrikleri, batarya taşıyıcısı, batarya koruyucu kapağı, modüller, elektriksel kablolar, akım taşıyan baralar, ısı yönetim sistemi ve bağlantılar için ısı malzemeler, etkin bir batarya yönetim sistemi (BYS) ve buna bağlı batarya ısı yönetim sistemi (BIMS) bileşenleri gibi ana bileşenler üzerinde şekillenir. BIMS' nin etkin bir şekilde çalışması, bataryanın ideal çalışma sıcaklığı aralığında tutulması açısından önemlidir. Elektrikli araçlardaki BIMS çözümleri genellikle hava soğutmalı, sıvı soğutmalı ve faz değiştiren malzemeler ile sağlanmaktadır (C. Bibin vd., 2020).

Bu tez çalışmasında soğutma sistemlerinden kısaca bahsedilmiştir. Daha çok ideal bir batarya ısı yönetim sisteminde kullanılan ısı malzemeler ve detaylarına Bölüm 2.4. 'de yer verilmiştir.

Bu tez çalışması, termal malzemelerinin batarya hücrelerinin ısı özellikleri ve ısı performansı üzerindeki etkisini ve ısı verimliliğini artırmak için gereken parametre değişikliklerini gözlemlemektedir. Aynı zamanda batarya hücresinden modül montajındaki birleştirme prosesinde, hücre ve hücreler arasına yerleştirilen termal

malzeme üzerine uygulanacak kuvvet parametresinin değiştirilmesine yönelik zorlukları ele almaktadır.

Hücreler arasında farklı kalınlıklarda poliüretan ve silikon bazlı termal malzemeler kullanılması ile, bu malzemelerin farklı yük altında hücreler ile birlikte sıkıştırılarak farklı sıcaklık parametrelerinde, hücrelerin şarj-deşarj döngülerinde test edilmesi ile termal malzemelerin sıcaklık etkisi araştırılmıştır. Yapılan şarj-deşarj testleri esnasında batarya soğutma sistemi uygulanmamıştır. Batarya hücreleri üzerindeki sıcaklık değişimleri izlenmiştir.

Tüm bu özellikler göz önüne alındığında, elektrikli araç bataryalarında seçilecek olan termal malzemelerin teknolojisinde, uygulama alanında araştırmalar yapılmasını ortaya koyar. Günümüzde ısıyı daha etkili bir şekilde dağıtmak için artırılmış ısıl iletkenlik, daha uzun sürüş menzilleri için geliştirilmiş enerji yoğunluğu ve biyolojik esaslı veya geri dönüştürülmüş malzemeler kullanılarak çevre dostu çözümlerin geliştirilmesinin önünü açılmıştır. Bu yenilikler, elektrikli araç bataryalarının genel performansı ve sürdürülebilirliği noktasında büyük önem taşır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Lityum İyon Bataryalar

2.1.1. Lityumun kullanım amacı

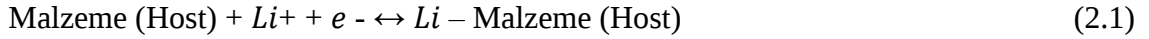
Lityum en hafif metaldir ve düşük elektrokimyasal potansiyele sahiptir, bu da onu oldukça reaktif hale getirir. Lityum yarıçapının küçük olması, özellikle katı veya sıvı elektrolitlerde yerleştirilen malzemelere kolay entegre olmasını sağlar. Böylelikle yüksek enerji ve güç yoğunluklarına sahip elektrokimyasal hücrelerde kullanım için uygun hale gelir ve hücrelerin enerji depolama kapasitesini artırır. Lityum bataryalar, 2,5 V ila 4,5 V arasında değişen bir hücre potansiyeline sahip şarj edilebilir batarya türüdür.

Lityum bataryalar, kimyasal özellikleri, performansı ve güvenlik özellikleri açısından büyük farklılıklar gösterir ve özel gereksinimler için optimize edilebilir. Bu ailenin bir parçası olan lityum-iyon bataryalar, taşınabilir elektronik cihazlarda ve tamamen elektrikli sürüş menziline sahip elektrikli araçlarda kullanılan en yaygın şarj edilebilir bataryalardır. Elektrotlar ve elektrolitler için farklı malzemeler kullanılarak, lityum bazlı hücreler kapasite, hız, yüksek enerji ve güç yoğunluğu dahil olmak üzere belirli uygulamalar için özelleştirilebilir. Bu hücreler genellikle hafiftir ve yüksek açık devre voltajına sahiptir, bu da enerji yoğunluğu üzerinde olumlu bir etki yaratır. Geniş bir şarj aralığı çevrimine sahiptir, ve yine geniş bir aralıkta sabit hücre voltajına izin verir. Hızlı şarj mümkündür ve raf ömrü kabul edilebilir düzeydedir.

Çoğu lityum batarya tasarımında sıcaklık kontrolünün sürdürülmesi kritik öneme sahiptir. Bunun başlıca sebebi, elektrolitin kararsızlığının hücrenin kapasite kaybına veya termal kaçak gibi yan etkilere neden olmasıdır. Ayrıca, hücrenin aşırı şarj edilmesi de benzer olumsuz etkilere yol açabilir. Bu riskleri minimize etmek için, lityum pillerde sıcaklık, akım ve voltaj seviyelerini düzenleyen ve devreyi koruyan bir yönetim sistemi bulunmalıdır. Bu sistem, olumsuz bir durum geliştiğinde pili devre dışı bırakacaktır.

Düşük sıcaklıklarda (hatta bazı durumlarda 10 °C'de), lityum bataryaların şarj edilmesi iç direncin artmasına bağlı olarak yukarıda bahsedilen yan reaksiyonlara ve hızlı bozulmalara yol açabilir.

Lityum pil tasarımında, iki elektrot, lityum iyonlarının yerleştirilmesini ve çıkarılmasını sağlayan malzemeler ile aşağıdaki işlem ile ifade edilebilir:



Farklı lityum batarya türlerinde kullanılan ana yapı ve malzemeler değişkenlik göstermektedir. Denklemdaki kombinasyonlar hibrit elektrikli araçlar için ve tamamen elektrikli araçlar için daha uygun hale getirilebilir.

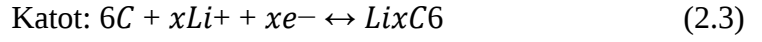
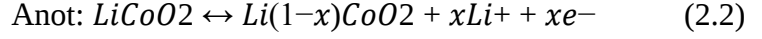
Lityum bataryalarda yüksek hücre voltajı nedeniyle, su bazlı elektrolitler kullanılamaz; bu yüzden su içermeyen elektrolitler tercih edilir. Bu elektrolitler, çözünmüş lityum tuzu içeren sıvı, katı polimer veya jel şeklinde olabilir. En yaygın lityum pil tipleri, lityum metal, lityum-iyon ve lityum-iyon polimer pil türleridir. Ayrıca, son dönemde lityum-oksijen ve lityum-sülfür pilleri gibi diğer lityum bazlı pil konseptlerine olan ilgi artmıştır.

2.1.2. Lityum-iyon batarya çalışma prensibi

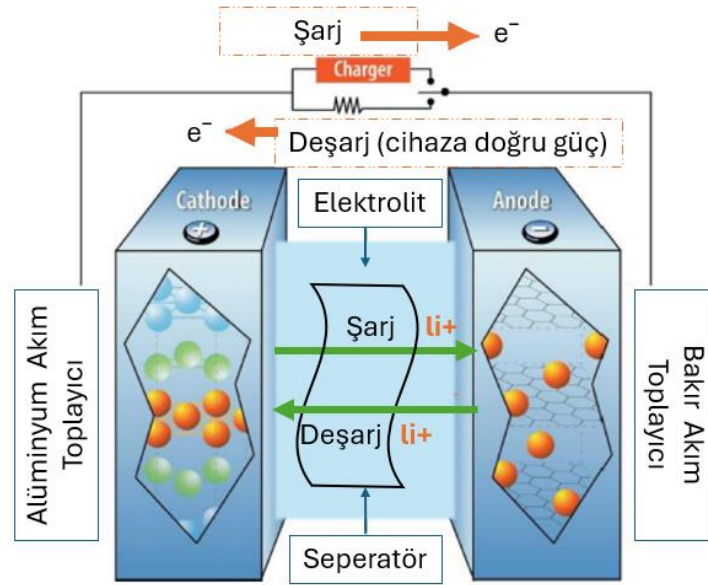
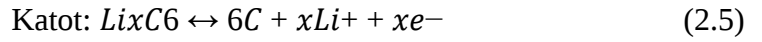
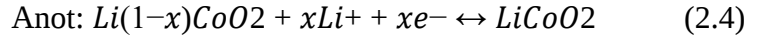
Lityum-iyon pillerin çalışma prensibi elektro-kimyasal temeline dayanır. Bir batarya hücresi, bir katot, bir anot, bir ayırıcı (seperatör), bir elektrolit, bir pozitif akım toplayıcı elektrot ve bir negatif akım toplayıcı elektrottan oluşur. Elektrolit, şarj esnasında yüklü lityum iyonlarını katottan anoda ve deşarj esnasında ise anottan katota geri taşır; burada depolanırlar. Bu hareket ile elektronlar serbestlik kazanır ve pozitif akım toplayıcısında bir yük indükleyerek bir elektrik akımının gücünü sağlayan cihazdan geçip negatif akım toplayıcısına geri akmasına neden olur. Ayırıcı(seperatör), pillerin içinde elektronların akışını engeller. Lityum-iyon pilleri, elektrotlar, katotlar, anotlar ve elektrolitler için kullanılan malzemelerdeki farklı kombinasyonlar ile çeşitli türlere ayrılır.

Şarj ve deşarj süreçleri sırasında meydana gelen reaksiyon denklemleri şu şekildedir:

Şarj esnasında,



Deşarj esnasında,



Şekil 2.1. Lityum-iyon batarya hücresinin çalışma prensibi (Liu vd., 2016)

Batarya hücreleri çeşitli geometrik tasarımlara sahip olabilir, ancak elektrikli araç içi uygulamalarında en yaygın olanları prizmatik ve silindirik hücrelerdir; her birinin kendine özgü avantajları vardır. Silindirik hücreler üretim açısından daha üretilebilir olup, seri imalatı daha ucuz bir şekilde üretilirler. Öte yandan, bu tezde incelenen kese tipi hücreler, diğer tasarımlara göre daha kullanışlı ve çok yönlülük sunar. Kese tipi hücreler, dikdörtgen şekildedir ve sıkıştırılarak montaj yapılır. Yassı tarafında daha büyük ısı direnci sahip ısı transferi gösterir (H. Liu vd., 2017).

2.1.3. Lityum-iyon batarya tipleri

Elektrikli araç bataryalarında üç farklı hücre tipi kullanıldığı görülür. Bunların dışında coin (düğme) hücre tipi, adından da anlaşılacağı üzere bozuk para büyüklüğünde olup, daha büyük yapıda hücrelerin kimya geliştirme aşamalarında labarotuvan şartlarında küçük ve basit şekilde primer hücre olarak üretilerek, kimyasal erken testlerinde kullanılır. Bu nedenle daha büyük format hücreye geçmeden önce bir çok hücre üretmek ve elektriksel olarak test etmek mümkündür. Aynı zamanda, işitme cihazları, kart okuyucuları, pilli elektronik saatler, hesap makinelerinde sıklıkla tercih edildiği için, seri üretimi yapılmaktadır (Linden & Reddy, 2002).

Hücreler geometrik formlarına göre sınıflanırlar:

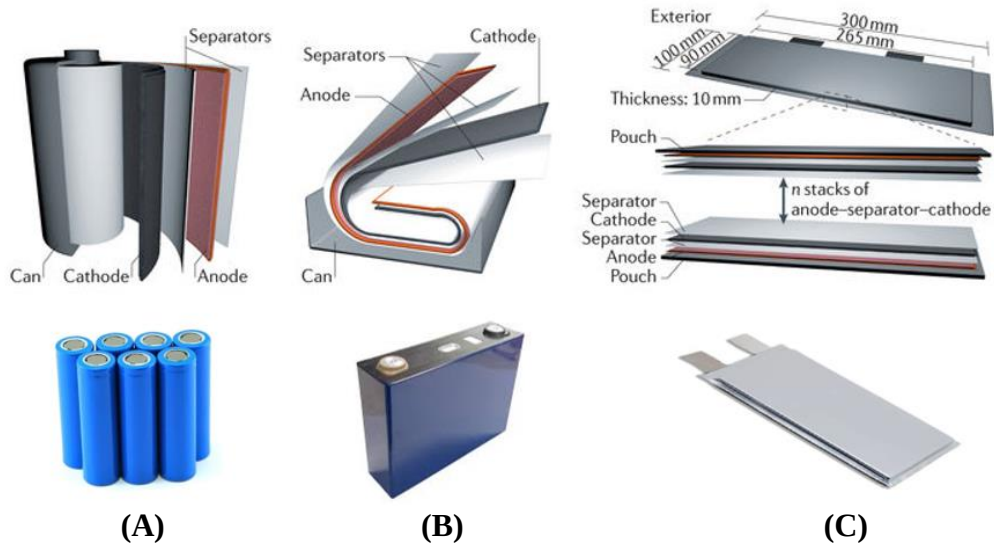
- Düğme/küçük daire (coin) hücre,
- Silindirik hücre,
- Kase hücre,
- Prizmatik hücre.

Tesla kendi geliştirdiği ve ürettiği silindirik hücreleri kullanmaktadır. Hücre katmanları bir spiral şeklinde sarılır ve genellikle bu hücrelerin alt kısmı negatif terminal, üst kısmı ise pozitif terminal olarak tasarlanır. Fakat, büyük formattaki silindirik hücrelerin + ve – terminalleri üst yüzeyde olacak şekilde tasarlanır. Silindirik hücreler, dünya genelinde üretim kapasitesi en fazla olan tiptir. Bu nedenle diğerlerine göre uygulayıcılar ve kullanıcılar tarafından en çok bilinen hücre tipidir. Silindirik hücrelerin olumsuzlukları arasında kapasite düşüklüğü ve formları nedeniyle yan yana dizildiklerinde aralarında kalan boşluklar nedeniyle fazla yer kaplamalarıdır. Öte yandan, aralarındaki boşluklar, diğer tiplere göre soğutma üstünlüğü sağlar.

Prizmatik hücreler çoğunlukla BMW tarafından kullanılırken, diğer elektrikli araç üreticileri çoğunlukla kase hücreleri kullanmayı tercih etmiştir. Kase hücreleri, dikdörtgen geometrik şekilleri ve esnek alüminyum ince duvarları ile daha iyi bir yerleşim olanağı sunar. Bu tip hücreler en çok elektrikli araç bataryası uygulamasında görülmektedir. Buradaki uygulamalar genellikle kase tipi hücrelerin yanyana dizilerek

sıkıştırılması ve araç ile uyumlu geometrik yerleşim kolaylıkla sağlanmaktadır. Kese tipi hücreleri mekanik olarak desteklenmesi gerektiği için yanyana dizilerek modül tasarlanır. Modül gerekli basıncı koruyarak, elektriksel bağlantıları destekler ve hücrelerin kontrollü bir şekilde hava alıp boşaltmasını sağlar. Kese tipi hücreler aynı zamanda boyutları nedeniyle; silindirik hücrelerden çok daha fazla enerji kapasitesine sahiptir. Bununla birlikte, hücreler arasında hiç boşluk kalmayacak şekilde hatta sıkıştırılarak montajlanması sebebiyle, ısınma sorunu ile karşılaşmaktadır. Tek tek her hücrenin sıcaklığını yönetmek, diğer tiplere göre daha karmaşık bir durumdur. Kese hücrelerin adından da anlaşılacağı üzere, hücre dış duvarları oldukça incedir. Bu da onların ısınma ile birlikte şişkinlik yapma eğilimini artırır.

Prizmatik hücreler de, kese hücrelerine benzer bir geometridedirler. Prizmatik bir hücrede elektrotlar, bir biri üzerinden katlanarak paketlenirken, kese hücre de plaka şeklinde düz bir konumda Şekil 2.2'deki gibi paketlenirler. Buna ek olarak, prizmatik hücrelerin dış haznesi kese hücrelere göre daha sert bir malzeme ile kaplandığı için, hücre içinde ısınma kaynaklı genişleme/şişme önlenir. Bu kalın duvarların dezavantajı ise kese tipi hücrelerden daha düşük bir enerji kapasitesine neden olmasıdır (Batmaz, 2023).



Şekil 2.2. Elektrikli araçlarda kullanılan farklı tipte batarya hücreleri. A) silindirik, B) prizmatik, C) kese (pouch) (M. Park vd., 2017)

2.1.4. Temel batarya parametreleri

Elektrikli araçların batarya kimyasal yapı ve özelliklerinden bahsetmeden önce, bu çalışmada kullanılacak olan bataryaların teknik özellikleri ile ilgili parametrelere değinilecektir. Batarya kimyasal yapılarının üstün ve zayıf olan yönlerini anlamak için gerekli olan parametreleri kapsamaktadır (Young vd., 2013; Ogura & Kolhe, 2017; Dikmen vd., 2018).

- **Nominal gerilim (V)**

En temel ifade ile batarya üzerindeki referans voltaj değeridir. Bataryanın normal çalışma gerilimidir (Young vd., 2013).

- **Özgül enerji (Wh kg^{-1})**

Gravimetrik enerji yoğunluğu olarak da bilinen özgül enerji, bir pilin birim kütle başına ne kadar enerji depolayabileceğini tanımlar. Ayrıca elektrikli bir aracın belirli bir menzil için gerekli olan batarya ağırlığını belirlemek için de kullanılır (Ogura & Kolhe, 2017).

- **Özgül güç (W kg^{-1})**

Bir pilin gravimetrik güç yoğunluğu olarak da adlandırılan özgül güç, birim kütle başına hesaplanan toplam güçtür (Young vd., 2013).

- **Hacimsel enerji yoğunluğu (Wh L^{-1})**

Birim hacim başına hesaplanan nominal batarya enerjisidir. Ayrıca elektrikli bir aracın belirli bir menzil için gerekli olan batarya boyutunu belirlemek için kullanılan parametrelerden biridir (Dikmen vd., 2018).

- **Kullanılabilir güç (P)**

Batarya nominal gerilimi (V) ve karşılayabileceği maksimum akım değerinin (I) çarpılması ile elde edilir.

- **Depolanan enerji (kWh)**

Bu parametre, belirli koşullar altında pilden çıkarılabilecek maksimum enerji miktarını ifade eder. Bataryanın enerjisi Amper saat (Ah) cinsinden kapasitesi veya watt saat (kWh) olarak ifade edilebilir ancak ikincisi elektrikli araç bataryaları için daha yaygın olarak kullanılır. Elektrikli araçların, batarya kapasitesinin/enerjisinin kritik bir rolü olduğu düşünüldüğünde, araştırmacıların ve üreticilerin temel amacı mümkün olan en kısa sürede daha fazla enerji miktarının depolanmasını sağlayan tasarım ve yeni teknolojiler üzerinde çalışma gerekliliği olacaktır.

- **Bataryanın şarj durumu (SOC)**

Şarj durumunun tanımı, bataryanın kalan şarjının toplam şarja olan oranıdır. SoC yüzde olarak ifade edilir ve bu değerin batarya için %100 olması tamamen şarj edildiği, %0 olması tamamen boşaltılmış olduğu anlamına gelmektedir. SoC kritiktir bir büyüklük olmasına karşın, mevcut tümleşik hesaplama teknolojileri göz önüne alındığında kesin olarak ölçülemez.

- **Bataryanın sağlık durumu (SOH)**

SoH, bir bataryanın, nominal kapasitesindeki kayıp değeridir ve bataryanın fiziksel durumunu ifade eder. SoH'nın genel bir tanımı da, bir bataryanın sağlık durumunu ve yeni bir batarya ile karşılaştırıldığında belirli bir başarıyı sağlama yeteneğini ne kadar yansıttığıdır. EV uygulamalarındaki SoH, belirli bir mesafeyi sürdürebilme özelliğini göstermek için kullanılır. Araştırmacılar ve üreticiler, bataryanın sağlık durumu eşiği olarak nominal kapasite yüzdesini kullanır. Şarj-deşarj döngüsünden dolayı azalan

kapasitenin, nominal kapasitesinin %80'ine düşmesi, bataryanın sağlıklı olmadığını gösterir.

- **Bataryanın ömrü (SOL)**

Bataryanın ömrü, ayrıca bir bataryanın kalan faydalı ömrü (Remaning Useful Life) olarak da bilinir. Doğru SoL tahminleri ile, bataryaların kullanım ömrünü uzatmak için gerekli arıza önlemlerinin alınması sağlanmakta ve bakımlarının yapılması için kullanıcılar uyarılmaktadır. Batarya güvenilirliği konusunda artan kullanıcı ve üretici talepleri ile, doğru SoL tahminleri için en gelişmiş tahmin algoritmaların kullanımı çalışmaları artmıştır.

- **Bataryanın çevrim ömrü (cycle life)**

Bataryanın belli bir deşarj derinliği seviyesine kadar deşarj ve sonra tam şarj edilmesine bir “çevrim” denir. Bataryanın çevrim ömrü kullanım süresini yani ekonomik ömrünü belirleyen bir parametredir. Diğer bir deyişle, akünün ömrünü belirlemede esas önemli olan unsur doldur-boşalt sayısıdır (Ogura & Kolhe, 2017).

- **Batarya c-oranı**

C oranı, bir bataryanın tam olarak şarj veya deşarj olma hızını ölçmek için kullanılan parametredir. Örneğin, 1 C'lik bir C oranında şarj etmek, pilin bir saatte %0-100 oranında şarj olduğu anlamına gelir. 1 C'den daha yüksek bir C oranı daha hızlı bir şarj anlamına gelir; örneğin, 3 C oranı üç kat daha hızlıdır, yani 20 dakikada tam şarj olur. Benzer şekilde, daha düşük bir C oranı daha yavaş bir şarj anlamına gelir (Tahirağaoğlu vd., 2024).

2.2. Lityum-Iyon Batarya Üretim Yöntemi

Bu tezin bu bölümünde konu olan lityum iyon kese tipi hücrelerin üretim ve montaj aşamaları ele alınmıştır. Lityum iyon bataryaların üretim süreci, kese tipi hücrelerin

üretim standartlarına ve müşteri özel isteklerine göre kalite kontrollerinin, kritik geometrik ölçümlerinin, elektriksel ölçümlerin yapılması ile başlar. Bu süreçte, öncelikle hücrenin güvenliğinin sağlanması için üretimde dikkat edilmesi gereken belirli noktalar bulunmaktadır. Özellikle, hücre kontrollerinde uygun ölçüm ekipmanlarının kullanımı, izolasyonun sağlanması, ve tüm süreçleri yüksek gerilim bulunan alanda çalışabilir izni alan operatörler tarafından yapılması gerekir. Montajda kullanılan malzemelerin ısı ve mekanik dayanıklılığı öncelikli kriterler arasındadır. Bu süreçte, üretilen hücreler dikkatle birleştirilerek modül komponentini oluşturur. Bu esnada, hücreler arası izolasyonun doğru bir şekilde yapılması, termal kaçak, termal sürüklenme risklerini minimize etmek büyük önem taşır. Daha sonra, modüller uygun elektriksel bağlantılar ve mekanik yapılar kullanılarak bir araya getirilerek finalde batarya paketini meydana getirir. Batarya paketi montajında ise oluşabilecek kısa devre akımlarını önlemek için, akım taşıyan bağlantıların yalıtılması gerekir. Tüm bu süreçlerde global güvenlik standartlarının ve kalite kontrollerin uygulanması, hem batarya paketinin elektriksel ve mekanik performansını artırır, hem de uzun ömürlü kullanım güvenliği sağlamaktadır.

2.2.1. Batarya hücresinden modül üretimi

- **Hücre kalite kontrol**

Hücresinin fiziksel ve kimyasal durumu kontrol edilerek modül oluşumundan önce uygun olmayan hücrelerin ayıklandığı proses adıdır. Bu adımda, fiziksel olarak hücrede operatör ve/veya kamera tarafından görsel kontrolleri, sensör ve/veya kamera tarafından geometrik ölçü ve tolerans kontrolleri, yük hücresi ve/veya loadcell ile hücrenin ağırlık kontrolleri yapılır.

Kimyasal ölçümlerde ise, test cihazı ile açık devre gerilimi (OCV) ölçülerek, müşteri tarafından bildirilen değerler ile kıyaslanır. Anlık şarj durumu bilgisine göre açık devre gerilim değerinde düşüş görülmesi bataryanın yaşlanmakta olduğunu gösterir (Atlas C. 2022).

- **Hücre ve hücre kaseti montajı**

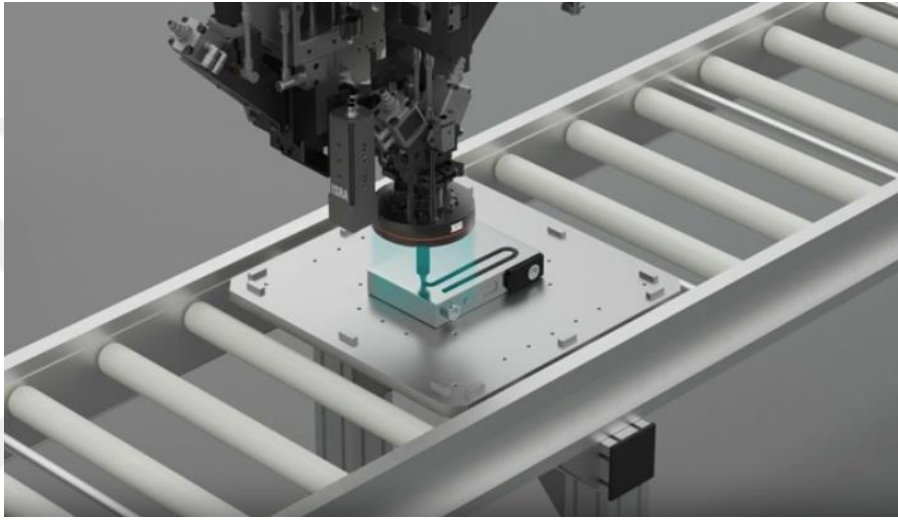
Kontrol edilen hücreler ile hücrenin yerleştirileceği kaset termal yapıştırıcı vasıtasıyla birleştirilir. Bu aşamada her iki malzemenin görsel kontrolleri yapılmalıdır. Hücre yüzeyinde çizik, deformasyon, darbe olup olmadığı, hücre artı eksi uçlarının izole edilip edilmediği dikkatle kontrol edilmelidir. Hücreler arasına yerleştirilecek olan termal köpük malzemeleri (foam) hücrenin başta kalınlığı olmak üzere en ve boy ölçülerine uygun olarak seçilir. Bu tezin de konusu olan termal köpük malzemeler minimum 1.6 mm, maksimum 2 mm kalınlığında olacak şekilde sınıflandırılır.

Köpük, hücre kaset montajının ardından hücre yüzeyinde sabitlenir. Daha sonra sıcaklık sensörleri belirli noktalara yerleştirilir.

- **Hücreleri sıkıştırma**

Hücre kaseti-yapıştırıcı-hücre-köpük-sensör montajlı komponentler bataryanın elektriksel mimarisine göre, ölçülere uygun montaj fikstürüne yerleştirilir. Seri üretimde bu işlem adımı için hücrenin geometrisine uygun tasarlanan bir tutucu (gripper) yapısına sahip robota ihtiyaç duyulur. Bu robot, hücreleri tek tek alarak yan yana dizer. Bu dizilim yapılırken merkezleme için uygun piston vb. komponentler bulunur. Dizilim işlemi tamamlandıktan sonra, ikinci bir robot yardımıyla batarya dizini alınır. Alım işleminde yine Loadcell yardımıyla tüm modülün ağırlığı ölçülür. Isıl temas ile, modül bütünlüğü sağlanmalıdır. Tüm bu operasyonlarda herhangi bir kısa devre oluşumuna karşın gripperlar ve fikstürler yalıtımla kaplıdır. Olması gereken modül boyutu ve belirlenen sıkıştırma kuvvetine bağlı kalınarak en uçlarda bulunan plakalar üzerinden yük uygulanır. Daha sonra bu yapı üzerinde hücrelerin artı/eksi kutupları üzerinden elektriksel bağlantıyı sağlayan hücre konnektörleri (baralar) yerleştirilir. Artı/eksi kutupların istenilen toleranslara uygun olacak şekilde, kesme bıçakları ile kesilir. Kesilme sebebi ise bu uçların bir sonraki kaynak işlemi için hazır hale getirilmesidir. Kesilen uçlar, baraların belirlenen yüzeylerine kaynak işlemi ile sabitlenir. Bu batarya dizininin ısı transferini sağlamak ve batarya içinde oluşan ısıyı daha etkili bir şekilde dağıtmak ve bataryayı soğutmak için termal arayüz malzemeleri ve yapışkanlar

kullanılır. Batarya dizinini modül haline getirmeden önce alüminyum plaka ve batarya dizini arasına bu malzemeler uygulanır. Yapıştırıcılar ise, yüksek bağlantı dayanımı gerektiren yapısal bağlama uygulamalarında kullanılır. Bileşenleri sabitleyerek, sızdırmazlığı sağlar, aynı zamanda titreşim ve şok sönümleme konusunda yardımcı olur. Alt, üst ve yan taraflar alüminyum plakalar ile belirli ölçülerde uygulanan kuvvetler ile kümelenerek, izole edilmiş ve güvenli bir kapalı kutu haline getirilerek, elektriksel montaj elemanları için bir sonraki adıma aktarılır.



Şekil 2.3. Batarya hücresi üzerine yapıştırıcı uygulaması (Atlas C. 2022).

- **Elektriksel mimari montajı ve modül haline getirilmesi**

Nihai hale gelen yapının sıcaklık ve gerilim ölçümlerinin izlendiği, gerilim dengelemelerinin yapıldığı, veri iletimin ana batarya yönetim sistemine doğru sağlandığı komponent olan hücre yönetim ünitesinin montajı yapılır. Bu elektronik karta hücrelerdeki sıcaklık ve gerilimleri ölçen sensörler bağlıdır.

- **Modül kalite kontrol**

Hazırlanan modüllerin batarya paketi montajından önce performansı ve elektriksel özelliklerinin kontrolü için deşarj testi yapılır. Bu test ile birlikte modülün deşarj (boşaltma) yeteneği değerlendirilir. Bu testte, belirli bir süre boyunca batarya modülüne

belirli bir akım uygulanır ve bataryanın bu akımı ne kadar süreyle taşıyabildiği ölçülür. "A" ise bu deşarj testi sırasında kullanılan deşarj akımının miktarını ifade eder ve genellikle bir örnek değer olarak kullanılır ve modülün karşılaşılabileceği yüksek akım değerlerini simüle etmek için yapılır. Bir diğer kalite kontrol testi ise, izolasyon direnci testidir ve bataryanın içindeki elektriksel bileşenler arasında olası izolasyon hatalarını tespit etmek ve izolasyon direncinin belirlenmesi için yapılır. Bunların yanısıra, hücrede olduğu gibi açık devre voltajı testi (OCV), koruma devre kartı (PCB) kontrolleri, modüle kapasite testleri, modül CSC (Cell Supervisory Circuit) kontrolleri yapılır. Test sonunda, bataryanın ne kadar enerji sağlayabildiği ve ne kadar süre boyunca stabil bir performansta çalışabildiği belirlenir.

2.2.2. Modülden batarya paketi üretimi

Montajı ve gerekli kontrolleri yapılan batarya modülünün batarya taşıyıcısına (frame) doğru bir şekilde yerleştirilmesi gerekir. Bataryanın hem optimum performans sunup hem de aracın tamamına yapısal stabilite sağlayabildiğinden emin olmak için yüksek kaliteli bir taşıyıcı kullanılması önemlidir. Batarya paketi hattına modülü yerleştirmeden önce, modüllerin yerleştireceği frame/tray konveyörlere yüklenir. Yükleme operasyonu robot veya operatör tarafından yönlendirilen manipülatörler ile yapılır.



Şekil 2.4. Batarya paketi-modül yerleştirme uygulaması (Atlas C. 2022).

- **Isıl yönetim**

Batarya ısını yönetmek için bir termal bileşikli malzemeler kullanılması gerekir. Taşıyıcının ayrıntılı bir şekilde kontrol edilmesi ve kullanılacak olan termal malzemelerin hesaplamasının doğru yapılması, bir dozajlama sistemiyle optimum bir şekilde boşlukların doldurulma uygulanması yapılması önemlidir. Termal arayüz malzemeleri (TIM) uygulaması bu aşamada yapılır. TIM, batarya modülünde ısı transferini iyileştirmek için kullanılan özel bir malzemedir. Bu malzeme, bataryanın içinde oluşan ısıyı daha etkili bir şekilde dağıtmak ve bataryayı soğutmak için kullanılır. TIM uygulaması, genellikle batarya modülündeki bileşenler arasındaki arayüzlerde kullanılır. Örneğin, batarya hücreleri, soğutma plakaları, ısı sensörleri ve diğer bileşenler arasında ısı transferini artırmak için TIM uygulanabilir. Uygulama öncesinde plasma temizlemesi TIM'in ısı performansını için faydalı olacaktır (Atlas C. 2022).

- **Modüllerin monte edilmesi**

Termal malzemeler taşıyıcı üzerine dozajlandıktan sonra modüllerin monte edilmesi ve mekanik bağlantılar ile batarya taşıyıcısına sabitlenmesi gerekir. 3D robot yönlendirmeli bir çoklu mil, sıkma işleminin mükemmel bir şekilde yapılmasını sağlar. Modül hattında hazırlanan modüller, talep doğrultusunda batarya içine robot veya manipülatör yardımıyla dizilir. Batarya içindeki boşlukların doldurulma (gap filler) uygulaması yapılır ve modüller batarya paketine civatalı bağlantı ile monte edilir. Ayrıca gap fillerin temiz yüzeyinin alttırılması amacıyla modül üzerine belirlenen bir süre boyunca üst baskı uygulanır. Eğer gap filler uygulaması yok ise baskıya ihtiyaç yoktur. Bunun yerine soğutucu pedler kullanılabilir (Atlas C. 2022).

- **Elektrikli bileşenlerin monte edilmesi**

Yalıtımlı montaj elemanlar ile optimum operatör güvenliği sağlayarak montaj yapılması önemlidir. Bağlantı elemanları için otomatik konumlandırma sistemleri ve proses kontrol yazılımı ile operatör açık bir şekilde yönlendirilir ve böylelikle batarya ve operatör güvenliği için uygun şartlar sağlanır. Bu operasyonda, yüksek akım taşıyan

Busbarlar, yüksek gerilim ve düşük gerilim taşıyan kablolama (HV-LV wirings), sabitleme braketleri (Fixing Bracket), tutucular, ve BMS gibi elektronik ve kablolamaların montajı yapılır (Atlas C. 2022).

- **Yangından koruma**

Elektrikli araç bataryalarında, iki bileşenli bir yangından koruma malzemesi ve yangından sonra yayılan havanın iyi bir şekilde tahliye edilmesi için valfler kullanılır. Bu uygulamalar ile birlikte yangının yayılmasını geciktirilir. Bunun için yangından koruma malzemesinin akış uygulamasının kusursuz ve doğru bir şekilde yapılması gerekir. Görsel kontrolü sağlayan sistemler ile uygulamanın doğru yapılıp yapılmadığı otomatik olarak incelenir ve kontrol edilir. Batarya taşıyıcısı üzerinde takılan soğutucu plaka (cooling plate) temas edecek yerlere plazma temizlemesi yapılarak ardından robot ile dozajlanarak yapıştırıcının sürülmesi sağlanır. Amaç; soğutucu plaka yerleşiminden sonra dışarıya hava giriş-çıkışını engellemektir. Daha sonra manipülatör veya robot yardımıyla soğutucu plaka montajı yapılır. Civataları belirlenen tork ile sıkılır. Tercihen, soğutucu plaka üzerine yük uygulanarak baskılanır. İşlemlerin ardından harici bir test ünitesiyle kaçak testi yapılır. İçeriye basınçlı hava verilerek, bar değişimi gözlenir. Hata sonucunda kaçak tespit edilerek, yeniden tamir işlemi yapılır. Soğutucu plakanın ardından batarya uygun şekilde kapatılarak son adımda batarya testleri aşamasına geçilir. Batarya hat sonu ise modülde olduğu gibi deşarj testi, izolasyon direnci kontrolü, açık devre voltaj ölçümü, akım koruma devresi kontrolü, kapasite kontrolü ve tüm etiketlemelerin kontrolü yapılara elektrikli araca takılması için nihai hale getirilir (Atlas C. 2022).

2.3. Li-Iyon Bataryalarda Isıl Yönetim Sistemi

Bir lityum iyon bataryanın verimliliğinin en üst düzeye çıkması için, 15 °C ile 35 °C arasındaki devamlı bir sıcaklık aralığını koruması gerekmektedir. Bu nedenle, ısıyı dağıtarak, bataryanın sıcaklığını bu düzeyde tutmak için güvenilir bir batarya ısı yönetim sistemine ihtiyaç vardır. Lityum iyon bataryalarda farklı metotlar ile ısı soğutma yapılabilir. Hava soğutmalı sistemlerin kısa mesafe seyahat eden elektrikli

araçlar için uygun olduğu, sıvı soğutma sistemlerinin uzun menzil gerektiren daha büyük batarya paketine sahip, yüksek ısı yüklerine çıkan elektrikli araçlar için uygun olduğu, faz değiştiren malzeme bazlı soğutma sistemlerin ise sabit ısı yüklerine ve stabil ortam sıcaklıklarına sahip elektrikli araçlar için uygun olduğu ve termoelektrik batarya ısı yönetim sistemlerinin daha iyi kontrol sağlamak için diğer tiplerle birlikte en iyi şekilde kullanıldığı belirlenmiştir.

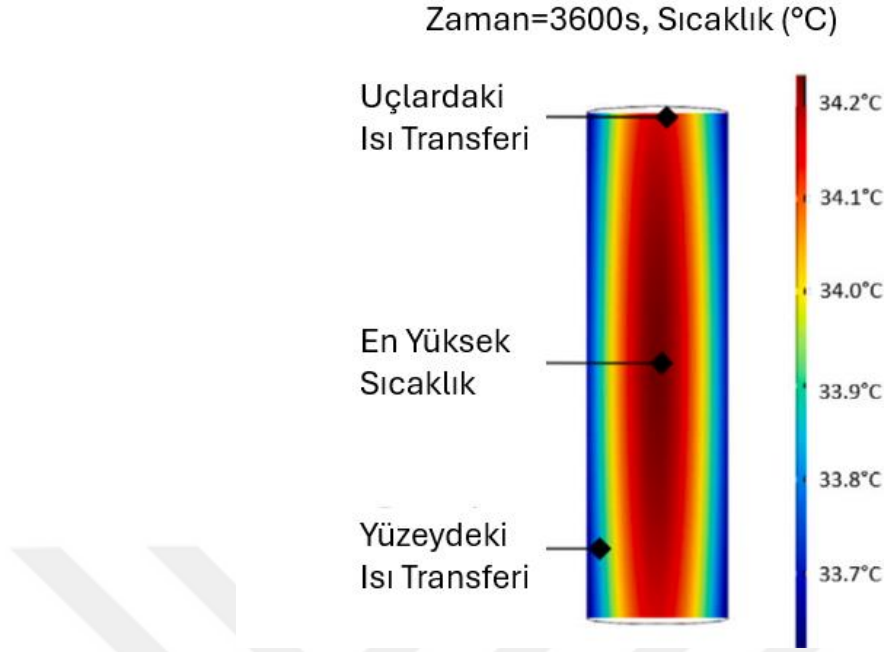
Bir elektrikli araç (EV) batarya paketinin performansını etkileyen birçok faktör vardır, ancak en önemli faktör ısı etkilere karşı duyarlılığıdır. Geleneksel bir EV lityum iyon batarya paketi, 15 °C ile 35 °C arasında optimal olarak çalışır. Eğer lityum iyon batarya paketi 15 °C'nin altında çalışırsa, genel kapasite düşer ve bataryanın iç direnci artar. Öte yandan, 35 °C'nin üzerindeki sıcaklıklar, lityum iyon batarya paketinde geri dönüşü olmayan reaksiyonların meydana gelmesine ve termal kaçak (Thermal Runaway) riskinin artmasına neden olabilir. Ayrıca, bu durum lityum iyon bataryanın kapasitesinin düşmesine de neden olmaktadır. Isı etkilerin bir EV batarya paketinin performansı üzerindeki kritik etkisi göz önüne alındığında, verimli soğutma sistemlerindeki sürekli gelişmeler, batarya paketinin genel dayanıklılığı ve güvenliği açısından fayda sağlayacaktır.

Elektrikli araçlarda çeşitli ısı yönetim stratejileri kullanılmaktadır; bunlar arasında en yaygınları hava soğutma, sıvı soğutma, katı-sıvı faz değişim malzemesi (PCM) bazlı soğutma ve termoelektrik eleman bazlı ısı yönetim sistemleridir. Her batarya BIMS türünün, performans ve maliyet açısından kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır. Örneğin, hava soğutma sistemleri iyi ekonomik fizibiliteye sahiptir, ancak yüksek ısı stres altında ısıyı verimli bir şekilde dağıtmakta zorluk yaşayabilirler. Buna karşılık, sıvı soğutma, doğrudan veya dolaylı yöntemlerle uygulanıp uygulanmadığına bakılmaksızın ısı dağıtımında belirgin bir etkililik sergilemektedir, ancak bu da genellikle daha yüksek uygulama maliyetleri içindedir. PCM bazlı soğutma mekanizmaları, katı ve sıvı durumlar arasında faz geçişleri yapan malzemeler büyük latent ısı kapasitelerini kullanarak ısıyı batarya paketlerinden uzaklaştırır; bu da sıcaklık dağılımının düzenlenmesini sağlar. Ancak PCM'ler düşük ısı iletkenliğe sahiptir ve bu durumda, ısı iletken malzemelerin doğru yerleştirilmeleri gerekir. Termoelektrik

eleman bazlı sistemler ise, ısı transferinde Peltier etkisini kullanarak hassas sıcaklık kontrolü sağlar, ancak genellikle daha yüksek uygulama maliyetlerinden dolayı tercih edilmezler.

Günümüzde, elektrikli araç (EV) endüstrisi ağırlıklı olarak hava ve sıvı soğutma yönetim sistemlerine sahiptir, nedeni bu sistemlerin soğutma kapasitesinin EV'nin talebine göre ayarlanabilir olmasıdır. Bu çalışma, sıvı soğutma sistemine sahip ısı yönetim sistemlerinde kullanılan termal arayüz malzemelerin türlerini araştırmakta, kalınlık ve boyutlarına göre avantajlarını ve dezavantajlarını kapsamlı bir şekilde sunmaktadır. Ayrıca, çalışma lityum iyon bataryalarda ısının nasıl oluştuğuna dair detayları incelemektedir. Bu tezin yeniliği, arayüz malzemelerin BIMS üzerindeki etkilerine odaklanmasıdır; bu yaklaşımların avantaj ve dezavantajlarını hassas bir şekilde incelemektedir.

Bir bataryada sıcaklık farklılıklarının ortaya çıkması normaldir; bu olay, hücrelerin bataryadaki konumuna bağlı olarak performans ve yaşlanma oranlarında farklılıklara neden olur. İyi tasarlanmış bir batarya bu sıcaklık farklarını en aza indirebilir, ancak bunları ortadan kaldırmak mümkün değildir ve bu durum hücrelerin voltaj dengelenmesini (Cell Balancing) etkiler. Daha yüksek sıcaklıklar, hücredeki reaksiyonlarının daha hızlı gerçekleşmesini ve hücrenin daha iyi performansta olmasını sağlar; bu da daha yüksek güç çıktısı, dolayısıyla empedansın azalmasıyla hücre kapasitesini artırır. Ancak, optimal aralığın dışındaki sıcaklıklar geri dönüşümsüz yan reaksiyonlara yol açabilir ve yaşlanma oranlarını artırabilir. Bu nedenle, optimal düzeyde batarya verimliliği ve dayanıklılığı için üst sıcaklık sınırı vardır. Düşük sıcaklıklar için de aynı durum geçerlidir; bataryanın performansı önemli ölçüde düşebilir ve düşük sıcaklıkta çalışmak bataryaya ciddi hasarlar verebilir. BTYS ideal olarak sıcaklığı önceden belirlenmiş bir bölgede tutmalı ve beklenmedik sıcaklık değişikliklerini tespit etmelidir. Güvenlik aralıkları açısından sıcaklık ve voltaj ilişkileri Şekil 2.5'de gösterilmiştir; ideal çalışma sıcaklığı +15 °C ile +35 °C arasında olmaktadır. (Hwang vd., 2024)



Şekil 2.5. 0.5C’de deşarj edildikten sonraki li-ion batarya hücresinin sıcaklık dağılımı (Hwang vd., 2024)

2.4. Termal Malzemeler

2.4.1. Termal malzemeler nedir?

Termal arayüz malzemeleri elektrikli araç bataryalarının birleştirme prosesinde kritik bir adımdır ve ısıl yönetimde önemli bir rol oynar. Bu da bataryanın performansını ve güvenliğini sağlar. Bölüm 2.2.’de bahsedildiği gibi elektrikli araç bataryası maksimum performansını belirli bir sıcaklık aralığında sunabilir. Ve her batarya şarj ve deşarj sırasında ortaya çıkan ısıyı, batarya güvenliği ve uzun süreli batarya kapasitesini korumak için, kontrol etmeli ve dağıtmalıdır. Hücrelerin çalışması nedeniyle oluşan ısının yarattığı aşırı ısınmayı önlemek için batarya taşıyıcısı üzerine, batarya modülleri ve soğutucu plaka arasına, hücreler arasına termal arayüz malzemeleri uygulanır. (Maddila vd., 2023)

2.4.2. Termal malzeme tipleri

Elektrikli araç bataryaları zorlu sıcaklık ve titreşim koşulları altında güvenilir bir şekilde çalışması için, ısııl performansı yüksek, sızdırmazlık ve titreşim izolasyonu sağlayan malzemelerin kullanımına ihtiyaç duyar. Günümüz piyasasında, termal macunlar, faz değıştiren malzemeler ve karbon bazlı malzemeler dahil olmak üzere çeşitli termal malzemeler bu amaçlar için kullanılmaktadır. Bataryalarda kullanılan ısııl çözümler, değışken sıkıştırma ve baskılarına dayanabilecek yüksek performanslı ürünler olmalıdır. Bu ürünler batarya hücrelerini hizalayarak, toz ve kirden uzak tutan, sıvı sızdırmazlığı sağlayan, titreşim etkisinden batarya hücrelerini ve modülleri koruyan, aynı zamanda güvenilir soğutma sistemi elemanı olan ve bataryayı güvenli sıcaklık aralığında tutan malzemelerdir. Bu tez kapsamına bağli olarak, daha çok termal köpük malzemeler üzerinde derinlemesine bir inceleme yapılacak olup, termal macunlar, termal elastomer malzemeler (jeller), karbon bazlı malzemelere çok fazla değinilmeyecektir (Maddila vd., 2023).

- **Termal macunlar**

Termal macunlar bir diyer bilinen adıyla termal gresler, bir polimer bazına seramik veya metal dolguların karıştırılmasıyla oluşturulur. Termal greslerde baz malzeme olarak genellikle silikon tercih edilir; bunun sebebi ısııl kararlılığının yüksek olması, yüzeyi ıslatma özelliklerinin olması ve düşük elastikiyet özelliğidir. Bir termal gres oluşturmak için bu bileşenler birleştirilerek yüzeylere sürülebilen bir macun haline getirilir. Bu macun, birleştirilecek olan pürüzlü yüzeylere uygulandığında boşlukları doldurarak ve buradaki hava boşluklarını ortadan kaldırır. Termal gresin ısııl iletkenliğinin yüksek olması için, genellikle daha yüksek dolgu oranı kullanılır. Fakat bu iletkenlik, kullanılan polimerin viskozitesi ve ıslanabilirlik özelliklerinden de etkilenir. (Maddila vd., 2023)

Termal macunlar, genellikle batarya taşıyıcısı üzerine modüllerin yerleştirilmesi için uygulanır ve bu sayede ısıının uygun soğutma sistemi yapıları üzerinden dağıtılmasını ve modüller arası aktif ısııl yönetim yapılmasını sağlar.

Batarya sistemi montajında, batarya taşıyıcı çerçeve üzerine termal macun uygulaması yapılır ve modüller yerleştirilir. Daha sonra modüller üzerine soğutucu plaka yerleştirilerek batarya paketi kapatılır. Bu proseste termal macun uygulamasında hava boşluğu olmadan hassas uygulama yapmak önemlidir. Sıvı malzemeleri büyük miktarlarda ve yüksek debi ile uygulama zorluluğu göz önünde bulundurulduğunda, piyasadaki gelişmiş dozajlama ve macun sıkma teknolojileri kullanarak bu uygulamaları doğru bir şekilde yapmak mümkün hale gelmiştir. Modüllerin termal macun üzerine baloncuk olmadan bastırılması için, bu uygulama tasarımı paralel çizgiler, zikzaklar, veya kemik şeklinde modellerde olabilmektedir (Copco, 2023)

- **Termal köpük malzemeler (foam, pad)**

Termal pedler, termal macunlar gibi, ısı iletken malzemeler içeren bir polimer ile karıştırılır. Ancak, termal pedlerin ağ yoğunluğu fazladır, bu da daha kolay hareket edebilen katı bir köpük malzeme oluşmasını sağlar. Köpük malzemenin bazı dezavantajı uygun bir şekilde çalışması için belirli bir basınç altında olmaları gerektirir. Pedin yumuşaklığı, arayüzlere uyum sağlaması için kritik öneme sahiptir. Daha yüksek dolgu oranına sahip olduğu için, yumuşaklık ile dolgu oranı arasında denge sağlanması beklenmektedir. Bu da bataryanın genel ısı performansını sınırlayabilir.

Termal köpük malzemelerin piyasada sıkıştırma pedleri veya ped yastıkları olarak da bilinir. Sıklıkla kese tipli batarya hücre tasarımlarında tercih edilir.

Bu pedler batarya hücreleri arasına yerleştirilerek kullanılır. Hücreleri yerinde tutmak için yeterince sert olmalı ve batarya ömrü boyunca kese tipli hücrelerin boyutsal değişikliklerine dayanacak kadar sıkıştırılabilir olmalıdır. Basit tabiri ile, batarya hücrelerini aşırı sıcaklıklardan ve titreşimlerden koruyan bir yalıtım malzemesi görevi görür. Bu yalıtım sayesinde, batarya çalışırken aşırı ısınma önlenir ve bataryanın çalışma güvenliği artar. Hücreler arası kullanılan termal köpük malzemelerin en yaygın olanları poliüretan köpük ve silikon köpüktür (Rogers, 2024).

- **Poliüretan köpük**

Poliüretan köpük malzeme, ısı yalıtım özellikleri yüksek seviyede olması ile bilinir ve batarya hücrelerinin arasında koruyucu bir katman olarak görev yapar. Poliüretan köpük malzeme ile üretilen sıkıştırma pedleri, farklı sıkıştırma seviyeleri arasında tutarlı davranarak hücrelerin birbiri ile sıkı tutunmalarını sağlar. Aynı zamanda bataryanın maruz kaldığı titreşimi sönümleyerek hücreleri titreşimin zararlarından izole etmeyi sağlar. Bu malzemenin sıkıştırma oranı, sıkıştırma ve sıcaklık etkilerinin zamanla neden olduğu zarara bağlı olarak değişir ve bataryanın ömrünü uzatarak, sızdırmazlık sağlamaya ve darbeyi emmeye devam eder (Rogers, 2024).

Bataryaların uzun ömürlü olması ve performanslı çalışması için hücre sıcaklığı ve hücre basıncının dengede olması gereklidir. Hücreler arasına yerleştirilen sıkıştırılmış PU bazlı köpük malzeme, hücre yüzeyinde eşit bir basınç oluşturur. Köpüğün ısı yalıtım özellikleri de hücre yüzey sıcaklığının korunmasına yardımcı olur. Bu özellikler ve köpüğün performansı, zamanla ve farklı çevresel koşullarda çok tutarlı bir şekilde işlev göstererek batarya paketinin uzun ömürlü olmasını sağlar.

- **Silikon köpük**

Hücreler arası sıkıştırma pedi olarak kullanılan bir diğer malzeme Silikon bazlı köpüktür. Elektriksel izolasyon sağlama konusunda üstün bir performans sergiler. Aynı zamanda nem ve toz girişine karşı bir engel oluşturarak batarya paketinin uzun vadeli güvenilirliğini sağlar. Ayrıca, bataryalar için en önemli kriterlerden yangına dayanıklılık ve termal yangın sıçramalarını önleme özelliklerine sahip olup güvenlik standartlarını artırır. Silikon köpükler, düşük sıcaklıklarda (<200 °C) ise mükemmel esneklik, geri kazanım, sıkıştırılabilirlik ve düşük yoğunluk özellikleri sayesinde darbe emici, ısıyı koruyan ve yapısal toleransları absorbe etme özellikleri gösterir. Ultra yüksek sıcaklıklarda (>600 °C) ise ısı yalıtım fonksiyonuna sahip olup, ısı yayılımını engelleyebilir, yüksek sıcaklıkları izole ederek hücreleri korur (Futureway, 2024).

- **Termal elastomer malzemeler (jel)**

Termal iletken elastomer malzemeler genellikle silikon elastomer bazından ve ısı iletken seramik partiküllerin karıştırılmasıyla elde edilir. Ayrıca, mekanik dayanımı artırmak için örgü cam elyafı veya dielektrik film de içerebilmektedir. Bu elastomerler, elektriksel izolasyon gerektiren batarya uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Termal macunların aksine, akışkan bir kıvamda değildir. Yüzey düzensizliklerine uyum sağlamak ve etkili bir ısı teması kurmak için sıkıştırma kuvveti ile yerleştirilmeleri gerektirir. Birleştirildikten sonra bağlantının stabilitesini sağlamak için kalıcı bir mekanik bağlantı elemanı gereklidir. Elde edilen ısı direnci, elastomer malzemenin kalınlığı, uygulanan sıkıştırma basıncı ve malzemenin hacimsel ısı iletkenliği gibi faktörlere bağlıdır. (Maddila vd., 2023)

- **Termal yapıştırıcılar (thermal conductive adhesives)**

Termal yapıştırıcılar, dış basınç veya bağlantı elemanı gerektirmeden komponentler arasında bağlantılar oluşturabilir. TIM gibi, TCA'larda da bir polimere (genellikle epoksi) karıştırılmış ısı iletken bir madde içerir. Bu maddeler genellikle sıvı olarak dağıtılır ve sertleşirken katılaşarak güçlü bir bağ oluşturur. (Maddila vd., 2023)

2.4.3. Termal arayüz malzemesi seçimi

Bir TIM seçerken çeşitli faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu faktörler arasında TIM'in belirli bir uygulamadaki performansı, güvenilirliği ve montaj süreçlerindeki davranışı bulunur. Aşağıda, bir TIM'in seçim sürecini etkileyebilecek bazı özellikler listelenmiştir:

- **Isı iletkenlik:** Bir termal arayüz malzemesinin ısı iletkenliği, ısıyı ara yüz boyunca iletme kabiliyeti için önemlidir ve bu da genel ısı performansını etkiler.

- **Isıl direnç:** Isıl direncin normal şartlarda düşük olması gerekir ki böylece batarya, çalışma sıcaklığı aralığında tutulabilmelidir.
- **Elektriksel iletkenlik:** Bazı termal arayüz malzemeleri elektriksel iletkenliğe sahip olsa da, genellikle polimer veya polimer karışımlarından elde edilenler elektrik iletkenliği sağlamaz.
- **Faz değişim sıcaklığı:** Bir termal arayüz malzemesinin faz değişim sıcaklığı, katıdan sıvıya geçiş yaptığı sıcaklığı gösterir. Burada TIM boşlukları doldurup sıkışmış havayı giderir. Eriyik sıcaklığının maksimum çalışma sıcaklığından daha düşük olması önemlidir, böylece malzeme arayüz boyunca ısıyı verimli bir şekilde aktarabilir.
- **Viskozite:** Viskozite, termal arayüz malzemesinin dikey olarak yönlendirildiğinde akmasını önlemek için yeterli olmalıdır. Viskozite çok düşükse, TIM'in montajdan damlama veya akma riski vardır.
- **Çalışma sıcaklık aralığı:** Bir TIM'in uygunluğu, çalışma ortamına bağlıdır. Bazı TIM'lerin dar bir çalışma aralığı vardır. Örneğin, termal pedler genellikle daha yüksek ısı iletkenliğe sahip malzemelerden yapıldıkları için termal jellere kıyasla daha geniş bir aralığa sahiptir.
- **Baskı:** TIM'lerin uygulanması, montaj sırasında uygulanan basınç miktarından etkilenir. Uygun miktarda basınç uygulanması, iki yüzey arasında mevcut olabilecek hava boşluklarının veya boşlukların kalınlığını azaltarak TIM'in performansını artırmaya yardımcı olabilir. Bu, ara yüz boyunca daha iyi ısı iletkenlik ve ısı transferi sağlar.
- **Kalınlık:** TIM'ler arasında, TIM'in kalınlığı, ısı transferine olan direncini doğrudan etkiler. Daha ince TIM'ler kullanıldığında, ısının geçmesi daha kısa sürer ve ısı transferi verimliliği sağlar (Maddila vd., 2023).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölüm, tez kapsamında kullanılan yöntemleri ve prosedürleri açıklamaktadır. Bu tezin amacı, elektrikli araç batarya modülleri için uygun köpük malzemesini seçerek bu köpük malzemenin hücreler arası montajının yapılması aşamasındaki sıkıştırma kuvvetinin değiştirilerek batarya hücrelerinin ısı davranışını izlemek ve elektriksel özelliklerinin değişip değişmediğini kontrol etmektir. Şekil 3.1. elektrikli araç batarya paketini oluşturan bir batarya modülünü ve hücre ve köpük malzemenin yerleşimini göstermektedir. Bu tezde yer alan deneylerde batarya modülü 4s1p olarak tasarlanmıştır. Seçilen hücrenin özellikleri Çizelge 3.1.'de yer almaktadır.

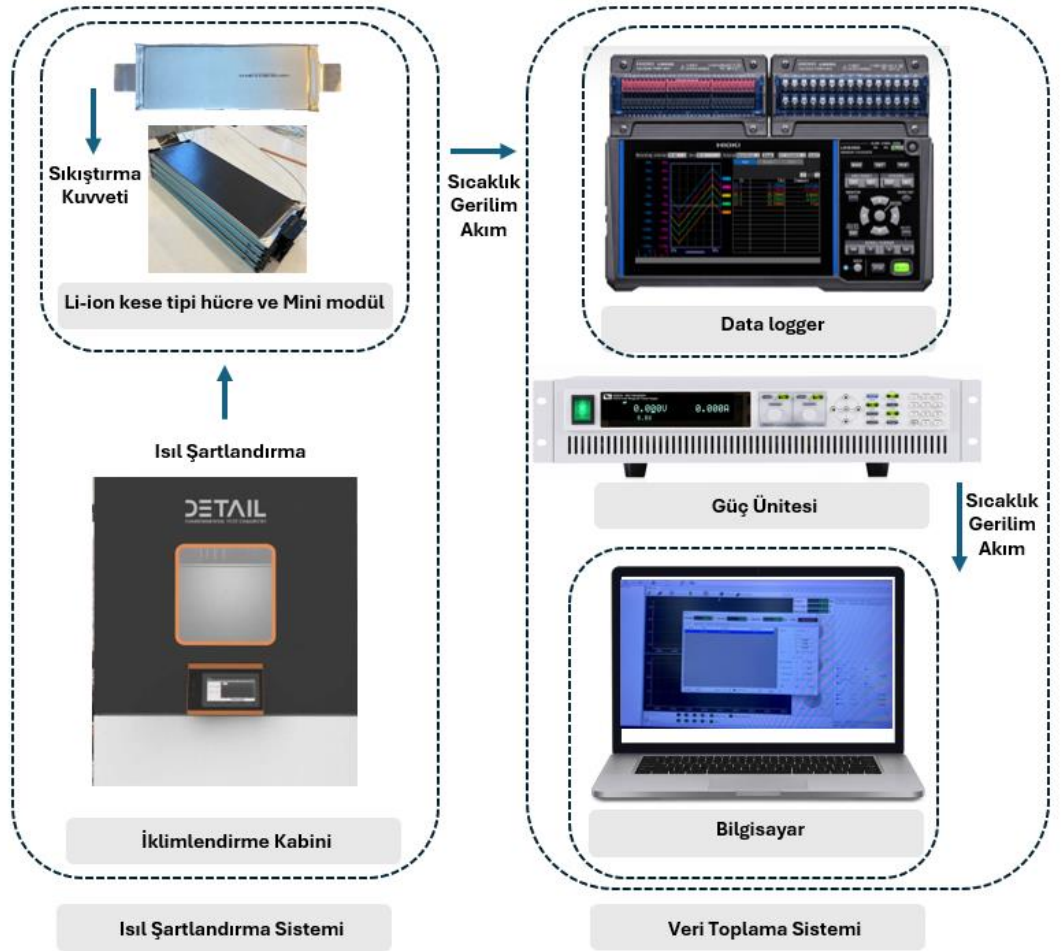
Deneyde hücreler arasına yerleştirilen köpük malzeme silikon bazlı ve poliüretan bazlı seçilmiştir. Her bir köpük malzeme için iki farklı sıkıştırma kuvveti (1,5 kN ve 3 kN) uygulanarak mini modüle montajı yapılmıştır. Hazırlanan mini modül 10 °C ve 20 °C'deki sıcaklıklarda sabit akımda şarj ve deşarj edilerek toplamda her iki köpük malzeme için 16 deney yapılarak, deney sonuçları izlenmiştir ve veriler kaydedilmiştir. Deney sonuçlarında hücreler arasına yerleştirilen sıcaklık ölçen ısı çiftleri ile hücrenin anot, katot ve merkezindeki ısı davranışları değerlendirilmiştir, elektriksel özelliklerdeki değişimler izlenmiştir.



Şekil 3.1. Modül ve modül içinde yer alan hücre-köpük grubu

3.1. Deney

Bu bölümde, deney düzeneği için kullanılan ekipmanlar, düzenek kurulum süreci, izlenen test prosedürü, veri toplama ve analiz yöntemleri ile sınırlamalar açıklanmaktadır. Şekil 3.2.'de yer alan deney düzeneğinin şematik gösterimini sunmaktadır.



Şekil 3.2. Test Düzeneğinin Şematik Gösterimi

3.2. Deney Kurulumu

Bu bölüm, deney düzeneği için gereken tüm komponentleri, deneyin yapıldığı makinaları, detayları ve kurulumu ile birlikte açıklamaktadır.

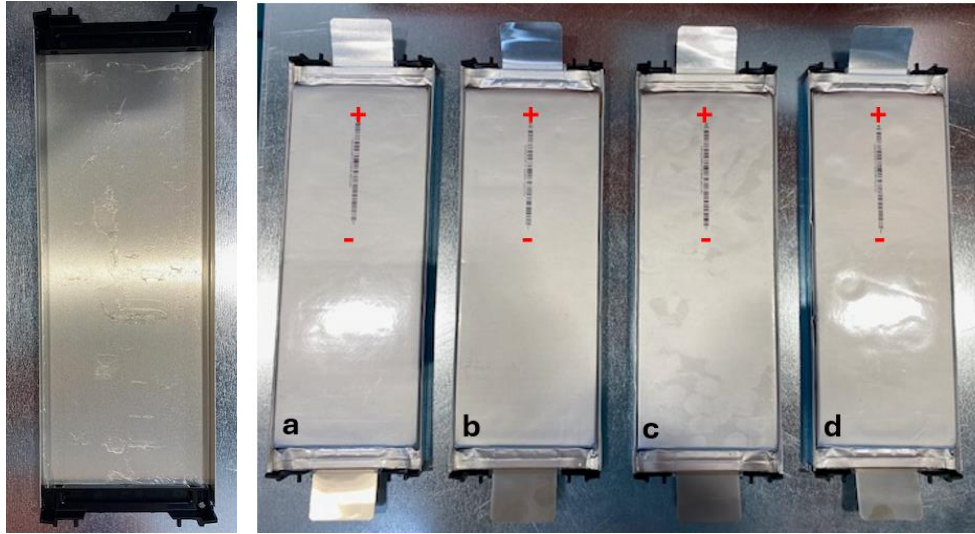
- **Batarya hücresi ve hücre kaseti**

Deneyde kullanılan kese tipli batarya hücresinin özellikleri Çizelge 3.1.'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Batarya hücresi özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Kimya	-	NMC
Tip	-	Kese
Ağırlık	g	930
Boyutsal Ölçüler	mm	101x364x14.2
Nominal Kapasite	Ah	73
Nominal Gerilim	V	3.65
Minimum Gerilim	V	2.75
Maksimum Gerilim	V	4.20
Enerji	Wh	271
Deşarj Akımı (Peak) @25°C 10s [A]	A	650
Devamlı Deşarj Akımı @25°C [A]	A	220
Devamlı Şarj Akımı @25°C [A]	A	36.5

Tüm deneylerde aynı hücreler kullanılmıştır. Hücre ve hücrenin yerleştirildiği alüminyum hücre kasetinin birleştirilmiş hali Şekil 3.3.'de gösterilmektedir.

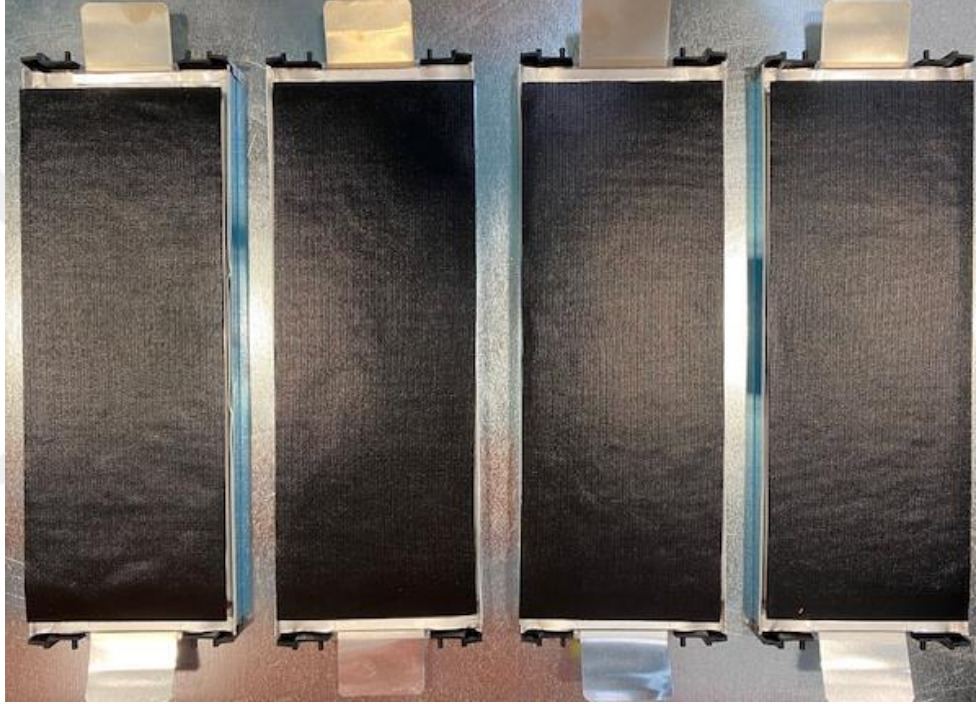


Şekil 3.3. Hücre ve hücrenin yerleştirildiği alüminyum hücre kasetinin montajı

- **Köpük malzeme (foam, ped)**

Bu deneyde silikon bazlı ve poliüretan bazlı köpük malzemeler kullanılmıştır. Her iki köpük malzemenin ısı, fiziksel, ısı özellikleri aşağıdaki Çizelge 3.2.'de gösterilmektedir.

Hücre ve hücre kaseti ikilisinin üzerine yerleştirilen köpük malzeme Şekil 3.4.'de gösterilmiştir.



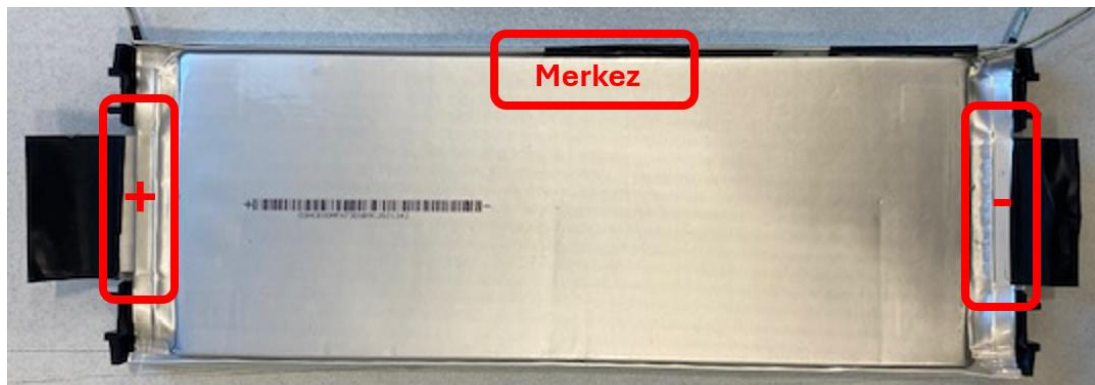
Şekil 3.4. Hücre ve hücre kaseti ikilisinin üzerine yerleştirilen köpük malzeme

Çizelge 3.2. Termal köpük malzeme özellikleri

Nr.	Özellik	PU Köpük Malzeme	Silikon Köpük Malzeme	Birim
1	Malzeme	PU	Silikon	-
2	Yoğunluk	250	330	kg/m ³
3	Kalınlık	2	1,8	mm
4	Renk	Siyah	Siyah	-
5	Sıkıştırma seti (@70 %, 7 gün)	(@70 %, 7 gün) @23°C<3 @70°C<10	(100°C, 22 saat, 50%) 1	gün
6	Sıkıştırma Kuvveti	(ASTM 1667, 50 mm /dk @30% sapma) 39	(ASTM D1056, %30 sapma) 75	kPa
7	Sıcaklık Aralığı	-40 - 70	-55 - 200	°C
8	Isıl İletkenlik	0,07	0,076	W/m.K
9	Yanma Dayanımı	ASTM D4986 Başarılı	UL 94 Başarılı	-
10	Raf Ömrü	(21°C 50% Nem) 12	(35°C 70% Nem) 10	Ay

- **K tipi ısıl çift (thermocouple)**

Hücre yüzeyinden sıcaklık ölçümü yapma yeteneğine sahip ısıl çiftlerin çalışma aralığı - 25 °C / +200 °C ve tolerans değeri $\pm 0,01$ °C 'dir. Isıl çiftler her bir hücreye üçer adet olmak üzere anot, katot ve merkez üst noktasına Şekil 3.5.'deki gibi yerleştirilmiştir. Ölçüm doğruluğundan emin olmak için hücrelerin montajını yapmadan önce her bir ısıl çift data logger cihazına bağlanarak kontrolleri yapılmıştır.



Şekil 3.5. Isıl çiftlerin batarya üzerindeki yerleşimi

- **Hücre sıkıştırma makinesi**

Hücre montajının yapılması için gerekli olan sıkıştırma kuvvetinin uygulandığı ve kuvvet-yol değerlerinin ekran üzerinden izlenebildiği özel imalat makinedir.

2-15 kN arasında kuvvet uygulama aralığı vardır. 14,3 mm kalınlığında 72 kese tipi hücreyi sıkıştırma genişliğine sahiptir. Tam merkeze eşit uzaklıkta bulunan yük hücreleri (loadcell) ile yük ölçümü kontrol edilmektedir.



Şekil 3.6. Hücre sıkıştırma makinesi

- **Data logger**

Sıcaklık, voltaj ve diğer elektriksel parametrelerin izlenmesi ve kaydedilmesi için kullanılan, yüksek hassasiyetli ve taşınabilir bir veri kaydedicidir. Deneyde, batarya hücreleri arasındaki sıcaklık değişimlerini ve köpük malzemelerin bu değişim üzerindeki etkilerini ölçmek için kullanılmış; sıcaklık sensörleri aracılığıyla toplanan veriler sayesinde sıcaklık profilleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Hücre yüzeyine yerleştirilen ısı çiftlerinin ve mini modül üzerinden alınan voltaj sensörünün, Data logger cihazından okunan değerleri Çizelge 3.3’de sunulmaktadır.

Çizelge 3.3 Hücre ve üzerindeki ısı çiftlerinin ve voltaj sensörünün gösterimi

Data logger	Hücre	Konum
U1-1[C]	A	Katot
U1-2[C]	A	Merkez
U1-3[C]	A	Anot
U1-4[C]	B	Katot
U1-5[C]	B	Merkez
U1-6[C]	B	Anot
U1-7[C]	C	Katot
U1-8[C]	C	Merkez
U1-9[C]	C	Anot
U1-10[C]	D	Katot
U1-11[C]	D	Merkez
U1-12[C]	D	Anot
U1-13[V]	Mini modül	Ana Terminaller

- **Güç ünitesi**

Çift yönlü programlanabilir DC güç ünitesi kullanılmıştır. Bu cihaz 80 V ve 300 A'e kadar elektriksel çıkış sağlayabilmektedir. Akım profilinin programlanması, elektriksel parametreler olan akım, terminal gerilimi ve kapasite değerlerinin ölçülüp kaydedilebilmesi için cihazın kendi yazılımı kullanılmaktadır.

- **İklimlendirme kabini**

Batarya sistemlerinde ısı yönetim ve ısı transfer analizleri için kullanılan, hassas ölçüm kapasitesine sahip bir cihazdır. Geniş sıcaklık aralığında çoklu sensör desteğiyle kapsamlı veri kaydı yapar ve anlık analiz imkânı sunar. Deneyde, farklı köpük malzemelerin ısı transferi üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılmış ve elde edilen veriler ısı performans analizi için detaylı şekilde incelenmiştir.

3.3. Deneyin Gerçekleştirilmesi

- **Mini modül montajı**

Isıl çiftleri izolasyon bantları ile yerleştirilmiş hücre-hücre kaseti-köpük malzeme grubu aşağıdaki elektriksel mimaride Şekil 3.7.'deki gibi üst üste yerleştirilir, elektriksel bağlantının sağlanması için hücrenin anot ve katot uçlarında yer alan bakır ve alüminyum tablalar alüminyum busbar yuvalarından geçirilir. Tablara açılan delikler üzerinde busbarlar mekanik vida bağlantısı ile birleştirilir. 4S1P mini module montajı yapılmıştır. Açıkta kalan iki uç ise izolasyon bandı ile kaplanır.



Şekil 3.7. Batarya hücrelerinin birleştirilmiş hali

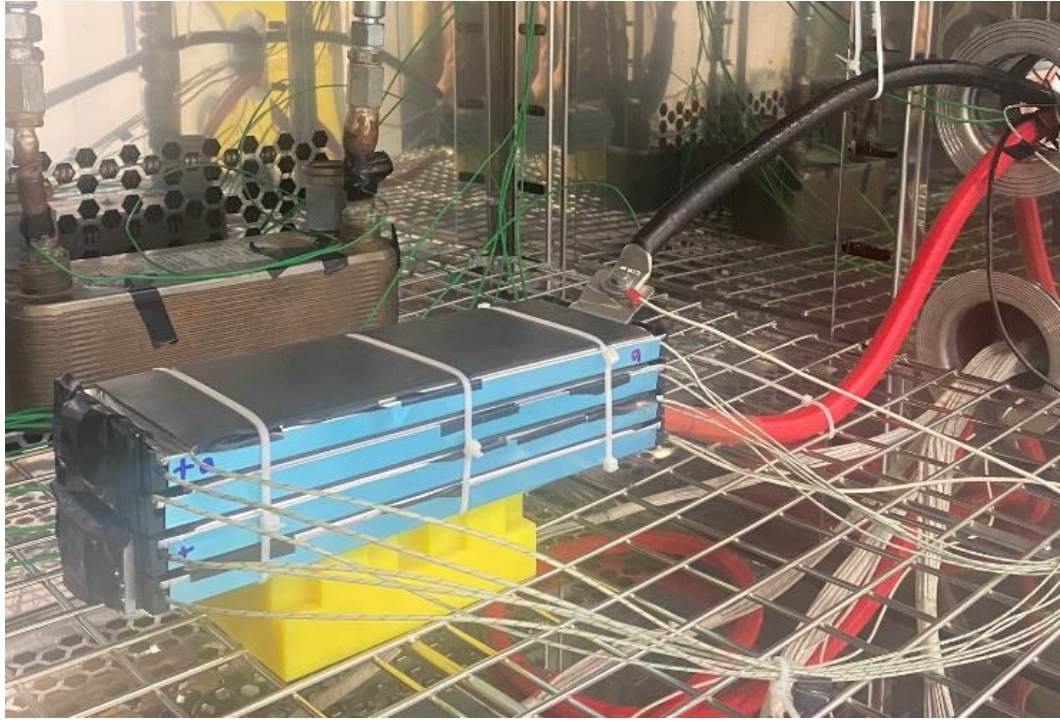
- **Sıkıştırma**

Mini modül grubu sıkıştırma makinasına yerleştirilir ve deney prosedüründe yer alan sıkıştırma kuvveti değeri makina ekranına elle olarak girilir. Şekil 3.6.'de görüldüğü

gibi sıkıştırma kuvveti gerçekleştiğinde, mini modül serbest bırakılır. Bu esnada cihaza bağlı olan usb bellek vasıtasıyla sıkıştırma kuvveti ve katedilen mesafe kayıt edilir.

- **Deney ayarlamaları**

Şarj-deşarj testlerinin gerçekleştirildiği cihaza mini modül yerleştirilir. Açıkta kalan kutup uçlarına artı-eksi güç kabloları Şekil 3.8.'de görüldüğü gibi bağlanır. Mini modül üzerindeki 12 ısı çift uçları data logger cihazına konumlarına göre sırasıyla bağlanır. Çizelge 3.3.'de yer alan deney planında belirlenen sıcaklık için makina ekranından değer girilerek, cihazın kapağı kapatılır ve ortamın belirlenen sıcaklık için şartlandırılması beklenir.



Şekil 3.8. İklimlendirme kabindeki mini modül yerleşimi

- **Yazılım**

Data logger cihazı ile uyumlu olan ve veri toplama, analiz, raporlama gibi işlemleri gerçekleştirmeye yönelik bir yazılım kullanılmıştır. Özellikle batarya testleri, sıcaklık

izleme ve elektriksel parametrelerin kaydını yapan cihazlarla entegre çalışarak, deneysel verilerin etkin bir şekilde işlenmesini sağlar.

3.4. Deney Prosedürü

3.4.1. Deney şartları

Çizelge 3.3.'de 4S1P mini modül için yapılan deneylere ilişkin parametreler yer almaktadır.

Çizelge 3.4. Deney parametreleri

Nr.	Parametre	Değer	Birim
1	Köpük Malzemesi	Silikon Bazlı / PU Bazlı	-
2	Köpük Kalınlığı	1.8 / 2	mm
3	Isıl iletkenlik	0,076 / 0.07	W/m.K
4	Uygulanan Kuvvet	1,5 / 3	kN
5	Uygulama Kuvveti Bekleme Süresi	2	dk
6	Kabin Sıcaklığı	10 / 20	°C
7	Şarj Akımı	1,8	C-rate
8	Deşarj Akımı	2	C-rate
9	Minimum Gerilim (4s1p)	11	V
10	Maksimum Gerilim (4s1p)	16,8	V
11	Ortalama Şarj Süresi	30	dk
12	Ortalama Deşarj Süresi	60	dk

Çizelge 3.4.'de de görülebileceği gibi, iki farklı köpük malzeme için sıcaklık ve uygulanan kuvvet parametreleri dışında, diğer parametreler sabit tutulmuştur. İlk testte, silikon bazlı köpük malzeme ile birleştirilen mini modül 1,5 kN kuvvet ile sıkıştırılarak 10 °C ve 20 °C'de şarj ve deşarj edilmiştir. Daha sonra 3 kN kuvvet ile aynı değerlerde testler gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonucunda her iki köpük malzeme ile sıkıştırılan mini modülün ısı özellikleri incelenmiştir.

3.4.2. Deney adımları

Aşağıdaki işlem sırası, hem silikon bazlı hem de Pu bazlı köpük malzeme ile birleştirilen mini modül için uygulanmıştır.

Adım-00: A,b,c ve d hücreleri hücre kaseti içine yerleştirilir. Isıl çiftler anot, katot ve merkez üst noktaya izolasyon bandı ile sabitlenir. Alüminyum busbarları ile anot ve katot uçları birleştirilir. Isıl çiftlerin doğru veri alıp almadığı kontrol edilir. 4 adet hücre arasında üç adet köpük malzeme olacak şekilde üst üste dizilerek mini modül oluşturulur.

Adım-10: Oluşturulan mini modül sıkıştırma makinesinde önce 1,5 kN ile sıkıştırma kuvveti uygulanır ve kuvvet sabitleninceye kadar (yaklaşık 2 dk) beklenir.

Adım-20: Cycle makinesindeki platforma yerleştirilen mini modülün açıkta kalan uçlarına cycle makinesinin kırmızı ve siyah gerilim sağlayan uçları bağlanır. Bu uçlara gerilim ölçen sensör takılır.

Adım-30: Cycle makinesi kapatılarak, kabin içi 20 °C'ye şartlandırılır. Düzenegin 20 °C'ye ulaşması için yaklaşık 45 dk beklenir.

Adım-40: Hücreler üzerindeki ısı çiftlerinden alınan değerler data logger ekranından takip edilir, tüm ısı çiftlerinden okunan değerler yaklaşık 20 °C'ye geldiğinde test başlatılmaya hazırdır.

Adım-50: DC güç kaynağını sabit 2 C akımı verilerek, bilgisayar ekranından mini modülün deşarj testi için 11 V değeri ayarlanır.

Adım-60: 30 dakika sonra mini modül belirtilen voltaj değerine gelir, ve test sonlandırılır. Test verileri bilgisayara kaydedilir.

Adım-70: Aynı mini modül için 1,8 C şarj akımı verilerek, bilgisayar ekranından şarj testi için 16,8 V değeri ayarlanır.

Şarj testi tamamlandıktan sonra mini modül 10 °C’de test edilmek üzere Adım-30 işleminden itibaren aynı testler tekrarlanır.

10 °C’deki şarj ve deşarj testleri tamamlandıktan sonra aynı mini modül üzerindeki 3 kN sıkıştırma işlemleri için Adım-10’dan itibaren adımlar yeniden yapılır.

1. Köpük malzeme ile olan testler tamamlandıktan sonra, 2. Köpük malzeme için aynı hücreler ile mini modül tekrar birleştirilir. İşlem adımları Adım-00’dan itibaren tekrarlanır. Toplamda her iki köpük malzeme için 16 adet test yapılmış olur.

4. BULGULAR

Deneyin ilk bölümünde, 0,07 W/m.K ısı iletkenliğe sahip 2 mm kalınlığındaki PU bazlı termal köpük ile sırasıyla 1,5 kN ve 3 kN sıkıştırma kuvvetleri uygulanarak hazırlanan mini modülün sabit akımda 10 °C ve 20 °C’deki şarj-deşarj döngüsünde test edilerek, hücrelerin yüzey sıcaklık profili sunulmuştır. Aynı zamanda elektriksel özelliklerine bakılmıştır.

Daha sonra aynı deneyler 0,076 W/m.K ısı iletkenliğe sahip 1,8 mm kalınlığındaki silikon bazlı termal köpük ile birleştirilen mini modül için yapılmıştır. Karşılaştırmalı analiz bölümünde ise farklı sıkıştırma kuvvetleri altında hücrenin kararlı durum sıcaklıkları karşılaştırılmıştır. Daha sonra, parametre çalışmasından faydalanarak farklı basınç durumlarındaki elektriksel özelliklere bakılmıştır. Son olarak hücrenin ısı ve elektriksel özellikleri, tekil hücre test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Tüm grafikler incelendiğinde U1-3[C] ısı çiftinin ortam sıcaklıklarından önemli derecede etkilendiği gözlemlenmiştir, bu sebeple U1-3[C] ısı çiftten alınan veriler göz ardı edilmiştir.

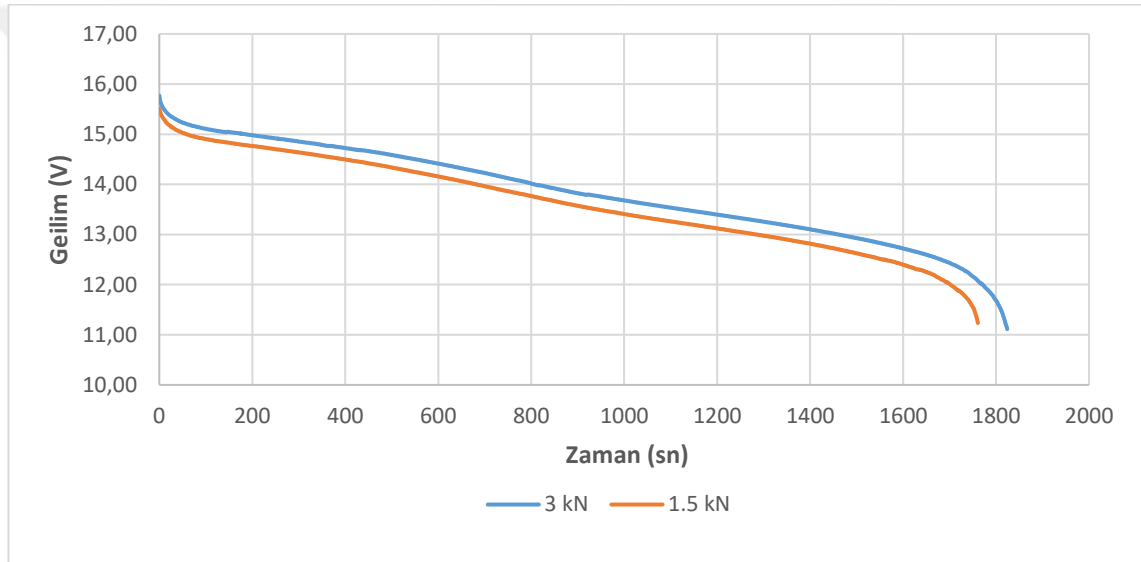
4.1. PU Köpük Malzeme Deney Sonuçları

1,8 C oranındaki şarj akımında, 2 C oranındakideşarj akımında ve 2 farklı sıcaklıklarda test edilen batarya hücresinin sıcaklık eğrileri aşağıdaki şekillerde sunulmuştur. Önce hücreler 1,5 kN sıkıştırma kuvveti ile sıkıştırılarak Bölüm 3.4.’de belirtilen adımlar takip edilerek mini modül montajı yapılmıştır. Bu mini modül ile yapılan şarj-deşarj testlerinden sonra aynı mini modül 3 kN sıkıştırma kuvveti ile sıkıştırılmıştır ve test sonuçları Bölüm 4.1.1 ve Bölüm 4.1.2’de sunulmuştur.

PU köpük malzemenin 1,5 kN ve 3 kN sıkıştırma kuvvetlerindeki şarj-deşarj eğrileri incelendiğinde, bu esnalarındaki hücre sıcaklıklarında farklılık gözlemlenmemiştir. Hücre yüzeylerinde bulunan ısı çiftlerinden alınan verilere göre,

- 10 °C'deki sabit akımda yapılan testlerde hücre sıcaklıkları şarj sırasında 40-50 °C, deşarj sırasında ise 48-58 °C arasında değişmiştir.
- 20 °C'de ise şarj sırasında sıcaklıklar 55-65 °C arasında gözlemlenmiştir.

Bunun yanısıra, sıkıştırma kuvvetindeki artış ile birlikte mini modülün elektriksel özelliklerinde iyileşmeler gözlemlenmiştir. Buna göre Şekil 4.1 'de 3 kN sıkıştırma kuvveti ile birleştirilen mini modülün deşarj süresi daha uzun sürmüş olup, test boyunca gerilim değerleri de daha yüksek seyretmiştir. Böylece, sıkıştırmanın hücreden sağlanan enerjiye olumlu katkısı olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.1. 1,5 kN ve 3 kN sıkıştırma kuvvetlerindeki zamana bağlı gerilim değişimini

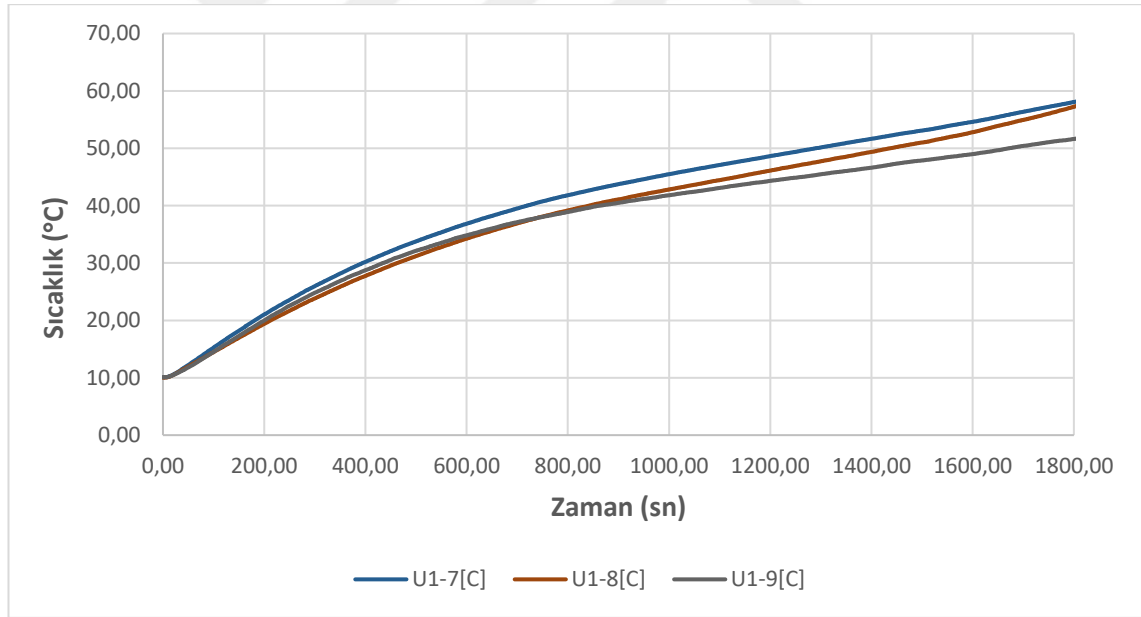
Karşılaştırma için özellikle ortada bulunan C hücresinin katot, merkez ve anot uçlarındaki sıcaklık değerlerine bakıldığında,

- 1,5 kN – 10 °C'deki deşarj testinde sıcaklıklar sırasıyla 57,47 °C, 57,21 °C ve 51,56 °C'dir.
- 3 kN – 10 °C'deki deşarj testinde bu değerler sırasıyla 53,66 °C, 58,34 °C ve 60,53 °C olarak ölçülmüştür.

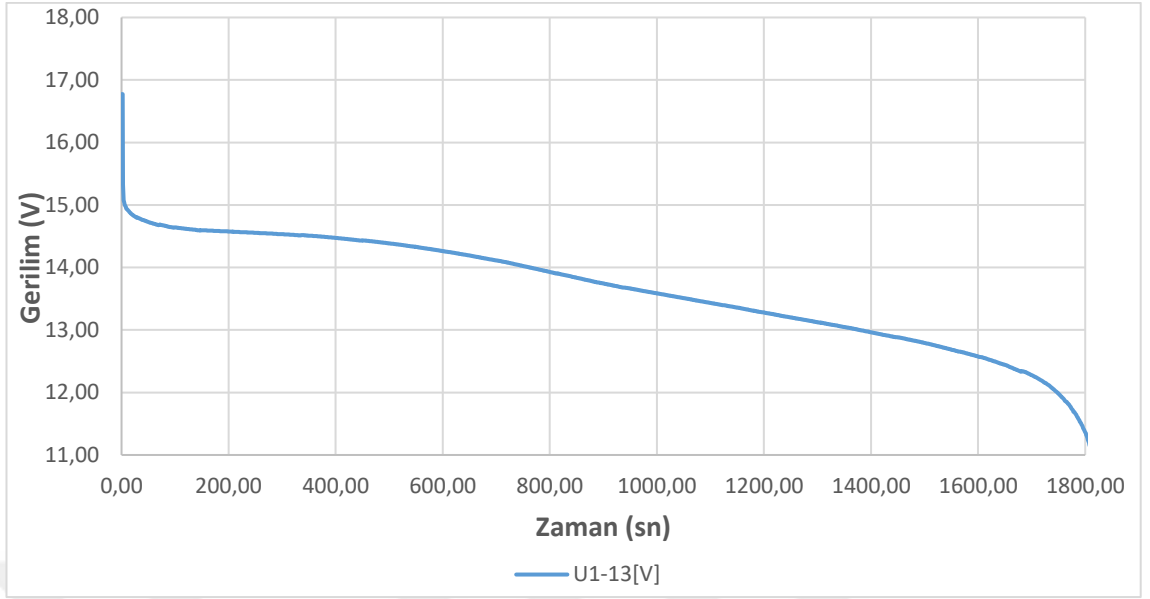
3 kN – 10 °C’deki deşarj testinde C hücresinde anot sıcaklığının, katot ve merkeze göre daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Bu durumun oluşmasında mini modül elektriksel bağlantısında, B hücresinin katodu ile, C hücresinin anodunun aynı kısımda yer alması etkili olmuştur. B hücresinin 3 kN sıkıştırma kuvvetinde ve 10 °C ortam sıcaklığında deşarj testi sonuçları 63,31 °C, 58,12 °C ve 53,69 °C olarak ölçülmüştür.

Bu tez kapsamında tüm parametre değişikliklerinin testleri tamamlandığında karşımıza sıcaklık eğrilerinin gösterildiği grafik çizilmektedir. Bu grafikler arasından C hücresinin 10 °C dış ortam sıcaklığında, 2 C sabit deşarj akımı ile 1,5 kN ve 3 kN test sonuçlarını içeren grafikler aşağıda Şekil 4.1, Şekil 4.2 Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de gösterilmektedir.

4.1.1. 1,5 kN sıkıştırma kuvveti altında

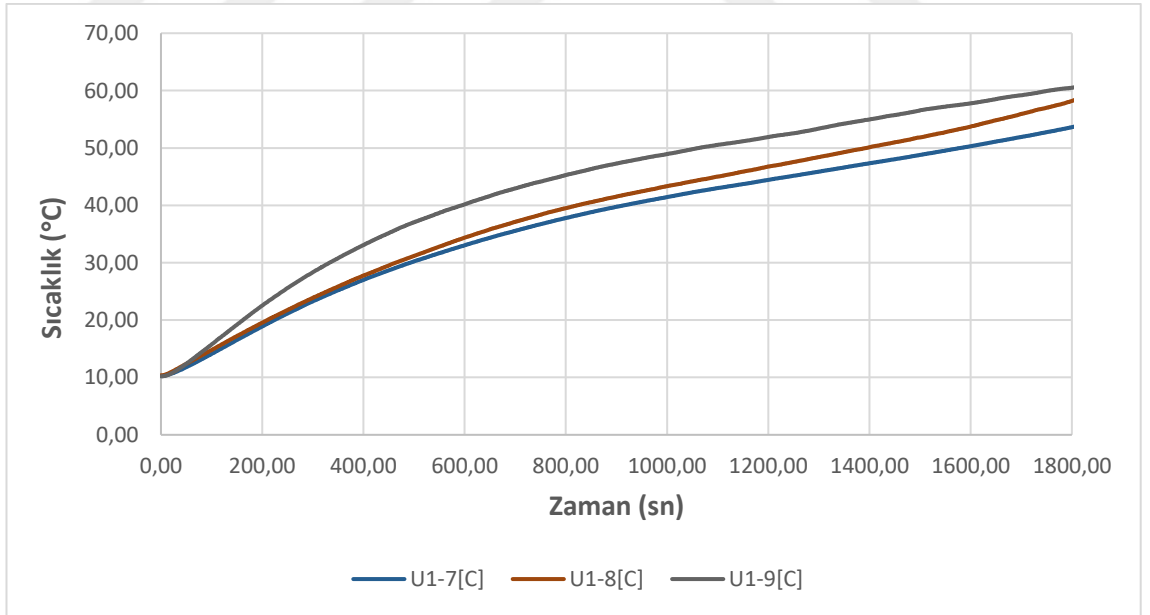


Şekil 4.2. 10 °C ortam koşullarında 2 C oranındaki deşarj akımında hücre sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi

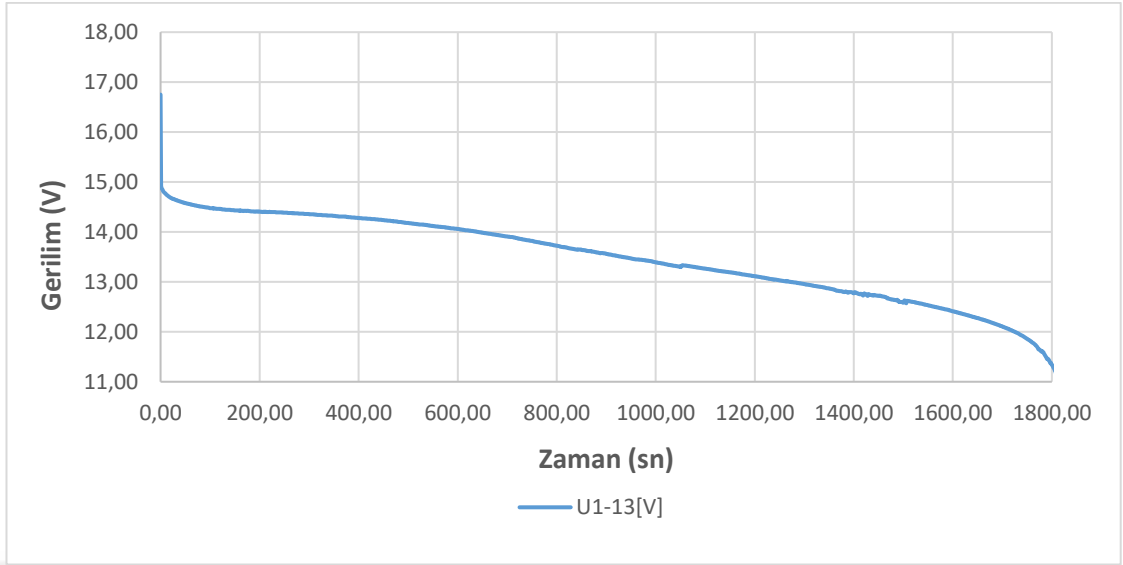


Şekil 4.3. 10 °C ortam koşullarında 2 C oranındaki deşarj akımında mini modüldeki zamana bağlı gerilim değişimi

4.1.2. 3 kN sıkıştırma kuvveti altında



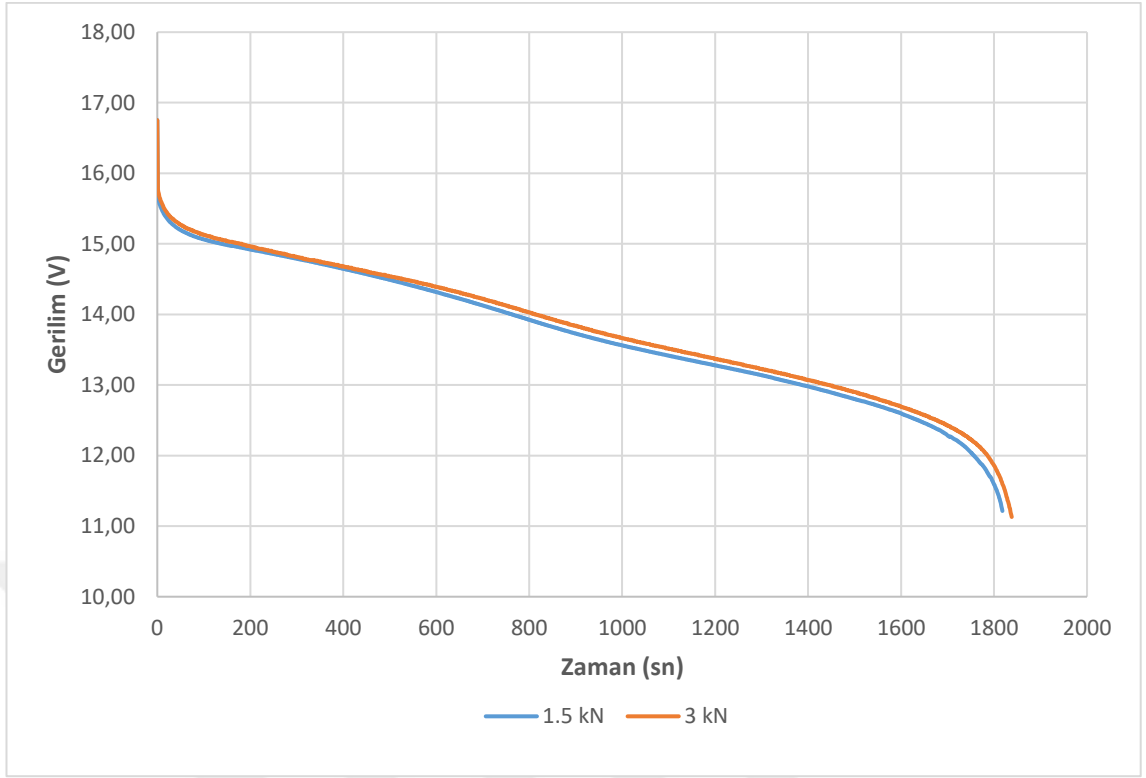
Şekil 4.4. 10 °C ortam koşullarında 2 C oranındaki deşarj akımında hücre sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi



Şekil 4.5. 10 °C ortam koşullarında 2 C oranındaki deşarj akımında mini modüldeki zamana bağlı gerilim değişimi

4.2. Silikon Köpük Malzeme Deney Sonuçları

PU bazlı köpük malzeme ile testleri tamamlanan mini modül demontaj edilerek, hücreler arasına silikon bazlı köpük malzeme yerleştirilerek önce hücreler 1,5 kN sıkıştırma kuvveti ile sıkıştırılarak mini modül montajı sağlanmıştır. Mini modül 1,8 C oranındaki şarj akımında, 2 C oranındaki deşarj akımında ve 2 farklı ortam sıcaklığında test edilen batarya hücresinin sıcaklık eğrilerinden bazıları Bölüm 4.2.1 ve Bölüm 4.2.2’de sunulmuştur. Bu mini modül ile yapılan şarj-deşarj testlerinden sonra 3 kN sıkıştırma kuvveti ile sıkıştırılmıştır ve testler tamamlanmıştır.



Şekil 4.6. 1,5 kN ve 3 kN sıkıştırma kuvvetlerindeki zamana bağlı gerilim değişimi

Silikon köpük malzemenin 1,5 kN ve 3 kN sıkıştırma kuvvetlerindeki deşarj eğrileri incelendiğinde, sıkıştırma kuvvetindeki artışı ile birlikte mini modülün elektriksel özelliklerinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre Şekil 4.6 'de 3 kN sıkıştırma kuvveti ile birleştirilen mini modülün deşarj süresi 1,5 kN'a göre daha uzun sürmüş olup, test boyunca gerilim değerleri de daha yüksek seyretmiştir. Buna rağmen Pu bazlı köpüğe göre elektriksel özelliklerdeki iyileşmeler silikon köpükte daha az görülmektedir.

Hücre yüzeylerinde bulunan ısı çiftlerinden alınan verilere göre, sıcaklıklar,

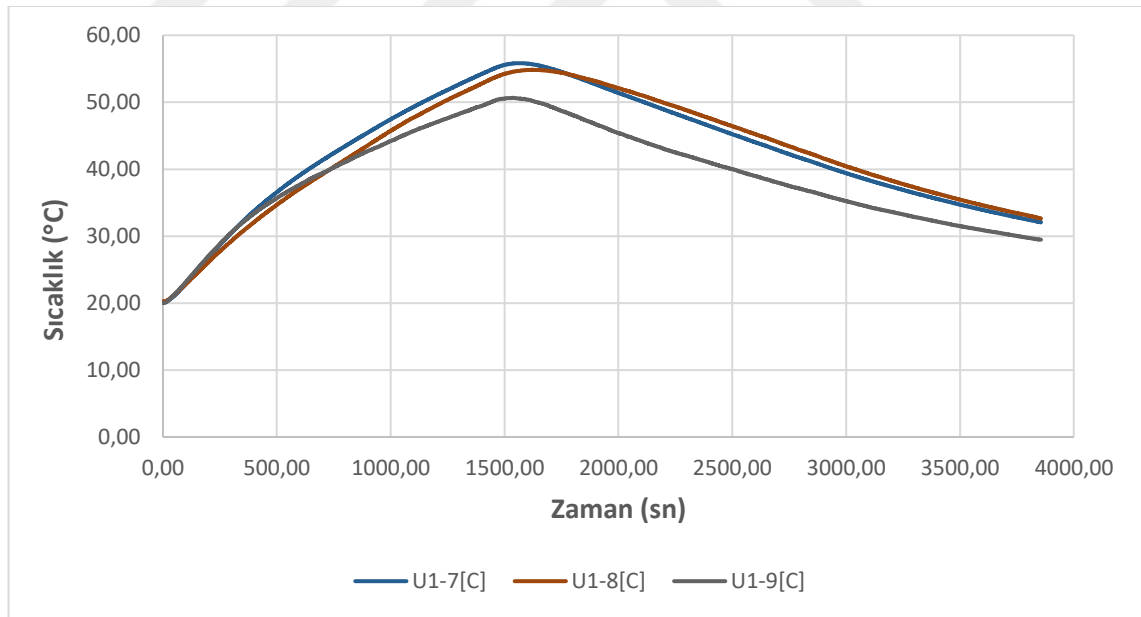
- 10 °C'deki sabit akımda şarj sırasında sıcaklıklar 40-50 °C, deşarj sırasında ise 48-58 °C arasında değişmiştir.
- 20 °C'deki testlerde şarj sırasında sıcaklıklar 50-58 °C, deşarj sırasında ise 50-60 °C arasında gözlemlenmiştir.

Karşılaştırma için özellikle ortada bulunan C hücresinin katot, merkez ve anot uçlarındaki sıcaklık değerlerine bakıldığında,

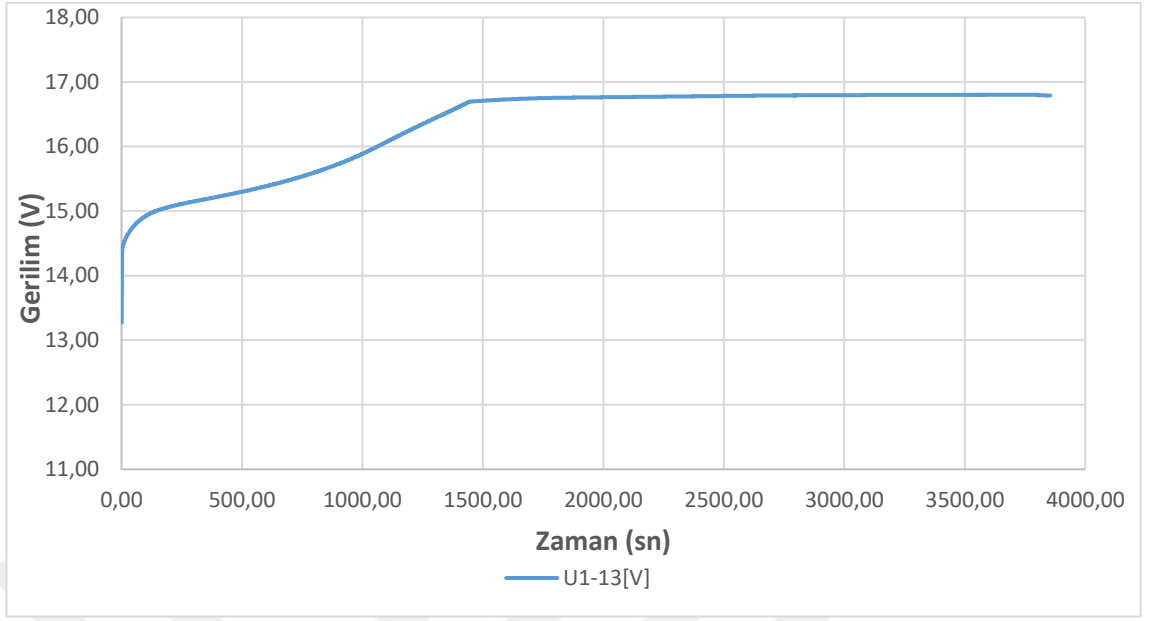
- 1,5 kN – 20 °C’deki şarj testinde C hücresinin sıcaklıkları sırasıyla 54,85 °C, 54,86 °C ve 50,36 °C’dir.
- 3 kN – 20 °C’de bu değerler sırasıyla 55,32 °C, 51,86 °C ve 51,50 °C olarak ölçülmüştür.

Bu tez kapsamında tüm parametre değişikliklerinin testleri tamamlandığında karşımıza 16 adet sıcaklık eğrilerinin gösterildiği grafik çizilmektedir. Bu grafikler arasından bu silikon köpük için 20 °C – 1,8 C Akım - Şarj Testi – 1,5 kN ve 3 kN test sonuçlarını içerenler Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de gösterilmektedir.

4.2.1. 1,5 kN sıkıştırma kuvveti altında

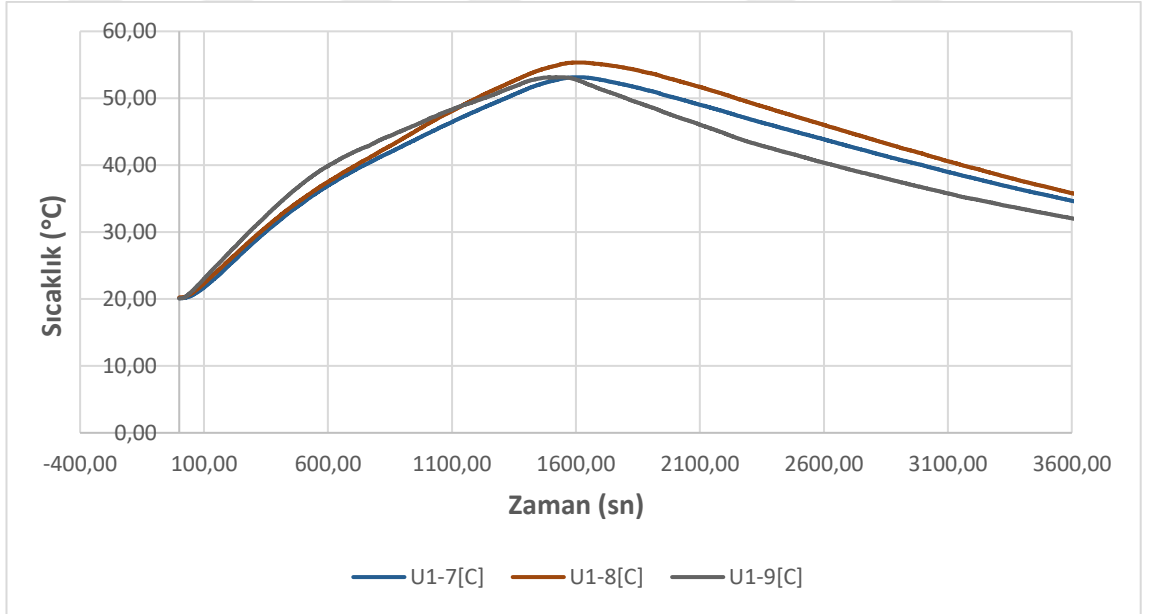


Şekil 4.7. 20 °C ortam koşullarında 1,8 C oranındaki şarj akımında C hücresinin sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi

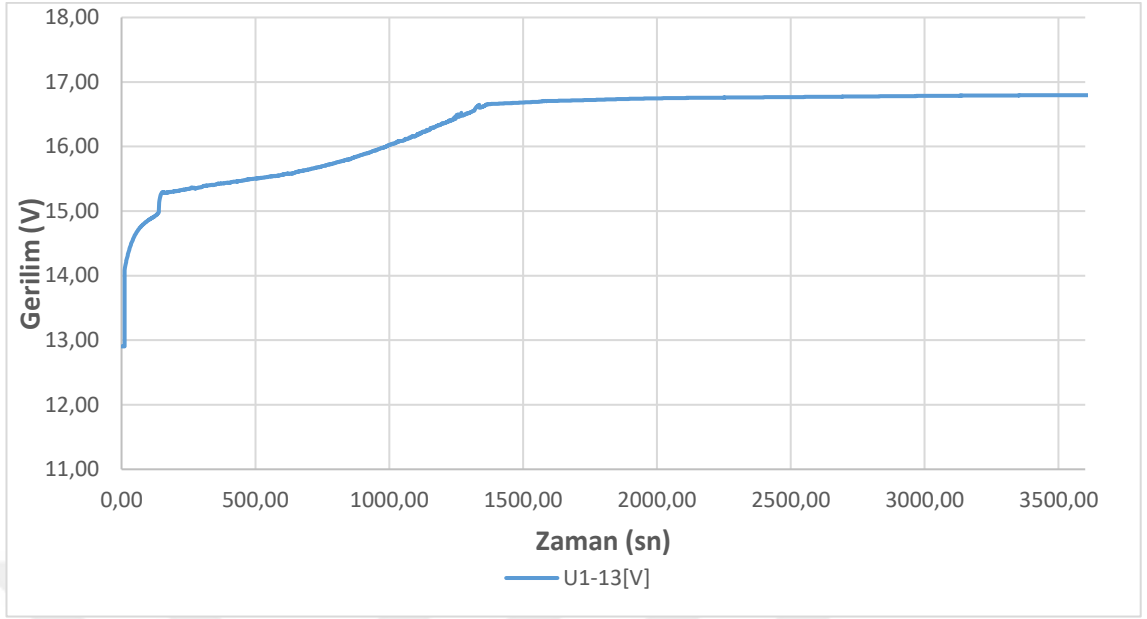


Şekil 4.8. 20 °C ortam koşullarında 1,8 C oranındaki şarj akımında mini modüldeki zamana bağlı gerilim değişimi

4.2.2. 3 kN sıkıştırma kuvveti altında



Şekil 4.9. 20 °C ortam koşullarında 1,8 C oranındaki şarj akımında C hücresinin sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi



Şekil 4.10. 20 °C ortam koşullarında 1,8 C oranındaki şarj akımında mini modüldeki zamana bağlı gerilim değişimi

4.3. Köpük Malzemelerin Karşılaştırması

Her iki malzeme için de farklı sıkıştırma kuvvetleri altında yapılan şarj-deşarj testlerinde düşük sıcaklık ortamında benzer ısıl performans sergilemiştir. Silikon bazlı köpük, yüksek sıcaklık ortamında PU köpüğe göre biraz daha düşük sıcaklık değerleri sağlamıştır. Silikon köpüğün ısıl iletkenliği (0,076 W/m.K), PU köpüğe (0,07 W/m.K) göre daha yüksek olduğundan, ısıyı hücreler arasında daha etkin bir şekilde yayabildiği gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, silikon köpüğün 1,8 mm kalınlığı, PU köpüğün 2 mm kalınlığına göre ısıl direnci bir miktar azaltabilir ve daha iyi ısı transferine izin verebilir.

Sadece C hücresi test sonuçlarına bakıldığında, silikon köpük, hem katot hem merkez hem de anot sıcaklıklarında PU köpüğe kıyasla daha düşük sıcaklık değerleri sağlamıştır. Silikon köpükte sıkıştırma kuvvetinin artması, PU bazlı köpüğe göre daha iyi elektriksel özellikler sağlamamıştır. Sıcaklık dağılımları incelendiğinde silikon köpük anot sıcaklığını önemli ölçüde düşürmüştür.

4.4. Tekil Hücre Sonuçları ve Karşılaştırması

Tekil olarak test edilen hücre yüzeyine kuvvet uygulanmadan sadece iklimlendirme kabininde 10 °C ve 20 °C sıcaklıklarda şarj ve deşarj testleri yapılmıştır. 2 C akımdaki deşarj test sonuçları incelendiğinde sıcaklık dağılımı,

- 10 °C için katot ucunda 31 °C, merkezde 29 °C, anot ucunda 26 °C'dir.
- 20 °C için, katot ucunda 40 °C, merkezde 36 °C, anot ucunda ise 34 °C'dir.

1,8 C akımdaki şarj testi sonuçlarına bakıldığında,

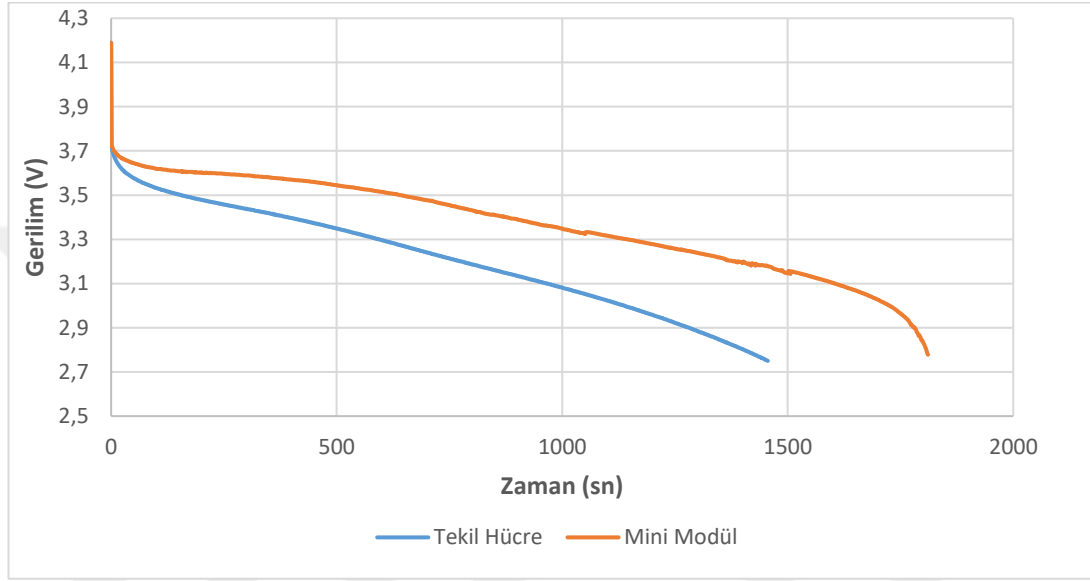
- 10 °C için katot ucunda 24 °C, merkezde 22 °C, anot ucunda 20 °C'dir.
- 20 °C için katot ucunda 35 °C, merkezde 31 °C, anot ucunda 30 °C'dir.

Bu çalışmada, silikon köpüğün PU bazlı köpüğe göre ısı özelliklerinin daha iyi çıkmasından dolayı, bu bölümde silikon köpük ile tekil hücrenin elektriksel ve ısı davranışı karşılaştırılacaktır. Böylece, mini modülün oluşturulması sırasında sıkıştırma kuvvetinin etkisi ortaya konmuş olacaktır.



Şekil. 4.11. 20 °C dış ortam sıcaklığında mini modül ve tekil hücre gerilim değişiminin karşılaştırılması

Şekil 4.11. incelendiğinde, mini modülün 20 °C dış ortam sıcaklığında 2 C akım ile deşarjının, tekil hücre ile kıyaslandığında yaklaşık olarak 190 saniye daha uzun sürdüğü ve gerilim değerlerinin deşarj boyunca daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, sıkıştırma kuvvetinin hücrenin elektiriksel özelliklerini iyileştirdiği dolayısıyla hücreden daha fazla enerji sağlanabileceğini göstermektedir.



Şekil. 4.12. 10 °C dış ortam sıcaklığında mini modül ve tekil hücre gerilim değişiminin karşılaştırılması

Şekil 4.12 mini modülün 10 °C dış ortam sıcaklığında 2 C akım ile deşarjının, tekil hücre ile kıyaslandığında yaklaşık olarak 350 saniye daha uzun sürdüğü ve gerilim değerlerinin deşarj boyunca daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, sıkıştırma kuvvetinin hücrenin elektiriksel özelliklerini iyileştirdiği, aynı zamanda 20 °C'ye göre kıyaslandığında ise 10 °C'de sıkıştırılan mini modülün daha yüksek enerji sağlayabileceği gözlemlenmiştir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Silikon köpüğün 20 °C sıcaklıkta PU köpüğe kıyasla belirgin bir üstünlük sağladığı söylenebilir. Bu durum, özellikle yüksek ısı iletkenlik gerektiren uygulamalarda silikon köpüğün daha uygun bir seçenek olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu avantajın maliyet, mekanik özellikler ve uzun süreli performans üzerindeki etkileri de değerlendirilmelidir.

Sıkıştırma kuvveti, hücre yüzeylerindeki temas direncini azaltarak ısı iletkenliğini iyileştirmesine ve daha iyi elektriksel performansa yol açtığı en önemli sonuçlardan biri olup bu durum, modülde sıcaklık artışını engellemeye yeterli olmamıştır.

Mini modülde, hücreler arasındaki köpük malzemenin bir dereceye kadar ısı yalıtım etkisi yarattığı düşünülebilir. Bu durum, sıcaklığın modülde birikmesine ve hücre sıcaklıklarının tekil hücreye kıyasla daha yüksek olmasına neden olabilir. Hücrelerin birbirine bağlandığı mini modülün oluşturulması sırasında elektriksel bağlantının gerçekleştirilmesi için kullanılan alüminyum baralar nedeniyle temas direncindeki artış, mini modülde tekil hücreye göre sıcaklık artışına sebep olduğu gözlemlenmiştir.

Isı yönetim performansını artırmak için, silikon köpüğün ısı özelliklerini geliştiren katkı maddeleri eklenebilir ya da hücreler arasındaki yalıtım etkisini azaltacak farklı malzemeler incelenebilir. Daha düşük hücre sıcaklıkları ve ısı dengesi sağlamak amacıyla silikon bazlı ısı köpüğün tercih edilmesi önerilir. PU köpük, yüksek sıkıştırma kuvvetleri altında ısı performansta zayıflık göstermiştir. Bu çalışma, termal köpük malzemelerin batarya modüllerinde sıcaklık kontrolüne etkisini kapsamlı bir şekilde analiz etmiştir. İlerleyen çalışmalarda;

- Farklı kalınlık ve ısı iletkenlik değerlerine sahip köpüklerin kullanımı,
- Daha geniş sıkıştırma kuvveti aralıklarında testler,
- Uzun süreli ömür testleri yapılması önerilmektedir.

Bu çalışmalar, bataryaların ısı yönetimi ve uzun vadeli performansı hakkında daha anlamlı sonuçlar sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- C. Bibin, M. Vijayaram, V. Suriya, R. S. Ganesh and S. Soundarraaj, (2020). “A review on thermal issues in Li-ion battery and recent advancements in battery thermal management system,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, pp. 116-128.
- H. Liu, Z. Wei, W. He and J. Zhao, (2017). “Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review,” *Energy Conversion and Management*, vol. 150, pp. 304-330, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.016>
- Linden D., Reddy T.B. (2002). *Handbook of batteries* (3ed.). McGraw-Hill.
- Batmaz, Ü. (Nisan 2023). “Elektrikli araçlarda batarya teknolojileri”, *Mühendis ve Makina*, <https://www.mmo.org.tr/nisan-2023-sayi-76/makale/makale-elektrikli-araclarda-batarya-teknolojileri>
- Minjoon Park, Jaechan Ryu, Wei Wang & Jaephil Cho, (2017). “Material design and engineering of next-generation flow-battery technologies” <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.80>
- Young, K., Fierro, C., & Fetcenko, M. A. (2011). *Status of Ni/MH battery research and industry*. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 18-20, 24-28 July, Detroit, MI, USA. doi:10.1109/PES.2011.6039071
- Ogura, K., & Kolhe, M. L. (2017). *Battery technologies for electric vehicles*. In: T. Muneer, M. L. Kolhe, & A. Doyle (Eds.), *Electric Vehicles: Prospects and Challenges* (pp. 139-167). Elsevier Inc. doi:10.1016/B978-0-12-803021-9.00004-5
- Dikmen, İ. C., Kartaca, K., Karadağ, T., & Abbasov, T. (2018). *Batarya teknolojilerine genel bir bakış*. In: A. Atmaca (Eds.), *3rd International Energy & Engineering Congress Proceeding Book*, (pp. 974-987).
- Foo Shen Hwang, Thomas Confrey, Colin Reidy, Dorel Picovici, Dean Callaghan, David Culliton, Cathal Nolan, (2024). *Renewable and Sustainable Energy Reviews: Review of battery thermal management systems in electric vehicles*, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114171>
- Rohith Virinchi Maddila, Soroush Rostami, (2023). *Investigation of the effects of Thermal Interface Materials on the Cooling of Battery Cells*, <http://hdl.handle.net/20.500.12380/306407>
- Tahirağaoğlu, B., Sevilgen, G., & Hamut, H. S. (2024). The numerical and experimental investigation of the transient behaviours of a lithium-ion pouch battery cell under dynamic conditions. *Case Studies in Thermal Engineering*, 62, 105169. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105169>
- Atlas Copco. (2022). EV bataryası montajı. <https://www.atlascopco.com/tr-tr/itba/industry-solutions/automotive-entry/e-mobility-and-ev-battery-assembly-process>
- Rogers Corporation. (2024). Battery Pads & Cushions <https://rogerscorp.com/applications/battery-pad-and-cushion>
- SZ Futureway. (2024). Foams for Pouch Cells. <http://www.szfutureway.com/en/weikongguixiangjiao/2.html>