

**UÇAKLARDA KULLANIMA YÖNELİK
BATARYA ISIL YÖNETİM SİSTEMLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Doktora Tezi

Melih YILDIZ

Eskişehir, 2016

**UÇAKLARDA KULLANIMA YÖNELİK BATARYA ISIL YÖNETİM
SİSTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Melih YILDIZ

DOKTORA TEZİ

Uçak Gövde –Motor Bakım Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Aralık, 2016

Bu Tez Çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1502F072 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Melih YILDIZ'ın "UÇAKLARDA KULLANIMA YÖNELİK BATARYA ISIL YÖNETİM SİSTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI" başlıklı tezi 28/12/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Unvanı-Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	Prof.Dr. T. Hikmet KARAKOÇ	
Üye	Prof.Dr. Olcay KINCAY	
Üye	Prof.Dr. Ramazan KÖSE	
Üye	Doç.Dr. Ziya SÖĞÜT	
Üye	Doç.Dr. Önder ALTUNTAŞ	

Enstitü Müdürü

ÖZET

UÇAKLARDA KULLANIMA YÖNELİK BATARYA ISIL YÖNETİM SİSTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Melih YILDIZ

Uçak Gövde –Motor Bakım Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aralık, 2016

Danışman: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

Sürdürülebilir havacılık yenilenebilir enerji kullanımını gerektirmektedir. Havacılıkta elektrik ve dolayısı ile batarya kullanımı, çevresel hassasiyetleri de dikkate alan bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bataryaların ısı yönetimlerinin önemini ve gerekliliği yaşanan pratiklerle ortaya konulmuştur. Bataryalarda hücreler arası dengenin sağlanması, ısı kaçışın engellenmesi ve ekonomik ömrün geliştirilmesi amacı ile ısı yönetim gereklidir. Ancak batarya ısı yönetiminin getirdiği ek ağırlık ve enerji tüketimi, zaten özgül enerji seviyeleri istenenin altında olan bataryaların etkinliğini daha da azaltmaktadır.

Elektrikli uçak kavramı ve uçaklarda elektrik kullanımının gelişimi incelenmiştir. Ardından batarya yönetimine yönelik gereksinimler doğrultusunda batarya yönetim sisteminin ve ısı yönetim sisteminin temel işlevleri ve özellikleri açıklanmıştır. Batarya türleri ve parametreleri incelenerek, bataryaların termodinamik, ısı transferi ve elektrokimyasal açıdan analizleri yapılmıştır. Batarya sıcaklığının belirlenmesine yönelik analiz sonuçları ortaya konmuştur.

Deney düzenekleri geliştirilmiş ve yapılan deneylerde farklı batarya konfigürasyonlarının, ısı davranışı, ısı kaçış, verim ifadeleri, sıcaklık değişimleri ve değişim hızları ölçülmüştür. Bataryaların endotermik ve ekzotermik davranışları incelenmiş, analiz sonuçları ile deney ölçümlerinin uyduğu tespit edilmiştir. Batarya boyutlandırılma ve hücre seçimine yönelik analizler sunulmuştur. Bir genel havacılık uçağında kullanılan kurşun asit batarya yerine lityum alternatifleri geliştirilmiştir.

Isı üretiminin akım değeri ile anlık batarya kapasitesine bağlı olduğu görülmüştür. Üretilen ısıнын büyük kısmının kayıp enerji olarak atıldığı değerlendirilmiştir. Batarya yönetim sistemleri ve bağlantı elemanlarının ısı üretimine katkılarının ısı yönetim açısından önemli olduğu görülmüştür. Isı kaçış deneysel olarak gözlenmiş, batarya hücrelerinin etkileşimleri incelenmiştir. Yüksek batarya kapasitesi kullanımının, ısı yönetime duyulan ihtiyacı azalttığı görülmüştür. Enerji verimi %90 üzerinde olan bataryalarda ekserji veriminin %54 olduğu hesaplanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Batarya, Batarya ısı yönetim, Daha elektrikli uçak

ABSTRACT

RESEARCH ON BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEMS FOR AIRVEHICLES

Melih YILDIZ

Department of Aircraft Fuselage-Engine Maintenance

Anadolu University Graduate School of Sciences, December, 2016

Supervisor: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

Sustainable aviation requires the use of renewable energy. The use of electricity and therefore batteries in aviation is a solution that takes environmental considerations into account. The importance and necessity of the thermal management of the batteries have been seen through practices. Thermal management is necessary for balancing the cells, preventing thermal runaway and improving economic life. However, the additional weight and energy consumption of the thermal management, further reduces the effectiveness of the batteries, which are already below the desired levels.

The concept of electric aircraft and electricity use in airplanes have been examined. Then the basic functions and features of the battery management system and the thermal management system are explained in accordance with the requirements. The battery types and parameters were examined, thermodynamic, heat transfer and electrochemical analyses were presented. Battery temperature determination was analyzed.

Experimental setups have been developed and different battery configurations, thermal behavior, thermal escape, efficiency, temperature changes and rate of change have been measured. The endothermic and exothermic behaviors of the batteries were investigated, and the results of the analyses were found to agree with the experimental measurements. Analyses for battery sizing and cell selection are presented. Lithium alternatives have been developed in lieu of a lead acid battery used in a general aviation aircraft.

It is seen that the heat production depends on the current value and the instantaneous battery capacity. It is estimated that most of the heat generated is lost energy. Battery management systems and fittings contribution to heat generation have been found to be important for thermal management. Thermal runaway was observed experimentally and the interactions of the battery cells were investigated. The use of high battery capacity has been shown to reduce the need for thermal management. Exergy efficiency of battery is calculated to be 54% whose energy efficiency is over 90%.

Keywords: Battery, Battery thermal management, More electric aircraft

ÖNSÖZ

Bataryalar ile 2009 yılında geleceğin ulaşım teknolojileri üzerine çalışırken tanıştım. Yurt dışında batarya sistemleri üzerine eğitim alma fırsatı da bulduğum bu proje ile profesyonel olarak bataryalar konusuna adım atmış oldum. İhtisasım olan havacılığa bu birikimi taşıma isteğiyle de bu doktora çalışması meydana geldi.

Doktora çalışması insan hayatında önemli bir yoldur. Bireyin bu yolda kaybolmadan yürümesi ve hedefe ulaşabilmek için rehberlik almasına ihtiyacı var. Bu çalışmayı ortaya çıkarabildiysem, rehberlerimin emeği ve sonsuz anlayışı sayesinde. Bu yola çıktıktan sonra hayatımda çok büyük değişiklikler ve dönüşümler yaşadım. Her köşede, her ihtiyacım olduğunda Danışmanım Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ, sadece bilgisi değil, sonsuz anlayışı ve çok zarif kişiliği ile rehberliğin çok ötesinde destek sağladı. Hayatım boyunca çok az insandan gördüğüm destekleri olmasaydı bu çalışma olmazdı. Hocama teşekkür ötesinde minnet duyduğumu belirtmem gerekir. Prof. Dr. İbrahim DİNÇER Hocam bu alandaki derinliği ile çalışmama vizyon kattı. Kendisine tezime verdiği katkı ve destek için teşekkür ederim.

TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü test altyapısı ve Dr. Halil HAMUT rehberliği için teşekkür ederim.

Çalışmanın çok boyutlu ve disiplinler arası olmasından dolayı, Hikmet Hocamın öğrencilerinin, Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Merkezi ve Yıldız ARGE çalışanlarının çok değerli desteklerini anmadan bu çalışma tamam olmayacaktır. Her türlü yazılımda doğuştan gelen yeteneği ile çözüm üreten Evren Yılmaz YAKIN, tüm idari işlerde sonsuz güvendiğim Seyhun DURMUŞ, tek biri bile günler süren bataryaların testlerinde sabırla teknik desteğini aldığım Tuğçe YOLCU çalışmanın gidişatına ve benim yoluma destek verdiler.

Elbette eşim Nevin ve en güzel dönemlerindeki çocuklarım bu yolda hep yanımda oldular. Ömer Gencer ve Ceren Öge, gösterdikleri yaşlarından büyük olgunluk ve anlayışı, umarım yaşamları boyunca karşılaştıkları herkesten görürler. Dilerim bu çalışmam ile onların ve tüm çocukların geleceğine olumlu katkı olacaktır. Bu çalışmamı çocuklarıma ve geleceği kuracak tüm çocukların aydınlığına adanmak istiyorum.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

28/12/2016

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Melih YILDIZ

İÇİNDEKİLER

BAŞLIK SAYFASI.....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
GÖRSELLER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Havacılık ve Çevre	2
1.2. Havacılıkta Elektrik Kullanımının Gelişimi	4
1.3. Motivasyon.....	7
1.4. Amaçlar.....	7
2. KAYNAK TARAMASI	10
2.1. Elektrikli Uçak Kavramı.....	10
2.2. Havacılıkta Enerji Depolama Araçları ve Gereksinimi	15
2.3. Uçaklar İçin Batarya Yönetim Sistemi Gereksinimleri	17
2.4. Batarya Yönetim Sistemi (BYS) Temel İşlevler ve Özellikler	19
2.5. Batarya Isıl Yönetimi.....	21
2.6. Isıl Yönetim Teknikleri	24
2.6.1. Hava	26
2.6.2. Sıvı	26
2.6.3. Faz dönüşüm malzemeleri.....	26
2.6.4. Isı kanalları.....	27
3. TEMEL BİLGİLER	28
3.1. Temel Tanımlar ve Parametreler	28
3.1.1. Hücre, modül, paket	30
3.1.2. Akım oranı.....	30
3.1.3. Açık devre gerilimi (Open circuit voltage (OCV)).....	30
3.1.4. Doluluk oranı (State of Charge (SoC)).....	30
3.1.5. Deşarj derinliği (Depth of Discharge (DoD)).....	31
3.1.6. Sağlık durumu (State of Health (SoH)).....	31
3.2. Lityum Bataryaların Elektrokimyasal Özellikleri.....	31
3.3. Batarya Türleri	34

3.3.1. Prizmatik hücreler	35
3.3.2. Poşet hücreler	35
3.3.3. Silindirik hücreler	35
3.3.4. Düğme tipi hücreler	36
3.4. Bataryalarda Isı Üretim Mekanizması	37
3.5. Isıl Modelleme	37
3.6. Batarya İç Direnci.....	38
3.7. Isıl Kaçış.....	39
3.8. Bataryanın Yaşlanması	40
4. DENEY DÜZENEGİ VE YÖNTEM	41
4.1. TUBİTAK MAM Deney Düzenegi	42
4.2. 20W Kapasiteli Deney Düzenegi.....	44
4.3. 1kW Kapasiteli Deney Düzenegi.....	47
4.4. Batarya Hücreleri Test Yatağı.....	48
4.5. Isıl Kameralar	50
4.6. Batarya Geliştirilmesi.....	51
4.7. Yöntem	56
4.7.1. Şarj yöntemi	57
4.7.2. Ölçüm yöntemleri.....	58
4.7.3. Hesaplanan değerler	59
4.7.4. Sıcaklık değişimlerinin gözlenmesi.....	59
4.7.5. Ölçüm hassasiyeti.....	60
4.7.6. Ölçüm Hassasiyetinin Sonuçlar Üzerindeki Etkisi	61
5. ANALİZ.....	62
5.1. Elektrokimyasal Isı Üretimi.....	62
5.2. Batarya Termodinamiği	65
5.3. Isı Transfer Analizi	69
5.4. Isıl Yönetimde Analiz Gereksinimi	71
5.5. Batarya Sıcaklığı Analizi ve Belirlenmesi.....	72
5.6. Batarya Enerji Kapasitesi Analizi.....	73
5.7. Enerji Verimi Analizi	75
5.8. Ekserji Analizi.....	76
6. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER	79
6.1. Batarya Isıl Yönetim Algoritması (BIYA).....	79
6.2. Batarya Şarj/Deşarj Akım Profili.....	82
6.3. Akım Oranlarının Batarya Sıcaklığına Etkisi.....	83
6.4. Hücrelerin Isıl Karakteristiklerinin Çıkarılması.....	86
6.4.1. Çoklu döngü deneyi	88
6.4.2. Üretici A hücre deneyleri	89
6.4.3. Üretici B hücre deneyleri.....	91

6.4.4. Üretici C hücre deneyleri	95
6.4.5. Üretici D hücre deneyleri	97
6.4.6. Üretici E hücre deneyleri.....	100
6.4.7. Üretici F hücre deneyleri.....	100
6.4.8. Üretici G hücre deneyleri	101
6.5. Isıl Kaçış Etkisinin Gözlenmesi	101
6.6. Batarya Isıl Karakteristiğinin Çıkarılması	103
6.7. Batarya Yönetim Sisteminin Isıl Davranışı	106
6.8. Batarya Hücrelerinin Etkileşimi	111
6.9. Batarya Enerji Verimi Analizi.....	116
6.10. Analiz ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	118
6.11. Bulgular	120
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	123
7.1. Sonuçlar	123
7.2. Öneriler	125
KAYNAKLAR.....	126
ÖZGEÇMİŞ	

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Uçakların elektrik güç özellikleri.....	6
Çizelge 1.2. Elektrikli uçaklar ve özellikleri.....	7
Çizelge 2.1. Alan yazında elektrikli uçak tanım, avantaj ve zorlukları	11
Çizelge 2.2. Green Flight Challenge 2011 verim kategorisi sonuçları	16
Çizelge 2.3. Batarya geliştirme projeleri performans hedefleri	19
Çizelge 2.4. Elektrokimyalarına göre işletme sıcaklık değerleri	22
Çizelge 3.1. Bazı endüstriyel bataryalar ve özellikleri.....	32
Çizelge 3.2. Farklı hücrelerin deşarj akımına göre kapasiteleri.....	34
Çizelge 4.1. Test ekipmanları listesi	42
Çizelge 4.2. 20 W kapasiteli deney teçhizatı listesi	44
Çizelge 4.3. Geliştirilen bataryaların özellikleri	51
Çizelge 4.4. Batarya konfigürasyonlarının teorik özgül enerji değerleri	55
Çizelge 4.5. Deneylerde kullanılan 18650 hücreler ve özellikleri	58
Çizelge 4.6. Deney teçhizatının hassasiyet ve sapmaları	60
Çizelge 6.1. Derin deşarj testinin sonlarında enerji ve kapasite değişimi.....	94
Çizelge 6.2. Bataryaların teorik ve deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	106
Çizelge 6.3. Hücrelerin enerji değerleri ve verimleri.....	116
Çizelge 6.4. Hücrelerin şarj/deşarjında oluşan kayıp enerji miktarları	117
Çizelge 6.5. Batarya deşarj oranlarına göre hesaplanan verim değerleri	118

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. CO ₂ emisyon kaynakları.....	3
Şekil 1.2. CO ₂ emisyon azaltma yol haritası.....	3
Şekil 1.3. Yıllara göre sivil havacılıkta elektrik gücü değişimi	6
Şekil 2.1. BYS işlevleri	20
Şekil 2.2. Literatürde ısı yönetim teknikleri.....	25
Şekil 3.1. Batarya çalışma sıcaklık ve gerilim aralığı.....	29
Şekil 3.2. Batarya elektrokimyasalına göre performans değişimleri.....	29
Şekil 3.3. Batarya ömrünün işletme sıcaklığına göre değişimi	30
Şekil 3.4. Değişik teknolojilerin enerji depolama performans diyagramı.....	32
Şekil 3.5. Silindirik hücrede güvenlik tedbirleri	36
Şekil 3.6. Batarya içinde ısı kaynakları.....	37
Şekil 3.7. Kapasite boyunca iç direnç değişimi	38
Şekil 3.8. İç direnci yüksek (a) hücresinin neden olduğu kapasite kaybı	39
Şekil 4.1. Deneysel çalışmaların şematik gösterimi.....	41
Şekil 4.2. Deney düzeneği bağlantı şematiği	42
Şekil 4.3. Deney düzeneği bağlantı şematiği	45
Şekil 4.4. BTSY kodlanmış hali.....	46
Şekil 4.5. BTSY Test yönetim ve kayıt yazılımı arayüzü.....	46
Şekil 4.6. Örnek kurşun asit batarya akıma göre deşarj süresi grafiği.....	54
Şekil 4.7. Sabit akım- sabit gerilim şarj metodu ile şarj	57
Şekil 5.1. Batarya sıcaklık artışının bileşenleri.....	64
Şekil 5.2. Termodinamik sistem olarak batarya.....	65
Şekil 5.3. Tersinir reaksiyonlarda enerji seviyeleri.....	65
Şekil 5.4. Tersinmez reaksiyonlarda enerji seviyeleri.....	66
Şekil 5.5. Bataryanın enerji etkileşimi	66
Şekil 5.6. Bataryanın entropi değişim kaynakları	67
Şekil 5.4. Batarya sıcaklığı analizi.....	73
Şekil 5.5. Batarya çevrim süreçleri	76
Şekil 5.6. Batarya süreçleri boyunca ekserji değişimi	77
Şekil 5.7. Hücrenin 1A ile şarj/deşarjı boyunca sıcaklık değişimi.....	78
Şekil 6.1. Algoritmanın işlem basamakları	79

Şekil 6.2. Başlatma süreci algoritması	80
Şekil 6.3. TYS algoritması döngü süreci	81
Şekil 6.4. Bataryanın farklı akım oranlarında deşarj testleri.....	82
Şekil 6.5. Bataryanın farklı akım oranlarında şarjı	83
Şekil 6.6. Farklı oranlarda yapılan deşarj deney sonuçları	83
Şekil 6.7. Farklı deşarj oranlarında bataryanın sıcaklık değişimleri.....	84
Şekil 6.8. Farklı deşarj oranlarında (1C, 2C ve 2.5C) sıcaklık değişimi.....	84
Şekil 6.9. 1C, 2C ve 2.5C deşarj sırasında zamana göre sıcaklık değişimi.....	85
Şekil 6.10. 1C deşarj sırasında sıcaklığın zamana göre değişimi.....	85
Şekil 6.11. Hücre ve bağlantılarda sıcaklık dağılımı	86
Şekil 6.12. Hücrelerin 2C deşarj altında gerilim değişimleri.....	87
Şekil 6.13. Hücrelerin 2C deşarj altında sıcaklık değişimleri.....	88
Şekil 6.14. Farklı ortam sıcaklıklarında hücrenin deşarj ısıl karakteristiği.....	88
Şekil 6.15. Üretici A hücresi deşarj deneyi gerilim değişimleri	89
Şekil 6.16. Üretici A hücresi sıcaklık değişimleri.....	90
Şekil 6.17. Üretici A hücresi C/2 ile deşarj sıcaklık değişimi.....	90
Şekil 6.18. Üretici A hücresi 1C ile deşarj sıcaklık değişimi.....	91
Şekil 6.19. Üretici A hücresi 2C ile deşarj sıcaklık değişimi.....	91
Şekil 6.20. Farklı akım oranlarında deşarj deney sonuçları	92
Şekil 6.21. Üretici B hücresinin 1C ile deşarjı.....	92
Şekil 6.22. Üretici B hücresi 2C ile deşarjı.....	93
Şekil 6.23. Üretici B hücresi 2.5C deşarjı.....	93
Şekil 6.24. C/3 deşarj sırasında, sıcaklığın gerilime göre değişimi	94
Şekil 6.25. 2.8 Ah Hücreden C/3 ile deşarj boyunca çekilen anlık enerji.....	95
Şekil 6.26. Hücrenin 1A ile şarj/deşarjı boyunca sıcaklık değişimi.....	95
Şekil 6.27. Üretici C hücresi 1C şarjı.....	96
Şekil 6.28. Üretici C hücresi 2C ile deşarjı.....	96
Şekil 6.29. LFP hücre şarj-deşarj boyunca gerilim-sıcaklık değişimi.....	98
Şekil 6.30. LFP hücre, 1A şarj ve 0,5 A ile deşarj gerilim değişimi.....	98
Şekil 6.31. LFP hücre 1A şarj ve 0.5A ile deşarj sıcaklık değişimi.....	99
Şekil 6.32. Üretici D hücresi 2C deşarj deney sonuçları.....	99
Şekil 6.33. Üretici E hücresinin C/3 ile şarjı.....	100
Şekil 6.34. Üretici F hücresi 3C deşarjı	101

Şekil 6.35. Üretici G hücresi 2C deşarjı.....	101
Şekil 6.36. Batarya deney düzeneği ve paralel kol numaraları	103
Şekil 6.37. 4S 12V, 3.2 Ah batarya ile yapılan test sonuçları.....	104
Şekil 6.38. 4S, 2P, 12V, 6.4Ah batarya test sonuçları	105
Şekil 6.39. 4S, 3P Batarya paketinin C/10 ile deşarj testi.....	105
Şekil 6.40. Batarya konfigürasyonlarının karşılaştırılması	106
Şekil 6.41. Şarjdan önce BYS sıcaklık dağılımı	107
Şekil 6.42. Batarya şarj akımı kesicileri aktif, batarya tam şarj durumunda.....	107
Şekil 6.43. Batarya deşarj oluyor, şarj akım kesicileri aktif	108
Şekil 6.44. Batarya deşarj oluyor akım kesiciler açıldı.....	109
Şekil 6.45. Batarya deşarj oluyor, akım kesiciler 45 dakika önce açıldı.....	109
Şekil 6.46. 3 numaralı paralel kol ve hücre numaraları	111
Şekil 6.47. Deneyin başlangıcında 3 numaralı paralel kol.....	112
Şekil 6.48. Şarj sonunda 3 numaralı paralel kol.....	112
Şekil 6.49. Deşarjın 5. dakikasında 3 numaralı paralel kol.....	113
Şekil 6.50. Deşarjın başlangıcından 1 saat sonra 3 numaralı paralel kol.....	113
Şekil 6.51. 1 numaralı hücrenin bağlantısından 2 dakika sonra paralel kol.....	114
Şekil 6.52. 1 numaralı hücre bağlandıktan 2 dakika sonra tüm batarya.....	114
Şekil 6.53. 1 numaralı hücrenin bağlanmasından 15 dakika sonra	115
Şekil 6.54. 15. Dakikada 3 numaralı paralel kol ve batarya.....	115
Şekil 6.55. 1 numaralı hücrenin bağlanmasından 3 saat 45 dakika sonra.....	116
Şekil 6.56. Farklı hücrelerin verim ifadelerinin karşılaştırılması.....	117
Şekil 6.57. 1C ile şarj sırasında iç direncin kapasite ile değişimi	119
Şekil 6.58. Kapasite boyunca ölçüm ve analiz sonuçlarının kıyaslanması	119

GÖRSELLER DİZİNİ

Görsel 2.1. 2013 yılındaki kazaya neden olan batarya	17
Görsel 3.1. (a) prizmatik, (b) poşet, (c) silindirik, (d) düğme tipi hücre	35
Görsel 4.1. Test edilen batarya hücreleri	43
Görsel 4.2. TÜBİTAK MAM şarj/deşarj (cyclers) ekipmanı	43
Görsel 4.3. TÜBİTAK MAM Batarya güvenlik ve test kabini	43
Görsel 4.4. Kurulan deney altyapısı.....	45
Görsel 4.5. 1kw kapasiteli deney düzeneği.....	48
Görsel 4.6. Batarya hücrelerinin bağlandığı deney düzeneği	49
Görsel 4.7. Deneylerde kullanılan ısıl kamera.....	50
Görsel 4.8. Sabit tip ısıl kamera ölçüm sırasında	50
Görsel 4.9. Tez kapsamında geliştirilen bataryalar.....	51
Görsel 4.10. Batarya Yönetim Sistemi (12V, 4S).....	52
Görsel 4.11. 4S, 3P olarak geliştirilen batarya paketi.....	53
Görsel 4.12. Geliştirilen batarya paketinin entegre edilmiş görünümü	53
Görsel 4.13. Geliştirilen 24V batarya	55
Görsel 4.14. 24 V bataryada kullanılan 26650 NMC hücre	56
Görsel 4.15. 24V LFP bataryalar	56
Görsel 4.16. Hücre ve hücre üzerine sabitlenmiş K-tipi ısıl çift.....	58
Görsel 4.17. Şarj sırasında bataryanın ısıl kamera ile izlenmesi	60
Görsel 6.1. Deneylerde kullanılan 18650 hücreler	87
Görsel 6.2. Hücrenin deney başındaki ısıl kamera görüntüsü	97
Görsel 6.3. Hücrenin deney sonundaki ısıl kamera görüntüsü	97
Görsel 6.4. Seri bağlı 6 hücreden oluşan batarya	102
Görsel 6.5. (a) AKA açılmış 3 numaralı hücre ve (b) sağlam AKA.....	102
Görsel 6.6. BYS ısı üretiminin bataryaya etkisi	110
Görsel 6.7. BYS Dengeleme dirençleri çalışma sırasında.....	110

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

η	enerji verimi
ψ	ekserji verimi
ξ	reaksiyon gerçekleşme sayısı
A	ısı geçiş yüzey alanı (m^2)
C	batarya anma akımı (A)
C_p	ısıl kapasite (J/K)
C_t	ısı transfer katsayısı $W/(mK)$
e_n	özellik enerji (J/kg)
e_x	özellik ekserji (J/kg)
E	enerji (Wh)
F	Faraday sabiti (elektron yükü/mol)
G	Gibbs serbest enerjisi (J/mol)
h	özellik entalpi (J/kg)
H	entalpi (J)
I	akım (A)
k	reaksiyon direnci
K	batarya kapasitesi (Ah)
M	elektromotor kuvvet (W)
N	toplam sayı
P	güç (W)
q	birim batarya kütleğinde üretilen ısı (J/kg)
Q	ısı transfer oranı (kW)
R	Reaksiyon enerjisi
s	özellik entropi (J/kgK)
S	entropi (J/K)
t	zaman (sn)
T	sıcaklık ($^{\circ}C$ veya K)
U	açık devre gerilimi (V)
x	mol sayısı
X	tüketilen ekserji
v	reaksiyon oranı

V	yük altında gerilim (V)
W	toplam ağırlık (kg)

Alt ve Üst İndisler

ac	yük altında ölçülen
akışkan	akışkana ait değer
bat	toplam batarya değeri
batarya	bataryaya ait değer
dış	dış
hücre	hücre başına değer
i	eleman numarası
iç	iç
kapasite	kapasite açısından hesaplanan değer
maks	maksimum
min	minimum
model	model için hesaplanan
oc	açık devre
ort	ortalama
paralel	paralel bağlı hücre (bank)
s	izantropik
seri	seri bağlı hücre
sür	sürekli yüklemeye
tersinir	tersinir reaksiyon veya ısı
tersinmez	tersinmez reaksiyon veya ısı
toplam	toplam değer
yüzey	yüzeyde ölçülen değer

Kısaltmalar

AEA	Tümü Elektrikli Uçak (All Electric Aircraft)
BSM	Batarya Sıcaklığı Modeli
BIYA	Batarya Isıl (Termal) Yönetim Algoritması
BTSY	Batarya Test Sistemi Yönetim Yazılımı
BYS	Batarya Yönetim Sistemi
DEU	Daha Elektrikli Uçak (More Electric Aircraft, MEA)

DoD	Deşarj derinliği (Depth of Discharge)
EV	Elektrikli Vasıta
GEO	Sabit Yörünge Uydusu (Geosynchronous Equatorial Orbit)
HEV	Hibrid Elektrikli Vasıta
IYS	Isıl (Termal) Yönetim Sistemi
İHA	İnsansız Hava Aracı
İYM	İçten Yanmalı Motor
LEO	Alçak İrtifa Uydusu (Low Earth Orbit)
LFP	Lityum Demir Fosfat
OCV	Açık devre gerilimi
SoC	Batarya Doluluk Oranı (State of Charge)
SoH	Hücresinin Sağlık Durumu (State of Health)
SoF	İşlevsellik Seviyesi (State of Function)
YVDC	Yüksek Voltaj DC

1. GİRİŞ

Modern yaşamın faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonların, dünya ölçeğinde insan sağlığını ve geleceğini tehdit etmesi, iklim değişikliği ve çevre sağlığına yönelik kaygıları giderek artırmaktadır. Çevre ile ilgili kaygılar, her alanda kirliliği ve maliyetleri azaltma çabalarını tetiklemekte ve çözüm arayışlarına yön vermektedir. Ulaşım, çevre kirliliğindeki payı nedeniyle bu çabaların yoğunlaştığı bir alan olarak öne çıkmaktadır. Ulaşımında çevresel etkiler yönünden baskının artması ile birlikte yakıt tasarrufu ihtiyacı ve artan maliyetler de “Daha Elektrikli” teknolojilerin kullanımını zorunlu kılmaktadır [1]. Buna dayalı olarak da kara, deniz ve hava ulaşım araçlarında elektrik kullanımı giderek artmaktadır. Özellikle hava ulaşım araçlarının dünya üzerindeki emisyonların %2’sinden sorumlu oluşu [2] havacılık endüstrisindeki elektrik kullanımı ile ilgili girişimleri önemli kılmaktadır.

Havacılık endüstrisinin en zorlu alanlarından birisi uçakların tahrik sistemlerinden kaynaklanan emisyonları hem havaalanlarında hem de uçuş sırasında azaltmaktır. Bu nedenle havacılık endüstrisi yeni tahrik sistemlerinin araştırılmasının yanı sıra var olan tahrik sistemlerinin geliştirilmesi yolunda da çaba harcamaktadır [3]. Bu alanda atılmış önemli adımlardan bir tanesi uçaklarda daha çok elektrik enerjisinin kullanılması yönündedir. Bu da elektrik enerjisi depolama aracı olan bataryaların havacılıkta kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Bataryalar, kimyasal özelliklerinden dolayı belli bir sıcaklık aralığında etkin ve güvenli işlev gösteren enerji depolama araçlarıdır. Havacılık alanında yaşanan bazı olumsuz deneyimler bataryaların güvenli kullanımı için ısı yönetimlerinin zorunlu olduğunu göstermiştir. Bataryaların ısı yönetimi, oda sıcaklığında çalışan bataryalarda (örneğin lityum-iyon) ani ısı artışının (örneğin yüksek akım çekildiği durumlarda) ısı kaçışa (thermal runaway) yol açmasına engel olmak ya da işletme sıcaklığının ortam sıcaklığından yüksek olduğu bataryaların çalışmasını sağlamak için (örneğin lityum polimer-elektrot hücreler) gerekli ve önemlidir [4]. Isı yönetimin diğer amaçları da bataryaların ekonomik ömrünü uzatmak ve batarya hücreleri arasında ısı kaynaklı dengesizliği önlemek olarak sayılabilir.

Isı yönetim sistemi, bataryaların güvenli ve etkin kullanımı için gerekli olmasına karşın, getirdiği ek ağırlık, hacim ve enerji tüketimi nedeniyle bataryaların zaten sınırlı olan enerji değerlerini olumsuz etkilemektedir. Bu tez çalışması ile havacılıkta kullanılan

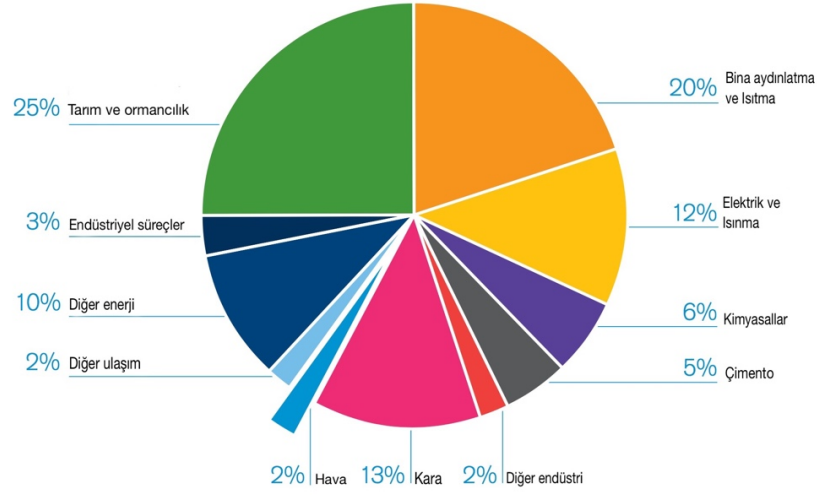
bataryaların ısıl yönetiminin etkin ve güvenli olarak sağlanması amacıyla batarya performans parametreleri incelenmiş ve havacılık uygulamalarına yönelik gereksinimlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan bu çalışma ile batarya özgül enerji değerinde de iyileşme sağlanması hedeflenmektedir.

Bu tez çalışmasında ilk iki bölümde öncelikle havacılıkta elektrik kullanımı incelenmiş, literatürde yıllar içinde gelişen elektrik kullanımı, avantajları ve kullanımın önündeki pratik engellere yönelik algılar değerlendirilmiştir. Ardından batarya ve batarya yönetim sistemleri tanıtılmış, uçaklara özel gereksinimler ve ısıl yönetim konusu değerlendirilmiştir. Üçüncü bölümde, araştırmanın çerçevesi ortaya konmuş, çalışmanın temel kavramları ve tanımları yapılarak, ısıl modelleme ve batarya iç direnci incelenmiştir. Isıl yönetimin en önemli işlevlerinden olan ısıl kaçış ve batarya yaşlanmasına dair mekanizmalar tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde, tez kapsamında yürütülen deneylerin düzenekleri ve deney süreçleri aktarılmış, havacılık uygulamaları doğrultusunda geliştirilen batarya tanıtılmıştır. Beşinci bölümde bataryaların enerji kapasiteleri analiz edilmiş, ısıl özellikleri incelenmiş ve bataryaların sıcaklığını kestirmeye yönelik, bir matematik model özgün olarak geliştirilmiştir. Altıncı bölümde, deney çalışmalarında elde edilen sonuçlar sunularak incelenmiş, bulgular aktarılmıştır. Gerçekleştirilen batarya ve hücre deney sonuçları, ısıl kaçışın gösterimi ve sonuçları incelenmiş, BYS ısıl özellikleri ve batarya ısıl yönetimine etkileri değerlendirilmiş, paralel kollarda dengesizlik sonucu karşılaşılan ısıl dengesizlik gözlenmiş, bataryanın verimi hesaplanmıştır. Yine bu bölümde, batarya sıcaklık modeli çalıştırılarak, deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yedinci bölümde ise tez çalışmasının sonuçları değerlendirilmiş ve tez sonuçları üzerine inşa edilebilecek çalışmalar tartışılmıştır.

1.1. Havacılık ve Çevre

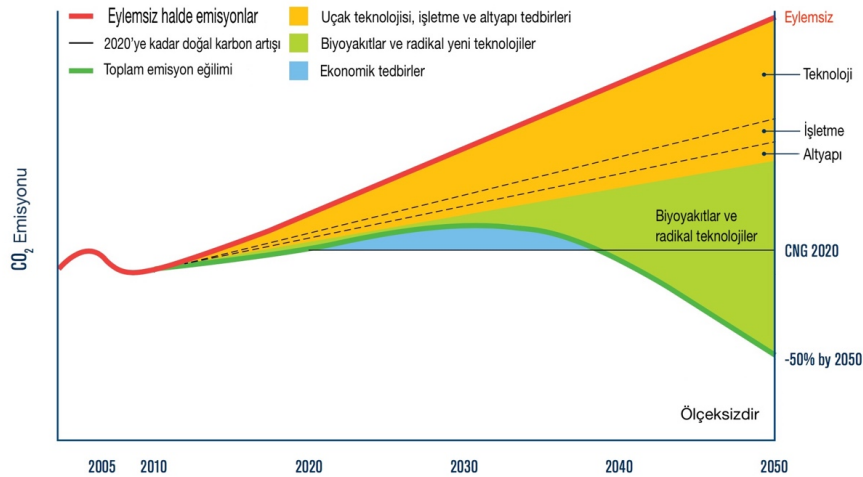
İnsanoğlunun tüm faaliyetleri arasında havacılık, **Şekil 1.1**'de görülebileceği gibi, tek başına tüm emisyonların %2'lik kısmından doğrudan sorumludur [2]. Bu nedenle, havacılık alanında emisyonlar ve gürültü kirliliğine karşı uluslararası önlemler alınmaktadır. Örneğin Amerikan Ulusal Havacılık Ajansı (NASA), havacılık endüstrisine 2020 yılına kadar, 1998 yılı değerleri ile kıyaslandığında, %50 daha az yakıt tüketimi, %75 daha düşük NO_x salınımı ve 42 dB daha az gürültü hedefleri koymuştur [5]. Benzer olarak, Avrupa Birliği, Flight Path 2050 [6] dokümanı ile iddialı hedefler tanımlamıştır. Bu hedefler, 2050 yılına kadar %75 oranında CO₂ ve %90 oranında NO_x salınımlarının

azaltılmasını içermektedir. Tanımlanan bu hedeflerin, artan hava trafiği ve taleplerin yanı sıra, havacılık alanında kullanılagelen konvansiyonel tahrik sistemleri ile sağlanamayacağı açıktır. Konvansiyonel sistemler üzerinde yürütülen geliştirme çalışmaları ile elde edilen emisyon düşüşleri ve verim artışları da endüstriye gösterilen bu hedeflere ulaşmak için yeterli görülmemektedir.



Şekil 1.1. CO₂ emisyon kaynakları
Kaynak: [2]'den uyarlanmıştır

Havacılık alanının tüm faaliyet konularında iyileştirme yapılması halinde 2050 yılına kadar %50'lik emisyon azaltılması ancak olanaklı görünmektedir. Bu alanlar ve olası katkıları **Şekil 1.2** ile temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.2. CO₂ emisyon azaltma yol haritası
Kaynak: [2]'den uyarlanmıştır

Uluslararası Hava Taşımacılığı Kuruluşu (International Air Transport Association-IATA) tarafından da ifade edildiği üzere, havacılık alanında emisyonların ve çevreye yönelik hedeflerin karşılanabilmesi için havacılıkta artan talebe rağmen, yakıt kullanımını, dolayısı ile emisyonları azaltmak yolunda global stratejiler tanımlanmıştır [2]. Bu stratejiler doğrultusunda gelişme sağlanacak teknoloji alanlarından birisi de uçaklarda tahrik sistemlerinin geliştirilmesi; birincil ve ikincil güç üretim, dağıtım ve kullanım unsurlarının daha verimli olan elektrikli seçenekleri ile değiştirilmesidir. Endüstride yürütülen bu çabalar Daha Elektrikli Uçak (DEU) başlığı altında ele alınmaktadır.

1.2. Havacılıkta Elektrik Kullanımının Gelişimi

Havacılık alanındaki gelişmeler, otomobil endüstrisindeki gelişmelere paralel olarak ilerlemiştir. Dünyada üretilen ilk otomobiller, elektrik enerjisi ile tahrik edilmekte ve ondan birkaç yıl sonra üretilmeye başlayan, İçten Yanmalı Motorlu alternatiflerine göre daha ucuza satılmaktaydı. ABD’de 1904 yılına ait bir gazetede verilen otomobil ilanında, elektrikli modellerin İçten Yanmalı Motorlu (İYM) alternatiflerinin yarı fiyatına satıldığı görülmektedir.

Elektrikli otomobiller, 1900’lerin başında daha düşük fiyatla pazara sürülse de, bu yıllarda gerçekleşen Ford endüstriyel devrimi ile başlanan seri üretim sayesinde, otomobil fiyatlarının düşmesi sağlanmıştır. Ford’un seri olarak ürettiği bu otomobillerde İYM kullanımını tercih etmesi ile İYM’li otomobiller pazarda öncü pozisyona gelmiştir. Ekonomik krizin etkisi ve seri üretim sayesinde daha ucuza satılan ve geniş pazar bulan İYM, bu dönemde yaygınlaşmıştır. Seri üretim İYM kullanan otomobillerin satış fiyatları 1909 yılında 850 USD iken 1920 yılına gelindiğinde 260 USD seviyesine indiği o dönem gazete ilanlarından da görülmektedir.

Havacılık sanayisinin gelişimi, İYM kullanımının yaygınlaştığı bu yıllara denk gelmektedir. İYM’lerin yaygınlığının yanı sıra elektrik enerjisi depolama maliyetinin ve ağırlığının o dönem için görece yüksek olmasından dolayı, havacılık endüstrisi İYM kullanmayı tercih etmiştir.

Tahrik sistemi olarak İYM kullanan ilk uçaklarda, kumanda yüzeyleri, pilotların manivelasına bağlı çubuklar ve halatlar (kablolu-uçuş) ile kas gücü kullanılarak hareket ettirilmekteydi. 1940’lardan itibaren uçakların ağırlaşması ve hızlanması sonucunda kumanda yüzeylerinin hareket ettirilebilmesi için hidrolik güç desteğine ihtiyaç

duyulmuştur. 1950'lerin sonlarına doğru, hidrolik motorlar, ağırlık ve karmaşıklık dezavantajına karşın, kumanda yüzeylerinin hareketi için kullanılmaya başlanmıştır.

Uçaklarda kumanda yüzeylerinin elektrikli kontrolü kavramı ilk defa 1916 yılında ortaya atılmıştır [7]. İkinci dünya savaşını izleyen yıllarda, karmaşık alt sistemlerin güç ihtiyacı artmış ve birincil uçuş kontrolleri dahi elektrikli olarak geliştirilmiştir [8]. Ancak, elektrikli kontrol sistemlerinin yaygın kullanıma uygun olarak geliştirilebilmesi, bilgisayar ve elektronik alanındaki gelişmeleri beklemiştir. Bu alanlardaki ilerlemelerin ardından, telli-uçuş (fly-by-wire) konsepti 1970'lerde geliştirilmiştir. Bu konseptte kontrol komutları elektronik sinyaller olarak bir bilgisayara gönderilmekte, bilgisayar da kontrol yüzeylerinin aktivasyonunu elektrik kullanarak gerçekleştirmektedir. Bu sistemin başka bir mekanik yedeği bulunmamaktadır [9]. Bu konsept, F-16 (1975), Mirage (1980) daha sonra Grippen (1988) uçaklarında kullanılmıştır.

Uçak üzerindeki sistemlerin 1970'lerde gereksinimler doğrultusunda elektrikli hale getirilmesi sürerken, tahrik sistemleri açısından, elektrik ve melez (hibrid) tahrik konusu araştırmalara konu edilmekteydi [10]. Bu çalışmalara elektronik ve güç elektroniği alanındaki teknolojik gelişmeler destek verici nitelikteydi [11–15].

Tümü elektrikli uçak çalışmaları da 1970 yılından itibaren ağırlık kazanmıştır [12]. İlk elektrikli uçak Militky MB-E1 Ni-Cd bataryaları ile 12 dakika süren ilk uçuşunu 23 Ekim 1973 tarihinde gerçekleştirmiştir [16]. Tümü elektrikli uçak denemeleri sonucunda, teknolojik altyapının enerji depolama, dağıtım ve teknolojik olgunluk açısından yeterli olmadığı görülmüştür. Diğer yandan, Daha Elektrikli Uçak (DEU) kavramının artan güç ihtiyacına orta dönemli bir çözüm olacağı öngörülerek bu kavrama yönelik çalışmalar başlatılmıştır.

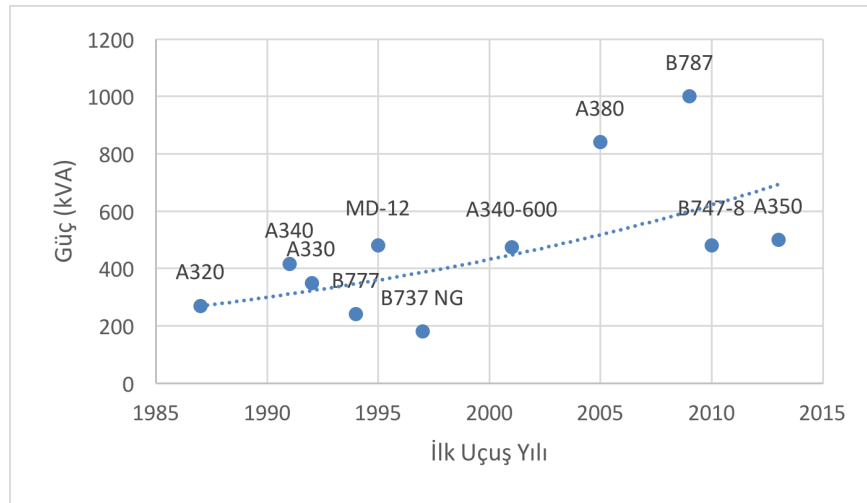
NASA, 1980'li yıllarda tümü elektrikli uçak kavramına yönelik çalışmalara destek sağlamış ve sonuç olarak sınırlı bazı askeri ve sivil uygulamalar ortaya çıkmıştır. Bu proje sonuçlarına göre çoğu donanım teknik olarak yapılabilir bulunmasına karşın, havacılık sektöründe güvenilirlik ve sertifikasyona yönelik tutucu yaklaşım, bu ürünlerin kullanımına sıcak bakmamıştır. Bunun yerine, ara bir çözüm olarak daha elektrikli uçak kavramına [8] yönelik çözümler tercih edilmiştir.

Sivil havacılık uçaklarında elektrik kullanımı Çizelge 1.1 ve elektrik kullanım eğilimi Şekil 1.3 ile verilmiştir. Buradan da görüldüğü üzere, havacılıkta elektrik gücü talebi hızlanarak artmaktadır. Bu talebin artışında, gelişmiş elektronik seyrüsefer sistemlerin de önemli payı bulunmaktadır.

Çizelge 1.1. Uçakların elektrik güç özellikleri

Uçak Modeli	İlk Uçuş	Elektrik Güç (kVA)	Koltuk Sayısı	MTOW (t)	kVA/koltuk
A320	1987	270	180	78	1.50
A330	1992	350	400	240	0.88
A340	1991	415	420	276	0.99
A340-600	2001	475	440	368	1.08
A350	2013	500	325	275	1.54
A380	2005	840	650	575	1.29
B787	2009	1000	330	253	3.03
B777	1994	240	400	300	0.60
B737 NG	1997	180	140	75	1.29
MD-12	1995	480	430	430	1.12
B747-8	2010	480	600	448	0.80

Kaynak: [17–19]



Şekil 1.3. Yıllara göre sivil havacılıkta elektrik gücü değişimi

Elektrikli havacılık, 1990'ların sonunda büyük havacılık uçakları açısından ilgi görmese de genel havacılık alanında, akademik çalışma ve sanayi tarafından yürütülen araştırmalarda konu edilmektedir. Endüstri tarafından genel havacılık amaçlı geliştirilmiş ve sertifikasyonu tamamlanarak satışa sunulmuş uçaklar mevcuttur. Bu uçaklardan bazılarının teknik özellikleri **Çizelge 1.2** ile verilmiştir.

Çizelge 1.2'de verilen genel havacılık uçakları en büyüğü 850 kg kalkış ağırlığına sahip olup, 2 koltukludur. Büyük sivil uçakların tümü elektrik konsepti ile geliştirilmesinin önündeki engel ise batarya kapasitesidir. Batarya kapasitesinin 1000 Wh/kg seviyelerinin üstüne çıkması ile büyük uçakların mümkün olacağı görülmektedir [26]. Batarya teknolojisi, otomobil endüstrisinin talep ve yatırımları ile gelişmekte olup, [27, 28] bu gelişmeler havacılık uygulamalarının geleceği açısından da izlenmektedir.

Çizelge 1.2. Elektrikli uçaklar ve özellikleri

Model	İlk Uçuş	OWE (kg)	MTOW (kg)	Motor Gücü (kW)	Menzil (km)	Koltuk	Batarya (Wh)	Özgül Enerji (Wh/kg)	Batarya Türü
Solar One	1979	104,3		3	1,2	1	720		NiCd
Lange Aviation Antares 20E	2003	475	660	42	220	1	10,627	136	Liion
Electravia BL1E Electra	2007			18	50	1	4,700		LiPo
Electravia Electro Trike	2008			19	100	1	3,000		LiPo
Pipistrel Taurus Electro	2009	306	450	40		2	6,500	155	Liion
Yuneec E430	2009	250	470	40	227	1	2,000	154	LiPo
EADS Cri-Cri	2010	78	175.5	22	200	1	500	187	LiPo
Alisport Silent 2	2011	205	315	22		1	4,300	277	LiPo
Lange Aviation Antares 23E	2013	525	850	42	220	1	10,627	136	Liion
Airbus E-Fan	2014		550	60	200	2	29,000	174	LiPo
Pipistrel Alpha Electro	2014	377	550	50	200	2	17,000	135	Liion

Kaynak: [20–25]

1.3. Motivasyon

Havacılık endüstrisi, çevresel kaygılar ve işletme maliyetlerini azaltmak açısından, havacılık sektörünün her bir bileşeni üzerinde verim artışına odaklanmıştır. Daha az enerji ile daha çok yük ve yolcu taşınması bu çalışmaların birincil hedefidir. Bu çalışmalar içinde daha çok elektrik enerjisi kullanımı gelecek vadede önemli bir teknolojidir. Bu teknolojinin gelecekteki en önemli uygulaması ise uçak üstünde elektrik enerjisinin depolanabilmesine yönelik olanlarıdır.

Havacılık alanında elektrik enerjisi depolamak için bataryalar kullanılmaktadır. Havacılık alanında kullanımı, bataryaların sistem yaklaşımı ile yönetilmesini ve kontrol edilmesini gerektirmektedir. Havacılığın geleceğinde önemli yer tutacağı öngörülen bu alan, tezin çalışılmasına yönelik önemli bir motivasyondur.

Ülkemizde havacılık alanında geçmişte elde edilen atılım ve kazanımlar, arkası getirilememiş ve teknolojik olarak dünya seviyesinin gerisinde kalmıştır. Yeni gelişmelerin takibi ve bu alanlarda kazanımlar elde etmenin, ülke olarak bu açığı kapatmaya yarayacak en önemli araç olduğu değerlendirilmektedir.

1.4. Amaçlar

Bu tez çalışması ile havacılıkta elektrik ve elektrik enerjisi depolama maksatlı bataryaların termodinamik, ısı transferi ve elektrokimyasal açıdan ısı özelliklerinin incelenmesi, havacılık açısından ısı yönetim gereksinimlerinin ortaya konması amaçlanmıştır. Deney sistemleri kurulumu ile bataryanın analiz edilen ısı

performanslarının incelenmesi hedeflenmiştir. Batarya yönetim sisteminin, paralel kollarındaki hücrelerin ısı özelliklerinin deneysel olarak gözlenmesi ve havacılık kullanımı için örnek batarya geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışmasının yukarıda anılan amaçları aşağıdaki başlıklar altında gruplandırılmış halde detaylandırılabilir;

- Havacılık alanında kullanılacak bataryalara ait özelliklerin ve gereksinimlerin belirlenmesi, bataryaların ısıtma ve soğutması için harcanacak ısı yönetim enerjisini en aza indirecek tedbirlerin tanımlanması ile batarya yönetiminin etkinliğinin artırılması ve uçaklarda kullanıma uygun batarya geliştirilmesi,
 - Havacılıkta batarya kullanımının analiz edilmesi,
 - Batarya kapasite belirlenmesinde ısı özelliklerinin etkisinin analiz edilmesi,
 - Uçaklarda kullanılacak bataryalar için ısı yönetim algoritmasının tanımlanması,
 - Uygulamaya göre bataryada kullanılacak uygun elektrokimya ve formda hücrenin seçilmesine yönelik kriterlerin tanımlanması,
 - Havacılık uygulamalarına yönelik özgün bataryalar geliştirilmesi,
 - Geliştirilen bataryalar ile deneysel performansının ve veriminin gözlenmesi.
- Batarya sıcaklığının hızlı ve yüksek doğrulukla belirlenmesi için analiz geliştirilmesi.
 - Batarya ve onu oluşturan hücrelerin ısı özelliklerinin gözlemlenmesi, tanımlanması ve modellenmesi,
 - Geliştirilen modelin deneysel verilerle doğrulanması,
 - Batarya performans parametrelerinin tanımlanması,
 - Batarya ısınmasına yönelik mekanizmaların tanımlanması.
- Batarya deneylerinde kullanılacak altyapı ve deney düzeneği geliştirilmesi
 - Deney düzeneğinin tanımlanması, geliştirilmesi ve performansının değerlendirilmesi
 - Hücre seviyesinde ısı kayıpların ve enerji verimine yönelik verilerin ölçülmesi,

- Batarya seviyesinde ısı özelliklerin ve verim ifadesine ilişkin verilerin elde edilmesi
- Deneysel olarak batarya verimi, hücre verimi ve batarya içindeki hücrelerin etkileşimlerinin analiz edilmesi,
 - Bataryayı oluşturan hücrelerin birbiri ile ısı ilişkilerinin gözlenmesi,
 - Hücre seviyesinde yüksek sıcaklık etkilerinin gözlenmesi,
 - Batarya yönetim sisteminin ve bağlantı elemanlarının ısı yönetim tasarımına etkilerinin tanımlanması,
 - Hücre ve batarya seviyesi ısı analizlerin yapılması,
- Bataryaların performanslarının;
 - Termodinamik
 - Isı transferi ve
 - Elektrokimyasal açılardan analiz edilmesi.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Elektrikli Uçak Kavramı

Elektrikli uçak kavramı ilk 1916 yılında ortaya atılmış, yüzyıllık geçmişine karşın, güç elektroniği ve elektrik makinaları teknolojilerindeki gelişmeler sonucunda günümüzde teknolojik zeminini bulmuştur [1, 29]. Özellikle elektronik kontrol ve mikroişlemcilerde ulaşılan endüstriyel seviye, hemen tüm sektörlerde elektrik ve elektronik uygulamalarının yaygınlaşmasına ortam sağlamış olup, havacılık endüstrisi de bu gelişimden faydalanmak için çalışmalar başlatmıştır.

Daha elektrikli uçak (DEU) kavramı çalışmalarında, Pearson 1998 yılında [30] DEU ile elde edilebilecek avantajları şu şekilde sıralamaktadır;

- Maksimum kalkış ağırlığında %6.5 düşüş
- Ömür devri maliyetinde %3.2 azalma
- Arızalar arasındaki ortalama uçuş süresinde %5.4 artış
- Uçuş saati başına bakım adam saatinde %4.2 oranında düşüş

Güç elektroniği endüstrisindeki gelişmeler, daha yüksek verimli ve ekonomik elektrik makinaları ve eyleyicilerin üretilmesini mümkün kılmıştır. Bu olanak sayesinde, mekanik, pnömatik ve hidrolik güç aktarımları yerine elektrik dağıtımı ve eyleyicilerin kullanımı olanaklı olmuştur. Böylece, ağırlık azalımı ve bu yolla da yakıt ekonomisi, düşük salınımlar ve düşük gürültü seviyeleri ulaşılabilir olmuştur. NASA tarafından yapılan bir çalışmada, daha elektrikli teknolojilerin kullanımı ile 200 koltuklu tipik bir uçak için boş ağırlıkta %10, gereken motor gücünde %13 ve yakıt tüketiminde %9 azalmanın mümkün olabileceği gösterilmiştir [31].

Hayata geçirilmiş bir örnek olarak Airbus A380 incelendiğinde, eğer bu uçakta elektrik yerine, konvansiyonel güç dağıtım sistemleri kullanılmış olsaydı, yaklaşık 40 MW'lık tahrik gücü, 200 kW elektrik, 1.2 MW pnömatik, 240 kW hidrolik ve 100 kW mekanik güç olarak kullanılacak ve toplam 1.7 MW tahrik için kullanılmayan güç olarak motorlardan çekilmiş olacaktır. Oysa, Airbus A380 uçağında MEA kullanımı ile 40 MW motor gücünden sadece 1 MW elektrik gücü çekilmekte ve kalan güç tahrik için kullanılmaktadır. Motor üzerinden kanama havasının (bleeding air) ve mekanik bağlantıların kaldırılması ile elde edilen faydalar ile de verim ve ağırlık avantajı yaratıldığı görülmektedir [32].

Elektrikli uçak tanımının yıllar içinde geçirdiği evrimsel sürecin analizi ile zaman içinde bu kavramın uygulamasında görülecek avantaj ve varsayılan engellerin ne yönde geliştiği görülerek, daha sağlam zemine oturmuş bir elektrikli uçak algısına ulaşılması olanaklıdır. Literatürde yıllar içinde yer alan tanımlar yapılan araştırma sonucunda özetlenmeye çalışılmış ve **Çizelge 2.1** ile verilmiştir. Çizelgede, literatürde yer alan çalışmanın yılına göre, daha/tümü elektrikli uçak tanımına, bu teknolojinin avantajı olarak görülen ve gelişmesi için yapılması gereken çalışmalara yer verilmiştir. Çizelgeden görüleceği üzere, yıllar içinde, MEA kabul edilmiş tek bir tanıma yönelmiş ve günümüzdeki anlamına ulaşmıştır.

Çizelge 2.1. Alan yazında elektrikli uçak tanım, avantaj ve zorlukları

Yıl	Tanım	Avantajlar	Zorluklar	Kaynak
1983	Yüksek basınçlı hidrolikler, motor kanama havası, pnömatik ve elektrikli olmayan motor çalıştırma gibi işçilik yoğun sistemlerin kaldırılması	Yer bakım ve lojistik destek gereksiniminin azaltılması, üretim, işletme ve ömür devri maliyet avantajları, ağırlık tasarrufu	maliyet	[12]
1993	Tarihsel olarak hidrolik, elektrik, pnömatik ve mekanik güç aktarma sistemleri yerine uçak alt sistemlerini sürmek için elektrik gücü kullanılması	Çok güvenilir, bakımı kolay, daha az ekipman ve işgücüyle desteklenen, daha idame edilebilir, düşük maliyetli ve yüksek performanslı		[15]
1993	Kullanım ve uçuş kontrol eyleyicilerinde, çevre kontrol sistemlerinde, yağlama ve yakıt pompalarında kullanılan mevcut hidrolik, pnömatik veya mekanik olarak sürülen uçak alt sistemlerinde elektrik gücünün kullanılması		Güvenilirlik, hata dayanıklılık, güç yoğunluğu ve performans artıracak elektrik güç ve güç elektroniği geliştirilmesi ve gösterimi	[33]
1998	Hareket gücü olarak kullanılan uçak üstü merkezi hidroliklerin azaltılması veya kaldırılarak elektrik gücü ile değiştirilmesi için, uçak elektrik güç sistem teknolojilerinin gelişmesi	Güvenilirlik, idame edirlilik, desteklenebilirlik be işletme/idame maliyetlerinde dramatik iyileştirmeler ve bunun yanı sıra uçak ağırlığında, hacminde ve savaş dayanımında gelişmeler	Düşük maliyetli, yüksek performanslı elektrik güç bileşenleri	[11]
1999	Uçağın ikincil güç ihtiyaçlarının çoğunluk veya tamamının elektrik olarak sağlanması			[8]

Çizelge 2.1. (Devam) Alan yazında elektrikli uçak tanım, avantaj ve zorlukları

Yıl	Tanım	Avantajlar	Zorluklar	Kaynak
2002	Pnömatik, hidrolik ve yapısal elektrik güç sistemleri elektrik güç ile yer değiştirmiştir.	Sahip olma maliyetinde dramatik düşüşler	Bileşen teknolojileri, optimum mimarilerin tanımlanması, yukardan aşağı evrimsel adımların ve olası fırsatların tanımlanması	[34]
2007	Motordan alınan hidrolik güç ve kanama havasının ortadan kaldırılması ve motorun başlatma/jeneratör aksamında giderek daha çok güç elektroniği kullanılması			[35]
2007	Sadece elektriğin yapısal boyunca dağıtılması ana hedefi	Önemli maliyet ve performans iyileştirmeleri ... karmaşıklıkta azalma ve artırılmış idame edilebilirlik.	Elektrik gücüne olan talep artışı, ilave yüklerle birlikte üretim kapasitesinde gereken önemli artış ihtiyacı	[29]
2008	Konvansiyonel uçakların kontrolleri ağır ve çok enerji tüketen, çoklu yedekli hidrolik eyleyiciler ile sürülmekte iken	Konvansiyonel hidrolik eyleyicilerin elektrikli olanlarla değiştirilmesi güvenilirlikte, idame edilebilirlikte iyileşme ve yakıt tasarrufu ile daha çok yolcu potansiyeline sahip daha hafif uçakların elde edilmesi mümkün olacaktır		[36]
2009	Ekonomik, ekolojik ve sürdürülebilir büyüme gereksinimleri doğrultusunda gelecek havacılık trendi. Mekanik, hidrolik ve pnömatik güç aktarımlarının elektrikli olanları ile değiştirilmesi		DC bara gerilimini dengeli kılmak için, geri dönen enerjiyi bertaraf edebilmek için bazı depolama ve dağıtım sistemleri gerekmektedir	[37]
2009	“daha elektrikli” araç şebekeleri, şebekeye elektrik enerjisi sağlayan ve bunu faydalı işe çeviren bir seri elektro manyetik makinadan oluşmaktadır			[38]
2010	Çoğu ikincil güç sistemleri elektrikli hale gelecektir. Yerel hidrolik sistemler bunlara entegre edilebilir.			[39]
2010	Hidrolik, mekanik ve pnömatik güçle çalıştırılan çoğu işlev elektrik gücü ile yer değiştirecektir			[40]

Çizelge 2.1. (Devam) Alan yazında elektrikli uçak tanım, avantaj ve zorlukları

Yıl	Tanım	Avantajlar	Zorluklar	Kaynak
2010	Motordan buz çözme ve çevre kontrol sistemi için kanama havası ile hidrolik sistem için şaft gücü alınması gibi konvansiyonel güç çekimlerinin yerine elektrikli güç aktarımının getirilmesi	Motor ömründe ve ekonomisinde artış		[41]
2011		Uçak idame edilebilirliğinde iyileşme, artan güvenilirlik, azalan sistem ağırlığı ve maliyetler	EMA yüklerinden geri gelen yüklerin yönetilmesi	[42]
2011	Daha ve daha çok sistemin elektrikle sürülmesi. Düşünülen bazı yükler uçuş kontrol sistemleri, elektrikli buz çözme, elektrikle sürülen bozucular, elektromanyetik valf kontrolü, klima sistemi, genel eyleyiciler, yakıt ve hidrolik pompalar	Uçağın karmaşıklığını azaltmakla kalmaz, güvenilirliğini, hata toleransını, güç yoğunluğu ve performansını da artırır,	Endüstriyel uygulamalar için geliştirilmiş mevcut güç elektroniği bileşenlerinin havacılık uygulamaları için optimize edilmemiş olması	[43]
2011	Telli uçuş eyleyici sistemi çoklukla uygulanacaktır	Uçağın güvenilirliğinin, idame edilebilirliğinin ve dayanıklılığının artırılması ve toplam ağırlığının büyük oranda azaltılması	Elektrikli eyleyicilerin birincil uçuş kontrol yüzeylerine tek başlarına uygulanması için yeterince olgun teknoloji seviyesinde olmaması	[44]
2012	Güç ihtiyacı yüksek hidrolik ve pnömatik sistemlerin doğru yedekleme ile kolay kontrol edilebilir, hafif, çevreci elektrikli sistemlerle değiştirilmesi, daha iyi olmasa da aynı güvenilirlik seviyesini sağlar ve bakımda geçen saatleri azaltır	Optimum enerji verimliliğini elde etmek için bir metot	• Yüksek sıcaklıklarda güç elektroniği çalıştırılması • İhmal edilebilir kayıplara sahip, süper iletken makinalar • Yüksek verimde çalışan soğutucular • YVDC sistem kararlılığı, kalitesi ve koruması • yük yönetimi	[5]
2012	Uçaktaki tahrik harici güçlerin üretimi ve dağıtımı için elektrik gücü kullanımı	Uçak performansını optimize eder, operasyon ve bakım maliyetlerini düşürür, emisyonları azaltır	Gerekli gücün miktarı ve bu gücün işlenmesi ve yönetimi.	[45]
2012	Mekanik olarak sürülen eyleyicilerin aşamalı olarak elektro servo valf kontrollü hidroliklerle değiştirilmesi – “elektro hidrolik hareket”	Mekanik bağların ve hidrolik güç kaynağı ağlarının azaltılması, bakımın basitleşmesi ve ağırlığın düşürülmesi		[7]

Çizelge 2.1. (Devam) Alan yazında elektrikli uçak tanım, avantaj ve zorlukları

Yıl	Tanım	Avantajlar	Zorluklar	Kaynak
2012	Uçak üstü hizmetlerin artarak elektrikleşmesi	Hidrolik, mekanik ve kanama havası/pnömatik sistemlere bağımlılığın azalması veya kaldırılması		[46]
2013	Mekanik, hidrolik ve pnömatik sistemlerle sürülegelen uçak alt sistemlerinin sürülmesi için elektrik gücünün kullanımının artması	Uçak bakımını kolaylaştırma, güvenilirliğini, uçuş emniyetini ve verimi artırma		[47]
2014	Tahrik, kontrol ve harici sistemler alanında, hidrolik, pnömatik ve mekanik ekipmanın elektrikli ekipmanla değiştirilmesi	Ağırlık kazanımı, azalan bakım gereksinimi ve artan güvenilirlik ve artan yolcu konforu		[48]
2014	Konvansiyonel mekanik, hidrolik ve pnömatik enerjili sistemlerin kısmen elektrikli sistemlerle değiştirilmesi	Elektrikli sistemler görece daha yüksek verime, hata dayanımına ve daha düşük ağırlığa sahiptir	Uçak elektrik güç sistemlerinin (EGS) kapasite ve karmaşıklığı dramatik olarak artacak ve daha gelişmiş EGS geliştirilmesine ihtiyaç olacaktır.	[49]
2015	Daha önce hidrolik, mekanik ve pnömatik güç kullanan alt sistemlerin tamamen veya kısmen elektrikli sistemlerle değiştirilmesi			[50]
2015	Hidrolik ve pnömatik araçların elektrik motorları ve eyleyicilerle değiştirilmesi	Elektrikli motorlar ve eyleyiciler elektrikli olmayanlara göre daha verimli olduğundan, gelişmiş verim, güvenilirlik, idame edilebilirlik ve azaltılmış ağırlık, yakıt sarfıyatı ve maliyete imkan sağlarlar	Elektrik gücü üretimi, dönüştürülmesi ve dağıtımı için daha verimli ve güvenilir usuller geliştirilmesi	[51]

Çizelge 2.1 ile sunulan literatür incelemesinde dikkat çeken bir diğer nokta, yıllar içinde literatürde sunulan üstesinden gelinmesi gereken konularla ilgili değişen zorluk algısıdır. İlk yıllarda maliyet ve güvenilirlik odakta iken, algı yıllar içinde güç elektroniğinin geliştirilmesi ve kullanımı yönünde değişmiştir.

Literatürde yer alan bir diğer avantaj ise, DEU kullanımı ile havacılık sektöründe önemli bir ekonomik yer tutan yer destek ekipmanları kullanımının %20 oranında

azalması ile elde edilecek maliyet ve işletme yönünden avantajların oldukça büyük olduğudur [15]. DEU uygulamalarının gelişmesinde önemli bir bileşen de elektrik enerjisi depolama teknolojisidir.

2.2. Havacılıkta Enerji Depolama Araçları ve Gereksinimi

Tek motorlu küçük genel havacılık uçakları dahi, tüm havacılık araçları, gerek motoru çalıştırmak, gerek aydınlatma ve radyo için uçakta elektrik enerjisi depolanma araçlarına ihtiyaç duymaktadır. Havacılık uygulamaları için elektrik enerjisi, batarya, fly-wheel, ultra kapasitör, hidrojen tankı gibi farklı formatlarda saklanabilir [52]. En yaygın kullanılan seçenek bataryalardır.

Elektrik sistemi ve uygulamalarına yönelik çalışmalar sürerken, 2010'lu yıllara kadar batarya ve elektrik enerjisi depolama konusu havacılık sektöründe özel ilgi alanı bulamamıştır. DEU, bu konuda hızlı gelişim gösteren otomobil endüstrisindeki elektrikli tahrik çalışmalarını ve uygulama örneklerini izlemektedir. Söz konusu havacılık uygulamalarında, güvenlik ve performans gereksinimi otomotive göre daha ön plana çıkmaktadır. Bu alandaki herhangi bir batarya kaynaklı kaza, havacılık sektörünün bu yöndeki çalışmalarını yıllarca geriye götürebilmektedir. Örnek olay olarak, batarya hasarından kaynaklı olarak 2013 yılında ortaya çıkan bir kaza, firmanın teknik ve ticari sorunlar yaşamasına neden olmuştur [53, 54].

Bataryaların uçaklarda kullanım amaçları aşağıda sıralanmıştır:

- DC elektrik sisteminde yüklerin ani yükselişlerini dengelemek;
- Sistem ve motor çalıştırma gücünü sağlamak;
- Acil durumlarda enerji sağlamak;
- Anlık yükler için enerji sağlamak.

Yukardaki işlevleri yerine getirmek için değişik teknoloji ve elektrokimyaya sahip bataryalar kullanılması mümkündür. Havacılık uygulamaları için batarya seçimi, hava aracının görev özelliklerine bağlıdır. Mars yüzey araçları, Ay arabaları, GEO yörünge uyduları, LEO uyduları, uçaklar, İHA türlerinin tümü farklı gereksinimler gösterirler. Uçaklarda bile gereksinimler irtifaya, elektrik yüklerine, görev tipine vb göre değişiklik gösterir. Örneğin, uydu uygulamalarında uzun döngü zamanları gerekli iken, uçaklarda yüksek deşarj oranları temel gereksinim olabilmektedir [55, 56].

Uçaklarda kullanılacak batarya seçimi için parametreler şu şekilde sıralanabilir [57];

- Şarj-deşarj devir sayısı
- Depolanacak enerji
- Gerek duyulan güç (anlık ve sürekli)
- Çevresel şartlar
- Maliyet
- İzin verilen en yüksek kütle
- İzin verilen en yüksek hacim.

Bu parametreler her bir tasarımda aracın görevine ve güç gereksinimine göre yeniden ele alınmalıdır. Örneğin otomobiller için yapılmış bir çalışmada, batarya performansı üzerinde çevresel şartların etkisinin azımsanmayacak ölçüde olduğu gösterilmiştir [58].

Elektrikli havacılık uygulamaları alanında, gelineen noktanın gösterimi açısından önemli bir etkinlik olan Green Flight Challenge yarışmasında, **Çizelge 2.2** ile sunulan sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 2.2. Green Flight Challenge 2011 verim kategorisi sonuçları

Takım	Pipistrel	e-Genius	Phoenix	Embry-Riddle
Kullanılan yakıt (Litre)			14.13	14.13
Kullanılan enerji (kWh)	65.40	34.70		3.80
Eşdeğer kullanılan yakıt (Litre)	7.18	3.81	14.73	15.17
Uçuş süresi (hız için)	1:47:16	1:48:27	2:25:01	2:00:48
Uçuş süresi (mesafe için)	1:49:37	1:50:23	2:25:43	2:04:07
Menzil (hız için) (km)	307.20	305.60	298.72	228
Menzil (mesafe için) (km)	313.44	309.92	300.48	236.96
Mesafe (km)	645.60	601.12	150.88	115.52
Hız (km/h)	171.84	169.12	123.68	113.12

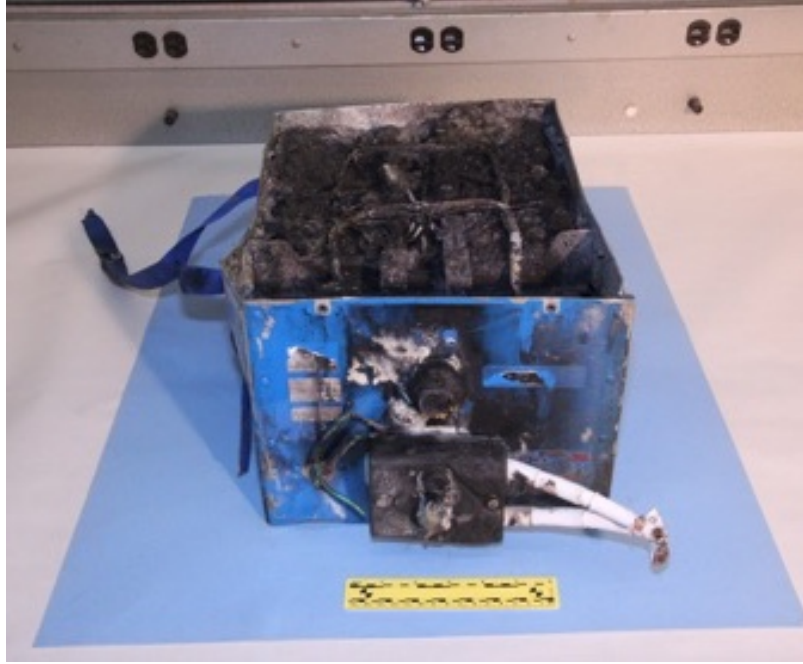
Kaynak: [59]

Çizelge 2.2 sonuçları, havacılık çalışmalarında batarya teknolojisindeki gelişmelerin, performans açısından kritik olduğunu göstermektedir. Uçaklara daha fazla batarya konulması, menzili olumlu etkileyebilecek ancak diğer yandan da ağırlığı artırarak paralı ağırlık kapasitesini azaltacaktır. Uçaklarda batarya kullanımı, enerji eşdeğeri açısından bakıldığında verimli olmakla birlikte, batarya teknolojisinin mevcut özgül enerji değerleri, havacılıkta elektrik kullanımı açısından en önemli engeldir.

Bataryaların özgül enerji kapasitelerinin var olan teorik değerlerin çok ötesine geçmesi halinde havacılıkta birincil enerji depolama unsuru olabileceği değerlendirilmektedir.

2.3. Uçaklar İçin Batarya Yönetim Sistemi Gereksinimleri

Bir uçak bataryasının 2013 yılında sebep olduğu bir kaza, bataryalarda güvenilirlik konusunu gündeme taşımıştır. Kazaya sebep olan batarya paketinin, kaza sonrası durumu **Görsel 2.1** de gösterilmiştir. Kaza inceleme raporları, açıkça, bataryaların bir sistem yaklaşımı ile tasarlanması, ısıl yönetim ve hücreler üzerinde sıcaklık izleme işlevine sahip olması gerektiğini ortaya koymuştur [53].



Görsel 2.1. 2013 yılındaki kazaya neden olan batarya
Kaynak: [53]

Anılan kazanın oldukça detaylı hazırlanmış inceleme raporunda [53, 54] yer alan bulgular, şu şekilde özetlenebilir;

- Bataryada şarj/deşarj veya kullanımdan kaynaklı bir sorun bulunmamıştır
- Batarya içinde nem olduğu gözlenmiş ancak hatanın bu nedenle olmadığı değerlendirilmiştir
- Hücrelerin ısıl hasara uğradığı görülmüştür
- Batarya içindeki 5. ve 6. hücrelerin içinde oluşan kısa devrenin tüm hücreleri sırası ile ısıl kaçışa uğrattığı tespit edilmiştir

- İnceleme heyetince yürütülen deneyler, hücrelerin BYS tarafından tespit edilemeyecek hızda, anlık olarak ısınabileceğini göstermiştir
- Sonuç bölümünde ise ısıl yönetimin, hücrelerdeki tüm ısı üretimine neden olan unsurları kapsamaması gerektiği hükmüne ulaşılmıştır.

Kazanın meydana geldiği uçak, yeni nesil Daha Elektrikli Uçak olarak anılmaktaydı ve firma bu kazadan sonra, bataryaların ısıl yönetimi için güvenlik çözümleri geliştirdi [31].

Havacılık için, gereksinimler, güvenilir, hataya karşı dayanıklı, test ve sertifikasyona uygun uygulamalar ile karşılanmalıdır. Bu amaçla, ABD ve AB bünyesinde, DEU uygulamalarının test ve değerlendirme altyapıları kurulmasına yönelik planlar tanımlanmıştır [3, 60–62].

NASA, Green Flight Challenge 2011 yarışmasında elde edilen sonuçlar doğrultusunda, elektrikli tahrik için geliştirilmesi gereken teknolojik zorlukları tanımlamış ve belli başlı şu sonuçlara ulaşmıştır [63];

- Yüksek güç yoğunluğuna sahip, soğutmasız tip motor
- Yüksek güç yoğunluklu bataryalar
- Yüksek sıcaklıkta çalışabilen güç elektroniği
- Gelişmiş ısıl yönetim teknikleri
- Şebeke benzeri yapıya sahip gelişmiş güç dağıtım mimarileri
- Güç sistem mimarilerinin ve güç yönetiminin gerçek boyutlu benzetimleri dahil analiz ve modellemesi

Alan yazının değerlendirildiği ***Çizelge 2.1*** ile verilen yayınlarda, güç sistemine yönelik analizler yoğunlukla yer alırken, batarya üzerine 2012 yılında yapılan bir çalışma, mevcut durumda gazolin (12,500 Wh/kg) ve batarya (350 Wh/kg) özgül enerjilerini karşılaştırmakta ve batarya kaynaklı ağırlık sorununa işaret etmektedir. Büyük ölçekli elektrikli yolcu uçaklarının hayata geçirilebilmesi için batarya enerji sığasının 750-1,000 Wh/kg seviyesine gelmesinin gerektiği öngörülmekte [26] olup, alan yazındaki kaynaklar günümüz şartlarında büyük tümü elektrikli uçakların mümkün olmadığını işaret etmektedir.

ABD Hava Kuvvetleri 90'lı yıllardan bu yana, uçaklarda kullanılacak tip ve özelliklerde batarya geliştirme projelerini desteklemektedir [64]. Bugüne kadar birkaç

firma ve araştırma merkezine kaynak sağlanmış ve proje çıktıları ile Mars inicileri ve Mars yürüyücüleri 2003 yılında hayata geçirilmiştir. Li-iyon bataryalar, bu projelerin temelini oluşturmuştur [55]. Uydular, iniciler (landers) ve yürüyücüler (rovers) gibi uzay sistemleri de Li-iyon bataryalar kullanmaktadır. Bu projelerde de görüldüğü ve **Çizelge 2.3** ile verildiği üzere, hava araçlarının görevleri farklılaştığı ölçüde batarya gereksinimleri de farklılıklar göstermektedir.

Çizelge 2.3. Batarya geliştirme projeleri performans hedefleri

	Landers	Rovers	GEO Orbiter	LEO Orbiter	Uçak	İHA
Kapasite (Ah)	30	8	10-35	10-35	5-20	100-200
Voltaj (V)	28	28	28-100	28	28-270	28-100
Deşarj oranı	C/5 - C	C/5 - C/2	C/2	C/2 - C	C	C/5 - C
Devir ömrü	>500	>500	>2000	>30000	>1000	>1000
Deşarj derinliği (DoD) (%)	>60	>60	>75	>30	>50	>50
İşletme sıcaklığı (°C)	-40 +40	-40 +40	-5 +30	-5 +30	-40 +65	-40 +65
Raf ömrü (yıl)	3	3	>10	>5	>5	>5
Özgül Enerji (Wh/kg)	>100	>100	>100	>100	>100	100
Enerji yoğunluğu (Wh/l)	120-160	120-160	120-160	120-160	120-160	120-160

Kaynak: [64]

2.4. Batarya Yönetim Sistemi (BYS) Temel İşlevler ve Özellikler

Enerjinin akışının hassas şekilde izlenmesi ve kontrolü, ağırlık, maliyet ve hacim anlamında minimum yatırım olanağı sunar [65]. Bu yönetim işlevi Batarya Yönetim Sistemi (BYS) tarafından yerine getirilir. Batarya yönetim sistemleri, daha agresif batarya işletme stratejilerinin uygulanmasına olanak sağlarken, güç kaynağı sisteminin güvenilirliğini de artırır [66].

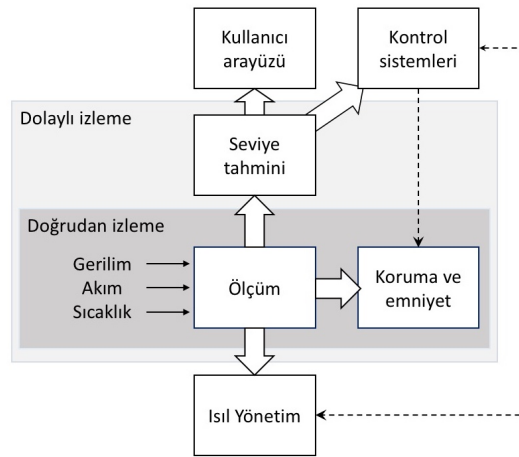
Yüksek kapasiteli bataryalar, çok sayıda hücrenin bir araya getirilmesi ile elde edilirler. Literatürde, bataryaların boyutlandırılması ve hücre sayısının belirlenmesi için çok sayıda yöntem yer verilmiştir [67–72]. Bataryadaki hücreler, güç gereksinimini karşılamak üzere paralel kollarda (bank) ve bu paralel hücre bankları da daha sonra toplam voltaj gereksinimini karşılamak üzere seri olarak bağlanırlar [67, 73]. Seri bağlı banklar, aynı karakterde olmalı ve şarj-deşarj döngüleri sırasında dengeli olarak durmalıdırlar. Aksi halde, bataryanın kapasitesi, en düşük kapasiteli seri bağlı bankın

kapasitesi ile sınırlı kalacağı gibi, iç direnç yükselişinden dolayı, zaman içinde tehlike yaratacak olaylara neden olabilirler [74–78].

Batarya Yönetim Sistemi (BYS)'nin birkaç temel görevi bulunmaktadır [67, 68, 76, 79, 80]:

- Şarj ve deşarjı kontrol ederek, batarya paketini yeterli performans düzeyinde tutmak,
- Sıcaklığı yönetmek (ısıl yönetim)
- Batarya durumunu izlemek ve tahmin etmek (voltaj, akım, sıcaklık, SoC, DoD, SoH, v.b.);
- Hataları tespit etmek ve
- Sistem bileşenleri arasında güvenilir iletişim kurmak.

Bu işlevlerin şematik gösterimi **Şekil 2.1** ile verilmiştir.



Şekil 2.1. BYS işlevleri

Batarya yönetim sistemlerinin işlevlerinden birisi de seviye ölçümü, hesaplanması ve tahminidir. Bataryanın şarj seviyesi (SoC), sağlık seviyesi (SoH), işlevsellik seviyesi (SoF) gibi değerleri çoğunlukla karmaşık sayısal yöntemlerle hesaplanır veya tahmin edilir. SoC hesabı ve tahmini için literatürde çok sayıda yöntem tanımlanmıştır [81–83].

Bataryada kullanılan hücreler arasında üç tip dengesizlik söz konusu olup, BYS tarafından bu dengesizliğin giderilmesi gerekir. Bu dengesizlikler şunlardır [76];

- Şarj (enerji) farkı, genellikle hücreler arasındaki sıcaklık farklılıklarından ortaya çıkar

- Toplam kapasite farkı, üretimden gelen farklılıklar sonucu olabilir,
- İç direnç farkı, hücrelerin üretim tekniğinden veya kullarımdaki dengesizliklerden dolayı farklılaşır. İç direnç farkı, BYS ile takip edilmediği takdirde, şarj sırasında seri bağılı hücreler (veya banklar) üzerinde farklı gerilim seviyelerine neden olabileceği için hücreler üst sınır gerilimlerini aşarak tehlikeli sonuçlar doğurabilir.

Hücreler arasında dengesizlikler, tehlikeli sonuçlar doğurmasa bile batarya toplam kapasitesini ve ekonomik ömrünü düşürecektir. BYS bu dengesizlikleri izleyerek gidermek ve dengesizliklerden kaynaklanabilecek tehlikeli durumları önlemek için kullanılır.

2.5. Batarya Isıl Yönetimi

Bataryalarda ısıı yönetim çoğunlukla ihmal edilmiş ancak çok önemli bir konudur. Hücre dengeleme problemleri çoğunlukla yanlış veya eksik ısıı yönetimden kaynaklanır [28, 84]. Bazı araştırmacılar, elektrikli aracın halen istendiği kadar yaygınlaşamamasının nedeni olarak ısıı özelliklerini vurgulamaktadır [85]. ABD hükümetince yaptırılan incelemeler, elektrikli araçların yaygınlaşması için etkin ısıı yönetim sistemleri geliştirme çalışmalarının yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Isıl yönetim yüksek güç gereksinimi olan uygulamalar için zorunludur. Isıl yönetim sisteminin görevleri, hücreler arasında sıcaklık dağılımını dengelemek, bataryanın soğutulması ve bazı uygulamalarda ısıtılmasıdır. Uygulamada karşılaşılan sorunların en önemlisi, elektrolit ve hücre duvarı malzemesinin ısıı direncinin yüksek olmasından dolayı ısıının hücrenin içinden dışına iletimidir [86]. Uygulamanın yanı sıra, hücreler ortam sıcaklığından gerek depolama gerekse de kullanım sırasında etkilenirler [85].

Bataryanın elektrokimyasına bağılı olarak, belli bir etkin çalışma sıcaklık aralığı bulunmaktadır [87–91]. **Çizelge 2.4** farklı elektrokimyaların çalışma sıcaklık aralıklarına dair temel bilgi vermektedir. Arrhenius denklemi ile elektrokimyasal reaksiyon ile sıcaklık arasındaki ilişki verilmiştir. Bu denklemden elde edilen sonuca göre, batarya sıcaklığındaki 10K yükseliş, iç reaksiyonların oranını iki kat artırmakta ve batarya ömrünü kısaltmaktadır. [85, 92]. Batarya hücrelerinin elektrikselsel olarak dengeli kalmaları için birbirine göre homojen sıcaklıkta olmaları gereklidir. Hücre performansı hücre

sıcaklığına ve batarya performansı da her bir hücreye bağlı olduğundan, batarya içindeki hücreler eş sıcaklıkta korunmalıdır. Aksi halde, birkaç döngüden sonra paket dengesizleşecek, batarya performansı ve ekonomik ömrü olumsuz etkilenecektir.

Çizelge 2.4. *Elektrokimyalarına göre işletme sıcaklık değerleri*

	Kurşun Asit	Ni-MH	Li-iyon	Li-iyon polimer
Şarj				
Önerilen T (°C)	5-25	15-30	20-30	18-25
En düşük müsaade edilen (°C)	-20	0	0	0
En yüksek müsaade edilen (°C)	50	45	60	45
Deşarj				
Önerilen T (°C)	0-30	15-30	20-30	18-25
En düşük müsaade edilen (°C)	-20	-20	-20	0
En yüksek müsaade edilen (°C)	50	65	60	50

Kaynak: [92]

Yukarıda sıralanan gereksinimler ışığında, ısıl yönetimin temel iki görevi (1) tüm batarya paketini, elektrokimyaya özel sıcaklıkta tutmak ve (2) batarya içindeki tüm hücreleri birbirine yakın sıcaklıkta korumaktır [58, 93–102].

Alan yazın, bataryaların ömür devri boyunca etkinliğini ve güvenliğini sağlamak için ısıl yönetimin gerekliliği konusunda ortak görüşe sahiptir [103].

Isıl yönetim, özellikle aktif ısıtma ve soğutma gereken uygulamalar söz konusu olduğunda enerji tüketir [58, 104, 105]. Isıl yönetim sisteminin enerji etkinliği kritik öneme sahip olup, tasarım sırasında elde edilecek bir değerdir. Diğer yandan, alan yazında çoğunlukla otomotiv endüstrisine yönelik ısıl analiz ve gösterim metodu bulunmaktadır [97, 106–116]

Isıl yönetim, havacılık alanında BYS'nin önemli ve değişmez bir parçası olup, işlevlerini verimli ve güvenilir şekilde yerine getirmelidir. Isıl yönetimin güvenilirliği, üzerinde çalışılmaya yeni başlanılmış bir konu olup, bu alanda yoğun çabalar gösterilmektedir.

Isıl yönetim tasarımı, bataryanın görev çevrimine göre ısıtma/soğutma ihtiyaçlarını göz önüne alarak, izolasyon, soğutma düzeneği, ısıtma düzeneği, ölçüm düzeneği tasarımlarını içermektedir [4, 28, 117].

Yapılan çalışmalar sonucu, Lityum-iyon hücrelerin performansları sıcaklığa bağlılığı net olarak gösterilmiştir [85, 101]

Hücreler üzerindeki ısıl etkiler şu şekilde sıralanabilir [85];

- Kapasite/güç kaybı: Hücre içindeki aktif malzemenin inaktif duruma geçmesi ile hücrenin elektriksel kapasitesi düşer. Bu yaşlanma etkisi muhtelif kaynaklarda incelenmiştir. Bulgular yaşlanmanın sıcaklıkla doğrudan ilgilini olduğunu ortaya koymaktadır.

- Kendi kendine boşalma: Yapılan çalışmalar, Li-iyon hücreler için oda sıcaklığında önemli bir kayıp olmadığını, ancak oda sıcaklığı üstünde depolama durumlarında hücrelerin kendi kendine boşalma oranlarının üstel olarak arttığını göstermiştir.

- Isıl Kaçış (Thermal Runaway): Isıl erime, hücre içinde malzemenin yüksek sıcaklıklar altında ısı üreten ekzotermik reaksiyonlara sebebiyet vermesi ve daha hızlı artan sıcaklığın sonunda daha zararlı reaksiyonlara yol açması ile gerçekleşir. Bu yüzden hücrenin iç sıcaklığı, eğer ortamdan ısı çekilmezse daha hızlı yükselir.

- Elektriksel denge: hücrelerin elektrik boşaltma kapasiteleri sıcaklıkla değişmektedir. Batarya içinde çok sayıda hücrenin aynı sıcaklıkta bulunmaması durumunda hücreler arasında dengesizlikler oluşabilir. Çok sayıda hücrenin topluca şarj edildiği durumlarda, eğer hücreler tek tek izlenmez ise, iç direnç farklılıklarından dolayı bazı hücreler çok yüksek gerilimlere maruz kalabilir. Bu da hücrenin, dolayısı ile bataryanın hasar görmesine yol açabilir.

- Düşük sıcaklık performansı: Yapılan çalışmalarda, özellikle otomotiv sektöründe, hücrelerin düşük sıcaklık ortamlarında kullanım öncesi ısıtılmaları gerekmektedir. Bu işlemin enerji çekmesi ve ısıtılması gereken hücrelerin de bu enerjiyi vermelerinin önünde engel olması, etkin bir ısıl yönetimin önemli konuları arasında bu başlığı ön plana çıkarmaktadır.

- Elektrokimyasal sistemin performansı

- Şarj kabul edebilirliği,

- Güvenilirlik [113]

Bataryaların aktif ısıl yönetime tabi tutulması ile ekonomik ömür devirlerinin %6 ile %12 arasında uzayabildiği deneysel çalışmalarda gösterilmiştir [118].

Batarya içinde hücreler arası sıcaklığın dengesiz dağılımı, elektrik olarak dengesizliğe ve paketin veriminin düşük olmasına neden olmaktadır. Çoğu hücreler 25 ve 40 °C arasında ömür ve performans açısından verimli çalışmakta ve bu sırada da hücreler arasındaki sıcaklığın 5 dereceden az olması gerekmektedir [113].

Hücre içinde üretilen ısıнын ortamdan çekilmemesi ve hücrenin elektrokimyasına bağlı çalışma sıcaklık aralığı dışına çıkması halinde, ısı kaçış etkisinin görülmesi söz konusudur [58]. Bu etki, ısınan hücrelerin daha yüksek güç performansı göstermesi, dolayısı ile daha da hızlı ısınmasına sebep verecek kısır döngüye girmesi sonucu tahribata uğraması olarak açıklanabilir. Literatürde, hücrelerin ısı kaçışa uğramasalar bile, yüksek sıcaklıklarda deşarj edilmesinin önemli performans kayıplarına neden olduğu görülmüştür [58, 91, 119]. Anılan nedenler ısı yönetimin gerekliliğini göstermektedir.

2.6. Isıl Yönetim Teknikleri

Isıl yönetimin ana hedefi, batarya paketinin en uygun sıcaklıkta tutulmasıdır. Bataryanın ömrü ve performansı arasında batarya kullanım yerine ve amacına göre optimizasyon yapılması gereklidir [58].

Batarya ısı yönetimine ilişkin literatürde tanımlanmış olan gereksinimler şunlardır [58, 91, 120];

- Her hücre ve batarya modülü için en uygun çalışma sıcaklığının sağlanması, sıcak ortamlarda ısı atılması, soğuk ortamlarda ısı eklenmesi
- Hücreler ve modüller arasında küçük sıcaklık farklılıkları
- Küçük ve hafif, kolay entegre edilebilen, güvenilir, ucuz ve idamesi kolay
- Bataryanın olası zararlı gaz çıkarması durumuna karşı gazı tahliye yeteneğine sahip

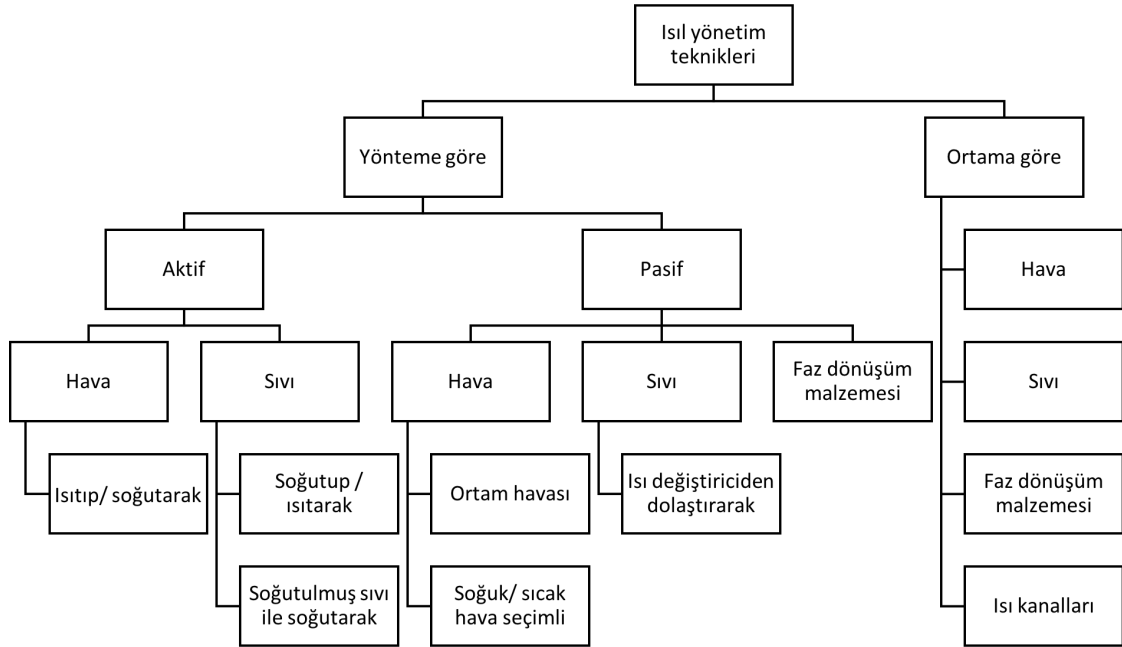
Bu gereksinimler doğrultusunda, batarya ısı yönetiminin sahip olması gereken işlevler ve bu işlevler için gerekli bileşenler şu şekilde sıralanabilir;

- Soğutma: bataryalar özellikle yüksek akım altında ısı üretirler. Ürettikleri bu ısıнын uzaklaştırılması için soğutma özelliği gerekir.
- Isıtma: bataryaların belli sıcaklık değeri altında ekonomik ömrü ve performansı olumsuz etkilenebilir. Düşük ortam sıcaklıklarında çalıştırılması gereken bataryaların ısıtılması gereklidir.
- Yalıtım: bataryanın yüksek veya düşük ortam sıcaklıklarında çalışması sırasında, kendi sıcaklığının istenen zarfın dışına çıkmasını engellemek ve sıcaklığını kontrol edebilmek için ısı yalıtıma ihtiyaç vardır.
- Havalandırma: bataryadan çıkabilecek zararlı gazların kontrolü şeklinde uzaklaştırılması için gereklidir.

Batarya ısı yönetim teknikleri literatürde iki farklı şekilde sınıflandırılmıştır. Bunlardan ilki aktif ve pasif teknik sınıflandırmasıdır. Aktif yönetim soğutma ve/veya ısıtma kaynağı kullanılması ve pasif yönetim ortam sıcaklığı kullanılması olarak uygulanmaktadır. Hava ve soğutma sıvısı yolu ile uygulanan bu teknikler **Şekil 2.2** ile verilmiştir.

Doğal iletimle soğutma durumunda, radyasyonla ısı geçişinin önemi ortaya konmuştur [121]. Oransal olarak incelendiğinde, yüzeyde %30 ile %50 arasında etkisi olduğu hesaplanmıştır. Diğer yandan aynı araştırmada zorlamalı (aktif) soğutma kullanıldığında, soğutma gücünü artırmanın hücrelerin en yüksek sıcaklığını düşürmenin yanı sıra, hücreler üzerindeki ısı dağılım dengesini bozduğu simülasyonla gösterilmiştir.

Literatürde, aktif soğutma ve ısıtma için kullanılan çok sayıda teknik yer almakla birlikte, hem ısıtma hem de soğutma amacı ile kullanılabilen Termoelektrik Jeneratörler (TEG) kullanımının değerlendirildiği görülmektedir [117].



Şekil 2.2. Literatürde ısı yönetim teknikleri

Diğer yandan literatürde ısı yönetim kullanılan ısı yönetim malzemesine dayalı olarak da sınıflandırılmış ve sıvı, hava, ısı kanalları veya faz dönüşüm malzemeler (phase change material, PCM) seçeneklerinden biri veya birleşimi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu sınıflandırmaya ilişkin detaylar izleyen başlıklarda verilmiştir.

Her bir ortam ile ısı yönetim, kendi avantaj ve dezavantajlarına sahiptir. Her bir uygulama özelinde bu tekniklerden biri veya birden fazlası birlikte kullanılabilir. Kullanılacak ısı yönetim stratejisine karar vermeden önce, hücre seviyesinde ısı

özelliklerin belirlenmesine ihtiyaç duyulur [98]. Her uygulama için hedef sıcaklık aralığı, bataryadan çekilecek akımın büyüklüğü, kullanım aralığı, soğutma için kullanılabilecek enerji gibi değerlerin belirlenmesi öncelikle gereklidir.

2.6.1. Hava

Hava, zorlamalı veya doğal akış halinde batarya ısı yönetimi için kullanılabilir. Literatürde hava ile ısı yönetim çok tartışılmakla birlikte küçük güçlü bataryalar için uygun olduğu değerlendirilmiş [122], bazı araştırmacılar ise hava ile ısı yönetimin istenen sonuçlara ulaşmayacağını öngörmüştür [4]. Bazı araştırmalar, özellikle otomobillerde, araç içi iklimlendirilmiş hava ile bataryaların ısı yönetiminin verimini incelemiştir [117, 123]. Hava kullanımı daha az karmaşık olmakla birlikte genellikle etkin olmadığı değerlendirilmiştir [58]. Sayısal modelleme ile elde edilen sonuçlar, hava ile soğutmada aynı sıcaklık seviyesine ulaşmak için sıvı için harcanan enerjinin 2 ila 3 katı enerji harcanması gerektiğini ortaya koymuştur [98].

2.6.2. Sıvı

Hava ile kıyaslandığında daha yüksek ısı iletkenlik ve ısı kapasiteye sahip olan sıvı kullanımı, literatürde daha uygun bir seçenek olarak kabul görmüştür [98], [124, 125]. Soğutma sıvılarının ısı transfer oranları havanın 1.5 ila 3 katı olduğundan, sıvı kullanımı ile soğutmada havanın 3 katına kadar etkinlik sağlanacağı önerilmektedir. Bu tür ısı yönetimde farklı sıvılar ve teknikler kullanımı incelenmiştir [58, 98, 126–128]. Hava ile ısı yönetim tekniği ile karşılaştırıldığında sistem dolaşan sıvı ve sıvı pompaları ilavesi, sisteme ek ağırlık, karmaşıklık ve enerji harcaması katarak verimi olumsuz etkilemesi literatürde olumsuz özellikler arasında sayılmaktadır.

2.6.3. Faz dönüşüm malzemeleri

Faz dönüşüm malzemeleri, genel olarak ayarlanabilen erime noktasına sahip, yüksek oranda ısıyı depolayabilen veya verebilen malzeme olarak tanımlanabilir. Alan yazında, sıvı ve hava kullanılan ısı yönetime alternatif olarak faz dönüşüm malzemeleri kullanımı önerilmiştir [105, 114, 128–132]. Bu teknik, ilave enerji kullanımı gerektirmediği, dolayısı ile ısı yönetimin ve bataryanın etkinliğini düşürmediği için üzerinde sıklıkla çalışılan konulardandır. Faz dönüşüm malzemeleri ısıyı tek yönlü olarak hücreden uzaklaştırdığı için sadece soğutma amaçlı kullanım için uygun görünmektedir.

2.6.4. Isı kanalları

Pek çok endüstriyel uygulamada soğutma ve ısı yönetimi amacıyla ısı kanalları yaygın olarak kullanılmaktadır. Batarya ısı yönetimi açısından da bu teknik yaygın olarak incelenmiştir [133–135]. Isı kanalları, enerji sarfiyatı açısından tercih edilmektedir. Tek başına kullanım durumunda, ısıнын hücreler arasında homojen olarak atılmasına yönelik bulgular yer almakla birlikte, literatür, ısı kanallarının diğer tekniklerle birlikte kullanımını değerlendirmiştir. Sayısal analiz sonuçları, ısı kanalları kullanımının sıvı ile soğutma tekniğine kıyasla %40 daha fazla ağırlık gerektirdiğini göstermiştir [98].

3. TEMEL BİLGİLER

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan ve batarya performansına yönelik tanımlar, temel parametreler ile yöntemle ilişkin hususlar tanıtılmıştır. Lityum bataryaların elektrokimyasal özellikleri, diğer elektrokimyalardan farkı, batarya formları ve silindirik hücre türünün seçilmesinin nedeni tanıtılmıştır. Ardından bataryaların ısı üretim mekanizması ile bu mekanizmanın modellenmesi konusu değerlendirilmiştir. Ardından bataryalarda ısı üretimi ile iç direnç, ısı kaçış ve yaşlanmaya yönelik ilişkiler tanımlanmıştır.

3.1. Temel Tanımlar ve Parametreler

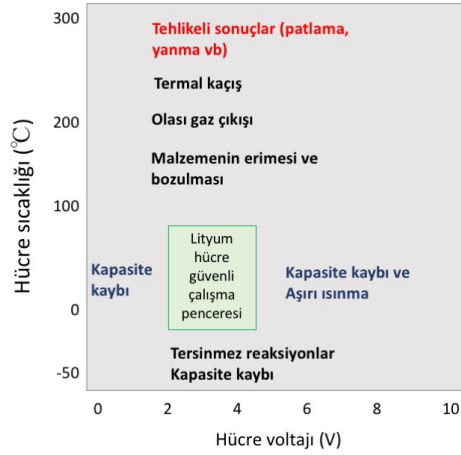
Elektrikli tahrik uygulamalarında, tahrik performansı kullanılan bataryalara bağlı olup, bataryaların ekonomik ömrünün uzatılması, maliyet etkinlik açısından önem arz etmektedir. Batarya teknolojileri, enerji depolamak için zaman içinde lityum-iyon teknolojisini tercih etmiştir. Bunun nedeni, lityum –iyonun benzerleri karşısında sağladığı özgül enerji, yüksek voltaj ve düşük kendi kendine deşarj oranıdır [99, 136]. Piyasada mevcut endüstriyelendirilmiş bazı batarya teknolojilerine ilişkin teknik özellikler *Çizelge 3.1* ile verilmiştir.

Elektrikli araçlar (EV) ve elektrikli hibrit araçlar (HEV) üzerinde yoğun olarak yakıt ekonomisi ve çevre gereksinimlerini karşılamak üzere çalışmalar yürütülmektedir [137]. Bu teknolojiler, Lityum-iyon bataryaları, yüksek özgül enerjisi, yüksek voltajı, düşük kendi kendine deşarj oranı ve güvenilirliği nedeni ile tercih etmektedir [136]. Diğer yandan, batarya ömrünün uzatılması ve tam kapasite kullanımlarının sağlanması bataryanın ekonomik değeri açısından önemli konulardır.

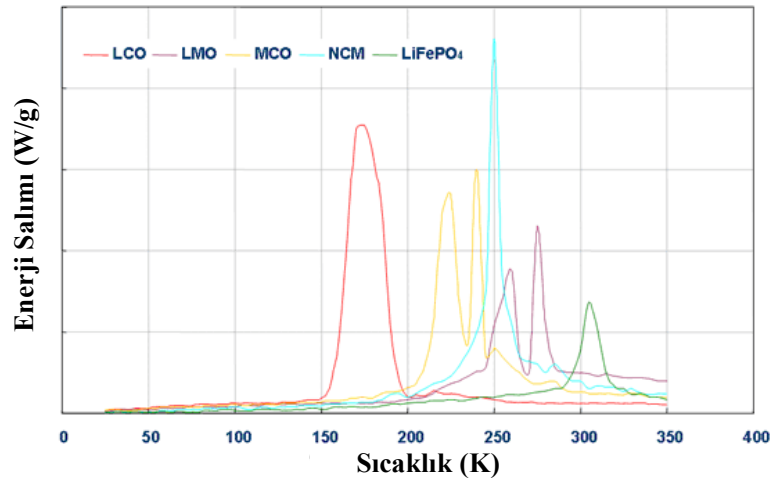
Bataryaların ısı yönetimi, bataryaların istenen performanslarını istenen ömür boyunca sağlanması için kritik öneme sahiptir [101]. Bataryaların gerek saklanma gerekse işletme sıcaklıklarının performans üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, ısı yönetim ile bataryalar ekonomik ömürleri boyunca istenen sıcaklık aralığında tutulmalıdır. Batarya içinde üretilen ısının ortamdan uzaklaştırılması, güvenilirliği artırmak ve hataları önlemek için gereklidir [120, 138].

Bataryalar, *Şekil 3.1* ile gösterildiği gibi çalışma zarfı dışında bozulur ve şekilde verilen tehlikelerin ortaya çıkmasına neden olabilirler. Düşük sıcaklıklarda performans düşüşü olurken, yüksek sıcaklıklarda hızla ömürlerinden kaybederler [139, 140]. Her bir

elektrokimyanın kendine özel optimum çalışma sıcaklığı vardır. **Şekil 3.2** ile gösterildiği gibi her elektrokimya, farklı sıcaklık değerinde farklı performans gösterme eğilimindedir. Batarya tasarımı sırasında, kullanılacak hücrenin elektrokimyası, çalışma ortamına göre seçilmelidir [103].



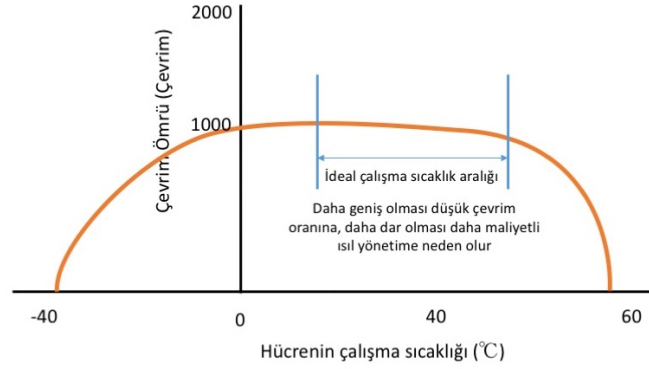
Şekil 3.1. Batarya çalışma sıcaklık ve gerilim aralığı
Kaynak: NREL



Şekil 3.2. Batarya elektrokimyalarına göre performans değişimleri
Kaynak: [138]

Batarya içindeki hücrelerin ısı dengesini sağlamak ve hücrelerin, tanımlı işletme sıcaklığı içinde kalmasını sağlamak için ısı yönetim gereklidir [138]. Batarya paketinde, sıcaklık dağılımındaki dengesizlik, aynı zamanda dengesiz enerji seviyelerine sebebiyet vereceği için, sistemin toplam performansını olumsuz etkileyecektir [131].

Bataryaların devir ömürlerinin, çalışma anındaki sıcaklığa bağlı olduğu pek çok çalışma ile gösterilmiştir. **Şekil 3.3** grafiğinde görüleceği üzere, çalışma sıcaklık aralığı dışında çalıştırılan bataryanın çevrim ömrü olumsuz olarak etkilenmektedir.



Şekil 3.3. Batarya ömrünün işletme sıcaklığına göre değişimi
Kaynak: NREL

3.1.1. Hücre, modül, paket

Hücre, kutup bağlantıları ile elektrot, elektrolit ve diğer bileşenlerini muhafaza eden tek başına bataryayı ifade eder. Modül birkaç hücrenin birleştirilmesi ile elde edilir. Paket ise daha yüksek kapasiteler elde edilmesi için tek bir kutu içinde birden çok modülden oluşturulur.

3.1.2. Akım oranı

Bataryaların üreticileri tarafından, bataryanın elektrokimyasına uygun olarak bir akım değeri verilir. Bu akım değeri, bataryanın akım kapasitesini gösterir ve C ile gösterilir. Bataryanın şarj ve deşarjı sırasında çekilen akım bu C akım değerinin katları olarak ifade edilir. Akım oranının bir diğer ifadesi, bataryanın 1 saatte dolması veya boşalması için gerekli akım değeri olarak da verilir.

3.1.3. Açık devre gerilimi (Open circuit voltage (OCV))

Bataryanın yüksüz halde elektrotlarından ölçülen gerilim değerine açık devre gerilimi denir. Bataryanın elektrik yük altında kendi iç direncinden de kaynaklanan bir gerilim düşüşü görülür. Bu düşüş miktarı, bataryanın doluluk oranı, sağlık durumu gibi parametrelerinin ölçülmesinde kullanılır.

3.1.4. Doluluk oranı (State of Charge (SoC))

Bataryanın verilen bir an için doluluk oranını (kalan kapasitesinin yüzde olarak oranını) ifade eder. Yüzde olarak gösterilir. Her elektrokimyanın gerilim düşüş karakteri farklı olduğundan, SoC seviyesi farklı şekilde hesaplanır.

$$SoC = \frac{\text{kalan kapasite}}{\text{anma kapasitesi}} \quad (3.1)$$

3.1.5. Deşarj derinliği (Depth of Discharge (DoD))

Bataryadan verilmiş bir anda çekilmiş kapasitenin göstergesi olarak kullanılır. Birimi Ah olarak verilir. Dolu bir bataryadan henüz şarj çekilmemişken DoD 0 Ah olarak ifade edilir. Bataryanın tüm enerjisi deşarj edildiğinde o ana kadar çekilmiş enerji miktarı bataryanın yaşlanmasına, iç direncine ve deşarj akımına bağlı olduğundan DoD iki tam deşarj arasında farklılık gösterebilir.

3.1.6. Sağlık durumu (State of Health (SoH))

Bataryanın sağlık durumu, ilk kullanımdaki kapasitesi ile o anki kapasitesinin yüzde olarak kıyaslanmasıdır. Bataryanın zaman içinde yaşlanması ve kapasitesinin azalması söz konusudur. Sıcaklık limitleri dışında kullanım, yüksek döngü sayılarında kullanım gibi nedenlerle bataryanın SoH seviyesi düşmüş olabilir. Kritik uygulamalarda bataryanın ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilir durumda olduğunu bilmek için SoH seviyesinin izlenmesi gereklidir. SoH, yeni bataryaya kıyasla kalan kapasite olarak ifade edilir:

$$SoH = \frac{\text{kullanılabilir kapasite}}{\text{anma kapasitesi}} \quad (3.2)$$

3.2. Lityum Bataryaların Elektrokimyasal Özellikleri

Elektrikli tahrik sistemleri üzerine 1968 yılında yapılan bir çalışma, o yıllarda batarya kapasitelerinin menzil ve hız gereksinimi için yeterli olmadığını ve endüstriyelendirilmiş en yüksek enerji depolama kapasitesinin 150 Wh/kg özgül enerjiye sahip fly-wheel olduğunu, batarya sığalarının o yıllar için henüz bu değerden düşük olduğunu göstermektedir [141]. Günümüzde batarya enerji yoğunlukları 300 Wh/kg seviyelerine ulaşmış ve yeni araştırmalarla bu seviyenin de geçilebileceği görülmektedir.

Günümüzde, havacılık ve uzay çalışmalarını yoğun olarak yürüten NASA, Li-iyon elektrokimyasının seçilmesinin nedenleri olarak (1) düşük çalışma sıcaklığı ve (2) yüksek enerji yoğunluğu ve (3) özgül enerji değerlerini sıralamaktadır [142]. Bu nedenlerle Mars gezginlerinde, uzay giysilerinde ve çoğu uydularda Li-iyon bataryaları kullanılmaktadır [55]. **Çizelge 1.2** ile de görüleceği gibi sivil havacılık alanında elektrokimyasal enerji depolama alternatifi olarak lityum temelli bataryalar tercih edilmektedir.

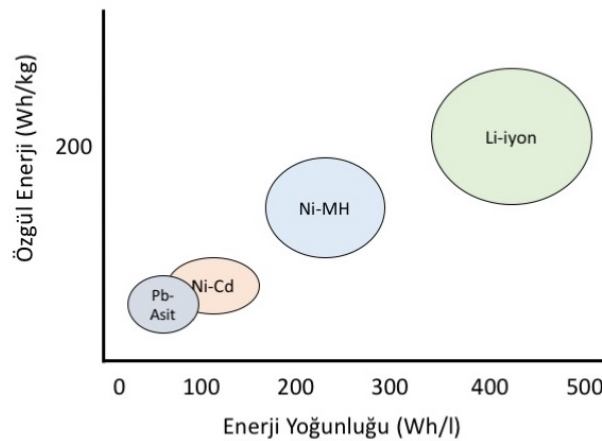
Bazı endüstriyelendirilmiş batarya türlerine ait teknik özellikler karşılaştırma amacı ile **Çizelge 3.1** ile verilmiştir. Çizelgede yer alan değerler, piyasada mevcut ürünlerle birlikte sunulan teknik değerlerdir. Halen geliştirme aşamasında olan veya teorik olarak daha yüksek değerlerin varlığı bilinmektedir.

Çizelge 3.1. Bazı endüstriyel bataryalar ve özellikleri

Sistem	Nominal Hücre Voltaj (V)	Özgül Enerji (Wh/kg)	Ömür Döngü Sayısı (kapasitenin %80'i)	Aylık Kendi Deşarj Oranı (%)
Kurşun asit	2	30-50	200-350	5
Ni-Cd	1.25	45-80	1500	20
Ni-MH	1.25	60-120	300-500	30
Li ion	3.60	110-180	500-1000	10
Li polimer	3.60	100-130	300-500	10
Li sülfür	2.50	600-1000	100-300	10

Kaynak: [68, 144, 145]

Enerji depolama sisteminde, belli bir güç talebinde çekilebilecek enerji miktarını gösteren diyagram Ragone eğrileri [146, 147] olarak isimlendirilmiştir. Ragone diyagramında farklı elektrokimyaların özgül enerjileri ve enerji yoğunlukları grafikte işaretlenerek, aralarındaki güç ve enerji açısından farklılıklar gösterilmiştir. Farklı uygulamalarda anlık güç veya enerjinin depolanması öncelikli gereksinim olabilir. Bu nedenle, uygun elektrokimyasal sistemin tercih edilmesinde bu diyagram eğrilerine göre seçim yapılması mümkündür.



Şekil 3.4. Değişik teknolojilerin enerji depolama performans diyagramı

Kaynak: [147]'den uyarlanmıştır

Ragone eğrilerinde görüldüğü gibi, lityum-iyon yüksek güç ve enerji değerlerinden dolayı havacılık uygulamalarında en uygun seçenek olarak görülmektedir [27, 143, 148]. Doksanların başından bu yana, lityum-iyon teknolojisi, alternatifi olan kurşun asit, nikel-metal hidrit ve nikel kadmiyum teknolojilerine kıyasla daha çok tercih edilmektedir [149]. Anılan teknolojilerin genel bir karşılaştırması **Çizelge 3.1** ile bu karşılaştırmanın grafik olarak sunumu da **Şekil 3.4** ile verilmiştir.

Batarya teknolojisindeki gelişmeler, ilk olarak kişisel elektronik endüstrisinin taşınabilir elektronik cihaz üretme ihtiyacı nedeni ile 1980'lerde başlamıştır [150]. Karşılaşılan yüksek talep, teknolojinin hızla ilerlemesine yol açmıştır. Lityum-iyon hücrelerin özgül enerjileri yüksek hızla gelişmiştir.

Lityum-Sülfür (Li-S) bataryalar, bir süredir üzerinde çalışılan teknolojilerdendir. Li-S bataryalar ile gelecek vaat eden teorik güç ve enerji değerleri elde edilmektedir. Mevcut teorik değerlerin 2000 Wh/kg üzerinde olduğu rapor edilmekle birlikte, çevrim döngü ömrünün endüstriyelendirme boyutuna uygun olmadığı görülmektedir [72, 151]. QinetiQ Zephyr, Li-S batarya ve güneş panelleri ile donatılmış bir İHA olarak, 2010 yılında, 70,000 feet irtifada, 336 saat (14 gün) kesintisiz uçuş gerçekleştirmiştir. Bu uçuş sırasında gece en düşük sıcaklığın eksi 75 °C olduğu kayıt edilmiştir [152]. Bu tür tecrübeler, yeterli batarya kapasitelerinin geliştirilmesi halinde sistem tasarımı yaklaşımı ile elektrikli uçuşun mümkün olduğu konusunda umutlar ortaya çıkarmaktadır.

Lityum hava bataryalar, gelecek teknoloji olarak bir diğer yoğun araştırma konusudur. Şu ana kadarki sonuçlar ışığında, 3400 Wh/kg gibi yüksek teorik enerji değerlerine rağmen, pratik teknik zorluklar nedeni ile, geliştirilmesi için daha çok zaman harcanacağı öngörülmektedir. Şu ana kadar elde edilmiş pratik değerler 500 Wh/kg civarında olmasına rağmen, bu değerlerin elde edildiği deneylerde saf oksijen kullanılmasından dolayı, bu teknolojinin yakın zamanda endüstriyelendirilmesi beklenmemektedir [72, 153].

Bataryaların performansları, üreticilerin ifade ettiği değerler dışında, kullanım ortam ve şartlarına çok bağlıdır. Laboratuvarlarda farklı üreticilere ait silindirik hücrelerle yapılan testlerde elde edilen kapasiteler ile hesaplanan özgül enerji değerleri **Çizelge 3.2** ile verilmiştir. Bu tablodan da görüleceği gibi, batarya kapasiteleri üzerinden çekilen gücün yoğunluğuna bağlıdır. Güç talebi arttıkça, bataryanın verebileceği enerji miktarı azalmaktadır.

Bataryanın kapasitesi, bataryanın belli gerilim aralığında depolayabileceği şarj miktarı olarak tanımlanabilir [68]. Bataryanın %100 SoC seviyesine kadar şarj edildikten sonra, alt gerilim seviyesine kadar deşarj edilerek ölçülür. Alt gerilim sınırına t zamanında ulaşıldığı düşünülerek kapasite akımın integrali alınarak hesaplanır:

$$K = \int_0^t I(t) dt \quad (3.3)$$

Burada K (Ah) batarya kapasitesi ve I (A), t zamandaki akım değeridir. Farklı üreticilere ait elektrokimyalar ile aynı hacim içinde farklı kapasiteler elde edilmektedir. **Çizelge 3.2** ile farklı üreticilere ait hücrelerin kapasite değerleri görülmektedir. Tabloda yer alan hücrelerden ilk üçü 18650 ebatlarında silindirik hücre olup, dördüncü ve beşinci hücreler 26650 ebatlarında silindirik tiptedir.

Denklem (3.3) doğrultusunda, batarya kapasitesinin akım ile doğru orantılı olduğu **Çizelge 3.2** ile görülmektedir. Yüksek akım ile gerçekleşen deşarj durumunda, batarya daha az enerji vermek başka deyişle verimsizliğe doğru eğilim göstermektedir. Deneylerde gözlenen bu düşüş, Peukert verimsizliği ile paraleldir.

Çizelge 3.2. Farklı hücrelerin deşarj akımına göre kapasiteleri

Üretici ve Model	Nominal kapasite (mAh)	0.2C deşarj altında özgül enerji (Wh/kg)	1C deşarj altında özgül enerji (Wh/kg)
Üretici A, lityum-metal	3200	248.7	241.2
Üretici B, lityum-metal	2850	235.7	220.5
Üretici C, lityum-polimer	2600	170.0	153.0
Üretici D, lityum-metal	5000	180.0	172.1
Üretici E, LiFePo	1500	120.0	114.0

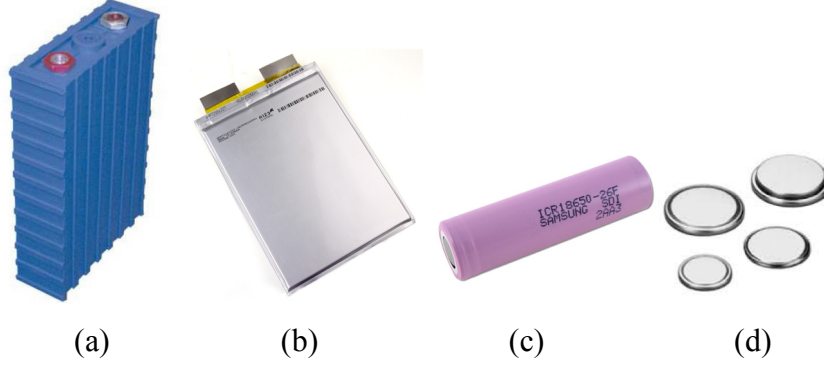
Literatürde ısı kaçış sıcaklığının çok yüksek olması nedeni ile tercih edilen LiFePo tipi hücre, tabloda görüleceği gibi benzeri bir Li-polimer hücrenin sunduğu kapasitesinin yaklaşık 1/3'ünü verebilmektedir. İlk iki hücre, piyasada en çok tercih edilen iki üreticiye ait olup, fikri mülkiyet haklarına sahip oldukları elektrokimyaların enerji kapasitelerinin farklılığı tabloda görülebilmektedir.

3.3. Batarya Türleri

Batarya hücreleri farklı formlarda üretilmekte olup, bunlardan dördü endüstri standardı olarak kabul edilmektedir. Bunlar;

- Prizmatik

- Poşet
- Silindirik
- Düğme tipi hücrelerdir.



Görsel 3.1. (a) prizmatik, (b) poşet, (c) silindirik, (d) düğme tipi hücre
Kaynaklar: CALB, A123, Samsung SDI, Battery University

3.3.1. Prizmatik hücreler

Yüksek enerji uygulamalarında kapasite ve formlarından dolayı tercih edilmektedir. Plastik tabanlı bir kutu içinde anot, katod, seperatör ve elektrolitin muhafazası ile genelde vidalı tip kutup başlarına sahiptir. Kutusunun plastik özelliğinden dolayı ısı yönetim ihtiyacı olan uygulamalar için tercih edilmemektedir.

3.3.2. Poşet hücreler

Genellikle alüminyum esaslı bir zarf içinde anot, katod, seperatör ve elektrolitin doldurularak izole edilmesi şeklinde üretilir. İnce yapılarından dolayı, daha iyi iç sıcaklık dağılımı sergilediği de bilinmektedir [67]. Bu tip hücrelerin üst üste bindirilmiş katmanlarının, şarj/deşarj boyunca sıcaklık veya kullanımda maruz kalınacak mekanik etkilerden dolayı birbirinden ayrılmasını önlemek için özel tasarım gereklidir. Bu tür tasarımlar özellikle yüksek kapasitelerde ilave ağırlık ve maliyet doğurmaktadır.

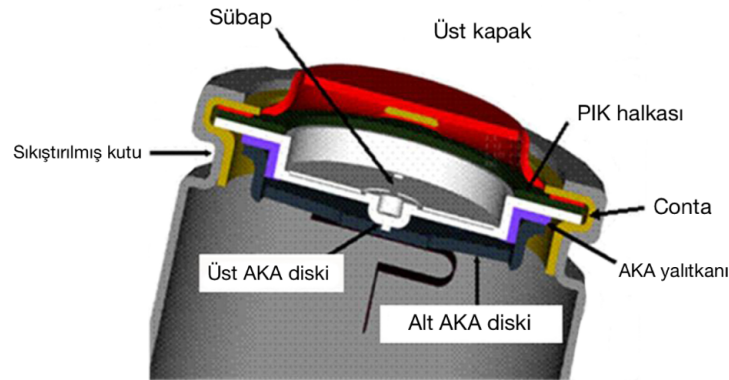
3.3.3. Silindirik hücreler

Kendi içlerine basınçla sarıldıklarından dolayı, daha iyi yapısal performans göstermekte ve daha hassas uygulamalarda tercih edilmektedir. Aynı zamanda hem yapısal bütünlük hem de kullanılan güvenlik mekanizmalarının varlığı ile [154] silindirik

hücreler endüstride en çok tercih edilen ve havacılık endüstrisinde de benzer nedenlerle tercih edileceği düşünülen hücre formudur.

Ticari olarak üretilen silindirik hücrelerde kullanılan güvenlik mekanizmalarına ait örnek bir kesit **Şekil 3.5** ile gösterilmiştir. Bu tür hücrelerin üzerinde, dışarda meydana gelebilecek kısa devre veya ani yüksek akım çekilmesi durumunda kesici olarak görev yapan Pozitif Isıl Katsayı (PIK) halkası kullanılmaktadır. Yüksek akımlarda çalışabilen bazı hücrelerde bu PIK kullanılmaz. Aşırı şarj durumunda ve yüksek sıcaklıklarda akım kesmek için ise Akım Kesme Aracı (AKA) bulunmaktadır. Hücre içindeki elektrokimyanın herhangi bir nedenle gaz çıkarması durumunda ise, gazı tahliye ederek hücre çalışmasını durdurmak için metalin işlenerek inceltilmesi ile elde edilen bir sübap bulunmaktadır.

Silindirik hücre tipinde lityum tabanlı hücrelerin endüstriyel üretimleri genellikle 18650 ve 26650 ebatlarında üretilirler. Farklı uygulamalar için daha özel ebatlarda üretimi de yapılmakta olup, bu iki ebat perakende olarak yaygın kullanımdadır. Bu ebat kodunun ilk iki hanesi çap, sonraki üç hanesi ise hücrenin boyu olacak şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 3.5. Silindirik hücrede güvenlik tedbirleri
Kaynak: [154]'dan uyarlanmıştır

Batarya türlerine özel karakteristiklerin bilinmesi, farklı uygulamalarda ortaya çıkan farklı gereksinimlerin karşılanması amacıyla uygun yapının seçilmesi için gereklidir.

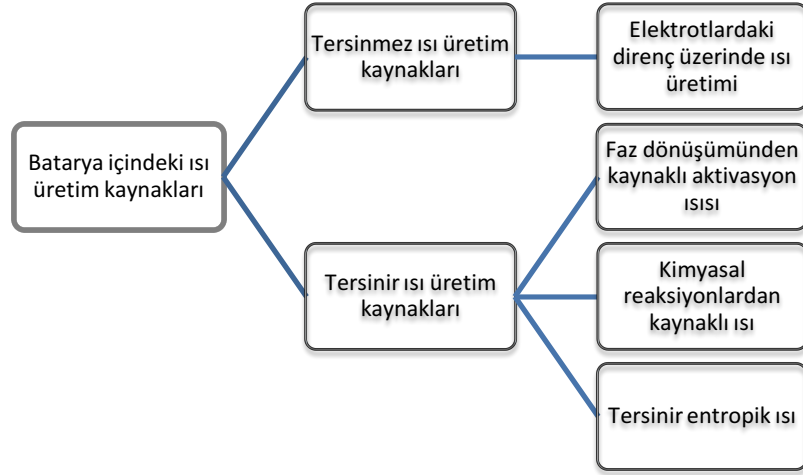
3.3.4. Düğme tipi hücreler

Genellikle yeni elektrokimya geliştirme aşamasında denemeler maksadı ile laboratuvar ölçeğinde üretilirler. Saat gibi küçük hacimli, düşük enerji gerektiren uygulamalar için de endüstriyel olarak üretilmektedir.

3.4. Bataryalarda Isı Üretim Mekanizması

Bataryalarda, elektrokimyasal olarak elektrik enerjisinin depolanması (şarj) ve verilmesi (deşarj) sırasında dört temel ısı mekanizması bulunur. Bunlar, (1) hücre içindeki konsantrasyon değişiminden kaynaklı karışım ısı, (2) tersinir entropik ısı (3) kimyasal reaksiyonlardan kaynaklı ısı ve (4) direnç üzerinde üretilen ısı. Bataryalardaki tersinir ve tersinmez ısı üretimi **Şekil 3.6** ile verilen şemada gösterilmiştir.

Tersinmez ısı kaynağı, hücre bileşenleri üzerinden akan elektrik akımının bu elemanların direnç etkisi ile ürettiği ısı olarak ön plana çıkmaktadır. Bu ısı hücrenin şarj vedeşarj aşamalarında sürekli pozitif değere sahiptir. Tersinmez ısı kaynakları ise hücre içinde şarj vedeşarj sırasında meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan ısıdır. Bu ısı farklı şartlarda endotermik veya ekzotermik olarak ortaya çıkabilir.



Şekil 3.6. Batarya içinde ısı kaynakları

Batarya ısı üretim kaynakları termodinamik ve elektrokimyasal olarak analiz edilmiştir.

3.5. Isıl Modelleme

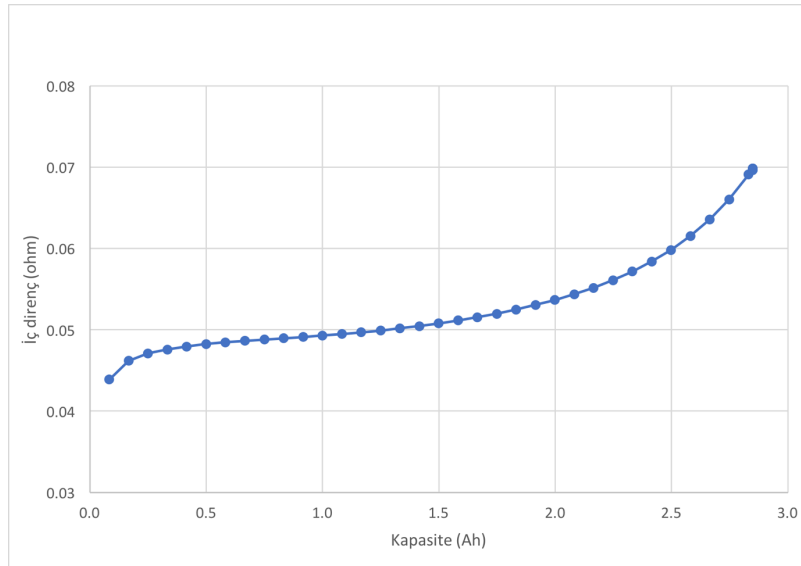
Literatürde farklı boyutta ve farklı varsayımlara dayanılarak modeller tanımlanmış, bunlar hız ve doğruluk açısından kıyaslanmıştır. Modelin en önemli parametrelerinden olan hesaplama hızının, sonucun en doğru şekilde elde edildiği model sorgulanmıştır. Tek boyutlu modeller ile en hızlı sonucun üretildiği ancak hassasiyetin düşük olduğu literatürde yer almaktadır [121, 155]. Çoğu araştırmacı, tabakalardan oluşmuş hücre iç yapısının ortalama olarak kullanıldığı modeli tercih etmiştir. Sonuçta modelin tercihinde tek başına hassasiyet değil, işlem hızı da belirleyici olmaktadır [122, 156, 157].

Chen bulgularında, hücrenin deşarj oranı arttıkça ısı üretimi ve dağılımında düzensizliğin arttığına yer vermektedir [121]. Bu nedenle yüksek deşarj oranına sahip bataryalarda termal yönetim şarttır.

3.6. Batarya İç Direnci

Bataryada ısı üretiminin ikinci faktörü, hücrenin iç direncidir [158, 159]. Bataryanın iç direnci şarj ve deşarj anında açık devre gerilimi üzerinde gerçekleşen gerilim düşüşünün sebebidir. İç direnç SoC, SoH gibi bataryanın durumunu izlemek ve güvenli sınırlar içinde bataryanın tutulabilmesi için gereklidir [85]. İç direnç ölçümü, batarya gibi enerjik yapılarda zor olduğundan, çalışan bataryanın gerilim düşüşü üzerinden hesaplanarak kullanılmaktadır.

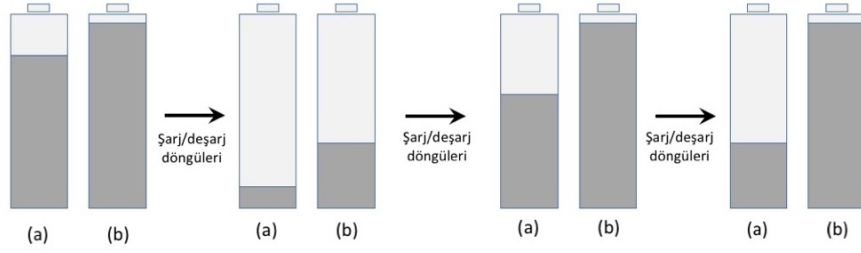
Bataryalar şarj derinliği boyunca değişken iç direnç özelliği gösterirler. Deşarj sırasında düşük SoC değerlerine yaklaşılrken iç direnç yükselen eğim gösterir. Bu eğim, bataryanın ömrü boyunca artarak, bataryanın enerji depolama kapasitesini düşürür [67, 160]. Bataryada karşılaşılan kapasite boyunca iç direncin değişimi **Şekil 3.7** ile gösterilmiştir. Grafikte de analiz edilebileceği gibi kapasitesinin sonuna doğru iç direnç yükselmektedir.



Şekil 3.7. Kapasite boyunca iç direnç değişimi

Bataryada kullanılan hücrelerin iç dirençlerinin birbirinden farklı olması, şarj ve deşarj sırasında hücrelerin üzerinde farklı gerilim düşüşlerine neden olur. Özellikle şarj sırasında iç direnç farklılıkları, bazı hücrelerin gerilim üst sınırlarını aşmasına ve tehlikeli sonuçlara ortam hazırlayabilir. BYS tarafından tehlikeli sınırlar önlenese bile, **Şekil 3.8** ile

gösterildiği gibi, zaman içinde iç direnci yüksek olan hücre, tüm bataryanın enerji depolama kapasitesini düşürecektir.



Şekil 3.8. İç direnci yüksek (a) hücresinin neden olduğu kapasite kaybı

İç direnç, üretim tekniğinden ve hücrelerin dengesiz kullanımından ortaya çıkar. Hücrelerin kullanım ömrü boyunca iç dirençleri düzenli olarak yükselir ve ömür sonunda hücrenin enerji tutmasına izin vermez ve batarya yaşlandı olarak nitelendirilir [160]. Bataryaların yaşlanma sebeplerinden olan döngü yaşlanmasının en önemli nedeni iç direnç artışı olarak görülmektedir [161, 162].

3.7. Isıl Kaçış

Bataryalarda iç direncin ve elektrokimyasal reaksiyonların etkisi ile çalışma sırasında ısı üretimi gerçekleşir. Üretilen bu ısı ortamdan çekilmediğinde, hücre kimyasına bağlı olarak, yükselen ısı ek ekzotermik reaksiyonlara neden olarak ısı kaçış gerçekleşebilir [160]. Bu reaksiyonlar, eğer ısı uzaklaştırılmazsa, kısır döngü oluşturarak ısının aniden daha da yükselmesine sebep olabilir. Sonuçta ısı kaçış gerçekleşerek hücrenin kullanılmaz olmasına ve daha da ötesinde yangın ve patlamaya sebebiyet verir. Isıl kaçış olmasa bile, yüksek sıcaklıklarda hücrenin çalıştırılması batarya kapasitesinin önemli ölçüde azalmasına sebebiyet verir [163]. Bu nedenle bataryaların yönetiminde batarya ısı yönetimi kullanılması gereklidir. Bazı araştırmacılar sıvı ve hava ile soğutma, izolasyon, faz değiştiren malzemeler, aktif ve pasif yaklaşımları ve bunların bileşimleri sistemleri incelemiştir [86, 100, 164].

Isıl Kaçış, literatürde hücrenin güvenli kullanımı için ön plana çıkan, yönetilmesi gereken bir konudur [165]. Lityum-iyon hücrelerin ısı kaçışı üç adımlı bir süreç olarak tanımlanır [166]:

- Anot üzerindeki reaksiyonlar 90° C civarında başlar. Sıcaklık 120 °C üzerine çıkmaya başladığında, katı elektrolitik arayüz katmanı ve negatif elektrot bozulmaya başlar.

- Isıl kaçış mekanizmasının ikinci basamağında, pozitif elektrot üzerinde ekzotermik reaksiyonlar başlar ve sıcaklık 140°C üzerine hızla çıkar. Bu aşamada Oksijen oluşumu hızlanır.
- Pozitif elektrot bozunur ve elektrolit 180 °C üzerinde okside olmaya başlar. Bu ekzotermik reaksiyon dakikada 100 °C gibi ısıtma kapasitesine sahiptir.

Isıl kaçış, hücrenin Şarj Durumuna (SoC), (hücre ne kadar yüksek şarj voltajına sahipse o kadar düşük sıcaklıkta reaksiyon başlar), hücre tipine, hücrenin geçmişine ve uygulanan yüke bağlıdır [165].

Bu mekanizmanın, Li-iyon batarya kullanımı sırasında yönetilmesi gerekli olup, uygulamanın kritiklik derecesine göre tasarım aşamasında BYS'ye dahil edilmesi gereken bir fonksiyondur.

3.8. Bataryanın Yaşlanması

Bataryaların ekonomik ömrü, kullanıldığı sistemin performansı açısından önemlidir. Bu yüzden platform üzerindeki bataryanın yaşlanmasını takip etmek ve hatta yönetmek önemli bir işlevdir [167]. Bataryaların güç ve enerji kapasitesi döngüler sonucu azalır. Güç kaybı temel olarak iç direnç seviyesindeki yükselmeye bağlıdır. İç direnç, enerjinin israf edilmesine yol açan Ohm kayıplarını doğurur, ısı üretir ve yaşlanmayı hızlandırır.

Tüm hücrelerde yan reaksiyonlar oluşur. Bunlardan bazıları tersinir olup, batarya üzerinde kalıcı etki bırakmazlar. Ancak bazı reaksiyonlar tam olarak tersinmez ve kalıcı kapasite kaybına yol açar. Bu yan reaksiyonlar, bataryanın yaşlanmasını veya zamanla kapasite kaybına neden olan mekanizmadır. Her elektrokimyanın ve her hücrenin kapasite kaybı mekanizması birbirinden farklıdır [162, 168].

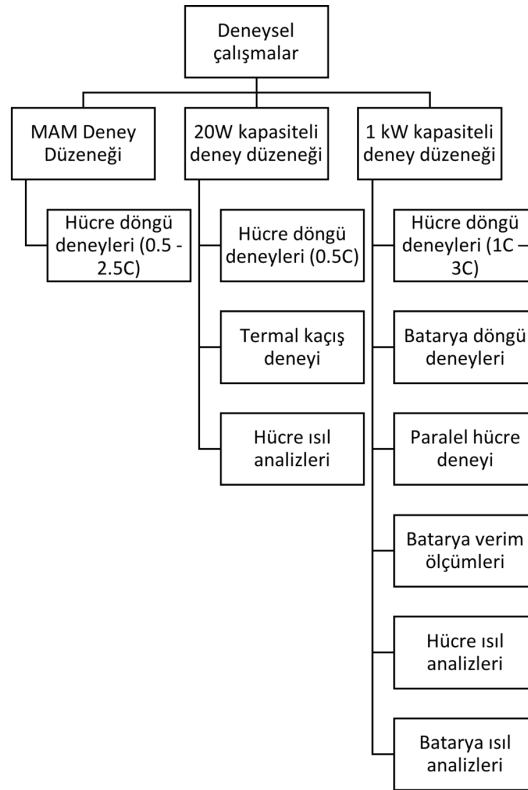
Karbon tabanlı anoda sahip hücrelerde, SEI katmanının kalınlaşması veya üzerine ilave katman oluşumu, yaşlanmanın en bilinen etkilerindendir [68]. Bu mekanizma ile hücre içindeki aktif malzemenin daha azı kullanılır ve hücre kapasitesinin altında şarj ve deşarj edilebilir hale gelir [67].

Bataryaların yaşlanması aynı zamanda iç direnci artıracığından, düşük akımlarda bile daha yüksek ısı üretmesine neden olmaktadır. Bu yönü ile de yaşlanma, batarya ekonomik ömrünü sınırlandıran bir etmendir.

4. DENEY DÜZENEGİ VE YÖNTEM

Hücre ve batarya ısı özelliklerinin incelenmesi, veri toplanması ve sayısal modelin doğrulanması için farklı kapasitelerde deney düzenekleri kullanılmıştır. Deneysel düzeneklerin bileşenleri, yöntem ve süreçler bu bölümde aktarılmıştır.

Tez kapsamında yer alan deneysel çalışmaları yürütmek için iki ayrı deney düzeneği geliştirilmiştir. Deney düzeneklerinin tedarik sürecinde ilk deneyler TÜBİTAK MAM bünyesinde yer alan deney teçhizatı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ardından önce 20W kapasiteye sahip deney düzeneği kurulmuş, ardından daha gelişmiş ölçüm ve kayıt yeteneğine sahip olan 1kW kapasiteli deney düzeneği geliştirilmiştir. Deney düzeneklerinin otomasyonu ve kayıtların bilgisayarda tutulması için kontrol ve yönetim yazılımı özgün olarak geliştirilmiştir.



Şekil 4.1. Deneysel çalışmaların şematik gösterimi

Deneysel çalışmalarda kullanılan düzenekler ve yapılan deney çalışmaları **Şekil 4.1** ile verilmiştir. Deney çalışmalarında kullanılmak üzere batarya geliştirilmesi yapılmıştır. Uçaklarda kullanılan kurşun asit bataryaların yerine kullanımı öngörülen batarya için farklı kapasitelerde deney yapılabilmesi için bir de deney yatağı üretilmiştir.

4.1. TÜBİTAK MAM Deney Düzeneği

Tez çalışmasının başlangıç aşamasında gerek tedarik süresinin uzunluğu gerekse de deney düzeneği, kullanımı ve güvenlik tedbirleri hakkında bilgi edinilmesi açısından, deneylerin yürütülmesi için TÜBİTAK MAM’da kurulu olan ve aşağıdaki bileşenlere sahip bir deney altyapısından yararlanılmıştır;

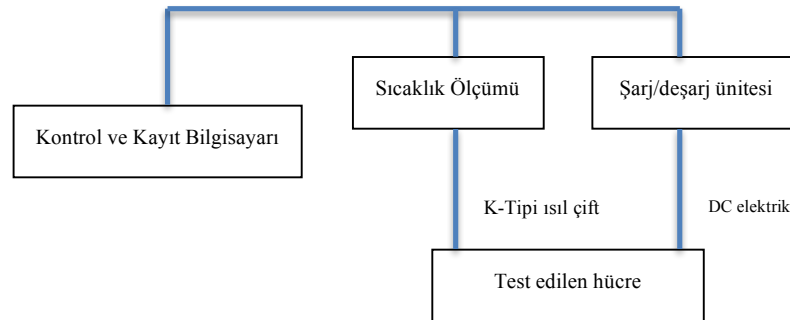
- Batarya şarj/deşarjı için programlanabilir kaynak ve yük (cyclers)
- Gerilim ve akım ölçüm sistemi
- Sıcaklık ölçüm sistemi
- K-tipi ısıl çift
- Güvenlik ve entegrasyon kabini ve bağlantı elemanları

Bu deney düzeneğinde yer alan ekipmanlar **Çizelge 4.1** ile verilmiştir.

Çizelge 4.1. Test ekipmanları listesi

Cihaz / Ekipman / Yazılım	Marka ve Model	Seri No
Batarya Test Sistemi (10 Kanallı)	Digatron IBTR 2000-072	1130305
Cyclers (24 Kanallı)	BaSyTec	BA V1.61.40.0193
Güvenlik Test Kabini	CIS- CLT-020S	MYV13SIKTX2001
Ölçüm ünitesi	Megger M8037	-

Kurulan deney düzeneği bağlantı şematiği **Şekil 4.2** ile gösterildiği gibidir.



Şekil 4.2. Deney düzeneği bağlantı şematiği

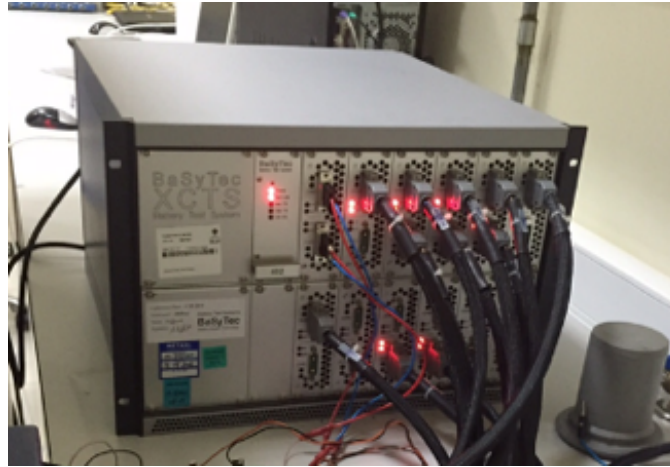
TÜBİTAK MAM Test altyapısı ile model geliştirme için test edilen hücre, poşet tipi olup, hücre ağırlığı yaklaşık 250 g, boyu 135 mm, eni 82 mm ve kalınlığı 12 mm’dir. Şarj sıcaklığı 0 ila 45 °C,deşarj sıcaklığı -20 ila 65 °C olarak verilmiştir. Nominal voltajı 3.2V, nominal kapasitesi ise 10 Ah’dır. Üretici en yüksek şarj gerilimini 3.65V vedeşarj

kesme gerilimini 2.3V olarak tanımlamıştır. Ürün özelliklerinde nominal deşarj akımı 10A olarak verilmiştir. Test edilen hücreler **Görsel 4.1** ile verilmiştir.



Görsel 4.1. Test edilen batarya hücreleri

Hücreler (**Görsel 4.1**) öncelikle **Görsel 4.3** içine yerleştirilerek bağlantıları yapılmıştır. Bağlantılar hücreden doğrudan **Görsel 4.2** ile gösterilen cihaza yapılmıştır. Deney düzeneğine bağlanan bataryaların şarj deşarj döngü testleri gerçekleştirilmiştir. Şarj döngüleri 1C, C/2, deşarj döngüleri de C/2, C, 2C ve 2,5C akım değerlerinde gerçekleştirilmiştir.



Görsel 4.2. TÜBİTAK MAM şarj/deşarj (cycler) ekipmanı



Görsel 4.3. TÜBİTAK MAM Batarya güvenlik ve test kabini

Test edilen batarya için üretici tarafından nominal değerler 10Ah ve 3.2 V olarak verilmiştir. Deşarj için kesme voltajı 2.3 V ve şarj için 3.65V olarak verilmiştir. Testler sırasında bu değerlere uygun olarak testler gerçekleştirilmiştir.

Batarya yüzey sıcaklığı ölçümleri için K-tipi ısı çiftleri kullanılmıştır. Yüzeye yapıştırılarak test sırasında yüzey sıcaklığı değişimleri ölçülmüştür.

Testler oda sıcaklığında yaklaşık 25 °C altında gerçekleştirilmiş, hücrelerin doğal soğumaları için hava açıklığı sağlanmıştır.

4.2. 20W Kapasiteli Deney Düzenegi

İlk deney altyapısı ile elde edilen tecrübeler doğrultusunda, 20W kapasiteli bir deney altyapısı da tasarlanmış ve kurulumu gerçekleştirilmiştir. Kurulan bu deney altyapısı, bir adet şarj/deşarj için kaynak cihazı ve sıcaklık, gerilim ve akım ölçümü için de bir adet ölçüm ünitesi ile K-tipi ısı çiftleri, bağlantı ekipmanı ve güvenlik kabininden oluşmaktadır. Test düzeneğinde kullanılan ekipman marka ve modelleri **Çizelge 4.2** ile verilmiştir.

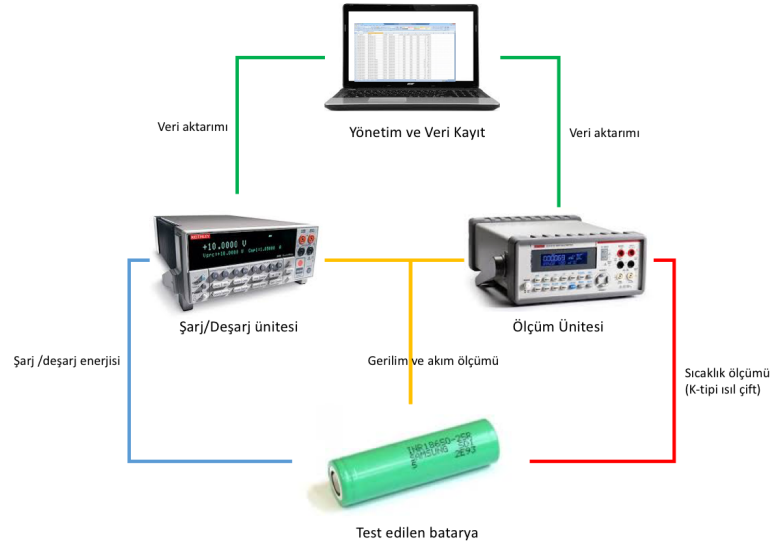
Çizelge 4.2. 20 W kapasiteli deney teçhizatı listesi

Test Cihazı	Marka/model
Şarj/deşarj ünitesi	Keithley 2400 Sourcemeter
Sıcaklık, gerilim ve akım ölçüm cihazı	Keithley 2110 Multimeter
Isıl çift	K-Tipi
Isıl Kamera	Testo 875 ısı kamera
Test yönetimi ve veri kayıt	Bilgisayar üzerinde BTSY

Deneylerde oda sıcaklığında 18650 ve 26650 hücreler kullanılmış ve şarj/deşarj sırasındaki gerilim, akım ve sıcaklık verileri alınmıştır.

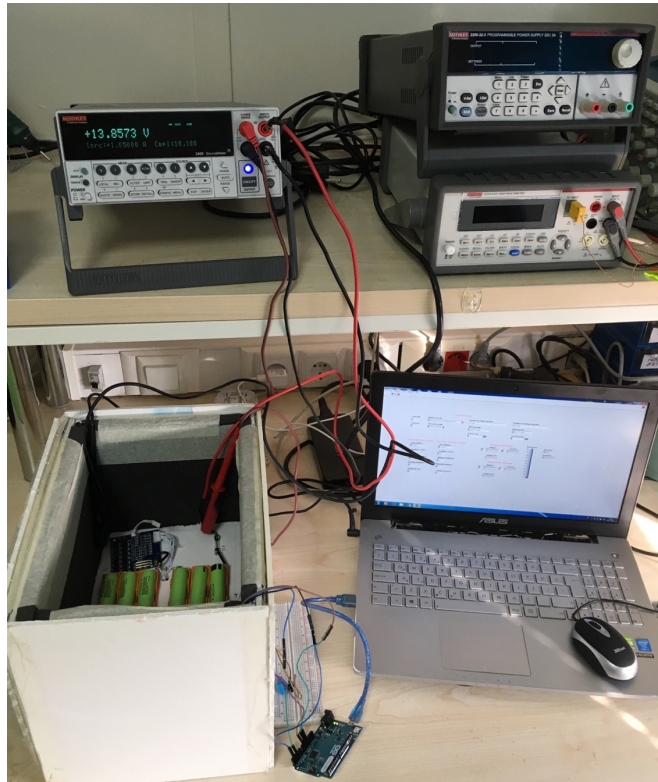
Kurulan deney düzeneği, **Şekil 4.3** ile gösterilen bağlantı mimarisine sahiptir. Kurulan deney düzeneği test halinde iken **Görsel 4.4** ile gösterilmiştir. Bu deney düzeneği, tek hücreler ve 20 W kapasiteye kadar bataryalar ile testler gerçekleştirilecek şekilde tasarlanmıştır.

Gerçekleştirilen testler, Batarya Test Sistemi Yazılımı (BTSY) ile bilgisayar ortamında kayıt altına alınmıştır. Veriler Labview yazılımı ile sıkıştırılmış veri formatında kaydedilmiş, ardından MS Excel formatına çevrilerek grafikler elde edilmiştir.



Şekil 4.3. Deney düzeneği bağlantı şematiği

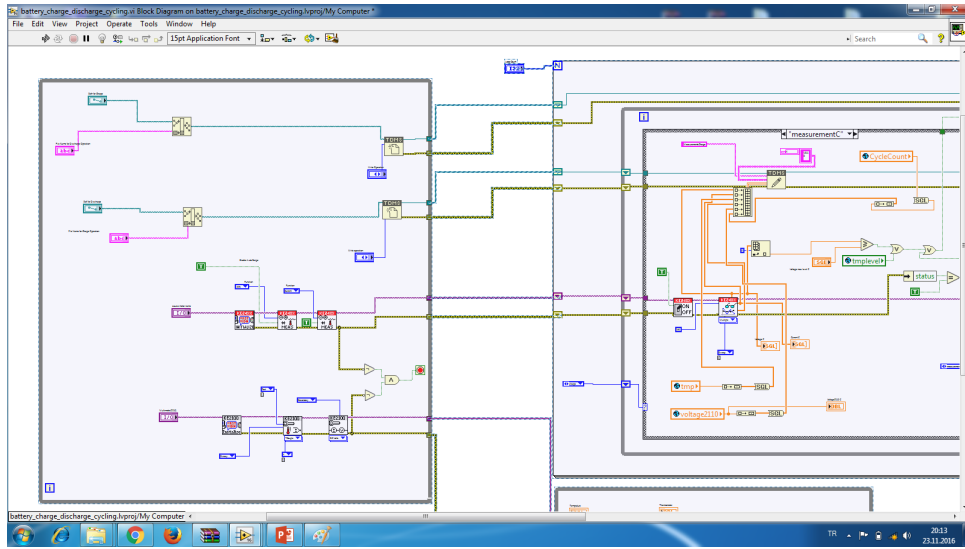
Batarya testlerinin ortalama olarak üç gün civarında sürmesinden dolayı, test sistemin başında insan olmadan güvenli şekilde çalışması ve verilerin kaydının tutulması için bir kontrol yazılımı gerekmektedir. Bu amaçla Labview ortamında batarya test sistemi yönetim ve kayıt yazılımı (BTSY) geliştirilmiştir. Yazılıma ait arayüz ve ayar parametreleri **Şekil 4.5** ile gösterilmiştir.



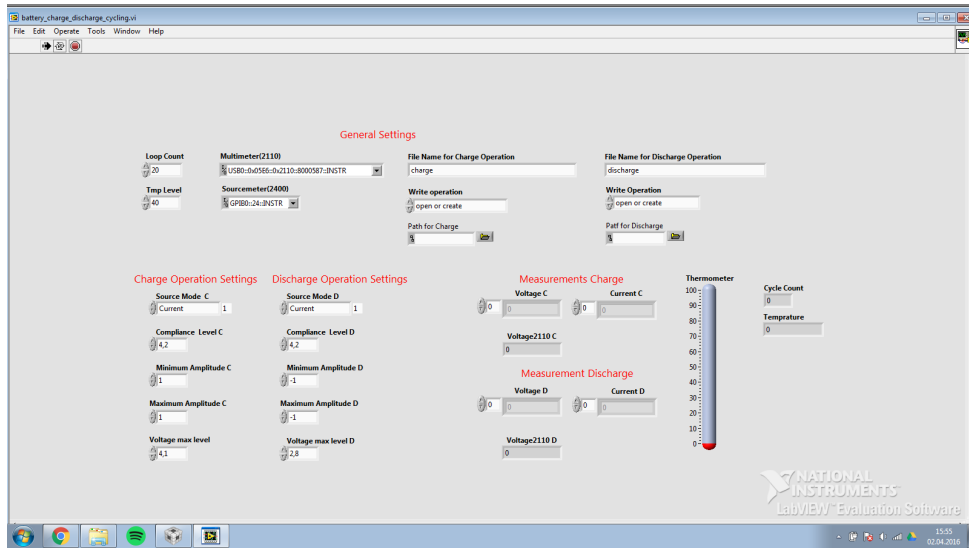
Görsel 4.4. Kurulan deney altyapısı

BTSY temel işlevleri şunlardır;

- Test ekipmanlarını kontrol etmek, komutları göndermek,
- Test cihazlarından verileri okumak ve kaydetmek,
- Test için tanımlı parametreleri kullanıcı arayüzünden almak,
- Test için tanımlı sınırlar aşıldığında testi güvenli şekilde durdurmak
- Testi istenen kadar döngüde şarj ve deşarj ederek yürütmek
- Kullanıcının tanımladığı klasörde test verilerinin kayıt edileceği dosyayı oluşturmak ve verileri bu dosyaya yazmak



Şekil 4.4. BTSY kodlanmış hali



Şekil 4.5. BTSY Test yönetim ve kayıt yazılımı arayüzü

BTSY, bu işlevleri yerine getirmesi için testin başında kullanıcı şu parametreleri girer;

- Döngü sayısı,
- Test sırasında izin verilecek en yüksek sıcaklık,
- Şarj kayıtlarının kaydedileceği klasör ve dosya isimleri ile ekle/yeniden yarat seçenekleri,
- Deşarj kayıtlarının kaydedileceği klasör ve dosya isimleri ile ekle/yeniden yarat seçenekleri,
- Şarj metodu ve akım ile gerilim değerleri,
- Şarjın çıkacağı en yüksek gerilim değeri (cut-off),
- Deşarj metodu ve akım ile gerilim değerleri,
- Deşarj sırasında inilecek en düşük gerilim değeri (cut-off).

Bu parametrelerin yanı sıra, yazılım test sırasında kaynak cihazından ve ölçüm ünitesinden okunan verilerin gösterildiği alanlar ile sıcaklığın termometre şeklinde gösterildiği bir alana sahiptir.

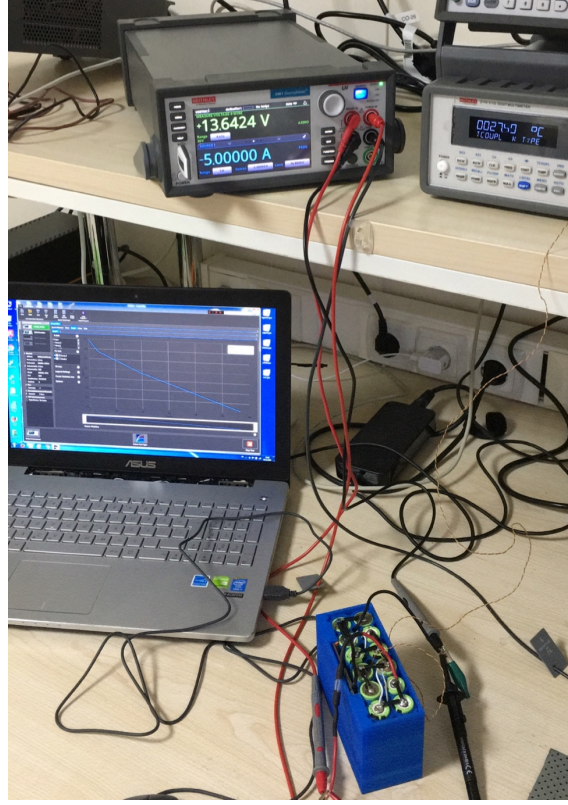
4.3. 1kW Kapasiteli Deney Düzeneği

Tez çalışması kapsamında, ilkinde göre kapasitesi daha yüksek olan 1 kW gücünde test sistemi kurulmuştur. Bu test sistemi, ikinci aşamada kurulan 20 W gücündeki test sistemine nazaran daha yüksek akımlarda test yapılabilmesini sağlayacak niteliktedir. Bu yüksek güç, batarya paketleri ile deney yapılabilmesi için gereklidir.

Görsel 4.5 ile gösterilen cihaz ve deney düzeneği ile hücre ve bataryalarda yüksek akımlar kullanılarak döngü testleri yapılmıştır. Deney cihazı üzerinde kendi kayıt imkanı ve grafik oluşturma yeteneği bulunmaktadır.

Cihaz kendi dokunmatik ekranı üzerinden de önceden belirlenmiş programları otomatik olarak çalıştırabilmekte ve kendi hafızasında kayıt tutabilmektedir. Cihaz sadece şarj veya sadece deşarj yapabildiğinden, otomatik olarak döngünün yapılabilmesi için ayrıca bir deney yönetim yazılımına ihtiyaç duyulmaktadır.

Cihaz 4 ayrı kablo ile bataryaya bağlanmaktadır. Bunlardan ikisi artı ve eksi elektrik yükleri ile şarj veya deşarj yaparken diğer ikisi ölçüm almaktadır. Bu yöntem ile şarj/deşarj enerjisinin ölçüm sonuçlarına etki etmesinin önüne geçilmiş olmaktadır.



Görsel 4.5. 1kw kapasiteli deney düzeneği

Test cihazı, aynı BTSY yazılımı ile çalıştırılmıştır. Deney sırasında 20W kapasiteli deney düzeneğinde kullanılan bağlantı şeması, bir önceki deney düzeneğinde kullanılan ile aynı şekildedir.

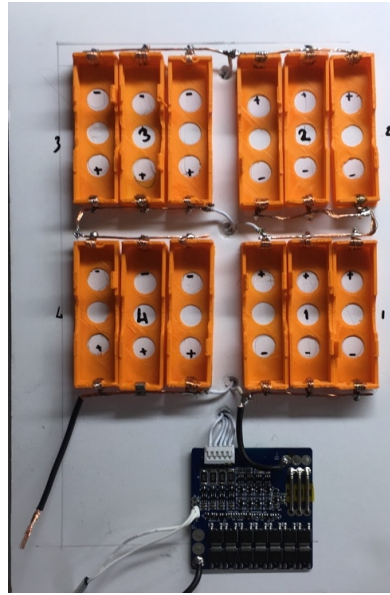
4.4. Batarya Hücreleri Test Yatağı

Batarya oluşturulurken, son hücrelerin bağlantısı sırasında, ondan önceki hücrelerin oluşturduğu yüksek seviye enerji tehlikeli durumlar oluşturmaktadır. Kısa devre, atlama gibi etkilerin yarattığı zorluklar nedeni ile endüstriyel uygulamalarda da bataryanın entegrasyonu önemli bir çalışma konusudur.

Deneyler sırasında bataryayı oluşturan çok sayıda hücrenin takılıp çıkarılmasında karşılaşılan bu zorluklar nedeni ile, hücrelerin bağlantılarının kolaylıkla yapıldığı bir düzenek geliştirilmiştir.

Düzenek ile 4 seri ve 3 paralel 18650 ebadında hücrenin bağlantılarının yapılması için tasarlanmıştır. **Görsel 4.6** ile görüldüğü gibi, düzenek 1, 2 veya 3 paralel hücre bağlantısı sağlamaktadır. Paralel yuvaların diğer seri kollardaki ile eşit sayıda hücre konması yeterlidir.

Geliştirilen düzenek üzerinde BYS takılması ve BYS bağlantılarının hücrelere yapılmasına olanak verecek kanallara sahiptir. Düzenek aynı zamanda ısıl kamera ile hücreler üzerindeki ısı dağılımının görüntülenebilmesi için yatay formda ve tüm hücrelerin görülebileceği şekilde planlanmıştır. Bataryayı oluşturan hücrelerin yerleştirildiği hücre kutuları, yapılan tasarım ile üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Hücreler arasında enerjiyi taşıyan bara, hücre kutularının bağlantısını sağlamanın yanı sıra, üzerinden ölçüm alınabilecek yapıdadır.



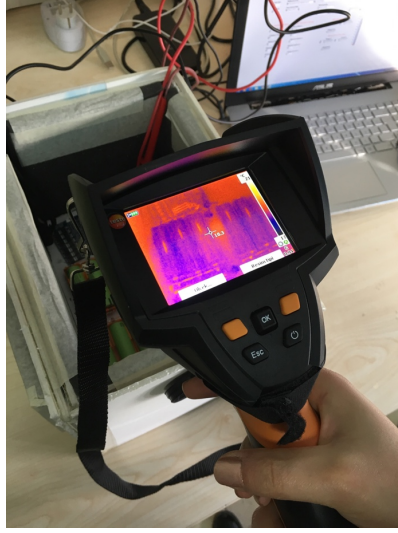
Görsel 4.6. *Batarya hücrelerinin bağlandığı deney düzeneği*

Batarya üzerinde bir adet analog BYS kartı bulunmaktadır. BYS, hücreler arasında oluşabilecek enerji seviyelerindeki dengesizliği, üst şarj sınırı (4.2 V) civarında dengeleyecek şekilde programlanmıştır. Bu sayede her 4.2 V seviyesine ulaşan hücre, diğerlerinin seviyesine düşene kadar düşük akımlarla deşarj edilmektedir. BYS aynı zamanda hücrelerin üst şarj seviyesinden daha yukarı şarj edilmesine ve deşarj alt gerilim seviyesinin altında deşarj edilmesini önlemek üzere iki yönlü devre kesiciye sahiptir.

Düzenek üzerinde, çekilen akımı sınırlamak ve olası kısa devre gibi durumlarda güvenlik amaçlı bir sigorta bulunmaktadır. Test düzeneği ile çekilebilecek en yüksek akım 10A altında olduğundan, bu değerde bir sigorta seçilmiştir. Kısa devre için BYS kartı üzerinde de elektronik kesici mevcuttur.

4.5. ısıl Kameralar

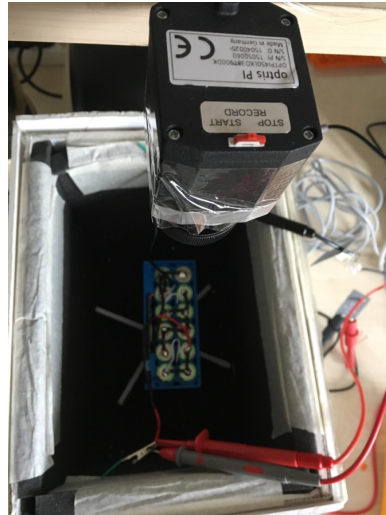
Deneyler sırasında ısı gözlem yapabilmek ve ikincil sıcaklık ölçümleri almak için ısı kamera kullanılmıştır. Bunlardan birisi el tipi olan Testo 875 model bir ısı kameradır (*Görsel 4.7*).



Görsel 4.7. Deneylerde kullanılan ısıl kamera

Bu kamera taşınabilir olup, görece düşük çözünürlük ve hıza sahiptir. Testlerin gereksinimleri ve hücrelerin sıcaklık değişim hızları ile kıyaslandığında yeterli görülmüştür. Daha çok anlık gözlem yapmak amacı ile kullanılmıştır.

Diğer ısıl kamera, batarya test yatağı ile yapılan testlerin izlenmesi ve kaydedilmesi için kullanılan daha yüksek çözünürlüklü sabit tip olan Optiris PI 450 model kameradır. Bu ikinci kameranın test sırasında kullanımı *Görsel 4.8* ile verilmiştir.



Görsel 4.8. Sabit tip ısıl kamera ölçüm sırasında

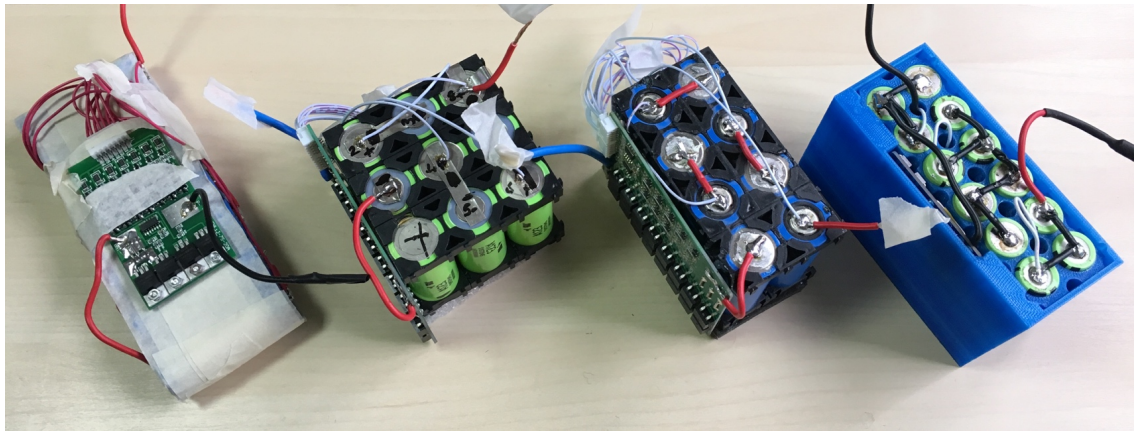
4.6. Batarya Geliştirilmesi

Tez kapsamında, hedeflenen Cessna 172 model genel havacılık uçağının 12V ve 24V bataryalarının yerine Lityum-iyon bataryalar geliştirilmiştir. Halen kullanılan 12V kurşun asit bataryasına ilişkin teknik veriler **Şekil 4.6** ile verilmiştir. Bu amaçla ısıt analizleri yapılan hücre türleri kullanılarak **Çizelge 4.3** ve **Görsel 4.9** ile verilen bataryalar geliştirilmiştir.

Çizelge 4.3. Geliştirilen bataryaların özellikleri

Gerilim (V)	Hücre Sayısı	Kapasite (Wh)	Nominal Akım (A)	Elektrokimya
12	12, 4 seri 3 paralel	120	10	LCO
24	7 seri	100	4.5	NMC
24	8 seri	90	3.2	LFP
24	8 seri	80	2.3	LFP

Bataryalardan ilki, standart genel havacılık aküsü gereksinimleri doğrultusunda boyutlandırılmış ve 12 V gerilime sahip olacak şekilde 4 seri 3 paralel hücreden oluşturulmuştur. Bataryalarda pasif dengeleme ve yönetim maksadı ile analog bir BYS tercih edilmiştir.



Görsel 4.9. Tez kapsamında geliştirilen bataryalar

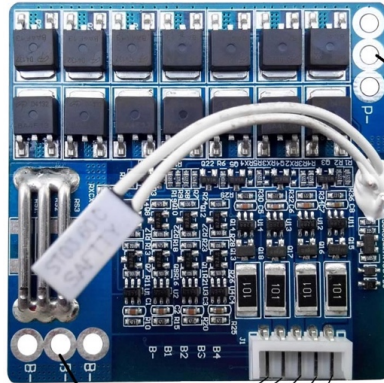
İlk bataryada 3.2 Ah kapasiteli 18650 tipte LCO (Lityum-kobalt-oksit) elektrokimyasında hücreler kullanılmıştır. İkinci batarya 24V gerilime sahip olup, NMC (nikel-mangan-cobalt) elektrokimyasında ve 4500 mAh kapasitede 7 seri bağlı 26650 hücrelerden oluşturulmuştur. Diğer iki bataryada LFP (lityum-demir-fosfat) elektrokimyasında hücre tercih edilmiştir. Bu hücrelerin nominal gerilimleri düşük olduğundan 24V karşılamak için 8 adet hücre seri olarak bağlanmıştır. Hücreler 26650 ebattadır.

Batarya tasarımından önce yürürlükte olan standartlar incelenmiştir. Ulaşılan bu standartlar çerçevesinde bataryanın tasarımları geliştirilmiştir. Bu standartlar şunlardır;

- TS-EN-61960 “Alkalin ya da diğer asit olmayan elektrolitleri içeren ikincil hücreler ve piller- Taşınabilir uygulamalar için ikincil lityum hücreler ve piller (IEC 61960:2011)” ve
- TS-EN-62133 “Alkalin ya da diğer asit-olmayan elektrolitleri içeren ikincil hücreler ve piller- Taşınabilir uygulamalarda kullanılan taşınabilir sızdırmaz ikincil hücreler ve bu hücrelerden yapılan piller için güvenlik kuralları (IEC 62133:2012)”

Sıralanan bu standartlar açısından geliştirilen bataryalar kontrol edilmiş, kullanılan BYS ve kutu tasarımı ile standartlarda sıralanan gereksinimlerin karşılandığı görülmüştür. Kısa devre koruması dahil standartlarda anılan elektriksel deneyler gerçekleştirilmiştir. Mekanik ve kutu tasarımını ilgilendiren testler, çalışmanın dışında değerlendirilmiştir.

İlk bataryada kullanılan BYS **Görsel 4.10** ile gösterilmiştir. BYS üzerinde hücre gerilimlerinin 4.1 V üzerine çıktığında, gerilimi yüksek olan hücreleri eş gerilime indirmek için dengeleme yönetimi, şarj için izin verilen en yüksek (16.8 V) seviyenin geçilmesi halinde, şarj yönünü, deşarj sırasında da izin verilen en az (10.8 V) batarya voltajının altına inildiğinde çıkış yönünü kesen katı hal MOSFET anahtar yapısı ve batarya sıcaklığının 60 °C ulaşması durumunda sistemi iki yönde kapatan bir güvenlik tertibatı bulunmaktadır.

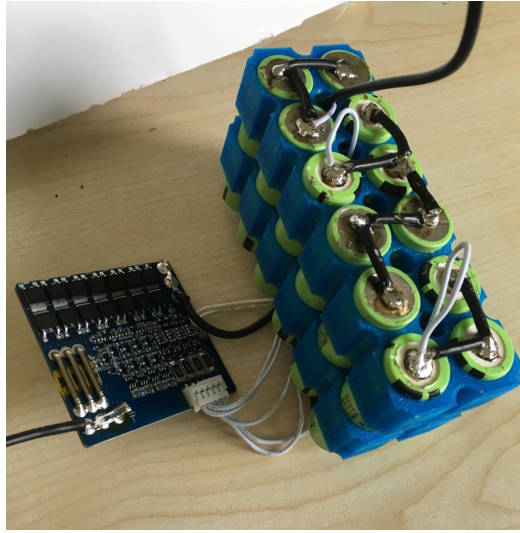


Görsel 4.10. Batarya Yönetim Sistemi (12V, 4S)

Bataryanın entegrasyonu sırasında ayrıca kullanım sırasında çekilecek akım değerine göre (tez kapsamındaki testler için en fazla 10 A) sigorta kullanılmıştır. BYS voltaj değerlerini üzerindeki hazır voltaj referans devreleri ile ölçerek açma/kapama ve

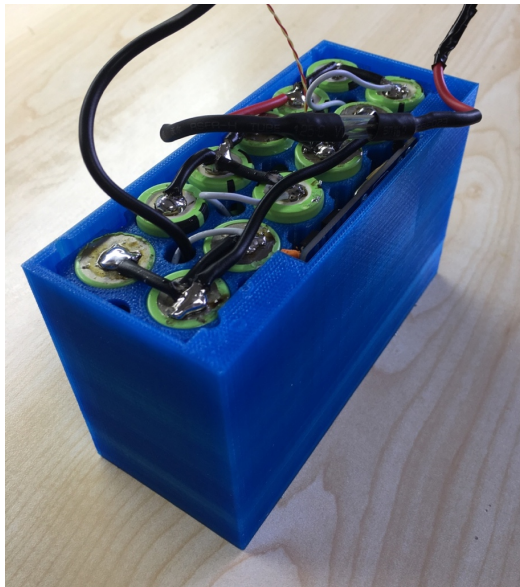
dengeleme yaptığı için analog tip olarak anılmaktadır. Tez kapsamındaki testlerde kullanımı görece daha karmaşık olan ve birkaç bileşenden oluşan sayısal sistemler tercih edilmemiştir. Ancak yüksek enerji seviyelerinde ve hassas kullanıma yönelik bataryalarda sayısal sistemlerin kullanımı daha uygun olduğu değerlendirilmiştir.

Bataryada kullanılan BYS dışarda oluşacak kısa devre durumlarında devre kesecek yeteneğe sahiptir. Bu özellik standart gereği olup, deneysel olarak BYS'nin kısa devreyi engellediği test edilmiştir.



Görsel 4.11. 4S, 3P olarak geliştirilen batarya paketi

Tez kapsamında geliştirilen algoritmanın bu tür analog sistemlere dahil edilebilmesi için iki ayrı sıcaklık değerinde aç/kapa sinyali üretebilen termik anahtar kullanımı öngörülmüştür.

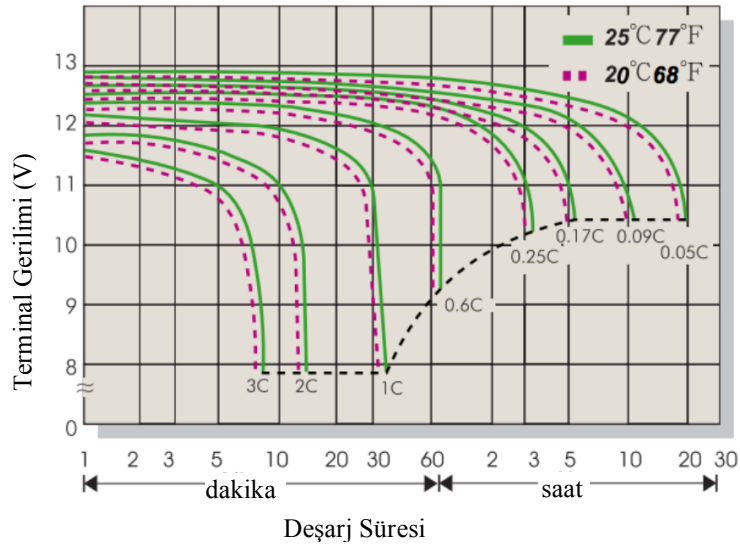


Görsel 4.12. Geliştirilen batarya paketinin entegre edilmiş görünümü

Kullanılan BYS, gerek ağırlık gerek işlev açısından optimum olduğu değerlendirilmiştir. BYS'nin yürürlükteki TSE standartlarında yer alan gereksinimler ile uyumlu olduğu görülerek kullanımına karar verilmiştir. Bataryaya ilave fazla ağırlık getirmemesi, mekanik kontaktör gerektirmemesi gibi özellikleri de avantajları arasında görülmüştür.

Batarya tasarımında sırası ile tek paralel (3.2 Ah), iki paralel (6.4 Ah) ve üç paralel (9.6 Ah) kapasitede deneme yapılabilmesi için üç ayrı konfigürasyonda üretilmiştir. Peukert etkisinden dolayı, seçilen kapasite, kurşun asit bataryalarda iki katı kapasiteye denk gelmektedir.

Cessna 172 uçağında kullanılan kurşun-asit elektrokimyasına sahip bataryalardan örnek olarak seçilmiş bir 12V, 20 Ah kapasiteli bataryadan, çekilecek sabit 20 A akımı batarya ancak yarım saat süresince verebilmektedir (**Şekil 4.6**). Bu da bataryadan çekilebilecek kapasiteyi 10Ah ile sınırlandırmaktadır. Alternatif olarak lityum tabanlı olarak geliştirilen batarya, sabit 10A altında 1 saat ve 20A altında yarım saat çalışabilmektedir.



Şekil 4.6. Örnek kurşun asit batarya akıma göre deşarj süresi grafiği
Kaynak: [170]

Bataryada kullanılan LCO elektrokimyasına sahip hücrelerin tek başına teorik özgül enerjisi üreticisi tarafından 237.52 Wh/kg olarak verilmiştir. Testler öncesi batarya konfigürasyonlarının üretici verilerine dayanılarak hesaplanan özgül enerjileri **Çizelge 4.4** ile verilmiştir.

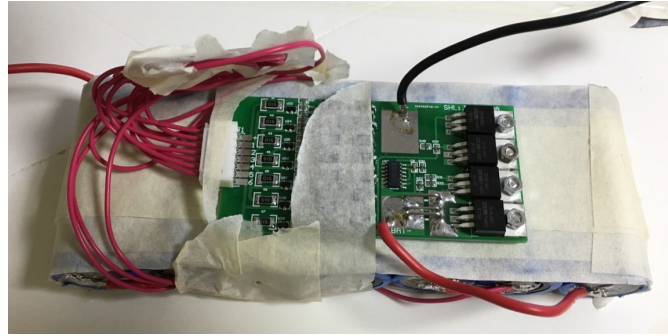
Her üç batarya konfigürasyonu da aynı voltaj seviyesine kadar şarj edilmiş, daha sonra 1A sabit akımla deşarj edilmiştir. Testler sırasında batarya yüzey sıcaklığı ve gerilim değerleri ölçülmüştür.

Çizelge 4.4. Batarya konfigürasyonlarının teorik özgül enerji değerleri

Konfigürasyon	Ağırlık (gr)	Özgül Enerji (Wh/kg)
4S, 1P	229	201.22
4S, 2P	423	217.87
4S, 3P	617	224.05

Geliştirilen ilk batarya konfigürasyonu 4 seri hücreden ve bir BYS kartı ile mekanik tutucu ve bağlantılardan oluşmaktadır. Bu batarya için hesaplanan ve **Çizelge 4.4** ile verilmiş değerlere göre batarya 229 gr ağırlığında, 201.22 Wh/kg teorik özgül enerji değerinde olmuştur. Bataryanın beklenen teorik enerji kapasitesi 46.08 Wh değerindedir. Bu batarya ile yapılan testler ve test sonuçları izleyen grafiklerde verilmiştir.

Her üç bataryanın testi sırasında gözlenen, 16 V ile 15V arasında gerçekleşen voltaj kayması, o bölgede BYS'nin şarj koruma devresini açmasından kaynaklanmaktadır. Anılan devre, yüke doğru BYS'nin iç direncini düşürdüğünden, voltaj düşüşü azalmakta ve çıkış gerilimi MOSFET'lerin açılmasından sonra yükselmektedir.



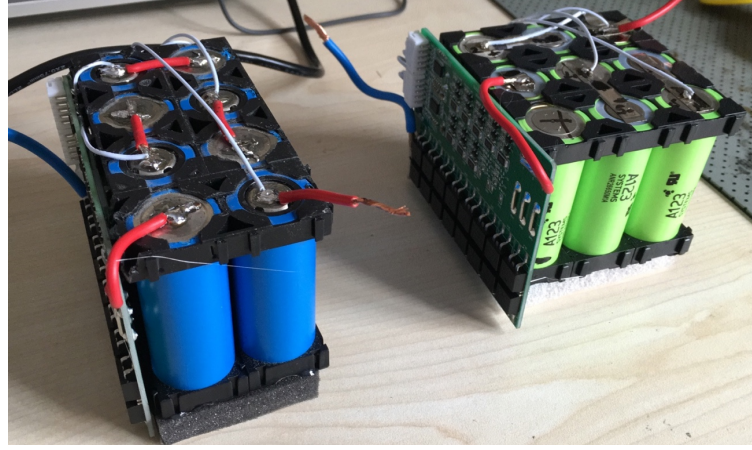
Görsel 4.13. Geliştirilen 24V batarya

Geliştirilen ikinci 7 seri hücre yapısına sahip 24V batarya **Görsel 4.13** ile gösterilmiştir. Bu batarya şarj deşarj sırasındaki verim hesaplamada kullanılmıştır. Batarya üzerinde 24V 20A kapasiteli analog devreli bir BYS kullanılmıştır. Bataryada üretici tarafından 4500 mAh kapasiteli 26650 ebadında hücreler kullanılmıştır. Kullanılan hücre **Görsel 4.14** ile gösterilmiştir. Bu bataryada 7 seri hücre gerilim ve kontrolüne uygun bir BYS kullanılmıştır.



Görsel 4.14. 24 V bataryada kullanılan 26650 NMC hücre

Diğer iki batarya için, LFP elektrokimyaya sahip 26650 ebadında hücreler kullanılmıştır. Bu hücrelerin nominal gerilimleri 3.2 V olup, 24V tamamlamak için 8 hücrenin seri bağlanması gerekmektedir. Bu bataryalar **Görsel 4.15** ile gösterilmiştir.



Görsel 4.15. 24V LFP bataryalar

Bu bataryalarda 8 seri hücre bağlanmasına ve LFP hücre terminal gerilimine uygun BYS kullanılmıştır. LFP hücre gerilim davranışı diğer tip hücrelerden farklı olduğundan güvenlik kontrolü ve ölçümler LFP elektrokimyasına uygun olarak seçilmiştir.

4.7. Yöntem

Tez kapsamında etkin bir ısı yönetim geliştirilebilmesi için, öncelikle bataryaların kullanımları sırasındaki ısı davranışlarının belirlenmiştir. Hücre ve bataryaların ısı özelliklerinin incelenmesi, geliştirilen modelin doğrulanabilmesi ve bataryanın işlevsel değerlendirilmesinin yapılabilmesi amacı ile deney düzeneği kullanılmıştır.

Isı özelliklerin belirlenmesi amacı ile farklı üreticilere ait farklı elektrokimyasal yapılara sahip hücreler ve bu hücrelerden oluşturulmuş bataryalar deneylere tabi tutulmuştur. Deneyler sırasında hücre ve bataryalar farklı akım seviyelerinde şarj ve deşarj yapılmış, bu sırada yüzey sıcaklığı kayıt altına alınmıştır. Yüzey sıcaklığı ölçümü

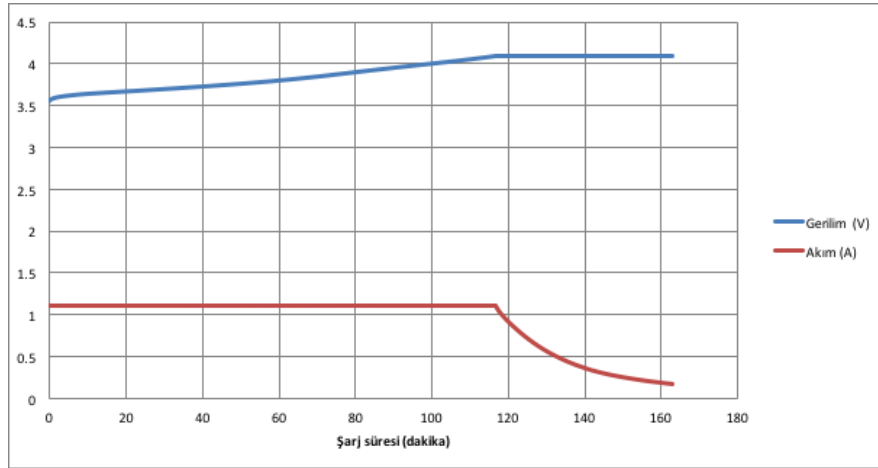
hücre yüzeyine sabitlenmiş K-tipi ısıl çift ile yapılmıştır. Kullanılan deney düzeneği bağlantı şematiği **Şekil 4.3** ile ve deney düzeneğinin fotoğrafı **Görsel 4.5** ile verilmiştir.

Bataryaların şarjı öncelikle sabit akım ve üst gerilim seviyesine ulaşıldıktan sonra sabit gerilim altında gerçekleştirilmiştir. Bu sayede batarya iç dirençleri nedeni ile kullanılamayan kapasite kalmaması sağlanmıştır.

4.7.1. Şarj yöntemi

Hücreler, farklı şarj akım yükleri altında farklı kapasite yetkinliği gösterirler. Bu özellik Peukert kanunu ile açıklanmıştır. Tez kapsamında, bataryaların yüksek akım değerleri ile şarjı sonrası, tam DoD oranında tam SoC seviyesine ulaşması için önce sabit akım seviyesinde şarj yapılmıştır. Bataryanın bu akım değerinde şarj kabul etme sınırına ulaşıldığında batarya henüz tam SoC seviyesine ulaşmamış olduğundan, SoC %100 olana kadar sabit gerilim altında, akım sıfıra düşene kadar şarja devam edilmiştir.

Anılan şarj metodu sabit akım-sabit gerilim (SA-SG, CC-CV) olarak anılmaktadır [67]. Tez kapsamında uygulanan şarj metoduna ilişkin akım ve gerilimin şarj süresince değişimi **Şekil 4.7** ile verilmiştir. Grafikteki uygulamada batarya 4.1 V seviyesine kadar sabit 1/3 C (bu hücre için 1.1A) akımla şarj edilmiş, bu seviyeden sonra gerilim sabit 4.1V olarak tutulmuş ve akım sıfır olana kadar düşürülmüştür. Bu yöntem ile hücrenin tam kapasite dolması sağlanmıştır.



Şekil 4.7. Sabit akım- sabit gerilim şarj metodu ile şarj

Deney sonuçlarında da gözlemlendiği gibi, sabit akım- sabit gerilim metodunda, sabit gerilim kısmında akımın sıfıra inmesini beklemek yerine 0.5A civarında kesilmesi yeterlidir. Bu değer, üreticinin önerisi ile örtüşmektedir. 0.5A seviyesinden sonra, grafikte de görüldüğü gibi akım seviyesi daha yavaş düşmeye, eksene paralel olarak hareket etmeye başlamaktadır. Bu noktadan itibaren verilen enerji bataryanın kendi deşarj

oranına ve şarj sırasında oluşan kayıplara harcanmakta olup, bataryada depolanmamaktadır.

4.7.2. Ölçüm yöntemleri

Deneyler 6 farklı üreticinin 8 farklı hücresi ile yürütülmüştür. Bu hücrelerden 18650 boyutunda olan 4 tanesi temel olarak ele alınmış ve yeni kurulan deney düzeneği ile bu hücreler ve bu hücrelerden oluşan bataryalar ile deneyler yürütülmüştür. Bu hücreler ve üreticileri tarafından verilmiş özellikleri **Çizelge 4.5** ile verilmiştir.

Çizelge 4.5. Deneylerde kullanılan 18650 hücreler ve özellikleri

Marka	Nominal Gerilim (V)	Anma Akımı (A)	Kapasite (mAh)	Ağırlık (gr)
Üretici A	3.6	3.2	3200	48.5
Üretici B	3.5	2.7	2900	45
Üretici D	3.7	2.5	2600	49
Üretici E	3.7	2.8	3000	51

Deneyler sırasında ölçümler için şarj/deşarj döngüsünü de yapan Keithley 2400 Sourcemeter cihazı ile gerilim ve akım değerleri, Keithley 2110 Multimeter cihazı ile de sıcaklık ve gerilim ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca Arduinio hızlı prototipleme devresi üzerinde test ortam sıcaklığının izlendiği ayrı bir düzenek hazırlanmış ve ortam sıcaklığı takip edilmiştir. Deneyler sırasında ortam klima sistemi ile sabit sıcaklıkta tutulmuştur.

Deneylerde incelenen hücre ve bataryaların üzerine K-tipi ısıl çift yapıştırılarak sıcaklık ölçümleri tek noktadan yapılmıştır. Ölçüm yapılacak nokta, hücre boyunun orta noktası olarak seçilmiştir. ısıl çift ve hücre üzerindeki uygulaması **Görsel 4.16** ile gösterilmiştir.



Görsel 4.16. Hücre ve hücre üzerine sabitlenmiş K-tipi ısıl çift

Bataryanın ısıl değişiminin gözlemlenebilmesi için ısıl çiftten başka bir de ısıl kamera kullanılmıştır. ısıl kamera ile deney süresince düzenli çekimler yapılmıştır. ısıl

kameranın saati ile bilgisayar saati eş hale getirilmiş ve deney sırasında kayıt alınan sıcaklık değişimi ile kamera görüntülerinin eşlenebilmesi sağlanmıştır.

4.7.3. Hesaplanan değerler

Ölçülen değerler zaman bilgisi ile birlikte kayıt edilmiştir. Elde edilen bu kayıtlar üzerinden, bataryadan çekilen veya bataryaya verilen enerji, iç direnç gibi değerler hesaplanmıştır.

Enerji değeri (E), iki ölçüm aralığında (t_1 ve t_2) geçen süre için V_1 gerilim değeri ve V_2 gerilim değerlerinin ortalaması, o aralıktaki akım ($I(t)$) ile çarpılarak hesaplanmıştır. Hesaplama kullanılan yöntem Denklem (4.1) ile verilmiştir.

$$E = \int_{t_1}^{t_2} \left[V_1 + \left(\frac{V_2 - V_1}{2} \right) \right] I(t) dt \quad (4.1)$$

Değerler, verilerin kayıt edildiği tablolama yazılımı üzerinde denklem girilerek hesaplanmış ve grafikleri elde edilmiştir.

Diğer bir denklem ise ölçülen ve saat- dakika-saniye şekilde kaydedilmiş olan zaman bilgisinin dakikaya çevrilmesi için kullanılmıştır. Bu işlem için tablolama yazılımının iç işlevlerinden yararlanılmıştır. Zaman bilgisi, aynı anda alınan ısı kamera görüntüleri ile ölçüm değerlerinin kıyaslanabilmesi için anılan uzun biçimde kayıt edilmiştir.

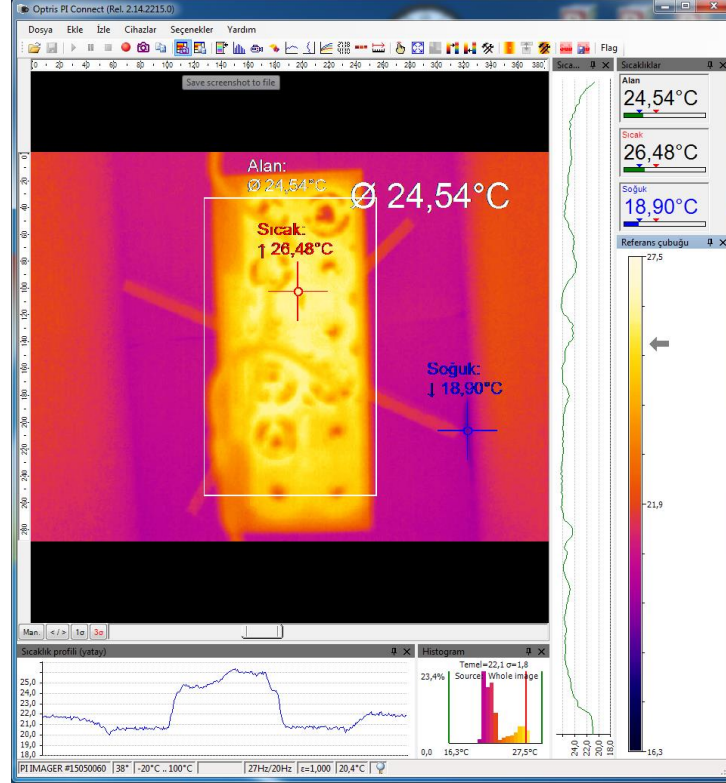
4.7.4. Sıcaklık değişimlerinin gözlenmesi

Batarya deneyleri sırasında, sıcaklıklar Keithley 2110 Multimetre ile K-tipi ısı çift kullanılarak alınmıştır. Aynı zamanda batarya deneylerinde ısı kamera ile sıcaklık dağılımlarının izlenmesi sağlanmıştır.

Görsel 4.17 ile izleme sırasında alınmış bir ekran görüntüsü verilmiştir. Bu görüntüde, 12V, 10Ah kapasiteli bataryanın şarjı sırasındaki sıcaklık değişimleri izlenmesi sırasında alınan arayüz yer almaktadır.

Sıcaklık değişimleri hücrelerin yüzeyinden yapılmıştır. Tez kapsamındaki tüm sıcaklık verileri yüzey sıcaklığıdır. Bataryalarda icra edilen dengesizlik deneylerinde ve BYS işlevlerinin izlenmesinde ısı kamera kullanılmıştır. Isı kamera üreticisi tarafından sağlanan analiz yazılımı ile de görüntü üzerinden sıcaklık ölçüm ve dağılım değerleri okunmuştur.

Deneyler sırasında değişimlerin görsel olarak izlenmesi amacı ile ısıl kameralar kullanılmıştır. Isıl kameraların kullanımı ile çok sayıda hücrenin ve batarya üzerinde seçilen bir bölgenin en düşük, en yüksek ve ortalama sıcaklıkları izlenebilmiştir. Analiz yazılımı ile ölçülen sıcaklıkların kayıt edilmesi mümkün olmuştur.



Görsel 4.17. Şarj sırasında bataryanın ısıl kamera ile izlenmesi

4.7.5. Ölçüm hassasiyeti

Testler sırasında kullanılan teçhizat kaynaklı ölçüm sapmaları için test teçhizatı üreticilerinin tanımladığı veriler **Çizelge 4.6** ile verilmiştir.

Çizelge 4.6. Deney teçhizatının hassasiyet ve sapmaları

Ölçüm unsuru	Ölçüm seviyesi	Değer
Gerilim (ölçüm)	20 V	100 μ V
Gerilim (kaynak)	20 V	0.08 V/ μ s
Akım	1 A	10 μ A
Sıcaklık	-200 – 1350 °C	0.1 °C
Sıcaklık (ısıl kamera)	0 – 100 °C	1 °C

4.7.6. Ölçüm Hassasiyetinin Sonuçlar Üzerindeki Etkisi

Deneyler sırasında uygulanan akım ve gerilim değerleri dikkate alındığında, deney setinden kaynaklanan ölçüm hatalarının 1/100.000 mertebesinde kalacağı görülmektedir. Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan sistemin düşük hassasiyeti (0.1 °C) ise bataryaların sıcaklık değerleri üzerinden yapılan hesaplamalarda 1/10 oranında sapma görülebileceğini ifade etmektedir.

Bataryaların şarjı ve deşarjı sırasında, şarjın veya deşarjın kesilmesi için sınır değere ulaşıldığında sistem otomatik kesim yapmaktadır. Bu kesime kadar olan değerler enerji miktarının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Şarj ve deşarjın sonlarına doğru gerilimdeki ani yükselişler, cihazların ölçüm sıklıkları ve hassasiyetleri göz önüne alındığında işlemin geç veya erken kesilmesi, dolayısıyla enerji miktarında sapmalara neden olması beklenebilir. Şarj/deşarj sonlarında ani yükselmelere karşılık, bataryanın bu bölgede enerji vermediği ve almadığı gözlemlerle bilinmektedir. Diğer yandan ölçüm cihazları saniyede 5 ölçüm alacak özelliğe sahiptir. Bu nedenle işlemin kesilmesinde ortaya çıkabilecek en yüksek hata akım, gerilim ve ölçüm sıklığının (saat cinsinden) çarpımından $1/((100.000)^2 \cdot 100 \cdot (60)^2)$ Wh olacaktır. Bu çarpımın değeri 2.77×10^{-16} Wh olup, ihmal edilebilir seviyededir.

Üreticiler tarafından bataryaların işletme sıcaklık aralıkları deşarj sırasında -20 ila 65 °C ve şarj sırasında 0 – 45°C olarak verilmiştir. İşletme sıcaklık aralığı ile kıyaslandığında, hesaplama hatalarının, ısı yönetim uygulamaları için kabul edilebilir olduğu görülmektedir.

Gerçek hayattaki uygulamalarda, algoritmada $q_{\min}$ ve $q_{\max}$ olarak tanımlanmış üst ve alt sıcaklık limitlerine göre güvenli mesafenin tanımlanmasında, BYS sıcaklık ölçüm algılayıcılarının hassasiyetinin girdi olarak kullanılması gerekmektedir.

Isıl kamera ölçümlerinde karşılaşılan 1 °C sapma, kamera ölçümlerinin sadece sıcaklık değişimini ve bölgesel farklılıkları izlemek için kullanılmasından dolayı, sonuçlar üzerinde doğrudan etkisi olmadığı değerlendirilmiştir.

5. ANALİZ

Ulaşım araçlarının taşıdığı enerji, sınırlı ve maliyetli olmasından dolayı etkin olarak kullanılmak zorundadır. Hava araçlarında maliyetin yanı sıra ağırlık da önemli bir kriter olarak girdiğinden hem bataryanın hem de bataryayı emniyetli şekilde çalıştırmak için gerekli ısıl yönetim sisteminin ağırlığının olabildiğince düşük olması zorunludur. Bu nedenle bataryanın performans parametrelerinin belirlenmesi ve ısıl yönetim ihtiyacının, uçul emniyetini düşürmeden, olabildiğince azaltılmasının önemi açıktır. Bu ihtiyacın azaltılmasının yöntemlerinden biri de daha akıllı ısıl yönetim geliştirilmesidir. Gelişen elektronik devre imkanları ile batarya yönetim sistemlerinde bataryanın ne oranda ısınabileceği ve/veya soğutulabileceği belirlenebilmekte, batarya ısıl yönetimi belirlenen oranlarda çalıştırılarak etkinliği artırılabilir. Bu etkinliğin artırılması, batarya ısınmasına yönelik mekanizmaların belirlenmesi ve bu veriler ışığında sayısal modellerin geliştirilmesine bağlıdır.

Bu bölümde bataryaların enerji kapasitesi ve kapasiteye bağlı olarak batarya termodinamiğine ilişkin analizler yer almaktadır. Bu analizlerde bataryanın denge denklemleri incelenmiş, denge denklemlerine dayalı olarak ısıl model geliştirilmiştir. Bataryaların sistem olarak şarjı sırasında harcanan enerji ile deşarj ile bataryadan çekilen enerji miktarları karşılaştırılarak elde edilen bütünsel batarya verim ifadesi tanımlanmıştır.

5.1. Elektrokimyasal Isı Üretimi

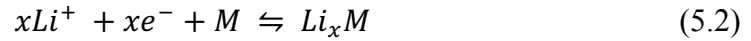
Lityum-iyon, anot ve katodunda lityum bileşiği kullanılan ve lityum elektronlarının bu anot ve katot arasında gidip geldiği ikincil, şarj edilebilir hücrelere verilen genel bir isimdir [67, 143]. Bataryalar aynı zamanda, elektrotlarında kullanılan materyale göre de isimlendirilirler.

Bataryalarda kullanılan temel kimyasal reaksiyon oksitlenme-indirgenme reaksiyonudur. Reaksiyonlar, bataryanın iki farklı yerinde iki yarım reaksiyon olarak gerçekleşir. İyonlar anotta (bir diğer isimle negatif elektrotta) oksitlenirler. Oksitlenme, molekülün bir veya daha fazla elektronunu kaybettiği kimyasal reaksiyondur. Negatif elektrotta oluşan tipik bir reaksiyon Denklem (3.1) ile verilmiştir.



Şarj sırasında pozitif elektrottan çıkıp, elektrolit ve ayraç (seperatör) içinden geçen lityum iyonları negatif elektrotta indirgenir. Denklem (5.1) ile verilmiş olan reaksiyon şarj sırasında sağdan sola,deşarj sırasında soldan sağa olacak şekilde tekrarlanabilir.

Pozitif elektrotta ise şarj sırasında aktif malzeme oksitlenir ve lityum materyali serbest kalır. Denklem (5.2) ile tipik bir pozitif elektrot reaksiyonu verilmiştir. Burada M metal oksit veya fosfat bileşiğini temsil etmektedir. Denklem (5.2) reaksiyonu da şarj sırasında sağdan sola vedeşarj sırasında soldan sağa olmak üzere tekrarlanabilir niteliğe sahiptir.



Denklem (5.1) ve (5.2) reaksiyonlarından elde edilebilecek teorik hücre gerilimi 4.2V civarındadır [68]. Bu değer Ni-MH ve Kurşun asit hücrelerin çok üstündedir.

Isı üretimi elektrokimyasal özelliklere bağlı olarak endotermik veya ekzotermik olabilir. Anılan bu ısı üretimine ilişkin genel denge denklemi [156] ifade edilmiştir:

$$\dot{q} = -E - R + M + P \quad (5.3)$$

Bu formülde, E , hücre üzerinden geçen akımdan kaynaklı elektrik gücünü ifade etmekte olup, şu şekilde verilmiştir:

$$E = IV \quad (5.4)$$

Denklemden yer alan R , hücrede gerçekleşen (i) reaksiyonun entropik veya tersinir ısı katkısını ifade etmekte olup, şu şekilde ifade edilmektedir:

$$R = \sum_i I_i T^2 \frac{d \frac{V_{i,avg}}{T}}{dT} \quad (5.5)$$

Denklemden M , hücre boyunca gerçekleşen düzensiz reaksiyonlar tarafından üretilen ısıyı ifade etmekte olup, karıştırma ısısı olarak anılmaktadır ve şu şekilde ifade bulur:

$$M = \sum_j \frac{d}{dt} \int \sum_i c_{i,j} RT^2 \frac{\partial}{\partial t} \ln \left(\frac{\gamma_{i,j}}{\gamma_{i,j}^{avg}} \right) dv_j \quad (5.6)$$

Denklemden P , hücre malzemelerinin faz değişimlerinden kaynaklanan ısı üretimini ifade etmektedir:

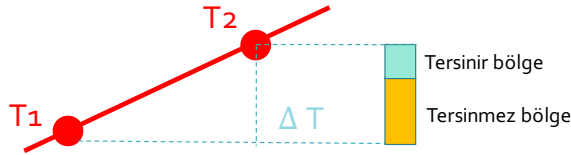
$$P = \sum_{i,j \neq m} \sum_i \left[\left(\Delta H_{i,j \rightarrow m}^0 - RT^2 \frac{d}{dt} \ln \frac{\gamma_{i,j}}{\gamma_{i,j}^{avg}} \right) \frac{dn_{i,j}}{dt} \right] \quad (5.7)$$

Görüleceği gibi, genel denge denklemi, işlenmesi zaman alacak bir yapıdadır. Diğer yandan anılan değerlerin süreklilik arz eden bir süreçte anlık okunacak değerlere bağlı olduğu göz önüne de alındığında, bataryaların ısı analizi için, özellikle araç üstü uygulamalarda gerçek zamanlı işlenerek, tahmin verisi üretmekte kullanılması mümkün görünmemektedir.

Tez çalışmasında, araç üstü gerçek zamanlı uygulamalarda da yüksek yakınlık ile kullanılabilecek bir model için, anılan (5.3) denklemini literatürde yer alan önermeler doğrultusunda sadeleştirilmesi yapılması gerekmektedir. Aynı zamanda, araç üstü uygulamalarda yer alacak tahmin algoritmasının, batarya elektrokimyasından bağımsız olması da istenecek bir özellik olacaktır. Bu amaçla, (5.3) denklemi, aşağıdaki hale sadeleşmiş olacaktır:

$$\dot{Q} = I(V_{oc} - V_{ac}) - I \left[T \left(\frac{dV_{oc}}{dT} \right) \right] \quad (5.8)$$

Bu denklemde, tersinmez $I(V_{oc} - V_{ac})$ Joule (Ohmic) ısınma ile kaybı ve $I[T(dV_{oc}/dT)]$ ifadesi de elektrokimyasal reaksiyonlarca oluşan tersinir iç enerji değişimi sonucu üretilen veya tüketilen ısıyı ifade etmektedir.



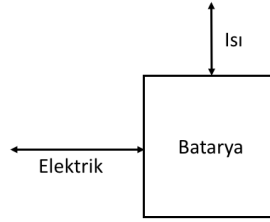
Şekil 5.1. Batarya sıcaklık artışının bileşenleri

Şekil 5.1 ile Denklem (5.8) bileşenlerinin sıcaklık değişimine katkıları sembolik olarak gösterilmiştir. Literatürde (5.8) denkleminin ikinci kısmına yönelik yapılan analizlerde, tersinir ısı üretimi değerinin tersinmez enerji kaybına oranla ihmal edilebilir küçüklükte olduğu görülmüştür [119, 140]. Denklemin bir adım daha sadeleştirilmesi sonucunda, ifade sadece Ohmic ısıtma etkisine dayalı hale gelecektir. Bu etki, temel olarak, hücre içinden akan akımın, hücre iç direnci üzerinde ürettiği ısı olarak da ifade edilebilir.

Görüldüğü üzere, elde edilen denklem ile üretilen ısının bazı ifadeleri ekzotermik ve bazı ifadeleri hem endotermik hem de ekzotermik karakter barındırmaktadır. Çalışmalarda, bu özellikler deneysel olarak da görülmüştür.

5.2. Batarya Termodinamiği

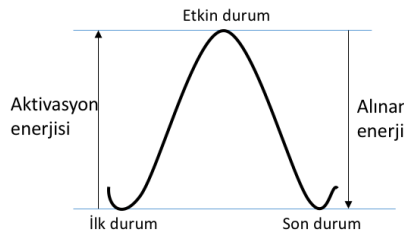
Bataryanın çevresi ile temel olarak iki farklı türde enerji alışverişi mevcuttur. Bunlardan ilki şarj veya deşarj anında alınan veya verilen elektrik enerjisidir. Bu enerji alışverişi neticesinde bataryada elektrokimyasal reaksiyonlar oluşur ve iç enerji değişimi yaşanır. Bu reaksiyonlar sonucu batarya çevresi ile ısı alışverişi gerçekleştirir. Bu alışveriş endotermik veya ekzotermik olabilir. Bataryanın çevresi ile yaptığı enerji alışverişi **Şekil 5.2** ile şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Termodinamik sistem olarak batarya

Kimyasal reaksiyonlarda tersinmez ısı üretimi, reaksiyon oranına bağlıdır. Genel tanımı itibari ile tersinmez ısı veya entropi üretimi tersinmez süreçlerin işleyişine karşı direnç olarak ortaya çıkar.

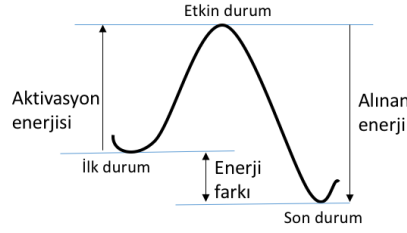
Örnek olarak $AB \rightarrow A + B$ gibi bir kimyasal reaksiyonda, reaksiyonun başlayabilmesi için reaksiyona giren moleküller bir eşik enerjisini aşmak zorundadır. Bu eşik enerjisi aktivasyon enerjisi olarak adlandırılır. Bu enerji reaksiyonun ilk durumundan son durumuna ulaşana kadar süreçte yer alır. Eğer süreç tersinir ise ilk ve son durumda enerji seviyeleri eşittir (**Şekil 5.3**). Moleküllerin aktif duruma geçmek için aldıkları enerji, son duruma düşerken verdikleri enerjiye eşittir ve reaksiyon sonunda enerji farkı açığa çıkmaz.



Şekil 5.3. Tersinir reaksiyonlarda enerji seviyeleri

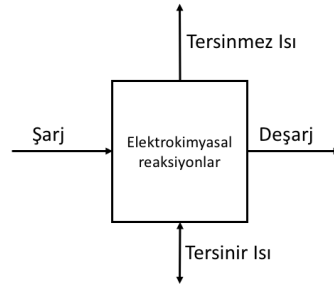
Tersinmez reaksiyonlarda, reaksiyon ilk durumu ile son durumu arasında enerji seviyesi farkı oluşur. Reaksiyon boyunca durumların enerji seviyesi arasındaki fark kadar

enerji açığa çıkar. Bu enerji ısı şeklinde ortama verilir ve entropi üretimi oluşur (**Şekil 5.4**).



Şekil 5.4. Tersinmez reaksiyonlarda enerji seviyeleri

Batarya hücrelerinde ısı üretiminin iki ana kaynağı vardır. Bunlar Denklem (5.8) ile ifade edildiği gibi, Joule ısıtması (veya Ohmic ısıtma) ve elektrokimyasal reaksiyonlardan dolayı iç enerji değişimlerinden kaynaklanan ısıdır [117, 139]. İç enerji değişimi, kristal fazı dönüşümlerinden, elektrolitin yoğunluk farklılıklarından kaynaklanan karışım ısısı ve reaksiyonlardan kaynaklanan ısıdır. Elektrotların direnç etkisinden kaynaklanan ısı tersinmez olarak kaybedilir. Buna ilave olarak aktivasyon ve konsantrasyon kayıpları da mevcuttur [156]. Son iki kayıp oransal olarak direnç kayıplarının yanında görece ihmal edilebilir seviyededir.

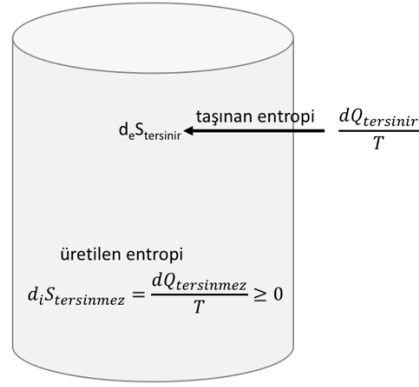


Şekil 5.5. Bataryanın enerji etkileşimi

Denklem (5.8) ile verilen ısı türlerinin batarya çevresi ile etkileşimi **Şekil 5.5** ile şematik olarak gösterilmiştir. Diğer yandan şarj enerjisi elektrokimyasal reaksiyonlar yolu ile iç enerjide artışa neden olurken, deşarj ile iç enerji elektrik enerjisi olarak dışarı aktarılır. Isı alışverişi bataryanın dış yüzeyinden iletim ve konveksiyon yolu ile gerçekleşir.

Bataryanın enerji üretimi ve alışverişleri **Şekil 5.6** ile gösterildiği gibi, tersinir ($Q_{tersinir}$) ve tersinmez ($Q_{tersinmez}$) olarak iki ayrı ısı enerjisi ifadesinden toplam entropi değişimi (dS) ifade edilmek istenirse [174]:

$$dS = \frac{dQ_{tersinir}}{T} + \frac{dQ_{tersinmez}}{T} \quad (5.10)$$



Şekil 5.6. Bataryanın entropi değişim kaynakları

Kaynak: [174]'den uyarlanmıştır.

İfadesine ulaşılır. Entropinin üretimi ifadesi için:

$$dS_{tersinmez} = \frac{dQ_{tersinmez}}{T} > 0 \text{ ve } dS_{tersinir} = \frac{dQ_{tersinir}}{T} \quad (5.11)$$

Entropi değişimi ifadeleri Denklem (5.10) içinde yerleştirilirse:

$$dS = d_e S_{tersinir} + d_i S_{tersinmez} \quad (5.12)$$

Tersinmez reaksiyonda yerine konmayan ısıнын oranı, entropi üretim oranı ile mutlak sıcaklığın çarpımına eşit olup, bu da reaksiyonu süren R kuvveti ile birim zamanda gerçekleşen reaksiyon oranı v ($v = d\xi/dt$) ile çarpımına eşittir [174]:

$$\frac{dQ_{tersinmez}}{dt} = T \frac{dS_{tersinmez}}{dt} = R v \geq 0 \quad (5.13)$$

Bu ifadede $v = k R$ gibi lineer bir ilişki durumunda:

$$\frac{dQ_{tersinmez}}{dt} = k R^2 \geq 0 \quad (5.14)$$

İfadesi elde edilir. Burada $1/k$ reaksiyon direnci olarak yer almaktadır. Bu denklem ile tersinmez ısı üretiminin, reaksiyonu süren R kuvvetinin karesi ile orantılı olduğu görülür. Bu aynı zamanda reaksiyonun ilk ve son durumları arasındaki enerji seviye farklarına eşittir.

Enerjisinin korunumu $dQ_{tersinir} = dU + p dV$ ve entropi üretimi $dQ_{tersinir} = T dS - T dS_{tersinmez}$ denklemlerini kullanarak:

$$dU + pdV = TdS - TdS_{tersinmez} \quad (5.15)$$

Eşitliği yazılabilir. Buradan da:

$$dU = TdS - pdV - TdS_{tersinmez} \quad (5.16)$$

Elde edilir. Sabit entropi (S) ve sabit hacimde (V) oluşan bir tersinmez reaksiyonun sistem iç enerjisinin azalmasına yol açacağı sonucuna ulaşılır [174]:

$$-dU = TdS_{tersinmez} > 0 \Rightarrow -(U_{son} - U_{ilk}) > 0 \quad (5.17)$$

Burada ($U_{son}-U_{ilk}$) tersinmez reaksiyonun ilk durumu ile son durumu arasındaki iç enerji değişimini ifade etmektedir. Benzer şekilde, sabit entropi (S) ve sabit basınç (p) altında entalpinin, reaksiyon sürecinde azaldığı da görülür:

$$TdS_{tersinmez} = -dH > 0 \Rightarrow -(H_{son} - H_{ilk}) > 0 \quad (5.18)$$

Bu ifade, tersinmez bir reaksiyon, sabit entropi (S) ve sabit basınç (p) altında gerçekleşiyorsa, ilk durumun entalpi (H_{ilk}) seviyesinden son durumun entalpi (H_{son}) seviyesine kadar düşüş olacağını göstermektedir. Denklem (5.17) ve (5.18), tersinmez reaksiyonun sabit entropi (S) altında gerçekleşmesi durumunda iç enerji ve entalpinin termodinamik açıdan önemli potansiyeller olduğu söylenebilir. Ancak **Şekil 5.6** ile de gösterildiği gibi entropi hem tersinir hem de transfer edilen bileşenlerden oluştuğu için sabit entropi ifadesi pratikte gerçekleşemez [174]. Bu yüzden serbest entalpi G (Gibbs enerjisi) ifadesi kullanılabilir.

İdeal şartlarda sabit sıcaklık ve basınç altında, hücre reaksiyonları ile geri dönüşebilir enerji halinde, entalpi değişimi ΔH ve entropi değişimi ΔS ile Gibbs serbest enerjisi (ΔG) ve T (K) sıcaklık arasındaki ilişki şu denklemle verilmiştir:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (5.19)$$

Entalpi, reaksiyonlardan elde edilebilecek teorik enerji miktarı olup, $T\Delta S$ üretilen ısı veya kaybedilen enerjidir. İdeal sistemde ΔG , Gibbs serbest enerjisi tamamen elektrik halinde işe çevrilebilir ve elektromotor güç (M) olarak şu şekilde ifade edilir [69]:

$$\Delta G = -xFM \quad (5.20)$$

Burada x, elektrokimyasal reaksiyonlara giren mol sayısını, F ise mol başına elektron yükünü gösteren Faraday sabitini ifade etmektedir. Termodinamik ilişkisinden entropi değişimi (ΔS) şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta S = \frac{\partial \Delta G}{\partial T} \quad (5.21)$$

Tersinir elektrokimyasal reaksiyonlar için ΔG , batarya dengede iken açık devre gerilimi (OCV) U (V) değerinin ölçülmesi ile elde edilir:

$$\Delta G = -xFU \quad (5.22)$$

Bu denklem yardımı ile entropi değişimi şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta S = xF \frac{\partial U}{\partial T} \quad (5.23)$$

Açık devre gerilimi (OCV) aynı zamanda reaksiyondaki diğer türlerin yoğunluğuna da bağlı olup şu şekilde ifade edilebilir:

$$U = U^\theta + \Delta U(c, T) \quad (5.24)$$

Burada U^θ açık devre geriliminin belli sıcaklık ve yoğunlukta sabit kısmını ifade etmekte ve ΔU sıcaklık (T) ve yoğunluk değişim (c) etkilerini hesaba dahil etmektedir.

Önceki bölümlerde, Denklem (5.1) ve (5.2) ile verilmiş kimyasal reaksiyonlarda x olarak ifade edilen elektrotta ortaya çıkarılan mol cinsinden elektron sayısı olup, bataryada üretilen tersinir ısı miktarı Q (J) veya Peltier etkisi, x 'e bağlı olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$Q_{tersinir} = T\Delta S = FxT \frac{\partial U}{\partial T} \quad (5.25)$$

Buradan da izotermal bir hücre için ısı üretimi oranı:

$$\dot{Q} = I \left(V - U + T \frac{\partial U}{\partial T} \right) \quad (5.26)$$

Burada ifade edilen Peltier etkisi tersinirdir ($Q_{tersinir}$). Yani şarj ve deşarj sırasında ısınma gibi soğumaya da sebep olabilir. Hücrelerde yüksek Ohmic (direnç) kayıpları, özellikle yüksek akım oranlarında hücrenin şarj ve deşarj sırasında ısı üretmesine neden olur. Denklem (5.26) ile ulaşılan sonuç, Denklem (5.8) ile paraleldir.

5.3. Isı Transfer Analizi

Batarya termodinamik bir sistem olarak ele alınırsa, Şekil 5.2 ile gösterildiği gibi çevresi ile etkileşimi şarj ve deşarj sırasında aldığı elektrik enerjisi ve ortama verdiği veya ortamdan aldığı ısı enerjisi şeklindedir.

Batarya şarj sırasında elektrik enerjisi alır ve deşarj sırasında bu enerjiyi verir. Bataryanın çevresi ile ısı alışverişi şarj veya deşarj döngüsü sırasında, elektrokimyasal reaksiyonlarda oluşan tersinir (Q_{tersinir}) ve direnç üzerinde oluşan tersinmez ısı ($Q_{\text{tersinmez}}$) farkı kadar olup ortama veya ortamdan bataryaya doğru olabilir. Buna göre batarya sisteminin ortam ile enerji alışverişi etkileşimi Şekil 5.5 ile şematik olarak sunulmuştur. Elektrokimyasal reaksiyonlarda üretilen ısı, endotermik veya ekzotermik olabilmekte ve çevreden bataryaya veya bataryadan çevreye yönde gerçekleşebilmektedir.

Isı değiştiricilerde, iletim ve konveksiyon yolu ile sıcak ve soğuk ortam arasındaki ısı değişimi izleyen denklem [173] ile ifade edilir:

$$q = C_t A \Delta T_m \quad (5.27)$$

Bu denklemde q (W) ısı transfer oranını, C_t (W/(mK)) ısı transfer katsayısını, A (m^2) ısı geçişinin gerçekleştiği yüzey alanını, ΔT_m (K) ise ortalama sıcaklık farkını göstermektedir. Bu denklemde ısı değiştirici ile atmosfer arasındaki ısı geçişi ihmal edilmiştir.

Bataryanın tüm bileşenlerinin homojen olduğu ve hücreler arası ısı geçişinin çok hızlı olduğu, batarya içinde tüm noktaların aynı T_{batarya} sıcaklığında olduğu varsayılırsa, batarya sıcaklığının zamana göre değişimi [173]:

$$\frac{dT_{\text{batarya}}}{dt} = \frac{\dot{Q}_{\text{üretilen}} - \dot{Q}_{\text{atılan}}}{m_{\text{batarya}} C_{p,\text{batarya}}} \quad (5.28)$$

Denklemde $\dot{Q}_{\text{üretilen}}$ ve $\dot{Q}_{\text{atılan}}$ sırası ile bataryada üretilen ve bataryadan uzaklaştırılan ısı oranlarını göstermektedir. Bataryadaki üretilen ısının kaynağı, elektrokimyasal reaksiyonlarda ve direnç üzerinde üretilen ısıdır. Bataryadan uzaklaştırılan ısı ise, ısı yönetiminde kullanılan akışkan veya ortam tarafından bataryadan uzaklaştırılan ısıyı ifade etmektedir. Batarya ısı yönetim tarafından soğutuluyorsa bu terim artı işaretlidir. Denklemde m_{batarya} bataryanın kütlesini ve $C_{p,\text{batarya}}$ ise bataryanın özgül ısı kapasitesini ifade etmektedir.

Diğer yandan, batarya bir akışkan ile soğutuluyor ise, şu denklem vasıtası ile bataryadan çekilen ısı oranı bulunabilir:

$$\dot{Q}_{\text{atılan}} = C_t A (\bar{T}_{\text{akışkan}} - T_{\text{batarya}}) \quad (5.29)$$

Bu denklemde $\bar{T}_{akışkan}$ soğutma akışkanının giriş ve çıkış sıcaklıkları ortalamasını ve $T_{batarya}$ bataryanın sıcaklığını işaret etmektedir.

5.4. Isıl Yönetimde Analiz Gereksinimi

Bir önceki bölümde sıralanan gereksinimler doğrultusunda, havacılıkta kullanılacak batarya ısıl yönetiminin, hava aracının görevi ve gereksinimleri paralelinde tasarlanması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Her hava aracı tipi ve her görev çeşidi için aynı batarya ısıl yönetimi aynı sonucu vermeyebilecektir.

Isıl yönetim, bataryanın sıcaklık durumunu ölçerek izlemenin yanı sıra, kullanımından kaynaklı olarak ısınma eğilimini de hesaplamak zorundadır. Bataryalardan güç, akım olarak çekilmektedir. Denklem (5.26)'dan da görüldüğü gibi, batarya, kendisinden çekilen akımın karesi ile doğru orantılı olarak ısınma eğilimindedir. Yani bataryadan ne kadar yüksek güç çekilmek istenirse, batarya o kadar hızlı ısınacaktır. Büyük batarya grupları için bu değer önceden tepki verilmesi gereken seviyelere çıkabilmektedir. Bu amaçla, ısıl yönetim sistemlerinde gerçek zamanlı sıcaklık eğilim tahmini için sıcaklık tahmin modelleri kullanılmaktadır.

Ani sıcaklık yükselmeleri ısıl yönetim sisteminde ani yüklere dolayısı ile verim düşüşüne ve tehlikeli durumlara neden olabilir. Ani ısıl yüklere neden olmamak için, batarya kullanımını izlenmesi ve ısı üretiminin gerçekleştiği anda ısıl yönetimi devreye alarak, sıcaklığın batarya yüzeyine ulaşmadan artışın karşılanması, ısıl yönetim sisteminin üzerindeki yükleri azaltarak hem kapasite hem de verim yönünden iyileştirme sağlayabilecektir.

Bu tez kapsamında da seçilmiş bir batarya için, gerçek zamanlı, düşük kapasiteli mikro işlemcide çalışmaya uygun, yüksek hassasiyetli tahmin modeli geliştirilmesi ve geliştirilen modelin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Modelin hızlı ve düşük işlem gücü gerektirmesi gerek maliyet gerek enerji tüketimi ve gerekse de güvenilirlik faktörleri açısından önem arz etmektedir. Bu yüzden modelin geliştirilmesi sırasında olabildiğince matematik işlemlerin sadeleştirilmesi ve yüksek yaklaşık bir sonuç elde edilmesi, temel yaklaşım olarak belirlenmiştir.

5.5. Batarya Sıcaklığı Analizi ve Belirlenmesi

Bataryadan elde edilen deneysel çalışmalar ve Denklem (5.3) denge denklemi doğrultusunda, ısınma eğilimi gösteren bataryalar için bir analiz geliştirilmiştir. Analizin geliştirilmesinde aşağıdaki temel varsayımlar ele alınmıştır;

- Batarya noktasal ısı kaynağı olarak düşünülmüştür
- Tersinir enerji değişimleri ihmal edilmiştir
- Denklem (5.3) ile verilen karışım ve faz değişimlerinden kaynaklanan ısı etkiler ihmal edilmiştir
- Hücre farklı katman ve bileşenlerden oluşmaktadır. Analizde, bu bileşenlerin ısı özellikleri aynı ve homojen tek madde olarak ele alınmıştır.
- Analiz, bataryadan çekilen akım ve batarya voltajı girdilerine göre hesaplamaya dayanmaktadır
- Batarya yüzey sıcaklığı, modele girdi olarak alınmaktadır
- Analiz, açık devre gerilimi ve yük altındaki gerilim farkının hesaplanabileceği bir altyapı kullanıldığını varsaymaktadır.

Modelde kullanılacak olan iç direnç ($R_{iç}$) şu formülle hesaplanmıştır:

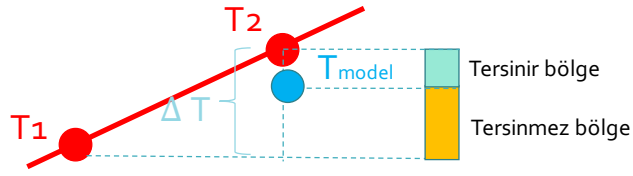
$$R_{iç} = (V_{oc} - V_{ac})/I_d \quad (5.30)$$

Yukarıda verilen varsayımlar ışığında, Denklem (5.30), Denklem (5.8) ve (5.17) içinde kullanılır ve sadeleştirmeler yapılırsa, Denklem (5.31) batarya yüzey sıcaklığını (T_{model}) kestirmek için elde edilir:

$$T_{model} = a \cdot R_{iç} \cdot I^2 \cdot \Delta t + T_{yüzey} \quad (5.31)$$

Bu denklemde bir önceki ölçümden bu yana geçen zaman (Δt) ve bataryadan ölçüm anında çekilen akımın (I) karesi, hesaplanmış olan iç direnç ($R_{iç}$) ve model düzeltme katsayısı (a) ile çarpılarak, o ölçüm dönemindeki sıcaklık artışı hesaplanmıştır. Ön kabul olarak, a 1 °C/Wh olarak kabul edilmiştir. Ölçüm anındaki batarya yüzey sıcaklığı $T_{yüzey}$ ile ifade edilmiştir.

Elde edilen bu sonuç, Denklem (5.14) ile verilen ve reaksiyonu süren enerjinin karesi ile bağlantılı tersinmez ısı üretimi ile paraleldir.



Şekil 5.7. Batarya sıcaklığı analizi

Analiz, Şekil 5.1 ile de şematik olarak gösterilmiş sıcaklık değişiminin sürekli pozitif değer alan tersinmez ısı kaynağını dikkate almaktadır. Batarya SoC bölgesinin uç noktalarında çalıştırılmayacak ise, model çalışmasını kolaylaştırmak ve ölçüm noktasını azaltmak için, batarya iç direnci ortalama bir değer olarak da ele alınabilir. Diğer yandan model her seferinde bir önceki ölçümdeki yüzey sıcaklığını hesaba kattığı için birikimli hataya neden olmamaktadır.

5.6. Batarya Enerji Kapasitesi Analizi

Bataryalar, kullanım görevlerine göre enerji ve güç yoğunlukları açısından değerlendirilirler. İç güç ve ekserji içeriklerine göre boyutlandırılırlar [146]. Bir batarya tamamen tükenmeden önce geçecek zaman; $t_{tükenme} = E_{ext}/P_{ext}$ olarak hesaplanır. Burada E_{ext} bataryanın P_{ext} güç seviyesinde verebileceği en fazla ekserji miktarıdır [169]. Bu değer, uçak tasarımında bataryanın enerji kapasitesi parametresini olarak kullanılır.

Uçak için gerekli toplam enerji, tüm uçuş fazları için gerekli enerji miktarlarının toplamına güvenlik yedek enerjisinin eklenmesi ile bulunur ve aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$E_{bat} = E_{kalkış} + E_{seyir} + E_{iniş} + E_{yedek} \quad (5.32)$$

Tek bir hücrenin enerjisi, $E_{hücre} = V_{hücre} \times K_{hücre}$, denklemi ile bulunur. Burada $V_{hücre}$ bataryada kullanılacak hücrenin gerilimi ve $K_{hücre}$ ise hücrenin Ah cinsinden kapasitesini ifade etmektedir.

Batarya tasarımı için hücreler paralel ve seri olarak bağlanacak hücrelerin hesaplanması gereklidir. Bu amaçla, uçak üstündeki güç elektroniği devrelerini besleyecek gerekli voltaj bilinmelidir. Eğer gerekli voltaja $V_{besleme}$, seri hücrelerin sayısı (N_{seri}) şu şekilde hesaplanır, $N_{seri} = \lceil V_{besleme} / V_{hücre} \rceil$.

Bataryada kullanılacak paralel hücre sayısını bulmak, seri hücre sayısını hesaplamaktan biraz daha karmaşıktır. Sürekli ve maksimum güç değerleri uygulama için farklı iki parametre olduğundan ve bu değerler, toplam enerji miktarının hesabı ile

birlikte, paralel kullanılacak hücre sayısını hesaplamakta kullanılacağından, bu üç parametreye göre de ayrı ayrı hesap yapıp, en yüksek olan değer kullanılması gerekmektedir.

Yeni nesil lityum-iyon hücrelerde sürekli besleme güç değerleri 2C ve anlık akım değerleri 15C civarlarına çıkabilmektedir. Eski nesillerde bu maksimum anlık akım değerleri 2C ile 5C ve sürekli besleme değerleri 0,1 ile 1C arasındadır.

Uçak tarafından ihtiyaç duyulacak anlık en yüksek güç gereksinimi (P_{maks}) bataryanın anlık en yüksek akım değeri ($C_{maks,batt}$) tarafından sağlanabilmelidir. Bu amaçla kullanılacak hücre sayısı $N_{maks,paralel} = \text{tavan}(C_{maks,bat}/C_{maks,hücre})$ denklemi ile hesaplanır.

Benzer olarak uçuş fazları sırasında ihtiyaç duyulacak sürekli güç değeri ($P_{sür}$) değerini karşılayacak paralel hücre sayısı için $N_{sür,paralel} = \text{tavan}(C_{sür,bat}/C_{sür,hücre})$ hesaplanır. Bu parametrenin hesaplanmasında, hücrenin ısı özelliğinin çekilen akıma bağlı olduğu bilindiğinden, hücrelerin görev boyunca düşük C seviyelerinde çalıştırılmasına özen gösterilmelidir. Bu parametrenin boyutlandırılması ile bataryaların ısı yönetiminin getireceği ağırlık arasında bir denge gözetilmelidir.

Enerji açısından hesaplanacak üçüncü parametre, seri bağlı hücrelerin sağladığı gerilim ile paralel bağlı hücrelerin sağladığı akım üzerinden yapılır ve

$$N_{kapasite,paralel} = \text{tavan}((E_{bat}/V_{bat})/E_{hücre}/V_{hücre})) \quad (5.33)$$

denklemi ile hesaplanır.

Tasarımda kullanılacak paralel hücre sayısı, bu üç parametreden en büyük olanın seçilmesi yolu ile yapılır:

$$N_{paralel} = \text{maks}(N_{maks,paralel}, N_{sür,paralel}, N_{kapasite,paralel}) \quad (5.34)$$

$$N_{toplamlam} = N_{seri} \cdot N_{paralel} \quad (5.35)$$

Bataryanın toplam enerjisi bu halde şu denklem ile hesaplanabilir:

$$E_{bat} = N_{seri} \cdot V_{hücre} \cdot N_{paralel} \cdot K_{hücre} \quad (5.36)$$

Diğer yönden Denklem (5.23) kullanılarak:

$$E_{bat} = N_{toplamlam} \cdot V_{hücre} \cdot K_{hücre} \quad (5.37)$$

Kullanılan hücrelerin birim ağırlığı kullanılarak, kullanılacak bataryanın toplam ağırlığı (W_{bat}) şu şekilde hesaplanabilir:

$$W_{bat} = N_{toplam} \cdot W_{hücre} + W_{BYS} + W_{ısıl\ yönetim} + W_{kutu} \quad (5.38)$$

Bu şekilde, bataryanın boyutlandırılması ve kullanılacak hücre sayısının hesaplanması ile, uçak tasarım parametrelerinden ağırlık, hacim ve maliyet tahmini yapılması kolaylaştırılmış olacaktır. Denklem (5.38) ile verilen bataryanın çıplak ağırlığına ayrıca %15 civarında BYS ve kutu ağırlığı ilave edildiği görülmektedir.

Batarya firmalarının teknik tanımlarına göre toplam batarya kütlelerinin 15%–20% kadarını BYS, kutu, ısıl yönetim sistemi ve kablolama oluşturmaktadır [170]. Isıtma ve soğutma sistemlerinin ilavesi ile, bataryanın enerji sığası, hücrelerinden de düşük olacaktır. Bataryaların enerji yoğunluğu, ilave ağırlıklarla birlikte azalacağından, eklenecek her işlevin veya ağırlığın tasarımı ve etkinliği daha da önem kazanmaktadır.

Örnek verecek olursak, Çizelge 2.2 içinde yer alan Pipistrel uçağının 65,400 Wh olan bataryası, Çizelge 3.1 ile verilen Li-iyon olması halinde ortalama 150 Wh/kg değerinden, BYS olmadan toplam 436 kg gelmektedir. Bunun üzerine %15 ilave BYS ve ısıl yönetim ağırlığı koyduğumuzda, toplam batarya ağırlığı, 501.4 kg olmaktadır. Yaklaşık 70 kg ilave ağırlık, bataryanın sadece dengeli ve güvenli çalışması için gerekli olmaktadır. Güvenlik, özellikle havacılık uygulamalarında vazgeçilmez bir unsur olduğundan, bu yeni ağırlığı ile uçacak bataryanın özgül enerji değeri 130.43 Wh/kg seviyesine düşmektedir.

5.7. Enerji Verimi Analizi

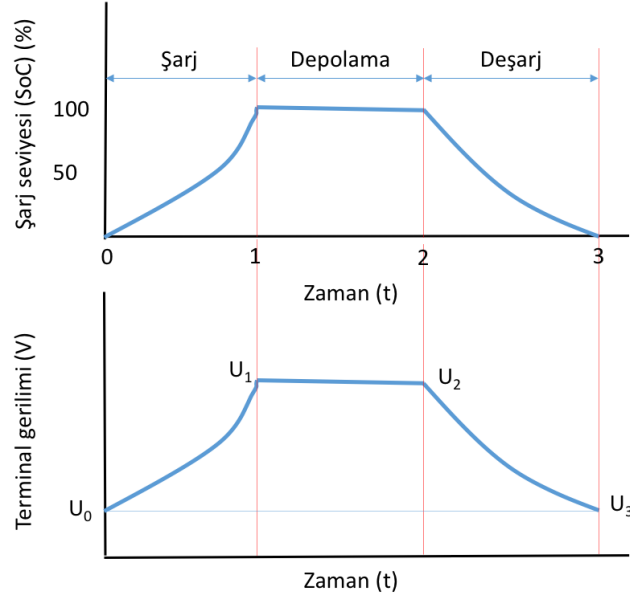
Elektrik enerjisi depolama sistemlerinden olan bataryalarda sistem olarak verim, elektrik enerjisinin depolanması yani bataryanın şarjı sırasında harcanan enerjiden ne kadarının deşarj sırasında kullanılabilir şekilde alındığı olarak tanımlanır. Bataryalarda sistem olarak enerji verimi η teriminin şarj ve deşarj enerjileri açısından ifadesi denklem (5.39) ile verilmiştir:

$$\eta = \left(\frac{E_{deşarj}}{E_{şarj}} \right) \quad (5.39)$$

Bataryaların şarj ve deşarjı sırasında kullanılan elektrik teçhizatın verimi bu hesapta göz önüne alınmamıştır. Bu denklem sadece bataryanın kontrol hacmi olarak ele alındığı durum için geçerlidir.

5.8. Ekserji Analizi

Ekserji, sistem, madde veya enerji akışının, referans ortamla denge haline gelene kadar üretebildiği en yüksek iş miktarı olarak tanımlanır [171, 172]. Ekserji enerji gibi korunum yasalarına tabi olmayıp, tüm gerçek sistemlerde, tersinmezlikten dolayı entropi artışına paralel olarak tüketilir veya yok olur.



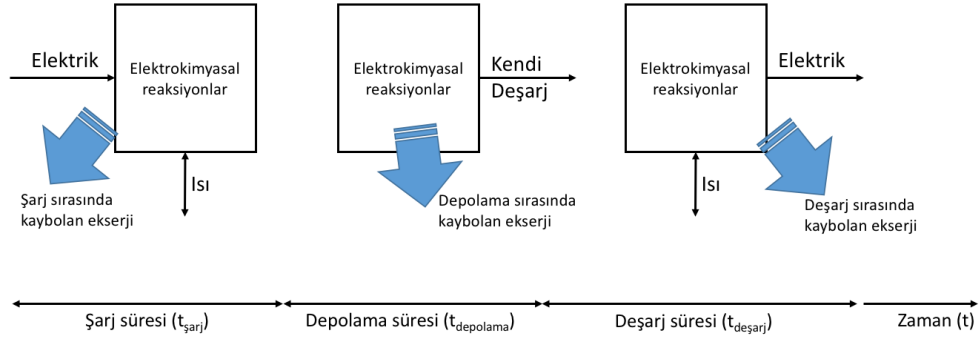
Şekil 5.8. Batarya çevrim süreçleri

Batarya, Şekil 5.2 ile de gösterildiği gibi, çevresi ile sadece ısı ve elektrik enerjisi alışverişi yapan bir kapalı sabit sistem olarak ele alınmıştır. Bataryanın elektrik enerjisi depolama süreçleri, şarj, depolama ve deşarj olarak üç ana bölüm halinde incelenebilir. Bu süreçler Şekil 5.8 ile verilmiştir.

Şekil 5.8 ile verilen grafiklerde, üstte bataryanın çevrim süreçlerinde doluluk oranı (SoC) ve alttaki grafikte ise terminal gerilimi olarak verilmiştir. Dikkat edilirse, terminal gerilimi hiçbir zaman sıfıra inmemekte ve sabit bir U^0 değerinin üzerinde değişmektedir. Bu süreçlerde bataryanın çevresi ile enerji ve ekserji alışverişi, Şekil 5.9 ile verilmiştir.

Batarya süreçlerinde toplam ekserji tüketimi, her bir süreçte tüketilen ekserjiler toplamına eşit olacaktır:

$$X_{\text{tüketilen}} = X_{\text{şarj}} + X_{\text{depolama}} + X_{\text{deşarj}} \quad (5.40)$$



Şekil 5.9. Batarya süreçleri boyunca ekserji değişimi

Şarj sürecinde, bataryaya verilen enerji ve çevreye verilen veya alınan ısı, bataryanın Denklem (5.17) ve (5.22) ile verilen iç enerjideki değişimine eşit olacaktır.

$$E_{\text{şarj}} = W_{\text{şarj}} + Q_{\text{şarj}} = -xF(U_1 - U_0) \quad (5.41)$$

Depolama aşamasında batarya kendi kendine deşarj olabilecek ve ekserji kaybedecektir. Bu süreçteki ekserji tüketimi yine termodinamiğin birince kanununa göre iç enerjideki düşüşe eşit olacaktır.

$$X_{\text{depolama}} = xF(U_2 - U_1) \quad (5.42)$$

Deşarj aşamasında bataryadan çekilen enerji, elektrik olarak çekilen güç ve ortama verilen/alınan ısı olarak ifade edilebilir. Bu da yine bataryanın deşarj başındaki ve sonundaki iç enerjilerindeki değişimin farkı olarak ifade edilirse:

$$E_{\text{deşarj}} = W_{\text{deşarj}} + Q_{\text{deşarj}} = xF(U_3 - U_2) \quad (5.43)$$

Ekserji verimi ψ , Denklem (5.35) ile gösterildiği gibi hesaplanır:

$$\psi = \left(\frac{X_{\text{çekilen}}}{X_{\text{verilen}}} \right) = 1 - \frac{X_{\text{tüketilen}}}{X_{\text{verilen}}} \quad (5.44)$$

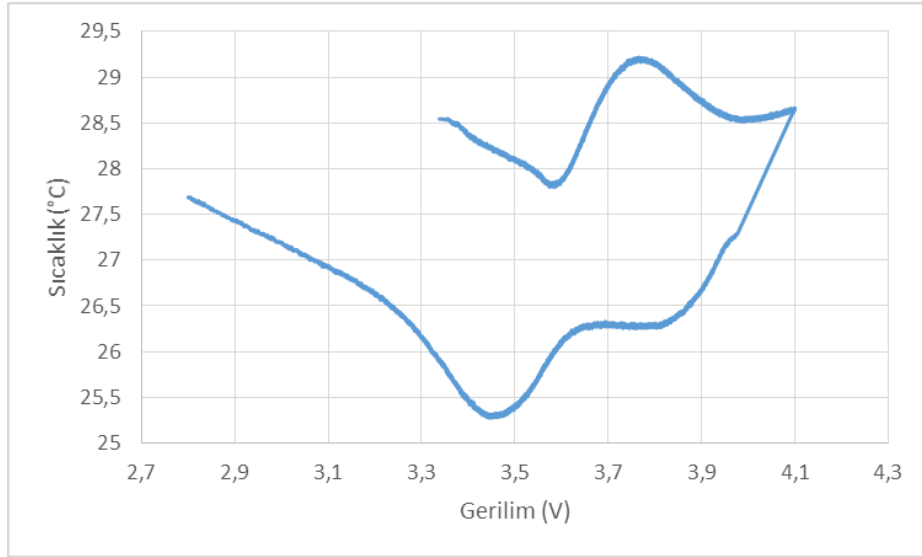
Bu ifadelerle göre bataryanın ekserji verimi, şarj sırasında bataryaya verilen enerji karşılığında bataryadan alınabilen toplam enerji olarak ifade edilirse:

$$\psi = \left(\frac{-xF(U_3 - U_2)}{xF(U_1 - U_0) + xF(U_2 - U_1)} \right) \quad (5.45)$$

Bu denklemin sadeleştirilmesi ile:

$$\psi = \frac{(U_2 - U_3)}{(U_2 - U_0)} \quad (5.46)$$

Sadeleştirilen bu ifadede görüleceği gibi, depolama sürecinin başındaki hücre gerilimi önemli değildir. Bu verim ifadesinin deneysel sonuçlar üzerinde gösterilmek istenirse, **Şekil 5.10** ile verilen şarj/deşarj grafiğinde $U_0=2.8V$, $U_2=4.1V$ ve $U_3=3.4V$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.10. Hücresinin 1A ile şarj/deşarjı boyunca sıcaklık değişimi

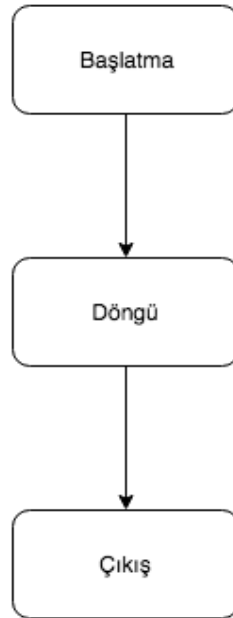
Deneysel sonuçlar ışığında yapılan hesaplama ile deneysel verileri alınan bataryanın ekserji verimi %54 olarak hesaplanmıştır. Aynı bataryanın enerji verimi %90 üzerinde hesaplanmıştır. Daha yüksek akım ile yapılan şarj vedeşarjlarda, gerilim düşüşüne bağlı olarak ekserji verimi de düşecektir.

6. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

Uçaklarda kullanılacak bataryaların, kara araçlarından farkı, havada gerçekleşecek bir kazanın, özellikle yüksek enerji barındıran bataryalardan kaynaklanması veya onları etkilemesi telafi edilmez sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle gerek güvenlik, gerek güvenilirlik ve gerekse de performans konularında, bataryanın tasarımı, üretimi ve uygulaması kritik öğeler barındırmaktadır. Bataryaların hava araçlarında yönetimi, yoğun parametre optimizasyonu gerektirmektedir. Bu bölümde optimizasyon parametrelerine yönelik bulgular ve değerlendirmeler yer almaktadır.

6.1. Batarya Isıl Yönetim Algoritması (BIYA)

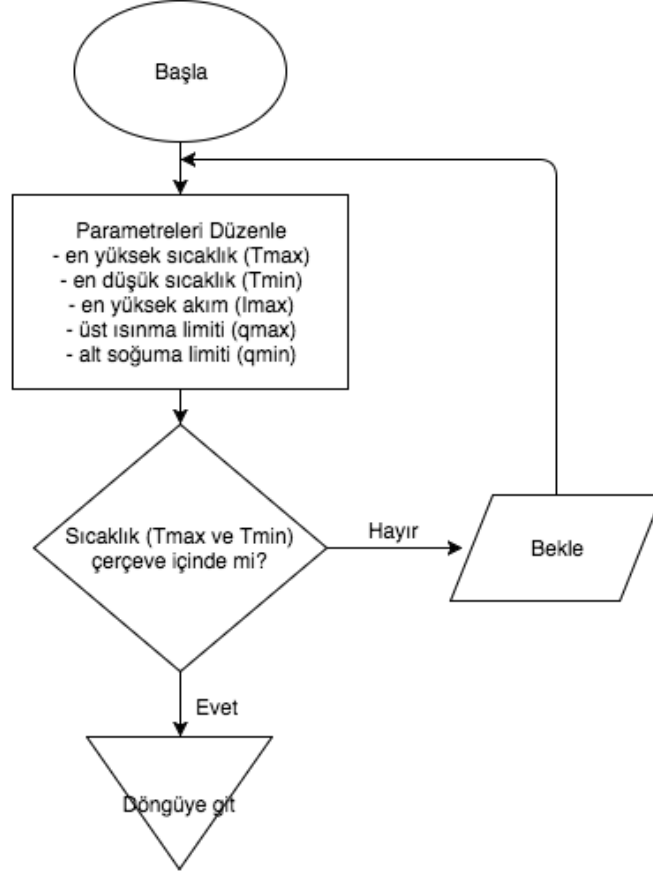
Tez kapsamında uçaklarda kullanıma uygun BYS gereksinimlerinin analizi ışığında, bataryaların ısıl yönetimi için aşağıda akış şeması sunulan BIYA elde edilmiştir. Algoritma üç ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, parametrelerin okunduğu başlatma süreci, verilerin okunup, işlem ve karşılaştırmaların gerçekleştirildiği döngü süreci ve çıkıştan oluşmaktadır. Bu genel yapı **Şekil 6.1** ile verilmiştir.



Şekil 6.1. Algoritmanın işlem basamakları

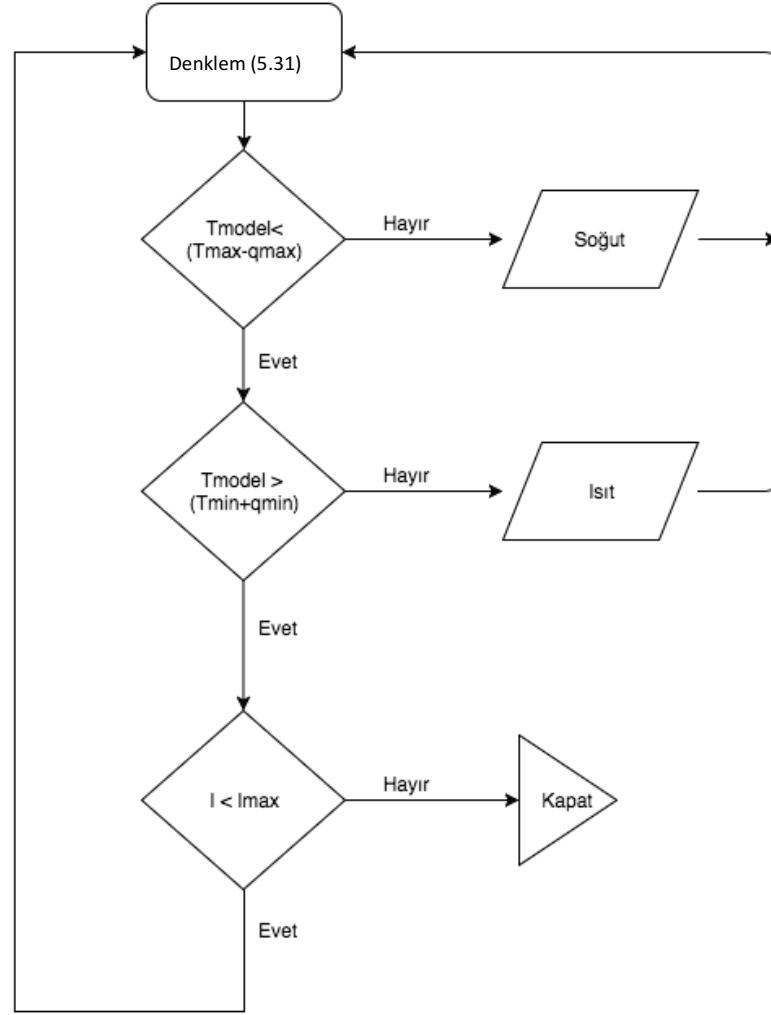
Genel yapı içinde yer alan başlatma (initialize) sürecinin detayı **Şekil 6.2** ile verilmiştir. Bu adımda, sıcaklığın en üst ve en alt izin verilen sınırları ve bu sınırdan, soğutma sisteminin ısıtma ve soğutma kapasitesine göre belirlenmiş olan q_{maks} ve q_{min} bölgeleri tanımlanmıştır.

Başlangıç (initialize) bölümü, BYS çalışmaya başladığında bataryanın izin verilen sıcaklık sınırlarının dışında olunmamasını sağlamak için kontroller içerir. Bataryanın izin verilen ötesinde sıcak veya soğuk olması halinde, batarya fonksiyonları çalıştırılmaz, batarya beklemeye alınarak izin verilen sınırlar içine dönene kadar beklenmesi sağlanır.



Şekil 6.2. Başlatma süreci algoritması

Sıcaklık için izin verilen en üst (T_{maks}) ve en alt (T_{min}) sınırların içinde kalabilmek için, TYS ısıl yeteneği doğrultusunda bir güvenli bölge tanımlanması ihtiyacı vardır. Bu bölge, bataryadan çekilebilecek en fazla I_{maks} akım değeri kullanılarak, Denklem (5.31) ile verilmiş olan analiz vasıtası ile o an içinde bulunulan gerilim seviyesi (V) için izin verilen sıcaklık sınırına yaklaşmadan ne kadar zaman önce soğutmaya ve ısıtmaya başlanılacağını belirleyen q_{maks} ve q_{min} bölgeleridir. Bu bölgelerin, batarya parametrelerine bağlı olarak belirlenmesi ile soğutma veya ısıtma sisteminin geç çalışması veya fazla çalışması gibi olasılıklar ortadan kaldırılarak, güvenli çalışma temin edilir. Bu bölge aynı zamanda TYS'nin verimi için gereklidir.



Şekil 6.3. TYS algoritması döngü süreci

BIYA'nın BSA kullanılarak, bataryanın sıcaklığının istenen aralıkta kalmasını sağlayan ve batarya çalıştığı sürece çalışan bölümü döngü bölümüdür. Döngü bölümünde yer alan işlem adımları **Şekil 6.3** ile verilmiştir. Bu döngüde, ölçülen batarya sıcaklığının, izin verilen sıcaklık sınırlarına güvenli mesafe kadar yakın olması durumunda soğutma veya ısıtma sistemini aktive eder.

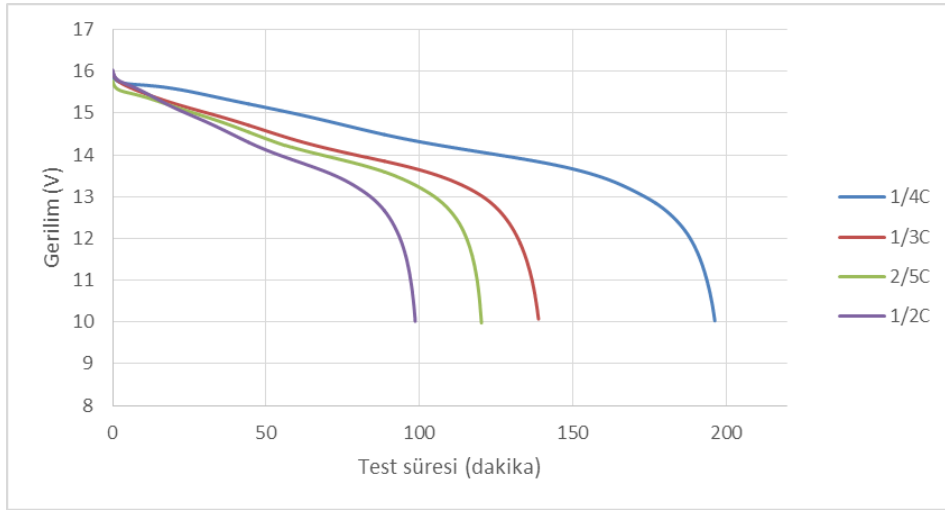
Güvenli bölgenin (q_{maks} ve q_{min}), izin verilen sıcaklık sınırına (T_{maks} ve T_{min}), olan uzaklığı, mevcut soğutma/ısıtma gücü dikkate alarak belirlenmesi durumunda, TYS'nin toplam verimi üzerinde olumlu etkisi olacaktır.

Batarya yönetim sisteminin çalışmasında, akım değerinin izlenmesi aynı zamanda Isıl Yönetim Sisteminin de görevidir. Sistem, bataryanın çalışması sırasında izin verilen en yüksek akım (I_{maks}) değerinin aşılmasına engel olacaktır. Pratik uygulamalarda, batarya üzerinde yer alan sigorta veya hücre üzerinde bulunan koruma tedbirleri zaten hücreleri bu değer civarında koruma altına almak için tasarlanmıştır. Bütün bu tedbirler

olmazsa veya çalışmazsa, akım sınırı aşıldığında, batarya sıcaklığı, akımın karesi ile orantılı artacağından ve hücre içi reaksiyonlar da sıcaklığı artırma yönünde döngüye girebileceğinden dolayı, ısı yönetim sisteminin üstesinden gelemeyeceği anlık ısı yükler oluşturacak ve batarya sıcaklığı hızla yükselerek tehlike yaratacaktır. Bu nedenle yüksek akım karşısında sistemi kapatmak, bataryanın doğal korunma refleksi olarak algoritmaya dahil edilmiştir.

6.2. Batarya Şarj/Deşarj Akım Profili

Bataryanın şarj/deşarj sırasında alınan kayıtlar ve bu kayıtlardan elde edilen grafikler **Şekil 6.4** ile verilmiştir. Geliştirilen 12V 10Ah bataryanın 1/4, 1/3, 2/5 ve 1/2 akım oranları iledeşarjları sırasında zamana göre gerilim değişimleri verilmiştir. Gerilim aralığı BYS'nin izin verdiği çalışma aralığı kadardır.

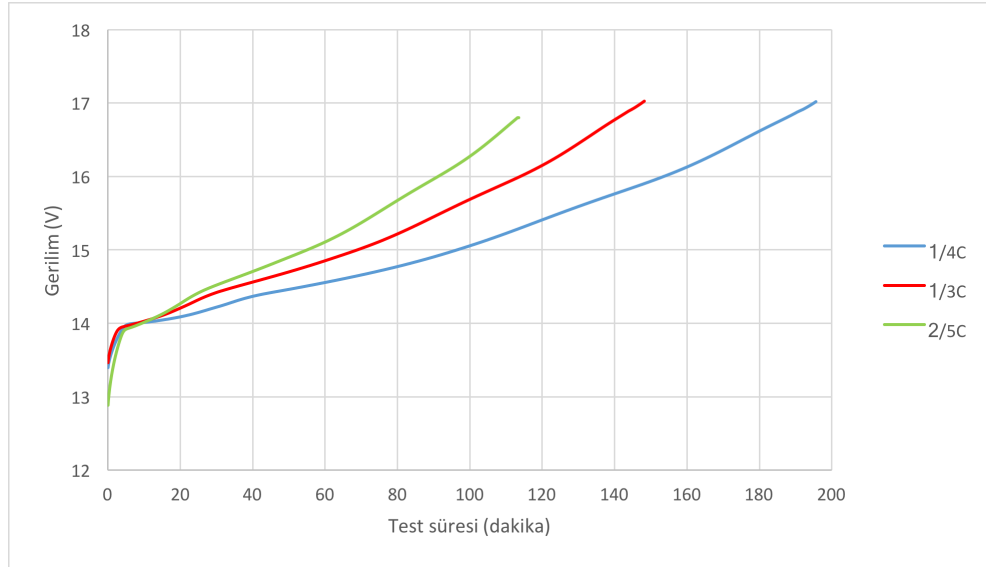


Şekil 6.4. Bataryanın farklı akım oranlarındadeşarj testleri

Deşarj deneylerinde bataryadan 1/4C altında 116.75Wh, 1/3C altında 104.41 Wh, 2/5C altında 112.99 Wh ve 1/2C altında ise 115.85 Wh enerji çekilebilmiştir. Bu değerlerdeki farklılıklardeşarj oranlarından ziyade BYS tarafından dengeleme, kesme gibi işlevler için harcanan enerjilerin farklılığından kaynaklanmaktadır.

Bataryanın farklı akım oranlarındaşarjları sırasındaki gerilim değişimleri **Şekil 6.5** ile verilmiştir. Şarj sırasında uygulanan akım oranları 1/4, 1/3 ve 2/5C olarak uygulanmıştır. Görece yüksek olan şarj akımı altında batarya terminal gerilimi daha hızlı yükselmiştir. Şarj deneyleri sırasında bataryaya 1/4C altında 123.76 Wh, 1/3C altında 120.42 Wh ve 2/5C altında ise 114.56 Wh enerji verilebilmiştir. Görüldüğü gibi şarj akımının artması ile bataryanın şarj alabildiği enerji miktarında azalma olmaktadır.

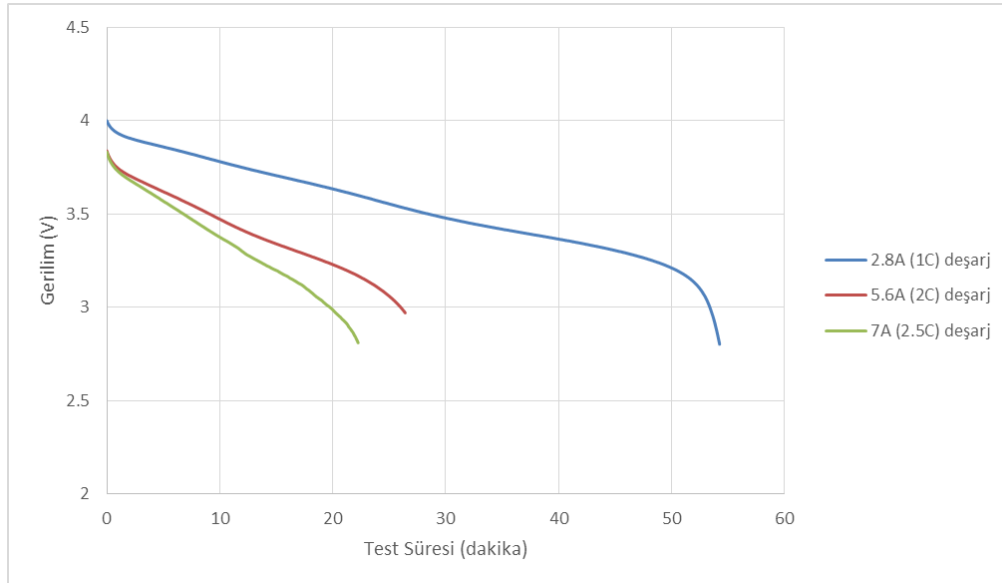
Literatürde ve endüstriyel uygulamalarda, şarj oranlarının bu testte uygulandığı gibi düşük akım oranları seviyesinde uygulandığı görülmektedir.



Şekil 6.5. Bataryanın farklı akım oranlarında şarjı

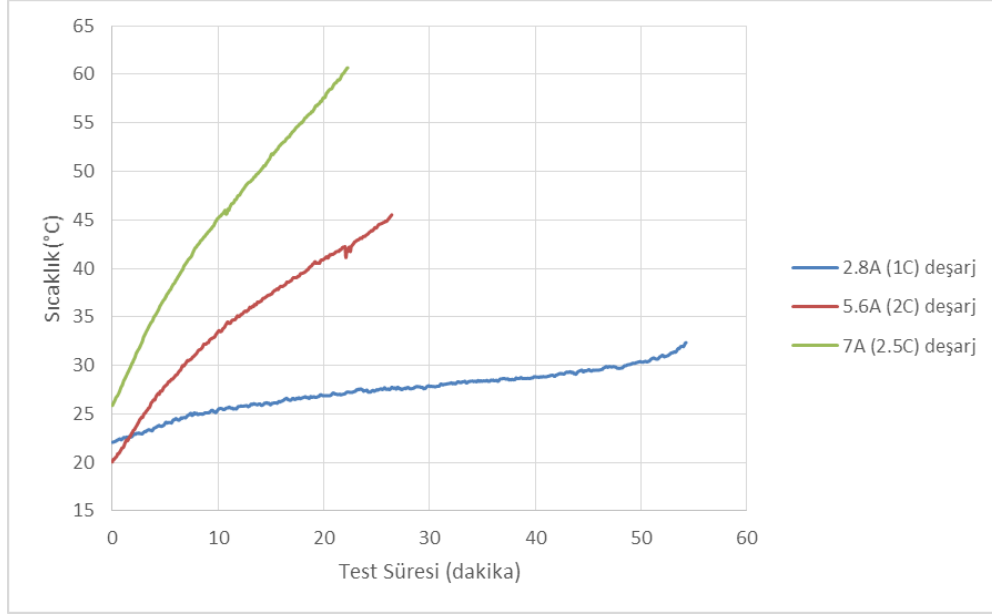
6.3. Akım Oranlarının Batarya Sıcaklığına Etkisi

Batarya ile yapılan deneylerde farklı akım oranlarında yapılan deşarjlar sırasında görülen gerilim değişiklikleri Şekil 6.6 ile gösterilmiştir.

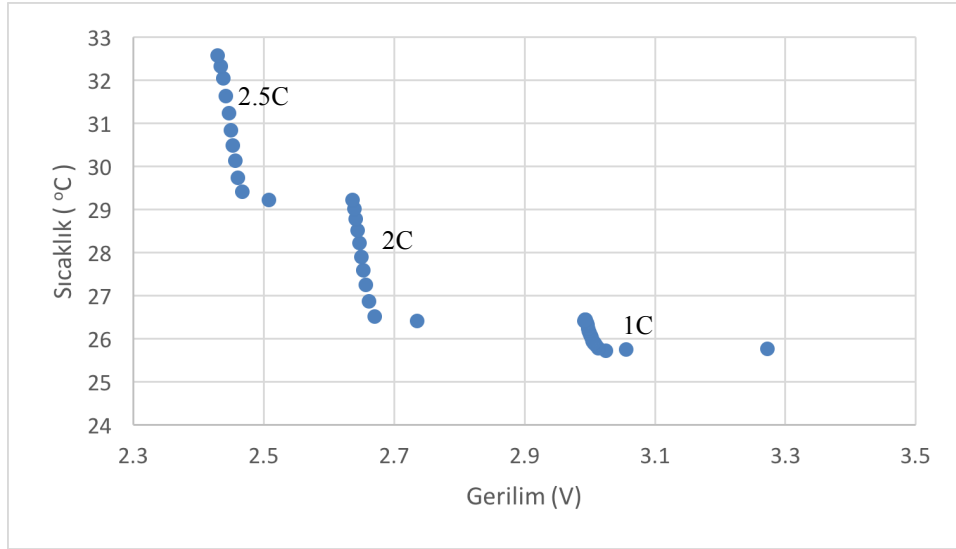


Şekil 6.6. Farklı oranlarda yapılan deşarj deney sonuçları

Yapılan deşarj deneyleri sırasında kayıt edilen batarya sıcaklıkları incelendiğinde, deşarj akımının artması ile batarya sıcaklığının artış hızının doğru orantılı olduğu görülmektedir. Bataryanın sıcaklık artışı Şekil 6.7 ile verilmiştir.



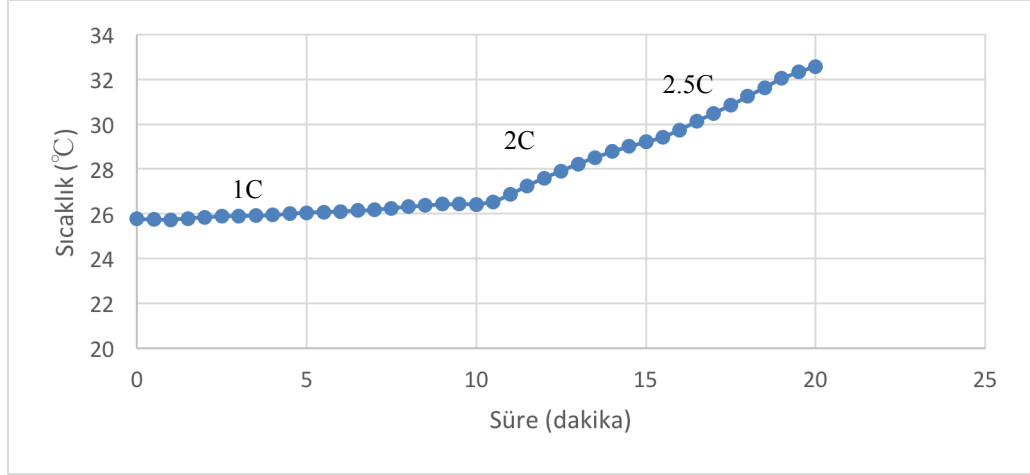
Şekil 6.7. Farklı deşarj oranlarında bataryanın sıcaklık değişimleri



Şekil 6.8. Farklı deşarj oranlarında (1C, 2C ve 2.5C) sıcaklık değişimi

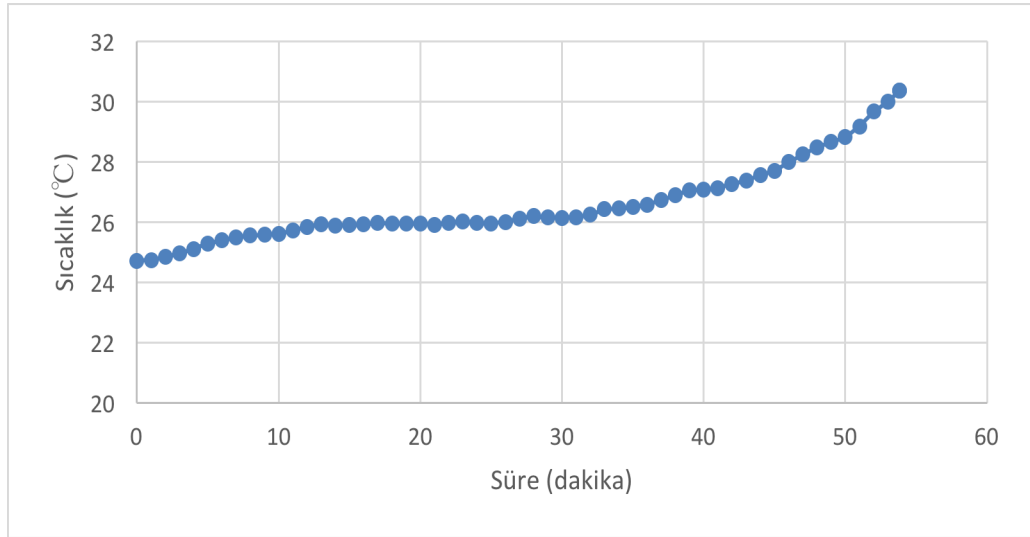
Aynı şekilde, yüksek şarj/deşarj oranlarında görece daha hızlı sıcaklık yükselişi izlenmiştir. **Şekil 6.8** ile görüleceği üzere, bataryanın 1C oranında deşarjı sırasında sıcaklık 1 derece civarında yükselirken, aynı süre için 2C uygulandığında 3 dereceye yakın ve 2.5C deşarj sırasında ise yine aynı süre içinde 4 derece civarında artış ölçülmüştür.

Test edilen hücrenin bir tam deşarjı sırasında, deşarj akımı önce 1C, sonra 2C ve daha sonra da 2.5C seviyesine çıkarılmış, gerilim düşüşü ile hücrenin ısıl tepkisi (**Şekil 6.8** ve **Şekil 6.9**) incelenmiştir.



Şekil 6.9. 1C, 2C ve 2.5C deşarj sırasında zamana göre sıcaklık değişimi

Aynı hücre tüm kapasitesi boyunca 1C ile deşarja tabi tutulmuş ve **Şekil 6.10** ile verilen sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçların birlikte incelenmesinden, yüksek deşarj seviyesinde hücre kapasitesinin Peukert etkisi ile birlikte daha erken deşarj olduğu görülmektedir. Hızlı deşarj sırasında bataryadan 10 Ah yerine sadece 6 Ah çekilebilmiştir. Bu kapasite düşme özelliğinin her bir elektrokimya için farklı olacağını da hesaba katarak, havacılık için batarya kapasitesinin belirlenmesinde, bu özelliğin dikkate alınması gerektiği değerlendirilmektedir.



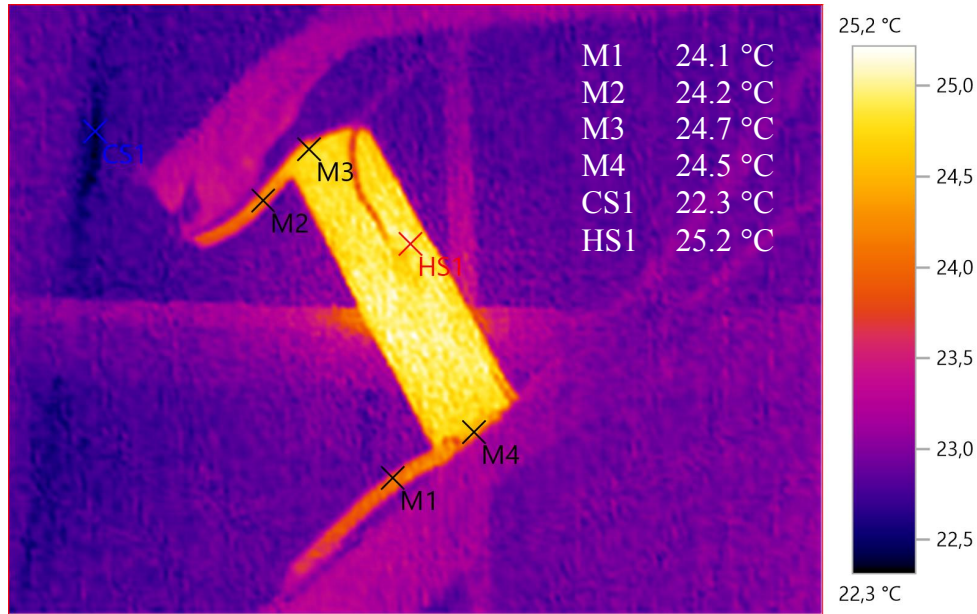
Şekil 6.10. 1C deşarj sırasında sıcaklığın zamana göre değişimi

Yine yüksek deşarj seviyelerinde sıcaklığın daha hızlı yükseldiği **Şekil 6.9** ve **Şekil 6.10** ile sunulan grafiklerin birlikte incelenmesinden görülmektedir.

6.4. Hücrelerin Isıl Karakteristiklerinin Çıkarılması

Deneyler sırasında da gözlemlendiği gibi, batarya sıcaklığı, bataryadan çekilen güç ile doğrudan ilişkilidir. Diğer yandan bataryaların ısıl yönetiminin, batarya ağırlığına ilave ağırlık getirdiği ve toplam özgül enerjiyi düşürüldüğü önceki bölümlerde incelenmişti. Isıl yönetimin ilave ağırlığını düşürebilmek için, bataryaların tasarımı sırasında boyutlandırılması ve bataryalarda kullanılacak hücrelerin ısıl özelliklerinin bilinmesi önem arz etmektedir.

Bataryaların tasarımdan gelen özellikleri de hücrelerin bazı bölgelerinin daha çok ısınmasına neden olabilmektedir. Isıl yönetim sistemi tasarımında hücrelerin ısıl yayılımının da bilinmesi önem arz etmektedir. Buna ek olarak, hücrelerin bağlantı noktaları da ısı üretiminde kritik noktalardandır.



Şekil 6.11. Hücre ve bağlantılarda sıcaklık dağılımı

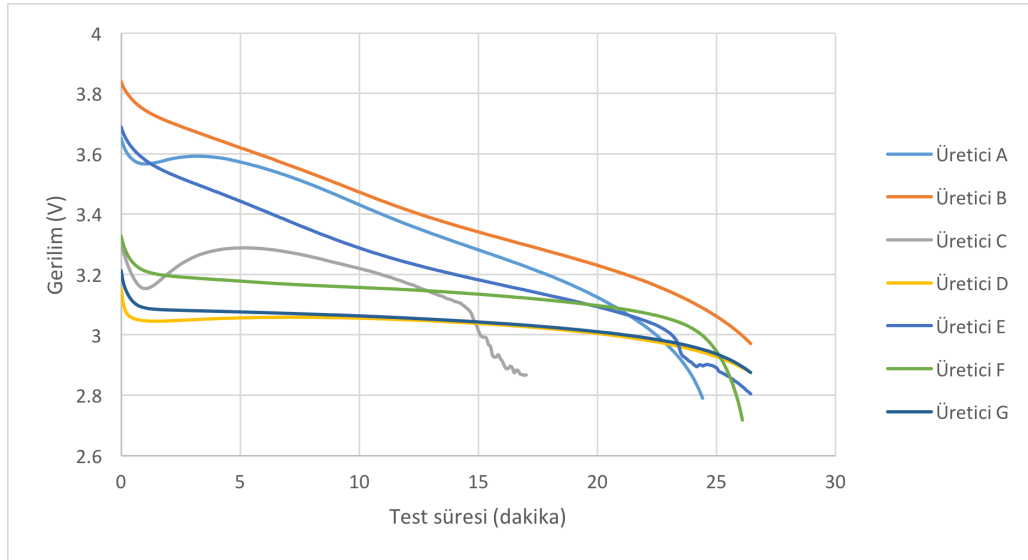
Şekil 6.11 ile görüldüğü üzere, ortam 22, hücre 25 °C iken, bağlantı telleri üzerinden geçen akımın ve hücreden iletimle gelen ısının etkisi ile hücreye yakın yerlerde 24,7 °C olarak ölçülmüştür. İletken tel, üzerinde izolasyona rağmen, hücreden iki cm uzakta 24°C sıcaklığa sahip görünmektedir. Buradan da görüleceği üzere, batarya tasarımında hücre seçimi kadar elektrik bağlantı elemanlarının da özellikleri ısıl tasarım açısından önemlidir.

Deneylerde kullanılan farklı üreticilere ait hücrelerin kapasite bilgileri Çizelge 4.5 ile verilmiştir. Bu hücreler Görsel 6.1 ile gösterilmiştir.



Görsel 6.1. Deneylerde kullanılan 18650 hücreler

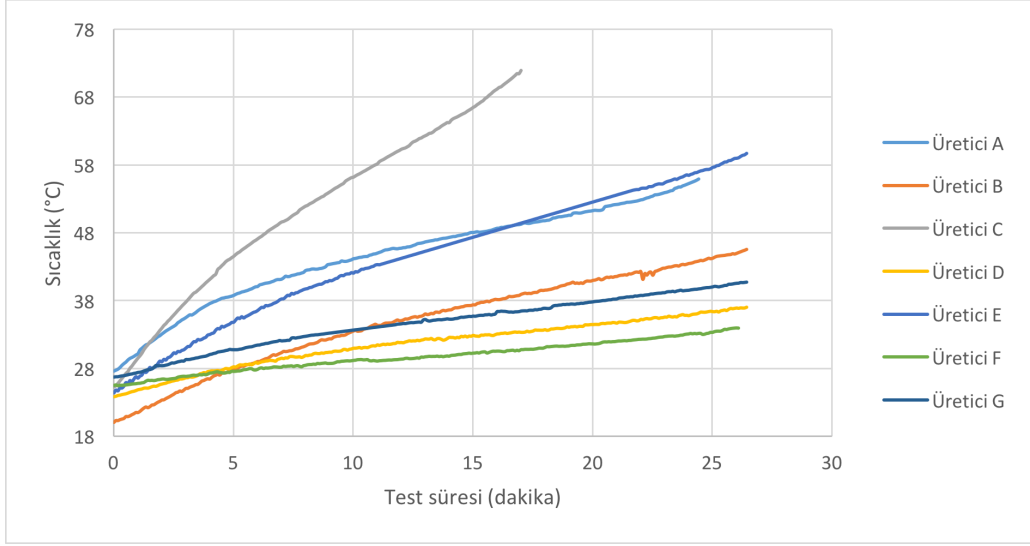
Diğer yandan izleyen bölümlerde, deneylerde kullanılan hücrelerin şarj ve deşarjı sırasında ısıl davranışları incelenmiştir. Bu deney sonuçları arasında hücrelerin 2C ile deşarjı sonucu elde edilen verilerin kıyaslamaları **Şekil 6.12** ve **Şekil 6.13** ile verilmiştir. **Şekil 6.12** ile hücrelerin 2C deşarj yüküne karşılık deney süresince gerilimlerinin değişimleri kıyaslanmıştır. LFP hücrelerin en düşük gerilim seviyesinde, sabit olarak kaldığı, kapasitesinin sonunda birden geriliminin düştüğü ölçülmüştür. Diğer elektrokimyalar düzenli olarak gerilim düşüşü göstermiş, büyük kısmı beklendiği gibi yarım saat içinde deşarj noktalarına ulaşmıştır.



Şekil 6.12. Hücrelerin 2C deşarj altında gerilim değişimleri

Diğer yandan aynı deneyler sırasında hücrelerin ölçülen sıcaklık değişimleri ise **Şekil 6.13** ile kıyaslanmıştır. Bir önceki grafikte görülen LFP elektrokimyadaki hücreler, grafiğin alt kısmında kalmış, sıcaklıkları en yavaş yükselen hücreler olmuştur. Kapasite olarak diğerlerinden daha düşük performans gösteren Üretici C hücresi, diğer hücrelerle kıyaslandığında daha hızlı sıcaklık artışı göstermiş ve 15. dakikadan sonra kapasitesini

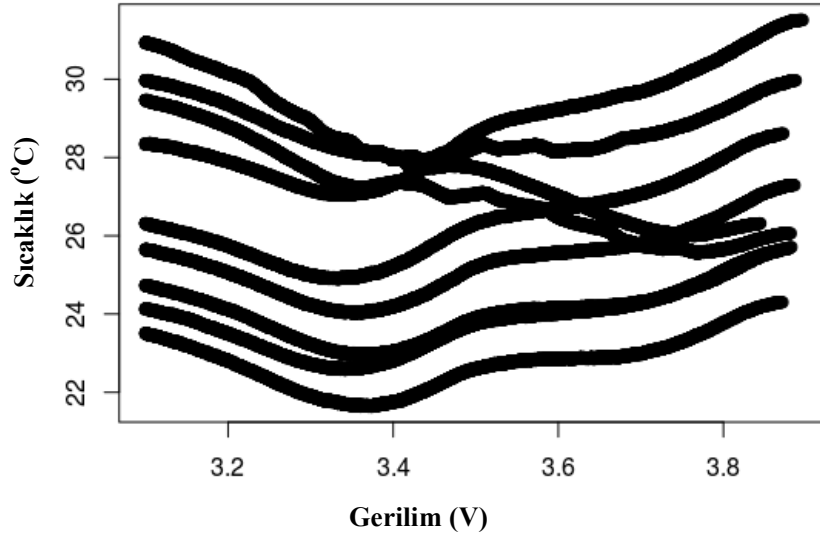
bitirmiştir. Diğer hücreler üzerinde deney sonunda yaklaşık olarak aynı miktarda sıcaklık artışı ölçülmüştür.



Şekil 6.13. Hücrelerin 2C deşarj altında sıcaklık değişimleri

6.4.1. Çoklu döngü deneyi

Oda sıcaklığında yürütülen çok sayıda şarj/deşarj döngü testleri ve bu testlere ait ölçümlerden biri **Şekil 6.14** ile verilmiştir. Deney, tek hücrenin C/2 oranında tam SoC boyunca 11 kez şarj ve deşarj edilmesi ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.14. Farklı ortam sıcaklıklarında hücrenin deşarj ısı karakteristiği

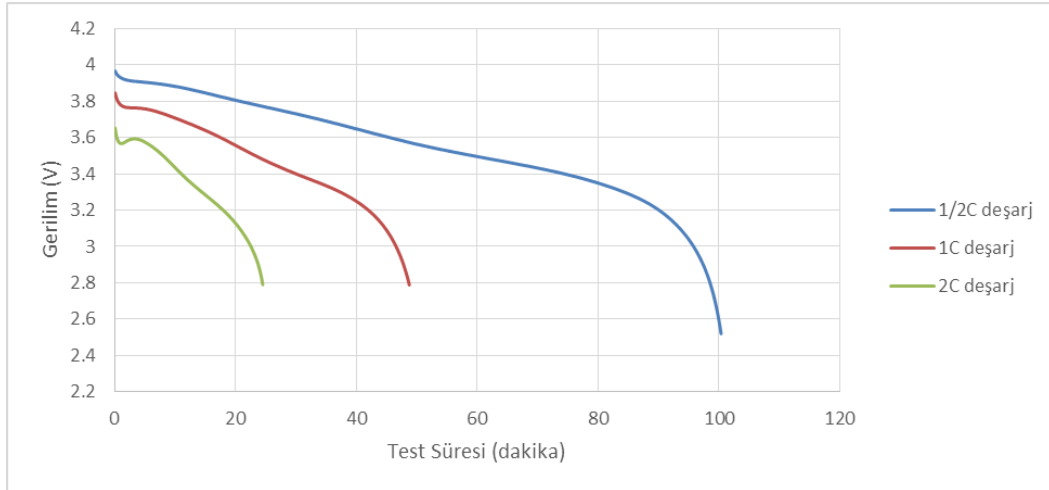
Deneyin deşarj sonuçlarından elde edilen grafikte, hücrelerin tekrarlayan tipik ısı karakter davranışı, yüksek SoC seviyesinde sıcaklığın düşmesi (endotermik) ve nominal

gerilimin altında ise sıcaklığın yükselmesi (ekzotermik) şeklinde görülmektedir. Bu bulgu, Denklem (5.13) ile verilmiş olan Peltier etkisinin gösterimidir.

Şarj/deşarj testleri sonuçlarında, hücrenin nominal voltajına (yaklaşık 3.4 V) doğrudeşarj olurken, yüksek SoC değerlerinde endotermik, düşük SoC değerlerinde ise ekzotermik davrandığı görülmektedir. **Şekil 6.14** ile verilen testlerde genel karakterden farklı olarak elde edilen iki sonuç, hücrenin test altında dışardan ısıtılması ile elde edilmiştir. Diğer testler sabit sıcaklık altında gerçekleşmiştir.

6.4.2. Üretici A hücre deneyleri

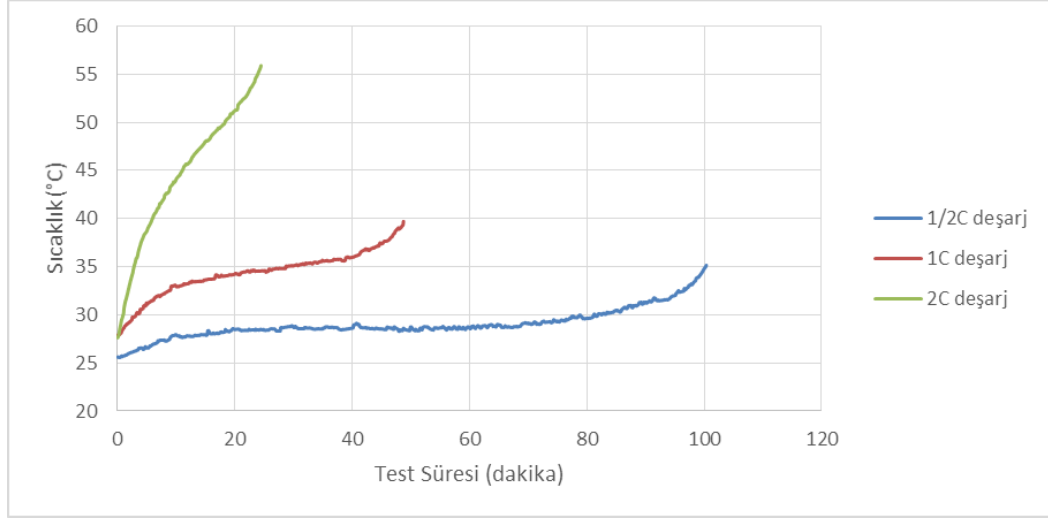
A üreticisine ait 3,2 Ah kapasiteli 18650 ebatlarında LCO elektrokimyasında silindirik hücre, oda şartlarında sırası ile C/2, C ve 2C akım oranlarındadeşarj edilmiştir. Bu deneyler sırasında elde edilen gerilim değişimleri kıyaslamalı olarak **Şekil 6.15** ile verilmiştir.



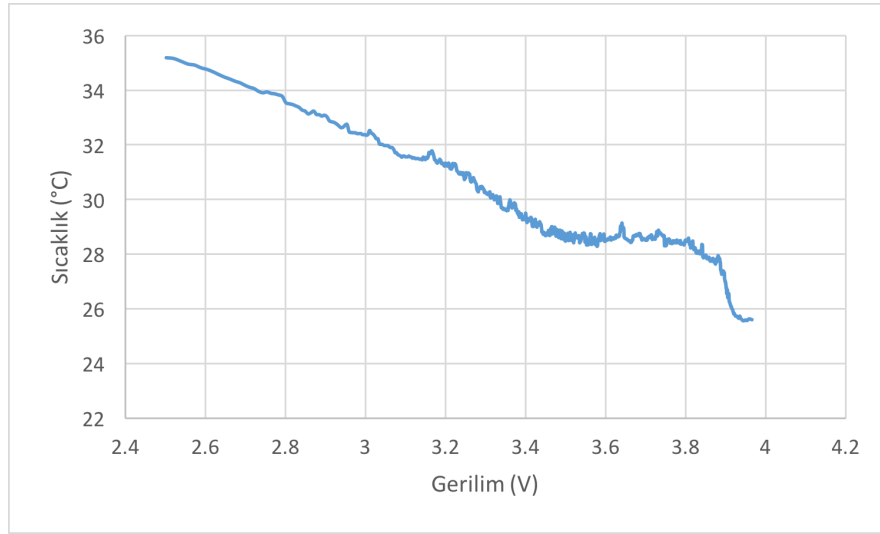
Şekil 6.15. Üretici A hücresideşarj deneyi gerilim değişimleri

Aynı deneyler sırasında hücrenin sıcaklık değişimleri de incelenmiştir. Hücrenin yüzey sıcaklığınındeşarj oranı arttıkça daha hızlı yükseldiği ölçülmüştür. Bu geliştirilen modelin sıcaklık öngörüsü ile paraleldir. Deney sonucu yüzey sıcaklığı değişimleri **Şekil 6.16** ile verilmiştir.

İlkdeşarj, C/2 akım oranında (1.6A) hücre 3.53 V iken başlamış ve 2.5 V civarında kesilmiştir. Sıcaklığın deneyin sonuna doğru 34 °C üzerine çıktığı ölçülmüştür. Bu yükselişin hücre geriliminin 3V altına düşmesi ile artması dikkat çekicidir. Bu bölgede hücrenin iç direncinin en hızlı yükseldiği ve buna paralel olarak ısı üretiminin arttığı bölgedir. Sıcaklığın hücre terminal gerilimine göre değişimi **Şekil 6.17** ile verilmiştir.



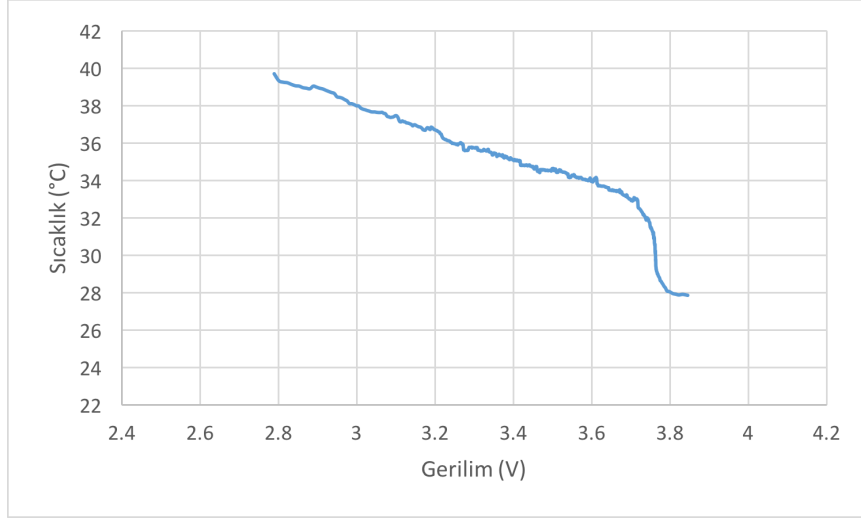
Şekil 6.16. Üretici A hücresi sıcaklık değişimleri



Şekil 6.17. Üretici A hücresi C/2 ile deşarj sıcaklık değişimi

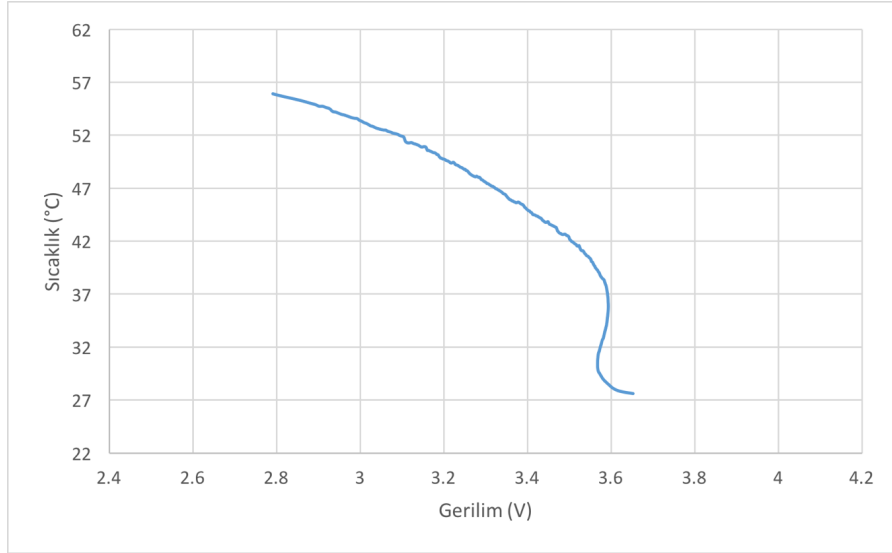
Üretici A hücresinin 1C (3.2A) ile yapılan deşarjında ise sıcaklık yükselişi C/2 ile yapılan deneydeki hücrenin sıcaklığından beklendiği gibi daha hızlı yükselmiştir. Bu deneyde hücre gerilimi 3.2V altına geçmesi ile ısı üretiminin arttığı ve deney sonunda sıcaklığın 40 °C seviyesine yaklaştığı görülmektedir.

Üretici A hücresinin 2C (6.4A) akım oranı ile yapılan deşarjında hücrenin sıcaklığı deneyin başından itibaren düzenli olarak yükselmiştir. Test başında sıcaklık yükselişi daha hızlı olarak başlamış, hücre içindeki elektron akışı normale dönmesi ve sıcaklığın etkisi ile hücre içindeki malzemenin daha aktifleşmesi ile hücre terminal geriliminde az da olsa yükselme ve ardından azalan eğimde bir sıcaklık artışı gözlenmektedir.



Şekil 6.18. Üretici A hücresi 1C ile deşarj sıcaklık değişimi

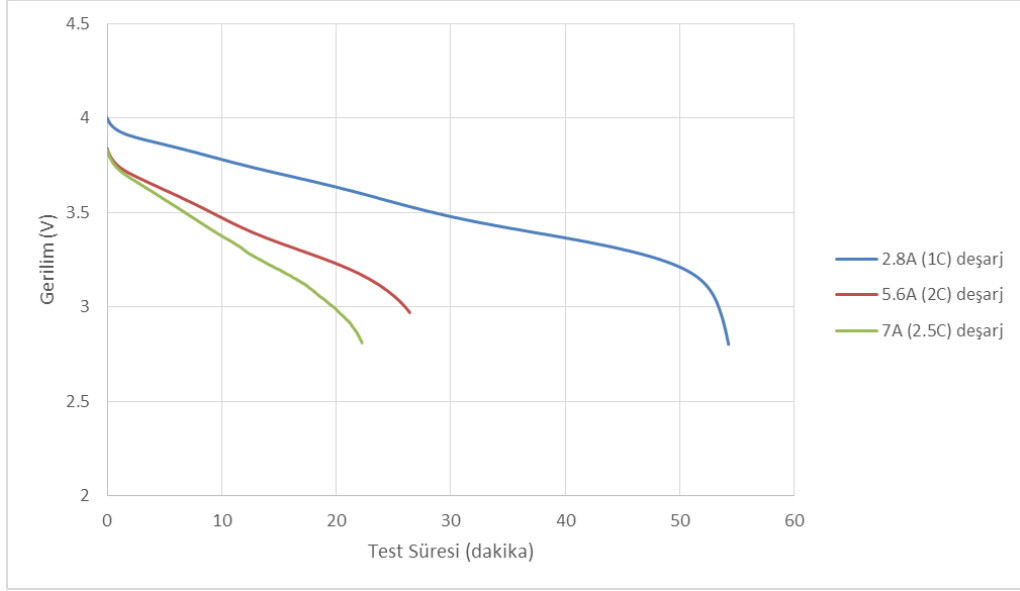
Hücre 3V altında terminal gerilimini daha hızlı düşürmüştü ancak önceki düşük oranlı deneylerde olduğu gibi sıcaklık artış hızı son bölgede belirgin yükseliş eğilimi göstermemiştir. **Şekil 6.19** ile görüleceği gibi, sıcaklık 57 °C seviyesine, önceki deneylerde olduğundan daha hızlı çıkmıştır. Ayrıca yine bu grafikten görüleceği üzere, yüksek akım ile karşılaştığında hücre önce güç üretememiş ve hücre gerilimi beklenenden fazla düşmüştür. Bu sürede hücre sıcaklığı hızla yükselmiştir.



Şekil 6.19. Üretici A hücresi 2C ile deşarj sıcaklık değişimi

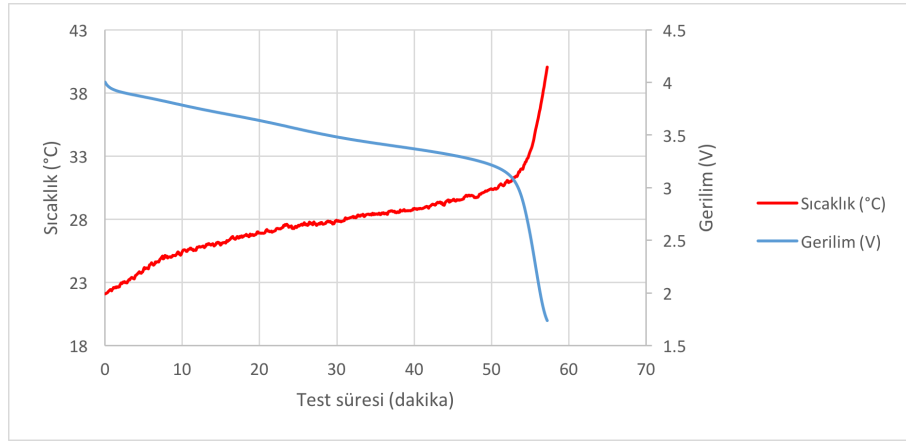
6.4.3. Üretici B hücre deneyleri

B üreticisine ait olan 2.8 Ah kapasiteli 18650 ebatlardaki NMC elektrokimyasına sahip hücre ile farklı akım oranlarında deşarj deneyleri yapılmıştır. Deneylerde hücre 1C (2.8A), 2C (5.6A) ve 2.5C (7A) deşarj akımlarına tabi tutulmuştur. Bu deneylerde elde edilen zamana göre gerilim değişimleri **Şekil 6.20** ile sunulmuştur.



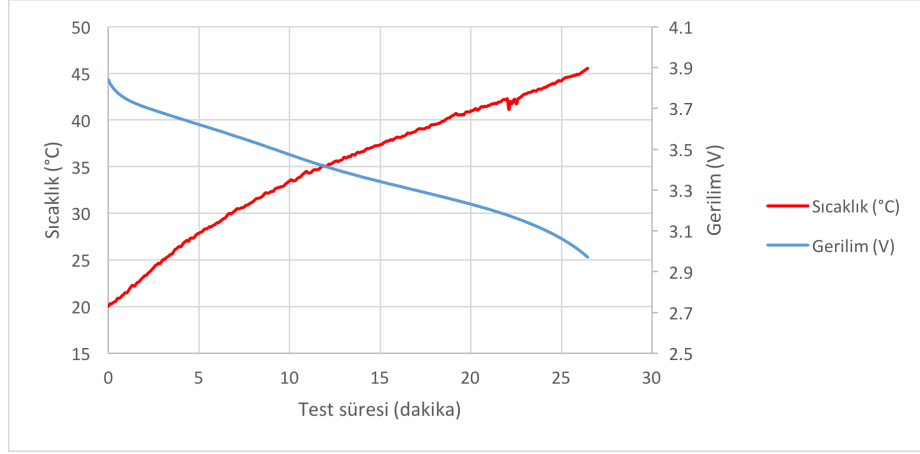
Şekil 6.20. Farklı akım oranlarında deşarj deney sonuçları

Hücrenin 1C (2.8A) ile yapılan deney sonucu, hücrenin gerilim ve yüzey sıcaklığı değişimi **Şekil 6.21** ile verilmiştir. Bu deneyde hücreden toplam çekilen enerji 9.24 Wh olmuştur. Bu deneyde hücre aşırı deşarj edilmiş, terminal gerilimi 2.8V altına indirilmiştir. Bu aşırı deşarj sonucu çekilen enerji miktarına ilişkin analiz **Çizelge 6.1** ve izleyen kısımda verilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere, hücre 2.8V altına doğru şarj edilirken sıcaklığı daha da hızlı artmaya başlamıştır. Bu bölgede hücrenin anlık sıcaklık artışı 10°C civarında görülmektedir.



Şekil 6.21. Üretici B hücresinin 1C ile deşarjı

Üretici B hücresinin 2C (5.6A) ile yapılan deneyinde hücreden 8.37 Wh enerji çekilmiştir. Bu deney sonucu elde edilen sıcaklık ve gerilim değişimi **Şekil 6.22** ile verilmiştir.



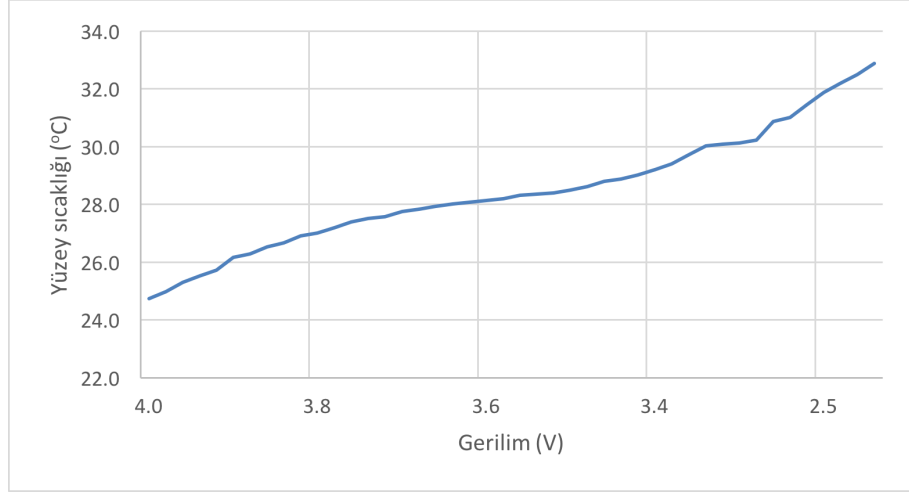
Şekil 6.22. Üretici B hücresi 2C ile deşarjı

Üretici B hücresi daha sonra 2.5C (7A) ile deşarja tabi tutulmuş, deney sonuçları **Şekil 6.23** ile verilmiştir. Bu deneyde hücreden çekilebilen enerji 8.71 Wh olmuştur. Görüleceği üzere hücrenin sıcaklığı deney süresi olan 23 dakika içinde 25 °C seviyesinden 60 °C seviyesine kadar yükselmiştir.



Şekil 6.23. Üretici B hücresi 2.5C deşarjı

Üretici B hücresinin C/3 (1A) akım altında yapılan derin deşarjı ile hücrenin tekrar 2.5V altına inmesi sağlanmış ve sıcaklık tepkisi incelenmiştir. Gerilim 2.5V altına indiğinde hücrenin sıcaklığının yükseliş eğimi de artmıştır. Aynı test sırasında elde edilen sıcaklık verisinin, hücre voltajına göre değişimi de **Şekil 6.24** ile verilmiştir. Bu grafikte, deşarj sırasında voltaj değişimi ve sıcaklık düzenli olarak, sabit akımın ısıtma etkisi ile artmaktadır.



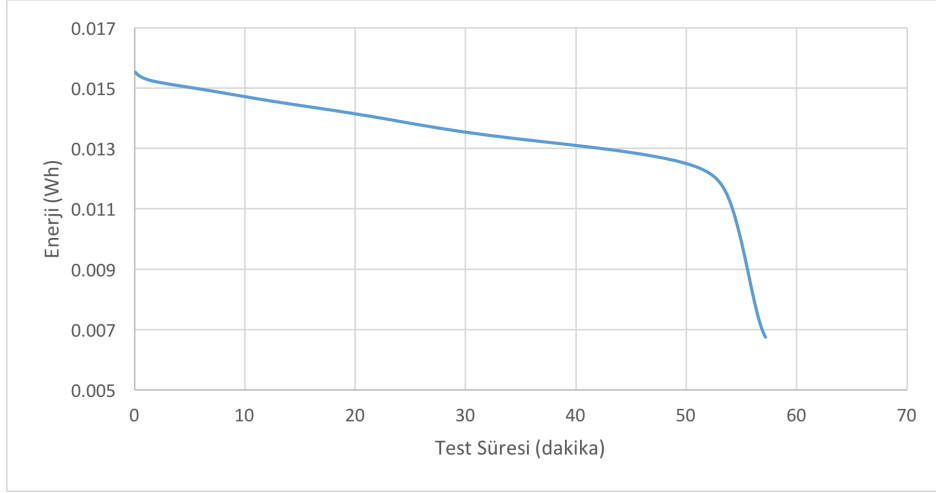
Şekil 6.24. C/3 deşarj sırasında, sıcaklığın gerilime göre değişimi

Derin deşarj sırasında gözlenen hızlı düşüş bölgesinin değerleri **Çizelge 6.1** ile incelenmiştir. Enterpolasyonla OCV boyunca kapasite ve enerji değerleri elde edilmiştir. Görüleceği üzere, 3.1 V altında hücrenin deşarj edilmesinin pratik olarak bir faydası bulunmamaktadır. Bu gerilim seviyesinin altında hücreden çekilebilen enerji hem gerilimin hızlı düşmesinden hem de iç direncin en yüksek olduğu bölgede ısı üretiminin yükselmesinden dolayı pratik görülmemektedir. Bu deşarj bölgesinde hem sıcaklık daha hızlı yükselmekte hem de toplam çekilen enerji 0.2 Wh gibi, toplam kapasitesinin %2 gibi bir oranını ifade etmektedir.

Çizelge 6.1. Derin deşarj testinin sonlarında enerji ve kapasite değişimi

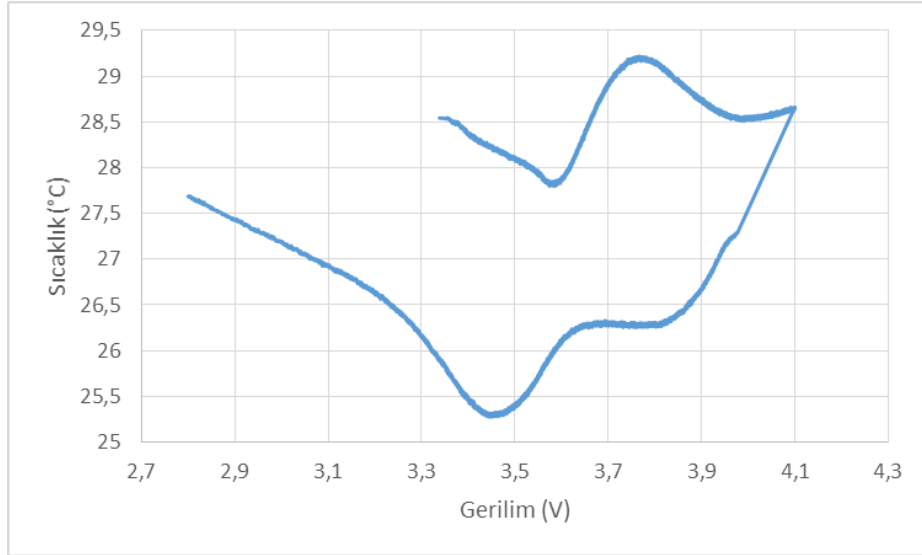
OCV	Süre	Kapasite (Ah)	Toplam Çekilen Enerji (Wh)
3.1	02:34:37	2.576	9.33
3.0	02:36:09	2.602	9.40
2.9	02:37:29	2.624	9.47
2.8	02:37:57	2.632	9.49
2.7	02:38:18	2.638	9.50
2.6	02:38:39	2.644	9.52
2.5	02:38:56	2.649	9.53

Diğer yandan, hücrenin sabit akım altında normal deşarjı sırasında, bataryadan çekilen enerji grafiği **Şekil 6.25** incelendiğinde, testin 50. dakikasından sonra, hücrenin düşük SoC'lerde hızla düşen terminal geriliminin de etkisi ile enerji sağlayamadığı görülmektedir. Testin sonundaki kısımda, hücre 3.1 V altına inmekte ve üretilen enerji grafikte yatay hale gelmektedir. Bu bölgenin normal kullanımda enerji üretimi yerine, ancak çok gerektiğinde ve sınırlı olarak acil durumlarda kullanılmasının pratik olabileceği görülmektedir.



Şekil 6.25. 2.8 Ah Hücreden C/3 ile deşarj boyunca çekilen anlık enerji

Aynı hücrenin şarj/deşarj döngüsü sırasındaki sıcaklık davranışı tek grafikte incelenmiştir. Grafikten de görüleceği üzere, hücre şarj/deşarj boyunca tipik olarak nominal gerilimine yaklaşıırken endotermik ve nominal gerilim altında ise ekzotermik davranış göstermiştir. Grafikte hücrenin 3.4V ile başlayan şarjı sırasında sıcaklık değişimi üstte yer alan kolda ve şarjı takiben 2.8V seviyesine kadar deşarj edilirken sıcaklık değişimi altta yer alan kolda görülmektedir. Hücrenin bu sıcaklık profili düşük akımla yapılan deneylerde, LFP hariç hemen her hücrede gözlenmiştir.

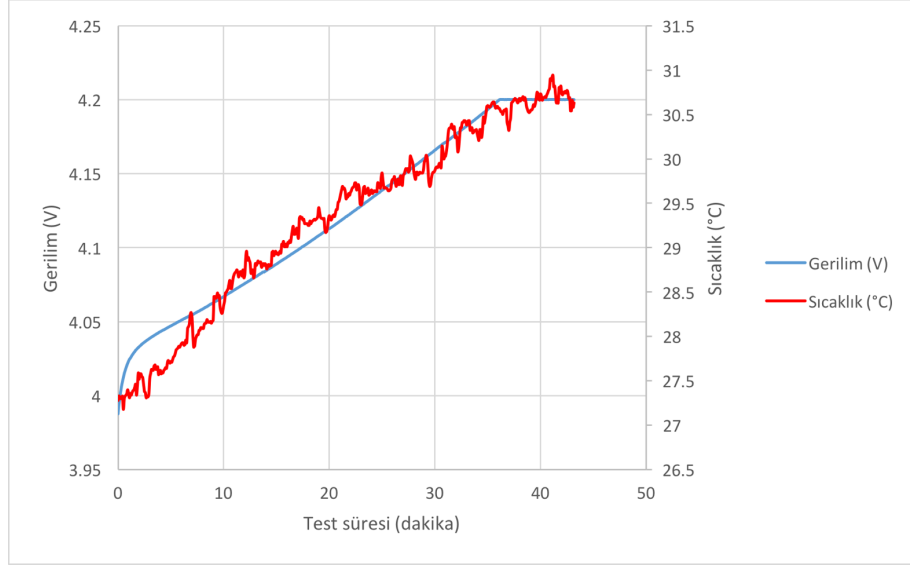


Şekil 6.26. Hücrenin 1A ile şarj/deşarjı boyunca sıcaklık değişimi

6.4.4. Üretici C hücre deneyleri

Üçüncü üreticiye ait 18650 ebadında 3000 mAh ve 3.7 V anma değerlerine sahip Lityum-iyon hücre ile yapılan deney sonuçları izleyen grafiklerde gösterilmiştir. Hücre

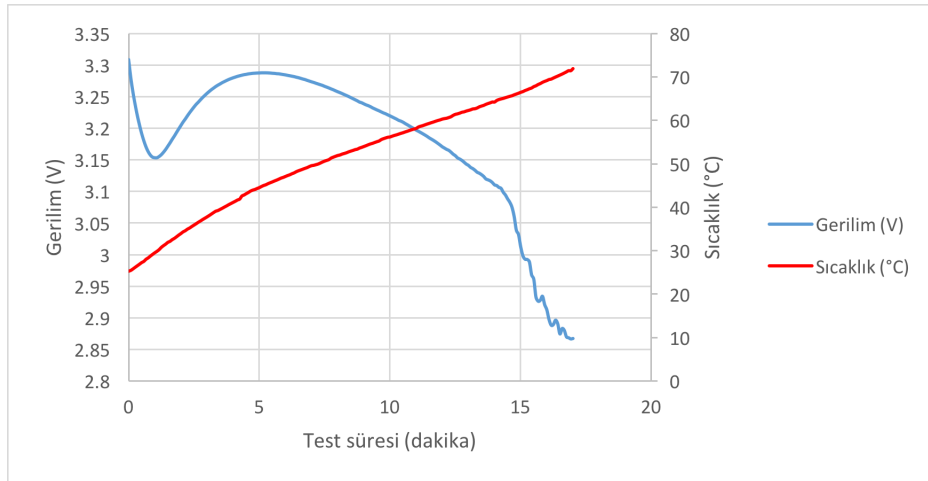
önce C/2 (1.5A) akım oranında şarj edilmiş, ardından da 3C (4.5A) akım oranında deşarj edilmiştir.



Şekil 6.27. Üretici C hücresi 1C şarjı

Hücresinin C/2 akım oranında şarjı sırasında gerilim ve sıcaklık değişimi **Şekil 6.27** ile verilmiştir. Hücresinin gerilimi ile birlikte sıcaklığı düzenli olarak yükselmiştir. Sıcaklık değişimindeki çok sayıda düzensiz titreşimler, hücresinin ısınırken bir yandan da endotermik reaksiyonlar doğurduğunu göstermekte olup, hemen her hücresinin şarjı sırasında karşılaşılan bir özelliktir.

Hücresinin 2C (6A) ile deşarjı sırasında elde edilen gerilim-sıcaklık değişimi **Şekil 6.28** ile verilmiştir.

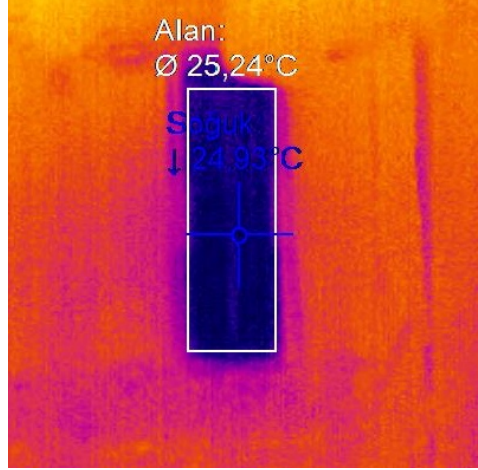


Şekil 6.28. Üretici C hücresi 2C ile deşarjı

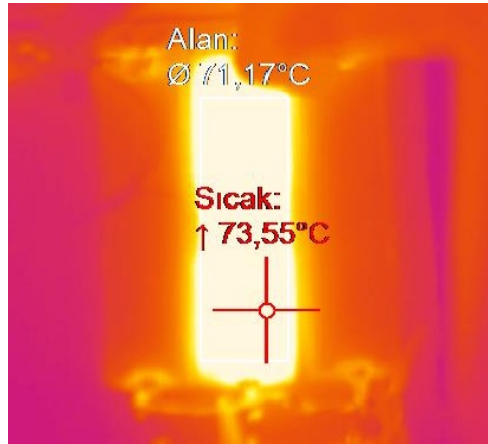
Bu deney sırasında hücre yüzey sıcaklığı 70 °C seviyesine kadar çıkmıştır. Hücre kapasitesinin sonuna doğru diğer hücrelerde karşılaşılmamış bir davranış göstermiştir.

3.1V gerilim altında hücrenin kapasitesi oldukça hızla düşmüştür. Hücre grafikten de görüleceği gibi bu bölgede çok düşük enerji üretiminde bulunmuştur.

Hücrenin 2C ile deşarjı deneyinde hücrenin deney başındaki ve deneyin sonundaki ısı kamera görüntüleri **Görsel 6.2** ve **Görsel 6.3** ile verilmiştir. Deneyin başında 25 °C olan hücre sıcaklığı deney sonunda 70°C seviyesine kadar yükselmiştir.



Görsel 6.2. Hücrenin deney başındaki ısı kamera görüntüsü

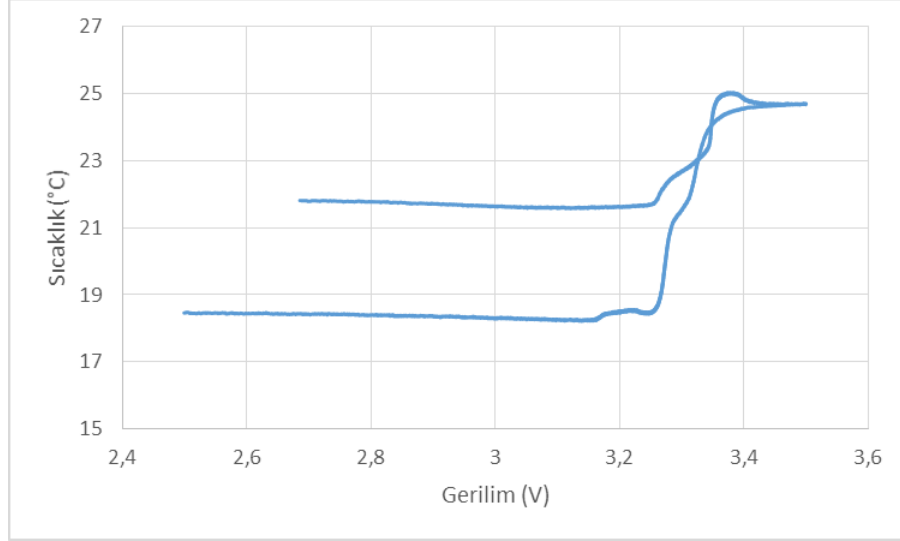


Görsel 6.3. Hücrenin deney sonundaki ısı kamera görüntüsü

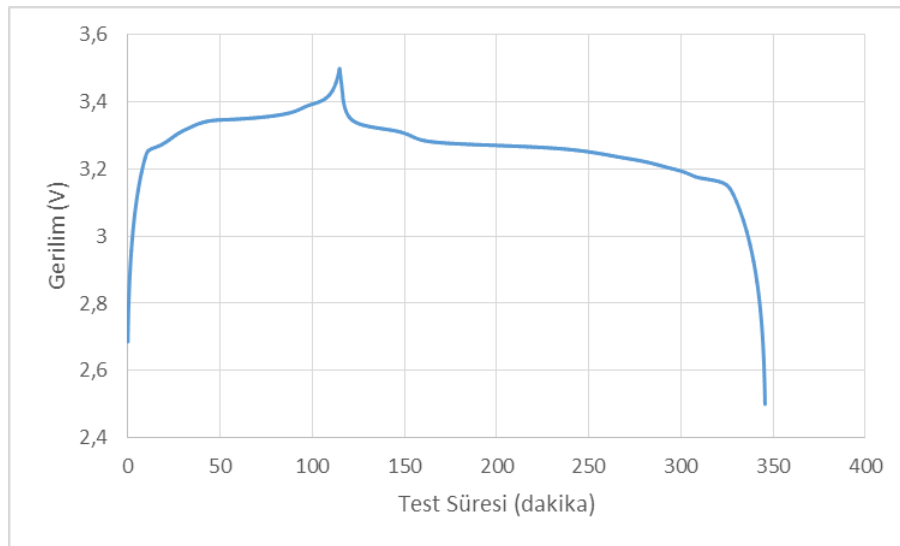
6.4.5. Üretici D hücre deneyleri

Deneye tabi tutulan hücre, 3.2V nominal eğrilime sahip, 1500 mAh kapasiteli LFP (lityum-demir-fosfat) tipi 18650 ebatlarında hücredir. Hücrenin birim ağırlığı 40 gr civarındadır. Hücrenin en yüksek gerilimi üretici tarafından 3.7 V olarak verilmiştir. Şarj ve deşarj döngüsü boyunca **Şekil 6.29** ile görüleceği üzere, sadece 3.2V üzerinde yani nominal geriliminin üzerindeki şarj döngüsünde ısınmış, deşarj boyunca soğumuş ve diğer işletme süreçlerinde, sıcaklık artışı göstermemiştir. Ancak kapasitenin sonunda aşırı ısı üretim oranı göstermiştir.

Hücre sabit 1A ile şarj edilmiş sonra sabit 0.5 A ile deşarj edilmiştir. **Şekil 6.30** ile görüleceği gibi, hücre 3.2 V altında hızlı gerilim düşüşü göstermiştir. Bir önceki grafikte ısı özelliklerinin iyi görünmesine rağmen, bu grafikte de görüleceği gibi üreticinin nominal olarak verdiği değer altında hücrenin enerji üretimi kısıtlıdır. Hücre düşük akımlar altında oldukça iyi bir ısı performans göstermiştir.



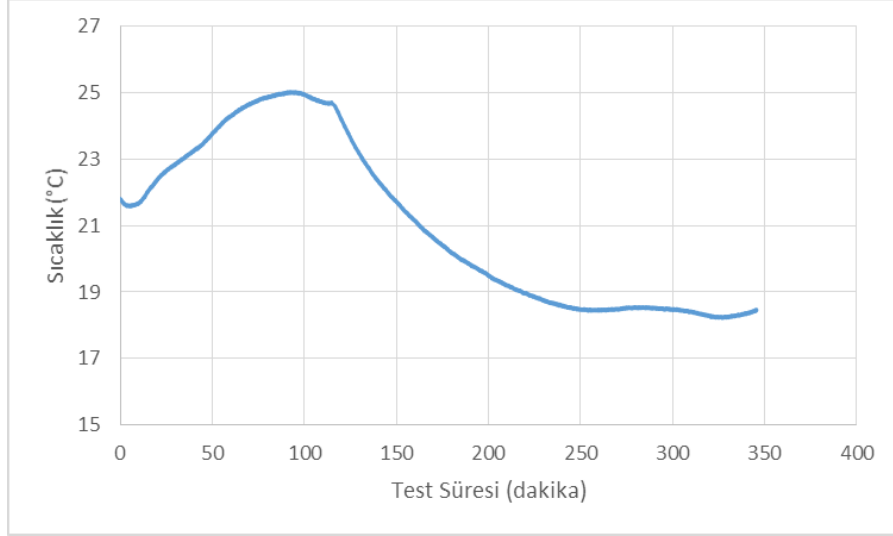
Şekil 6.29. LFP hücre şarj-deşarj boyunca gerilim-sıcaklık değişimi



Şekil 6.30. LFP hücre, 1A şarj ve 0,5 A ile deşarj gerilim değişimi

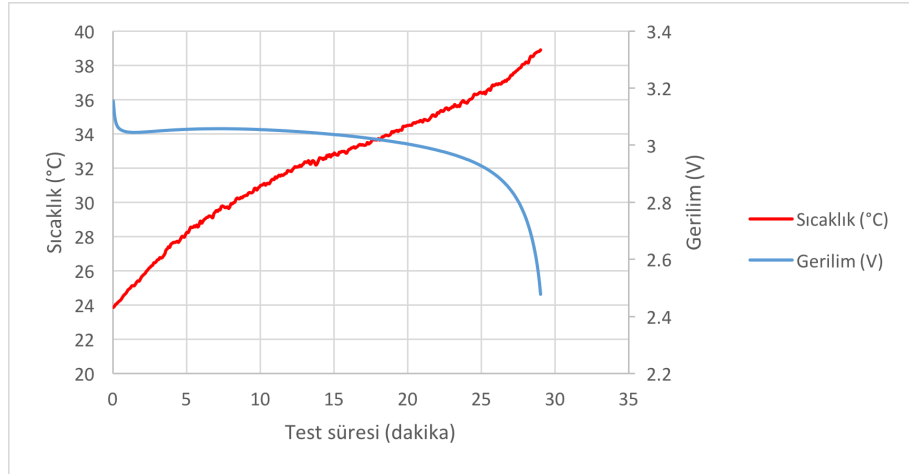
Hücrenin **Şekil 6.31** ile verilen test süresi boyunca sıcaklık değişimi incelendiğinde, şarj sırasında sıcaklığının nominal gerilim üzerine geçildiğinde arttığı, deşarj sırasında düşük akım etkisi ve elektrokimyasal yapısından dolayı ısı üretimi yapmadığı görülmüştür.

Hücre genel olarak ısıl yönden kararlı bir yapıya sahip olsa da enerji sığası açısından alt sıralarda yer almaktadır. Bu hücrenin kullanımı durumunda geriliminin 3.2V altında uzun süre kullanılması ısıl yönetim açısından verimsiz olacağı öngörülmektedir.



Şekil 6.31. LFP hücre 1A şarj ve 0.5A ile deşarj sıcaklık değişimi

Üretici D hücresinin 2C (3A) ile yapılan deşarjında elde edilen sıcaklık-gerilim değişimi **Şekil 6.32** ile verilmiştir.

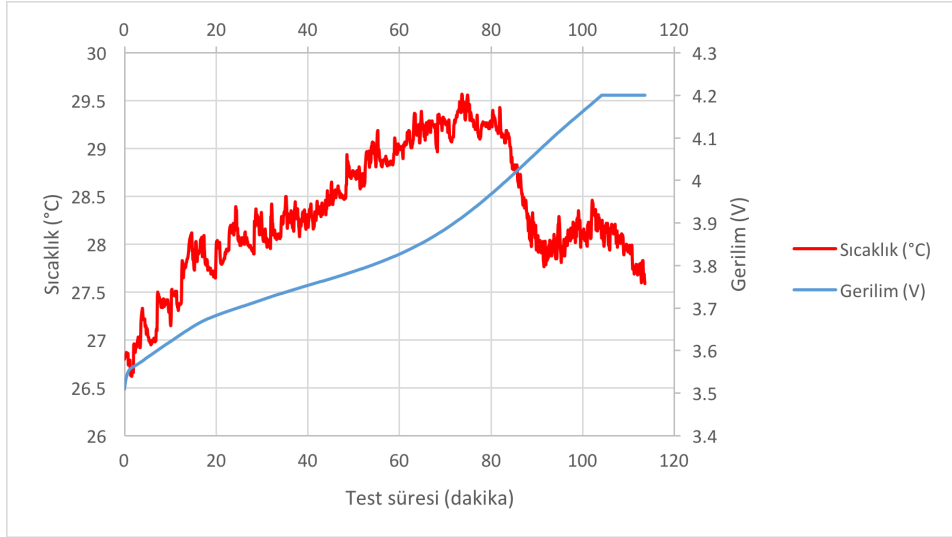


Şekil 6.32. Üretici D hücresi 2C deşarj deney sonuçları

Grafikten de görüleceği gibi yüksek akım altında hücre sıcaklığı deney boyunca yükselmiştir. Hücre elektriksel özellikleri gereği 3V seviyesinde uzun süre düzgün gerilim sağlayabilmiş ancak enerjisi bittiğinde terminal gerilimi çok hızlı olarak düşmüştür. Bu davranış genellikle LFP tipi hücrelerde görülen özelliktir.

6.4.6. Üretici E hücre deneyleri

E üreticisine ait 18650 ebadında 2600 mAh ve 3.7 V anma değerlerine sahip Lityum-iyon hücre ile yapılan deney sonuçları Şekil 6.33 ile verilen grafikte gösterilmiştir. Bu deneyde hücre C/3 akım oranı ile şarj edilmiştir. Şarj boyunca hücrenin sıcaklığı, hücre gerilimi 3.9V olana kadar düzenli olarak yükselmiştir. Bu seviyeden sonra hücre endotermik davranış göstermiş ve sıcaklığı 28 °C seviyesine inmiştir. Hücrenin şarj boyunca sıcaklık değişiminin çok düzensiz ve parazitik olması dikkat çekicidir.



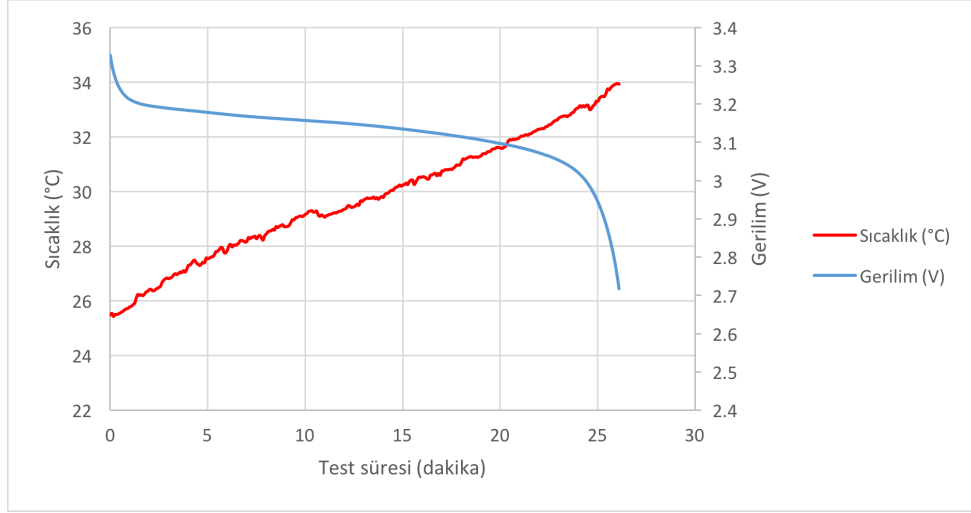
Şekil 6.33. Üretici E hücrenin C/3 ile şarjı

E üreticisine ait hücre ile yapılan deney sonucunda, hücrenin 3.2V altında performans vermediği, çok hızlı gerilim düşüşü yaşadığı ve sıcaklığının bu bölgede ani yükseliş gösterdiği ölçülmüştür. Hücrenin nominal gerilim altında ısı üretiminin hızlandığı görülmüştür.

6.4.7. Üretici F hücre deneyleri

Bir diğer üreticiye ait 26650 ebadında LFP elektrokimyasında 3.2V nominal gerilime ve 2300mAh kapasiteye sahip hücre ile yapılan deşarj deneyinde elde edilen sonuçlar Şekil 6.34 ile verilmiştir. Görüleceği gibi hücrenin deşarj sırasında 3.1V gerilim civarında uzun süre sabit gerilim üretebilmiştir.

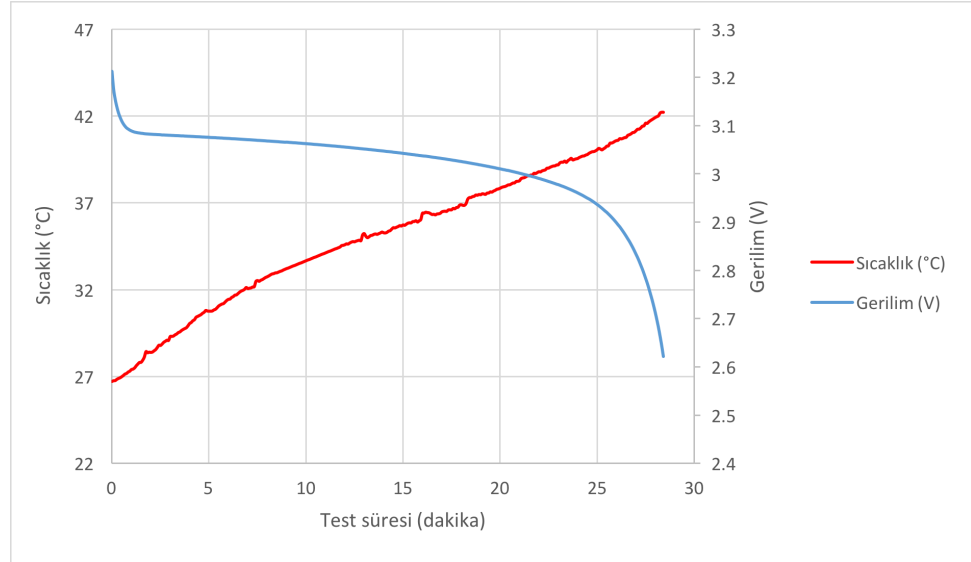
Bu hücre üreticisi tarafından nano teknolojiye sahip bileşenlerden üretildiği ifade edilmekte ve piyasada diğer benzerlerine nazaran daha yüksek fiyatla satılmakta olan bir üründür. Ürünün teknik broşüründe anlık çekilebilecek akım değerinin 60C civarında olduğu ifade edilmektedir. Bu değer diğer benzer ürünlerle kıyaslandığında oldukça yüksektir.



Şekil 6.34. Üretici F hücresi 3C deşarjı

6.4.8. Üretici G hücre deneyleri

Bir diğer uzak doğulu üreticiye ait 26650 ebadında LFP elektrokimyasında 3.2V nominal gerilime ve 3200mAh kapasiteye sahip hücre ile yapılan deşarj deneyinde elde edilen sonuçlar **Şekil 6.35** ile verilmiştir. Hücre LFP karakteristiği olarak 3.1V civarında bir süre kararlı davranabilmiş ama beklenenden daha kısa sürede kapasitesi düşmüştür.



Şekil 6.35. Üretici G hücresi 2C deşarjı

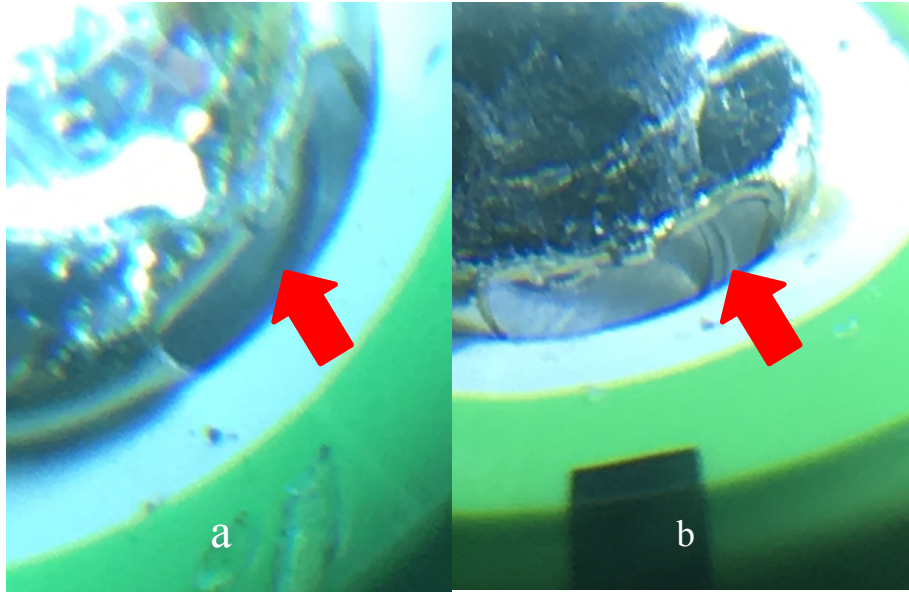
6.5. Isıl Kaçış Etkisinin Gözlenmesi

Yönetim devresi olmadan, 6 seri bağlı hücreden oluşan bir batarya oluşturulmuştur. Oluşturulan bu batarya şarja tabi tutulmuştur. Seri bağlı 6 adet hücre için, tez kapsamında tanımlı şarj yöntemi kullanılarak birim hücrenin üst limiti olan 4.2V hesaplanarak, 6 adet için toplam 25.2V seviyesine kadar C/2 (1.5A) ile şarja tabi tutulmuştur.



Görsel 6.4. Seri bağlı 6 hücreden oluşan batarya

Görsel 6.4 ile gösterilen 6 adet seri bağlı hücreden oluşan batarya, henüz 24V seviyesinde iken fotoğrafta ortada görünen 3 numaralı hücre, diğerleri ile arasındaki enerji kapasitesi dengesizliğinden dolayı ısıl kaçışa uğramıştır. Hücrenin sıcaklığı aniden 40 °C üzerine çıkmış, hücre kapağında bulunan Akım Kesme Aracı (AKA) açılarak hücrenin hasar görmesine ve etrafına zarar vermesine engel olmuştur.



Görsel 6.5. (a) AKA açılmış 3 numaralı hücre ve (b) sağlam AKA

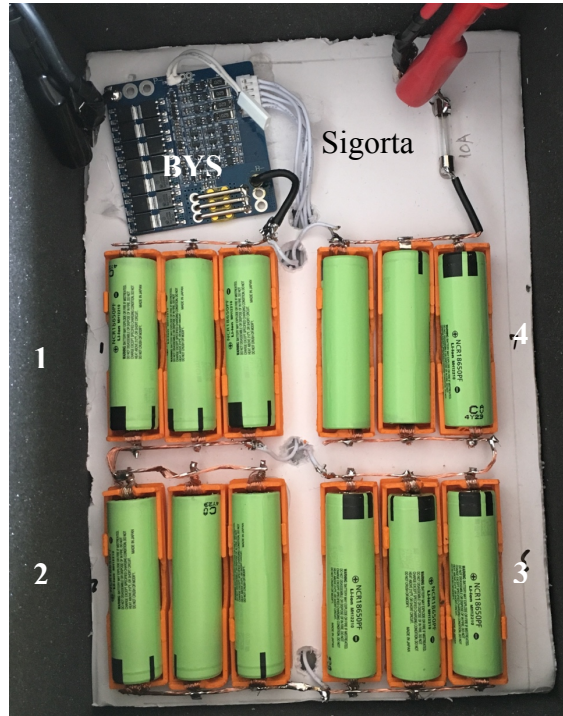
Hücrenin açılan AKA devresi, **Şekil 3.5** ile verildiği üzere, hücrenin akımını üzerinden taşıyan ve dolayısı ile hücrenin en çok ısınan iletkeninin bağlı olduğu,

inceltiilmiş iletken yüzeyinden oluşmaktadır. Bu sayede üzerinden taşıyabileceğinden fazla akım geçmesi durumunda AKA inceltiilmiş kısmından ayrılmakta ve devreyi kesmektedir. Açılarak hücrenin daha fazla hasara uğramasını engellemiş olan AKA ve sağlam AKA (**Görsel 6.5** (a) ve (b)) ile gösterilmiştir.

Bu çalışmadan da görüldüğü üzere, seri bağlı hücrelerin gerilimlerinin kontrol edilerek, aşırı şarj açısından korunması gerekliliği aşikardır. Bu işlevi yerine getirecek BYS kullanımının, çok sayıda seri bağlı bataryalar için kullanımı zorunlu olduğu değerlendirilmiştir.

6.6. Batarya Isıl Karakteristiğinin Çıkarılması

Her üç batarya konfigürasyonu da aynı voltaj seviyesine kadar şarj edilmiş, daha sonra 1A sabit akımla deşarj edilmiştir. Testler sırasında batarya yüzey sıcaklığı ve gerilim değerleri ölçülmüştür. Batarya deneyleri **Şekil 6.36** ile gösterilen deney düzeneğine yerleştirilmiş hücrelerden oluşan batarya grubu ile gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında güvenlik açısından batarya grubunda 10A sigorta bulunmaktadır.



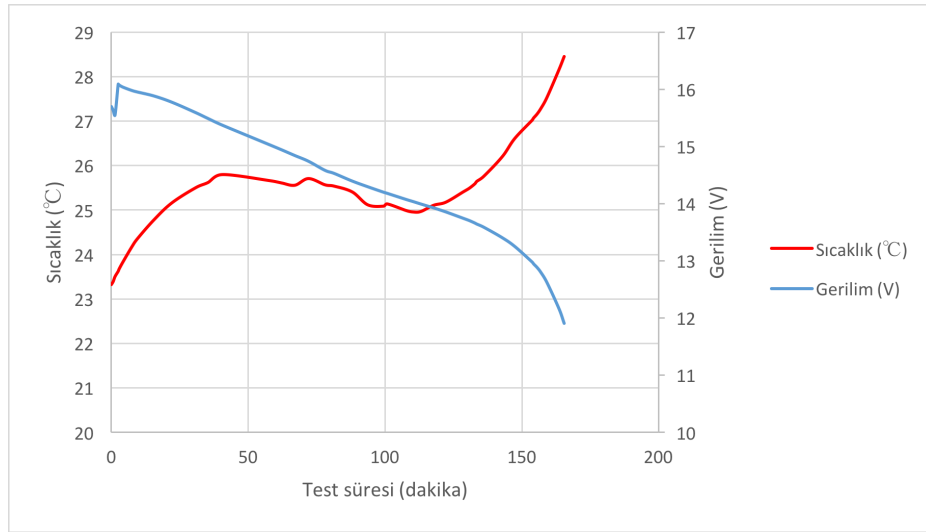
Şekil 6.36. Batarya deney düzeneği ve paralel kol numaraları

Geliştirilen ilk batarya konfigürasyonu 4 seri hücreden ve bir BYS kartı ile mekanik tutucu ve bağlantılardan oluşmaktadır. Bu batarya için hesaplanan ve **Çizelge 6.2** ile verilmiş değerlere göre batarya 229 gr ağırlığında, 201.22 Wh/kg teorik özgül enerji

değerinde olmuştur. Bataryanın beklenen teorik enerji kapasitesi 46.08 Wh değerindedir. Bu batarya ile yapılan testler ve test sonuçları izleyen grafiklerde verilmiştir.

Her üç bataryanın testi sırasında, 16 V ile 15V arasında gerçekleşen gerilim kayması, o bölgede BYS'nin şarj koruma devresini açmasından kaynaklanmaktadır. Anılan devre, yüke doğru BYS'nin çıkış devre elemanlarının toplam direncini düşürdüğünden çıkış gerilimi yükselmektedir.

İlk batarya paketi olan 4S konfigürasyon ile 12V, 3.2 Ah özelliklerde olup, 1A sabit akım ile deşarj edilmiştir. Deşarj 15.7 V ile 11.9 V arasında gerçekleşmiştir. Test sırasında bataryadan toplam 39.79 Wh enerji çekilmiştir. Bu değer teorik olarak hesaplanan 44 Wh değerine oldukça yakındır. Deney sırasında gözlenen gerilim ve sıcaklık değişimleri **Şekil 6.37** ile verilmiştir.



Şekil 6.37. 4S 12V, 3.2 Ah batarya ile yapılan test sonuçları

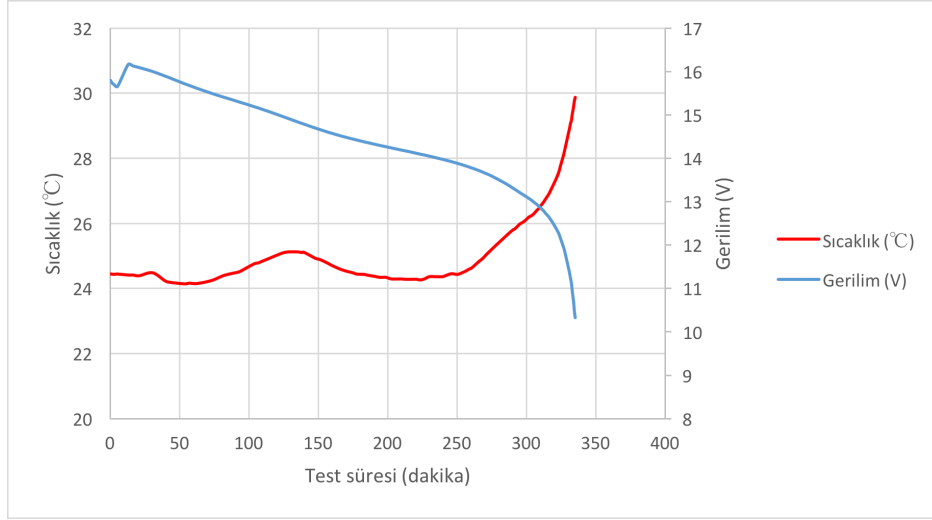
Bu deneyde batarya test yatağının paralel kollarında yer alan pil yataklarından birer tanesi doldurularak dört seri, bir paralel batarya yapısı elde edilmiştir.

Bataryanın testi sırasında, hücrelerin nominal gerilim seviyesi civarında endotermik özelliği gözlenmektedir. Bu seviyede batarya ilk başta ısınmasına rağmen, soğumaya başlamış, nominal gerilimin altına düştüğünde sıcaklık tekrar yükselme eğilimine girmiştir. Bu sonuçlar Bölüm 6.4 altında verilen ve **Şekil 6.14** yer alan grafikte sunulduğu üzere, hücre karakterizasyonu deney sonuçları ile uyum içindedir.

Bataryanın 4S, 2P ve 12V, 6.4 Ah özelliklere sahip konfigürasyonu ile yapılan testler sonucu elde edilen veriler aşağıdaki grafiklerde sunulmuştur. Bu deneyde test yatağının paralel kollarından ikişer pil yuvası doldurulmak suretiyle iki paralel hücre elde edilmiştir. Deney sonuçları **Şekil 6.38** ile verilmiştir.

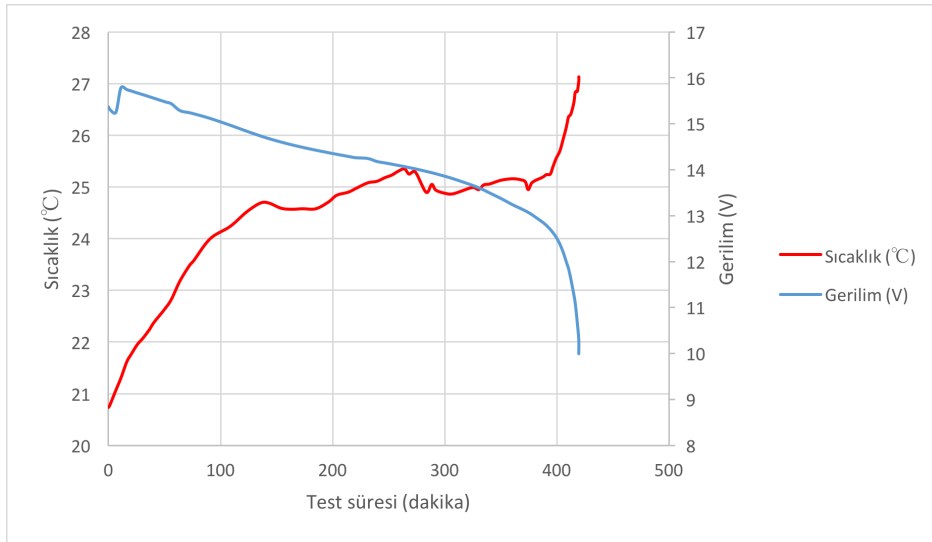
Batarya test sonuçlarına göre, 12V, 6.4Ah batarya ortam sıcaklığında 30 °C sıcaklığına kadar çıkmış, toplamda 80.75 Wh enerji sağlayabilmiştir. Bataryanın tam deşarj derinliğinde (DoD) 5 saat 35 dakikada deşarj olmuştur.

Çalışmalarda 4S, 3P konfigürasyonunda 12V, 10Ah özelliklerinde elde edilen batarya yapılan testlerde, batarya deşarj edilirken yüzey sıcaklığı ve gerilim değişimi ölçülmüştür. Anılan test sonuçları **Şekil 6.39** ile verilmiştir.



Şekil 6.38. 4S, 2P, 12V, 6.4Ah batarya test sonuçları

Bu testte batarya paketi, oda sıcaklığında ve ortamında 13.05 V seviyesine kadar deşarj edilmiştir. Toplam test 7 saat 32 dakika sürmüştür ve paketten 119.42 Wh enerji çekilmiştir. Çekilen enerji miktarı, hücrelerin tek olarak testi sırasında elde edilen 9.84 Wh değeri ile örtüşmektedir. Batarya hücreleri yüzey sıcaklığı 28.84 °C seviyesine kadar yükselmiştir.



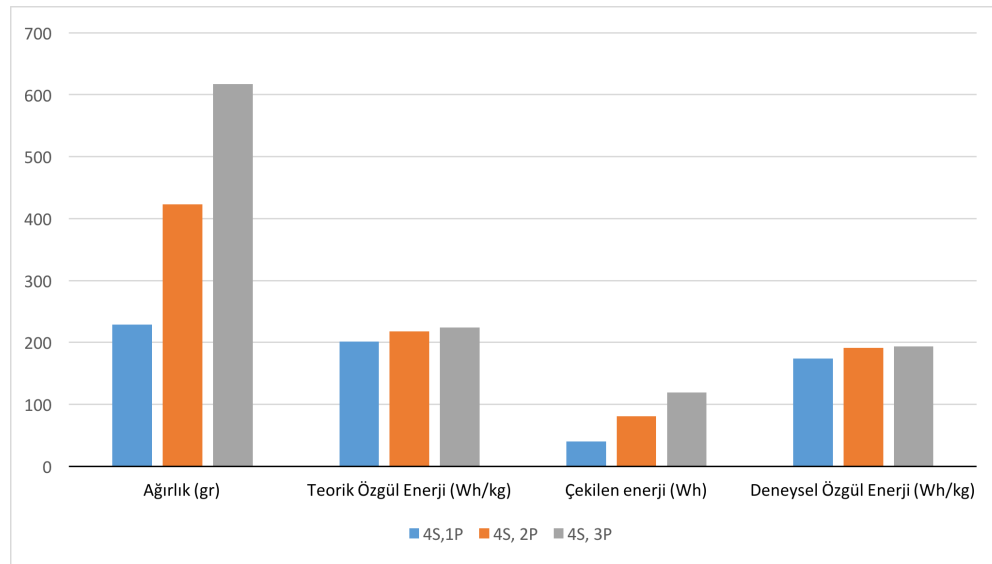
Şekil 6.39. 4S, 3P Batarya paketinin C/10 ile deşarj testi

Bu deneyde hücreler batarya test yatağının paralel kollarını tam dolduracak şekilde yerleştirilmiştir. Isıl çift orta hücrelerden birisinin yüzeyine tutturulmuştur. Deşarj için Keithley 2400 Sourcemeter cihazı kullanılmıştır.

Çizelge 6.2 ile deneyleri yapılan batarya konfigürasyonlarının, deney sonuçlarının karşılaştırılması tablo olarak ve **Şekil 6.40** ile grafik olarak sunulmuştur. Görüleceği üzere, bataryaların deneyler öncesinde hesaplanan teorik enerji yoğunlukları, deneysel sonuçlara göre yukarıdadır. Ancak konfigürasyonlar arası değişimlerin oranı deneysel sonuçlar ile paraleldir. Batarya ağırlıkları hücrelerin toplam ağırlığını ve BYS ağırlığını içermektedir. Konfigürasyonlar arasında BYS ağırlığı sabit olduğundan, kapasite artışı, yani paralel kolda bulunan hücre sayısının artışı, enerji verimini olumlu yönde geliştirmektedir. Çekilen enerji miktarları, bataryanın kapasite artışı ile orantılı olarak artmıştır.

Çizelge 6.2. Bataryaların teorik ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

Konfigürasyon	Ağırlık (gr)	Teorik Özgül Enerji (Wh/kg)	Çekilen Enerji (Wh)	Deneysel Özgül Enerji (Wh/kg)
4S, 1P	229	201.22	39.80	173.79
4S, 2P	423	217.87	80.75	190.89
4S, 3P	617	224.05	119.42	193.54

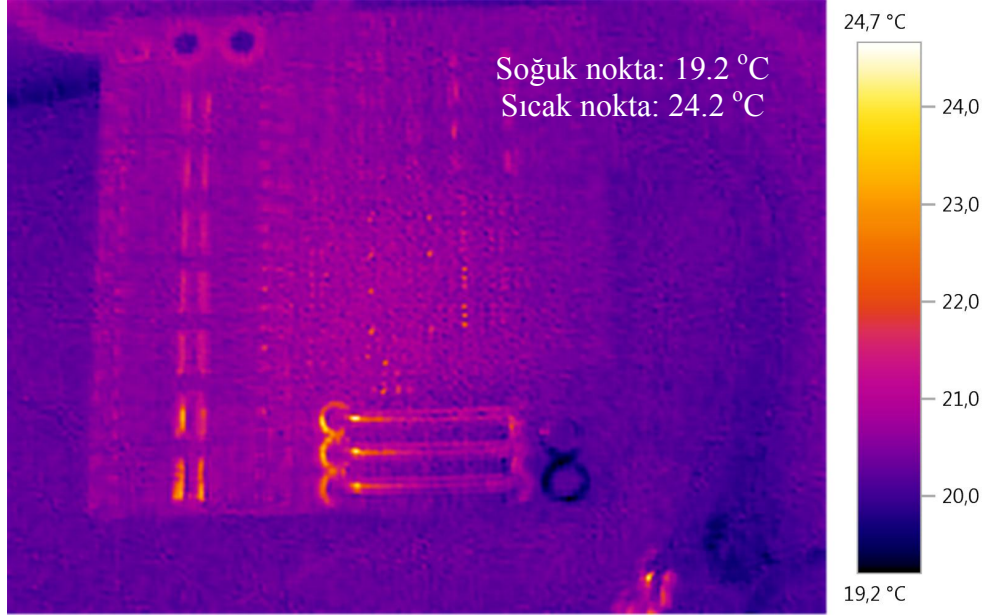


Şekil 6.40. Batarya konfigürasyonlarının karşılaştırılması

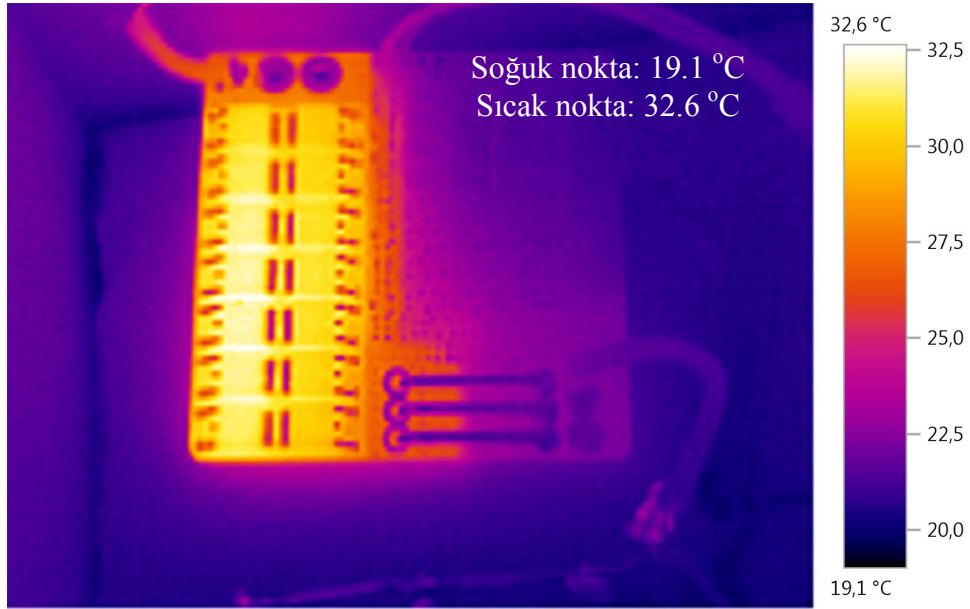
6.7. Batarya Yönetim Sisteminin Isıl Davranışı

BYS elektronik devrelerden oluşan bir yapıdır. Bataryadan çekilen enerjinin ölçüm, kontrol ve dengelemesini yapma görevlerini icra ederken, üzerinden yüksek miktarda

akım geçer. Deneyler sırasında BYS üzerinden geçen akımların ısı üretimine katkısı analiz edilmiştir. Yapılan deneyin başlangıcında BYS ortam ile aynı sıcaklıktadır (*Şekil 6.41*).



Şekil 6.41. Şarjdan önce BYS sıcaklık dağılımı

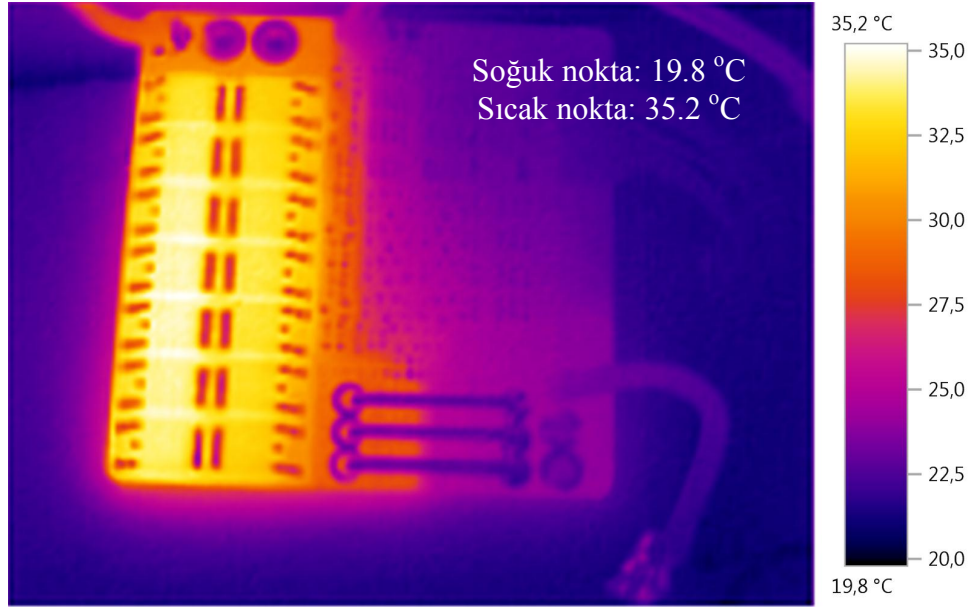


Şekil 6.42. Batarya şarj akımı kesicileri aktif, batarya tam şarj durumunda

Batarya, üst seviyeye kadar BYS üzerinden şarja tabi tutulmuştur. Şarj hücre başına izin verilen 4,2V seviyesine ulaştığında, BYS şarj yolunu kapatmıştır. Şarj devresi BYS üzerinde yer alan paralel bağlı MOSFET üniteleri üzerinden yapılmakta, BYS devre kesmek için MOSFET girişlerine sinyal uygulamaktadır. MOSFET yapısı gereği, girişinde besleme olduğunda, üzerinden geçen büyük akıma karşı yüksek seviyede direnç

olarak davranmaktadır. Ancak bu halde bile MOSFET üzerinden çok düşük seviyelerde akım geçmesi mümkündür. Geçen bu “sızma” akımının MOSFET devrelerinin sıcaklığını artırdığı ölçülmüştür (**Şekil 6.42**).

Deşarj deneyi sırasında, şarj yönündeki MOSFET devreleri kapalı olduğundan, deşarj yönüne doğru daha yüksek direnç ve bu direnç üzerinde gerilim düşüşü gözlenmektedir. Batarya deneylerinde deşarjın hemen başında gerilimin düşük başlaması 15.5 V seviyesinde tekrar yükselmesi bu nedene bağlıdır.

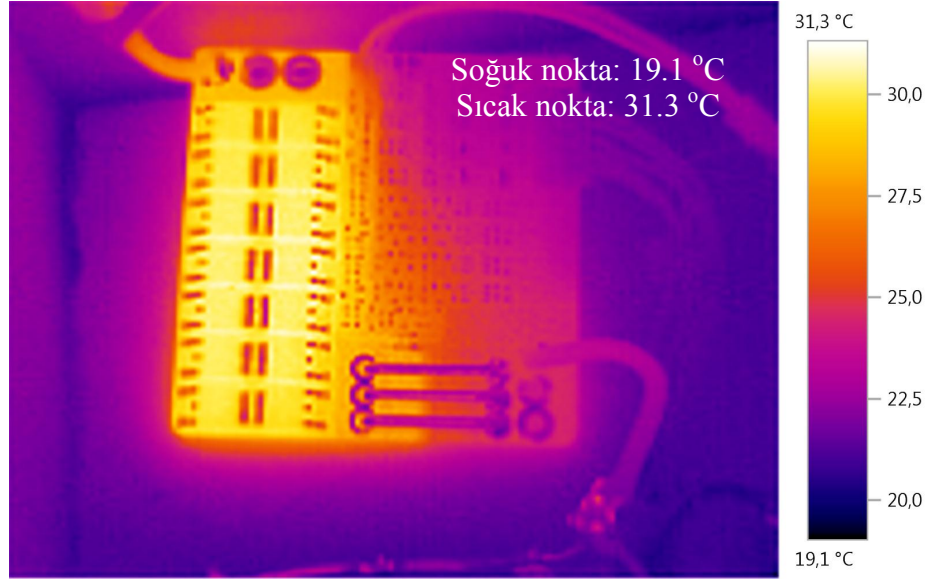


Şekil 6.43. Batarya deşarj oluyor, şarj akım kesicileri aktif

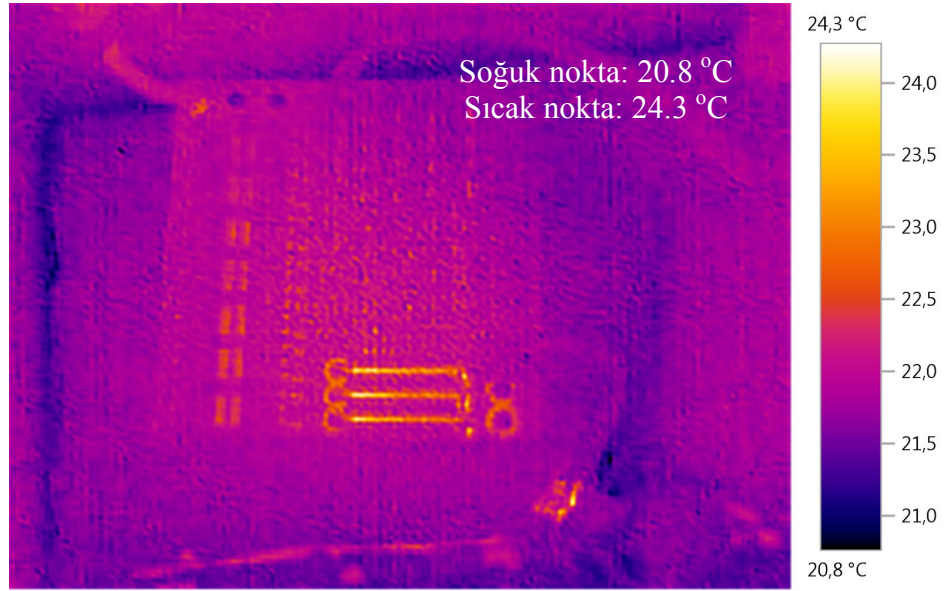
BYS üzerindeki MOSFET devresi sıcaklığı, batarya gerilimi 15.5 V seviyesine inene kadar geçen 7 dakika içinde 33 °C seviyesine ulaşmıştır (**Şekil 6.43**). Deney başladıktan 12 dakika sonra batarya gerilimi 15.5 V altına inmiş ve şarj yönündeki MOSFET devresi beslemesi kesilmiş, devre açılmıştır.

Devrenin açıldığı andan yaklaşık 2 dakika sonra BYS üzerindeki sıcaklık dağılımı **Şekil 6.44** ile gösterildiği gibi 30 °C seviyelerinin altına inmiş, **Şekil 6.45** ile görüldüğü gibi 45 dakika sonra ise batarya ile aynı sıcaklık seviyesine düşmüştür.

BYS üzerinde üretilen ısıнын batarya kullanımı boyunca gelişimini bilmek, batarya entegrasyonu sırasında yerleşim ve soğutma tasarımı açısından önemlidir. Özellikle çok sayıda hücrenin bulunduğu batarya paketlerinde, BYS kartının ısı üreten kısımlarının hücrelere yakın olması durumunda, üretilen bu ısıнын, kendisine yakın olan hücrelerin sıcaklığını artırıp, batarya içinde dengesizliğe neden olabilir.

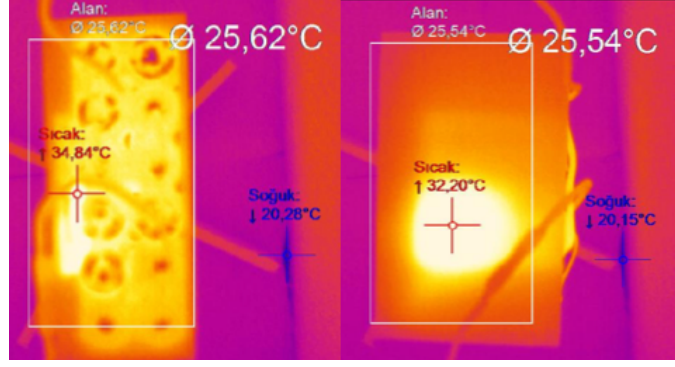


Şekil 6.44. Batarya deşarj oluyor akım kesiciler açıldı



Şekil 6.45. Batarya deşarj oluyor, akım kesiciler 45 dakika önce açıldı

Burada sunulan deneysel çalışma ile BYS üzerinde üretilen ısı, özellikle bataryadan yüksek akımlar çekilmesi durumu veya sıcak ortamda kullanım söz konusu olduğunda, bataryada ilave ısı yük oluşturacağını göstermektedir. Bu nedenle batarya ısı yönetiminin konusu dahilinde BYS tarafından üretilen ısı, da ortamdan uzaklaştırılmasının ele alınması gerekmektedir. BYS tarafından üretilen ısı, da aynı hücrelerdeki gibi bataryadan en verimli şekilde uzaklaştırılması, batarya tasarımının optimizasyon konuları arasındadır.

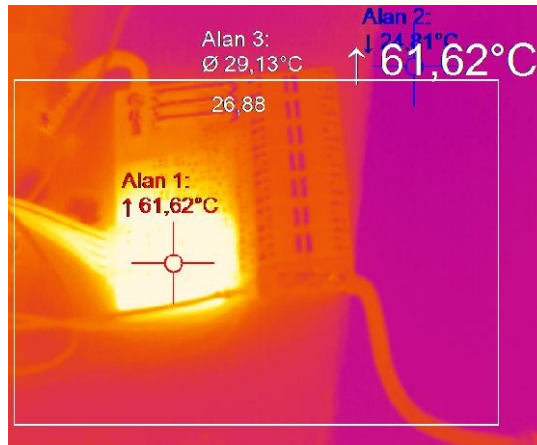


Görsel 6.6. *BYS ısı üretiminin bataryaya etkisi*

Görsel 6.6 ile görüleceği gibi, BYS dengeleme dirençlerinin ürettiği ısı da bataryaya içinde kalmakta ve dengesizliğe neden olabilmektedir. Görselde sol tarafta bataryanın üstten ve sağ tarafta da BYS'nin bulunduğu yan taraftan sıcaklık dağılımının ısı kamera ile alınmış görüntüsü verilmiştir.

Dengeleme dirençleri, seri bağlı hücrelerden enerjisi yüksek olanın enerjisini azaltarak, diğerleri ile aynı seviyede şarj olabilmelerini sağlamak üzere görev yaparlar. Enerjisi yüksek olan hücrenin üzerindeki enerji dengeleme dirençleri üzerinde ısı olarak atmaktadır. Bu dirençler üzerindeki sıcaklık anlık olarak hücre çalışma sıcaklığının çok üstüne çıkabilmektedir. Bu sıcaklığa neden olan dengeleme dirençlerinin, BYS batarya dışında iken alınmış ısı kamera görüntüsü **Görsel 6.7** ile verilmiştir.

Görüleceği üzere, noktasal olarak ölçülmüş 61 °C sıcaklık, hücrenin çalışma sıcaklığının üstündedir. Bu sıcaklığa hücrenin ulaşması halinde, hücre üzerindeki AKA devreden çıkacak ve hücrenin çalışmasını durduracaktır. Bu nedenle bu ısının batarya dışına atılabilmesi kritik öneme sahiptir.

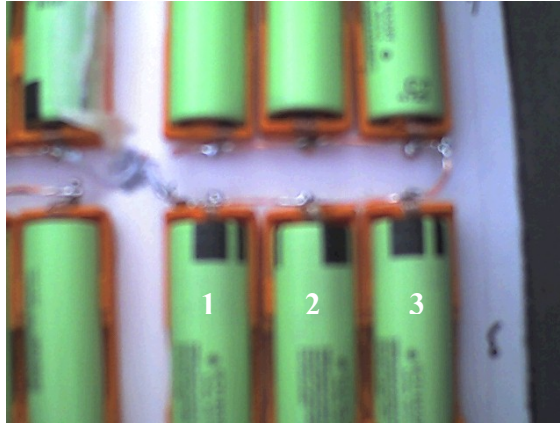


Görsel 6.7. *BYS Dengeleme dirençleri çalışma sırasında*

6.8. Batarya Hücrelerinin Etkileşimi

Batarya paketlerinde paralel kollarda bulunan hücreler, birbirlerini gerilim açısından dengede tutar ve bataryanın talep ettiği enerjiyi doğal olarak dengeli şekilde verirler. Özellikle yüksek enerji kapasiteli bataryalarda çok sayıda hücre paralel olarak bağlı olur. Bu paralel bağlı hücrelerden birisinin devre dışı kalması durumunda, o koldan talep edilen gücü, koldaki diğer hücreler üstelenerek karşılar. Bir paralel kolda bulunan hücrelerden bir tanesinin devre dışı kalması veya daha düşük kapasite ile var olması durumunda oluşan etkilerin incelenmesi amacı ile deney yapılmıştır.

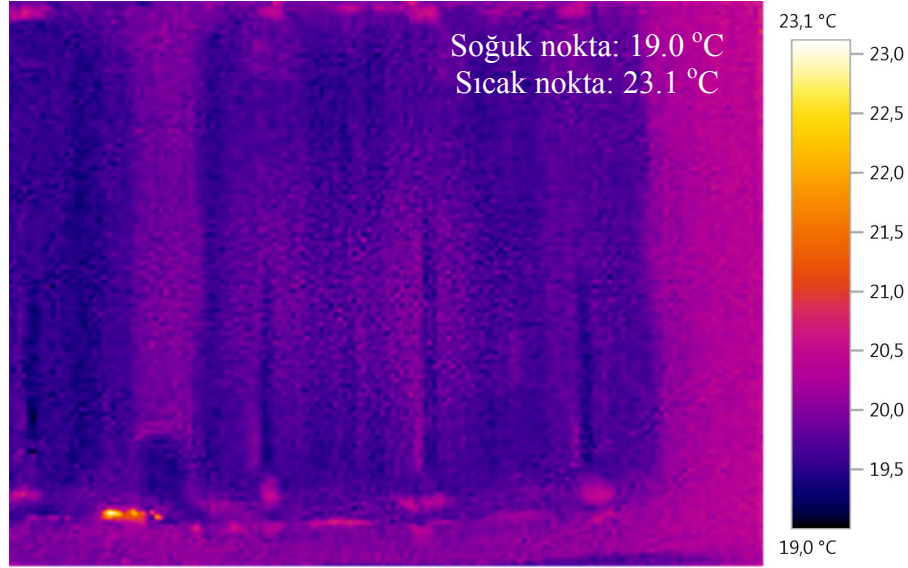
Şekil 6.36 ile gösterilmiş olan batarya paketi 4 seri, 3 paralel konfigürasyonunda 15 V seviyesinden 17 V seviyesine kadar kısa bir şarj tabi tutulmuştur. Bu şarj sırasında 3 numaralı paralel kolda (**Şekil 6.36** ve **Şekil 6.46**) yer alan 1 numaralı hücre çıkarılarak, paketin 15 V seviyesindeki değerinde yani 3.75 V seviyesinde tutulmuştur. Diğer hücreler 4.25 V seviyesine çekilmiştir. Şarj başlangıcında hücreler arası sıcaklık ihmal edilebilir düzeydedir (**Şekil 6.47**).



Şekil 6.46. 3 numaralı paralel kol ve hücre numaraları

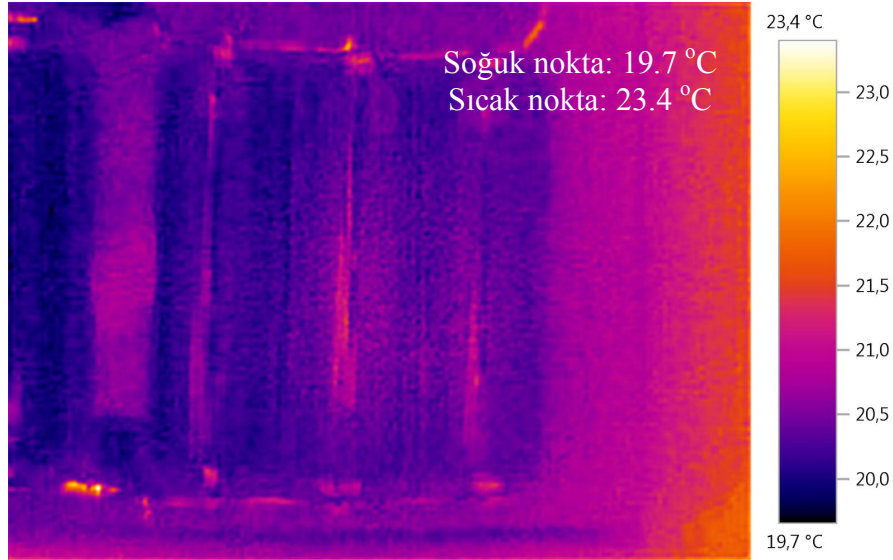
Bataryanın 17 V seviyesinde şarj olduğunda paralel kolda yer alan hücreler arasında sıcaklık farkı oluşmaya başlamıştır (**Şekil 6.48**). Sıcaklık farkı 0.4 °C olarak ölçülmüştür.

Batarya 17V seviyesinden 1A (C/10) ile deşarj edilmeye başlanmıştır. Şarjın hemen başlangıcında, deşarj akım oranı çok düşük olmasına rağmen 3 numaralı paralel kolda deşarj olmayan hücre ile deşarj olan hücreler arası sıcaklık farkı 1 °C seviyesine ulaşmıştır (**Şekil 6.49**).



Şekil 6.47. Deneyin başlangıcında 3 numaralı paralel kol

Bataryanın deşarjı sırasında, 3 numaralı paralel kolda yer alan 1 numaralı hücre devre dışı olup, bataryanın enerji ihtiyacını bu paralel kolda yer alan diğer iki hücre, bataryada yer alan diğer hücrelere oranla daha fazla deşarj olarak vermiştir.

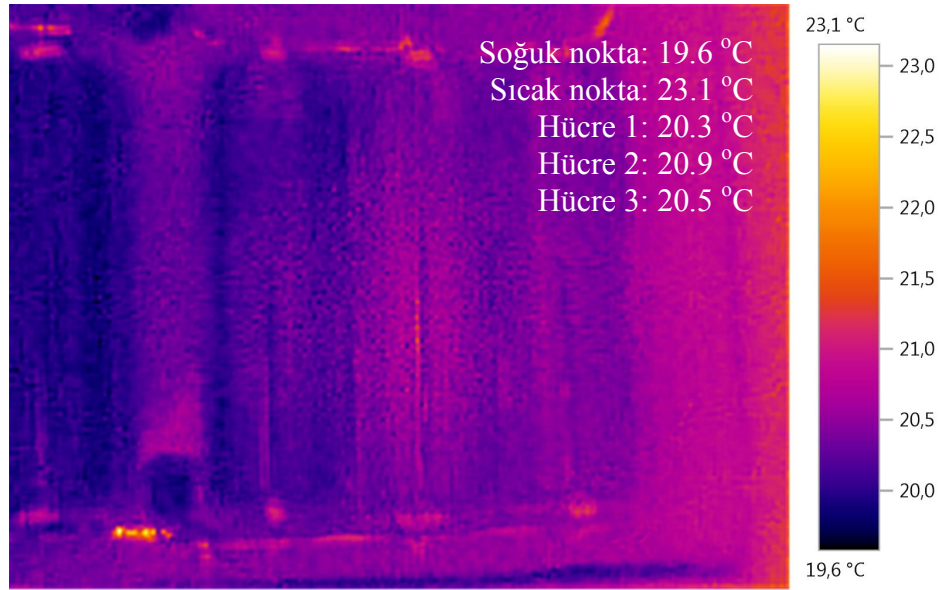


Şekil 6.48. Şarj sonunda 3 numaralı paralel kol

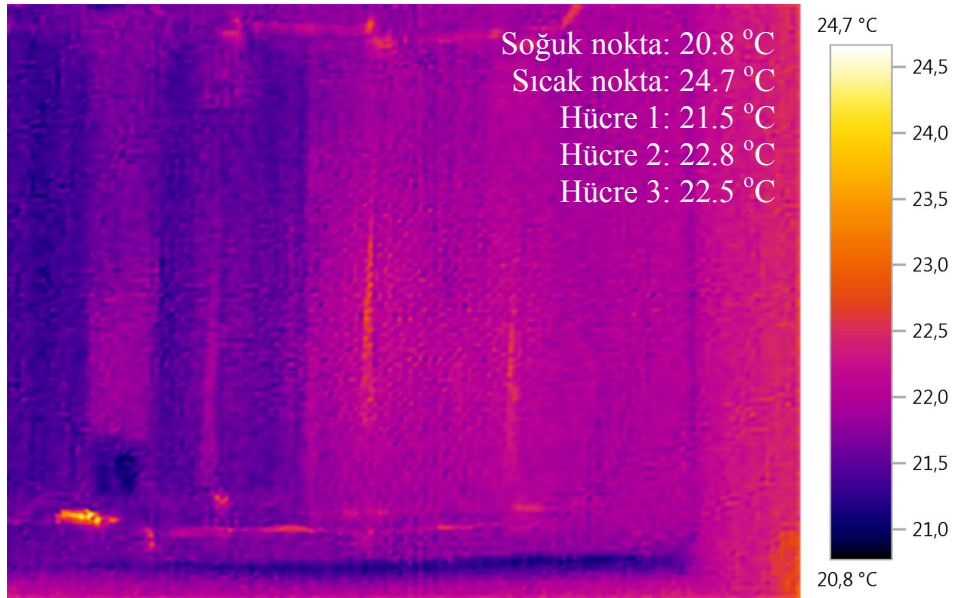
Bu iki hücre üzerinden çekilen akımın yüksek olmasından dolayı, bataryanın diğer hücrelerine oranla daha fazla ısı üretmiştir. Deşarj deneyinin ilk saati sonunda paralel kolun birinci hücresi ile diğer ikisi arasındaki sıcaklık farkı 2 °C'ye ulaşmıştır (*Şekil 6.50*).

Deşarj deneyinin birinci saati dolduğunda, 3 numaralı paralel kolun birinci hücresi, batarya ile tekrar irtibatlandırılmıştır. Bu sürede bataryanın diğer paralel kollarındaki

hücrelerin gerilimi 3.81V ve 3 numaralı paralel koldaki hücrelerin gerilimi 3.79 V seviyesine inmiştir.

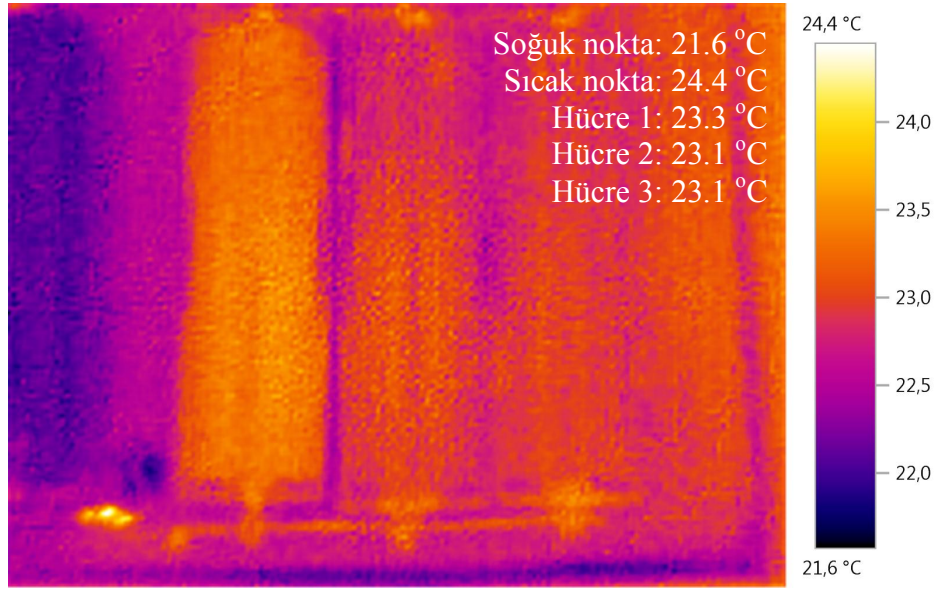


Şekil 6.49. Deşarjın 5. dakikasında 3 numaralı paralel kol

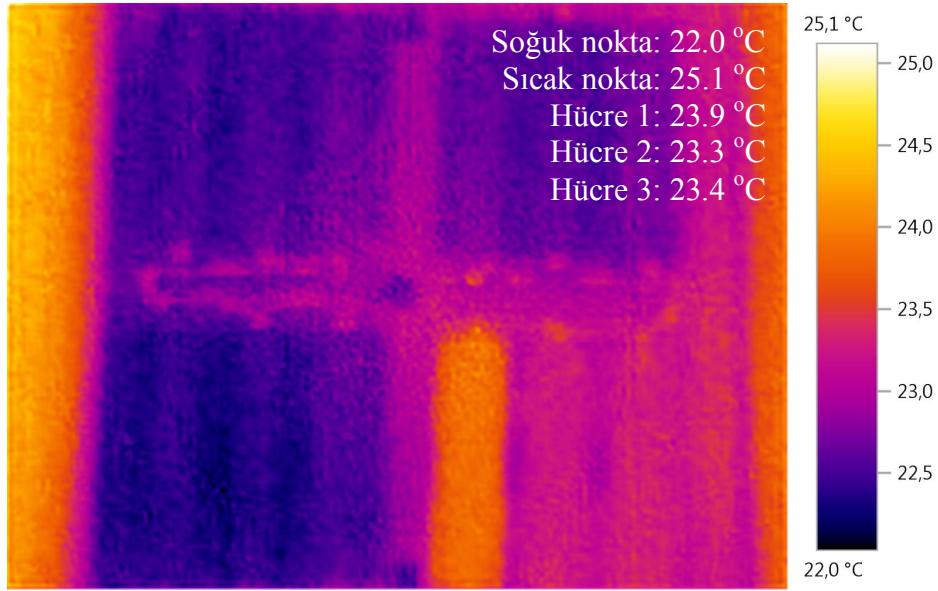


Şekil 6.50. Deşarjın başlangıcından 1 saat sonra 3 numaralı paralel kol

Birinci hücre bağlantısı 3.75 V seviyesinde yapıldığında, öncelikle paralel koldaki komşu hücreleri hem batarya enerjisini vermeye hem de paralel koldaki hücrenin gerilimini yükseltmeye çalışmıştır. Bağlantısı yapıldığında aniden komşu hücreler tarafından şarj edilmeye başlanan 1 numaralı hücre aniden ısı üretmeye başlamıştır. Bağlantıdan iki dakika sonra hücrenin sıcaklığı paralel koldaki komşusundan 0,6 °C ve diğer kollardaki hücrelerden 1,6 °C daha yüksektir (Şekil 6.51).

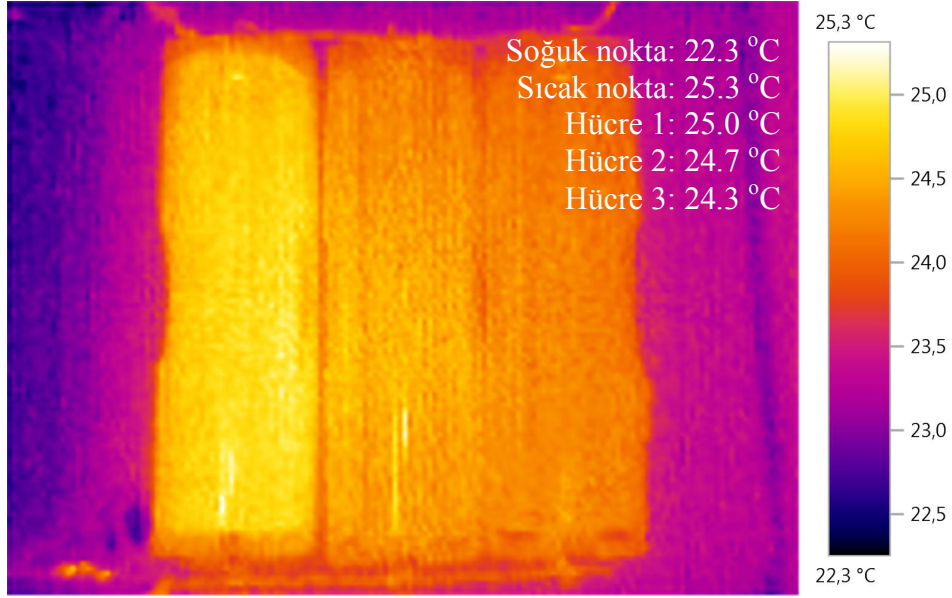


Şekil 6.51. 1 numaralı hücrenin bağlantısından 2 dakika sonra paralel kol

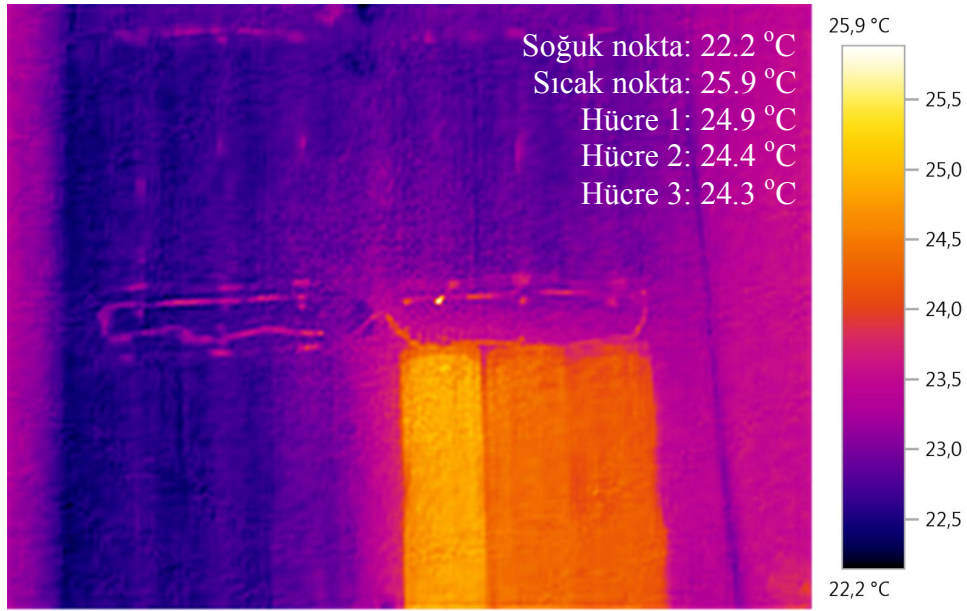


Şekil 6.52. 1 numaralı hücre bağlandıktan 2 dakika sonra tüm batarya

Paralel koldaki 1 numaralı hücrenin bağlanmasından 15 dakika sonra, paralel komşuların hem batarya enerjisini sağlamak hem de paralel hücrenin şarjını tamamlamak için verdikleri fazla akım neticesinde diğer batarya hücrelerinden hızlı ısındığı görülmektedir. Paralel hücrelerin ikisinin aynı anda verdiği akım, 1 numaralı hücreyi şarj etmeye devam etmekte, 1 numaralı hücrenin diğer komşularının üzerinden geçenden 2 kat daha yüksek akıma maruz kalmakta ve dolayısı ile iki katı ısındığı gözlenmektedir (Şekil 6.53).

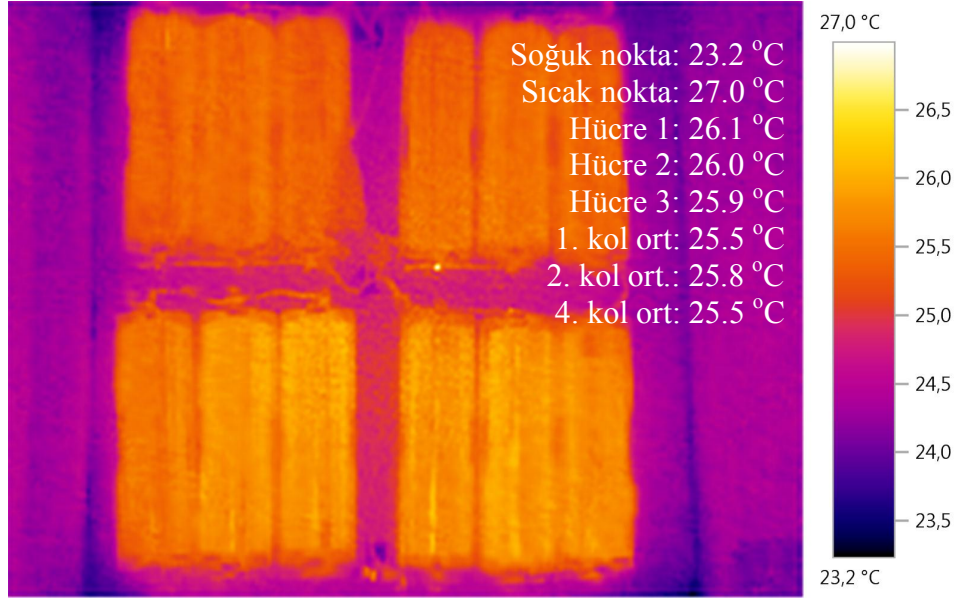


Şekil 6.53. 1 numaralı hücrenin bağlanmasından 15 dakika sonra



Şekil 6.54. 15. Dakikada 3 numaralı paralel kol ve batarya

Paralel kol kendi içinde aynı enerji seviyesine ulaştıktan sonra, her üç hücre de batarya deşarj enerjisini eşit olarak karşılamaya başlamıştır. Deşarj oranının görece düşük olmasından dolayı hücreler soğumaya fırsat bulmuştur. Deşarj deneyinin 3 saat 45 dakika sonrasında batarya hücreleri yaklaşık olarak aynı sıcaklık seviyesine ulaşmış görülmektedir. 3 numaralı paralel kol ile diğerleri arasındaki sıcaklık farkı en yüksek 0,5 °C seviyesine gelmiştir **Şekil 6.55**



Şekil 6.55. 1 numaralı hücrenin bağlanmasından 3 saat 45 dakika sonra

Deneyin sonunda, 3 numaralı paralel kolun gerilim seviyesinin diğer üç koldan 0.01 V daha düşük olduğu ölçülmüştür.

6.9. Batarya Enerji Verimi Analizi

Deneylerde kullanılan dört farklı üreticiye ait hücreler ile yapılan çalışmalar sonucu, bu hücrelerin şarj ve deşarj sırasında bataryaya verilen ve ondan çekilen enerji miktarları hesaplanmıştır. Deneysel olarak ölçülen hücrelerin enerji değerleri ve bu değerler üzerinden Denklem (5.32) kullanılarak hesaplanan verimleri **Çizelge 6.3** ile verilmiştir.

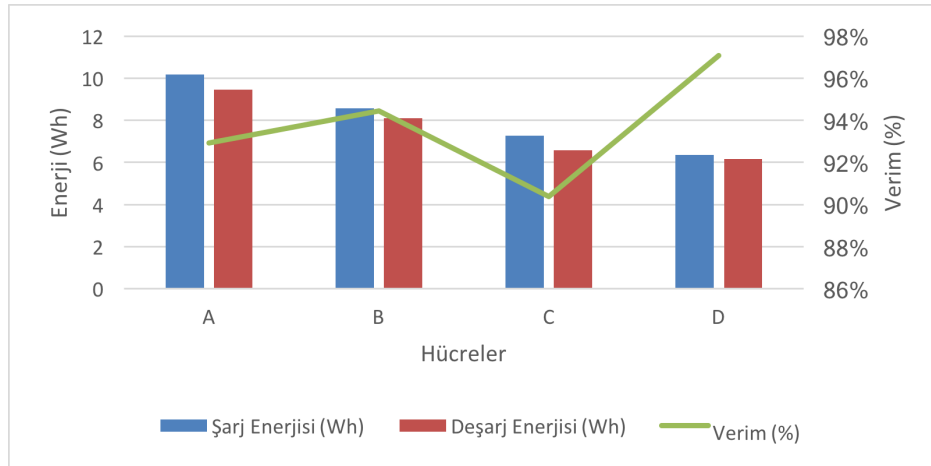
Bu hücrelerden sonuncusu 26650 ebatlarında LFP tipi hücredir. Bu hücre ile verimin diğerleri ile kıyaslanabilmesi için deney yapılmıştır. Görüleceği gibi, hacim olarak büyük olmasına rağmen, hücrenin enerji yoğunluğu diğerlerine nazaran düşüktür.

Çizelge 6.3. Hücrelerin enerji değerleri ve verimleri

Üretici	Şarj Enerjisi (Wh)	Deşarj Enerjisi (Wh)	Verim (%)
A	10.17	9.45	92.93%
B	8.59	8.11	94.44%
C	7.28	6.58	90.39%
D	6.37	6.18	97.08%

Deney sırasında şarj ve deşarj döngüleri arasında soğuma süresi dışında bekleme olmamış, ortam sıcaklığı bu dönemde sabit tutulmuştur. Bu şekilde bataryanın kendi

kendine deşarj olmasının önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Hücreler 1 A sabit akım ile şarj edilmiş ve yine 1A sabit akım altında deşarj edilmiştir.



Şekil 6.56. Farklı hücrelerin verim ifadelerinin karşılaştırılması

Her bir hücrenin şarj ve deşarjı sırasında tersinmeyen reaksiyonlarda harcanan enerji miktarları **Çizelge 6.4** ile verilmiştir. Hücrelerin ortalama verimi %92 üzerinde görülmektedir. Bu sonuçlar, Literatürde yer alan elektrokimyasal enerji depolama araçları arasında Lityum-iyon bataryaları ayrı bir yere taşımaktadır.

Çizelge 6.4 ile verilen kayıp enerjiler, hücrelerin şarjı sırasında verilen ancak deşarj sırasında hücrelerden geri alınamayan enerji miktarıdır. Bu kayıp enerji, batarya içinde elektrokimyasal olarak depolanma sırasında tersinir olmayan reaksiyonlar ile ısı olarak ortama verilen enerjinin toplamından oluşmaktadır. **Şekil 6.56** ile verilen grafikte görüleceği gibi, enerji kapasitesi düşük olmasına rağmen, LFP tipi hücreler çalışma sırasında daha az ısı ürettiği için daha yüksek verim ortaya koyabilmektedir.

Çizelge 6.4. Hücrelerin şarj/deşarjında oluşan kayıp enerji miktarları

Üretici	Kayıp Enerji (Wh)
A	0.72
B	0.48
C	0.70
D	0.19

Denklem (5.33) doğrultusunda bataryaların ekserji verimleri (ψ), **Çizelge 6.3** ile verilen enerji verimlerine eşit olmaktadır.

Bataryaların enerji verim analizleri farklı şarj ve deşarj oranları ile gerçekleştirilmiştir. Verim analizlerinde ilke önce 12V 10Ah kapasiteli, geliştirilen batarya kullanılmıştır. Batarya üzerinde BYS kayıplarının da etkilerinin izlenebilmesi

için entegre edilmiş batarya sistemi ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Bataryanın 1/4C (2.5A) ile şarjı sırasında verilen enerji miktarı 120.41 Wh, 1/3 C (3.2A) ile şarjı sırasında ise 120.42 Wh olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler hem birbiri hem de bataryanın teorik enerji kapasitesi ($12V \times 10Ah = 120 \text{ Wh}$) ile paraleldir. Diğer yandan farklı deşarj oranlarında bataryadan çekilen enerji miktarları hesaplanmıştır. Bu değerler **Çizelge 6.5** ile verilmiştir.

Çizelge 6.5. Batarya deşarj oranlarına göre hesaplanan verim değerleri

Deşarj Akımı (A)	Akım Oranı (C)	Çekilen Enerji (Wh)	Verim (%)	Kayıp Enerji (Wh)
2.5	1/4	116.75	96.93	3.70
3.2	1/3	118.35	98.26	2.06
4.0	2/5	111.99	93.01	8.42
5.0	1/2	115.85	96.21	4.56

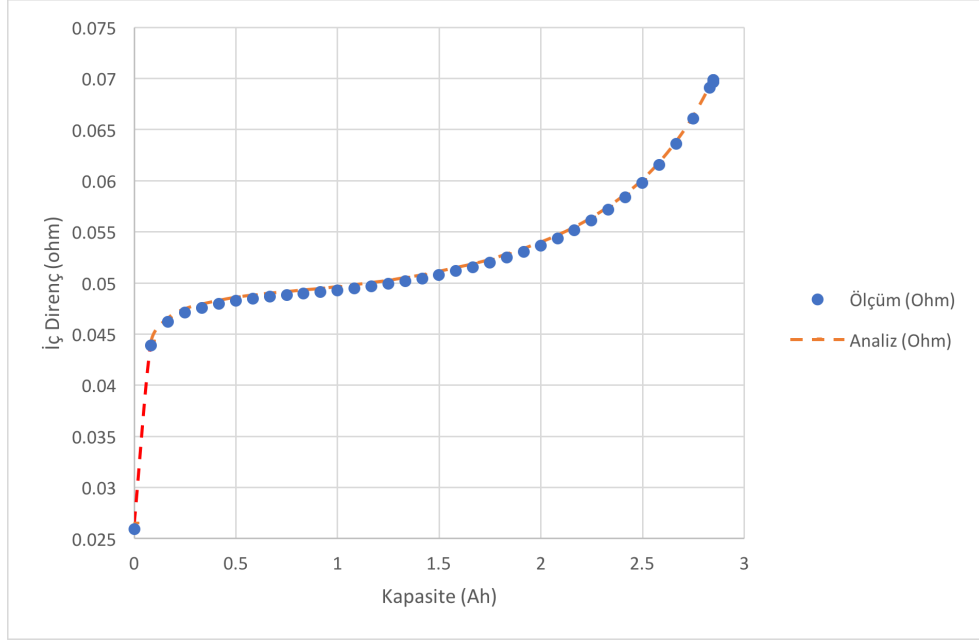
Çizelge 6.5 ile verilen ifadelerden bataryaların veriminin deşarj akımına doğrudan bağımlı olmadığı görülmektedir. Batarya üzerindeki enerjiyi uygun sıcaklık aralığında çalıştığı sürece %90 üzerinde verimlerle verebilmektedir. Elde edilen bu sonuç, literatürde yer alan değerler ile paraleldir. Burada verilen sonuçlar çok sayıda deney arasından ortalama olarak verilmiştir.

Geliştirilen bir diğer batarya olan 24V, 7S 4Ah kapasiteli batarya ile yapılan verim testlerinde, batarya BYS'nin çalışma sınırları içinde 1A (1/4 C) şarj edilmiş, ardından da yine 1A ile deşarj edilmiştir. Şarj sırasında bataryaya verilen enerji 75.50 Wh ve deşarj sırasında çekilen enerji 73.00 Wh olarak hesaplanmıştır. Bu değerler sonucunda bataryanın enerji verimi Denklem (5.26) doğrultusunda %96.69 olarak hesaplanmıştır.

6.10. Analiz ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

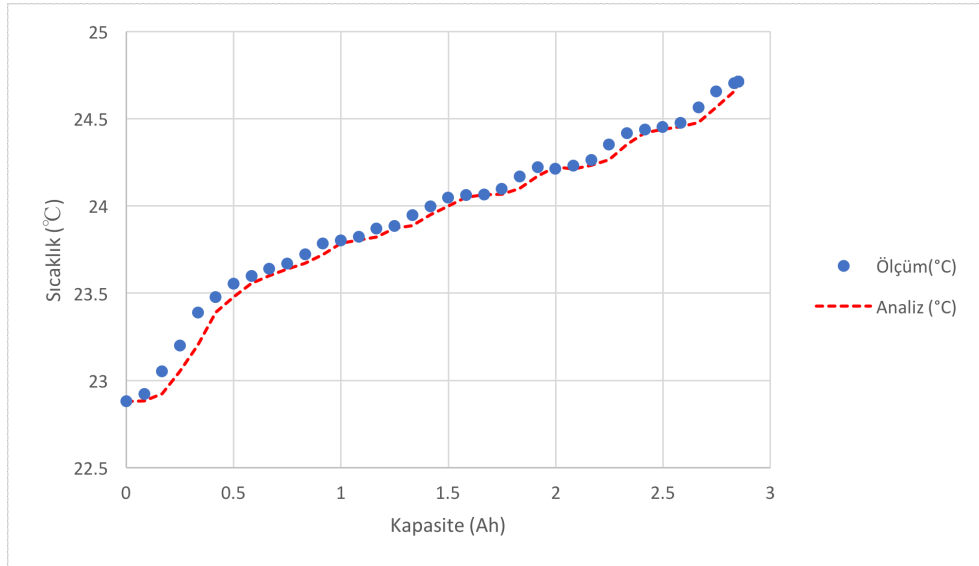
Deney sırasında kullanılan ölçümlerden akım, açık devre gerilimi, yük altında hücre gerilimi ve yüzey sıcaklığı değerleri üzerinde model çalıştırılarak bir tablo oluşturulmuştur. Batarya sıcaklığı modeli (BSM) ile ölçüm sonuçları daha sonra aynı grafik üzerinde gösterilmiştir.

Deneyler esnasında 1C ile şarj sırasında elde edilen değerler ve bu değerler kullanılarak Denklem (5.20) ile elde edilen iç direnç hesaplama sonuçları **Şekil 6.57** ile gösterilmiştir. Görüleceği üzere, hesaplanan ve ölçülen iç direnç değerleri yüksek uyum içindedir. Sonraki aşamada, hesaplanan bu iç direnç değerleri, sıcaklık değişiminin modellenmesinde kullanılmıştır.



Şekil 6.57. 1C ile şarj sırasında iç direncin kapasite ile değişimi

Deney sırasında uygulanan 1C şarj altında, bataryanın sıcaklık değişiminin ölçüm sonuçları ve Denklem (5.30) ile verilmiş analiz ile yapılan hesaplamalar **Şekil 6.58** ile verilmiştir. Buradan da görüleceği üzere, analiz, Ohmic ısıtma etkisi hesabı yolu ile bataryanın sıcaklık değişimini yeterli doğrulukla belirleyebilmektedir.



Şekil 6.58. Kapasite boyunca ölçüm ve analiz sonuçlarının kıyaslanması

Önerilen model, içerdiği çok az sayıda matematik işlem ve parametre sayesinde, çok düşük güçlü bir işlemci üzerinde dahi yaklaşık gerçek zamanlı çalışabilecek yapıdadır.

6.11. Bulgular

Tez çalışmaları sırasında ulaşılan bulgular aşağıda sıralanmıştır.

- Havacılık alanında elektrik kullanımı tarihsel bir zorunluluk olarak hızla artmaktadır. Bu nedenle elektrik enerjisi depolama aracı olarak bataryaların havacılık uygulamalarında karşılaşılan gereksinimler doğrultusunda geliştirilmesine ihtiyaç vardır.
- Lityum bataryalarda ısı üretimi ve mekanizmaları deneysel olarak incelenmiştir. Tersinir ve tersinmez ısı etkileri analiz edilmiştir. Tersinmez ısıya dayalı model ve deney sonuçlarından bataryalarda tersinir ısı üretiminin, tersinmez ısıya oranla düşük olduğu ölçülmüştür.
- Farklı kapasitelerde deney düzenekleri geliştirilmiş, bu düzeneklerin yönetimi, güvenliği ve kayıt alınması için deney yönetim ve kayıt yazılımı geliştirilmiştir. Yazılım bir günden uzun süren deneyler için sınır koşulları izleyerek, izin verilen dışında sonuçlar gözlemlendiğinde deneyi durduracak yönetim algoritmasına sahiptir.
- Hücrelerin ısı özelliklerinin yanı sıra elektrik bağlantı elemanlarının da ısı özelliklerinin önemli olduğu bulunmuştur. Hücre testinde sadece 1A akım altında iletken telin sıcaklığının batarya sıcaklığına yakın değerlere ulaştığı ölçülmüştür. Batarya ısı tasarımında iletken elemanların da girdi olarak dikkate alınması gerektiği ortaya konmuştur.
- Literatürden ve daha önce yapılan deneysel çalışmalardan yola çıkılarak ısı yönetim algoritması ve buna dayanarak batarya sıcaklık modeli (BSM) oluşturulmuştur. Elde edilen tersinmez ısı üretimine dayalı hızlı modelleme ile batarya sıcaklığının yüksek doğrulukla hesaplanabildiği deneysel olarak gösterilmiştir.
- Farklı üreticilere ait hücrelerin deneysel olarak ısı özellikleri incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde her üreticiye ait ve farklı elektrokimyalara sahip hücrelerin farklı ısı özellikler gösterdiği görülmüştür. Bu farklılaşan ısı özelliklere rağmen her hücrede kayıp enerjinin ısı olarak atıldığı görülmüştür. Isıl mekanizmaların hemen tüm hücrelerde benzer olduğu ve nominal geriliminden yüksek SoC seviyelerinde hücrelerin endotermik davranış gösterdiği görülmüştür. Diğer yandan yüksek kapasiteli bataryalardan düşük

akımlarla çekilen gücün batarya sıcaklığına belirgin etki yapmadığı, ancak akım değerinin karesi ile orantılı şekilde ısı artışına neden olduğu görülmüştür. Deney çalışması sırasında, literatürde çoklukla yer alan şarj sırasında soğuma, deşarj sırasında ısınma ifadelerinin, bataryanın SoC seviyesine bağlı olduğunu, bataryanın şarj veya deşarj durumuna bağlı olmadığı ölçülmüştür.

- Bataryalarda ısı kaçış etkisinin analizi için deney yapılmıştır. Hücre üzerinde bulunan koruma tedbirlerinin, yüksek akım ve sıcaklıkta hücre bağlantısını keserek, tehlikeli sonuçların ortaya çıkmasına engel olmuştur. Özellikle havacılık uygulamalarında silindirik tipte 18650 hücrelerin kullanımının emniyet açısından gerekli olduğu değerlendirilmiştir.
- Batarya yönetim sisteminin ısı davranışı incelenmiş, batarya ısı yönetimi açısından değerlendirilmiştir. BYS'nin de ısı kaynağı olduğu görülmüş ve batarya tasarımında bir girdi olarak ele alınması gerekliliği tespit edilmiştir.
- Hava araçları için batarya gereksinimleri tanımlanmış ve bu gereksinimlere uygun bir batarya geliştirilmiştir. Geliştirilen batarya akım kesme, kısa devre ve gerilim ile sıcaklık limit değerlerine karşı korumalı bir BYS ile entegre edilmiş, 3D yazıcı ile üretilen bir kutu imal edilerek entegrasyonu yapılmıştır.
- Bataryada yer alan paralel kollara ait hücrelerin davranışı ve aralarındaki etkileşim incelenmiş, sıcaklık açısından davranış özellikleri değerlendirilmiştir. Paralel kolda hücrelerin birbirini yerine görevleri alabildiği, düşük enerjili hücrelerin paralel bağlı hücreler ile şarj edildiği deşarj altında ısı değişimleri olarak ölçümlenmiştir.
- Bataryanın ısı davranışı gözlenmiş, farklı kapasiteler arasında deneysel olarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Batarya paketi ile yapılan deneylerde bataryaların sıcaklığının aynı SoC değerinden itibaren daha hızlı yükseldiği (14 V ve altında) ölçülmüştür. İlk batarya 3.2 Ah kapasiteli olup 2 saat 13 dakikada, 6.4 Ah kapasiteli ikinci batarya 4 saat 40 dakikada ve 9.6 Ah kapasiteli üçüncü batarya ise 6 saat civarında deşarj olmuştur. Bataryaların her bir deneyde en yüksek sıcaklığının 30 °C olduğu ölçülmüştür. Bataryaların zamana göre ısı üretimi kapasite arttıkça azalmakta, ısıyı ortamdan uzaklaştırmak için gerekli enerji seviyesi de daha düşük olmaktadır. Hava aracında ısı yönetiminin getireceği ilave enerji ve ağırlık yükünü azaltmak için, kullanılacak

bataryaların deşarj derinliğinin (DoD), mümkün olduğunda nominal gerilim üzerinde seçilmesinin gerektiği görölmüştür.

- Farklı üreticilere ve elektrokimyasal özelliklere ait bataryaların şarj sırasında aldıkları ve deşarj sırasında verdikleri enerjileri kıyaslanmış ve verimleri elde edilerek karşılaştırılmıştır. Lityum bataryalarda verimlerin %90 üzerinde ve ortalamasının %93 olduğu hesaplanmıştır.
- Hücrelerin, üreticileri tarafından ifade edilen kapasitelerde ve gerilim aralığında çalıştırılmasının pratik olmadığı, bunun yerine yüksek SoC seviyelerinde çalıştırılmasının ısı yönetim gereksinimi ve batarya yönetimi açısından daha etkin olacağı görölmüştür.
- Bataryaların deşarjı ile bataryadan çekilen enerji miktarının ve veriminin 1C altındaki akımlarda, deşarj akım oranına bağlı olmadığı hesaplanmıştır.
- Enerji kapasitesi düşük olmasına rağmen, en iyi ısı özellikler LFP elektrokimyasındaki hücreler tarafından sağlanmıştır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde, bir önceki bölümde detayları verilen ve sıralanan bulguların analizi ile elde edilen sonuçlar verilmiştir. Ardından bu çalışma bulguları sonucunda, bu çalışmanın üzerine inşa edilebilecek izleyen araştırma konularına ilişkin öneriler sıralanmıştır.

7.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında bataryaların havacılık alanında etkin ve güvenli kullanımı için gerekli parametreler belirlenmiştir. Belirlenen bu parametrelerden ısı kaçış, yaşlanma ve etkin ısı yönetim konuları incelenmiştir. Uçaklarda kullanıma uygun iki ayrı terminal geriliminde ve üç ayrı elektrokimyasal hücre kullanılarak toplam dört ayrı batarya geliştirilmiştir. Hücre ve batarya seviyesinde kapsamlı deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bulguları bir önceki bölümde sıralanmıştır. Bu bulgulara dayanılarak aşağıdaki sonuçlar sıralanmıştır;

- Bu tez kapsamında, uçaklarda kullanıma uygun iki ayrı terminal geriliminde ve üç ayrı elektrokimyasal hücre kullanılarak toplam dört ayrı batarya geliştirilmiştir. **Görsel 4.9** ile görülen bataryalar Cessna-172 uçağında kullanılabilecek özellikte olup, tez çalışmaları sırasında geliştirilmiştir. Bu bataryalar, şu an kullanılan bataryalardan yarı yarıya daha hafif olup, havacılık açısından önem arz etmektedir. Bundan sonraki aşamada, geliştirilen bu bataryanın endüstriyelendirilmesi söz konusu olabilecektir. Geliştirilen bataryalar farklı kapasite ve elektrokimyalarla kullanılabilecek niteliktedir.
- Değişik batarya türleri arasından lityum tabanlı hücrelerin enerji verimlerinin literatürde verildiği gibi %90 üzerinde olduğu doğrulanmıştır. Havacılık uygulamalarında verim ve enerji sığası açısından lityum tabanlı hücrelerin tercih edilmesi gerekliliği görülmüştür.
- Bataryalarda, şarj ve deşarj arasındaki enerji farklılıklarının, tersinmeyen reaksiyonlardan kaynaklı oluşan ve ortama verilen ısı olduğu görülmektedir. Batarya kapasitesinin yüksek tutulması ile çekilen akımın düşük C oranlarında olmasının, bataryada açığa çıkan ısının düşük olmasını, dolayısı ile verimin yüksek olmasını sağlayacağı görülmektedir. Burada enerji verimi ile batarya maliyeti arasında optimizasyon konusu olacaktır.

- Havacılık uygulamaları için batarya tasarımı, enerji kapasitesinin yanı sıra kullanılacak hücrelerin, BYS ve bağlantı elemanlarının ısı özellikleri gözönüne alınarak yapılmalıdır. Isıl yönetimin toplam ağırlığı, mevcut uygulamalarda bataryanın %10-25 kadar ağırlığa ulaşmakta olup, bunun yanı sıra enerji tüketimine de sebebiyet vermektedir. Daha yüksek batarya kapasitesi kullanımı, bataryadan daha düşük C oranlarında akım çekilmesini, dolayısı ile daha az ısınma ortaya çıkarmaktadır. Diğer yandan yüksek kapasite kullanımında, bataryanın endotermik bölgede çalıştırılması imkanı da doğuracağından daha az ısı yük ve ısı yönetim ihtiyacı doğuracağı görülmüştür. Daha yüksek kapasite aynı zamanda daha güvenli uçuş anlamına da gelmektedir. Bu noktada ısı yönetim sisteminin ağırlık ve enerji yükü ile ilave batarya ağırlığı arasında optimizasyon yapılması gerekmektedir. İlave batarya kapasitesinden dolayı ağırlığının %10-25 kadar artması ile ısı yönetiminde en azından aktif soğutma kısmına ihtiyacın ortadan kalkacağı büyük kapasiteli uygulamalarda, tercihin batarya kapasitesinin artırılmasından yana kullanılabileceği görülmektedir.
- Havacılık uygulamalarında bataryada kullanılacak hücrelerin, üzerinde kendi emniyet tedbirlerini de barındıran silindirik tip hücrelerden seçilmesinin, emniyet açısından BYS ile gelen tedbirlere ilave olacağı ve BYS çalışmasa dahi sistemin tehlikeli durumlara meydan vermesine engel olacağı görülmüştür. Havacılık uygulamalarında sorunlara neden olan diğer tip hücreler yerine silindirik tip hücre kullanımı emniyetli seçenek olarak belirlenmiştir.
- Hücrelerin BYS gibi hücre kapasitelerinin tek tek izlenmeden şarj edilmesinin tehlikeli durumlara neden olduğu deneysel olarak da gözlenmiştir. Seri bağlı hücrelerin şarjı sırasında BYS kullanımı güvenlik açısından zorunludur.
- Batarya kapasitesinin artırılarak, bataryadan çekilen akımın C oranının düşürülemediği uygulamalarda, hücre elektrokimyası olarak LFP seçilmesinin, bu tür bataryaların ısı özelliklerinden dolayı, ısı yönetime olan ihtiyacı düşüreceği, anılan hücrenin işletme boyunca sabit sıcaklıkta çalıştığı görülmüştür. Bu tip hücrelerin kullanımı ile batarya ısı yönetiminin etkinliğinin artırılacağı değerlendirilmektedir. Bu hücrenin kullanımında

dikkat edilecek önemli nokta, hücrenin düşük SoC seviyesinde çalıştırılmamasıdır.

- Geliştirilen analiz ile bataryanın akıma ve hesap edilen iç dirence bağlı olarak sıcaklık değişimi yüksek doğrulukla izlenebilmiştir. Bu modelin kullanımı, ısıl yönetimin gerekli olduğu zamanda devreye alınması ve etkin kullanımı ile verim artışı elde edebilmenin mümkün olacağı değerlendirilmektedir.

7.2. Öneriler

Bu tez çalışmasını izleyen zamanda aşağıda yer alan başlıklarda çalışmalar yapılması değerlendirilmelidir

- Bataryada paralel bağlı hücrelere ilişkin mekanizmalar ve bunların ısıl etkilerinin analizi yapılmalıdır.
- Batarya verimlerinin hesaplanmasında hücre dengelemenin etkisi deneyse ve sayısal analizler yolu ile incelenmelidir.
- Batarya yönetim sisteminin gerek devre kesicilerinden gerek dengeleme dirençleri ile neden olduğu ısının hücreler üzerindeki etkisi incelenmelidir.
- Bataryaların uçuş profiline benzer şartlandırılmış ortam ve yükleme altında deneyleri yapılmalı ve batarya performansının hangi uçuş şartlarında nasıl davrandığı analiz edilmelidir.
- Hücrelerde gözlenen nominal gerilim civarındaki tipik davranışın ileri seviye analizi ve karakterizasyonu farklı akım oranları altında çok sayıda tekrara dayalı deneylerle yapılmalıdır.
- Batarya verimimin şarj yöntemi ve şarj sırasındaki şartlara göre değişimi farklı ortam şartları ve şarj rejimleri altında deneysel olarak incelenmeli ve şarj-deşarj arasındaki ilişkiler ortaya konmalıdır.
- Bataryaların ömür devri boyunca neden oldukları toplam emisyon ve batarya maliyetleri üzerine çalışmalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] A. Emadi, M. Ehsani, and J. M. Miller (2004), *Vehicular Electric Power Systems Land, Air, and Space Vehicles*. Marcel Dekker.
- [2] IATA (2013), *Technology Roadmap*.
- [3] N. Lapeña-Rey, J. Mosquera, E. Bataller, F. Ortí, C. Dudfield, and A. Orsillo. (2008), “Environmentally friendly power sources for aerospace applications,” *J. Power Sources*, 181, (2), 353–362.
- [4] Y. F. Chen and J. W. Evans, (1996), “Thermal analysis of lithium-ion batteries,” *J. Electrochem. Soc.*, 143 (9), 2708–2712.
- [5] J. C. Shaw, S. D. A. Fletcher, P. J. Norman, and S. J. Galloway, (2012), “More electric power system concepts for an environmentally responsible aircraft (N+2),” *Proc. Univ. Power Eng. Conf.*
- [6] European Union, (2011), *Flight Path 2050. Europe’s Vision for Aviation*, Brussels.
- [7] W. Cao, B. C. Mecrow, G. J. Atkinson, J. W. Bennett, and D. J. Atkinson, (2012), “Overview of electric motor technologies used for more electric aircraft (MEA),” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 59 (9), 3523–3531.
- [8] R. I. Jones, (1999), “The More Electric Aircraft: the past and the future?,” *IEE Colloquium. Electrical Machines and Systems for the More Electric Aircraft*, 1999, 1–4.
- [9] M. Kayton, (2003), “One Hundred Years of Aircraft Electronics,” *Engineering*, 26 (2), 193–213.
- [10] E. Stuhlinger, (1963), “Electric Propulsion Development,” *AIAA J.*, 1 (4), 987–988.
- [11] J. S. Cloyd, (1998), “Status of the United States Air Force’s More Electric Aircraft initiative,” *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, 13 (4), 17–22.
- [12] M. J. Cronin, (1983), “All-electric vs conventional aircraft,” *J. Aircr.*, 20 (6), 481–486.
- [13] A. S. Gohardani, G. Doulgeris, and R. Singh, (2011), “Challenges of future aircraft propulsion: A review of distributed propulsion technology and its potential application for the all electric commercial aircraft,” *Prog. Aerosp. Sci.*, 47 (5), 369–391.
- [14] J. W. Langelaan, A. Chakrabarty, A. Deng, K. Miles, V. Plevnik, J. Tomazic, T.

- Tomazic, and G. Veble, (2013), “Green flight challenge: aircraft design and flight planning for extreme fuel efficiency,” *J. Aircr.*, 50 (3), pp. 832–846.
- [15] R. E. J. Quigley, (1993), “More Electric Aircraft,” in *Proceedings Eighth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*.
- [16] https://en.wikipedia.org/wiki/Brditschka_HB-3. [Erişim tarihi: 08.10.2016].
- [17] www.airbus.com. [Erişim tarihi: 10.10.2016].
- [18] www.boeing.com. [Erişim tarihi: 10.10.2016].
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/McDonnell_Douglas_MD-12. [Erişim tarihi: 10.10.2016].
- [20] https://www.flightglobal.com/pdfarchive/view/1979/1979_2438.html. [Erişim tarihi: 10.10.2016].
- [21] www.pipistrel.si. [Erişim tarihi: 10.10.2016].
- [22] <http://www.flyingmag.com/news/yuneecs-e430-electric-airplane-has-25-hours-endurance>. [Erişim tarihi: 10.10.2016].
- [23] <https://www.flightglobal.com/news/articles/all-electric-eads-cri-cri-takes-to-the-skies-346933/>. [Erişim tarihi: 10.10.2016].
- [24] <http://www.alisport.com>. [Erişim tarihi: 10.10.2016].
- [25] <http://www.airbusgroup.com/int/en/corporate-social-responsibility/airbus-e-fan-the-future-of-electric-aircraft.html>. [Erişim tarihi: 10.10.2016].
- [26] A. Misra, (2016) “Energy Conversion and Storage Requirements for Hybrid Electric Aircraft,” in *40th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites*.
- [27] M. Yildiz, H. Karakoc, and I. Dincer, (2016), “Modeling and validation of temperature changes in a pouch lithium-ion battery at various discharge rates,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 75, 311–314 .
- [28] H. S. Hamut, (2015), “Exergy analysis of electric vehicle battery thermal management systems using transcritical CO₂ vapour compression cycle,” *Int. J. Exergy*, 18 (2), 214–233.
- [29] C. R. Avery, S. G. Burrow, and P. H. Mellor, (2007), “Electrical generation and distribution for the more electric aircraft,” *Proc. Univ. Power Eng. Conf.*, 1007–1012.
- [30] W. Pearson, (1998), “The More Electric/All Electric aircraft - a military fast jet perspective,” *IEE Colloq. All Electr. Aircr.*, 5–5.

- [31] R. T. Naayagi, (2013), "A review of more electric aircraft technology," in *2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*, 750–753.
- [32] P. Wheeler and S. Bozhko, (2014), "The More Electric Aircraft: Technology and challenges.," *IEEE Electrifi. Mag.*, 2 (4), 6–12.
- [33] J. A. Weimer, (1993), "Electrical power technology for the more electric aircraft," *AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference*, 445–450.
- [34] S. J. Cutts, (2002), "A collaborative approach to the More Electric Aircraft," in *International Conference on Power Electronics Machines and Drives*, 2002, 223–228.
- [35] J. A. Rosero, J. A. Ortega, E. Aldabas, and L. Romeral, (2007), "Moving towards a more electric aircraft," *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, 22 (3), 3–9.
- [36] H. Zhang, C. Saudemont, B. Robyns, and M. Petit, (2008), "Comparison of technical features between a More Electric Aircraft and a Hybrid Electric Vehicle," *IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2008*, 1–6.
- [37] H. Zhang, H. Fakham, C. Saudemont, and B. Robyns, (2009), "Power management strategies in a local DC Power Distribution System of More Electric Aircraft with the help of hybrid storage and dissipation systems," *8th International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symposium*, (July), 1–7.
- [38] A. Mcloughlin, (2009), "More Electric – Ready for take off?," in *13th European Conference on Power Electronics and Applications*, 1–7.
- [39] I. Berlowitz, (2010), "All / More Electric Aircraft Engine & Airframe Systems Implementation," in *Israeli Symposium on Jet Engines and Gas Turbines*, 1–48.
- [40] S. V. Bozhko, T. Wu, Y. Tao, and G. M. Asher, (2010), "More-electric aircraft electrical power system accelerated functional modeling," *Proc. EPE-PEMC 2010 - 14th Int. Power Electron. Motion Control Conf.*, 7–14.
- [41] R. Gandolfi, L. F. Pellegrini, and S. De Oliveira, (2010), "More electric aircraft analysis using exergy as a design comparison tool," *48th AIAA Aerosp. Sci. Meet. Incl. New Horizons Forum Aerosp. Expo.*, (January), 1–11.
- [42] T. X. Wu, J. Zumberge, and M. Wolff, (2011), "On regenerative power management in More Electric Aircraft (MEA) power system," *Natl. Aerosp. Electron. Conf. Proc. IEEE*, 211–214.

- [43] S. Wu and Y. Li, (2011), "Application and challenges of power electronics for variable frequency electric power system of more electric aircraft," *2011 Int. Conf. Electr. Mach. Syst.*, 1–4.
- [44] H. Qi, Y. Fu, X. Qi, and Y. Lang, (2011), "Architecture Optimization of More Electric Aircraft Actuation System," *Chinese J. Aeronaut.*, 24 (4), 506–513.
- [45] A. Abdel-Hafez, (2012), "Power Generation and Distribution System for a More Electric Aircraft - A Review," in *Recent Advances in Aircraft Technology*, R. K. Agarwal, (Ed.), 289–308.
- [46] R. Bojoi, M. G. Neacsu, and A. Tenconi, (2012), "Analysis and survey of multi-phase power electronic converter topologies for the more electric aircraft applications," in *International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 440–445.
- [47] R. Abdel-Fadil, A. Eid, and M. Abdel-Salam, (2013), "Electrical Distribution Power Systems of Modern Civil Aircrafts," *2nd Int. Conf. Energy Syst. Technol.*, 201–210.
- [48] Y. Deng, S. Y. Foo, and I. Bhattacharya, (2014), "Regenerative electric power for More Electric Aircraft," *IEEE Southeastcon 2014*, 1–5.
- [49] J. M. Guerrero, (2014), "Review of aircraft electric power systems and architectures," *2014 IEEE Int. Energy Conf.*, 949–953.
- [50] B. Sarlioglu and C. T. Morris, (2015), "More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft," *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, 1 (1), 54–64.
- [51] A. Barzegar, R. Su, C. Wen, L. Rajabpour, Y. Zhang, and M. Y. Lee, (2015), "Intelligent Power Allocation and Load Management of More Electric Aircraft," *IEEE PEDS*, (June), 533–538.
- [52] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, (2015), "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," *Appl. Energy*, 137, 511–536.
- [53] National Transportation Safety Board, (2013), "Auxiliary Power Unit Battery Fire Japan Airlines Boeing 787-8," Boston, MA.
- [54] N. Williard, W. He, C. Hendricks, and M. Pecht, (2013), "Lessons learned from the 787 dreamliner issue on Lithium-Ion Battery reliability," *Energies*, 6 (9), 4682–4695.

- [55] R. A. Marsh, S. Vukson, S. Surampudi, B. Ratnakumar, M. Smart, M. Manzo, and P. Dalton, (2001), “Li ion batteries for aerospace applications,” *J. Power Sources*, 97–98 (1–2), 25–27.
- [56] Y. Borthomieu, (2014), “Satellite Lithium-Ion Batteries,” in *Lithium-Ion Batteries*, (s. 311–344), Elsevier.
- [57] D. A. Howey and S. M. Alavi, (2015), “Rechargeable battery energy storage system design,” *Handb. Clean Energy Syst.*, 5.
- [58] A. Pesaran, (2001), “Battery Thermal Management in EVs and HEVs : Issues and Solutions,” in *Advanced Automotive Battery Conference*.
- [59] http://cafe.foundation/v2/gfc_2011_results.html. [Erişim tarihi: 08-Oct-2016].
- [60] K. J. Karimi, (2007), “Future Aircraft Power Systems- Integration Challenges”.
- [61] J. F. Soeder, (2015), “Future NASA Power Technologies for Space and Aero Propulsion Applications”.
- [62] Steering Committee for NASA Technology Roadmaps, (2016), *NASA Space Technology Roadmaps and Priorities Revisited*. Washington, D.C.: National Academies Press.
- [63] A. Misra, (2012), “Technology Challenges for Electric Aircraft,” in *EnergyTech 2012*.
- [64] R. A. Marsh, (1994), “Air Force aviation battery programs,” in *Proceedings of MILCOM '94*.
- [65] E. Meissner and G. Richter, (2003), “Battery Monitoring and Electrical Energy Management,” *J. Power Sources*, 116 (1–2), 79–98.
- [66] E. Karden, P. Shinn, P. Bostock, J. Cunningham, E. Schoultz, and D. Kok, (2005), “Requirements for future automotive batteries – a snapshot,” *J. Power Sources*, 144 (2), 505–512.
- [67] D. Andrea, (2010), *Battery Management Systems for Large Lithium-ion Battery Packs*. Norwood: Artech House.
- [68] C. Rahn. D. and C.-Y. Wang, (2013), *Battery Systems Engineering*. Wiley.
- [69] D. Deng, (2015), “Li-ion batteries: basics, progress, and challenges,” *Energy Sci. Eng.*, 3 (5), 385–418.
- [70] C. Mi, M. A. Masrur, and D. W. Gao, (2011), *Batteries, Ultracapacitors, Fuel Cells, and Controls*.
- [71] G. R. Dahlin and K. E. Strom, Eds., (2009), *Lithium Batteries: Research,*

Technology And Applications. New York: Nova Science Publishers, Inc.

- [72] C. Glaize and S. Geniès, (2013), *Lithium Batteries and Other Electrochemical Storage Systems*. Hoboken, NJ USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [73] C. Glaize and S. Geniès, (2013), “Definitions and Measuring Methods,” *Lithium Batter. Other Electrochem. Storage Syst.*, 21–87.
- [74] K. Vitols, (2015), “Efficiency of LiFePO₄ battery and charger with passive balancing,” in *2015 IEEE 3rd Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*.
- [75] I. Aizpuru, U. Iraola, J. M. Canales, and A. Goikoetxea, (2016), “Comparative Study and Evaluation of Passive Balancing Against Single Switch Active Balancing Systems for Energy Storage Systems,” *PCIM Eur.*, (May), 10–12.
- [76] A. Hauser and R. Kuhn, (2015), *Cell balancing, battery state estimation, and safety aspects of battery management systems for electric vehicles*, in *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*, (s. 283–326), Elsevier,
- [77] F. Baronti, R. Roncella, and R. Saletti, (2014), “Performance comparison of active balancing techniques for lithium-ion batteries,” *J. Power Sources*, 267, 603–609.
- [78] F. Baronti and G. Fantechi, (2013), “Design of the battery management system of LiFePO₄ batteries for electric off-road vehicles,” *(ISIE), 2013 IEEE*.
- [79] N. A. Chaturvedi, R. Klein, J. Christensen, J. Ahmed, and A. Kojic, (2010), “Algorithms for advanced battery-management systems,” *IEEE Control Syst. Mag.*, 30 (3), 49–68.
- [80] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, and M. Ouyang, (2013), “A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles,” *J. Power Sources*, 226, 272–288.
- [81] C. Unterrieder, C. Zhang, M. Lunglmayr, R. Priewasser, S. Marsili, and M. Huemer, (2015), “Battery state-of-charge estimation using approximate least squares,” *J. Power Sources*, 278, 274–286.
- [82] Y. Zou, X. Hu, H. Ma, and S. E. Li, (2015), “Combined State of Charge and State of Health estimation over lithium-ion battery cell cycle lifespan for electric vehicles,” *J. Power Sources*, 273, 793–803.
- [83] M. U. Cuma and T. Koroglu, (2015), “A comprehensive review on estimation strategies used in hybrid and battery electric vehicles,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 42, 517–53.

- [84] Q. Wang, B. Jiang, B. Li, and Y. Yan, (2016), “A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 64, 106–128.
- [85] T. M. Bandhauer, S. Garimella, and T. F. Fuller, (2011), “A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries,” *J. Electrochem. Soc.*, 158 (3).
- [86] A. Jossen, V. Späth, H. Döring, and J. Garche, (1999), “Reliable battery operation—a challenge for the battery management system,” *J. Power Sources*, 84, 283–286.
- [87] K. Murashko, J. Pyrhonen, and L. Laurila, (2013), “Three-dimensional thermal model of a lithium ion battery for hybrid mobile working machines: Determination of the model parameters in a pouch cell,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, 28 (2), 335–343.
- [88] G. Liu, L. Lu, J. Li, and M. Ouyang, (2013), “Thermal Modeling of a LiFePO₄/Graphite Battery and Research on the Influence of Battery Temperature Rise on EV Driving Range Estimation,” *2013 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*
- [89] T. M. Bandhauer, S. Garimella, and T. F. Fuller, (2014), “Temperature-dependent electrochemical heat generation in a commercial lithium-ion battery,” *J. Power Sources*, 247, 618–628.
- [90] S. Al Hallaj, J. Prakash, and J. R. Selman, (2000), “Characterization of commercial Li-ion batteries using electrochemical–calorimetric measurements,” *J. Power Sources*, 87 (1–2), 186–194.
- [91] A. Pesaran and M. Keyser, (2001), “Thermal characteristics of selected EV and HEV batteries,” in *Sixteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances. Proceedings of the Conference*.
- [92] B. Scrosati, J. Garche, and W. Tillmetz, (2015), *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*. Woodhead Publishing.
- [93] S. Yayathi, W. Walker, D. Doughty, and H. Ardebili, (2016), “Energy distributions exhibited during thermal runaway of commercial lithium ion batteries used for human spaceflight applications,” *J. Power Sources*, 329, 197–206.
- [94] S. Park, (2011), “A Comprehensive Thermal Management System Model for Hybrid Electric Vehicles”, The University of Michigan.
- [95] A. Pesaran, (2009), “Energy Storage R & D Thermal Management Studies and Modeling NREL Energy Storage Program,” in *DOE Hydrogen Program and*

- [96] M. R. Giuliano, A. K. Prasad, and S. G. Advani, (2012), “Experimental study of an air-cooled thermal management system for high capacity lithium–titanate batteries,” *J. Power Sources*, 216, 345–352.
- [97] G.-H. Kim and A. Pesaran, (2006), “Battery Thermal Management System Design Modeling,” *22nd Int. Batter. Hybrid Fuel Cell Electr. Veh. Conf. Exhib. EVS22*, 1 (November), 126–133.
- [98] D. Chen, J. Jiang, G.-H. Kim, C. Yang, and A. Pesaran, (2016), “Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells,” *Appl. Therm. Eng.*, 94, 846–854.
- [99] N. Javani, I. Dincer, G. F. F. Naterer, and B. S. S. Yilbas, (2014), “Heat transfer and thermal management with PCMs in a Li-ion battery cell for electric vehicles,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, 72, 690–703.
- [100] A. Pesaran, A. Vlahinos, and S. D. Burch, (1997), “Thermal Performance of EV and HEV Battery Modules and Packs,” in *Fourteenth International Electric Vehicle Symposium*.
- [101] H. S. Hamut, I. Dincer, and G. F. Naterer, (2014), “Experimental and Theoretical Efficiency Investigation of Hybrid Electric Vehicle Battery Thermal Management Systems,” *J. Energy Resour. Technol.*, 136 (March).
- [102] Y. Troxler, B. Wu, M. Marinescu, V. Yufit, Y. Patel, A. J. Marquis, N. P. Brandon, and G. J. Offer, (2014), “The effect of thermal gradients on the performance of lithium-ion batteries,” *J. Power Sources*, 247, 1018–1025.
- [103] A. Väyrynen and J. Salminen, (2012), “Lithium ion battery production,” *J. Chem. Thermodyn.*, 46, 80–85.
- [104] C. H. Lee, S. J. Bae, and M. Jang, (2015), “A study on effect of lithium ion battery design variables upon features of thermal-runaway using mathematical model and simulation,” *J. Power Sources*, 293, 498–510.
- [105] R. Sabbah, R. Kizilel, J. R. Selman, and S. Al Hallaj, (2008), “Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution,” *J. Power Sources*, 182 (2), 630–638.
- [106] J. K. Min and C. H. Lee, (2012), “Numerical study on the thermal management system of a molten sodium-sulfur battery module,” *J. Power Sources*, 210, 101–

109.

- [107] I. Bayraktar, (2012), “Computational simulation methods for vehicle thermal management,” *Appl. Therm. Eng.*, 36 (1), 325–329.
- [108] A. Mills and S. Al Hallaj, (2005), “Simulation of passive thermal management system for lithium-ion battery packs,” *J. Power Sources*, 141 (2), 307–315.
- [109] N. Nieto, L. Díaz, J. Gastelurrutia, F. Blanco, J. C. Ramos, and A. Rivas, (2014), “Novel thermal management system design methodology for power lithium-ion battery,” *J. Power Sources*, 272, 291–302.
- [110] M. Shadman Rad, D. L. Danilov, M. Baghalha, M. Kazemeini, and P. H. L. Notten, (2013), “Adaptive thermal modeling of Li-ion batteries,” *Electrochim. Acta*, 102, 183–195.
- [111] N. Javani, I. Dincer, G. F. Naterer, and G. L. Rohrauer, (2014), “Modeling of passive thermal management for electric vehicle battery packs with PCM between cells,” *Appl. Therm. Eng.*, 73 (1), 307–316.
- [112] L. H. Saw, K. Somasundaram, Y. Ye, and A. O. Tay, (2014), “Electro-thermal analysis of Lithium Iron Phosphate battery for electric vehicles,” *J. Power Sources*, 249, 231–238.
- [113] A. Pesaran, (2002), “Battery thermal models for hybrid vehicle simulations,” *J. Power Sources*, 110 (2), 377–382.
- [114] S. A. Khateeb, S. Amiruddin, M. M. Farid, J. R. Selman, and S. Al Hallaj, (2005), “Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters: Experimental validation,” *J. Power Sources*, 142 (1–2), 345–353.
- [115] D. Bharathan, A. Pesaran, A. Vlahinos, and G.-H. Kim, (2005), “Improving battery design with electro-thermal modeling,” *2005 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC*, 2005 (1), 368–375.
- [116] K. Yu, X. Yang, Y. Cheng, and C. Li, (2014), “Thermal analysis and two-directional air flow thermal management for lithium-ion battery pack,” *J. Power Sources*, 270, 193–200.
- [117] H. S. Hamut, I. Dincer, and G. F. Naterer, (2014), “Analysis and optimization of hybrid electric vehicle thermal management systems,” *J. Power Sources*, 247, 643–654.
- [118] M. Keyser and K. Smith, (2011), “Battery Thermal Modeling and Testing,” in *U.S. DOE Hydrogen Program and Vehicle Technologies Program Annual Merit*

- [119] K. Smith and C.-Y. Wang, (2006), "Power and thermal characterization of a lithium-ion battery pack for hybrid-electric vehicles," *J. Power Sources*, 160 (1), 662–673.
- [120] M. Keyser, A. Pesaran, S. Oweis, G. Chagnon, and C. Ashtiani, (1999), "Thermal Evaluation and Performance of High-Power Lithium-Ion Cells," in *16th Electric Vehicle Conference*.
- [121] S. C. Chen, C. C. Wan, and Y. Y. Wang, (2005), "Thermal analysis of lithium-ion batteries," *J. Power Sources*, 140 (1), 111–124.
- [122] G.-H. Kim and A. Pesaran, (2007), "Analysis of Heat Dissipation in Li-Ion Cells & Modules for Modeling of Thermal Runaway," *3rd Int. Symp. Large Lithium Ion Batter. Technol. Appl.*
- [123] H. S. Hamut, I. Dincer, and G. F. Naterer, (2012), "Exergy analysis of a TMS (thermal management system) for range-extended EVs (electric vehicles)," *Energy*, 46 (1), 117–125.
- [124] T. M. Bandhauer, S. Garimella, and T. F. Fuller, (2014), "Electrochemical-Thermal Modeling to Evaluate Battery Thermal Management Strategies: I. Side Cooling," *J. Electrochem. Soc.*, 162 (1), A125–A136.
- [125] A. Pesaran, A. Vlahinos, and T. Stuart, (2003), "Cooling and preheating of batteries in hybrid electric vehicles," *6th ASME-JSME Therm. Eng.*
- [126] A. Jarrett and I. Y. Kim, (2011), "Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance," *J. Power Sources*, 196 (23), 10359–10368.
- [127] W. Tong, K. Somasundaram, E. Birgersson, A. S. Mujumdar, and C. Yap, (2015), "Numerical investigation of water cooling for a lithium-ion bipolar battery pack," *Int. J. Therm. Sci.*, 94, 259–269.
- [128] N. Javani, I. Dincer, G. F. Naterer, and B. S. Yilbas, (2014), "Exergy analysis and optimization of a thermal management system with phase change material for hybrid electric vehicles," *Appl. Therm. Eng.*, 64 (1–2), 471–482.
- [129] C. Lin, S. Xu, G. Chang, and J. Liu, (2015), "Experiment and simulation of a LiFePO₄ battery pack with a passive thermal management system using composite phase change material and graphite sheets," *J. Power Sources*, 275, 742–749.
- [130] X. Duan and G. F. Naterer, (2010), "Heat transfer in phase change materials for

- thermal management of electric vehicle battery modules,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, 53 (23–24), 5176–5182.
- [131] G.-H. H. Kim, J. Gonder, J. Lustbader, and A. Pesaran, (2008), “Thermal management of batteries in advanced vehicles using phase-change materials,” *World Electr. Veh. J.*, 2 (2), 46–59.
- [132] C.-V. Hémerly, F. Pra, J.-F. Robin, and P. Marty, (2014), “Experimental performances of a battery thermal management system using a phase change material,” *J. Power Sources*, 270, 349–358.
- [133] Z. Rao, S. Wang, M. Wu, Z. Lin, and F. Li, (2013), “Experimental investigation on thermal management of electric vehicle battery with heat pipe,” *Energy Convers. Manag.*, 65, 92–97.
- [134] M. S. Wu, K. H. Liu, Y. Y. Wang, and C. C. Wan, (2002), “Heat dissipation design for lithium-ion batteries,” *J. Power Sources*, 109 (1), 160–166.
- [135] Y. Park, S. Jun, S. Kim, and D.-H. Lee, (2010), “Design optimization of a loop heat pipe to cool a lithium ion battery onboard a military aircraft,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24 (2). 609–618.
- [136] A. Ritchie and W. Howard, (2006), “Recent developments and likely advances in lithium-ion batteries,” *J. Power Sources*, 162 (2) SPEC. ISS., 809–812.
- [137] A. Emadi, (2011), “Transportation 2.0,” *IEEE Power Energy Mag.*, 9 (4), 18–29.
- [138] M. A. Keyser, A. Pesaran, M. Mihalic, J. Yu, and S. Kim, (2003), “Thermal Characterization of Advanced Lithium-Ion Polymer Cells,” in *Third Advanced Automotive Battery Conference*.
- [139] C. R. Pals and J. Newman, (1995), “Thermal Modeling of the Lithium/Polymer Battery I. Discharge Behavior of a Single Cell,” *J. Electrochem. Soc.*, 142 (10), 3282.
- [140] B. Wu, Z. Li, J. Zhang, J. Huang, Z. Nie, Y. Sun, F. An, and N. Wu, (2013), “Thermal modelling of large-format laminated Li-ion battery and experimental validation using embedded thermocouples,” *2013 World Electr. Veh. Symp. Exhib.*, (1), 1–9.
- [141] H. R. Hazard, (1968), “Propulsion aspects of transportation,” *Proc. IEEE*, 56 (4), 523–535.
- [142] C. M. Reid, (2015), “Batteries at NASA – Today and Beyond”, in *Undergraduate Seminar for Xavier University of New Orleans*.

- [143] Y. Nishi, (2014), *Past, Present and Future of Lithium-Ion Batteries*. Elsevier.
- [144] B. Scrosati and J. Garche, (2010), “Lithium batteries: Status, prospects and future,” *J. Power Sources*, 195 (9), 2419–2430.
- [145] I. Dincer and T. A. H. Ratlamwala, (2013), “Importance of exergy for analysis, improvement, design, and assessment,” *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.*, 2 (3), 335–349.
- [146] T. Christen and M. W. Carlen, (2000), “Theory of Ragone plots,” *J. Power Sources*, 91 (2), 210–216.
- [147] D. Doerffel and S. A. Sharkh, (2006), “Large Lithium-Ion Batteries – a Review,” *Electr. Veh. Exhib. (EMA 2006)*.
- [148] M. M. Thackeray, C. Wolverton, and E. D. Isaacs, (2012), “Electrical energy storage for transportation—approaching the limits of, and going beyond, lithium-ion batteries,” *Energy Environ. Sci.*, 5 (7), 7854.
- [149] K. E. Aifantis, S. A. Hackney, and R. V. Kumar, Eds., (2010), *High Energy Density Lithium Batteries*. WILEY.
- [150] M. Yoshio, R. J. Brodd, and A. Kozawa, Eds., (2009), *Lithium-Ion Batteries*. New York, NY: Springer New York.
- [151] A. Manthiram, Y. Fu, and Y.-S. Su, (2013), “Challenges and Prospects of Lithium–Sulfur Batteries,” *Acc. Chem. Res.*, 46 (5), 1125–1134.
- [152] <http://www.sionpower.com/media-center.php?code=sion-powers-lithiumsulfur-batteries-power-high-alt>. [Erişim tarihi: 08.10.2016].
- [153] L. Grande, E. Paillard, J. Hassoun, J. B. Park, Y. J. Lee, Y. K. Sun, S. Passerini, and B. Scrosati, (2015), “The lithium/air battery: Still an emerging system or a practical reality?,” *Adv. Mater.* 27 (5), 784–800.
- [154] J. A. Jeevarajan, (204), “Safety of Commercial Lithium-Ion Cells and Batteries,” in *Lithium-Ion Batteries*, (387–407), Elsevier.
- [155] S. X. Chen, K. J. Tseng, and S. S. Choi, (2009), “Modeling of Lithium-Ion Battery for Energy Storage System Simulation,” in *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*.
- [156] D. Bernardi, (1985), “A General Energy Balance for Battery Systems,” *J. Electrochem. Soc.*, 132 (1), 5.
- [157] J. Newman, K. E. Thomas, H. Hafezi, and D. R. Wheeler, (2013), “Modeling of lithium-ion batteries,” *J. Power Sources*, 119–121, 838–843.

- [158] S. Bhide and T. Shim, (2011), “Novel Predictive Electric Li-Ion Battery Model Incorporating Thermal and Rate Factor Effects,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 60 (3), 819–829.
- [159] G. Piłatowicz, A. Marongiu, J. Drillkens, P. Sinhuber, and D. U. Sauer, (2015), “A critical overview of definitions and determination techniques of the internal resistance using lithium-ion, lead-acid, nickel metal-hydride batteries and electrochemical double-layer capacitors as examples,” *J. Power Sources*, 296, 365–376.
- [160] R. Spotnitz, (2003), “Simulation of capacity fade in lithium-ion batteries,” *J. Power Sources*, 113 (1), 72–80.
- [161] W. Waag, S. Käbitz, and D. U. Sauer, (2013), “Experimental investigation of the lithium-ion battery impedance characteristic at various conditions and aging states and its influence on the application,” *Appl. Energy*, 102, 885–897.
- [162] M. Broussely, S. Herreyre, P. Biensan, and P. Kasztejna, (2001), “Aging mechanism in Li ion cells and calendar life predictions,” *J. Power Sources*, 97–98, 13–21.
- [163] P. Ramadass, B. Haran, R. White, and B. N. Popov, (2003), “Mathematical modeling of the capacity fade of Li-ion cells,” *J. Power Sources*, 123 (2), 230–240.
- [164] H. Vaidyanathan, W. H. Kelly, and G. Rao, (2001), “Heat dissipation in a lithium ion cell,” *J. Power Sources*, 93 (1–2), 112–122.
- [165] D. Lisbona and T. Snee, (2011), “A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries,” *Process Saf. Environ. Prot.*, 89 (6), 434–442.
- [166] J. R. Selman, S. Al Hallaj, I. Uchida, and Y. Hirano, (2001), “Cooperative research on safety fundamentals of lithium batteries,” *J. Power Sources*, 97–98, 726–732.
- [167] D. Dvorak, H. Popp, T. Bäuml, D. Simic, and H. Kapeller, (2014), “Arrhenius-Equation Based Approach for Modelling Lithium-Ion Battery Aging Effects,” in *ITI Symposium, Dresden*.
- [168] K. Maher and R. Yazami, (2014), “A study of lithium ion batteries cycle aging by thermodynamics techniques,” *J. Power Sources*, 247, 527–533.
- [169] H. Kuhn and A. Sizmann, (2012), “Fundamental Prerequisites for Electric Flying,” *Dtsch. Luft- und Raumfahrt Kongress, DLRK*.
- [170] http://www.europeanbatteries.com/upload/files/EB_brochure_2011_EN.pdf.

[Erişim tarihi: 08.10.2016].

- [171] I. Dincer and M. A. Rosen, (2013), “Thermodynamic Fundamentals,” in *Exergy*, Elsevier.
- [172] M. A. Rosen and C. A. Bulucea, (2009), “Using exergy to understand and improve the efficiency of electrical power technologies,” *Entropy*, 11 (4), 820–835.
- [173] Incropera, F. P., (2007), Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons
- [174] Sato, N., (2004), Chemical Energy and Exergy: An Introduction to Chemical Thermodynamics for Engineers, Elsevier Science and Technology Books