ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA KULLANILAN BATARYA MODÜLÜNÜN ELEKTRİKSEL VE ISIL ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Selim YILMAZ

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA KULLANILAN BATARYA MODÜLÜNÜN ELEKTRİKSEL VE ISIL ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Selim YILMAZ
0009-0007-4936-7697

Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
HIBRID VE ELEKTRIKLI TASITLAR ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans

ELEKTRİKLİ TAŞITLARDA KULLANILAN BATARYA MODÜLÜNÜN ELEKTRİKSEL VE ISIL ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Selim YILMAZ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Hibrid ve Elektrikli Taşıtlar Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN

Bu tez kapsamında, 73 Ah kapasiteli kese tipi NMC kimyasına sahip lityum-iyon hücrelerden oluşturulmuş 6S3P elektrikli araç bataryası modülünün elektriksel ve çevresel faktörler değiştirilerek hem şarj hem de deşarj yönünde ısıl özellikleri incelenmiştir. Bu inceleme için farklı C-rate değerleri ve soğutma sıvısının sıcaklığı üzerinde değişiklikler yapılarak soğutma plakasının en etkili ve optimal soğutma performansı saptanmıştır. Yapılan deneyler kapsamında, akım değerleri sabit tutulup soğutma sıvısının sıcaklığını düşürdükçe (25°C, 15°C ve 5°C) batarya modülünün ulaştığı maksimum sıcaklık değeri azalmıştır ve soğutma sıvısının sıcaklık değeri sabit tutulup akım değeri azaltıldıkça (1.3 C-rate ve 0.8 C-rate) batarya modülünün ulaştığı maksimum sıcaklık değeri azalmıştır. Düşük C-rate değerleri ve düşük soğutma sıvısı sıcaklığı, batarya modülünün ısınmasını en performanslı şekilde engellemiştir. Ancak batarya modülünün istenilen sıcaklıkta tutabilmek için soğutmaya sağlanan fayda, harcanan enerji ve hücreler arası sıcaklık farkı dikkate alınarak soğutucu sıvı sıcaklığı optimize edilerek bu değer 5°C yerine 15°C olarak belirlenmiştir.

Bu deneyler için 3D metal yazıcı kullanılarak ve eklemeli imalat yöntemi ile soğutucu plaka tasarımı ve prototip imalatı gerçekleştirildi. Bu kapsamda literatür incelendiğinde 3D metal yazıcı kullanılarak modül seviyesi soğutma analizleri için az sayıda deneysel çalışma bulunmaktadır. Batarya modülü içerisindeki hücrelerin merkezlerine ısıl çiftler yerleştirildi. Ölçümler yapabilmek adına termal kabin, DC güç ünitesi ve veri toplayıcı kullanıldı. Özetle birçok disiplinin bir arada bulunduğu ve farklı test ve ölçüm cihazlarının kullanıldığı deneysel temelli çalışma olmasından dolayı, bu tez ile elektrikli araç batarya tasarımlarına, ilgili diğer tezlere ve makalelere referans olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, elektrikli araç batarya modülü, soğutma plakası, termal yönetim, batarya modülü soğutma, kesecik tipi hücre, lityum-iyon batarya
2025, xiv + 72 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF BATTERY MODULE USED IN ELECTRIC VEHICLES

Selim YILMAZ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Hybrid and Electrical Vehicles

Supervisor: Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN

Within the scope of this thesis, the thermal properties of the 6S3P electric vehicle battery module, which is made of lithium-ion cells with a capacity of 73 Ah and pouch type NMC chemistry, were examined in both charging and discharging directions by changing the electrical and environmental factors. For this examination, the most effective and optimal cooling performance of the cooling plate was determined by making changes to different C-rate values and the temperature of the cooling liquid. Within the scope of the experiments, the maximum temperature value reached by the battery module decreased as the current values were kept constant and the temperature of the cooling liquid was reduced (25°C, 15°C and 5°C), and the maximum temperature value reached by the battery module decreased as the temperature value of the cooling liquid was kept constant and the current value was reduced (1.3 C-rate and 0.8 C-rate). Low C-rate values and low cooling liquid temperature prevented the heating of the battery module in the most efficient way. However, in order to keep the battery module at the desired temperature, the cooling liquid temperature was optimized by considering the benefit provided to cooling, the energy consumed and the temperature difference between the cells, and this value was determined as 15°C instead of 5°C.

For these experiments, a cooling plate design and prototype manufacturing were carried out using a 3D metal printer and additive manufacturing method. In this context, when the literature is examined, there are few experimental studies for module level cooling analyses using a 3D metal printer. Thermocouples were placed at the centers of the cells in the battery module. Thermal cabin, DC power unit and data collector were used to make measurements. In summary, since it is an experimental based study where many disciplines come together and different test and measurement devices are used, this thesis will be a reference for other theses and articles related to electric vehicle battery designs.

Key words: Electric vehicle, electrical vehicle battery module, cooling plate, thermal management, battery module cooling, pouch cell, lithium-ion battery
2025, xiv + 72 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisansa başlamam konusunda yönlendirme ve motivasyonumu sağlayan, her zaman değerli desteğini hissettiğim; ülkemize elektrikli araçlar ve batarya teknolojileri alanında çok değerli katkıları olmuş Doç. Dr. Halil Sadettin HAMUT'a, teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim ve tez sürecimde katkılarını ve desteklerini esirgemeyen Anıl DEMİRKESEN, Kadir ARAS, Oğuz TORUNOĞLU, Gökhan ERDOĞAN ve Cihan KARTALMİŞ başta olmak üzere Siro Silk Road Temiz Enerji Depolama Teknolojileri San. ve Tic. A.Ş. ailesine teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecim boyunca değerli bilgi, beceri ve yönlendirmeleri ile her zaman değerli katkıları ve emeklerini hissettiğim kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN'e ve tüm süreçlerde her zaman için desteklerini esirgemeyen Arş. Gör. Berkay TAHİRAĞAOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Üç boyutlu metal yazıcı ile soğutma plakası üretimi sırasında gösterdiği destek için Enes Furkan SEVİNÇ'e ve ayrıca deneysel çalışmalarda gösterdiği yakın ilgi ve desteklerinden dolayı Gökhan DEMİRÖZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecimde sağladığı test altyapısı ve hedeflediği misyon ile bu tezin ortaya çıkmasında katkı sunan TÜBİTAK 1004 Mükemmeliyet Merkezi Destek Programı kapsamında desteklenen 22AG001 numaralı Elektrikli Taşıtlar İçin Batarya Teknolojileri Araştırma ve Geliştirme Platformu'na teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim ve tez sürecim boyunca her zaman desteklerini, emeğini ve sevgisini esirgemeyen; bu süreçte sabrı, anlayışı ve teşvikleri ile her an yanımda olan sevgili ve değerli eşim Doktorant/Öğretmen Aygün YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım. Her ne kadar farkında olmasalar da var olmaları fazlasıyla yeterli olan oğlum Yavuz (8) ve kızım Zehra'ya (4) sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım. Bugünlere gelmemde büyük fedakarlıklarla yanımda olan, duaları ve emekleriyle her zaman destek veren annem ve babama saygılarım ve sevgilerim ile teşekkürlerimi sunarım.

Selim YILMAZ
02/06/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xii
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER 3
2.1. Elektrikli Araçların Gelişim Evreleri 3
2.2. Elektrikli Araç Bataryalarının Gelişim Evreleri 4
2.3. Batarya Paketi Yapıları 6
2.3.1. Modülden pakete (Module-to-Pack, MTP) sistemler 7
2.3.2. Hücreden pakete (Cell-to-Pack, CTP) sistemler 7
2.3.3. Hücreden şasiye (Cell-to-Chassis, CTC) sistemler 8
2.4. Batarya Alt Komponentleri 9
2.4.1. Hücre (Cell) 10
2.4.2. Modüller (Battery Modules) 16
2.4.3. Soğutma plakası (Cooling Plate) 19
2.4.4. Taşıyıcılar (Battery Carrier Structures) 25
2.4.5. Batarya yönetim sistemi, BMS (Battery Management System) 25
2.4.6. Modül izleme sistemi, CSC (Cell Supervisory Circuit) 27
2.5. Batarya Charge-Discharge Prensipleri 27
2.5.1. Temel kavramlar 27
2.5.2. Şarj kavramı ve stratejileri 28
2.5.3. Deşarj kavramı ve stratejileri 29
3. MATERYAL ve YÖNTEM 31
3.1. Soğutma Plakası Tasarımı ve Üretimi 31
3.2. Batarya Modülü Genel Görünümü ve Temel Kısımları 33
3.3. Soğutma Plakası ve Modül entegrasyonu 36
3.4. Deney Düzeneği Kritik Bileşenleri, Deney Düzeneği ve Çalışma Prensibi 39
3.5. Deney Planı 46
3.6 Soğutucu Plaka Performansının Değerlendirilmesi 47
3.7. Deneysel Hata Analizi 48
4. BULGULAR 49
4.1. Deney Sonuçları ve Oluşturulan Grafikler 49
4.2. Termal Kamera Görüntüleri 59
4.3. Soğutma Sıvısının Sıcaklık Değerinin Deney Sonuçlarına Etkisi 59
4.4. Şarj Akımının Deney Sonuçlarına Etkisi 61
4.5 Soğutucu Plaka Performansının Hesabı 62
4.6 Hücrelerin Homojen Soğutulması Açısından Değerlendirme 63
4.7 Genel Değerlendirme 65
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 67
KAYNAKLAR 69
ÖZGEÇMİŞ 72

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
C	Kapasite (Ah)
E	Kapasite (Wh)
I	Akım (A)
P	Güç (W)
V	Gerilim (V)
$\dot{Q}$	Isı Transfer miktarı (W)
$\dot{m}$	Kütlesel debi (kg/s)
C_p	Özgül ısı (kj/kg°C)
ΔT	Sıcaklık farkı (°C)

Kısaltmalar	**Açıklama**
3D	Üç boyutlu
BMS	Batarya Yönetim Sistemi
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CC	Sabit Akım
CCV	Kapalı Devre Gerilimi
COP	Performans Katsayısı (Coefficient of Performance)
C-rate	Şarj-Deşarj hızı
CSC	Modüle izleme sistemi
CTC	Cell-to-Chassis (Hücreden Şasiye)
CTP	Cell-to-Pack (Hücreden Pakete)
CV	Sabit Gerilim
DC	Doğru Akım
EV	Elektrikli Araçlar
HEV	Hibrit Elektrikli Araçlar
LCO	Lityum-Kobalt oksit
LFP	Lityum-Demir-Fosfat
LMO	Lityum-İyon Manganez Oksit
MTP	Module-to-Pack (Modülden Pakete)
NCA	Nikel-Kobalt-Alüminyum oksit
NiCd	Nikel-Kadmiyum
NMC	Nikel-Mangan-Kobalt
OCV	Açık Devre Gerilimi
P	Paralel Bağlantı
PbA	Kurşun-Asit
PCM	Faz Değiştiren Malzeme
S	Seri Bağlantı
SOC	Şarj Durumu
TIM	Termal İletkenlik Macunu

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.3.	Hücre-modül-batarya paketi kavramları şematik gösterimi	6
Şekil 2.4.	Batarya konsept gösterimi ve tipik bileşenleri	10
Şekil 2.4.1.	Hücrelerin kritik bileşenleri ve lityum-iyon batarya hücresinin çalışma prensibi	10
Şekil 2.4.1.1.	Silindirik tipi hücrelerin şematik görseli ve kritik komponentleri	12
Şekil 2.4.1.2.	Prizmatik tipi hücrelerin şematik görseli ve kritik komponentleri	13
Şekil 2.4.1.3.	Kesecik tipi hücrelerin şematik görseli ve kritik komponentleri	14
Şekil 2.4.1.4.	Düğme tipi hücre şematik görseli ve kritik komponentleri	14
Şekil 2.4.1.5.	Blade tipi hücre görseli ve kritik komponentleri	15
Şekil 2.4.1.6.	Tabsız tipi hücre görseli ve kritik komponentleri	15
Şekil 2.4.2.1.	Şematik olarak seri bağlantı gösterimi.	17
Şekil 2.4.2.2.	Şematik olarak paralel bağlantı gösterimi.	17
Şekil 2.4.2.3.	Şematik olarak seri ve paralel bağlantı gösterimi.	18
Şekil 2.4.3.1.	Lityum-iyon bataryaların optimum çalışma sıcaklığı.	20
Şekil 2.4.5.	BMS blok diyagramı.	26
Şekil 3.1.1.	Eklemeli imalat cihazının genel görseli ve teknik özellikleri	31
Şekil 3.1.2.	Batarya modülü soğutucu plakası genel görünümü	32
Şekil 3.1.3.	Batarya modülü soğutucu plakası üretim fotoğrafları	33
Şekil 3.2.	Batarya modülünün genel görünümü ve komponentleri	35
Şekil 3.3.	Soğutma plakası ve modül entegrasyonu.	37
Şekil 3.4.1.	Deney düzeneği kritik bileşenleri ve şematik gösterimi	41
Şekil 3.4.2.	Deney düzeneği kritik bileşenleri ve ilgili bileşenlerin konumları	42
Şekil 4.1.	Sıcaklık-Zaman ve Sıcaklık-Voltaj grafikleri	50
Şekil 4.2.	Termal kamera sıcaklık ölçüm görselleri	59
Şekil 4.6.	Şarj verilerine ait hücre sıcaklıklarının anlık sıcaklık farkı grafiği (Sıcaklık-Zaman)	64

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.3.1.	Modülden pakete batarya sistemlerinin avantajları ve dezavantajları	7
Çizelge 2.3.2.	Hücreden pakete batarya sistemlerinin avantajları ve dezavantajları	8
Çizelge 2.3.3.	Hücreden şasiye batarya sistemlerinin avantajları ve dezavantajları	9
Çizelge 2.4.1.1.	Silindirik hücrelerin avantajları ve dezavantajları	11
Çizelge 2.4.1.2.	Prizmatik hücrelerin avantajları ve dezavantajları	12
Çizelge 2.4.1.3.	Kese tipi hücrelerin avantajları ve dezavantajları	13
Çizelge 2.4.3.	Sıvı soğutmalı sistemler ile hava soğutmalı sistemlerin karşılaştırması	24
Çizelge 2.5.1.	Şarj-Deşarj sırasında OCV ve CCV karşılaştırması	28
Çizelge 3.2.	Batarya modülü elektriksel özellikleri	36
Çizelge 3.5.a.	Deneyde sabit olarak belirlenen bilgiler	46
Çizelge 3.5.b.	Deney planı ve deneyde değişken olarak belirlenen bilgiler	47
Çizelge 3.7.	Kritik ekipmanların listesi ve ölçüm toleransları	48
Çizelge 4.3.	Farklı soğutma suyu sıcaklıkları ile 1.3C Şarj Verileri	60
Çizelge 4.4.	15°C Soğutma suyu sıcaklıkları ile 1.3C ve 0.8C şarj verilerinin karşılaştırması	61
Çizelge 4.5.	Gerçekleştirilen testler için soğutma plakası ısı transfer miktarları	62
Çizelge 4.6.	Şarj verilerine ait hücre sıcaklıklarının anlık olarak farkı	64
Çizelge 4.7.a.	Toplam sıcaklığı düşürmekte yapılan minimum etki	65
Çizelge 4.7.b.	10. Hücre için sıcaklığı düşürmekte yapılan maksimum etki	66

1. GİRİŞ

Günümüzde çevresel sorunların artması ve sürdürülebilirlik alanında bilincin artmasının tetiklemiş olduğu daha çevreci akımlardan etkilenen sektörlerde bir tanesi de otomotiv sektörüdür. Son birkaç on yılda, petrole olan bağımlılık, artan fiyatlar, çevresel kirlilik ve küresel ısınma konusundaki endişeler, alternatif enerji kaynaklarına sahip araçlar üzerine aktif araştırmalar yapılmasına yol açmıştır. Enerji yoğunluğu, maliyet ve boyut açısından batarya teknolojilerinde yaşanan son gelişmeler sayesinde, elektrikli araç (EV) ve hibrit elektrikli araç (HEV) teknolojileri önemli ölçüde gelişmiş ve birçok alanda geleneksel araçlara ciddi bir alternatif haline gelmiştir. Bu araçlar, düşük işletme maliyetleri ve (EV'ler için neredeyse sıfıra yakın) emisyonlarla, günümüzün geleneksel araçlarına ilişkin temel sorunlara çözüm sunmaktadır (Hamut, Dincer, Naterer, 2013).

Elektrikli araç teknolojilerinin gelişebilmesi için en temelde elektrik depolama sistemleri yani araç bataryalarının geliştirilmesi büyük öneme sahiptir. Batarya sistemlerinde, performans, güvenlik ve ömür gibi birçok etmen geliştirilmeyi bekleyen özellikler arasındadır. Bu özellikleri tetikleyen ve etkileyen en önemli etmenler arasında elektriksel ve ısıl davranışların hücre, modül ve paket seviyesinde izlenmesi ve yönetilmesi kritik öneme sahiptir.

Hücre tipi, batarya paket stratejisi, modül stratejisi, batarya yönetim sistemi ve batarya termal yönetim sistemi bataryanın verimi ve güvenliğini doğrudan etkileyen sistemlerdendir. Bu sistem ve özellikler teorik bilginin yanında deneysel olarak incelenmesi ve optimize edilmesi önemlidir.

Tezde, termal yönetimin sisteminin bir parçası olan batarya modülü için elektriksel ve ısıl davranışların deneysel olarak incelemesi başlıklı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Farklı soğutucu plaka akışkan sıcaklıklarında ve farklı şarj ve deşarj oranlarında yapılan testler ile modül üzerindeki sıcaklık değişimleri gözlemlenmiştir., seri ve paralel bağlantı stratejilerinin sistem üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.
Tez çalışması kapsamında ilk olarak elektrikli araçlar ve batarya teknolojilerinin gelişimi teorik olarak ele alınmış, ardından batarya paketi yapıları, hücre tipleri, bağlantı

stratejileri ve ısıl sistemler üzerine literatür temelli incelemelere yer verilmiştir. Devamında yapılan deneysel uygulamalarla birlikte elde edilen bulgular yorumlanmış ve sonuçlar bölümünde değerlendirmeler sunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Elektrikli Araçların Gelişim Evreleri

19. yüzyılın sonlarına doğru geliştirilen elektrik motorları sayesinde elektrikli taşıtların ilk örnekleri görülmeye başlanmıştır. Şehir içi ulaşımlarında konforlu ve sessiz bir alternatif olarak ön plana çıktı ve dikkatleri üzerine çekmiştir. İlk elektrikli araçlar 1880'lerde üretilmeye başlanmıştır. 1900'lerin başında ABD başta olmak üzere Avrupa'da büyük bir ilgi görmeye başlanmıştır. Dönemin elektrikli araçları, görece kısa menzilleri ve düşük hızları olmasına rağmen içten yanmalı araçlarla kıyaslandığında sessiz ve konforlu olmaları bakımından belirgin bir fark ortaya koymuşlardır.

20.yüzyılın ortalarında, petrolün ucuz ve erişebilir hale gelmesinden dolayı ve yakıt istasyonlarının altyapılarının hızla yaygınlaşmasıyla içten yanmalı motorlar ve bu motorların teknolojilerinde büyük gelişmeler yaşandı. Bu atılımla birlikte, elektrikli araçlara göre içten yanmalı motorlara sahip araçlar teknik üstünlük elde etmiştir. Kısa menzilleri, düşük hızları ve elektrik şarj altyapılarının sınırlı olmasından dolayı dezavantajlı durumda olan elektrikli araçlar bu dönemde gerileme gösterdi.

1990'lı yıllara gelindiğinde, küresel ısınmaya karşı artan bilinç, karbon ayak izinin takibi ve karbon salınımını azaltmaya yönelik yasal mevzuatlar zorunlu hale gelmeye başladı. Bu mevzuatların her geçen gün daha sıkı takibi ve gerekliliklerinin zorlaşması sebebi ile elektrikli araçların tekrar gündeme gelmesine zemin hazırladı. Buna rağmen yüksek batarya maliyetleri ve sınırlı menzil sorunları elektrikli araçların yaygın kullanımlarının önünde bir engel olarak kalmaya devam etmiştir.
2008 sonrasında, lityum-iyon batarya teknolojisinin gelişimi sayesinde elektrikli araç teknolojisi büyük bir atılım yapmıştır. Bazı doğuştan elektrikli araç üreticilerinin ortaya çıkması, bazı içten yanmalı araç üreticilerinin mevcut altyapılarını elektrikli araçlara çevirmesi ve/veya araç üreticilerinin yeni bir altyapı tasarımı ile elektrikli araçlar üretmeye başlamasıyla sektör giderek büyümüştür. Bu gelişmelerin ardından, birçok araç üreticisi elektrikli araçlara yatırım yaptı veya mevcut yatırımlarını arttırmıştır. Böylece bu üreticilerin öncülüğünde modern elektrikli araçlar dönemi başlamıştır.

Geleceğe yönelik tahminler, yeni batarya teknolojilerinin gelişmesi, bataryaların daha güvenli hale gelmesi, çevreye verdiği göreceli zarar giderek azaltılması, geri dönüşüm imkanlarının artması, bataryaların ultra hızlı şarj özelliğine kavuşması ve şarj altyapılarının yaygınlaşması, depolanan enerjinin artması ve menzillerin artması ile pazarda daha büyük bir yer bulacaktır. Ayrıca elektrikli araçlar ile akıllı ve otonom sürüş teknolojilerinin entegrasyonu önümüzdeki dönemde giderek artacaktır. Sonuç olarak, önümüzdeki kısa bir dönemde daha uzun menzilli, daha kısa şarj süreleri, daha akıllı ve otonom, çevreye duyarlı araçlar görmeye başlayabiliriz.

2.2. Elektrikli Araç Bataryalarının Gelişim Evreleri

Erken dönemde kullanılan bataryalar genelde Kurşun-Asit (PbA) ve Nikel-Kadmiyum (NiCd) gibi bataryalardı. Kurşun-Asit bataryalar düşük maliyetleri ve üretim kolaylığı bakımında tercih edilmişlerdi ancak bunlara karşın düşük enerji yoğunluğundan dolayı (25-40 Wh/kg) ağırlardı ve bu sebepten menzili sınırlamıştır (Liu vd., 2017).

20. yüzyılın başlarında daha yüksek çevrim ömrü ve daha iyi performans sağlaması sebebi ile Nikel-Kadmiyum bataryalar üzerine durulmaya başlanmıştır. Kurşun-Asid bataryalara göre Nikel-Kadmiyum bataryalar daha uzun çevrimler sağladı ancak çevreye verdiği zararlar ve bataryada oluşan hafıza etkisi sebebi ile sürdürülebilir olmamıştır.

Lityum-iyon bataryalar eski nesil bataryalara göre çok daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasından dolayı daha düşük ağırlık daha uzun menzile imkan tanımıştır. Silikon anot malzemeli lityum iyon bataryalar ~ 500 Wh/kg varan enerji yoğunluğu sunar (Niu vd., 2024). Ayrıca düşük oranda kendiliğinden deşarj (self discharge) oranları ve daha kısa şarj süreleri ile otomotiv sektörü açısından daha kullanışlı olduğunu kanıtlamıştır. Sektörde yaşanan gelişmelerle günden güne Lityum-iyon bataryalar daha ekonomik, daha güvenilir ve daha çevreci hale gelmektedir.

Elektrikli araçlar için bataryalar, enerji yoğunluğunu arttırma, maliyetini düşürme, güvenliğini arttırma ve daha çevreci olma hedefleri doğrultusunda gelişim

göstermektedir. Günümüzde çoğunlukla Lityum-Demir-Fosfat (LFP), Nikel-Mangan-Kobalt (NMC), Lityum-Kobalt oksit (LCO), Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum oksit (NCA) ve Lityum-İyon Manganez Oksit (LMO) kimyalarını içeren Lityum-iyon bataryalar üzerinde durulmaktadır (Koech vd., 2024). Uygulama alanlarına göre her biri valide ve optimize edilmektedirler. Elektrikli araçlarda hem menzil artışı beklentisi hem de ulusal ve uluslararası yönetmeliklerce güvenlik şartlarının arttırılmasından dolayı daha yüksek enerji yoğunluğu ve daha güvenilir batarya geliştirilmesini zorunlu kılmıştır.

Günümüzde Batarya Yönetim Sistemi (BMS), bataryalara entegre edilerek batarya hücreleri veya kritik bölgelerinden sıcaklık ve voltaj ölçümleri yapılarak batarya doluluk seviyesi tahminleri, batarya sağlığı tahminleri ve kalan batarya kullanım ömrü tahminleri gibi algoritmalarla batarya sağlığı, batarya ömrünü uzatma ve bataryadan maksimum verimi alma üzerine çalışmalar yapılmıştır. Batarya yapıları, paketleme teknikleri ve batarya termal yönetimi iyileştirme ve geliştirme süreçlerinde dönemin kritik adımları olarak yer almaktadır (Li vd.,. 2025)

NMC (Nikel-Mangan-Kobalt) ve NCA (Nikel-Kobalt-Alüminyum) gibi katot kimyaları, yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ancak ek olarak termal stabilizasyon ve güvenlik tedbirlerini almak önemlidir. Diğer taraftan LFP (Lityum Demir Fosfat) bataryalar, termal stabilizasyon açısından daha iyi, daha uzun döngü ömrü ve daha güvenilir olsa da NMC ve NCA bataryalara göre enerji yoğunluğu daha düşük ve daha ağırdırlar (Ohneseit vd., 2023).

Özetle, enerji yoğunluğu arttıkça termal stabilizasyon ve yangına karşı güvenlik sistemleri daha da önem kazanırken yine de tüm bataryalar için gelişmiş soğutma sistemleri ve yangın önleyici güvenlik tedbirleri almak sürdürülebilir olması açısından çok önemlidir.

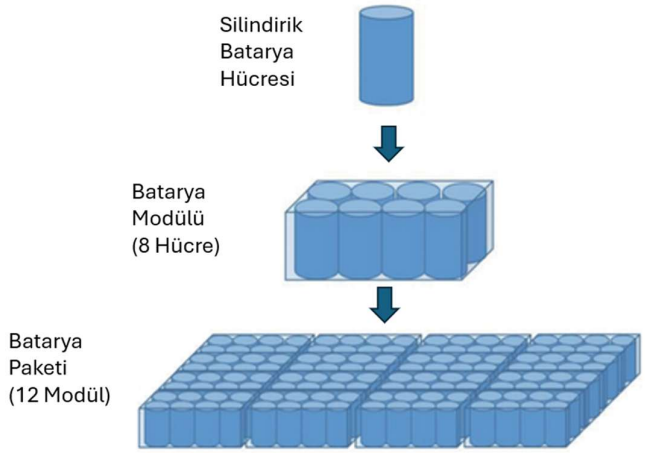
Gelecekte erişilmek istenen hedef olarak batarya teknolojilerinde, şarj süresini kısaltmak, enerji yoğunluğunu arttırmak, çevrim ömrünü arttırmak, daha ekonomik bataryalar üreterek erişilir hale getirmek, daha güvenli bataryalar geliştirmek ve batarya

hücre kimyaları ve komponentlerinin içeriğini daha da çevreye duyarlı hale getirmek yer almaktadır (Hasan vd., 2025).

2.3. Batarya Paketi Yapıları

Elektrikli taşıtlarda batarya paketi yapıları olarak geleneksel yöntemler göz önüne alındığında daha çok Hücreden Pakete (Cell-to-Pack, CTP) ve Modülden Pakete (Module-to-Pack, MTP) tercih edilirken son yıllarda hücrelerin drekt olarak araca entegre edildiği Hücreden Şasiye (Cell-to-Chassis, CTC) gibi yapılar ön plana çıkmaktadır. Ve gelecekte bu yapıların birkaçının birleştiği hibrid çözümler yapılabilir (Kampker vd., 2023).

Sonraki bölümlerde detaylandırılacak olan hücre, modül ve batarya paketi kavramlarını CTP, MTP ve CTC yapılarını daha iyi anlayabilmek için Şekil 2.3.'de şematik olarak verilmiştir (Li vd., 2018).



Şekil 2.3. Hücre-modül-batarya paketi kavramları şematik gösterimi (Li vd., 2018).

Hangi sistem kullanılırsa kullanılsın batarya teknolojilerinin temel yönelimi maksimum enerji yoğunluğu sağlamak, üretim maliyetlerini düşürmek, mekanik dayanımı arttırmak, çevreye duyarlı olmak ve araç mimarisine maksimum oranda uyumlu olmak yer almaktadır.

2.3.1. Modülden pakete (Module-to-Pack, MTP) sistemler

Module to Pack (MTP) sistemlerde, hücreler seri-paralel şeklinde elektriksel bağlantılarla küçük alt birimler olarak ifade edilebilecek modülleri oluşturur. Modüller seri-paralel şeklinde bir araya gelerek ise batarya paketini meydana getirir (Shinde vd., 2023). MTP yaklaşımının sunduğu avantaj ve dezavantajlar Çizelge 2.3.1.'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.3.1. Modülden pakete batarya sistemlerinin avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	**Dezavantajlar**
Bir hücrede sorun oluşması durumunda, paket içerisindeki ilgili hücrenin bulunduğu modülü değiştirmek yeterlidir. Düşük tamir maliyetleri sağlar.	Modüller arası ara yapısal elemanlar bulunmasından dolayı daha ağır olabilirler.
Modül kombinasyonları farklı araç yapıları için de paket oluşturularak kullanılabilir.	Yapısal elemanlar paket içerisinde belli bir hacim kaplar, bu alana hücre entegre edilemediği için görece düşük enerji kapasitesine sebep olur. Bu durum araç tarafı için görece daha düşük menzile sebep verir.

2.3.2. Hücreden pakete (Cell-to-Pack, CTP) sistemler

Cell to Pack (CTP) sistemlerde, hücreler doğrudan batarya paketine entegrasyonu sağlanarak arada farklı modül gibi taşıyıcı elemanlar bulunmadan doğrudan batarya paketi oluşturulması sağlanır (Shen vd., 2022). CTP yaklaşımının sunduğu avantaj ve dezavantajlar Çizelge 2.3.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.3.2. Hücreden pakete batarya sistemlerinin avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	**Dezavantajlar**
Doğru tasarım ile, ara taşıyıcı elemanlar bulunmadığı için paket içerisinde hücreler için daha geniş alanlar oluşma imkanı tanır ve batarya depolama kapasitesini arttırmaya fırsat sağlar.	MTP tasarımına göre, termal yönetimi çok daha karmaşık ve pahalı bir çözüm olabilir.
MTP tasarımına göre daha hafif bataryalar oluşturmaya olanak tanır.	Hücre arızalarının tüm paketin performansını etkileme riski daha yüksektir. Ve tamiri daha maliyetli olabilir.
Daha yalın üretim ve daha ekonomik batarya çözümleri sunabilir.	
Daha hafif ve enerji yoğunluğu arttırılmış bir batarya tasarımı düşünüldüğünde daha uzun menzil imkanı sağlayabilir.	

2.3.3. Hücreden şasiye (Cell-to-Chassis, CTC) sistemler

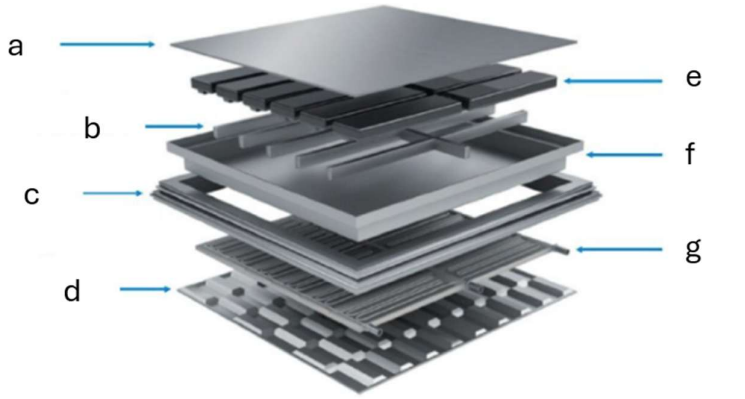
Cell to Chassis (CTC) sistemlerde, hücreler doğrudan aracın şasisi üzerine entegre edilirler. Batarya paketi aracın bir parçası olarak düşünülür ve bataryalar için olması gereken mekanik dayanım beklentisinin büyük bir kısmını araç şasisi sağlar (Jin vd., 2022). CTC yaklaşımının sunduğu avantaj ve dezavantajlar Çizelge 2.3.3'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.3.3. Hücreden şasiye batarya sistemlerinin avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	**Dezavantajlar**
Hücreler doğrudan araç şasisi üzerine entegre edilerek maksimum hücre sayısı kullanılır. Böylece batarya depolama kapasitesi en üst seviyede kullanılır.	Mekanik dayanım çok daha önem kazanır, özellikle çarpışmaya karşı güvenlik çözümleri daha karmaşık hale gelebilir.
Taşıyıcı yapıların büyük bir bölümü ortadan kaldırıldığı için toplam batarya (araç) ağırlığı azalmış olur.	Hücre arızalanmalarında tamir işlemleri daha zorlu ve maliyetli olabilir.
Depolama kapasitesinin artması ve araç ağırlığının azalmasından dolayı menzil artırışı sağlanır.	Termal yönetim daha karmaşık hale gelebilir.
Azalan parça adedi sebebi ile, doğru bir tasarımla daha yalın bir üretim ve daha ekonomik bir batarya oluşturulmuş olur.	

2.4. Batarya Alt Komponentleri

Batarya sistemleri, elektrikli araçlarda sadece enerji depolama birimi olarak görev almazlar. Aynı zamanda karmaşık termal yönetim, karmaşık voltaj, sıcaklık, akım, güvenlik vb algoritmaların yönetildiği ve araç için mekanik bütünlük sağlayan bütüncül bir sistemdir. Bu sistemin verimli, uzun ömürlü ve güvenli olabilmesi için birçok alt komponentin birlikte bir uyum içerisinde çalışması gerekmektedir. Batarya ana komponentleri olarak Hücre, Modül, Soğutma Plakası, Taşıyıcı Yapı, Koruyucu Yapı, Batarya Yönetim Sistemi (BMS) ve Modül İzleme Sistemi (CSC) gösterilebilir. Batarya konsept gösterimi ve tipik bileşenleri Şekil 2.4.'de verilmiştir. (Belingardi ve Scattina, 2023)

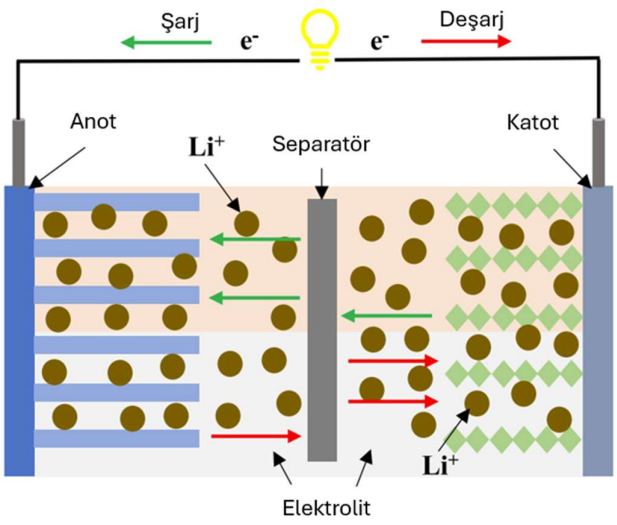


a: Kapak
b: Kiriş İskelet
c: Çarpışma Koruyucu
d: Alt Gövde Kalkanı
e: Batarya Modülü
f: Dış Kabuk
g: Su Soğutmalı Sistem

Şekil 2.4. Batarya Konsept Gösterimi ve Tipik Bileşenleri (Belingardi ve Scattina, 2023).

2.4.1. Hücre (Cell)

Hücre, kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü temel birimdir. Her hücre , anot, katot, separatör, elektrolit gibi alt komponentlerden oluşur (Liu vd., 2016). Hücrelerin kritik komponentleri ve çalışma prensibi aşağıda lityum iyon batarya diyagramı üzerinde Şekil 2.4.1. de verilmiştir.



Şekil 2.4.1. Hücrelerin kritik bileşenleri ve lityum-iyon batarya hücresinin çalışma Prensibi (Hasan vd., 2025)

Hücrelerin performans kriterleri değerlendirildiğinde, Enerji yoğunluğu (Wh/kg), Döngü ömrü (life cycle), Şarj-deşarj hızları (C-rate), ağırlığı, boyutları ve termal stabilizesi göz önünde bulundurulur.

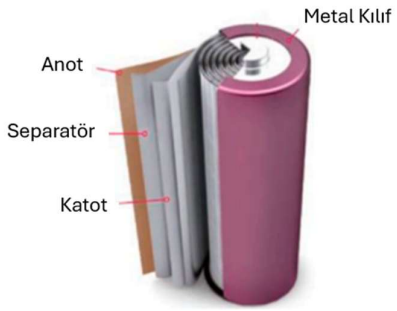
Hücreler, maliyet, performans, güvenlik, hacim, ağırlık gibi etmenler değerlendirilerek farklı geometrilerde üretilebilirler, bu kriterlerin temel amacı optimum şartlarda performans sağlamaktır. Ayrıca hücrelerin performansını doğrudan etkileyen diğer etmenler hücrenin iç yapısı ve kimyasal yapılarıdır.

Silindirik hücreler, çok uzun yıllardan beri kullanılan önceleri tüketici elektroniği için geliştirilmiş sonrasında elektrik araç bataryalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmış olan silindirik formdaki hücrelerdir. Silindirik hücrelerin sunduğu avantaj ve dezavantajlar Çizelge 2.4.1.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.4.1.1. Silindirik hücrelerin avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	**Dezavantajlar**
Yüksek mekanik dayanım	Hücreler arası boşluktan dolayı batarya paketi içerisinde kullanılamayan alan fazladır.
düşük maliyet	Batarya paketinin genel enerji yoğunluğunu Wh/kg olarak negatif yönde etkiler.
Homojen ısı dağılımı	

Silindirik hücrelerin kritik bileşenleri ve şematik genel görünümü Şekil 2.4.1.1.'de verilmiştir.



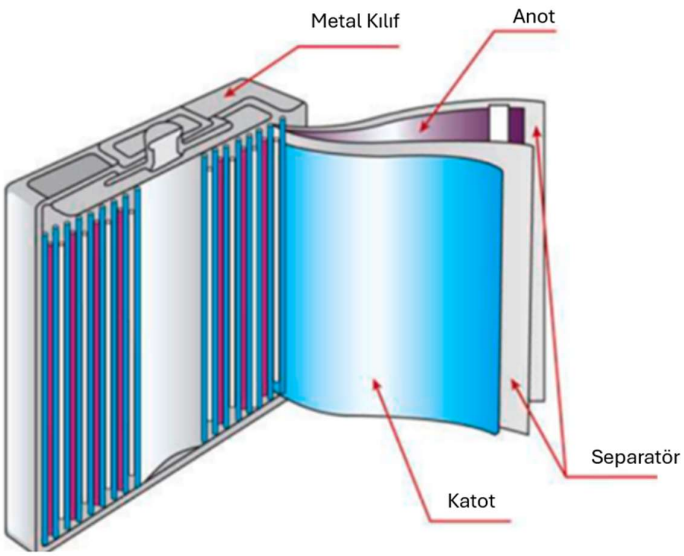
Şekil 2.4.1.1. Silindirik tipi hücrelerin şematik görseli ve kritik komponentleri (Saber vd., 2025)

Prizmatik hücreler, dikdörtgen biçimde olup, alüminyum veya çelik gibi taşıyıcı bir kasa içerisine yerleştirilmişlerdir. İhtiyaca göre boyutları veya kapasiteleri kolaylıkla optimize edilerek batarya içi hacim ve paketleme verimliliği arttırılabilir. Bu hücrelerin esnek tasarım olanaklarından dolayı otomotiv sektörü için özellikle geliştirilmişlerdir. Prizmatik hücrelerin sunduğu avantaj ve dezavantajlar Çizelge 2.4.1.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.4.1.2. Prizmatik hücrelerin avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	**Dezavantajlar**
Alan kullanımını efektif olarak değerlendirilebilir.	Homojen ısı dağılımını sağlamak zordur, Isıl yönetim zorlaşır.
Hücre yoğunluğu ve enerji kapasitesi artırılabilir.	Dışında alüminyum veya çelik gibi taşıyıcı bir kasa bulunmasından dolayı hücre ağırlığı yüksektir.

Prizmatik hücrelerin kritik bileşenleri ve şematik genel görünümü Şekil 2.4.1.2'de verilmiştir.



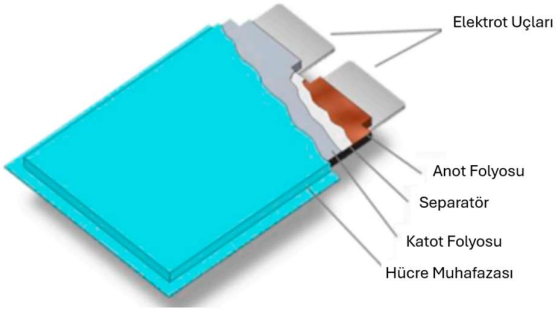
Şekil 2.4.1.2. Prizmatik Tipi Hücrelerin Şematik Görseli ve Kritik Komponentleri (Saber vd., 2025)

Poşet/kese tipi hücreler, yassı formda, elektrotların düz tabakalar şeklinde serilen ve minimal paketleme mantığı ile alüminyum bir zarf içerisinde üretilmişlerdir. Hafif yapıları sayesinde modern bataryalarda çokça kullanılmaya başlanan hücre tipidir. Kese tipi hücrelerin sunduğu avantaj ve dezavantajlar Çizelge 2.4.1.3'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.4.1.3. Kese tipi hücrelerin avantajları ve dezavantajları

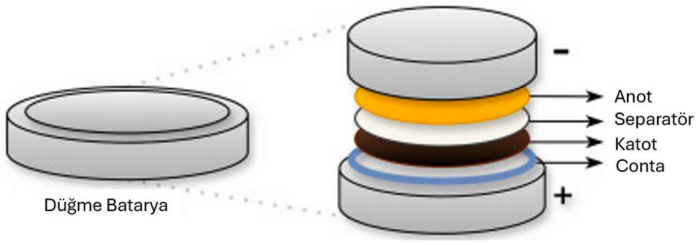
Avantajlar	**Dezavantajlar**
Hafiflik	Hücrenin mekanik dayanımı düşüktür. Mekanik dayanımı arttıracak paket tasarımı gerektirir
Doğru tasarım ile alan verimliliği yüksektir (minimum paket kaybı)	
Yüksek özgül enerji yoğunluğu sağlar (Wh/kg oranı yüksektir).	

Kesecik tipi hücrelerin kritik bileşenleri ve şematik genel görünümü Şekil 2.4.1.3.'de verilmiştir.



Şekil 2.4.1.3. Kesecik tipi hücrelerin şematik görseli ve kritik komponentleri (Saber vd., 2025)

Düğme (Coin) tipi hücreler, hücre araştırma veya geliştirme aşamasında kullanılan küçük boyutlu, düşük kapasiteli, yapımı kolay ve maliyeti düşük hücrelerdir. Özellikle hücrelerin elektrot malzemelerinin karakterizasyonu ve optimizasyonu için kullanılırlar. Otomotivde direkt olarak kullanımı için oldukça düşük kapasitede üretilirler. Düğme tipi hücrelerin kritik bileşenleri ve şematik genel görünümü Şekil 2.4.1.4.'de verilmiştir

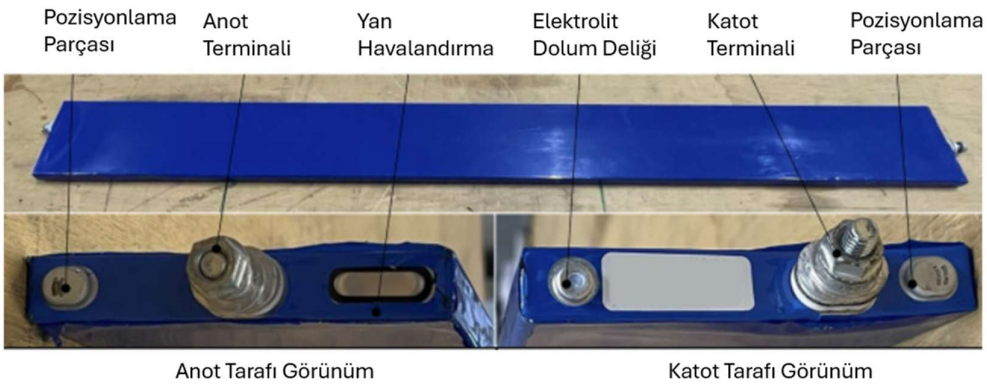


Şekil 2.4.1.4. Düğme tipi hücre şematik görseli ve kritik komponentleri (Silva vd., 2025)

Hibrid ve ileri hücre tasarımları, geleneksel hücre formlarından, boyutlarından, üretim yöntemlerinden veya kimyalarından saparak daha özel amaçlı ve hedeflerde olabilen hücrelerdir.

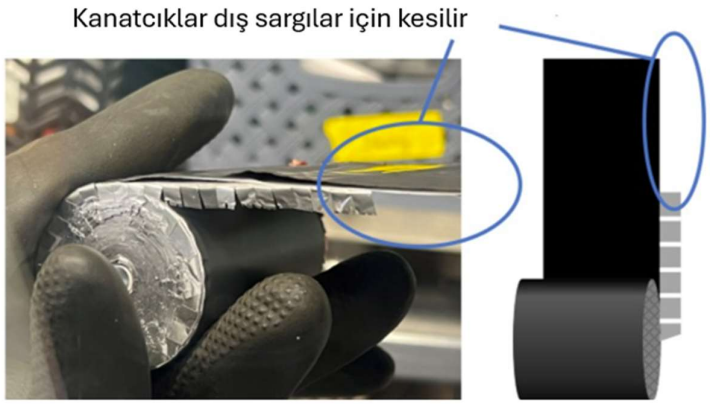
Blade (Bıçak) hücreler, geleneksel batarya modülü oluşturmak yerine batarya paketinin taşıyıcı yapısı üzerine uzun ince levhalar halinde direkt olarak dizilerek kullanılırlar. Belirli bir hacime daha çok hücre kapasitesi sığdırmak ve daha hafif batarya yapmak

hedeflenmiştir. Blade tipi hücrelerin kritik bileşenleri ve genel görünümü Şekil 2.4.1.5.'de verilmiştir



Şekil 2.4.1.5. Blade tipi hücre görseli ve kritik komponentleri (Gorsch vd., 2025)

Tabless (Tab'sız) electrode tasarımlı hücreler, silindirik hücre formundaki yapılarda hücrelerin tab kısımları kaldırılarak üretilmiştir. Daha az iç direnç ve daha az sıcaklık üretimi hedeflenmiştir. Tabsız tipi hücrelerin kritik bileşenleri ve genel görünümü Şekil 2.4.1.6.'da verilmiştir.



Şekil 2.4.1.6. Tabsız tipi hücre görseli ve kritik komponentleri (Börner vd., 2024)

Katı Hal (Solid-State) Geleneksel Li-ion pillerde (LIB'ler) kullanılan uçucu ve yanıcı sıvı elektrolitlerin (LE'ler) yanıcı olmayan katı elektrolitlerle (SE'ler) değiştirilmesi ile oluşturulmuştur. Daha güvenli batarya yapılması hedeflenmiştir (Bates vd., 2022).

Bunların yanında drekt hücre kimyaları ile ilgili olan “Silikon Anotlu Hücreler”, “Lityum Sülfür Hücreler” veya “Lityum Metal Hücreler” gibi hücreler geliştirilmiş ve üzerinde çalışılmaktadır. Temelde enerji yoğunluğunu arttırmak ve çevrim ömrünü uzatmak hedeflenmiştir.

2.4.2. Modüller (Battery Modules)

Modül, birden fazla hücrenin belirli seri ve paralel bağlantıların mekanik olarak sabitlenmesi ile bir araya gelerek istenen elektriksel özelliğe sahip olan bir alt birimdir. Modül tasarımı yapılırken, Enerji yoğunluğu (Wh/kg), Döngü ömrü (life cycle), Şarj-deşarj hızları (C-rate), ağırlığı, boyutları ve termal stabilizesi göz önünde bulundurulur. Batarya modülünün konsept olarak gösterimi önceki maddelerde Şekil 2.4.’de verilmiştir (Belingardi ve Scattina, 2023)

Batarya paketinin istenen elektriksel özelliklere sahip olabilmesi için eğer paket stratejisi Cell to Pack ise hücrelerin, Module to Pack ise hem modül içerisindeki hücrelerin hem de modüllerin kendi aralarında seri, paralel bağlantıları yapılarak istenilen elektriksel özellikler sağlanır. Bu sayede hedeflenen gerilim, akım ve kapasite değerlerine ulaşılmış olur. Bu sebeple hücrelerin ve/veya modüllerin uygun gruplar şeklinde istiflenmesi önemlidir.

Seri bağlantı, aynı fiziksel akımın ardışık olarak geçtiği iki ya da daha fazla elemanın oluşturduğu bağlantıdır (Skromme vd., 2022). Batarya hücrelerinde bir önceki hücrenin pozitif (+) kutbunun bir sonraki hücrenin negatif (-) kutpuna, bu hücrenin pozitif(+) kutbunun sonraki negatif (-) kutbuna bağlanarak ve bu şekilde aynı örüntü devam ettirilerek ardı ardına devam eden bağlantı şekli oluşturulan yapıya seri baülantı denir. Temel presip, sistemdeki toplam gerilimi arttırmaktır. Seri bağlantılarda akım tüm hücrelerde aynıdır.

İsimlendirme olarak kaç hücre seri bağlantı sağlandı ise yanına Serial (Seri) ifadesinin baş harfi olan “S” getirilir. Örneğin, 3S; 3 adet hücrenin seri olarak bağlandığını ifade

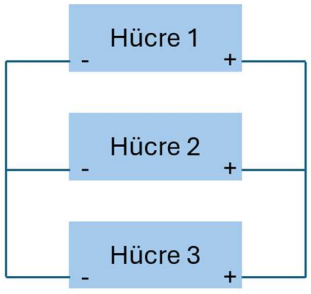
eder. Sistmede toplam 3 hücre vardır. Şematik olarak seri bağlantı gösterimini Şekil 2.4.2.1.'de verilmiştir.



Şekil 2.4.2.1. Şematik olarak seri bağlantı gösterimi (3S).

Paralel bağlantı, aynı iki düğüme bağlanmış elemanlar arasında oluşur. Bu elemanlar aynı potansiyel farkını paylaşır ve bu nedenle aynı gerilime sahiptir (Skromme vd., 2022). Batarya hücrelerinde bir önceki hücrenin pozitif (+) kutbun bir sonraki hücrenin pozitif (+) kutpuna, bir önceki hücrenin negative (-) kutbunun sonraki hücrenin negatif (-) kutbuna bağlanarak ve bu şekilde aynı örüntü ile yan yana devam eden bağlantı şekli oluşturulan yapıya paralel bağlantı denir. Temel prensip, sistemdeki toplam kapasiteyi arttırmaktır. Gerilim sabit tutularak akım arttırılmış olur.

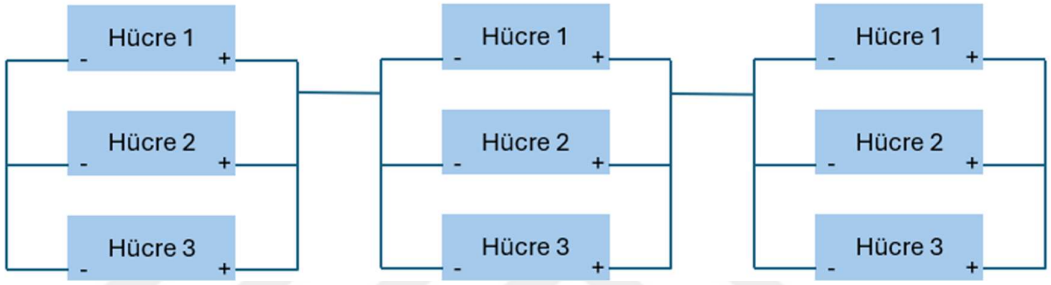
İsimlendirme olarak kaç hücre ile paralel bağlantı sağlandı ise ise yanına Paralel (Parallel) ifadesinin baş harfi olan "P" getirilir. Örneğin, 3P; 3 adet hücrenin paralel olarak bağlandığını ifade eder. Sistemde toplam 3 hücre vardır. Şematik olarak paralel bağlantı gösterimini Şekil 2.4.2.2.'de verilmiştir.



Şekil 2.4.2.2. Şematik olarak paralel bağlantı gösterimi.

Batarya tasarımlarında genellikle hem seri hem de paralel bağlantılar birlikte kullanılırlar. Bunun sebebi, hem gerekli gerilim seviyelerine hem de yeteri kadar kapasite ve akıma aynı anda ulaşabilmektir.

İsimlendirme olarak kaç hücre ile seri bağlantı ve kaç hücre paralel bağlantı sağlandı ise yanına uygun olarak Serial (Seri) ifadesinin baş harfi olan "S" ve Parallel (Paralel) ifadesinin baş harfi olan "P" harfi birlikte ve yan yana olacak şekilde kullanılır. Örneğin, 3S3P; 3 adet hücrenin paralel olarak bağlandığını ve toplamda bu paralel bağlantıların 3 adet seri olarak birbirine bağlandığını ifade eder. Sistemde toplamda 9 hücre vardır. Şematik olarak seri-paralel bağlantı gösterimini Şekil 2.4.2.3.'de verilmiştir.



Şekil 2.4.2.3. Şematik olarak seri ve paralel bağlantı gösterimi.

Seri-paralel bağlantıların ve kombinasyonların elektriksel sonuçlarını ve tanımları aşağıdaki gibidir.

- Toplam Gerilim (V): Seri bağlı hücrelerin/grupların gerilimlerinin toplamı.

$$V_{toplam} = V_1 + V_2 + V_3 + \cdots + V_n \quad (2.1)$$

- Toplam Akım (A): Paralel bağlı hücrelerin/grupların akımlarının toplamı.

$$I_{toplam} = I_1 + I_2 + I_3 + \cdots + I_n \quad (2.2)$$

- Toplam Kapasite (Ah): Paralel bağlı hücrelerin kapasitelerinin toplamı.

$$C_{toplam} = C_{tek\ bir\ hücrenin\ kapasitesi}\ N_{paralel\ hücre\ adedi} \quad (2.3)$$

- Enerji Kapasitesi (Wh): Bataryanın şarj edilerek depolayabildiği maksimum enerji miktarı

$$E = V_{toplam}\, C_{toplam} \tag{2.4}$$

- Güç Kapasitesi (W): Birim zamanda çekilebilecek maksimum enerji miktarı

$$P = V_{toplam}\, I \tag{2.5}$$

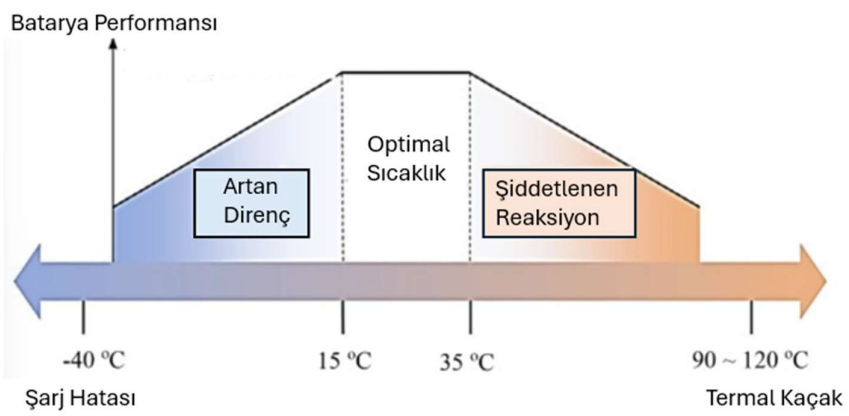
- C rate (A): Nominal kapasiteye göre çekilebilecek maksimum akım.

2.4.3. Soğutma plakası (Cooling Plate)

Soğutma plakası, bataryanın şarj-deşarj sırasında meydana gelen ısıyı batarya paketinden uzaklaştırmak için tasarlanmış bir komponenttir. Bataryalarda termal yönetim sistemi, bataryanın daha verimli şekilde çalışmasına destek veren ve batarya sıcaklığından doğabilecek olumsuz etkileri minimize edebilmesinden dolayı batarya güvenliğine önemli katkılar veren kritik bir komponenttir. Ayrıca doğru termal yönetimle batarya ömrüne katkı sağlamaktadır. Şekil 2.4.'de soğutma plakasının konsept olarak gösterimi önceki maddelerde verilmiştir (Belingardi ve Scattina, 2023).

Elektrikli araç bataryalarının güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışabilmeleri için batarya hücrelerinin ve/veya modüllerinin termal yönetiminin yapılması ve çalışması sırasında hücreleri üretici tarafından tavsiye edilen çalışma sıcaklığı arasında tutmak çok önemlidir. Literatürde bataryanın ideal çalışma sıcaklığı hücre tipine göre değişkenlik gösterse de genel olarak çalışma aralığı 15°C-35°C olarak belirtilmektedir. Bataryalar iki tür sıcaklık endişesine karşı hassastır, çalışma sıcaklığı izin verilen aralığı aşan ve düşük sıcaklıklar bozulmaya neden olarak pil ömrünü azaltır. Bataryalar, optimum performansı sağlamak için Şekil 2.4.3.1'de görüldüğü gibi 15–35 °C'lik dar bir sıcaklık aralığında çalıştırılmalıdır. Bataryalar çalışma aralıklarının dışındaki sıcaklıklarda çalıştırıldığında, güvenlikleri, performansları ve kullanım ömürleri etkilenecektir (Olabi vd., 2022). Batarya sistemleri, çalışması sırasında yani şarj-deşarj zamanında kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü gerçekleşir. Bu dönüşüm

sırasında hücre ve/veya modül ve/veya bataryanın iç yapısı veya bağlantılarından dolayı iç direnç ve kontak direnci oluşur. Bu dirençler hücrelerin ve/veya elektrik geçen komponentlerin ısınmasını sağlar. Bu ısıyı etkili bir şekilde uzaklaştırmak "Termal Yönetim Sisteminin" ana görevidir. Bununla beraber, bu sistem belli bir sıcaklığın altında olan soğuk hava şartlarında bataryanın çalışabilmesi için hücrelerin belirli bir çalışma sıcaklığına gelmelerini de sağlamaktadır. Bu bağlamda BMS',n görevi daha da önem kazanmaktadır. Bu tez kapsamında, batarya modülünün en kötü durum koşullarını simüle ederek modülü ne kadar soğutabileceğimizi görebilmek için bir soğutma plakası tasarlandı ve eklemeli imalat yöntemiyle üretilerek batarya modülüne entegrasyonu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.4.3.1. Lityum-iyon bataryaların optimum çalışma sıcaklığı (Olabi vd., 2022)

Soğutma plakası tasarımı yaparken öncelikle soğutma tipini doğru belirlemek gerekir. Termal yönetim gereksinimlerini karşılamak, operasyonel güvenilirliği sağlamak ve güvenlik tehlikelerini azaltmak için hava soğutma, sıvı soğutma, faz değişim malzemeleri (PCM) dahil olmak üzere uygun soğutma stratejileri seçilebilir. Sıvı soğutmada, sıvı soğutucu daha yüksek termal iletkenliğe ve ısı kapasitesine sahiptir, bu da soğutma verimliliğini önemli ölçüde artırabilir. Ancak, soğutma kanallarının yapısal düzeni ve soğutucu sızıntısı kullanıcılar için dikkate alınmalıdır. PCM'ler faz değişim süreci sırasında büyük miktarda gizli ısıyı emebilir veya serbest bırakabilir, bu nedenle pil hücrelerinin sıcaklığını ve sıcaklık farkını kontrol etmek ve pilin termal kaçışının oluşumunu bastırmak için kullanılır (Wang vd., 2021).

Soğutma plakaları tasarımı için diğer göz önünde bulundurulması gereken kavramalar aşağıdaki gibidir.

Isı İletkenliği: Daha efektif bir ısı transferi sağlayabilmesi için kullanılan malzemelerin ısıl iletkenliğinin yüksek olması gerekmektedir. (Genellikle Alüminyum veya bakır seçilir)

Ağırlık: Genel anlamda enerji yoğunluğunun yüksek bir batarya üretmek için cooling plate'inde hafif malzemelerden üretilmesi gerekmektedir. Ayrıca, ağırlık aracın menzilinede doğrudan etki etmektedir.

Mekanik Dayanım: Araçtan veya dış ortamdan gelen istenmeyen titreşim, şok, termal şok, korozyon vb etkikere karşı dayanıklı olmalıdır.

İç Kanal Yapısı: Sıvının veya kullanılması durumunda havanın soğutma plakası içerisinde hareket ederken maksimum verimlikte ısıyı taşıyabilmesi veya ısıyı ortamdan uzaklaştırabilmesi için kanalların veya yönlendiricilerin uygun geometriye sahip olması gerekmektedir.

Sızdırmazlık: Özellikle sıvı kullanılan sistemlerde sızdırmazlık batarya güvenliği açısından çok önemlidir. Bu sebeple bağlantılar, birleşim yerleri, sıvının giriş çıkış kısımları vb bölgelerin sıvı izolasyonuna dikkat edilmelidir.

Üretim yöntemleri hedeflenen kanal yapısına ve malzeme türüne bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Üretimde etkili olan bir diğer etken üretim yönteminin maliyetidir. Soğutma plakaları genellikle iki plakadan oluşmaktadır. Bunlardan biri düz formda olup bir diğeri desenli yapısı ile kanal ve yönlendirici görevi görmektedir. Gelenekselin dışında, özel olarak tasarlanmış petekli yapılar veya özel tasarımlar da mevcuttur.

Plakaların başlıca üretim yöntemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

Ekstrüzyon Kalıp Yöntemi : Malzemeler yüksek basınç altında kalıplardan geçirilerek üretilir. En büyük sınırlılılarından biri belirli kanal geometrileri üretilebilmektedir.

Enjeksiyon Kalıplama (Die Casting) : Belirli bir sıcaklıkta ergimiş malzemenin kalıba enjekte edilmesiyle tek parça veya parçalar halinde soğutma plakası üretilir.

Sac Metal Şekillendirme ve Kaynak : Yeterli kalınlıkta sac levhalar preslenerek istenilen form ve kanal yapıları oluşturulur.

Şişirme Kalıbı (Hydroforming): İki ince metal plaka üst üste yerleştirilir. Çevresel olarak kenarlarından ve ilgili kısımlardan birleştirilir. Plakaların arasına yüksek basınç uygulanarak (genellikle hava, su veya yağ) istenen form elde edilir..

Plakaların başlıca birleştirilme yöntemleri ise şu şekildedir;

Sürtünme Karıştırma Kaynağı (Friction Stir Welding - FSW): Dönen bir alet, metallerin birleşim noktasına mekanik sürtünme uygulayarak malzemeyi yumuşatır. Yumuşayan metaller karıştırılır ve katı halde kaynatılır. Böylece yüksek mukavemetli, gözeneksiz, sızdırmaz birleşim elde edilir.

Lazer Kaynağı (Laser Welding): Genellikle kızılötesi dalga boyundaki lazer ışını birleştirme istenen yüzeye odaklanır ve çok kısa sürede yoğun bir ısı oluşturur. İki malzeme hızla ergir ve hızla soğuyarak birleşme sağlanmış olur.

Ultrasonik Kaynak (Ultrasonic Welding): İki malzeme yüksek frekansta meekanik titreşimin etkisi ile temas yüzeylerinde sürtünmeden kaynaklı ısı meydana getirtilir. İlgili yüzeyler yumuşamaya başlar ve basınç altında iki malzeme birbirine birleşmiş yani kaynamış olur.

Özellikle düşük adetlerde veya prototip aşamasında yapılan tasarımı fiziksel olarak görebilmek ve işlevselliğini anlayabilmek için kullanılan yöntemler Prototip ve Küçük Seri Üretim Yöntemleri olarak ifade edilmektedir. En büyük sınırlılığı asıl tasarımı

temsil edemeyebilir ve üretim maliyeti çok yüksektir. Bu yöntemlerin bazıları aşağıdaki gibidir;

3D Baskı (Additive Manufacturing): 3 boyutlu metal yazıcılar kullanılarak, tasarıma en yakın metal tozlar ve karışımları kullanılarak üretim yapılır. Asıl kullanılacak malzemeyi temsil etmek zordur.

CNC İşleme (CNC Machining): Bilgisayar destekli makineler ile yüksek hassasiyetli olarak dolu malzemelerden talaşlı imalat yöntemi ile üretim. Üretimi çok maliyetlidir.

Geçici Kalıp, Döküm veya Prototipleme yöntemleri: Genellikle bir veya birkaç sefer kullanılmak için tasarlanmış olan kalıplamalar ile üretilir. Hassasiyeti düşük üretimler gerçekleşir.

Aktif soğutma, sıvı veya hava sirkülasyonunu sağlamak için zorlanmış akış ile oluşan ısıyı uzaklaştırmak için tasarlanmış olan ve dış kaynak enerjili (pompalar, fanlar vb) sistemlerdir.

Pasif soğutma, doğal konveksiyon, radyasyon veya ısı boruları ve katmanları gibi yöntemlerle doğal olarak ısı transferi oluşturmak ve ısının uzaklaştırılmasını sağlayan sistemlerdir.

Soğutma sistemleri kullanıldığı yere göre ve kullanım amacına göre en uygun tasarım ve ısı transferi yöntemi tercih edilmelidir. Başlıca farklarını avantaj dezavantajlarını birbirlerine göre değerlendirerek aşağıda çizelgede gösterilmiştir. Sıvı soğutmalı ve hava soğutmalı sistemlerin karılaştırmasını Çizelge 2.4.3.5'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.4.3. Sıvı Soğutmalı Sistemler ile Hava Soğutmalı Sistemlerin Karşılaştırması

Kriterler	**Sıvı Soğutmalı Sistemler**	**Hava Soğutmalı Sistemler**
Isı Transfer Verimliliği	Yüksek	Düşük
Yüksek Performanslı Araçlarda Kullanım İmkanı	Yüksek	Düşük
Hızlı Şarjda Kullanım İmkanı	Yüksek	Düşük
Komplekslik	Yüksek	Düşük
Ağırlık	Yüksek	Düşük
Maliyet	Yüksek	Düşük

Soğutma sisteminin tasarımında temel olarak ele alınabilecek ve soğutma performansını doğrudan etkileyecek beş temel değişken vardır. Bunlar:
Isı transfer katsayısı (h, W/m²·K): Soğutma yüzeyi ile akışkan arasındaki ısı geçişinin verimliliğidir.

Isı iletim katsayısı (k, W/m K) : Bir katı malzemenin birim uzunluk başına ısı iletimi verimliliğidir.

Soğutma sıvının özgül ısı kapasitesi (c_p, J/kg K): Sistem içerisindeki akışkanın birim kütlesinin sıcaklığını 1°C arttırmak için gerekli enerji miktarını ifade eder.

Soğutucu plaka içerisinde dolaşan sıvının debisi (Q, m^3/s, l/dk): Sistem içerisindeki akışkanın birim zamanda taşıdığı hacimsel miktar.

Soğutucu plakaların sıvı giriş ve çıkışı arasında oluşan basınç farkları (ΔP, Pa): Akışkanın kanallar içerisinde akarken maruz kaldığı dirençtir.

Yukarıda belirtilen her bir değişkenin yönetilmesi ile termal sistemi yönetimi gerçekleştirilmiş olur. Doğru bir optimizasyon tüm değişkenlerin en efektif şekilde optimizasyonunu yapılarak ısıl verimliliğin arttırıldığı durumdur.

Batarya sistemlerinin soğutulması genellikle iletim ve taşınım mekanizmaları ile olur. Dolayısı ile, doğru iletkenlik katsayısına sahip soğutma plakaları, doğru ısı transferi sağlayan akışkanlar, bu akışkanların daha işlevsel çalışabilmesi için doğru debi ve soğutucu plaka kanal tasarımlarının minimum oluşacak basınç farkı oluşturacak şekilde tasarlanması ve doğru bir termal yönetim sistemi ile olabilecek en mümkün optimize çalışmasını sağlamış olacaktır.

2.4.4. Taşıyıcılar (Battery Carrier Structures)

Taşıyıcı yapılar, batarya sistemlerinde bataryanın tüm bileşenlerini içerisinde barındıran, mekanik bütünlüğü sağlayan, modül ve/veya hücrelerin batarya paketine ve/veya araç şasisine entegre edilmesini sağlayan yapısal elemanlardır. Bu elemanlar aşağıda belirtilen özelliklere sahip olmalıdır. Önceki maddelerde Şekil 2.4.'de batarya taşıyıcısının konsept gösterimi verilmiştir.

Yapısal kararlılık: Batarya paketi, hücrelerin çalışabilirliğini etkilemeden onları destekleyecek, statik ve dinamik yükleme sırasında akü hücrelerinin ilgili kütlesini taşıyacak şekilde tasarlanmalıdır.

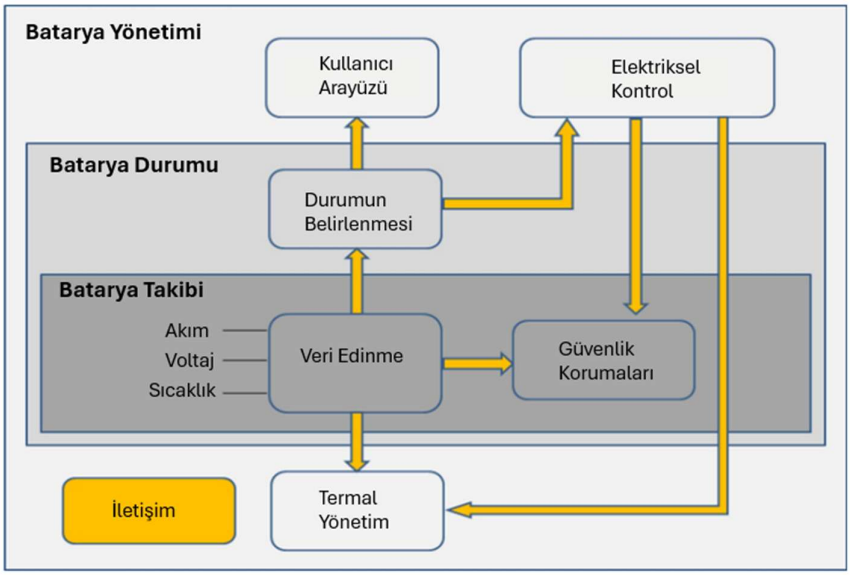
Alt gövde sertliğinde iyileştirme: Batarya paketinin bir tür sandviç yapı oluşturmak için alt gövde yapısal sertliğine katkıda bulunması beklenir.
Çarpışma koruması: Batarya paketi, yeterli çarpışma emme yapıları ile yerleştirilmeli ve korunmalıdır; hücre hasarlarını ve hücre kırılmasından kaynaklanan olası yangın veya patlamayı önlemek ve aracın çarpışma performansını arttırması beklenir.
Dış ortamdan koruma: Batarya, hücrelere zarar gelmesini önlemek ve yeterli koruma sağlamalıdır (Belingardi ve Scattina, 2023).

2.4.5. Batarya yönetim sistemi, BMS (Battery Management System)

BMS ünitesi, batarya modüllerinin ve hücrelerinin istenen sıcaklık seviyesini kontrol eden batarya termal yönetim sistemi gibi alt bileşenlere sahiptir. Sıcaklık artışından kaynaklanan olası güvenlik riskleri BMS tarafından algılanarak batarya termal yönetim

sistemi yardımıyla ortadan kaldırılır. Bu nedenle, batarya hücresi özellikleri dinamik koşullar altında termal ve elektriksel özellikler açısından dikkate alınmalıdır (Tahirağaoğlu, Sevilgen, Hamut, 2024). Batarya yönetim sistemi, batarya içerisindeki hücre, modül yönetim (CSC) sistemleri ve termal yönetim sisteminin birlikte çalışmasını sağlayarak bataryanın güvenli ve verimli çalışmasını sağlayan birimdir.

BMS, batarya takımının durumlarını ve parametrelerini izleyerek şarj edilebilir bir batarya takımını yöneten elektronik bir sistemdir. Pil durumlarına örnek olarak hücre voltajı, akım, sıcaklık, SOC, sağlık durumu (SOH), güç durumu (SOP) vb. verilebilir. Bu durumların izlenmesi, BMS'nin pili ne zaman şarj edeceği ve tehlikeli çalışma koşullarından kaçınmak için pil kullanımına ne zaman bir kesinti uygulanacağı gibi kararlar almasını sağlar. Bu şekilde, BMS bataryanın ve son kullanıcının her türlü zarardan iyi bir şekilde korunmasını sağlar. Şekil 2.4.5.'de tipik bir BMS'nin blok diyagramını göstermektedir (Dhabe, Paraskar ve Jadhao, 2025).



Şekil 2.4.5. BMS blok diyagramı (Dhabe, Paraskar ve Jadhao, 2025).

2.4.6. Modül izleme sistemi, CSC (Cell Supervisory Circuit)

CSC (Cell Supervisory Circuit), modül izleme sistemi olarak değerlendirilebilir. Her bir hücre veya hücre gruplarının (modül) izlenmesi için tasarlanmış güvenlik devresidir. BMS hücre, hücreler ve/veya modüller ile alakalı voltaj, sıcaklık, akım gibi bilgileri CSC biriminden elde etmektedir. Önceki madde numaralarında Şekil 2.4.5.'de "Battery Monitoring" olarak belirtiği kısmı yönettiği söylenebilir.

2.5. Batarya Charge-Discharge Prensipleri

Batarya performansı, kullanım ömrünü ve batarya güvenliğini doğrudan etkileyen faktörlerden bir tanesi özellikle uzun ömürde şarj-deşarj profilleridir.
Bu bölümde bataryaların şarj-deşarj profilleri, döngüleri, süreçleri, temel prensipleri ve kavramları üzerine durulacak.

2.5.1. Temel kavramlar

SOC Şarj Durumu (State of Charge) : Bataryanın mevcut durumda enerji düzeyini yüzdesel olarak ifade eden kavramdır. SOC bataryada kalan enerji miktarını tanımlar. SOC, doğrudan ölçülebilen fiziksel bir nicelik değildir. SOC, yalnızca voltaj, akım ve sıcaklık gibi güçlü bir şekilde ilişkili vekil nicelikleri ölçerek tahmin edilebilir (How vd., 2019). Batarya SOC değeri %0 ile %100 dahil olmak üzere bu aralıkta bir değerde olur. %100 SOC tam dolu olduğunu ifade ederken %0 SOC bataryanın tam boş olduğunu gösterir.

SOC değerinin genel hesaplama formülü:

$$SOC\% = \frac{Qmevcut}{\text{Qmaksimum}} x100 \tag{2.6}$$

Q_{mevcut}: Anlık mevcut kapasite (Ah)
$Q_{maksimum}$: Bataryanın toplam kapasitesi (Ah)

OCV Açık Devre Gerilimi (Open Circuit Voltage): Batarya hiçbir yüke bağlı değilken yani batarya üzerinden akım akmıyorken, kimyasal denge durumunda ölçülen gerilim değeridir. Gerçek SOC değerini bu yöntemle görebiliriz.

CCV Kapalı Devre Gerilimi (Closed Circuit Voltage): Batarya akım altında ölçülen gerilim değeridir. Akıma bağlı olarak CCV değeri değişkenlik gösterir.

OCV ve CCV arasındaki bağlantı: CCV sırasında alınan ölçüm ile OCV sırasında alınan ölçüm arasındaki fark, şarj veya deşarj olma durumuna göre ve hücreden kaynaklı iç direnç ve uygulanan akım ile ilişkilidir. Kısaca şarj-deşarj sırasında OCV ve CCV farkı Çizelge 2.5.1'de özetlenmiştir

Çizelge 2.5.1. Şarj-Deşarj sırasında OCV ve CCV karşılaştırması.

Ölçüm	**Gerilim Seviyesi**
CCV (Şarj Sırasında)	OCV'den yüksek (Şarjdan Sonra)
CCV (Deşarj Sırasında)	OCV'den düşük (Deşarjdan Sonra)

2.5.2. Şarj kavramı ve stratejileri

Şarj (Charge): Bataryaya dışarıdan elektrik akımı verilerek, elektrik enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürme işlemidir. Şarj sırasında verilen akım (I) sayesinde gerilim (V) yükselir. %100 SOC değerine geldiğinde maksimum gerilime ulaşmış olur.

CC Sabit Akım Şarj (Constant Current) Fazı: Batarya, hücre spesifik özelliklerinin izin verdiği aralık içerisinde belirlenmiş olan sabit bir akım ile şarj edilmesine denir. Gerilim, akım ile orantılı bir şekilde artmaya başlar.

CV Sabit Gerilim Şarj (Constant Voltage) Fazı: İstenilen gerilim seviyesine gelen bataryanın gerilim değeri sabit tutularak, şarj akım değeri hedeflemiş olduğumuz minimum bir değere inene kadar kademeli olarak kısılır. Sonuç olarak hedeflediğimiz gerilim değerine ulaşılmış olur.

CC – CV (Constant Current – Constant Voltage) Şarj Yöntemi: Şarj işlemi genellikle iki ana aşamada gerçekleştirilir. Batarya öncelikle CC fazında belirlenmiş olan gerilim seviyesine kadar şarj edilir. Bataryanın, bu şarj sırasında istediğimiz gerilime ulaşıldığında CV fazına geçilerek istediğimiz gerilim değerine tam olarak ulaşması hedeflenir.

BMS (Batarya Yönetim Sistemi) kontrollü şarj yöntemi: Bu şarj işlemi temel olarak bataryanın güvenliği ve yaşam döngüsünü arttırmaya yönelik yapılmış olan algoritmaların çalışması sağlanarak yapılır. Bataryaya uygulanan akım hücre sıcaklığı, SOC değeri gibi etmenler dikkat edilerek gerektiğinde akım kısılır, gerektiğinde akım arttırılarak optimum şarj süresi sunulmaya çalışılır

Çok Aşamalı Şarj (Multi-Stage Charging) yöntemi: Şarj süreci boyunca birden fazla adım içeren ve CC, CV, BMS veya herhangi bir şarj yöntemi, farklı akım ve gerilimlerde belirli zamanlarda devreye girdiği şarj yöntemidir. Bataryaya ve şarj senaryolarına spesifik durumlar çalışılarak farklı şarj profilleri elde edilebilir.

Hızlı Şarj (Fast Charging) Yöntemi: Bataryaların yüksek akım değerleri kullanılarak çok kısa sürede şarj etmeyi hedefleyen şarj yöntemidir. Yüksek akım değerleri genellikle %20 SOC ile %80 SOC aralığında uygulanarak, diğer kalan kısımlarda hücre sıcaklık ve gerilim seviyelerine bağlı olarak akım kısılır veya yok sayılır. Genellikle hızlandırılmış ömür testlerinde kullanılır.

2.5.3. Deşarj kavramı ve stratejileri

Bataryaya depolanmış olan kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüştürme işlemidir. Deşarj sırasında çekilen akım (I) sayesinde gerilim (V) düşer. %0 SOC değerine geldiğinde minimum gerilime ulaşmış olur.

CC Sabit Akım Deşarjı (Constant Current – CC Discharge): Bataryanın, hücre spesifik özelliklerinin izin verdiği aralık içerisinde belirlenmiş olan sabit bir akım ile deşarj edilmesine denir. Gerilim, akım ile orantılı bir şekilde azalmaya başlar.

Sabit Gerilim Deşarjı (Constant Voltage – CV Discharge): İstenilen gerilim seviyesine deşarj edilmek istenen bataryanın gerilim değeri sabit tutularak, şarj akım değeri hedeflemiş olduğumuz minimum bir değere inene kadar kademeli olarak kısılır. Sonuç olarak hedeflediğimiz gerilim değerine ulaşılmış olur.

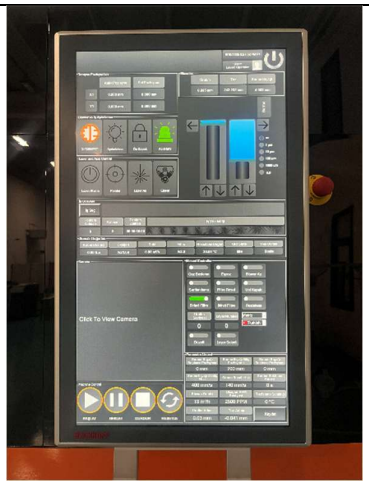
Sabit Güç Deşarjı (Constant Power – CP Discharge): Deşarj işlemi boyunca bataryadan çekilen gücün (P=VxI) sabit tutulması prensibine dayanır. Gerilim azaldıkça akım arttırılarak çekilen gücün sabit kalması sağlanır. Elektrikli araçlarda elektrik motorunun çektiği sabit gücü simüle etmek hedeflenmiştir.

BMS (Batarya Yönetim Sistemi) kontrollü deşarj yöntemi: Bu deşarj işlemi temel olarak bataryanın güvenliği ve yaşam döngüsünü arttırmaya yönelik yapılmış olan algoritmaların çalışması sağlanarak yapılır. Bataryadan çekilen akım hücre sıcaklığı, SOC değeri gibi etmenler dikkat edilerek gerektiğinde akım kısılır, gerektiğinde akım arttırılarak optimum batarya kapasitesi kullanılarak elektrik motorunun talebi karşılanmaya çalışılır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Soğutma Plakası Tasarımı ve Üretimi

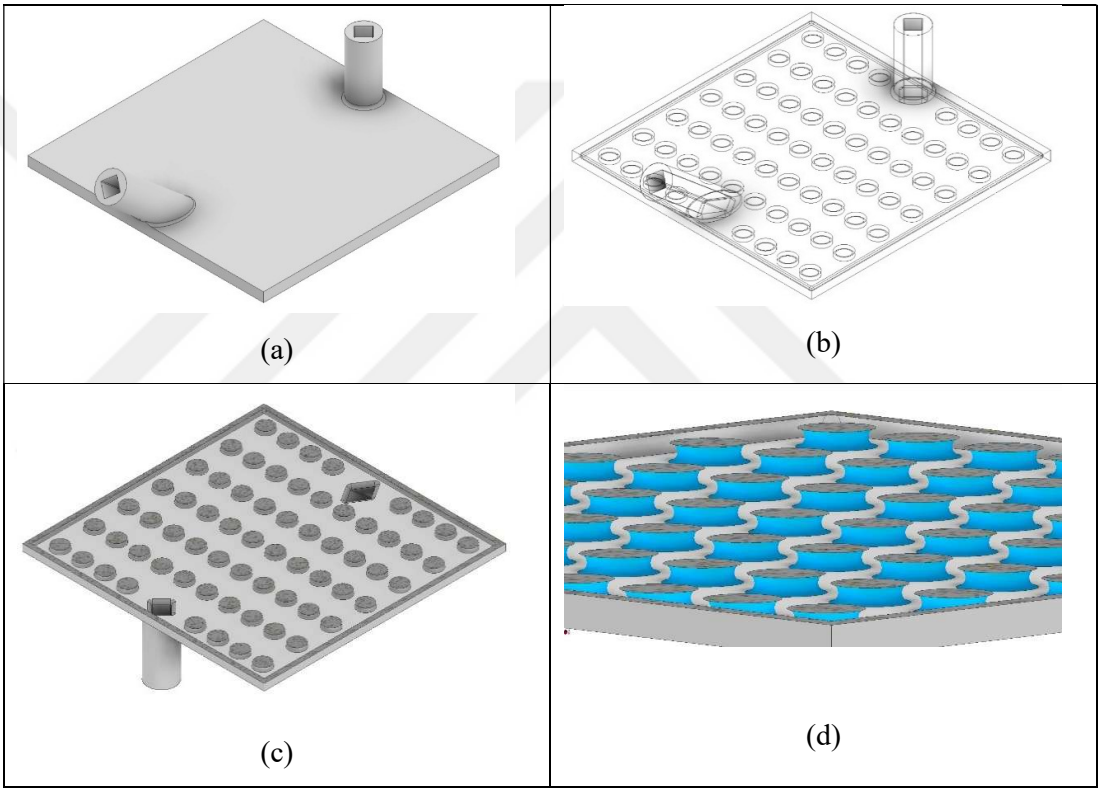
Soğutucu plaka tasarımı bilgisayar destekli tasarım programı ile üç boyutlu (3D) tasarım (CAD) modeli eklemeli imalat cihazının üretim tablasının boyutları referans alınarak yapılmıştır. Eklemeli imalat cihazının genel görseli ve teknik özellikleri Şekil 3.1.1'de verilmiştir.

<table>
<tr>
<td> 
(a)</td>
<td> 
(b)</td>
</tr>
<tr>
<td> 
(c)</td>
<td>Üretim Hacmi (mm3): 250x250x300
Katman Yüksekliği: 20-100µm
Lazer Gücü: 500W
Kullanılan Malzeme: AlSi10Mg

(d)</td>
</tr>
</table>

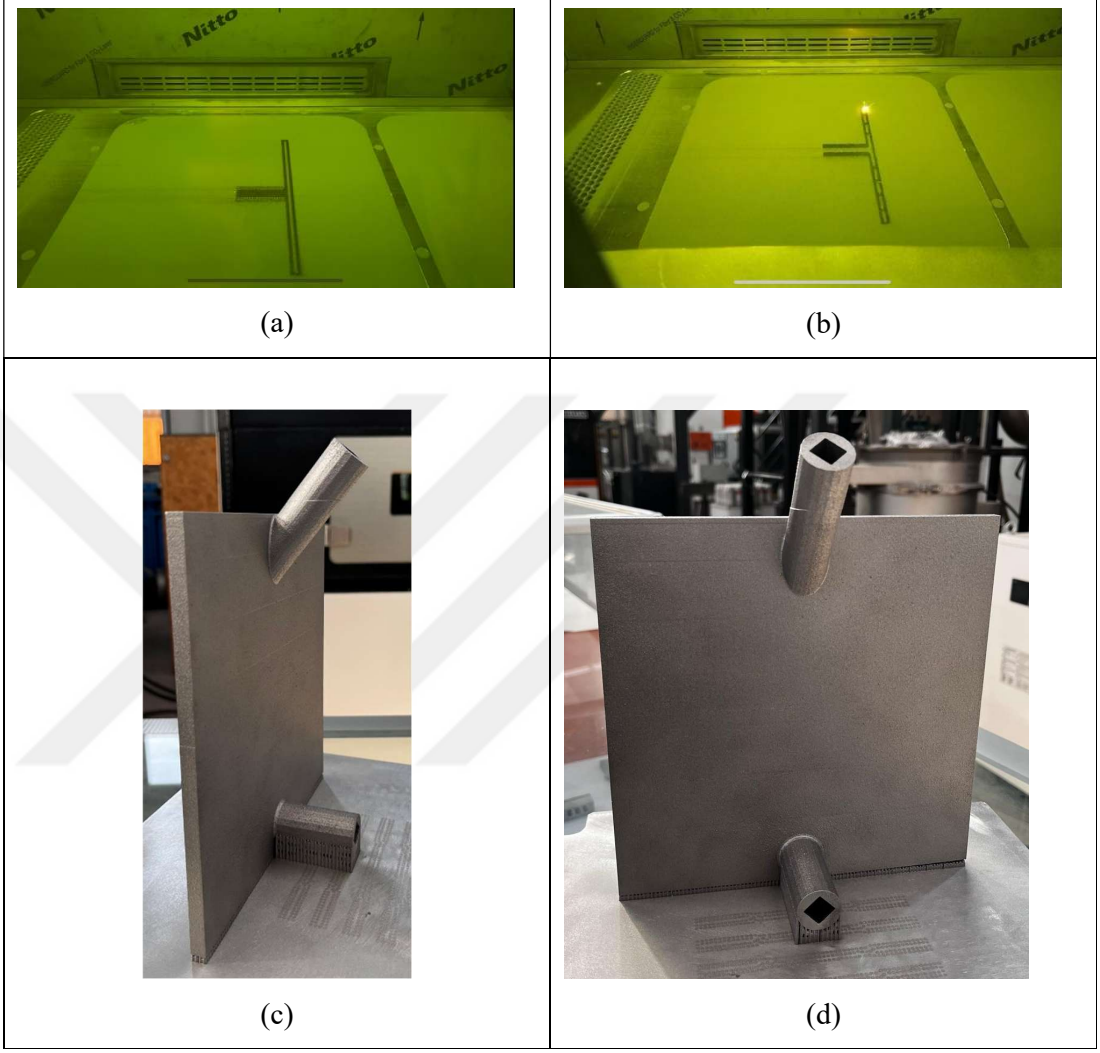
Şekil 3.1.1. Eklemeli imalat cihazının genel görseli ve teknik özellikleri. a) Eklemeli imalat cihazı ve yardımcı komponentleri, b) Eklemeli imalat cihazı c) Eklemeli imalat cihazı kontrol paneli, d) Eklemeli imalat cihazı teknik özellikleri

Eklemeli imalat yöntemine uygun olması açısından soğutucu plakanın giriş kısmı yüzeye dik olarak tasarlanırken, çıkış kısmı ise belli bir açıda dizayn edilmiştir. Yapılan tasarım genel hatlarıyla Şekil 3.1.2'de verilmiştir. Soğutucu plaka içerisine akışkanın yönlendirilmesi için 66 adet dairesel saptırıcı yerleştirilmiştir. Bu saptırıcıların çarpılma olmadan ideal bir şekilde üretilebilmesi için kavisli yapıda Şekil 3.1.2.d.'de gösterildiği şekilde üretilmiştir.



Şekil 3.1.2. Batarya modülü soğutucu plakası genel görünümü. a) Üst perspektif görünüş, b) Üst perspektif iç görünüm, c) Alt perspektif iç görünüm, d) Kanal içi görünüm

CAD modelin hazırlanmasının ardından ilgili tasarıma destek elemanları eklenir. Final hale gelmiş olan CAD tasarımı program tarafından dilimlenerek iş dosyası oluşturulur ve eklemeli imalat cihazına bu data yüklenir. Şekil 3.1.3.'de örnek aşamaları ve görselleri sunulmuştur.



Şekil 3.1.3. Batarya modülü soğutucu plakası üretim fotoğrafları. a) İmalat sırasında görünüm, b) İmalat sırasında görünüm, c) Üretim sonrası yan perspektif, d) Üretim sonrası ön perspektif

3.2. Batarya Modülü Genel Görünümü ve Temel Kısımları

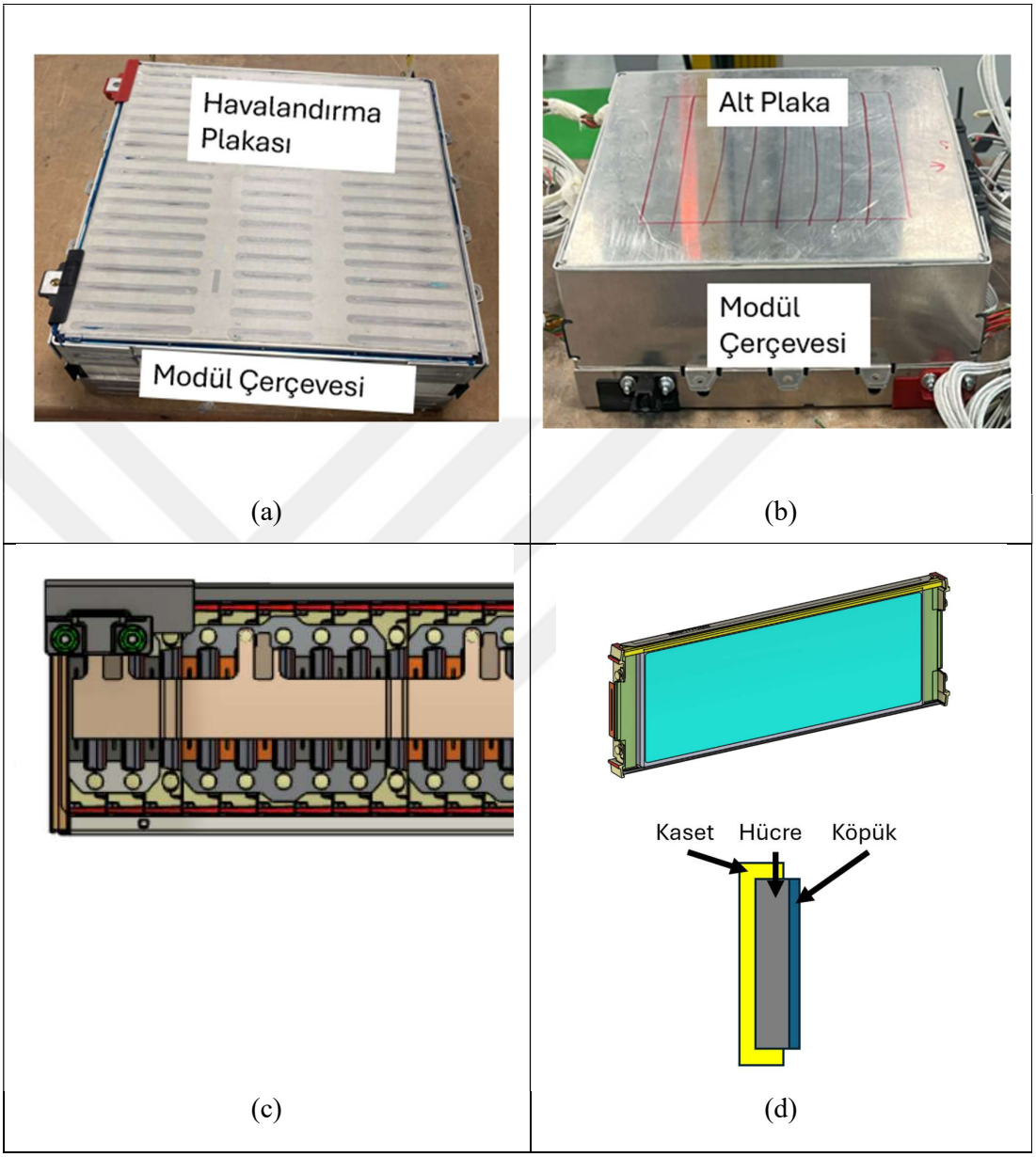
Test edilen modül genel anlamda Venting Plate (Havalandırma Plakası), Bottom Plate (Alt Plaka), Modüle Frame (Modül Taşıyıcı Çerçeve), Hücreler ve Bağlantı Komponentlerinden oluşur.

Modül içerisindeki bir hücrede herhangi bir sebeple açığa çıkan gazın tahliyesinin yapılmasını sağlayan havalandırma plakası bulunmaktadır. Havalandırma plakasının tam karşısında modül içerisindeki hücreleri termal açıdan yönetilebilmesi için ısı iletimini sağlayan alt plaka bulunur. Modül soğutma plakası ve hücre soğutma alt komponentleri (kaset) gibi sistemler alt plaka üzerinde konumlandırılır. Ayrıca alt plakanın diğer bir görevi modül içerisindeki hücreleri mekanik olarak bir arada tutmaktır. Modülü çevreleyen ve hücrelerin mekanik dayanımını sağlayan diğer bir parça modül taşıyıcılarıdır. Bu parça ayrıca modülü batarya paketi içerisine konumlandırmaya yarayan ve modülü batarya paketine sabitleme görevi gören komponenttir.

Hücreler modül içerisinde termal ve mekanik yapıştırıcılar ve elektriksel bağlantılar ile modül içerisinde birleştirilirler. Böylelikle mekanik bütünlüğü sağlanmış ve elektriksel bağlantıları yapılmış olur.

Hücreler modül içerisinde kaset adı verilen, hücreyi muhafaza eden ve termal olarak ısınma ve soğutmaya yardımcı olan bir komponentin içerisine konumlandırılır. Üzerlerine hücre üzerine denk gelecek ve hücreyi kapsayacak şekilde foam (köpük) adı verilen termal olarak hücreler arası yalıtım sağlayan ve elastik yapısı sayesinde şarj-deşarj sırasında oluşan swelling (şişme ve inmeler) etkisini süspanse eden bir komponent yerleştirilir. Bu şekilde modül içerisinde kaset, hücre ve köpükler arka arkaya bir örüntü oluşturularak dizilirler.

Şekil 3.2'de detaylı olarak görsellerde havalandırma plakası, alt plaka, modül taşıyıcı çerçeve, hücreler ve elektriksel bağlantı elemanları gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Batarya modülünün genel görünümü ve komponentleri. a) Havalandırma plakası ve modül taşıyıcı çerçeve, b) Alt plaka ve modül taşıyıcı çerçeve, c) Modül elektriksel bağlantı elemanları, d) Hücre, Kaset, Köpük

Batarya Modülü Elektriksel Özellikleri

Deneyleri gerçekleştirdiğimiz batarya modülünün elektriksel özellikleri Çizelge 3.2.'de sunulmuştur.

Çizelge 3.2. Batarya modülü elektriksel özellikleri

Parametre	Açıklama	Değer	Birim
Hücre Tipi	Pouch (Kesecik)	-	-
Hücre Kimyası	NMC	-	-
Modül Stratejisi	6S3P	-	-
Toplam Hücre Adedi	-	18	Adet
Hücre Kapasitesi	-	73	Ah
Hücre Nominal Voltajı	-	3.65	V
Modül Kapasitesi	-	219	Ah
Modül Nominal Voltajı	-	21.9	V

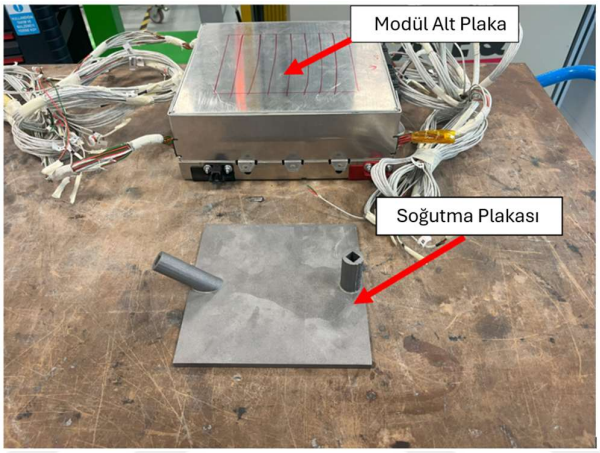
3.3. Soğutma Plakası ve Modül entegrasyonu

Modül içerisindeki hücrelerin şarj-deşarj sırasında soğutması için modül alt plakasına soğutma plakasının yerleştirilmesi işlemi TIM (Thermal Interface Material) adı verilen bir macun ile sağlanmıştır. Bu macun hem termal açıdan iletkenliği sağlayarak ısının modül üzerinden daha hızlı uzaklaştırılması görevini üstlenmiş olacak hem de soğutma plakasının modül alt plakası üzerine sabitlenmesi görevini görecektir.

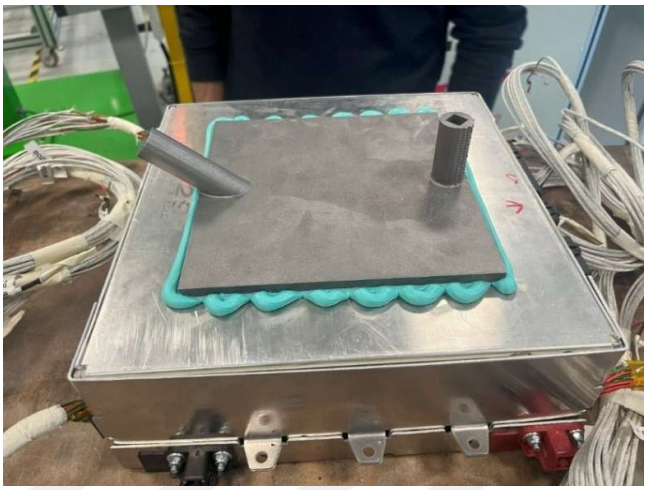
Öncelikle soğutma plakasının yerleştirileceği alan işaretlenmiştir. Bizim modülümüzün alt plakası üzerine modül merkezine gelecek şekilde işaretlenen alana manuel olarak TIM uygulaması yapılmıştır. TIM uygulamasının ardından belirlenen alana denk gelecek şekilde soğutma plakası koyulur ve modül ile soğutma plakası arasında 1-1.5mm boşluk kalana kadar baskı uygulandı. Bu süreçte artık olarak TIM macunu soğutma plakasının baskı alanının dışına çıkmıştır. Böylelikle TIM macununun tüm soğutma plakasının alt yüzeyi ile modül alt plakasının birleştiği yere boşluksuz olarak uygulandığını gösterir. Bu hali ile macunun kürlenmesi için yaklaşık 5 gün beklemeye bırakıldı. Bu süreçte soğutma plakası üzerine baskı yapan ağırlıklar konularak, kendi kendine çevresel şartlardan kaynaklı ayrılmaların önüne geçilmiş olundu. Macunun kürlenmesinden sonra soğutma plakası üzerine bırakılan ağırlıklar alındı. Dışarıya taşan macun temizlenerek birleşme noktalarında açıklıkların olup olmadığı kontrol edildi.

Tüm işlemlerin ardından yapılan kontrollerde ideal bir TIM uygulaması ve soğutma plakası montajı yapıldığı sonucuna varılmıştır.

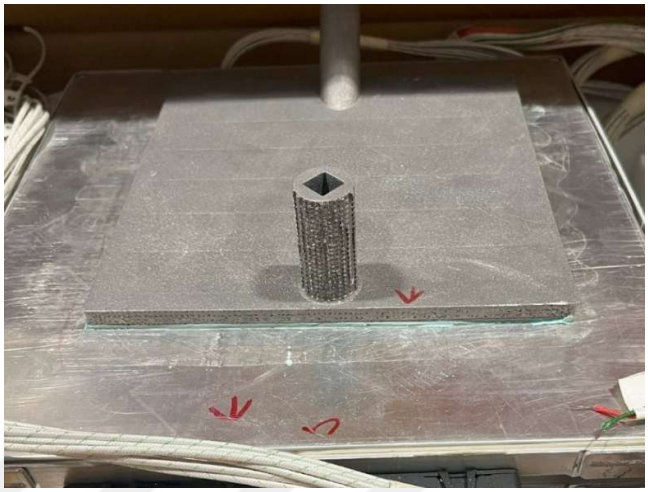
Şekil 3.3'te detaylı olarak görsellerde modül alt plakası üzerine soğutma plakasının montajı adım adım gösterilmiştir.

Adım 1	 (a)
Adım 2	 (b)

Şekil 3.3. Soğutma plakası ve modül entegrasyonu. a) TIM uygulanacak alanın ve soğutma plakasının koyulacağı alanın işaretlenmesi, b) TIM uygulanması, c) Soğutma plakasının yerleştirilmesi, d) Ağırlık koyularak kürlenmeye bırakılması, e)Fazlalık TIM'lerin temizlenmesi ve TIM yayılım kontrolü

Adım 3	 (c)
Adım 4	 (d)

Şekil 3.3. Soğutma plakası ve modül entegrasyonu. a) TIM uygulanacak alanın ve soğutma plakasının koyulacağı alanın işaretlenmesi, b) TIM uygulanması, c) Soğutma plakasının yerleştirilmesi, d) Ağırlık koyularak kürlenmeye bırakılması, e)Fazlalık TIM'lerin temizlenmesi ve TIM yayılım kontrolü (devam)

Adım 5	  (e)

Şekil 3.3. Soğutma plakası ve modül entegrasyonu. a) TIM uygulanacak alanın ve soğutma plakasının koyulacağı alanın işaretlenmesi, b) TIM uygulanması, c) Soğutma plakasının yerleştirilmesi, d) Ağırlık koyularak kürlenmeye bırakılması, e)Fazlalık TIM'lerin temizlenmesi ve TIM yayılım kontrolü (devam)

3.4. Deney Düzeneği Kritik Bileşenleri, Deney Düzeneği ve Çalışma Prensibi

Deney düzeneği ile alakalı kritik bileşenler aşağıda verilmiştir.

Termal Kabin: Ortam sıcaklığını talep ettiğimiz değere ayarladığımız ve test edilecek modülün şartlanmasını sağlayan cihazdır.

Soğutma-Isıtma Sistemi: Soğutma Plakası içerisinden istediğimiz debi ve sıcaklıkta sıvı dolaştırabilmeyi sağlayan cihaz. Bundan sonra adının geçtiği yerlerde sıvı soğutma sistemi olarak anılacaktır.

Isıtma-Soğutma Sistemi Boruları: Sıvı soğutma sistemi tarafından istenen sıcaklığa getirilen sıvının modüle entegre edilmiş olan soğutma plakası giriş ve çıkışlarına ulaştıran sıvı soğutma sisteminin bir bileşenidir.

DC Güç Ünitesi: Modüle talep ettiğimiz akım limitleri içerisinde şarj-deşarj uyguladığımız cihaz.

DC Güç Ünitesi Kabloları: Şarj-Deşarj yapabilmek için DC güç ünitesi cihazından modül terminallerine bağlantıyı sağlayan yüksek voltaj kablolarıdır.

Veri Toplayıcı: Şarj-deşarj sırasında modül üzerinden sıcaklık, voltaj, akım gibi değerlerin ölçümünü ve kaydını yaptığımız cihaz.

Isıl çift: Modül içerisindeki hücreler üzerine yerleştirilmiş olan sıcaklık ölçüm sensörleridir.

Akım ölçer: Şarj-Deşarj sırasında modüle uygulanan akımı ölçen cihaz.

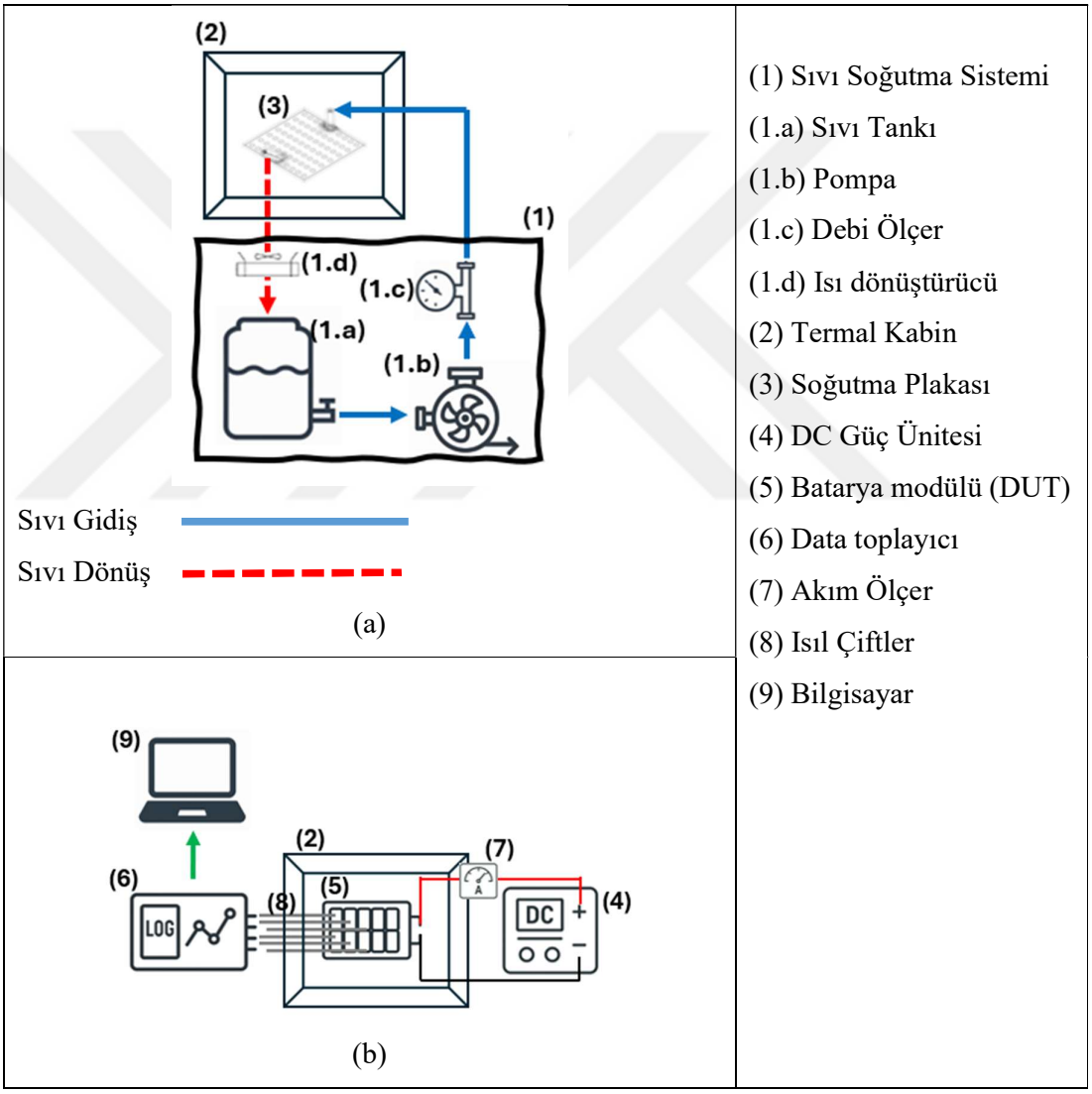
Voltaj ölçüm kablosu: Şarj-Deşarj sırasında OCV ve CCV ölçümlerinin alınabilmesi için bir ucu ilgili terminallere, diğer ucu data toplayıcıya yerleştirilmiş kablolardır.

Test Edilen Cihaz - Modül: Deney setimizde üzerinden sıcaklık, voltaj gibi değerler okuduğumuz 6S3P yöntemi ile üretilmiş olan batarya modülüdür.

Soğutucu Plaka: Şarj-Deşarj sırasında ısınan hücreleri soğutmak maksadı ile üretilmiş ve modül alt plakası üzerine entegre edilmiş olan parçadır.

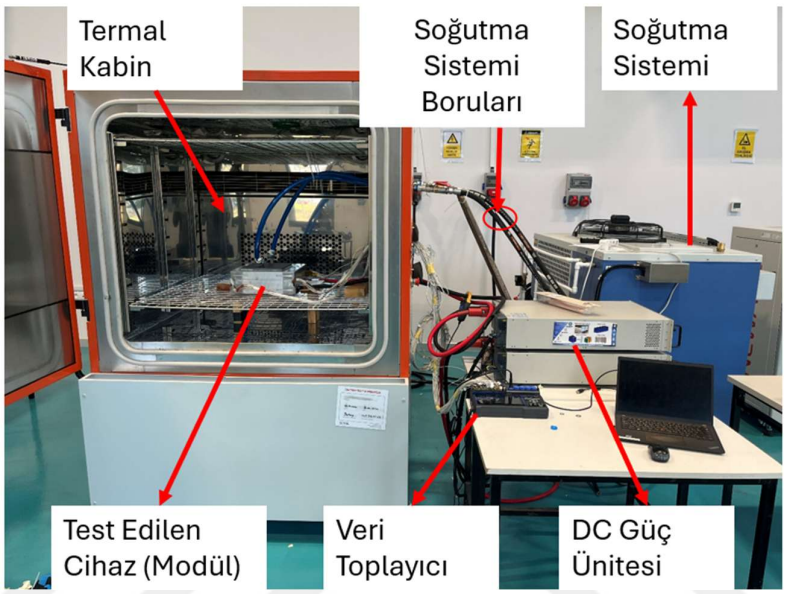
Soğutma Plakası Giriş ve Çıkışı: Soğutma plakası içerisinden soğutma sıvısının girip ısıyı uzaklaştırabilmesi için dışarı çıktığı ve sıcı soğutma sisteminin içerisine döngüye tekrar katıldığı kısımdır.

Şekil 3.4.1'de deney düzeneği ile ilgili şematik gösterimler verilmiştir.



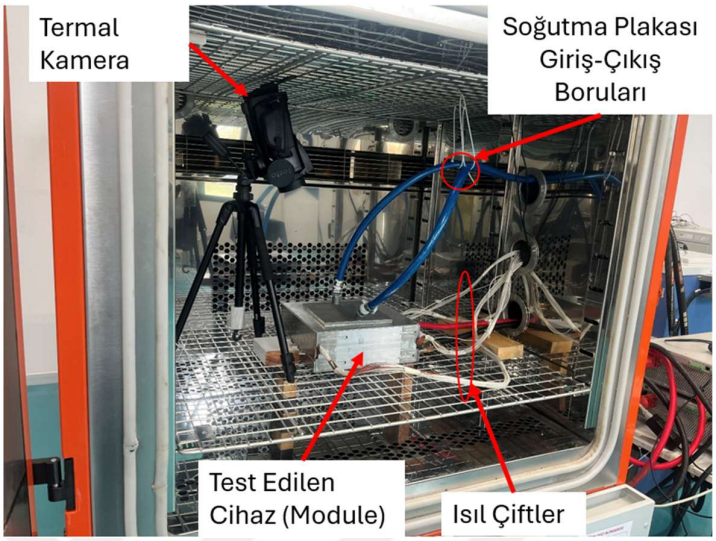
Şekil 3.4.1. Deney düzeneği kritik bileşenleri ve şematik gösterimi. a) Termal bağlantılar, b) Elektriksel bağlantılar ve ısıl çiftler üzerinden kayıt alma

Şekil 3.4.2.'de deney düzeneği ile ilgili görseller ve ilgili bileşenlerin konumlandırmaları verilmiştir.

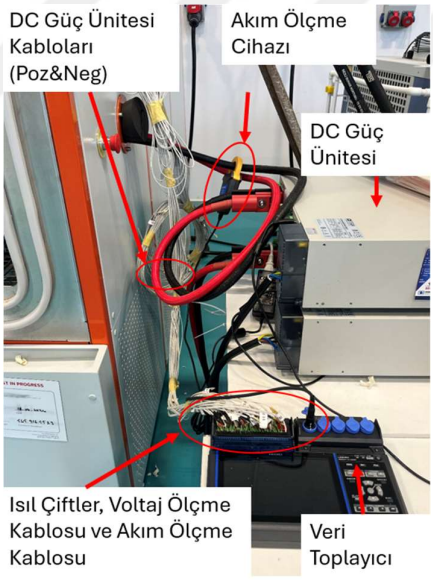


(a)

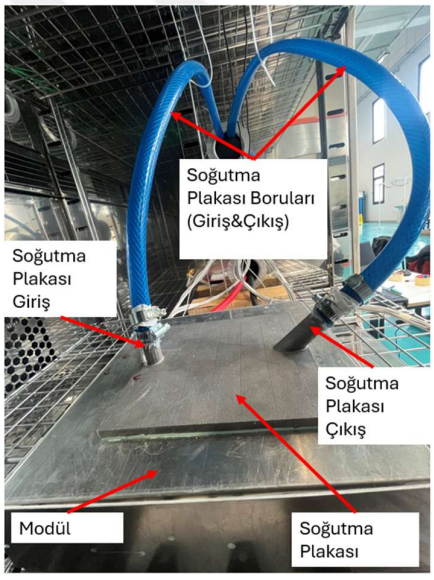
Şekil 3.4.2. Deney düzeneği kritik bileşenleri ve ilgili bileşenlerin konumları . a) İklimlendirme kabini, sıvı soğutma sistemi, DC güç ünitesi, veri toplayıcı, DUT b) Termal kamera, soğutucu plaka giriş çıkışları, ısıl çift kabloları, DUT c) DC güç ünitesi, HV kabloları, akım ölçer, veri toplayıcı d) Soğutucu sistemi hortumları, soğutucu plaka, soğutucu plaka giriş çıkışları, DUT e) Modül terminalleri, HV kabloları, ısıl çift kabloları f) Modül ile tel ızgara arasındaki mesafe gösterimi



(b)

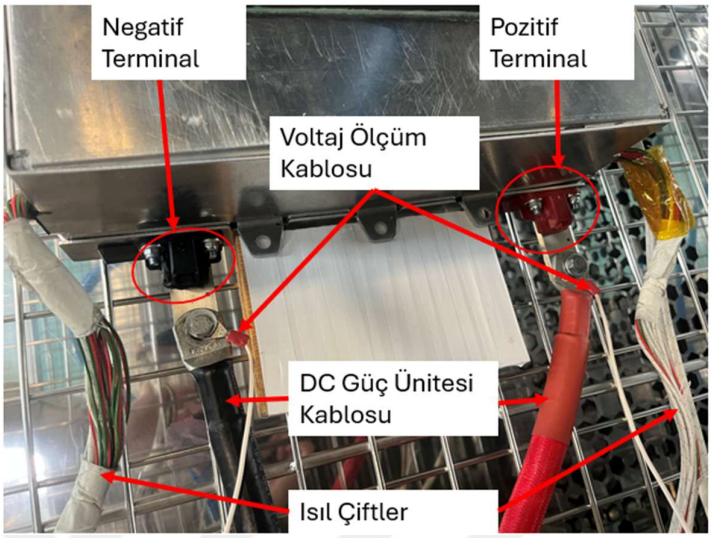


(c)

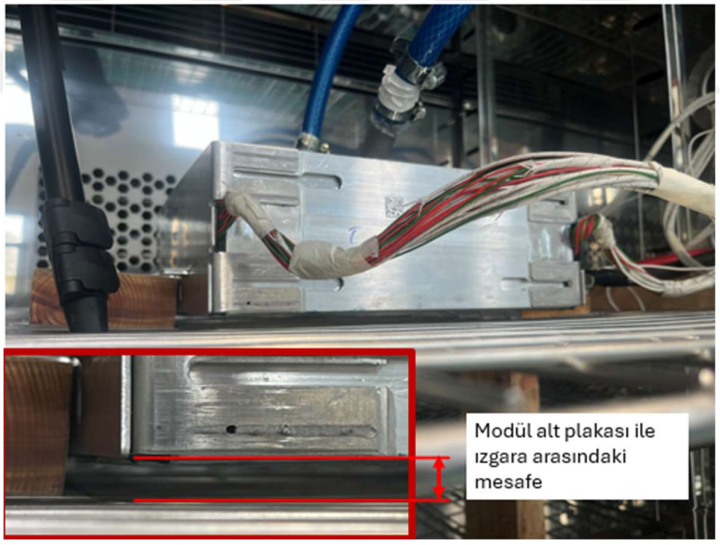


(d)

Şekil 3.4.2. Deney düzeneği kritik bileşenleri ve ilgili bileşenlerin konumları . a) İklimlendirme kabini, sıvı soğutma sistemi, DC güç ünitesi, veri toplayıcı, DUT b) Termal kamera, soğutucu plaka giriş çıkışları, ısıl çift kabloları, DUT c) DC güç ünitesi, HV kabloları, akım ölçer, veri toplayıcı d) Soğutucu sistemi hortumları, soğutucu plaka, soğutucu plaka giriş çıkışları, DUT e) Modül terminalleri, HV kabloları, ısıl çift kabloları f) Modül ile tel ızgara arasındaki mesafe gösterimi (devam)



(e)



(f)

Şekil 3.4.2. Deney düzeneği kritik bileşenleri ve ilgili bileşenlerin konumları . a) İklimlendirme kabini, sıvı soğutma sistemi, DC güç ünitesi, veri toplayıcı, DUT b) Termal kamera, soğutucu plaka giriş çıkışları, ısıl çift kabloları, DUT c) DC güç ünitesi, HV kabloları, akım ölçer, veri toplayıcı d) Soğutucu sistemi hortumları, soğutucu plaka, soğutucu plaka giriş çıkışları, DUT e) Modül terminalleri, HV kabloları, ısıl çift kabloları f) Modül ile tel ızgara arasındaki mesafe gösterimi (devam)

Deney Düzeneğinin Hazırlanışı

Test edilecek olan modül, soğutma plakası yukarı bakacak şekilde, klimatik oda içerisine hava sirkülasyonunu engellemeyecek biçimde ızgara şeklindeki tablaya temas etmeyecek şekilde yerleştirildi. Temas etmesini istenmemesinin sebebi az da olsa sisteme normal kullanım koşullarında olmayan ısı iletimini dahil etmemektir. Böylelikle en ideal koşullar sağlanması hedeflendi.
Klimatik odaya modül tarif edildiği gibi yerleştirildikten sonra modül içerisinde ilgili hücrelere önceden yerleştirilmiş olan ısıl çift sensörleri data toplayıcının ilgili kanallarına takılmıştır.

Daha önce hazırlanmış olan soğutucu sistemin borulama hattı modül üzerimde konumlandırılan soğutucu plakanın ilgili giriş ve çıkışlarına bağlanmıştır.

DC güç ünitesi cihazının pozitif ve negatif terminalleri, modül üzerindeki ilgili terminallere voltaj ölçüm kablosu ile birlikte bir cıvata somun yardımı ile bağlanmıştır.

İklimlendirme kabini test için talep edilmiş olan 30 ºC ± 1ºC ortam sıcaklığına ayarlandı. Test edilen modülün tüm hücreleri ortam koşuluna şartlanana kadar beklendi. Hücreler için şartlanma sıcaklık değeri 30 ºC ± 2ºC olarak belirlenmiştir.

Son olarak soğutma sıvısının debisi soğutma sistemine verilen komutla 2 l/dak. olarak belirlenmiştir.

Modül şarj-deşarj sınır değerleri bir sonraki maddelerde deney planı adı altında detaylıca verilmiştir.

Tüm ayarlamalardan sonra teste başlandı. Veri toplayıcı cihaz üzerinden şarj-deşarj voltaj değeri, akım değeri ve ısıl çiftlerin sıcaklıkları kayıt altına alındı. Herhangi bir beklenmedik bir sıcaklık artışında hücrenin tavsiye edilen çalışma sıcaklığının dışına çıkmaması için öncelikle ısıl çiftlerden ölçülen sıcaklık değeri referans olarak takip edildi ve bir adet harici termal kamera ile dışarıdan da takibi ayrıca yapıldı. Test

tamamlanmasından sonra kayıtlar kapatıldı, kayıtların kaydı kontrol edildi ve bir sonraki testin hazırlıkları yapıldı. Bu şekilde tüm testler tarif edildiği örüntü ile tamamlanana kadar tekrar edilmiştir.

3.5. Deney Planı

Deney düzeneği hazırlanan, soğutma plakalı batarya modülü için çeşitli soğutma sıvısı sıcaklığı ve C-rate oranında şarj ve deşarj testleri gerçekleştirilmiştir. Deneyde C-rate değeri olarak verilen 1.3C değeri kötü durum koşulu olarak belirlenmiş ve böylece soğutma plakasının performansı araştırılmıştır.

Ayrıca sarj-deşarj sırasında sıcaklığa etki eden önemli faktörlerden bir tanesi de dış ortam sıcaklık değeridir. Bu değer göz önünde bulundurularak ortam sıcaklığını hem de hücre sıcaklıkları Çizelge 3.5.'de belirtilen sıcaklık değerlerinde şartlandırılarak kötü durum koşulu sağlanmıştır.

Yapılan deneylerde gözlemlemek istediğimiz değişkenler soğutma sıvısı giriş sıcaklığı ve hücre şarj-deşarj C-rate değeridir. Deneyde değişken olarak belirlenen bilgiler Çizelge 3.5.b'de sunulmuştur. Geri kalan bilgiler deneylerde sabit olarak belirlenmiştir. Deney sabiti olarak belirlenen bilgiler Çizelge 3.5.a'de sunulmuştur.

Çizelge 3.5.a. Deneyde sabit olarak belirlenen bilgiler

Açıklama	**Değer ve Birim**
Soğutma Sıvısı Debisi	2.0 l/dak.
Ortam Sıcaklığı	30 ± 1 ºC
Hücrelerdeki Başlangıç Sıcaklık Değeri	30 ± 2 ºC
SOC Aralığı	%20-%80
Şarj Durdurma Akım Koşulu	10.950 A
Şarj Durdurma Voltaj Koşulu (%80 SOC)	23.95 V
Deşarj Durdurma Voltaj Koşulu (%20 SOC)	20.80 V

Çizelge 3.5.b. Deney Planı ve deneyde değişken olarak belirlenen bilgiler.

Test Adı	**Test Tipi**	**Strateji**	**Soğutma Sıvısı Sıcaklığı**	**Akım C-rate**	**Akım Değeri**
Test 1	Şarj	CC-CV	NA	1.3C	285A
Test 2	Deşarj	CC	NA	1.3C	285A
Test 3	Şarj	CC-CV	15 ºC	1.3C	285A
Test 4	Deşarj	CC		1.3C	285A
Test 5	Şarj	CC-CV	5 ºC	1.3C	285A
Test 6	Deşarj	CC		1.3C	285A
Test 7	Şarj	CC-CV	25 ºC	1.3C	285A
Test 8	Deşarj	CC		1.3C	285A
Test 9	Şarj	CC-CV	15 ºC	0.8C	175A
Test 10	Deşarj	CC		0.8C	175A

3.6 Soğutucu Plaka Performansının Değerlendirilmesi

Soğutma plakasının performansının araştırılması ve değerlendirilebilmesi için ısı transfer miktarını incelemek önemlidir. Aşağıda verilen Eşitlik 3.1'e göre ısı transfer miktarı hesaplanmıştır. Yapılan hesaplara, 5°C, 15°C ve 25°C soğutucu akışkan sıcaklık değerleri için en kötü durumu simüle edebilecek şarj verileri referans alınarak Çizelge 4.5'de verilmiştir.

$$\dot{Q} = \dot{m}\, c_p\, \Delta T \tag{3.1}$$

$\dot{Q}$: Isı Transfer miktarı (W)

ṁ: Kütlesel debi (kg/s)

C_p: Özgül ısı (%50 glikol-su karışımı – kj/kg°C)

ΔT: Sıcaklık farkı: Soğutma plakası çıkış ve giriş sıcaklığı arasındaki fark (°C)

3.7. Deneysel Hata Analizi

Toplanan verilerin güvenilirliğinin sağlayabilmek için hata analizi yapmak önemlidir. Bu tez için hata analizi Moffat (1988) tarafından önerilen, deneyler sırasında ölçülen verilerin toplam deneysel hata tespitini yapmaya yarayan Eşitlik 3.2'de verilen formülle hesaplanmıştır.

$$Total\ error\ (\%) = \left[\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.2}$$

Deneyler sırasında kullanılan ekipmanların listesini ve ölçüm toleranslarını aşağıda Çizelge 3.7.'da verilmiştir.

Çizelge 3.7. Kritik Ekipmanların Listesi ve Ölçüm Toleransları

Ekipman	**Özellik**	**Ölçüm Aralığı**	**Ölçüm Toleransı**
DC Güç Ünitesi	Gerilim	0-80V	0.02 %
DC Güç Ünitesi	Akım	-300 A / 300A	0.1 %
Termal Kabin	Sıcaklık	-40 °C / +150 °C	± 1 °C
Isıl-Çift Sensör	Sıcaklık	-25 °C / +200 °C	± 0.01 °C

Eşitlik 3.2.'de gösterilen formüle göre, Çizelge 3.7.'da belirtilen test cihazlarının hata analizi hesaplandığında en yüksek hata ±2% mertebesinde bulunmuştur.

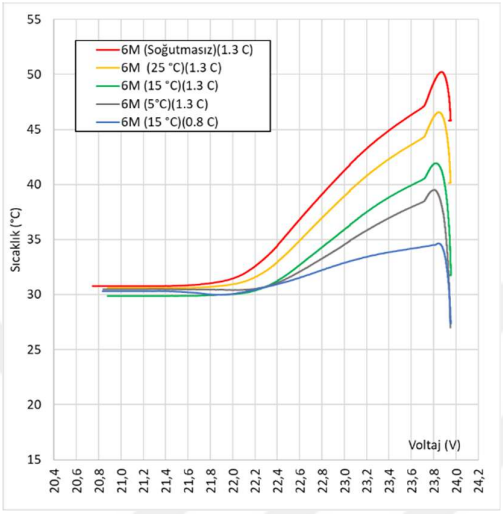
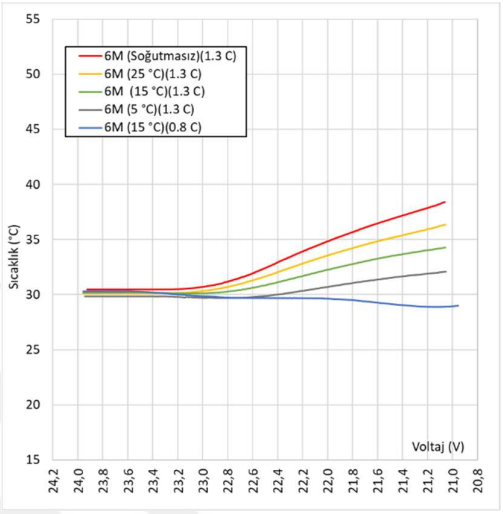
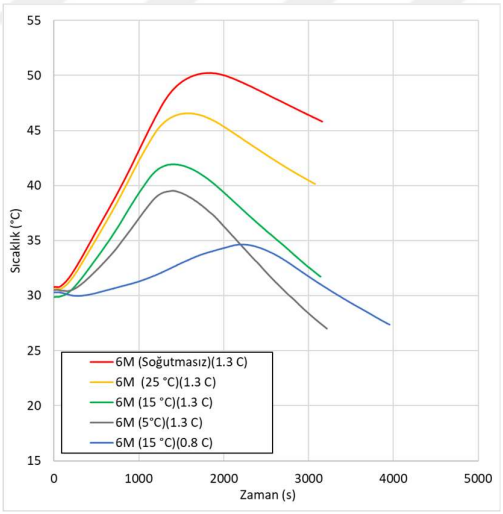
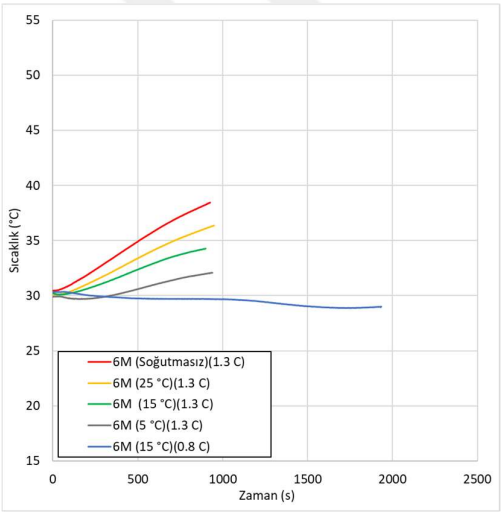
4. BULGULAR

Deneyler 6S3P stratejisine göre oluşturulmuş bir modülle gerçekleştirilmiştir. Dolayısı ile toplamda 18 adet hücre bulunmaktadır.

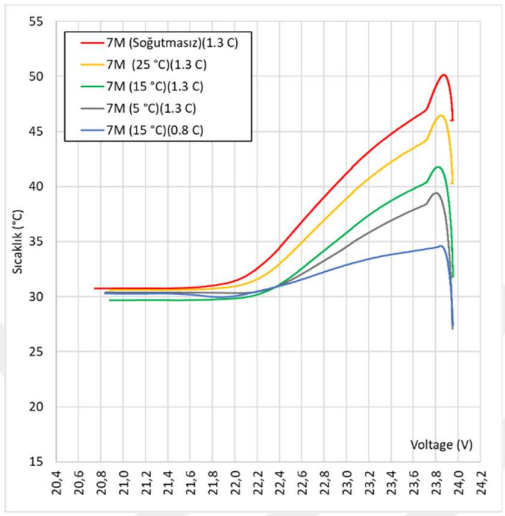
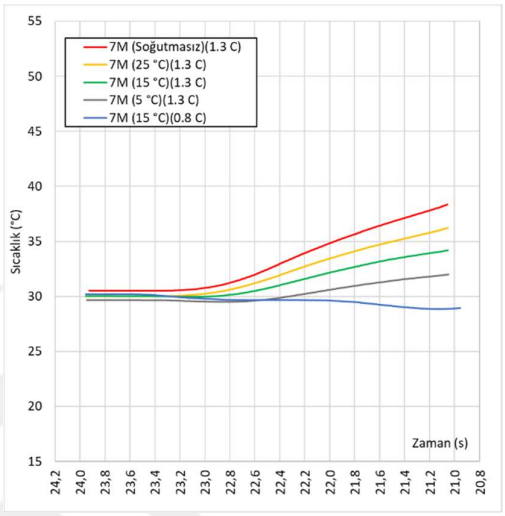
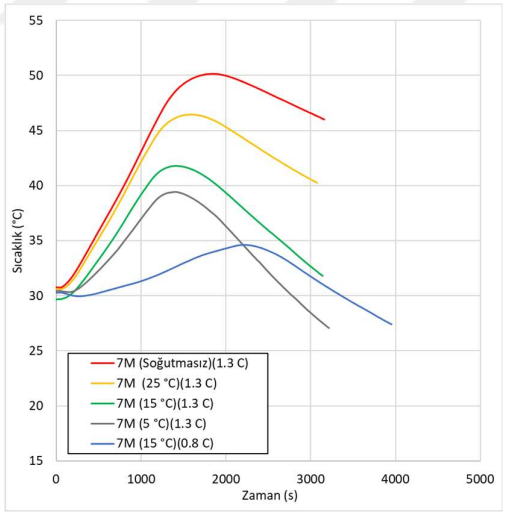
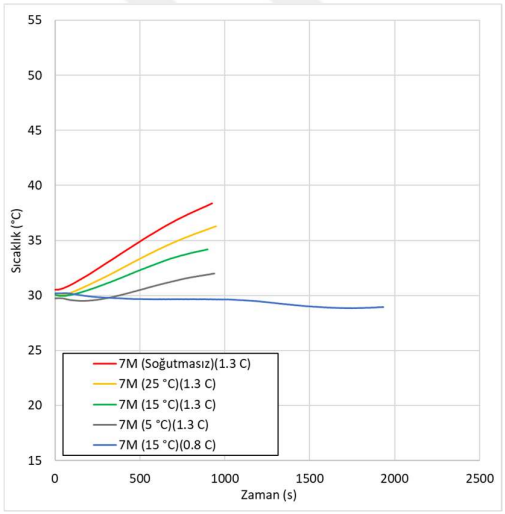
Bu tez kapsamında üretilmiş olan soğutma plakası, eklemeli imalat cihazının üretim kapasitesinin izin verdiği limitler içerisinde üretilmiştir. Dolayısı ile soğutma plakası modül üst yüzeyinin tamamını kaplayamamaktadır. Bu sebeple soğutma plakasının temas ettiği yüzeyde bulunan 6,7,8,9,10,11,12,13 ve14 numaralı hücreler, soğutma plakasının soğutma performansının araştırılması için belirlenmiş ve bu hücrelerin merkezinde bulunan toplamda 9 adet ısıl çiftlerden toplanan sıcaklık verileri takip edilerek raporlanmıştır.

4.1. Deney Sonuçları ve Oluşturulan Grafikler

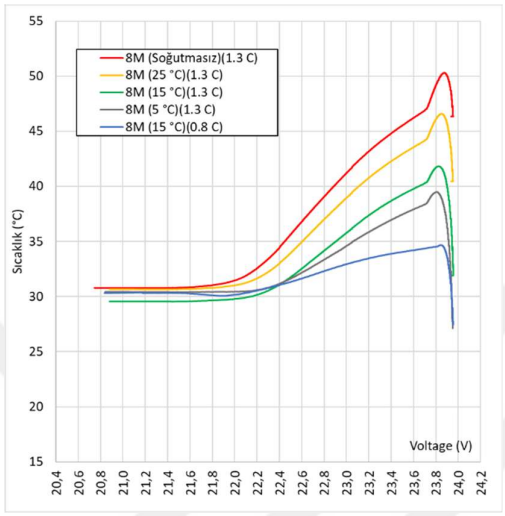
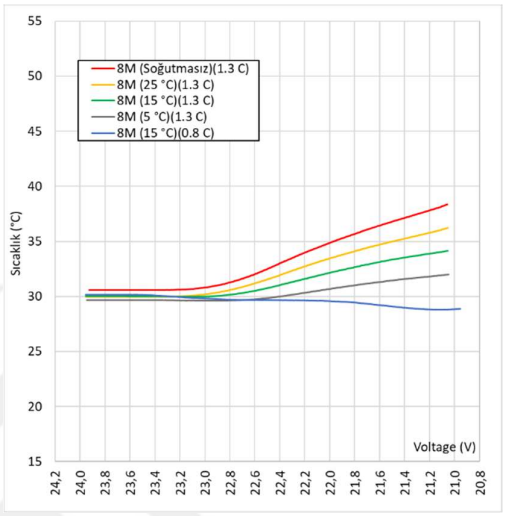
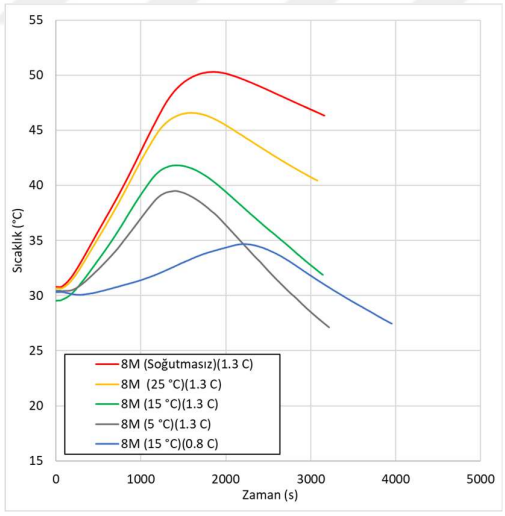
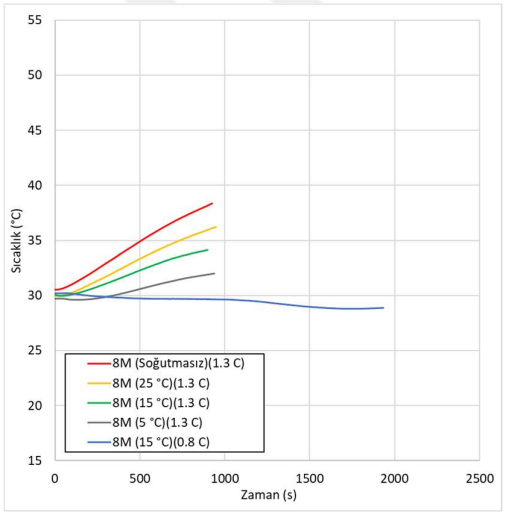
Yukarıda tarif edilen 9 adet hücrenin merkezinde bulunan ısıl çift için toplam 10 adet testte elde edilmiş olan Sıcaklık-Zaman ve Sıcaklık-Voltaj grafikleri, şarj ve deşarj olarak ayrı ayrı Şekil 4.1.'de sunulmuştur.

Hücre No: 6	
Şarj	Deşarj
	
	
(a)	

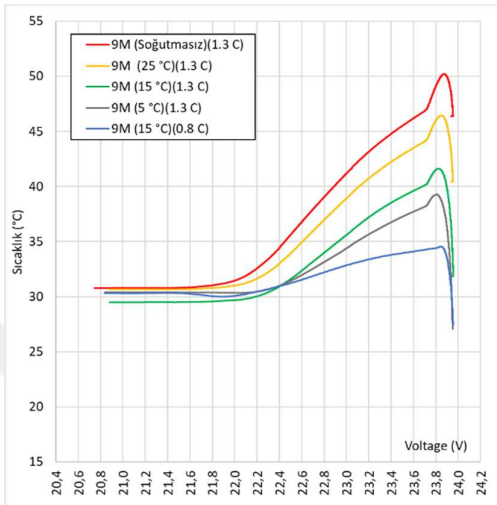
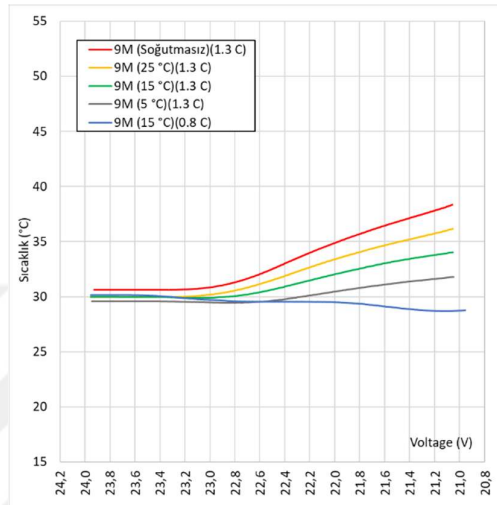
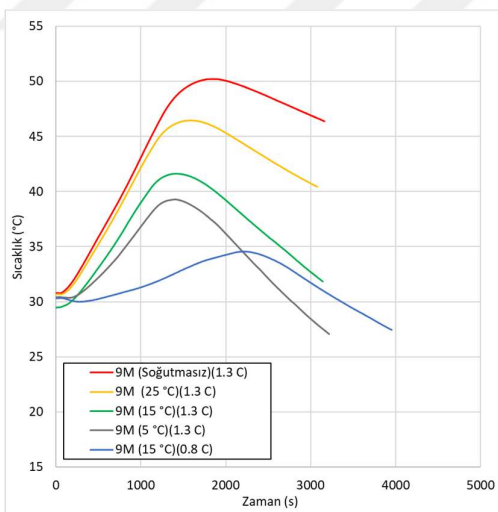
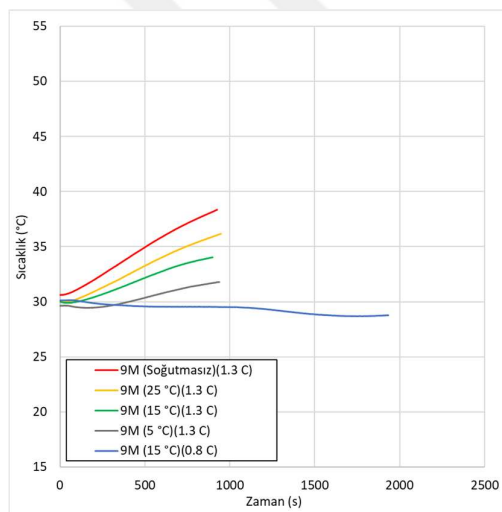
Şekil 4.1. Sıcaklık-Zaman ve Sıcaklık-Voltaj grafikleri, a) Hücre No:6, b) Hücre No:7, c) Hücre No:8, d) Hücre No:9, e) Hücre No:10, f) Hücre No:11, g) Hücre No:12, h) Hücre No:13, i) Hücre No:14

Hücre No: 7	
Şarj	Deşarj
	
	
(b)	

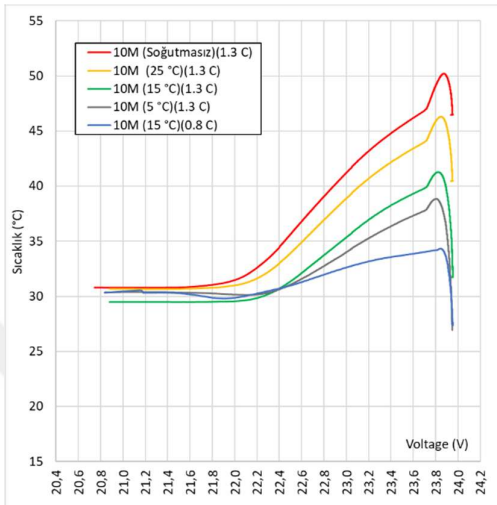
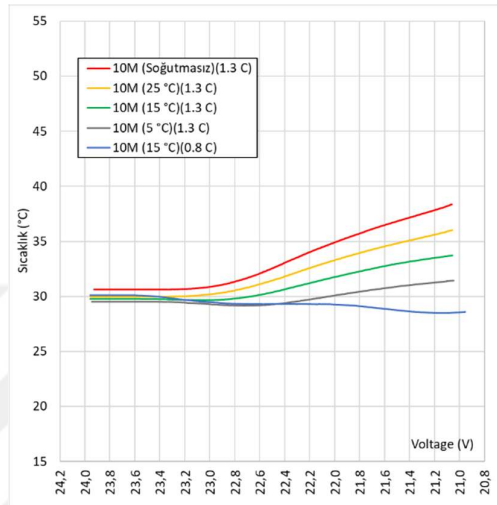
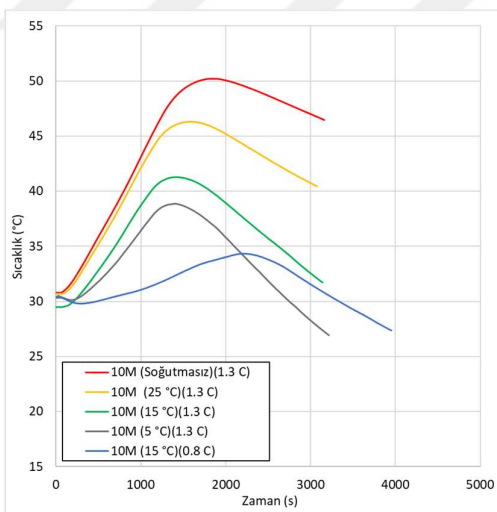
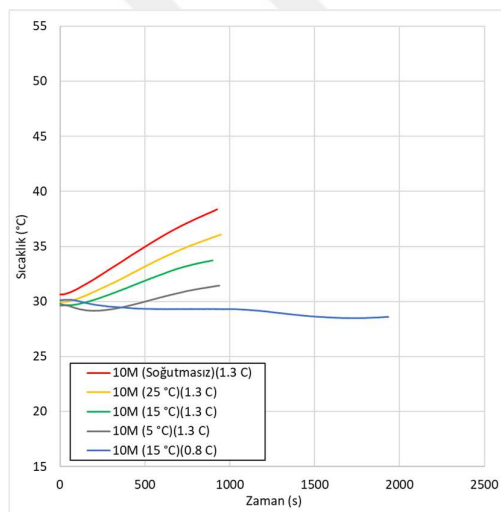
Şekil 4.1. Sıcaklık-Zaman ve Sıcaklık-Voltaj grafikleri, a) Hücre No:6, b) Hücre No:7, c) Hücre No:8, d) Hücre No:9, e) Hücre No:10, f) Hücre No:11, g) Hücre No:12, h) Hücre No:13, i) Hücre No:14 (devam)

Hücre No: 8	
Şarj	Deşarj
	
	
(c)	

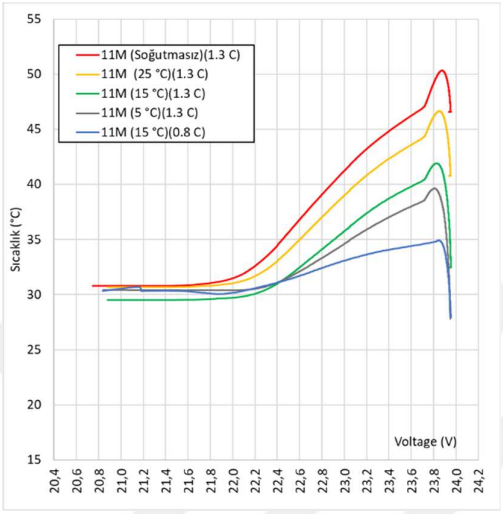
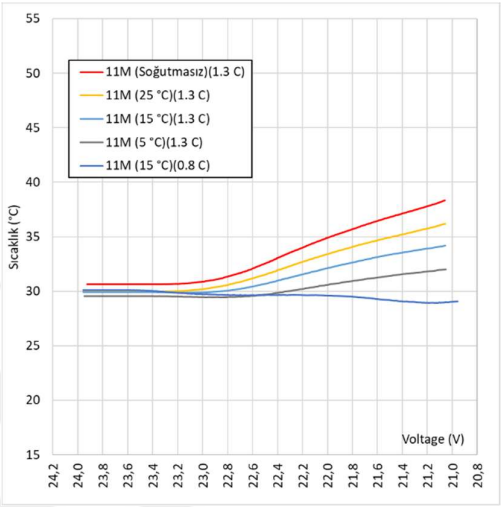
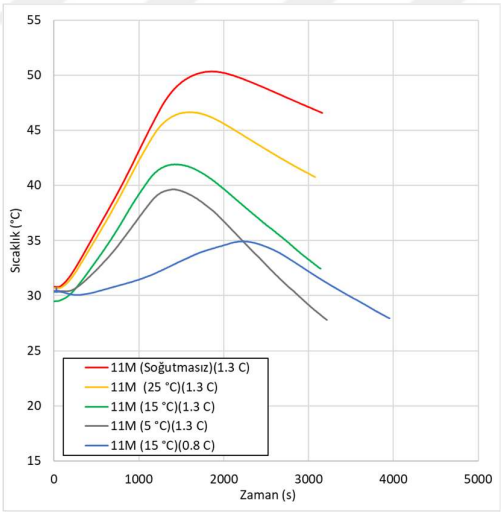
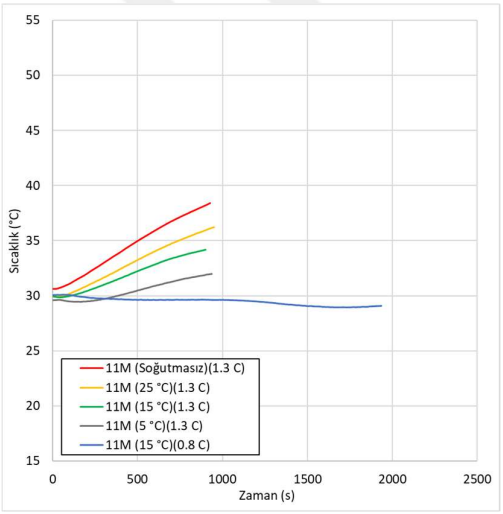
Şekil 4.1. Sıcaklık-Zaman ve Sıcaklık-Voltaj grafikleri, a) Hücre No:6, b) Hücre No:7, c) Hücre No:8, d) Hücre No:9, e) Hücre No:10, f) Hücre No:11, g) Hücre No:12, h) Hücre No:13, i) Hücre No:14 (devam)

Hücre No: 9	
Şarj	Deşarj
	
	
(d)	

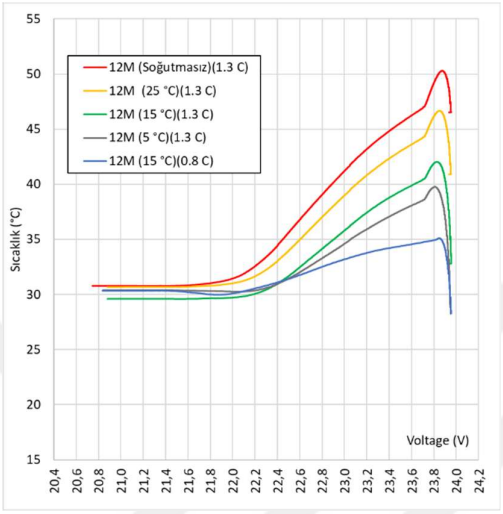
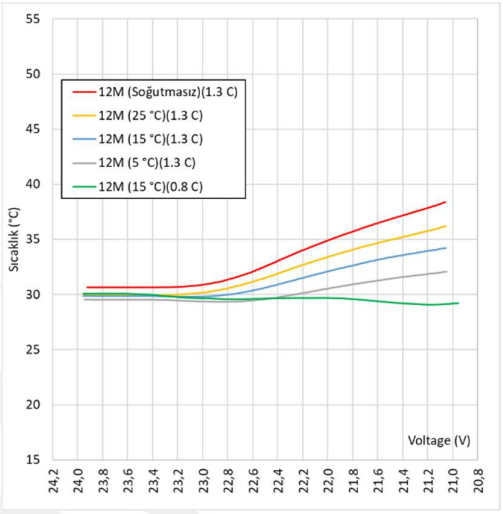
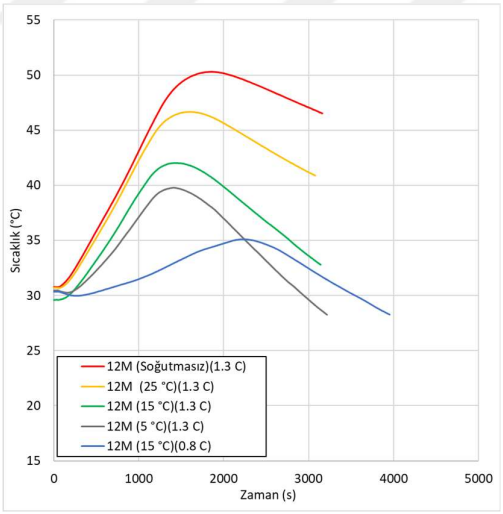
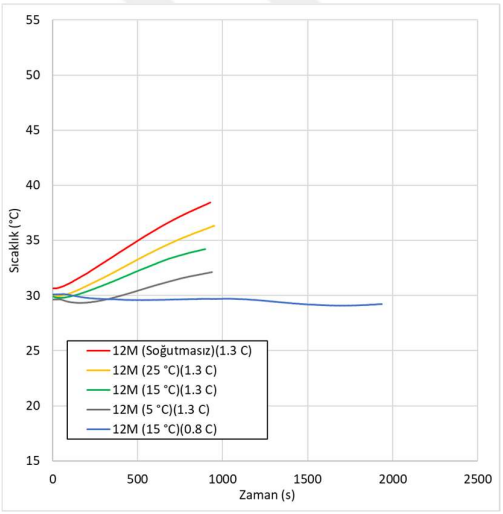
Şekil 4.1. Sıcaklık-Zaman ve Sıcaklık-Voltaj grafikleri, a) Hücre No:6, b) Hücre No:7, c) Hücre No:8, d) Hücre No:9, e) Hücre No:10, f) Hücre No:11, g) Hücre No:12, h) Hücre No:13, i) Hücre No:14 (devam)

Hücre No: 10	
Şarj	Deşarj
	
	
(e)	

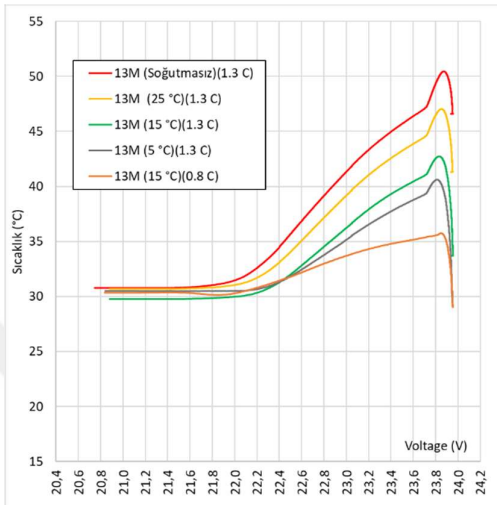
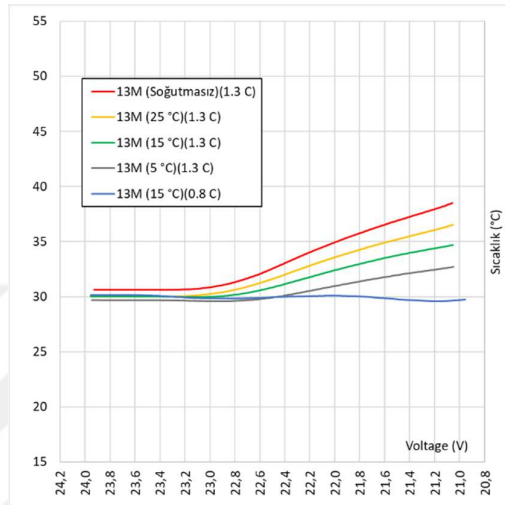
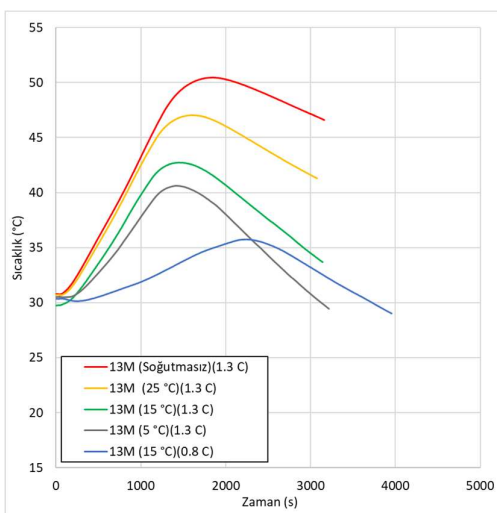
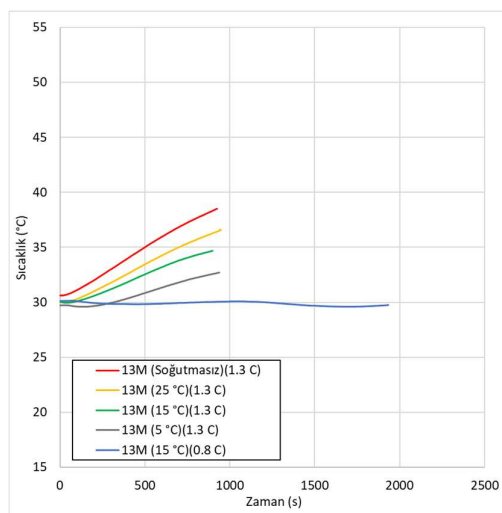
Şekil 4.1. Sıcaklık-Zaman ve Sıcaklık-Voltaj grafikleri, a) Hücre No:6, b) Hücre No:7, c) Hücre No:8, d) Hücre No:9, e) Hücre No:10, f) Hücre No:11, g) Hücre No:12, h) Hücre No:13, i) Hücre No:14 (devam)

Hücre No: 11	
Şarj	Deşarj
	
	
(f)	

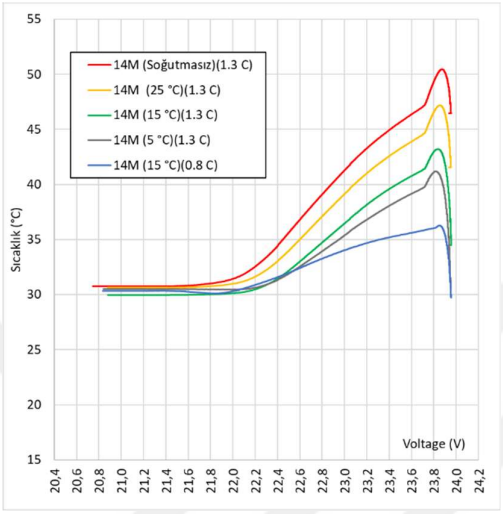
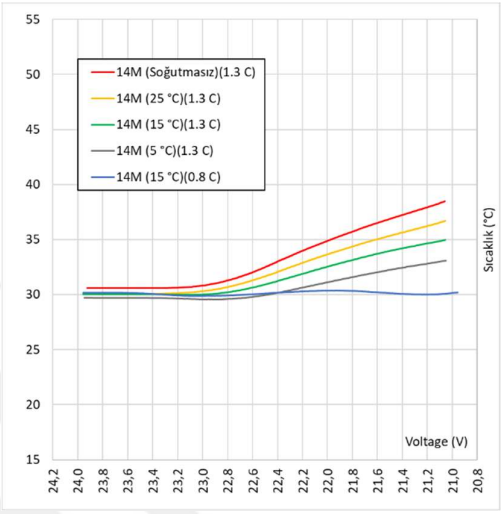
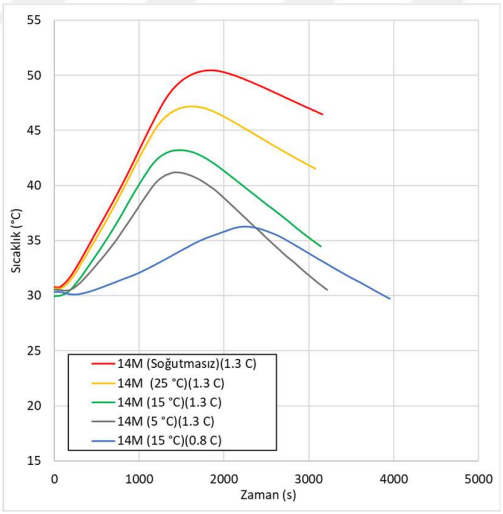
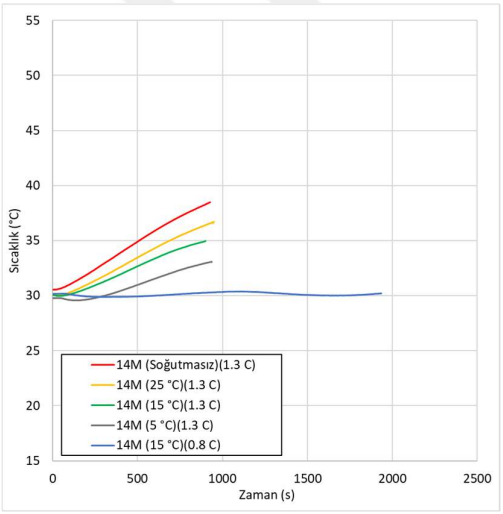
Şekil 4.1. Sıcaklık-Zaman ve Sıcaklık-Voltaj grafikleri, a) Hücre No:6, b) Hücre No:7, c) Hücre No:8, d) Hücre No:9, e) Hücre No:10, f) Hücre No:11, g) Hücre No:12, h) Hücre No:13, i) Hücre No:14 (devam)

Hücre No: 12	
Şarj	Deşarj
	
	
(g)	

Şekil 4.1. Sıcaklık-Zaman ve Sıcaklık-Voltaj grafikleri, a) Hücre No:6, b) Hücre No:7, c) Hücre No:8, d) Hücre No:9, e) Hücre No:10, f) Hücre No:11, g) Hücre No:12, h) Hücre No:13, i) Hücre No:14 (devam)

Hücre No: 13	
Şarj	Deşarj
	
	
(h)	

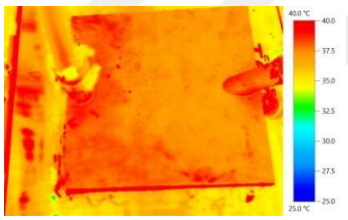
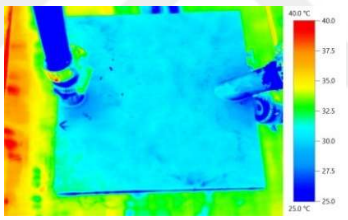
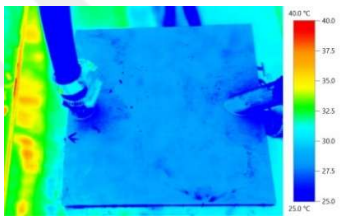
Şekil 4.1. Sıcaklık-Zaman ve Sıcaklık-Voltaj grafikleri, a) Hücre No:6, b) Hücre No:7, c) Hücre No:8, d) Hücre No:9, e) Hücre No:10, f) Hücre No:11, g) Hücre No:12, h) Hücre No:13, i) Hücre No:14 (devam)

Hücre No: 14	
Şarj	Deşarj
	
	
(i)	

Şekil 4.1. Sıcaklık-Zaman ve Sıcaklık-Voltaj grafikleri, a) Hücre No:6, b) Hücre No:7, c) Hücre No:8, d) Hücre No:9, e) Hücre No:10, f) Hücre No:11, g) Hücre No:12, h) Hücre No:13, i) Hücre No:14 (devam)

4.2. Termal Kamera Görüntüleri

Soğutma performansının araştırılması için soğutma plakasını yukarıdan görecek şekilde termal kamera yerleştirilmiş ve sıcaklık değişimleri gözlemlenmiştir. Toplamda gerçekleştirilen 10 adet testten, soğutmasız durumu temsil eden Test 1, 1.3C şarj ve 15°C soğutma suyu sıvısı sıcaklığına sahip olan bizim için ideal durum olarak değerlendirilen Test 3 ve 0.8C şarj durumunda ideal soğutma sıvısı sıcaklığı olarak belirlediğimiz 15°C soğutma sıvısı sıcaklığına sahip olan Test 9 olmak üzere 3 test belirlenmiş ve Şekil 4.2.'de karşılaştırmak üzere ayrı ayrı olarak sunulmuştur.

Test No: Test 1 Şarj Akımı: 1.3C Soğutma: Yok	Test No: Test 3 Şarj Akımı: 1.3C Soğutma: 15°C	Test No: Test 9 Şarj Akımı: 0.8C Soğutma: 15°C
		
(a)	(b)	(c)

Şekil 4.2. Termal kamera sıcaklık ölçüm görselleri, a) Test 1, b) Test 3, c) Test 9

4.3. Soğutma Sıvısının Sıcaklık Değerinin Deney Sonuçlarına Etkisi

Yapılan testler karşılaştırıldığında en kötü durumu simüle eden testlerin şarj verileri olduğu gözlemlendi. Bu sebeple hücre açısından en kötü durumu 1.3C ile yapılan şarj durumudur. Toplamda her test için 9 adet hücrenin ve 4 adet şarj verisinin maksimum değerleri referans alınarak en kötü durumun değerlendirmesi Çizelge 4.3.'da verilmiştir.

Çizelge 4.3. – Farklı soğutma suyu sıcaklıkları ile 1.3C şarj verileri

Şarj Verilerine Genel Bakış			
Soğutma Sıvısı Sıcaklığı	C-Rate	Maksimum Sıcaklık	Delta Sıcaklık
NA	1.3C	51,54°C	-
25°C	1.3C	47,73°C	3,81°C
15°C	1.3C	45,40°C	2,33°C
5°C	1.3C	44,28°C	1,12°C
Toplam sıcaklığı düşürmekte yapılan minimum etki			7,26°C

Yukarıdaki çizelge değerlendirildiğinde, soğutma suyunun sıcaklığı hücre sıcaklıklarına bariz bir şekilde etki ettiği görülmüştür. Soğutma sıvısı sıcaklığı düştükçe hücrelerin maksimum sıcaklıkları şarj sırasında düştüğü yorumu net olarak yapılabilir.

İncelemeye göre, soğutmasız yapılan testin maksimum verisi ile 25°C soğutma sıvısı kullanılarak yapılan testin maksimum verisi arasındaki fark 3,81°C'dir. 25°C soğutma sıvısı kullanılarak yapılan testin maksimum verisi ile 15°C soğutma sıvısı kullanılarak yapılan testin maksimum verisi arasındaki fark 2,33°C'dir. 15°C soğutma sıvısı kullanılarak yapılan testin maksimum verisi ile 5°C soğutma sıvısı kullanılarak yapılan testin maksimum verisi arasındaki fark 1,12°C'dir. Soğutmasız yapılan testin maksimum verisi ile 5°C soğutma sıvısı kullanılarak yapılan testin maksimum verisi arasındaki fark 7,26°C'dir. Dolayısı ile 1.3C şarj sırasında en kötü ihtimalle en az 7,26°C soğutma sağlanabileceğini göstermektedir.

Efektif değeri anlayabilmek için soğutmasız yapılan testin maksimum verisi ile 15°C soğutma sıvısı kullanılarak yapılan testin maksimum verisi arasındaki farka bakıldığında değerin 6,14°C olduğu görülmektedir. Bu değerde maksimum yapılan etki olan 7,26°C değeri ile karşılaştırıldığında yaklaşık %85'i olarak hesaplanır. Bu hesaba göre %15'lik bir kayıp olsa bile soğutma için harcanacak enerjinin daha verimli olduğu aralık 1.3C şarj verileri için 15°C olarak belirlenmiştir.

Ayrıca soğutma sıvısı sıcaklığı için harcanan enerji ve hücreler arası sıcaklık farkının göz önünde bulundurularak yapılan optimizasyon değerlendirmesi madde 4.5. ve madde 4.6.'da verilmiştir.

Tüm bu değerlendirmeler sonucunda, sonraki değerlendirmeler için de 15°C optimize edilmiş bir soğutma sıvısı sıcaklığı olarak belirlenmiştir.

4.4. Şarj Akımının Deney Sonuçlarına Etkisi

Daha önce 15°C soğutma suyunun sıcaklık değeri 1.3C için en efektif soğutmanın sağlandığı yorumu yapılmıştı. Sonrasında akımın sıcaklığa olan etkisini gözlemlemek için optimize edilmiş olan 15°C soğutma sıcaklığı ve 1.3C şarj değerini 0.8C için güncellediğimizde soğutmaya olan etkisini aşağıdaki çizelgede özetle değerlendirildi.

Toplamda her test için 9 adet hücrenin ve 1 adet 0.8C şarj verisinin maksimum değerleri ile önceki testlerde optimize ettiğimiz 1.3C şarj verisi referans alınarak en kötü durumun değerlendirmesi Çizelge 4.4.'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. 15°C Soğutma suyu sıcaklıkları ile 1.3C ve 0.8C şarj verilerinin karşılaştırması

Şarj Verilerine Genel Bakış			
Soğutma Sıvısı Sıcaklığı	C-Rate	Maksimum Sıcaklık	Delta Sıcaklık
15°C	1.3C	45,40°C	-
15°C	0.8C	38,43°C	6,97°C
Toplam sıcaklığı düşürmekte yapılan minimum etki			6,97°C

Yukarıdaki çizelge değerlendirecek olduğumuzda şarj C-rate değerinin hücre sıcaklıklarına bariz bir şekilde etki ettiği görülmüştür. Soğutma sıvısı sıcaklığı sabit kalmış olsa bile C-rate değeri düştükçe hücrelerin maksimum sıcaklıkları şarj sırasında düştüğü yorumu net olarak yapılabilir.

Bu sonucun en temel nedeni 0.8 C-rate ile yapılan şarj deşarj işlemlerinde 1.3 C-rate değerine göre ısınmaya olan eğilimin daha az olmasıdır. Buradan çıkartılacak sonuç C-rate değeri azaldıkça soğutmaya olan ihtiyaç azalmaktadır.

4.5 Soğutucu Plaka Performansının Hesabı

Soğutucu akışkanı istenilen sıcaklığa soğutmak için harcanılan enerjiden dolayı araç özelinde menzil kayıplarına yol açmaması istenmektedir. Bu sebeple soğutma plakasının doğru sıcaklık aralığında çalışması önemlidir.

Soğutma plakasının performansının araştırılması için ısı transfer miktarını incelenen sıcaklıklar olan 5°C, 15°C ve 25°C soğutucu akışkan sıcaklık değerleri ile birlikte en kötü durumu simüle edebilecek şarj verileri referans olarak alınmıştır. Bu değerler açısından Eşitlik 3.1'de verilen formüle göre hesaplanan değerlere Çizelge 4.5'de ulaşılmaktadır.

Çizelge 4.5. Gerçekleştirilen testler için soğutma plakası ısı transfer miktarları

Test Adı	Soğutucu Sıvının Giriş Sıcaklığı	(*) Sıcaklık Farkı (ΔT)	Akım Değeri	Isı Transfer Miktarı Q̇
Test 1	-	-	1.3C (285A)	-
Test 3	15 ºC	3.12 ºC	1.3C (285A)	369.64 W
Test 5	5 ºC	4.09 ºC	1.3C (285A)	478.73 W
Test 7	25 ºC	2.08 ºC	1.3C (285A)	249.42 W
Test 9	15 ºC	3.01 ºC	0.8C (175A)	355.94 W

(*) Soğutucu sıvının giriş sıcaklığı ile çıkış sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı

Çizelge 4.5.'de hesaplandığı gibi soğutucu sıvının sıcaklığı düştükçe ısı transfer miktarı artmıştır. Ancak verimli bir soğutma yapmak için pompanın ve ısı değiştiricinin doğru

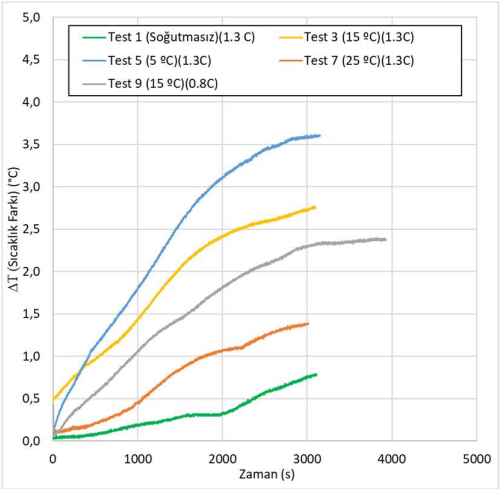
seçilmesi önemlidir. Pompa seçimi için ısı farkından çok soğutucu sıvının girişi ile çıkışı arasındaki basınç farkı önemlidir, bu tez için bu konuya değinilmemiştir. Ayrıca ısı değiştirici için önemli olabilecek kriter giriş çıkış arasındaki sıcaklık farkıdır. Harcadığı elektrik enerjisini bulmak için COP (Coefficient of Performance – Performans Katsayısı) değerini bilmek gerekir. Isı değiştiricisinin tipine ve teknolojisine bağlı olarak COP değeri değişkenlik gösterir. Ancak teorik olarak sıcaklık farkı arttıkça ilgili ısı dönüştürücüsünün verimliliği de düşmektedir.

Bu kriterler üzerinden düşündüğümüzde ısı değiştiricisinin soğutma plakasına soğutucu akışkanı talep edilen sıcaklıklarda göndermesi sırasında sıcaklık farkı arttıkça daha çok enerji harcaması gerektiği yorumu yapılabilir.

Önceki bölümlerde incelendiği üzere 25°C'de soğutucu akışkanın modül içerisinde yer alan hücreleri ideal çalışma sıcaklığı aralığında tutmaya yeterli olmadığını ve yine sonraki bölümde 5°C sıcaklığındaki soğutucu akışkanın modül içerisindeki hücreler arasında sıcaklık farkı oluşturduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu bölümde 15°C soğutucu akışkan sıcaklığının optimum bir soğutma sağladığı yorumu yapılabilir.

4.6 Hücrelerin Homojen Soğutulması Açısından Değerlendirme

Bataryanın daha uzun ömürlü olması yani batarya sağlığı açısından batarya modülü içerisindeki hücrelerin homojen olarak ısınması ve soğuması önemlidir. Bu bağlamda soğutma uygulanırken hücreler arasındaki sıcaklık farkının en az olması istenir. Şekil 4.6.'da şarj verilerine ait hücre sıcaklıklarının anlık sıcaklık farkı grafiği ve Çizelge 4.6.'da şarj verilerine ait hücre sıcaklıklarının anlık olarak farkı verilmiştir.



Şekil 4.6. Şarj verilerine ait hücre sıcaklıklarının anlık sıcaklık farkı grafiği (Sıcaklık-Zaman)

Çizelge 4.6. – Şarj verilerine ait hücre sıcaklıklarının anlık olarak farkı

Test Adı	**Test Tipi**	**Soğutma Sıvısı Sıcaklığı**	**Akım C-rate**	**Maksimum Hücre Sıcaklığı**	**ΔT***
Test 1	Şarj	-	1.3C	51.54°C	0.79 ºC
Test 3	Şarj	15 ºC	1.3C	45.40°C	2.77 ºC
Test 5	Şarj	5 ºC	1.3C	44.28°C	3.61 ºC
Test 7	Şarj	25 ºC	1.3C	47.73°C	1.39 ºC
Test 9	Şarj	15 ºC	0.8C	38.43°C	2.40 ºC

*: T anındaki 9 adet hücrenin herhangi birinin maksimum sıcaklığı ile minimum sıcaklığı arasındaki fark (Minimum sıcaklık soğutucu sıvısının giriş yaptığı bölge, maksimum sıcaklık soğutucu sıvısının çıkış yaptığı bölge olarak tanımlanabilir.).

Yukarıdaki tablo ve grafik yorumlandığında soğutucu sıvı sıcaklığı azaldıkça bariz olarak hücreler arasında sıcaklık farkı gözlemlenmiştir. Bu da soğutucu sıvısının giriş ve çıkış sıcaklıkları arasında sıcaklık farkı olduğunu gösterir. Bir diğer deyişle ortam

sıcaklığı ile soğutucu sıvısı sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı arttıkça hücreler arasında homojen soğutma zorlaşmaktadır.

Ortam sıcaklığı ile soğutucu sıvı sıcaklığı (veya soğutucu yokken) birbirine yaklaştığında hücreler arası sıcaklık farkı azalır ancak yukarıdaki diğer grafiklerde ve açıklamalarında açıklandığı gibi bu durumda soğutma etkisi azalmakta ve modülü yeterince soğutamamaktayız.

Sonuç olarak bu bölümdeki değerlendirme olarak 15 ºC soğutma sıvısı sıcaklığı diğerlerine oranla hem modülde genel bir soğutmaya olan etkinin fazla olması hem de hücreler arasındaki sıcaklık farkının fazla olmaması sebebi ile optimal değer olarak belirlenebilir.

4.7 Genel Değerlendirme

Sistem seviyesi düşündüğümüz zaman soğutma olmayan 1.3C şarj durumu en kötü koşul olarak seçildi ve en iyi durum olarak 0.8C şarj değeri 15°C soğutma sıvısı sıcaklığı için bir karşılaştırma yapıldı.

Toplamda her test için 9 adet hücrenin ve 5 adet şarj verisinin maksimum değerleri referans alınarak en kötü durumun değerlendirmesi Çizelge 4.7.a'de verilmiştir.

Çizelge 4.7.a. Toplam sıcaklığı düşürmekte yapılan minimum etki

Şarj Verilerine Genel Bakış			
Soğutma Sıvısı Sıcaklığı	C-Rate	Maksimum Sıcaklık	Delta Sıcaklık
NA	1.3C	51,54°C	-
15°C	0.8C	38,43°C	13,11°C
Toplam sıcaklığı düşürmekte yapılan minimum etki			13,11°C

Sonuç olarak, sonuçlarına göre 15 °C ve 0.8 C-rate ile yapılan deneylerde en kötü ihtimalle 13,11°C'lik bir etki göstermiştir.

Eğer sonuçları her hücreyi tekil olarak değerlendirseydik, etkinin çok daha fazla olduğunu görebilirdik. Bunu grafikler üzerinden yaklaşık olarak değerlendirdiğimizde açık olarak görebiliriz. Örnek verecek olursak, modülün tam orasında yer alan hücrelerden biri olan 10.hücre için maksimum sıcaklık ile minimum sıcaklık arasındaki fark Çizelge 4.7.b.'de verilmiştir.

Çizelge 4.7.b. – 10. Hücre için sıcaklığı düşürmekte yapılan maksimum etki

10. Hücre için Şarj Verilerine Genel Bakış			
Soğutma Sıvısı Sıcaklığı	C-Rate	Maksimum Sıcaklık	Delta Sıcaklık
NA	1,3C	50,22°C	-
15°C	0,8C	34,34°C	15,88°C
Toplam sıcaklığı düşürmekte yapılan etki			15,88°C

Tekil olarak değerlendirilen 10.hücre için 15,88°C'lik sıcaklık farkı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak modül genelinde düşünüldüğünde modül içerisindeki herhangi bir hücre için soğutmasız yapılan teste göre referans aldığımızda en iyi ihtimalle 15,88°C, en kötü ihtimalle 13,11°C'lik sıcaklık farkı gerçekleşmiştir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez kapsamında, 73 Ah kapasiteli kese tipi NMC kimyasına sahip lityum-iyon hücrelerden oluşturulmuş 6S3P elektrikli araç bataryası modülünün elektriksek ve çevresel faktörler değiştirilerek elektrikli araç batarya modülünün hem şarj hem de deşarj yönünde ısıl özellikleri incelenmiştir. Bu inceleme için farklı C-rate değerleri ve soğutma sıvısının sıcaklığı üzerinde değişiklikler yapılarak soğutma plakasının en optimal soğutma performansı saptanmıştır. Bu veriler ışığında şu sonuçlara varılmıştır.

1- Akım değerleri sabit tutulup soğutma sıvısının sıcaklığı düştükçe (25°C, 15°C ve 5°C) batarya modülünün ulaştığı maksimum sıcaklık değeri azalmıştır. Bu da soğutma sıvısının sıcaklığının batarya modülü sıcaklığı üzerinde doğrudan etkili olduğunu gösterir. Dolayısı ile bu sonuca göre düşük soğutma sıcaklığı daha iyi soğutma performansı sağladığı söylenebilir.

2- Akım değeri olarak görece yüksek akım değeri diyebileceğimiz (1.3 C-rate) C-rate seviyelerinde yapılan testlerde ulaştığı maksimum sıcaklıklara göre kıyaslandığında görece daha düşük seviyeler olan (0.8 C-rate) C-rate değerinde yapılan testlerde batarya modülünün ulaştığı maksimum sıcaklık daha düşük seviyelerde kalmıştır. Bu da bizlere C-rate değerinin batarya modülü üzerinde sıcaklığa doğrudan etkili olduğunu gösterir. Ayrıca bu sonuca göre şarj ve deşarj yönleri için akım seviyesi düştükçe batarya modülünün ihtiyacı olan soğutma ihtiyacı azalmıştır diyebiliriz.

3- Optimum soğutma performansını bulabilmek için birçok kriterin hep birlikte değerlendirilmesine ihtiyacımız vardır. Bizim tezimizi değerlendirecek olursak, yukarıda elde edilen 2 adet sonuç birlikte ele alındığında, doğru C-rate ve doğru soğutma sıvısı sıcaklığı ile en optimum soğutma performansı bulunabilir. Bu performansı değerlendirirken optimum olarak ele alınacak verilerden bir tanesi soğutma sıvısının sıcaklığı düştükçe soğutmaya olan etkisinin arttığını söylemiştik ancak soğutma sıvısını belirli bir sıcaklığa getirebilmek için harcanan enerji düşünülerek hareket edilmelidir. Bu sebeple batarya modülünü soğutması için en düşük sıcaklıkta soğutma akışkanı kullanarak sağlayacak olan fayda göz ardı edilebilir bir düzeyde kalabilir. Ayrıca tüm etkiyi düşündüğümüz

zaman doğru soğutucu sıvı sıcaklığını belirlemek ilgili komponentlerin (pompa, ısı dönüştürücü vb.) verimli çalışmasının yanında ürünlerin maliyetlerini düşürmekte fayda sağlayabilir.

Önceki maddelerde verilen test verilerine göre batarya modülünün soğutmaya olan etkisi en fazla 5°C gözlemlenmiş olsa da tezde belirtilen enerji verimliliği ile ilgili hesap ve hücreler arasındaki homojen soğutma koşulları göz önüne alındığında bu tez için en optimum soğutma sıvısı sıcaklığını 15°C olarak belirlendi. Ayrıca 5°C soğutma sıvısı sıcaklığının soğutmaya olan etkisine göre 15°C soğutma sıvısı sıcaklığı ile yaklaşık %15'lik bir kayıp yaşanmasına rağmen bu kayıp yukarıda açıklanan sağladığı faydalardan dolayı göz ardı edilebilir olarak belirlendi.

Sonuç olarak, bu tez ile literatüre hem şarj hem de deşarj yönünde batarya modülünün farklı C-rate akım değerlerinde ve farklı akışkan sıcaklığı ile yapılan elektriksel testlerde oluşan batarya modülündeki sıcaklıkları en optimal seviyede modülden uzaklaştırabilecek yani modülü soğutabilecek değerleri deneysel verilerle ve teknik teorilerle destekleyerek literatüre kazandırıldı.

Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen soğutma plakası, herhangi bir sıvı kaçağı olmadan, modülde gözle görülür ve ölçülebilir soğutma gerçekleştirdi. Bu yönü ile soğutma plakası üretimi için literatüre yeni bir üretim yöntemi için destekleyici örnek kazandırdı.

Gelişime açık yönleri olarak, yapılan bu çalışmaya soğutucu plakanın boyutları ve/veya iç geometrisi ve/veya akışkanın debisi değiştirilerek ve basınç düşümü gibi konuları dikkate alarak en optimal soğutma performansına daha da yaklaşılabilir. Sonrasında modül seviyesinde yapılmış olan bu deneysel çalışma, batarya paketi seviyesine genişletilebilir.

KAYNAKLAR

Bates, A. M., Preger, Y., Torres-Castro, L., Harrison, K. L., Harris, S. J., & Hewson, J. C. (2022). Are solid-state batteries safer than lithium-ion batteries? *Joule, 6*(4), 742–755. https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.02.007

Belingardi, G., & Scattina, A. (2023). Battery pack and underbody: Integration in the structure design for battery electric vehicles—Challenges and solutions. *Vehicles, 5*(2), 498–514. https://doi.org/10.3390/vehicles5020028

Börner, M. F., Mohsseni, A. M., De, N., Faber, M., Krause, F., Li, W., Bihn, S., Ringbeck, F., & Sauer, D. U. (2024). Manufacturing cost comparison of tabless vs. standard electrodes for cylindrical lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage, 77*, 109941. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109941

Dhabe, P. R., Paraskar, S. R., & Jadhao, S. S. (2025). A comprehensive analysis of the open-circuit voltage (OCV) method for the estimation of state of charge. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering, 10*(1), 235–242. https://doi.org/10.1007/s41403-025-00517-7

Gorsch, J., Schneiders, J., Frieges, M., Kampker, A., Muñoz Castro, M., & Siebecke, E. (2025). *Contrasting a BYD Blade prismatic cell and Tesla 4680 cylindrical cell with a teardown analysis of design and performance*. Cell Reports Physical Science, 6(3), 102453. https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2025.102453

Hamut, H. S., Dincer, I., & Naterer, G. F. (2013). Performance assessment of thermal management systems for electric and hybrid electric vehicles. *International Journal of Energy Research, 37*(1), 1–12. https://doi.org/10.1002/er.1951

Hasan, M. M., Haque, R., Jahirul, M. I., Rasul, M. G., Fattah, I. M. R., Hassan, N. M. S., & Mofijur, M. (2025). Advancing energy storage: The future trajectory of lithium-ion battery technologies. *Journal of Energy Storage, 120*, 116511. https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116511

How, D. N. T., Hannan, M. A., Hossain Lipu, M. S., & Ker, P. J. (2019). State of charge estimation for lithium-ion batteries using model-based and data-driven methods: A review. *IEEE Access, 7*, 136116–136136. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2942213

Jin, C., Sun, Y., Yao, J., Feng, X., Lai, X., Shen, K., Wang, H., Rui, X., Xu, C., Zheng, Y., Lu, L., Wang, H., & Ouyang, M. (2022). No thermal runaway propagation optimization design of battery arrangement for cell-to-chassis technology. *eTransportation*, *14*, 100199. https://doi.org/10.1016/j.etran.2022.100199

Kampker, A., Heimes, H. H., Offermanns, C., Vienenkötter, J., & Robben, T. (2023). Framework and classification of battery system architectures. *World Electric Vehicle Journal, 14*(4), 88. https://doi.org/10.3390/wevj14040088

Koech, A. K., Mwandila, G., Mulolani, F., & Mwaanga, P. (2024). Lithium-ion battery fundamentals and exploration of cathode materials: A review. *South African Journal of Chemical Engineering, 50*, 321–339. https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.09.008

Li, M., Xu, W., Zhang, S., Liu, L., Hussain, A., Hu, E., Zhang, J., Mao, Z., & Chen, Z. (2025). State of health estimation and battery management: A review of health indicators, models and machine learning. *Materials, 18*(1), 145. https://doi.org/10.3390/ma18010145

Li, M., Lu, J., Chen, Z., & Amine, K. (2018). 30 years of lithium-ion batteries. *Advanced Materials, 30*(33), 1800561. https://doi.org/10.1002/adma.201800561

Liu, C., Neale, Z. G., & Cao, G. (2016). Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries. *Materials Today, 19*(2), 109–123. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.10.009

Liu, H., Wei, Z., He, W., & Zhao, J. (2017). Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review. *Energy Conversion and Management, 150*, 304–330. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.016

Moffat, R. J. (1988). Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, *1*(1), 3–17. https://doi.org/10.1016/0894-1777(88)90043-X

Niu, H., Zhang, N., Lu, Y., Zhang, Z., Li, M., Liu, J., Zhang, N., Song, W., Zhao, Y., & Miao, Z. (2024). Strategies toward the development of high-energy-density lithium batteries. *Journal of Energy Storage, 88*, 111666. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111666

Ohneseit, S., Finster, P., Floras, C., Lubenau, N., Uhlmann, N., Seifert, H. J., & Ziebert, C. (2023). Thermal and mechanical safety assessment of type 21700 lithium-ion batteries with NMC, NCA and LFP cathodes–Investigation of cell abuse by means of accelerating rate calorimetry (ARC). *Batteries, 9*(5), 237. https://doi.org/10.3390/batteries9050237

Olabi, A. G., Maghrabie, H. M., Adhari, O. H. K., Sayed, E. T., Yousef, B. A. A., Salameh, T., Kamil, M., & Abdelkareem, M. A. (2022). Battery thermal management systems: Recent progress and challenges. *International Journal of Thermofluids, 15*, 100171. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100171

Saber, N., Richter, C. P., & Unnthorsson, R. (2025). Review of thermal management techniques for prismatic Li-ion batteries. *Energies, 18*(3), 492. https://doi.org/10.3390/en18030492

Shen, K., Sun, J., Zheng, Y., Xu, C., Wang, H., Wang, S., Chen, S., & Feng, X. (2022). A comprehensive analysis and experimental investigation for the thermal management of cell-to-pack battery system. *Applied Thermal Engineering*, *211*, 118422. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118422

Shinde, S. R., Song, Y., & Sahraei, E. (2023). Modeling electric vehicle's battery module using computational homogenization approach. *International Journal of Energy Research*, *2023*, Article 9210078. https://doi.org/10.1155/2023/9210078

Silva, M. T., Silva, D. P. S., Silva, J. G., Resende, M. M., Cardoso, V. L., & Ma, W. (2025). Extraction of lithium and manganese ions from spent coin batteries: A new environmentally friendly approach. *Journal of Cleaner Production, 145015*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145015

Skromme, B. J., Wong, M. L., Redshaw, C. J., & O'Donnell, M. A. (2022). Teaching series and parallel connections. *IEEE Transactions on Education, 65*(3), 461–470. https://doi.org/10.1109/TE.2021.3129505

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

Wang, Y., Yu, Y., Jing, Z., Wang, C., Zhou, G., & Zhao, W. (2021). Thermal performance of lithium-ion batteries applying forced air cooling with an improved aluminium foam heat sink design. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 167*, 120827. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120827