

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİTYUM İYON PİL HÜCRESİNİN TERMAL KARAKTERİZASYONU



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gizem TAYLAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

TEMMUZ 2019

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİTYUM İYON PİL HÜCRESİNİN TERMAL KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Gizem TAYLAN
(161080106)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Kemal Furkan SÖKMEN

TEMMUZ 2019

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 161080106 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Gizem TAYLAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "LİTYUM İYON PİL HÜCRESİNİN TERMAL KARAKTERİZASYONU" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Kemal Furkan SÖKMEN**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Kemal Furkan SÖKMEN**
Bursa Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ömer KAYNAKLI
Uludağ Üniversitesi

Prof. Dr. Yusuf Ali KARA
Bursa Teknik Üniversitesi

Savunma Tarihi : 29 Temmuz 2019

FBE Müdürü : **Doç. Dr. Murat ERTAŞ**
Bursa Teknik Üniversitesi/...../.....

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Gizem TAYLAN

İmzası :

X X X X X



Aileme ve eşime,

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda isteklerimi göz önünde bulundurup tez konumu seçmem hususunda yardımcı olan ve tezin her aşamasında desteğini esirgemeyen danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Kemal Furkan SÖKMEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tüm öğrenim hayatım süresince, bana her daim inanan, yanımda olan ve her türlü desteğini esirgemeyen annem Sevilay KARADAĞ'a, babam Hüseyin KARADAĞ'a ve tezimin başından sonuna kadar desteğini esirgemeyen değerli eşim Taha Murat TAYLAN'a sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca, tez çalışmam süresince beni hep destekleyen ve yanımda olan değerli arkadaşlarım Reyhan YEŞİL, Hazal YILMAZ ve Büşra YAKŞI'ye teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz 2019

Gizem TAYLAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
KISALTMALAR	vii
SEMBOLLER.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Lityum-İyon Pillerin Tarihsel Gelişimi	4
1.2 Lityum-İyon Pilin Performans Karşılaştırması	5
1.3 Lityum-İyon Pil Çalışma Prensibi Ve Pil Bileşenleri	8
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	12
3. MATERYAL VE METOD	14
3.1 Isı Transfer Mekanizması	14
3.2 Sonlu Hacim Modelleme	15
3.3 Lityum İyon Batarya Sonlu Hacimler Modeli	16
3.4 Sonlu Hacim Modelinin Başlangıç ve Sınır Şartları	16
3.4.1 Isı fiziksel parametreleri	17
3.4.1.1 Ortalama yoğunluk	17
3.4.1.2 Özgül ısı	17
3.4.1.3 Isı iletim katsayısı.....	17
3.4.1.4 Hücre ısı üretim oranı	18
3.4.1.5 Başlangıç şartları	19
4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR.....	21
4.1 Tek Hücre İçin Örnek Deneysel Çalışma	21
4.2 Tek Hücre İçin Sonlu Hacim Metodu	27
4.3 Modül için Deneysel Çalışma ve Sonlu Hacim Metodu	34
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	39
KAYNAKLAR.....	42
ÖZGEÇMİŞ	47

KISALTMALAR

CAGR	: Compound Annual Growth Rate
EV	: Electric Vehicle
PHEV	: Plug-in Hybrid Electric Vehicle
HEV	: Hybrid Electric Vehicle
USABC	: United States Advanced Battery Consortium
LIB	: Lityum-İyon Batarya
EFD	: Engineering Fluid Dynamics
CFD	: Computational Fluid Dynamics
CAD	: Computer Aided Design

SEMBOLLER

Q_p	: Üretilen ısı
Q_e	: Çevreye yayılan ısı
Q_a	: sıcaklık değişimi ile batarya içerisinde meydana gelen ısı
ρ	: Yoğunluk
∇	: Gradyan
t	: Zaman
$C_{p,k}$: Özgül ısı
q	: Farklı ısı üretim hızlarının kümülatif bir değeri
k_k	: Isı iletim katsayısı
T	: Sıcaklık
k_x, k_y, k_z	: Bataryanın x, y ve z koordinatlarındaki ısı iletim katsayısı
m_i	: Hücre çekirdeği elemanının ağırlığı
v_i	: Hücre çekirdeği elemanının hacmi
M_b	: Hücre çekirdeğinin ağırlığı
V_b	: Hücre çekirdeğinin hacmi
δ_p	: Pozitif elektrot levhasının hacim oranı
δ_n	: Negatif elektrot levhasının hacim oranı
δ_s	: Ayırıcının hacim oranı
k_p	: Pozitif elektrot ısı iletim katsayısı
k_n	: Negatif elektrot ısı iletim katsayısı
k_s	: Ayırıcı ısı iletim katsayısı
ε	: Pilin gözenekliliği
k_m	: Gözenekli malzemenin elektrolit içermeyen ısı iletim katsayısı
k_i	: Gözenekli malzemenin düzeltilmiş ısı iletim katsayısı
I	: Akım
R	: Pilin iç empedansı
dU_0 / dT	: Sıcaklıkla değişen açık devre voltajının katsayısı
V_m	: Pozitif / negatif terminalin karşılık gelen hacmi
R_m	: Doğrudan ölçümle elde edilebilen pozitif/negatif terminalin direnci
T_0	: Analiz başlangıç sıcaklığı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Li-iyon pil marketi(GWh/yıl),geçmiş gelişmeler ve gelecek görünümü.	3
Çizelge 1.2 : Diğer piller ile li-iyon pillerin karşılaştırılması.	6
Çizelge 1.3 : Batarya malzemeleri ve parametreleri.	11
Çizelge 3.1 : Elektrolit içindeki pil malzemesinin ısı iletim katsayısının düzeltilmesi.	18
Çizelge 3.2 : Pil ısısı fiziksel parametrelerinin hesaplanan sonuçları.	19
Çizelge 3.3 : Çeşitli sıcaklık ve deşarj hızlarında başlıca bileşenlerin ısı üretim hızları(W/m ³).	19
Çizelge 4.1 : Ölçüm cihazının özellikleri.	23
Çizelge 4.2 : 3C deşarj oranı, 25°C’de farklı ölçüm noktalarının sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.	25
Çizelge 4.3 : Tek hücre pil mesh yapısı için uygun eleman sayısı belirleme.	29
Çizelge 4.4 : FLIR E8 termal kamera özellikleri.	32
Çizelge 5.1 : 1C deşarj hızı, 25°C çevre şartında maksimum ölçülen analiz ve test sonuçları.	40

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Dünya genelinde lityum-iyon pil üretimi.....	2
Şekil 1.2 : Küresel Li-ion Pil Pazarının Büyüklüğü ve Tahmini (Milyar Dolar).....	4
Şekil 1.3 : Tarihte bilinen ilk voltaj pili.....	4
Şekil 1.4 : Li-iyon, kurşun asit, Ni-Zn, NiCd, NiMH ve Zn-MnO ₂ pillerin tipik deşarj karakteristikleri.....	7
Şekil 1.5 : Çeşitli pil tiplerinin gravimetrik ve volumetrik enerji yoğunluğu.....	7
Şekil 1.6 : Lityum-iyon pilin şematik gösterimi.....	9
Şekil 1.7 : Şarj edilebilir sulu olmayan Li-ion piller için incelenen elektrot materyallerinin ve elektrolit tiplerinin listesi.....	10
Şekil 3.1 : Silindirik bir bataryanın yapısı.....	16
Şekil 4.1 : Sony 18650 li-ion pilin yapısı (a) ve pilin sonlu hacim modeli (b).....	22
Şekil 4.2 : Ölçüm noktalarının konumları.....	23
Şekil 4.3 : Yüzey sıcaklık dağılımı analiz sonucu.....	24
Şekil 4.4 : Test ölçüm sonuçlarına göre yüzey sıcaklık dağılımı.....	25
Şekil 4.5 : T ₀ =25°C, 1C deşarj hızında gerçekleşen analiz sonucu iç sıcaklık dağılımı (a) ve T ₀ =25°C, 3C deşarj hızında gerçekleşen analiz sonucu iç sıcaklık dağılımı(b).....	26
Şekil 4.6 : CATIA yazılımı ile batarya modellemesi.....	28
Şekil 4.7 : Bataryanın mesh yapısı.....	28
Şekil 4.8 : Bataryanın negatif ucunda kullanılan malzeme özelliklerinin programa aktarımı.....	30
Şekil 4.9: Batarya yüzeyinde kullanılan malzeme özelliklerinin programa aktarımı.....	30
Şekil 4.10 : Hücre çekirdeğinde kullanılan malzeme özelliklerinin programa aktarımı.....	31
Şekil 4.11 : Test ölçümleri sırasında kullanılan termal kamera.....	32
Şekil 4.12 : FloEFD yazılımı ile elde edilen batarya yüzeyi sıcaklık dağılımı.....	33
Şekil 4.13 : Termal kamera ile ölçülen batarya yüzeyi sıcaklık dağılımı.....	33
Şekil 4.14 : FloEFD analiz sonucu.....	35
Şekil 4.15 : Termal kamera ile sıcaklık ölçüm sonuçları.....	35
Şekil 4.16 : Kaplama sonrası FloEFD analiz sonucu.....	36
Şekil 4.17 : Kaplama sonrası termal kamera ile sıcaklık ölçüm sonuçları.....	37
Şekil 4.18 : Kaplama sonrası sıcaklık dağılımını gösteren modül kesiti.....	38

LİTYUM İYON PİL HÜCRESİNİN TERMAL KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Enerjiye duyulan ihtiyacın artması ile birlikte enerji kaynaklarının azalması, çevre kirliliği, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki farkın hızla büyümesi sonucu alternatif kaynaklara ihtiyaç duyulmuştur. Enerji talebindeki hızlı artışın karşılanabilmesi için enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin verimli bir şekilde depolanması ve ihtiyacı karşılayacak en uygun dönüşümlerin geliştirilmesi, en yararlı çözümlerden biri olacaktır. Son yıllarda yüksek enerji yoğunlukları ve uzun çevrim ömrü sayesinde, lityum-iyon piller yoğun olarak araştırılmaktadırlar. Li-ion piller genellikle 0°C derecenin altındaki sıcaklıklarda şiddetli güç kaybına ve aşırı yüksek sıcaklıklarda termal kaçak riskinde artışla karşı karşıya kalmaktadırlar. Bu nedenle, sistem sıcaklığını kabul edilebilir bir aralıkta kontrol etmek ve tüm sistem boyunca sıcaklık homojenliğini korumak için bir termal yönetim sistemi gereklidir.

Bu tezde, iç sıcaklık dinamiklerini açıklayan genel bir modelleme metodolojisi ve silindirik bir pil hücreesindeki sıcaklık dağılımı üzerinde durulmuştur. Hücreler arasındaki sıcaklık dağılımı daha tutarlı olan ve kolay boyutlandırılabilir bir li-iyon batarya tasarımı amaçlanmıştır. Bu tasarım yapılırken Zhenpo ve çalışma arkadaşlarının yaptığı çalışmadaki matematiksel modelleme ve kimyasal yapı baz alınmıştır. Samsung 18650 li-iyon pil kullanarak sıcaklık problemlerini önceden tahmin etmek ve çözümlenmek için yeni bir sonlu hacim modeli geliştirilmiştir. Batarya paketinin ısı akış alanı verilerini hesaplamak için CFD tabanlı olan FloEFD yazılımı kullanılmıştır. Termal kamera ile yüzey sıcaklığı ölçülen hücre ve modülün FloEFD programı ile analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen maksimum sıcaklık değerleri tek hücre için 34,02°C, 14 tane lityum iyon bataryadan oluşan modül için 40,16°C olarak bulunmuştur. Termal kamera ile ölçülen sıcaklık sonuçları ise tek hücre ve modül için sırasıyla 32.9°C ve 40°C olarak ölçülmüştür. Lityum-iyon pilin çevreye yaydığı ısı nedeniyle bağlı bulunduğu cihaza verdiği zararı engellemek ve batarya sıcaklığını düşürebilmek amacıyla, batarya polimer(PA66) bir malzeme ile çevrilmiştir. Kaplama sonrası FloEFD yazılımı ile yapılan analiz sonucu maksimum sıcaklık 37,71°C, termal kamera yardımıyla test sonucu sıcaklığı ise 38,8°C olarak ölçülmüştür. Analizler 25°C çevre şartlarında, ışınlama etkisi ve yerçekimi etkileri dikkate alınarak yapılmıştır. Çalışma sonunda lityum iyon batarya için kurulan ısıl model doğrulanmıştır. Polimer katkılı bir malzeme ile çevrilen bataryaların sıcaklık dağılımlarının düzenli olduğu ve bataryalarda sıcaklık problemi olmadığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Lityum-iyon Batarya, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Termal Model, Sıcaklık Dağılımı, FloEFD

THERMAL CHARACTERIZATION OF LITHIUM-ION BATTERY CELL

SUMMARY

Alternative sources were needed as a result of the increase in the need for energy, the decrease in energy resources, the environmental pollution, and the rapid growth of the difference between energy production and consumption. In order to meet the rapid increase in energy demand, efficient storage of energy from energy sources and development of the most suitable transformations to meet the need will be one of the most useful solutions. In recent years, due to their high energy density and long cycle life, lithium-ion batteries have been extensively researched. Li-ion batteries often face severe power loss at temperatures below 0°C and an increased risk of thermal leakage at extremely high temperatures. Therefore, a thermal management system is required to control the system temperature within an acceptable range and to maintain temperature homogeneity throughout the system.

In this thesis, a general modeling methodology explaining the internal temperature dynamics and temperature distribution in a cylindrical battery cell is emphasized. It is intended to design a li-ion battery which is more consistent and easy resizable, with temperature distribution between cells. This design is based on the mathematical modeling and chemical structure of Zhenpo et al. A new finite volume model has been developed to predict and solve temperature problems using the Samsung 18650 li-ion battery. FloEFD was used as CFD software to calculate the heat flow area data of the battery pack. Cell, module and package whose surface temperature was measured by thermal camera were analyzed with FloEFD program. The maximum temperature values obtained at the end of the analysis were found to be 34,02°C for single cell and 40,16°C for module consisting of 14 lithium ion batteries. Temperature results measured by thermal camera were measured as 32.9°C and 40°C for single cell and module, respectively. The battery is surrounded by a polymer (PA66) material to prevent damage to the device to which it is connected due to the heat emitted by the lithium-ion battery and to reduce the battery temperature. The maximum temperature was measured as 37,71°C by the FloEFD software and the temperature of the test was 38,8 °C by the thermal camera after the coating. The analyzes were carried out at 25°C environmental conditions considering radiation effect and buoyancy effects. At the end of the study, the thermal model established for the lithium ion battery was verified. It was found that the temperature distributions of the batteries packaged with polymer material are regular and there is no temperature problem in the batteries.

Keywords: Lithium-ion Battery, Computational Fluid Dynamics, Thermal Model, Temperature Distribution, FloEFD

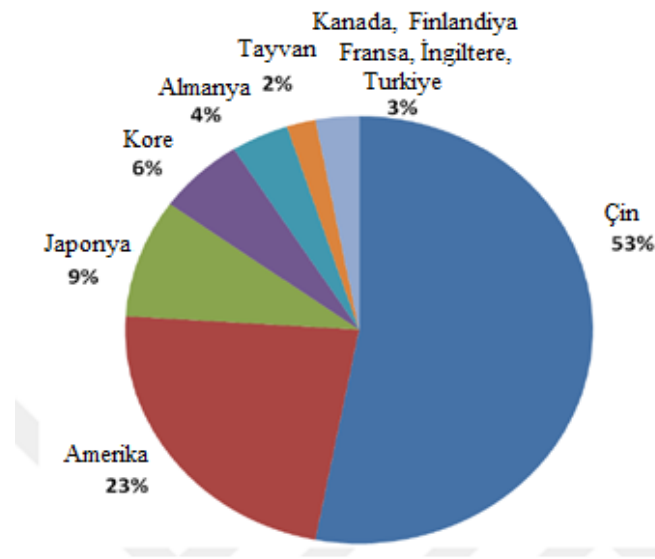
1. GİRİŞ

Enerji depolama sistemleri, hem ulaşım hem de elektrik sektörlerinde enerji sürdürülebilirliğini geliştirmek için kritik bir olanak sağlayan teknoloji olarak kabul edilmiştir. Piller, taşınabilir elektronik cihazlarda, elektrikli taşıtlarda ve elektrik şebekelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Artan araçtan şebekeye sinerjileri ve yenilenebilir enerji entegrasyonu, piller zorunlu bir rol oynayacak şekilde benzersiz bir şekilde konumlandırılmıştır [1-4]. Günümüzde, toplum enerjide son derece bağımlıdır. Gelişmiş ülkelerdeki birçok insan tarafından enerjinin temin edilebilirliği zor değildir. Örneğin, modern toplumda elektronik cihazlara güç vermek, binaları ısıtmak veya soğutmak ve araçları sürmek kolaydır. ABD Enerji Enformasyon İdaresi'nden yakın tarihli bir raporda, dünya enerji tüketiminin önümüzdeki yıllarda artacağı öngörülmektedir. Ekonomik büyümenin yüksek olduğu ülkeler, özellikle Asya ülkeleri, bu artıştan sorumludur. Dünya genelinde, kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar ve bu yakıt türleri ile ilgili yapılan bilimsel yenilikler nedeniyle fosil yakıt türleri kullanılmaktadır. Her ne kadar yeni fosil yakıt alanları ileri teknoloji ile kesin olarak bulunacak olsa da, bu yenilenemez enerji kaynaklarının gelecekte tükenmesi kaçınılmazdır. Ayrıca fosil yakıtlar, uzun vadede büyük bir çevresel etkiye sahip olan sera gazlarını üreterek küresel ısınmaya neden olmaktadır [5-6]. Fosil yakıtlardan kaynaklanan sera gazı emisyonları, nükleer ve yenilenebilir enerji kaynakları gibi alternatif kaynaklar kullanılarak büyük oranda azaltılabilir. Bununla birlikte, her iki kaynağın da zorlukları vardır. Örneğin, nükleer enerji israfı binlerce yıl boyunca radyoaktif olabilir ve yanlış güvenlik yönetimi feci sonuçlara yol açabilir [7-8]. Bu bakımdan, yenilenebilir enerji kaynakları daha güvenli ve daha temizdir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının örnekleri güneş, rüzgar, deniz ve jeotermaldir [9-10]. Yenilenebilir kaynakların temel sorunu, enerji üretiminin çoğunlukla düzensiz olması ve enerji talebine ihtiyaç duyulduğu anlarda devreye alınamamasıdır. Bunun nedeni, bu kaynakların zamana, yere ve havaya büyük ölçüde bağımlı olmasıdır. Dolayısıyla, bu tür sistemler de enerji temini ve talebi arasındaki orantıdan doğabilecek farkı en aza indirmek için enerji depolama

cihazlarından faydalanılabilmektedir. Enerji; mekanik, elektriksel, termal veya elektrokimyasal bir şekilde depolanabilir [11]. Piller, günümüzde yenilenebilir kaynaklar tarafından üretilen enerjiyi depolayan popüler cihazlardır [12-14]. Bu batarya sistemleri, sabit enerji depolama cihazları olarak daha iyi bilinmektedir. Bataryalar aynı zamanda mobil cihazlara enerji sağlamak için de kullanılmaktadır. Mobil cihazlara örnek olarak taşınabilir telefonlar, dizüstü bilgisayarlar, tabletler, saatler ve (hibrit) elektrikli araçlar (H)EV verilebilir. Özellikle (H)EV pazarı, yakın gelecekte (H)EV satışlarında büyük bir artış olacağı için çok fazla pil gerektirebilir. Ancak, (H)EV satışlarının artması, maliyet, teknoloji, altyapı, tüketici kabulü ve devlet düzenlemeleri gibi faktörler nedeniyle tahmin edilmesi güçtür [15-17]. (H)EV pilleri, yenilenebilir enerji kaynakları tarafından üretilen elektrikle şarj edilirse, (H)EV'nin çevresel etkisi, fosil yakıtlar ile çalışan yanmalı motorların kullanıldığı araçların etkisinden çok daha düşüktür. Bu bakımdan, (H)EV, sera gazı emisyonlarını azaltmak için mükemmel adaylardır. Açıkça görülüyor ki, batarya hem sabit hem de mobil uygulamaların başarısında büyük rol oynamaktadır.

Yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü, ve düşük self-deşarj oranı nedeniyle, li-ion piller hem sanayi hem de devlet fonları kurumlarından yoğun ilgi görüyor ve bu alanda yapılan araştırmalar son yıllarda oldukça fazla [18-20].

Lityum-iyon pillerin ticarileştirilmesiyle kullanım alanları gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Lityum-iyon pil üretim teknolojisi artık birçok ülkede, özellikle ABD, Çin ve Japonya'da ticari olarak önemli bir konumdadır [21] (Şekil 1.1).



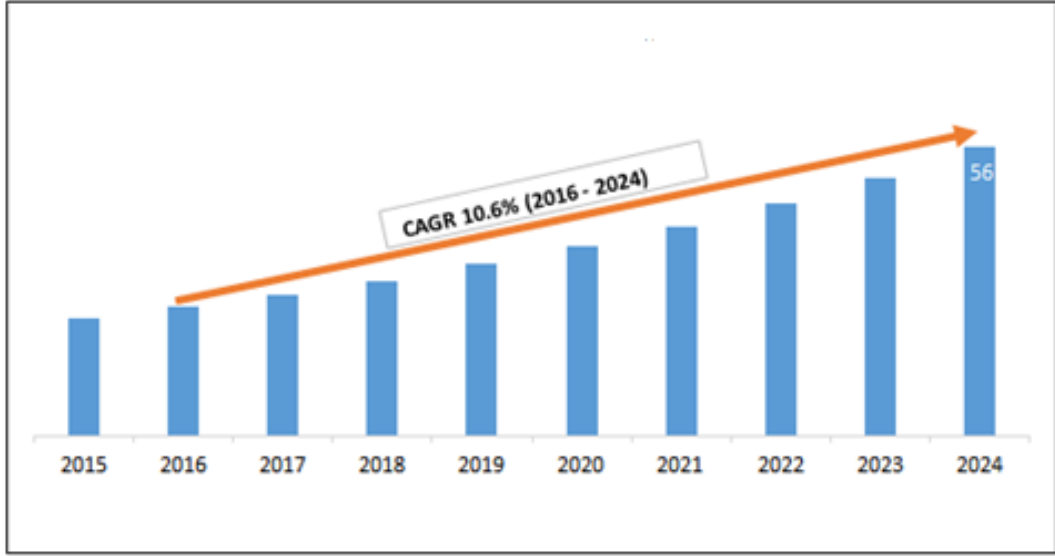
Şekil 1.1 : Dünya genelinde lityum-iyon pil üretimi.

Günümüzde lityum-iyon bataryalar cep telefonlarında, dizüstü bilgisayarlarda, dijital kamera, fotoğraf makinelerinde ve diğer kablosuz, taşınabilir elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ek olarak, lityum-iyon bataryalar askeri uygulamalar ve havacılık sektöründe kullanılmaktadır. Lityum-iyon batarya sektörü için büyük bir zorluk, her 5 yılda bir kabaca ikiye katlanan küresel talep artışıdır. Çizelge 1.1, 2030 yılına kadar olan son ve beklenen piyasa gelişmelerine dayanarak bu durumu vurgulamaktadır [22].

Çizelge 1.1 : Li-iyon pil marketi(GWh/yıl),geçmiş gelişmeler ve gelecek görünümü.

	2010	2015	2020	2025	2030
Cep telefonları	6	11	17	28	44
Tabletler	1	7	12	17	25
Bilgisayar	12	9	9	9	11
Taşınabilir elektronikler,diğer	3	4	7	12	20
Taşınabilir elektronikler,toplam	21	31	45	66	100
EV	0	11	65	115	200
PHEV	0	2	8	13	25
HEV	0	0	2	7	15
Karayolu taşımacılığı,diğer	0	0	1	2	5
Karayolu taşımacılığı,toplam	0	13	76	137	245
Güç kaynağında depolama	0	0	2	10	30
Diğer uygulamalar	1	1	2	7	15
Toplam	22	45	125	220	390

Akıllı telefonlar ve tabletler gibi elektronik cihazlara olan talebin artması ve kirliliği azaltmaya yönelik katı hükümet düzenlemeleri, küresel lityum-iyon batarya pazarını yönlendiren başlıca faktörlerdir. Ayrıca, elektrikli taşıtlara olan talebin artması, lityum-iyon pil sektörünün gelişimini de desteklemiştir. Bununla birlikte, elektronik cihazlardaki yüksek maliyet ve yangın riski, önümüzdeki yıllarda pazar büyümesini engelleyebilir. Otomobil endüstrisindeki büyüme, elektrikli taşıtlarda kullanılacak lityum-iyon pillere olan talebi artıracak. Küresel Lityum-İyon Pil Piyasasının 2024 yılına kadar 56 milyar dolara ulaşacağı tahmin ediliyor. Şekil 1.2'de görüleceği gibi 2016 dan 2024'e kadar yıllık birleşik büyüme oranı (CAGR) %10.6 olarak hesaplanmıştır [23].



Şekil 1.2 : Küresel Li-ion Pil Pazarının Büyüklüğü ve Tahmini (Milyar Dolar).

1.1 Lityum-İyon Pillerin Tarihsel Gelişimi

Piller, elektrik enerjisini depolamanın en yaygın şeklidir. Pil, oksidasyon-azaltma reaksiyonunun bir sonucu olarak kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Elektrokimyasal reaksiyonlar meydana geldiğinde, elektronlar bir malzemedен diğerine harici bir devre yoluyla aktarılır. Şekil 1.3'te gösterilen tarihte bilinen ilk gerçek batarya 1800'de İtalyan fizikçi Alessandro Volta tarafından icat edildi.



Şekil 1.3 : Tarihte bilinen ilk voltaj pili.

Bu, elektrolit olarak tuzlu su çözeltisi kullanılarak ayrılmış bakır (Cu) ve çinko (Zn) disklerinden oluşan bir hücreydi. Volta hücresi, iki elektrolit içeren Daniel hücresine (1836) ve sonra da bir çinko anot ve bir karbon anotuna sahip Leclanche hücresine

(1866) gelişti. Bunların hepsi birincil hücrelerdir ve genellikle yeniden şarj edilemezler.

İkincil bir batarya birçok kez tekrar kullanılabilir ve bu nedenle depolama ya da şarj edilebilir batarya olarak da adlandırılır. 1859'da Fransız Gaston Planté, her yaştaki en başarılı akümülatör olan kurşun-asit kimyasına dayalı ilk şarj edilebilir sistemi icat etti. İkincil olarak da bilinen şarj edilebilir piller, yıllar boyunca kurşun asit (1859'da Gaston Plante) nikel-kadmiyum (1899) ve nikel-metal hidrürden Li-iyona (1977) doğru gelişmiştir [24]. Lityum pil ilk olarak Gilbert N. Lewis tarafından 1912 yılında keşfedilmiştir. İlk şarj edilebilir pil hücreleri ise 1970 lerin ilk yıllarında ortaya çıkmışlardır. Yeniden doldurulabilir lityum iyon pillerin piyasaya sürülebilmeleri yaklaşık 20 yıllık bir çalışmadan sonra mümkün olmuştur. İlk ticari versiyon 1991 yılında John B. Goodnough yönetimindeki çalışma grubu Sony tarafından bulunmuştur [25]. Bu tarihten itibaren, grafit / karbon anotları kullanarak, LIB verimli bir şekilde şarj edildi / boşaltıldı. Bununla birlikte, grafitin sağladığı düşük kapasite, ticari LIB'nin yaygın olarak kullanılmasını engellemektedir; bu nedenle, yeni nesil elektrotlar icat etme çalışmaları halen devam etmektedir.

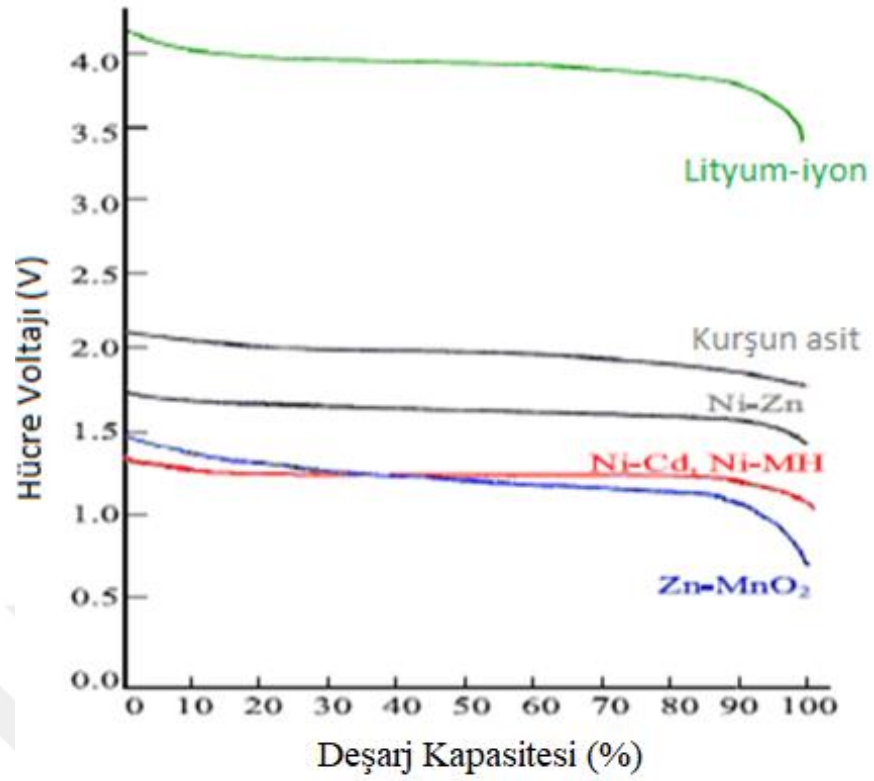
1.2 Lityum-İyon Pilin Performans Karşılaştırması

Önceki bölümlerde tartışıldığı gibi, Li-ion pil sürdürülebilir küresel kalkınmaya adil ve etkili bir ulaşım sağlamak için kullanılan en uygun pildir. İkincil (tekrar şarj edilebilir) lityum iyon piller üzerine yapılan araştırma geliştirme faaliyetleri taşınabilir elektrik ve elektronik cihazlara artan talebin yanı sıra elektrikli arabaların taşıma sektöründeki öneminin artmasıyla da gün geçtikçe değer kazanmaktadır. Lityum iyon piller sergiledikleri yüksek enerji yoğunlukları ve toksik olmamaları nedeniyle cep telefonu, diz üstü bilgisayarlar ve küçük ev aletlerinde ve salgıladıkları düşük seviyedeki CO₂ gazı salınımı sebebiyle de çevre bilincine sahip tasarımcılar ve tüketiciler tarafından tercih edilmektedirler. Yapılan pek çok araştırmaya göre yakın gelecekte tükenmesi beklenen petrol kaynaklarından sağlanan enerjiyle çalışan birçok araca gerekli enerjinin depolanmasında lityum iyon pillerin kullanılacağını ortaya çıkarmıştır. Kısa süre içinde, batarya ile çalışan araçlar, örneğin EV'ler, HEV'ler, PHEV'ler ve BEV'ler, otomobil ve havacılık endüstrisi yanısıra pazarlarını da elinde tutacaktır. Tüm piller için performans karşılaştırması Çizelge 1.2'de gösterilmiştir.

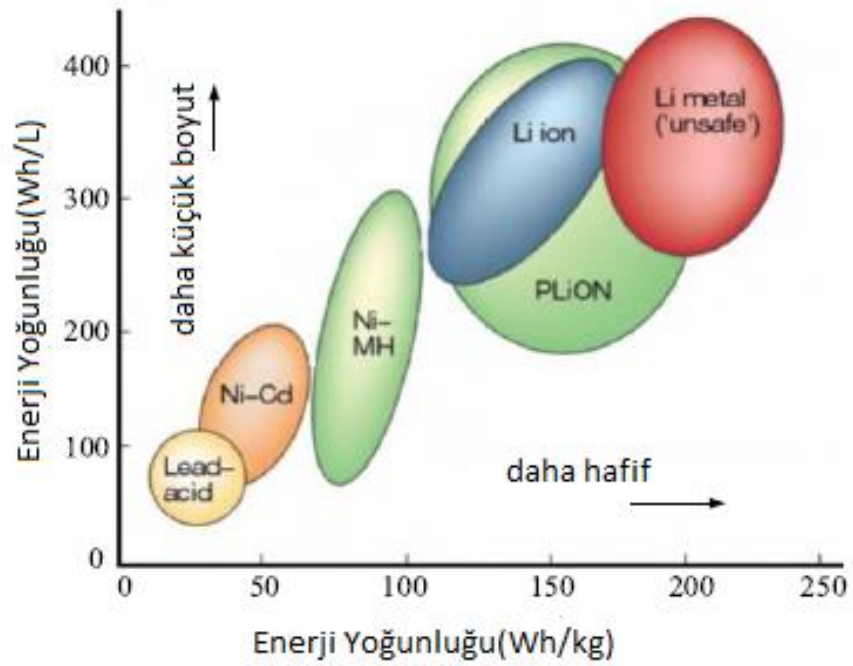
Çizelge 1.2 : Diğer piller ile li-iyon pillerin karşılaştırılması.

Pil Türü	Kurşun-asit	Ni-Cd	Ni-MH	Zn-Br	Fe-Cr	Li-iyon
Enerji Yoğunluğu(Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	35-54	20-35	110-160
Güç Yoğunluğu(W/kg)	180	150	250-1000	-	70-100	1800
Nominal Gerilim	2V	1.25V	1.25V	1.67V	1.18V	3.7V
Çalışma Sıcaklığı	-20 - 60°C	-40 - 60°C	-20 - 60°C	-20 - 60°C	-40 - 60°C	-20 - 60°C
Çevrim Ömrü	200-300	1500	300-500	>2000	-	500-1000
Şarj Verimi %	79	-	-	-	-	100
Enerji Verimi %	70	60-90	75	80	60	80
Gerilim Verimi %	-	-	-	-	82	-
Aşırı Yüklenme Toleransı	Yüksek	Orta	Düşük	Yüksek	Orta	Çok düşük
Self-deşarj	Düşük	Orta	Yüksek	Düşük	Yüksek	Çok düşük
Isıl Kararlılık	Az Kararlı	Az Kararlı	Az Kararlı	Az Kararlı	Kararlı	Çok kararlı

Kurşun-asit piller [26] nikel-kadmiyum (Ni-Cd) piller [27] ve nikel-metal hidrit (Ni-MH) piller [28,29] gibi farklı tipte geleneksel piller mevcuttur. Çizelge 1.2'de Li-ion pil ile diğer pil tiplerinin karşılaştırması gösterilmektedir. Li-ion piller, daha hafif ve daha küçük tasarımlarını sağlayan yüksek enerji verimliliği ve güç yoğunluğu bakımından üstündür. Ayrıca, Li-ion pillerin diğer avantajları arasında geniş bir sıcaklık aralığında çalışma, hızlı şarj kapasitesi, nispeten uzun çevrim ömrü, düşük self-deşarj ve şarj oranı, yüksek enerji ve şarj verimliliği sayılabilir [30,31]. Bu karlı özellikler sayesinde, Li-ion piller, biyo-implante cihazlara, tıbbi cihazlara ve taşınabilir cihazlara güç vermek için ticari pil pazarlarına hakimdir. Şekil 1.4, ticari olarak temin edilebilen şarj edilebilir pil kaynaklarının, yani lityum iyon (Li-iyon), kurşun asit, nikel-çinko (Ni-Zn), nikel kadmiyum (Ni-Cd), nikel metal hidrit (Ni-MH) ve çinko-manganez oksitin (Zn-MnO₂) tipik deşarj özelliklerini gösterir [32,33]. Neredeyse tüm bu batarya kaynakları kendi enerji ve güç seviyelerinde düzgün ve düz boşalma özelliklerine sahiptir; ancak, Li-ion pil biraz doğrusal deşarj özelliklerine sahiptir. Ayrıca, Şekil 1.5'te, aralarındaki anlaşılır farklılıklar, boyutlarına ve ağırlıklarına göre ortaya çıkar [34]. Burada, Li-ion pillerin en iyi teknolojiyi en yüksek enerji yoğunluğu ile en küçük boyut ve en hafif şekilde ortaya çıkardığı gösterilmiştir.



Şekil 1.4 : Li-iyon, kurşun asit, Ni-Zn, NiCd, NiMH ve Zn-MnO₂ pillerin tipik deşarj karakteristikleri.



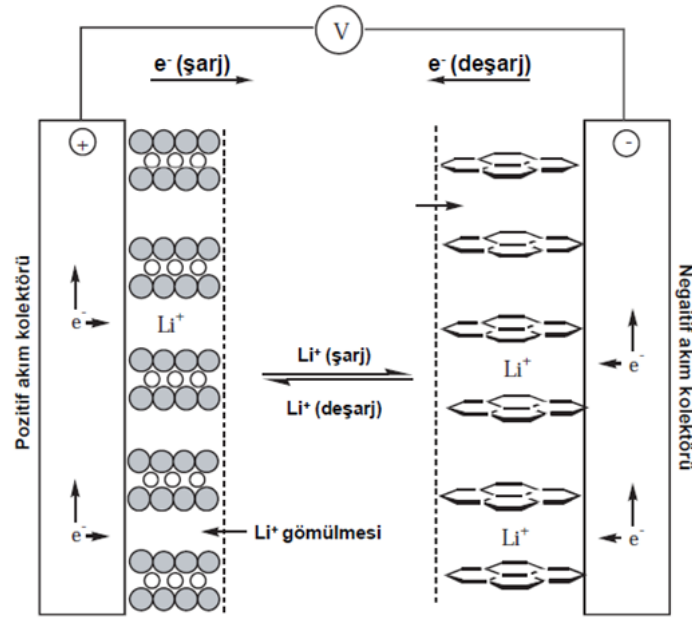
Şekil 1.5 : Çeşitli pil tiplerinin gravimetrik ve volumetrik enerji yoğunluğu.

Batarya teknolojisinin ilk ortaya çıktığı yıllarda, akım toplanmış batarya olarak üretildi; bununla birlikte, bu pil aktif elemanlar tükendiğinde elektriksel olarak şarj edilemezdi. Kurşun asit batarya, tekrar şarj edilebilecek şekilde icat edildiğinde kayda değer bir gelişme oldu. Enerjiyi tekrar tekrar depolayabilir ve ömrünü uzatabilirdi. Diğer bir yandan, Li-ion tek kullanımlık pil, yüksek enerji yoğunluğu ve birim fiyatı yüksek olmasına rağmen uzun ömürlü olması nedeniyle şarj edilebilir pil pazarında giderek daha popüler hale geldi. Pilin hacmi ve pilin enerji yoğunluğu arasındaki metodolojiler ve ilişkiler denklemde (1.1) verilmiştir ve cihazın ömrü [35] 'de incelenmiştir.

$$Pilin\ Hacmi = \frac{(Düzenlenmiş\ ortama\ güç)(cihaz\ ömrü)}{Pilin\ enerji\ yoğunluğu} \quad (1.1)$$

1.3 Lityum-İyon Pil Çalışma Prensibi Ve Pil Bileşenleri

Tekrar şarj edilebilen lityum iyon pillerde, hücreler diğer pil sistemlerinde olduğu gibi enerjiyi üretmek ve depolamaktan sorumlu katot, anot, elektrolit ve ayırıcı dahil dört ana bileşenden oluşur. Lityum (Li) tüm metaller arasında en düşük ağırlığa, en yüksek potansiyele ve en yüksek enerji yoğunluğuna sahip olanıdır. Özellikle çinkoya karşı olan spesifik kapasite üstünlüğü onu bir anot malzemesi olarak çok cazip kılmaktadır. Katot, bir lityum-metal-oksit tozudur. Lityum iyonlar, batarya boşaldığında katoda girer ve batarya şarj olduğunda ayrılır. Bir Li-ion pilin mekanizmalarının şematik gösterimi Şekil 1.6'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, şarj / deşarj işlemi lityum iyonlarının ve elektronların taşınması ile karakterize edilir. Şarj sırasında, lityum iyonları pozitif elektrot parçacıklarından ekstrakte edilir ve elektrolit ile ayırıcıdan negatif tarafa akar. Elektrik dengesini korumak için, pozitif elektrot parçacıklarının yüzeyinde aynı miktarda elektron aynı anda serbest bırakılır. Bu elektronlar daha sonra pozitif akım toplayıcı tarafından toplanır ve şarj akımını oluşturmak için harici devre üzerinden negatif elektroda hareket eder. Lityum iyonları elektronlarla reaksiyona girer ve sonrasında pozitif elektrot malzemelerine birleştirilir. Boşalma sırasında, elektrokimyasal işlem, şarj sırasında olanlara terstir. Eşit miktarda lityum iyonları ve elektronlar aynı anda negatif elektrottan kaçar ve sırasıyla iç ve dış geçit boyunca pozitif elektroda geri döner.



Şekil 1.6 : Lityum-iyon pilin şematik gösterimi.

Lityum-iyon pilin gelişmesini geciktiren ana faktörler, zayıf kullanım, stresin yol açtığı malzeme hasarı, kapasite solması ve muhtemel termal kaçak oluşumudur[36]. Araştırmacılar, lityum-iyon pillerin veya farklı türlerinin kimyalarını ticarileştirmek için önemli çabalar harcamaktadırlar. Belirli bir uygulama için bir lityum-iyon pilin seçilmesi, esas olarak katodun kimyasına ve örneğin hücrelerin imalatında rol oynayan diğer fiziksel faktörlere bağlıdır; elektrotlarda malzeme yoğunluğu, bileşim ve katı parçacık büyüklüğü ve hücre geometrisi. Katot malzemelerin üretilmesinde lityum-iyon piller için çeşitli kimyasal maddeler göz önünde bulundurulmuştur[37-40]. Bazı ana katot malzemeleri, lityum kobalt oksit (LiCoO_2), lityum mangan oksit (LiMn_2O_4) ve lityum demir fosfattır (LiFePO_4). Pilin performansı, hücre geometrisi, katod materyali ve katodun hazırlama veya üretim yönteminden önemli ölçüde etkilenir[41,42]. Pillerin tasarımının maksimum enerji ve güç performansı elde etmek için geliştirilmesi, türlerin yayılması ve elektrik iletkenliği gibi elektrot malzemelerinin fiziksel özelliklerinin, şarj /deşarj oranı gibi operasyonel parametrelerinin yanısıra elektrot kalınlığı ve hücre performansını etkileyen katı aktif maddelerin parçacık büyüklüğü gibi hücre yapısal parametrelerinin nasıl yapıldığının kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını gerektirir. Farklı li-iyon pil türleri, farklı kimyaları kullanır ve farklı performans, maliyet ve güvenlik özellikleri sunar [43]. Li-ion pillerde, yaygın olarak LiCoO_2 katot materyali olarak kullanılırken LiMn_2O_4 daha

yüksek güvenlik gerektiren bazı uygulamalar için kullanılır. Araştırma ve geliştirme aşamasındaki Li-ion piller için çoğu yeni katot materyali, elektrik kapasitesi yoğunluğu arttıkça daha düşük deşarj potansiyeli sağlama eğiliminde olan geçiş metal oksitlerdir. Karbon bazlı malzemeler (genellikle grafit) şu anda Li-ion pillerde anot malzemeleri olarak kullanılmaktadır. Diğer karbon bazlı malzemeler ve saf Li metal çeşitleri şu anda alternatif anot malzemeleri olarak önerilmektedir, ancak birçoğunun elektrot potansiyeli ve şarj-deşarj döngüsü yaşamı endişeleri bakımından daha da geliştirilmesi gerekmektedir. Sulu olmayan elektrolitler (organik ve iyonik sıvılar), jelleşmiş elektrolitler ve katı organik ve inorganik elektrolit malzemeleri gibi elektrolitler için çeşitli seçenekler mevcuttur (bkz. Şekil 1.7). Halen kullanılan ana elektrolitler, periyodik ve doğrusal karbonatların karışımlarını içermektedir. Vinilen ve etilen karbonatlar veya sülfidler gibi elektrolit katkı maddeleri de, bazı elektrolit çözücülerin döngü performansını arttırmak için kullanılır [44].

KATOT	ELEKTROLİT	ANOT
M_xO_y (M=V, Mn) MS_2 (M=V, Ti)	organik sıvı	Lityum Metal/Alaşım
$Li_{1-x}Co_{1-y}M_yO_2$ (M=Ni, Mg, etc)	iyonik sıvı	Lityumlu Karbonlar
$Li_{1-x}Mn_{1-y}M_yO_2$ (M=Co, Cr, etc)	inorganik sıvı	Sn/Si-tabanlı Alaşım
$Li_{1-x}Mn_{2-y}M_yO_4$	inorganik katı	3d-Metal Oksit
polianyon bileşikler Li_xMPO_4 (M=Fe, Co, Mn) Li_xVOPO_4 , $LiVPO_4F$	katı polimer	Metal Hidritler/Nitritler
Organik Moleküller kinon $Li_4C_6O_6$	polimer jel	Organik Moleküller Tereftalat $Li_2C_3H_4O_4$
	hibrit sistem	

Şekil 1.7 : Şarj edilebilir sulu olmayan Li-ion piller için incelenen elektrot materyallerinin ve elektrolit tiplerinin listesi.

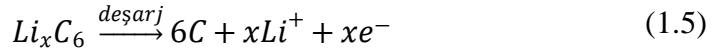
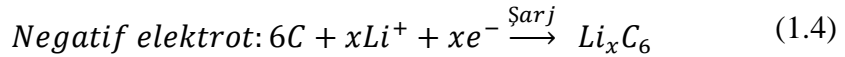
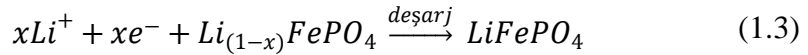
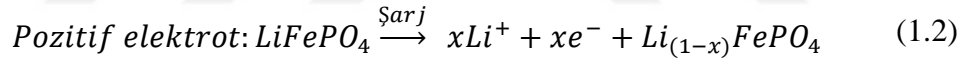
Metal kalkojenitler (örneğin, TiS ve MoS_2) ve manganez veya vanadyum oksitler katod olarak diğer yandan metalik Li veya grafit ise anot olarak araştırılmış ve şarj edilebilir Li-ion piller için başlangıçtaki başarılarla yol açmıştır [45,46]. Sn / Si / Ge alaşımları ve geçiş metali oksitler gibi yüksek kapasiteli lityum depolama malzemelerinin kullanılması, yüksek enerjili pillerin gelişimini destekledi[47]. Son

zamanlarda, potansiyel olarak düşük maliyet ve yüksek güvenlik sağlayacak olan polianyon bazlı bileşiklere (özellikle LiFePO₄) yönelik büyük ilgi gösterilmiştir

Çizelge 1.3 : Batarya malzemeleri ve parametreleri.

Malzeme	Materyal	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül Isı [J/(kg.°C)]
Katot	LiFePO ₄	2300	1300
Pozitif kolektör	Al	2710	903
Pozitif kutbu	Al	2710	903
Anot	Grafit	1347	1437
Negatif kolektör	Cu	8930	386
Negative kutbu	Çelik	7900	460
Ayırıcı	PE	1400	1551
Elektrolit	Organik çözelti (EC+DEC+EMC+DMC)	1223	1375

LiFePO₄(lithium iron phosphate) / grafit, pozitif ve negatif elektrot malzemeleri olarak kullanıldığında, şarj ve deşarj işlemleri sırasında Li-ion pil içinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [48].



Lityum-iyon piller gibi enerji depolama aygıtları, depolayabilecekleri enerji miktarına ve ne kadar hızlı şarj/deşarj edilebileceğine göre seçilir. Lityum iyon bataryaların şarj/deşarj süreçleri sırasında performansını etkileyen birçok parametre bulunur. Akım, voltaj, sıcaklık gibi batarya parametreleri, batarya performanslarının kıyaslanması için belirlenmesi gereken parametrelerdir [49].

2. LİTERATÜR TARAMASI

Yüksek enerji yoğunluğuna (705 Wh / L'ye kadar) ve güç yoğunluğuna (10.000 W / L'ye kadar) sahip Lityum-iyon piller, yüksek kapasite ve mükemmel çalışma performansı sergiler. Şarj edilebilir piller olarak, lityum-iyon piller çeşitli uygulama sistemlerinde güç kaynağı olarak görev yapar. Kritik bir faktör olarak sıcaklık, lityum iyon pillerin performansını önemli ölçüde etkiler ve ayrıca lityum iyon pillerin kullanımını sınırlar. Ayrıca, farklı sıcaklık koşulları farklı olumsuz etkilere neden olur. Lityum pillerin içindeki sıcaklığın doğru şekilde ölçülmesi ve sıcaklık etkilerinin anlaşılması, uygun pil yönetimi için önemlidir[50]. Bu tez de sıcaklık etkilerinin çoğu, bataryalarda meydana gelen kimyasal reaksiyonlarla ve aynı zamanda bataryalarda kullanılan malzemelerle ilgilidir. Kimyasal reaksiyonların yanı sıra, elektrotların ve elektrolitlerin iyonik iletkenlikleri de sıcaklıktan etkilenir. Örneğin, lityum tuzu bazlı elektrolitlerin iyonik iletkenliği düşük sıcaklıklarda azalır[51].

Bataryalar da şarj/deşarj durumunda çeşitli kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar meydana gelir[12]. Özellikle, hızlı şarj-deşarj ve düşük-yüksek voltajlı aküler sırasında yüksek akım seviyelerinde normal durumdan daha fazla ısı üretir. Üretilen ısı, hücrenin kimyasal yapısına, şarj durumuna ve şarj /deşarj profiline bağlıdır. Pil paketinin boyutunun artırılması ve hücre sayısının artırılması, ciddi ısı ve elektriksel dengesizlik sorunlarına neden olabilir [52,53]. Bu kaygılarla ilgili olarak, EV'lerde ve HEV'lerde kullanılan LIB'ler, ABD Gelişmiş Pil Konsorsiyumu (USABC) tarafından önerilen 10 yıllık bir yaşam beklentisini zor karşılayabilir [54].

Performans ve kullanım ömrü arasında uygun bir denge sağlamak için Kurşun Asit, Ni-MH ve Li-ion piller için optimum çalışma aralığının 25°C ila 45°C arasında olduğu ve sıcaklık farkının modülden başka bir modüle maksimum 5°C olması gerektiği gösterilmiştir. Yani sıcaklığın sabit olması arzu edilir, böylece hücreler arasında küçük değişiklikler olur [55]. Öte yandan, kurşun asit ile ilgili yapılan önceki çalışmalarda -26°C ile 65°C arasındaki sıcaklıkların verimlilik ve güç

kapasitesi açısından uygun olduğu belirtilmektedir [56]. Bir diğer çalışmada, li-iyon pillerin maksimum 45°C ila 50°C arasında çalışma sıcaklığına sahip olması gerekliliği yanı sıra kullanım ömrü ve güvenlik açısından -10°C'nin altındaki sıcaklıklara düşmesi istenir [57]. Sıcaklık, pilleri beş önemli şekilde etkiler:

1. Elektrokimyasal çalışma prensibini bozabilir.
2. Enerji verimliliğini azaltır.
3. Güvenliği ve güvenilirliği olumsuz yönde etkiler.
4. Ömrü kısaltır ve bakım gerektirir.
5. Şarj etme süresini uzatır ve etkili kullanımı olumsuz etkiler [58].

Rıza Kızılel ve ark. yaptıkları analiz sonucunda sıcaklıktan kaynaklanan iki ana problem olduğu görülmektedir. Bunlardan biri, şarj ve deşarj sırasında ortaya çıkan ısıtma; bu, aracın ve bataryanın ömrünü olumsuz etkiler. İkincisi, batarya takımındaki sıcaklığın eşit olmayan dağılımıdır; bu batarya yapımında ve modüller arasında bozulmalara neden olur [59].

Batarya uygulamaları, birçok teknolojik alanda gerekli olan yüksek performanslı batarya talepleri ile hızla artmaktadır. Bunun yanısıra, -25°C ila 60°C arasındaki sınırlı sıcaklık aralığı, yüksek bir sıcaklıkta (> 100°C) çalışan, yüksek enerjili, şarj edilebilir pil gerektiren bir dizi uygulama için bir problemdir. Yapılan bir çalışmada, yüksek sıcaklık elektrolitinin tasarımı, yüksek sıcaklıklarda kapasiteden sorumlu olan elektrot / elektrolit arayüzü olduğundan, yüksek sıcaklıkta çalışmanın en önemli kilit sorunlarından biri olduğu bulunmuştur. Geçmişte yapılan birçok çalışma, polimerler ve katı hal sistemleri gibi karbonat bazlı sistemlerden daha iyi performans gösterebilen alternatif elektrolit sistemlerinin mevcut olduğunu göstermiştir [60].

Batarya termal yönetim probleminin üstesinden gelmek için önceki çalışmalarda ısı transferi ve akışkanlar mekaniği temel prensipleri ve hesaplamalı akışkanlar mekaniği kullanılmıştır [61,62]. Özellikle, hesaplamalı akışkanlar dinamiği(CFD) çözümleri ile, pillerin termal dağılımı belirlenebilir ve ambalaj tasarımının bitmesinden önce gerekli tasarım modifikasyonları yapılabilir [63]. Bataryadaki sıcaklık artışı, yanma ve patlama gibi istenmeyen koşullara yol açabilir. Bu nedenle, darbe dayanımı, batarya ve batarya paketi için yanma analizinin CFD ve sonlu hacimler metodu ile gerçekleştirilmesi gerektiği kanıtlanmıştır [12,64].

3. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde, bir batarya paketindeki batarya hücreleri arasındaki sıcaklık dağılımının tutarsızlık problemleriyle başa çıkmak için, sonlu hacimler metoduna dayanan silindirik bir batarya için termal model sunulacaktır. Fiziksel yapı ve elektrokimyasal reaksiyonların her ikisi de dikkate alınacak ve batarya bileşenlerinin başlangıç koşulları, sınır koşulları ve termal karakteristik parametreleri teorik hesaplama ve deneylerle incelenecektir.

3.1 Isı Transfer Mekanizması

Bir lityum-iyon pilin termal dengesi şu şekilde gösterilebilir:

$$Q_p = Q_e + Q_a \quad (3.1)$$

Q_p 'nin üretilen ısı olduğu durumda, Q_e çevreye yayılan ısıdır. Q_a ise sıcaklık değişimi ile batarya içerisinde meydana gelen ısıdır.

Batarya ve çevre ortamı arasındaki ısı alışverişi, başlıca üç ısı transfer tipi, yani iletim, taşınım ve ışınım yoluyla sağlanır. İletim ile karşılaştırıldığında, ışınım ve taşınım yoluyla aktarılan ısı nispeten küçüktür ve bu nedenle makul olarak göz ardı edilebilir. Böylece, ısı dengesi denklemi aşağıdaki gibi basitleştirilebilir:

$$\rho_k C_{p,k} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (k_k \nabla T) + q \quad (3.2)$$

Denklemin sol tarafı, pil içerisindeki ısı iletim denklemini ifade etmektedir. Sağ taraftaki ilk terim iletim yoluyla enerji akışı, ikinci terim ise batarya ısı üretim hızıdır. ρ_k , $C_{p,k}$ ve k_k sırasıyla her bir batarya elemanının yoğunluğunu, özgül ısıyı ve ısı iletkenliğini, ve q farklı ısı üretim hızlarının kümülatif bir değeridir.

Batarya sıcaklık alanının hesaplanmasını daha da kolaylaştırmak için burada birkaç varsayım yapılmıştır:

- 1) Her malzemenin ısı iletkenliği bir yönde aynıdır.
- 2) Her malzemenin özgül ısı ve ısı iletkenliği sıcaklık gradyanından etkilenmez.
- 3) Şarj / deşarj sırasında, akım yoğunluğu homojendir ve ısı üretim hızı tutarlıdır.

Bu varsayımlara dayanarak, Kartezyen koordinatı altında bir 3 boyutlu(3D) batarya ısı iletim denklemi, batarya sıcaklık alanını hesaplamak için temeli oluşturan Denklem (3.3) olarak türetilmiŐtir.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q \quad (3.3)$$

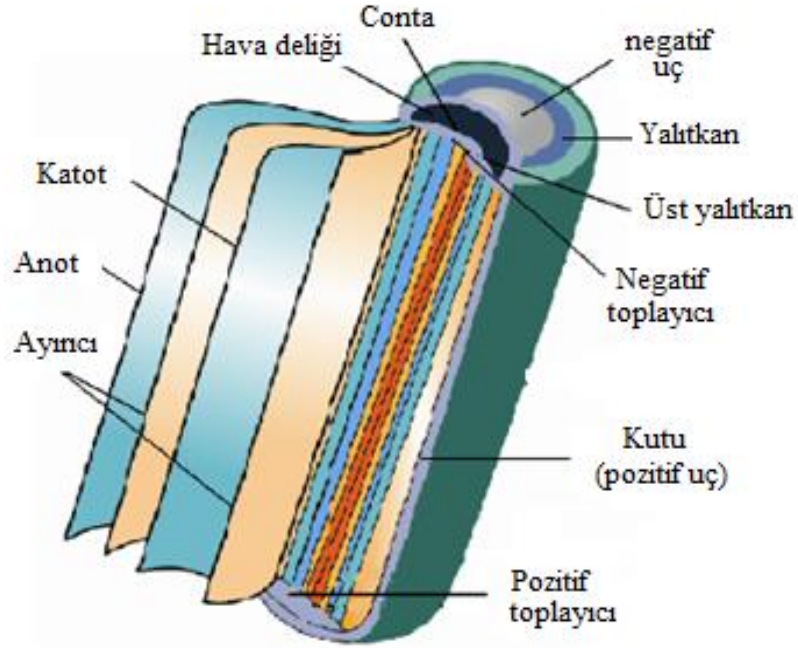
T, ρ ve C_p sıcaklık, ortalama yoğunluk, bataryanın özgül ısıdır. k_x , k_y ve k_z , bataryanın X, Y ve Z koordinatlarındaki termal iletkenliğini temsil eder ve q, ısı üretim hızıdır.

Denklem (3.4) de silindirik koordinatlarda genel ısı iletim denklemini ifade etmektedir. Kullanılan yazılım programlarında, pilin sıcaklık dağılım analizi silindirik koordinatlar yerine bir kesitin analizi yapıldığından dolayı hesaplamalarda kullanılan ısı iletim denklemi kartezyen koordinatlar genel ısı iletim denklemdir. Literatürde de pilin sıcaklık dağılım analizi bir kesit alanı dikkate alınarak yapıldığından dolayı bu tez de kartezyen koordinatlar genel ısı iletim denklemi kullanılmıştır.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q \quad (3.4)$$

3.2 Sonlu Hacim Modelleme

Bu alıŐmada 2.85 Ah kapasiteli silindirik bir batarya göz önünde bulundurulmuştur ve ayrıntılı yapı Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Pozitif ve negatif akım toplayıcılarının her ikisine de kaynaklanmış metalik kutuya sahip jöle-rulo yapısından oluşur. Jle-rulo(jelly-roll) yapısal olarak elektrot tabakalarından, akım toplayıcılardan ve ayırıcılardan oluşur. Pozitif uç alüminyumdan yapılmıştır. Pozitif ve negatif elektrot toplayıcıların sırasıyla alüminyum ve bakırdan yapıldığına dikkat edilmelidir. Kullanılan malzemeler ve parametreleri izelge 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Silindirik bir bataryanın yapısı.

3.3 Lityum İyon Batarya Sonlu Hacimler Modeli

Şarj edilebilir Li-ion pillerin sorunları ve zorlukları derinlemesine tartışılmış ve tipik bir silindirik pilin yapısı da tanıtılmıştır [65]. Batarya yapısı oldukça karmaşıktır. Sonlu hacimler modeli, 3 boyutlu batarya ısı transferini tanımlamak için doğrudan kullanılmışsa, sonuç olarak kabul edilemez. Hesaplama gereksinimlerini ortaya çıkaran çok sayıda eleman gerekli olacaktır. Bu, modelin gerçek dünyadaki uygulamalarda kullanılmasını önlemektedir. Bu nedenle, hesaplama etkinliğini sağlamak için pil yapısını basitleştirmek gerekmektedir. Bu çalışmada, elektrot tabakaları ve ayırıcılar sadeleştirilmiş 3 Boyutlu modelde çekirdek unsurlar olarak kabul edilmiştir. Elektrolit, yalıtkanlar, vb. gibi diğer bileşenler, batarya ısı davranışı üzerindeki ufak etkileri nedeniyle göz ardı edilmiştir.

3.4 Sonlu Hacim Modelinin Başlangıç ve Sınır Şartları

Batarya sıcaklık alanı hesaplamasındaki ana zorluk, ısı iletkenlik denklemini, yani Denklem (3.4) 'i çözmektir. Bu amaçla, doğru parametreleri (k , C_p , ρ , q) elde etmek ve başlangıç ve sınır koşullarını doğrulamak önemlidir.

3.4.1 Isı fiziksel parametreleri

3.4.1.1 Ortalama yoğunluk

Tüm hücre çekirdeğinin M_b ağırlığı ve hacmi V_b , ölçüm yoluyla elde edilebilir ve daha sonra ortalama yoğunluk,

$$\rho = \frac{\sum_i m_i}{\sum_i v_i} = \frac{M_b}{V_b} \quad (3.5)$$

burada ρ , hücre çekirdeğinin yoğunluğu, m_i ve v_i , her hücre çekirdeği elemanının ağırlığı ve hacmidir.

3.4.1.2 Özgül ısı

Özgül ısı, deney veya teorik hesaplama ile elde edilebilir. Deneylerde, ısı üretimi doğru bir şekilde ölçülebilir ve daha sonra ölçülen sıcaklık değişimi ve batarya ağırlığı dahil edilerek özgül ısı hesaplanabilir. Bu yöntem, ısı üretimi ölçümünün kesinliğini sağlamak için adyabatik kalorimetrenin kullanılmasını gerektirir.

Özgül ısı hesaplaması için teorik yöntem, hücre çekirdeğinin tüm bölümlerinde özgül ısının ağırlıklı değerini hesaplayan Denklem (3.6) 'e dayanmaktadır.

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^n m_i C_i}{M_b} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i V_i C_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i V_i} \quad (3.6)$$

M_b hücre çekirdeğinin ağırlığıdır, m_i , C_i , V_i sırasıyla kullanılan malzemenin ağırlığı, özgül ısı, hacmidir. Bu çalışmada, teorik hesaplama belirli bir ısı sağlamak için seçilmiştir.

3.4.1.3 Isı iletim katsayısı

Genel olarak, ısı transfer işleminin [66] ve [67] 'de belirtildiği gibi ısı transfer hızının ortotropik olduğu gerçeğiyle çelişen izotropik olduğu varsayılmaktadır. Pil yapısı incelendiğinde, silindir Li-iyon bataryanın ısı transfer hızının radyal yönde aynı, fakat eksenel doğrultuda tutarsız olduğu açıktır. Radyal ısı transfer hızı, seri direnç yöntemleri ile elde edilebilir ve eksenel olan, sırasıyla Denklem (3.7) ve Denklem (3.8) 'de gösterilen paralel direnç yöntemleriyle elde edilebilir.

$$k_x = k_z = \frac{V}{\sum_i \frac{V}{k_i}} = \frac{V}{\frac{V_p}{k_p} + \frac{V_n}{k_n} + \frac{V_s}{k_s}} = \frac{1}{\frac{\delta_p}{k_p} + \frac{\delta_n}{k_n} + \frac{\delta_s}{k_s}} \quad (3.7)$$

$$k_y = \sum_i \frac{k_i V_i}{V} = k_p \delta_p + k_n \delta_n + k_s \delta_s \quad (3.8)$$

burada k_x , k_y ve k_z , dikdörtgen koordinatların x, y, z yönünde ısı iletim katsayısıdır ve k_p , k_n ve k_s , pozitif elektrot, negatif elektrot levha ve ayırıcının ısı iletim katsayısıdır. δ_p , δ_n ve δ_s , sırasıyla pozitif elektrot levhasının, negatif elektrot levhasının ve ayırıcının hacim oranıdır.

Simüle edilmiş ısı iletim katsayısının doğruluğunu daha da arttırmak için elektrolitin etkisi burada göz önünde bulundurulur. Her bir parçanın ısı iletim katsayısı denklem (3.9) ile düzeltilebilir.

$$k_i = k_m(1 - \varepsilon) + \varepsilon k_f \quad (3.9)$$

burada ε pilin gözenekliliği, k_f elektrolitin ısı iletim katsayısıdır, k_m gözenekli malzemenin elektrolit içermeyen ısı iletim katsayısıdır ve k_i , gözenekli malzemenin düzeltilmiş ısı iletim katsayısıdır. Batarya bileşenlerinin orijinal ve düzeltilmiş parametreleri Çizelge 3.1'de listelenmiştir.

Çizelge 3.1 : Elektrolit içindeki pil malzemesinin ısı iletim katsayısının düzeltilmesi.

Parametre	Pozitif elektrot levhası	Negatif elektrot levhası	Ayırıcı
ε	0.25	0.3	0.47
δ_i	0.455	0.304	0.241
$k_m / W / (m.k)$	1.48	1.04	0.351
$k_f / W / (m.k)$	0.59	0.59	0.59
$k_i / W / (m.k)$	1.201	0.895	0.466

Yukarıdaki analize ve bilinen parametrelere göre, batarya ısısı fiziksel parametrelerinin hesaplanan sonuçları, Çizelge 3.2'te türetilmiş ve listelenmiştir.

3.4.1.4 Hücre ısı üretim oranı

Pillerde üretilen ısı iki kategoriye ayrılabilir: polarize ısı ve kimyasal reaksiyon ısısı. Polarize ısı miktarı esas olarak iç dirence bağlıdır, kimyasal reaksiyonlar ekzotermik veya endotermik olabilir. Polarize ısı ile karşılaştırıldığında, kimyasal reaksiyon ısısı, özellikle yüksek şarj / deşarj hızlarında sınırlıdır.

Çizelge 3.2'de batarya bileşenlerinin malzeme, yoğunluk, özgül ısı ve ısı iletim katsayısı verilmiştir. Bu değerler bu tezde yapılan analizlerde baz olarak alınmıştır.

Çizelge 3.2 : Pil ısısı fiziksel parametrelerinin hesaplanan sonuçları.

Bileşen	Malzeme	Yoğunluk kg/m ³	Özgül ısı J/(kg.°C)	Isı iletim katsayısıW/(m.K)
Hücre çekirdeği	Anot, katot ve ayırıcı karışımı	2000	900	$k_x = k_z = 1.6$ $k_y = 3$
Alüminyum kutu(pozitif uç)	Al	2710	903	238
Negatif uç	çelik	7900	460	20
Yalıtım filmi	PVC	920	1000	0.3344

1) Hücre çekirdeğinin ısı üretim hızı, aşağıda gösterilen Bernardi ısı üretim modeline dayanarak hesaplanabilir.

$$q = \frac{I}{V_m} \left[(U_0 - U) + T \frac{dU_0}{dT} \right] = \frac{1}{V_0} [IxR + T \frac{dU_0}{dT}] \quad (3.10)$$

V_b hücre hacmi ise, I şarj / deşarj akımı, T sıcaklık, R pilin iç empedansı ve dU_0 / dT sıcaklıkla değişen açık devre voltajının katsayısıdır.

2) Pozitif ve negatif terminaller direnç yükü olarak kabul edilebilir ve ısı üretim hızı aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$q = \frac{I^2 R_m}{V_m} \quad (3.11)$$

I , terminallerden geçen çalışma akımıdır, R_m doğrudan ölçümle elde edilebilen pozitif / negatif terminalin direncidir ve V_m , pozitif / negatif terminalin karşılık gelen hacmidir.

Çizelge 3.3 : Çeşitli sıcaklık ve deşarj hızlarında başlıca bileşenlerin ısı üretim hızları(W/m³).

Sıcaklık	263K	298K	298K
Deşarj hızı	3C	1C	3C
Elektrik çekirdeği	93585	12825	45156
Pozitif uç	1136	126	1136
Negatif uç	6616	735	6616

Her bileşenin ısı üretim hızları, çeşitli sıcaklıklarda ve şarj / deşarj oranlarında hesaplanır. Sonuçlar Çizelge 3.3'te gösterilmektedir.

3.4.1.5 Başlangıç şartları

1) Başlangıç sıcaklığı

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (3.12)$$

buradaki T_0 , analiz başlangıç sıcaklığıdır.

2) Isı transfer katsayısı

Yüzey ısı transfer katsayısı, doğal taşınım altında $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ve zorlanmış taşınım altında $10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ olarak ayarlanmıştır [68]. Bu tez çalışmasında, ısı aktarımı sınır koşulları doğal taşınım altında kabul edilmiştir.



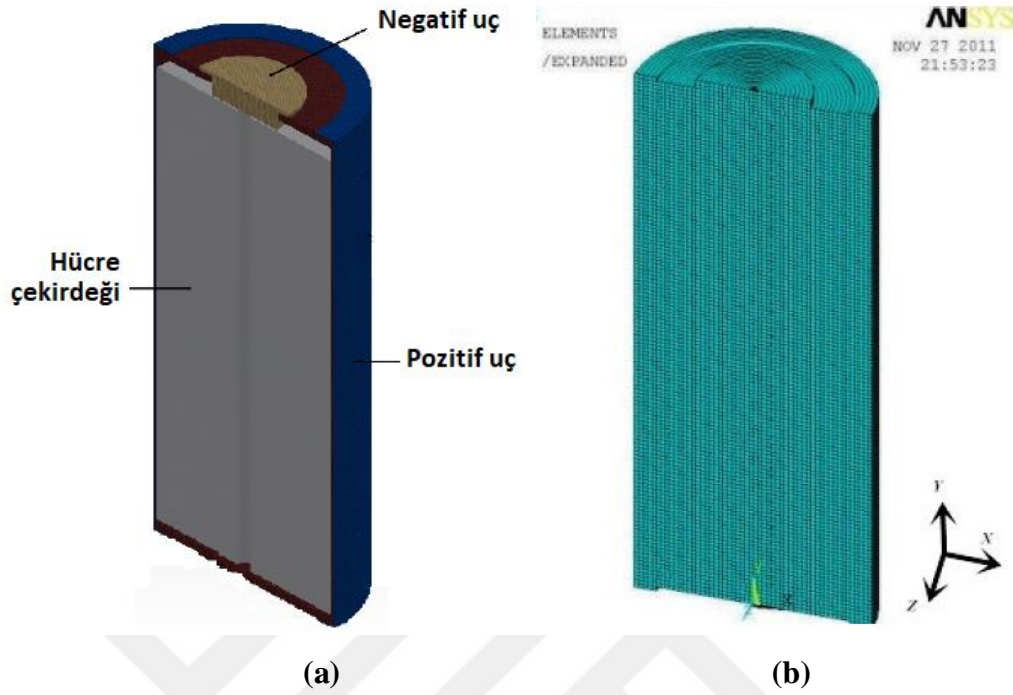
4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Bu çalışma ile mevcut enerji depolama sistemlerine alternatif olarak, hücreler arasındaki sıcaklık dağılımı daha tutarlı olan ve kolay boyutlandırılabilen bir li-iyon batarya tasarımı amaçlanmıştır. Bu tasarım yapılırken Zhenpo ve çalışma arkadaşlarının [43] yaptığı çalışmadaki matematiksel modelleme ve kimyasal yapı baz alınmıştır. Samsung 18650 li-iyon pil kullanarak örnek çalışmada geliştirilen sonlu hacim modeli doğrulanmıştır. Batarya paketinin ısı akış alanı verilerini hesaplamak için CFD yazılımı olarak FloEFD kullanılmıştır. Bu çalışma öncelikle tek hücre pil kullanılarak daha sonra 14 tane lityum-iyon pil kullanılarak oluşturulan bir modül için yapılmıştır. Lityum-iyon pilin çevreye yaydığı ısı ile bağlı bulunduğu cihaza zararını engellemek ve bu sıcaklık dağılımını hapsedmesi için modül, polimer (PA66) malzemesinden üretilmiştir.

4.1 Tek Hücre İçin Örnek Deneysel Çalışma

Zhenpo ve çalışma arkadaşlarının [43] gerçekleştirdiği çalışmada Sony 18650 tipinde bir Li-ion pil hücresi kullanılmıştır. Pil; 18 mm çapında ve 65 mm boyundadır. Model numarasında bulunan 0 sayısı ise pilin şeklini ifade etmektedir. 0; pil modelinin silindirik şeklinde olduğunu simgelemektedir. Pil; 3,7; 3,9 veya 4,2 Volt değerlerinde enerji çıkışı sağlayabilmektedir. Bu tipte piller son yıllarda pek çok alanda kullanılmakta ve bir çok avantaj sağlamaktadır. Gerek ağırlığının az olması gerek diğer pillere oranla enerji kayıplarının az olması sebebiyle endüstride geniş yer kaplamaktadır. Yüksek özgül enerji ve enerji yoğunluğuna, geniş çalışma sıcaklık aralığına, uzun raf ömrüne sahip olmasıyla birlikte hafıza etkisinin olmayışı lityum iyon pil kullanımının önemli avantajlarından biridir. Bunun yanı sıra yüksek sıcaklıklarda bozunması önemli bir dezavantajdır. Ani alev almalar ve patlamalar yüksek sıcaklıklar sonucu lityum iyon bataryalar da görülmektedir. Bu esnada aşırı yanıcı hidrojen gazının ortaya çıktığı da unutulmamalıdır. Ayrıca bu gibi durumlarda

zehirli elektrolit gazının oluşması sonucunda çevreye ve insan sağlığına tehlike söz konusudur.



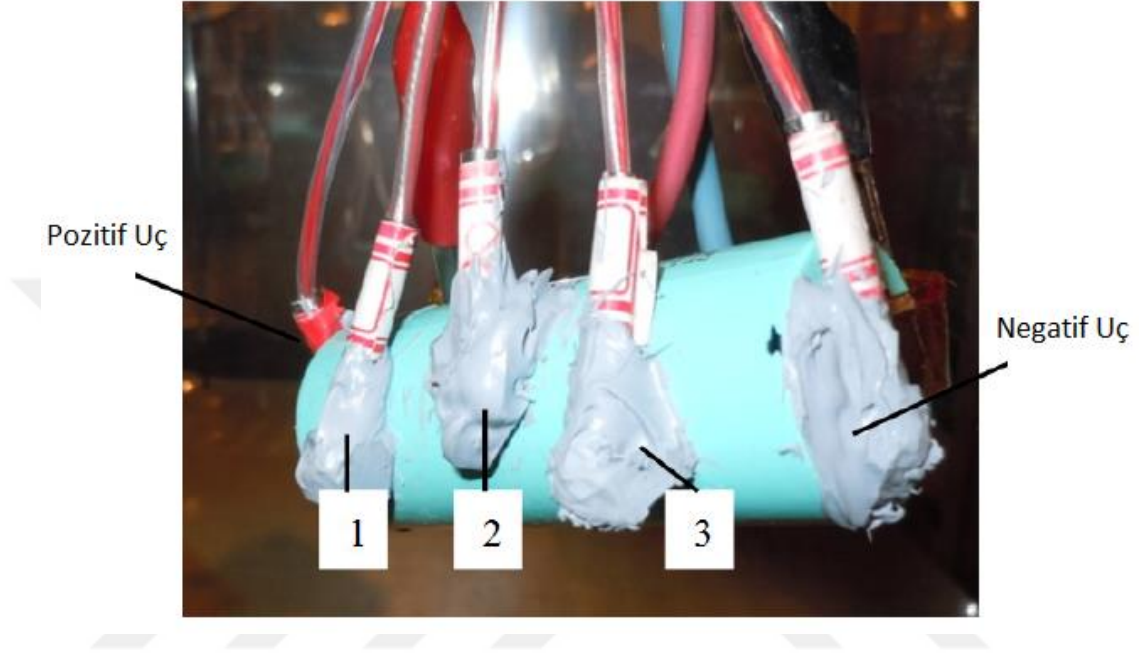
Şekil 4.1 : Sony 18650 li-ion pilin yapısı (a) ve pilin sonlu hacim modeli (b)

Yukarıdaki şekilde deneysel çalışmada kullanılan Sony 18650 tipi Li-ion pil hücrenin program yardımıyla oluşturulan basitleştirilmiş termal modeli görülmektedir. Pilin üst kısmında negatif uç yer almaktadır. Hücre çekirdeği pilin orta kısmında ve pozitif uç da Şekil 4.1 (a)'da gösterilmektedir. Silindirik Li-ion pilin sonlu hacim modeli, ANSYS yazılımında oluşturulmuştur, burada PLAN55 birimi, Şekil 4.1 (b)'de gösterildiği gibi uygun mesh yazılımı ile 47650 eleman üretmek üzere seçilmiştir.

Materyal ve metod bölümünde belirtilen Çizelge 3.2'de, çalışmada kullanılan pilin hücre bileşenleri hakkında detaylı bilgilere yer verilmiştir. Pilin hücre bileşenleri; hücre çekirdeği, pozitif uç ve negatif uçtan oluşmaktadır. Hücre çekirdeği; anot, katot ve ayırıcı karışımından meydana gelmekte ve yoğunluğu 2000 kg/m^3 , özgül ısısı $900 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$ ve ısı iletim katsayıları ise k_x , k_z $1,6 \text{ W/mK}$ ve k_y , 3 W/mK değerindedir. Pozitif uç alüminyum kutu olarak da bilinmekte ve Al malzemesinden oluşmaktadır. Pozitif ucun yoğunluğu 2710 kg/m^3 , özgül ısısı $903 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$ ve ısı iletim katsayısı 238 W/mK değerindedir. Negatif ucun malzemesinde çelik

kullanılmıştır ve yoğunluğu 7900 kg/m^3 , özgül ısısı $460 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$ ve ısı iletim katsayısı 20 W/mK değerindedir.

Şekil 4.2’de gösterildiği üzere, bataryanın belirli bölgelerine sıcaklık ölçüm cihazları olan termokuplar yerleştirilmiş ve ölçüm sonuçları ile yazılımla elde edilen analiz sonuçları birbiri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.2 : Ölçüm noktalarının konumları

Bataryanın pozitif ve negatif uçları ile batarya yüzeyinde bulunan 1, 2 ve 3 numaralı bölgelere termokuplar yerleştirilmiştir. Sıcaklık sensörleri batarya yüzeyine dikkatli bir şekilde yapıştırılmıştır. Bu yapıştırıcıların, kızılötesi görüntülemeye göre yakındaki yerel sıcaklık üzerinde belirgin bir etkisi yoktur. Aşağıdaki çizelgede ölçüm cihazları ile ilgili önemli bilgiler verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Ölçüm cihazının özellikleri.

Cihaz	Tür	Sıcaklık Aralığı ($^\circ\text{C}$)	Doğruluk Yüzdesi (%)	Ölçüm Modları
Kızılötesi Görüntüleme Cihazı	Thermo Vision™ A20M	(-20)-(250)	%2	Spot, Area, Difference
Termokupl	TSC Thermocouple	(-200)-(350)	%4	Spot

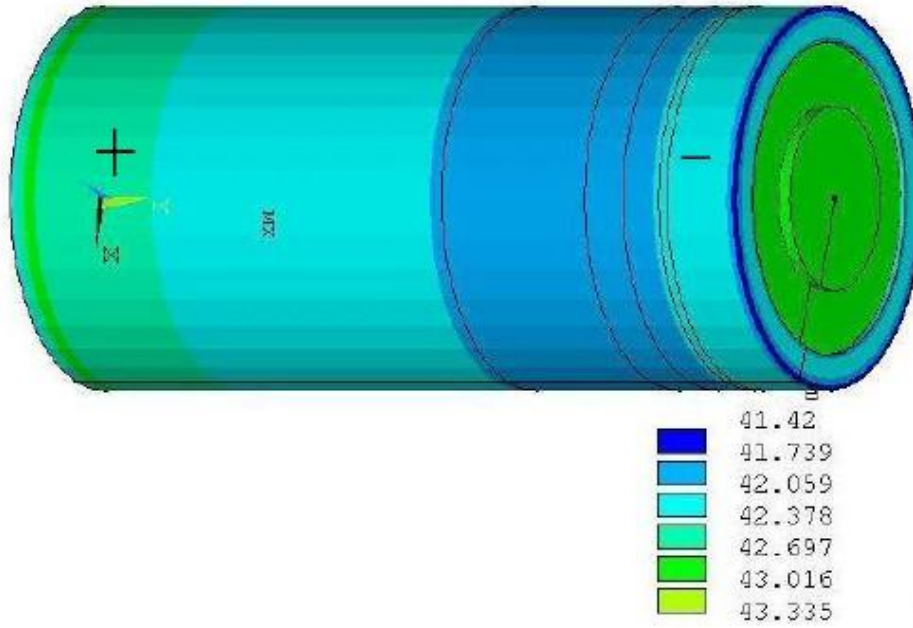
Test ölçümleri sırasında kullanılan cihazlar kızılötesi görüntüleme cihazı ve termokupllardır. Kızılötesi görüntüleme cihazının tipi Thermo Vision™ A20M, kullanılan termokupl tipi ise TSC Thermo-couple'dır. Cihazların ölçüm yapma aralıkları ve doğruluk yüzdeleri hakkında detaylı bilgiler de çizelge 4.1'de anlaşılmaktadır.

Her ölçme, kullanılan cihazın hassasiyetine güvenirliliğine bağlı olarak belirsizlik içerir. Doğruluk yüzdesi, test ölçümlerinin güvenilirliği hakkında önemli bir bilgidir. Analiz sonucunun gerçek değere ne kadar yakın olduğunu ifade etmektedir. Doğruluk yüzdesinin hesaplamak için kullanılan denklem;

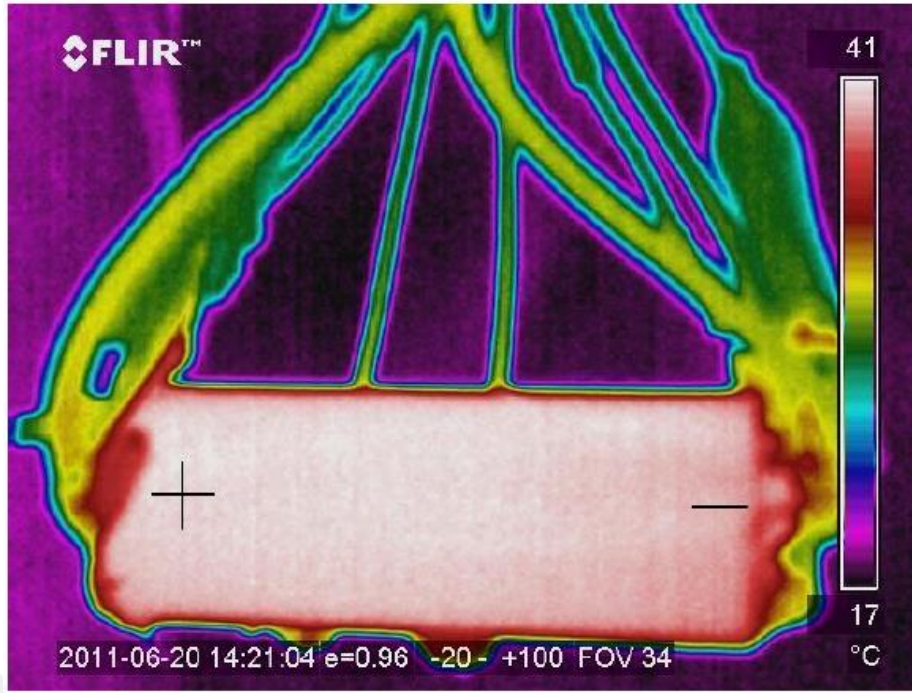
$$\Delta = T_s - T_t \quad (4.1)$$

$$\xi = \frac{\Delta}{T_t - T_0} * 100\% \quad (4.2)$$

Denklem 4.1'de Δ , analiz sonucu ile test sonucu arasındaki hata oranını temsil etmektedir. T_s analiz sonucunda ölçülen sıcaklık, T_t test sonucu ölçülen sıcaklıktır. Denklem 4.2'de ξ ifadesi doğruluk yüzdesini ifade etmektedir. T_0 ölçüm yapılan ortamın sıcaklığıdır.



Şekil 4.3 : Yüzey sıcaklık dağılımı analiz sonucu



Şekil 4.4 : Test ölçüm sonuçlarına göre yüzey sıcaklık dağılımı

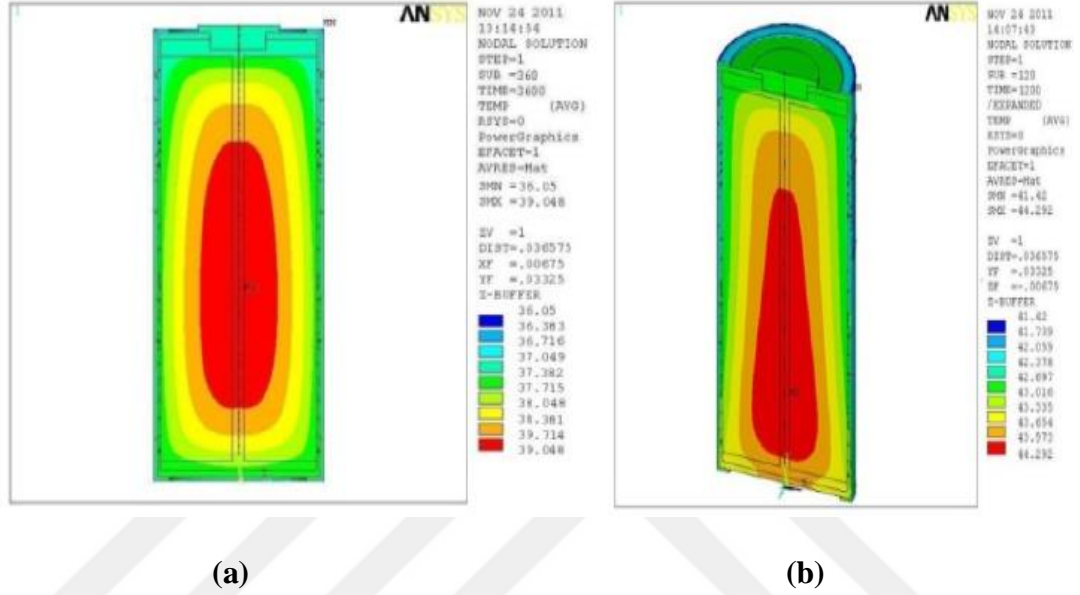
Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de yazılımdan elde edilen analiz sonucu ve test ölçüm sonuçları görülmektedir. ANSYS yazılımı ile gerçekleştirilen analizler sırasında çevre sıcaklığı 25 °C ve deşarj hızı 3C seçilmiş olmakla birlikte Şekil 4.3’de ANSYS analiz sonucu görülmektedir.

Şekil 4.4’de ise termokuplar ve diğer ölçüm cihazları sayesinde gerçekleştirilen test ölçümünden elde edilen termal analiz verilmiştir. Test ölçümü ve ANSYS ölçüm sonucunun birbiri ile benzer olduğu ve bataryanın pozitif ucundan negatif ucuna doğru kademeli olarak sıcaklık düşüşü olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.2 : 3C deşarj oranı, 25°C’de farklı ölçüm noktalarının sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

Değerler	Pozitif Uç	1	2	3	Negatif Uç
Analiz	43,3	43	42,6	41,7	41,4
Test	41,8	41,4	40,9	40,2	39,7
Sapma	1,5	1,6	1,7	1,5	1,7
Hata Oranı (%)	8,92	9,76	9,87	9,87	11,56

Yukarıdaki çizelge 4.2’de test ölçümü ve ANSYS ölçüm sonuçlarının bataryanın pozitif ucundan negatif ucuna doğru ölçüm sonuçları ve hata oranları hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. $t = 1200s$ ve $25^{\circ}C$ 'deki veriler çizelgede gösterilmektedir. Simülasyon ve testin sıcaklık değişim eğilimlerinin aynı olduğu ve karşılık gelen sıcaklık değerlerinin benzer olduğu görülmektedir. Maksimum bağıl sapma %11.56'lık bir maksimum bağıl hata ile $1.7 (^{\circ}C)$ 'dir.



Şekil 4.5 : $T_0=25^{\circ}C$, 1C deşarj hızında gerçekleşen analiz sonucu iç sıcaklık dağılımı (a) ve $T_0=25^{\circ}C$, 3C deşarj hızında gerçekleşen analiz sonucu iç sıcaklık dağılımı (b)

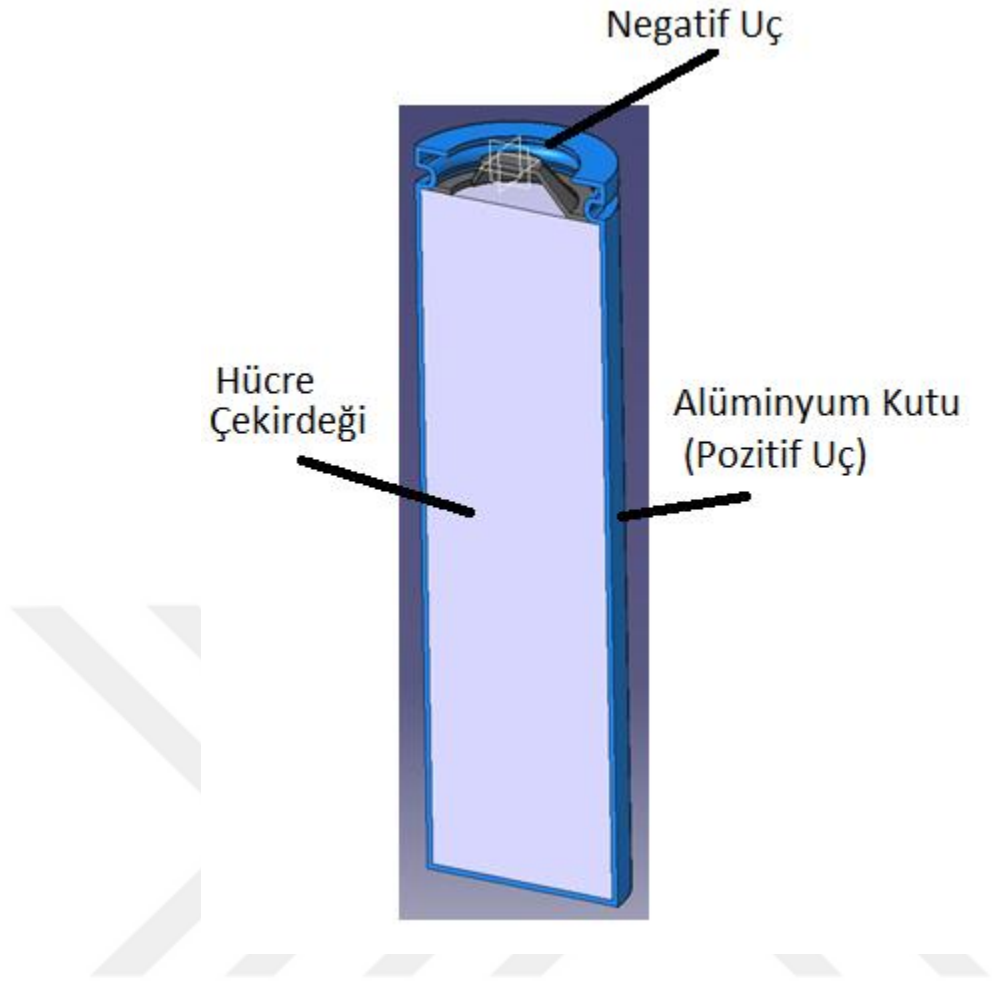
Örnek çalışmada Şekil 4.5’te gösterildiği gibi 1C ve 3C deşarj hız oranlarına göre farklı analizler gerçekleştirilmiştir. Batarya sıcaklığının, 3C deşarj hızında, 1C deşarj hızından daha yüksek olduğu görülmektedir. En yüksek sıcaklık alanları, her iki durumda da sırasıyla $39^{\circ}C$ ve $44.2^{\circ}C$ 'ye ulaşan çekirdek bölgede bulunur. Sonuçlara göre, her iki deşarj hız oranında, batarya yüzeyindeki sıcaklık artış eğiliminin benzer olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre, deşarj akımının bataryanın genelinde sıcaklık değişimi üzerinde çok az etkisi olduğu anlamına gelir. Ayrıca, deşarj hız oranı 1C olduğunda, termal kamera kullanılarak yapılan ölçümler ile daha benzer sonuçlar elde edilmiştir. Deşarj hızı daha yüksek olursa, batarya içerisinde kısa sürede daha fazla ısı üretimi meydana gelecek ve bu durum adyabatik ortam koşulunun oluşmasını engellemektedir. Adyabatik olmayan ortam koşullarında yapılan ölçümler sonuçların doğruluk oranını azaltmaktadır. Bu sebeple, tezde yapılan analizde deşarj hız oranı 1C olarak seçilmiştir.

4.2 Tek Hücre İçin Sonlu Hacim Metodu

Tez sırasında kullanılan analiz programı, FloEFD'dir. FloEFD programı ANSYS yazılımına alternatif olarak kullanılacak pratik bir program olmakla birlikte sonuçlar her iki programda da birbiri ile örtüşmektedir. Mentor Graphics firmasının bir ürünü olan FloEFD, Mühendislik Akış Dinamiği (EFD) olarak adlandırılan yeni nesil CFD yazılımlarından biridir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) kullanılarak çok çeşitli problemler çözülebilmektedir. Sonlu Hacim Metodu, CFD'de en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu yöntem sayesinde başlangıç şartları ve sınır şartları belirlenebilir ve bir bilgisayarın çözebileceği ayrı cebirsel denklemler oluşturulmaktadır. FloEFD, katı modelini olduğu gibi analizlerde kullanılmasına olanak sağladığı için gereksiz zaman ve efor harcanmasını önlemektedir. FloEFD, ürün performansının/işlevselliğinin artırılmasına ve prototip harcamalarının azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Catia-v5, Solidworks, Creo ve Siemens NX gibi modern CAD yazılımlarına gömülü olarak çalışan FloEFD, bu sayede zaman tasarrufu sağlamaktadır. Bu çalışmada Catia-v5 içerisine gömülü FloEFD-v14.2 kullanılmıştır.

FloEFD yazılımında internal ve external olmak üzere analizler gerçekleştirilmektedir. Nesnenin içerisinde gerçekleşen akış analizinin simülasyonu elde edilmek isteniyorsa internal, nesnenin etrafında gerçekleşen akış analizinin simülasyonu elde edilmek isteniyorsa external sekmesi seçilmektedir.

Bu çalışmada pilin içerisinde gerçekleşen termal sıcaklık dağılımının simülasyonu elde etmek istendiğinden dolayı, "internal" sekmesi seçilmiştir. Ayrıca, tezin ilk kısımlarında bahsedildiği üzere ışıınım ve iletimle ısı transferinin etkisinin ihmal edilebilecek boyutta küçük olması sebebiyle, analizler sırasında yalnızca taşınım ile ısı transferi hesaplamaları yapılmıştır. Çalışmada sınır koşulları çevre havası 25°C olarak alınmıştır. Yerçekimi etkileri (Buoyancy Effect) -z yönünde, 9,81 kg/m² olarak alınmıştır. Analizler 1C'de yapılmıştır. Çalışmada kullanılan hücre 3,7 V, 2,85 A değerlerinde çalışmaktadır. Analizde pile 10,5 W hacimsel güç uygulanmıştır. Doğal taşınım kabulü yapılmıştır. Isı taşınım katsayısı 5 W/m²K olarak alınmıştır. Ayrıca örnek çalışmanın kimyasal yapısı ve fizyolojisi baz alınmıştır.



Şekil 4.6 : CATIA yazılımı ile batarya modellemesi.

Şekil 4.5’de CATIA yazılımı ile Samsung 18650 tipinde bir Li-ion pil modellenmiştir. Bataryanın alüminyum kutusu, negatif ucu ve hücre çekirdek kısımları da şekilde görülmektedir.



Şekil 4.7 : Bataryanın mesh yapısı.

Yukarıdaki şekilde FloEFD yazılımı yardımıyla pilin mesh yapısı oluşturulmuştur. Mesh üretme fiziksel bir tanım aralığını daha küçük tanım aralıklarına (elemanlara)

bölme işlemi olarak tanımlanabilir. Burada amaç bir diferansiyel denklemin çözümünü kolaylaştırmaktır. Bundan dolayı sonlu hacimler metodunda elde edilecek sonuçların yaklaşım doğruluğu, ağ içerisinde kullanılan eleman tipine ve eleman sayısına bağlıdır. Yapılan analizin doğruluğu açısından, eleman sayısı optimum seçilmelidir. Gereksiz çok sayıda eleman kullanılması da istenilmez. Bu durumda hem fazla hesaplama zamanı harcanır, hem de sayısal hesaplamalarda oluşabilecek bir hatanın artmasına neden olacaktır. Eleman sayısının daha az seçilmesi durumunda ise eksik bilgi nedeniyle analiz doğru sonuca ulaşamamaktadır. Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi, sonuçların 27943 elemandan sonra çok değişmediği tespit edilmiştir. Analizler hücreler için en az 27943 eleman oluşturularak yapılmıştır.

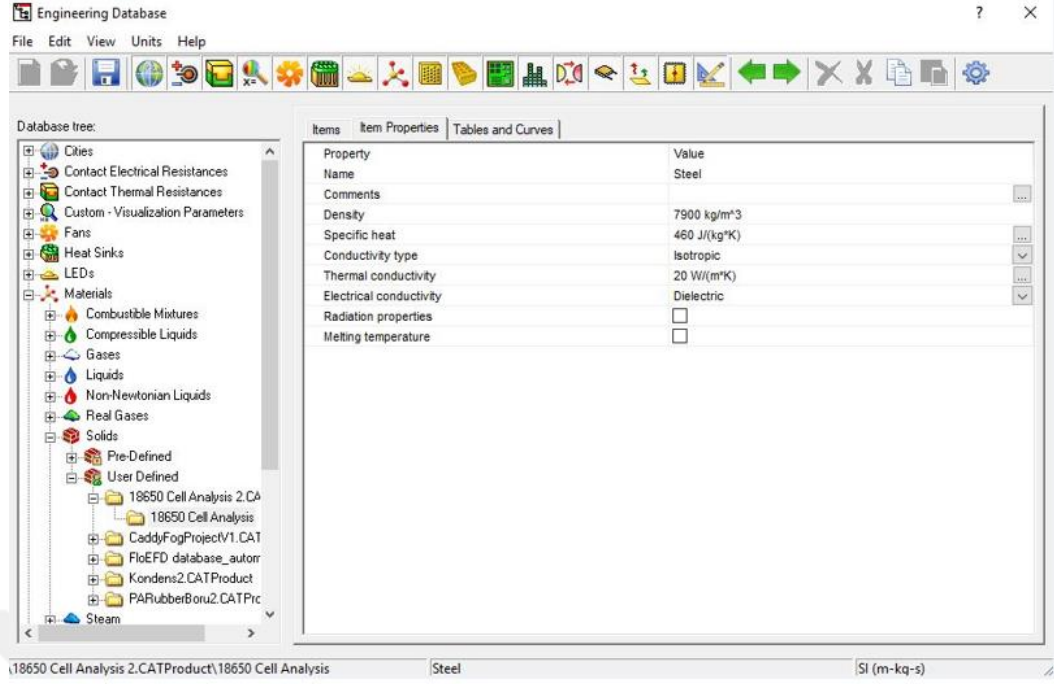
Çizelge 4.3 : Tek hücre pil mesh yapısı için uygun eleman sayısı belirleme.

Tek Hücre Analizi	Katı Hücre	Sıvı Hücre	Sonuç(°C)
Mesh1	16352	246521	30,3
Mesh2	21053	311248	31,7
Mesh3	23587	351479	33,9
Mesh4	27943	432856	34,02
Mesh5	32531	495837	34,05

Hücre çekirdeği, pozitif uç ve negatif uçta kullanılan malzemeler ve malzeme özellikleri örnek çalışmada kullanılan malzemeler ile aynıdır. Malzeme özellikleri hakkında detaylı bilgiler 3.bölüm de bulunan Çizelge 3.2'de görülmektedir. Bu malzemelerin yoğunluk, özgül ısı ve ısı iletim katsayısı gibi parametreleri sırasıyla çizelge de verilmiştir.

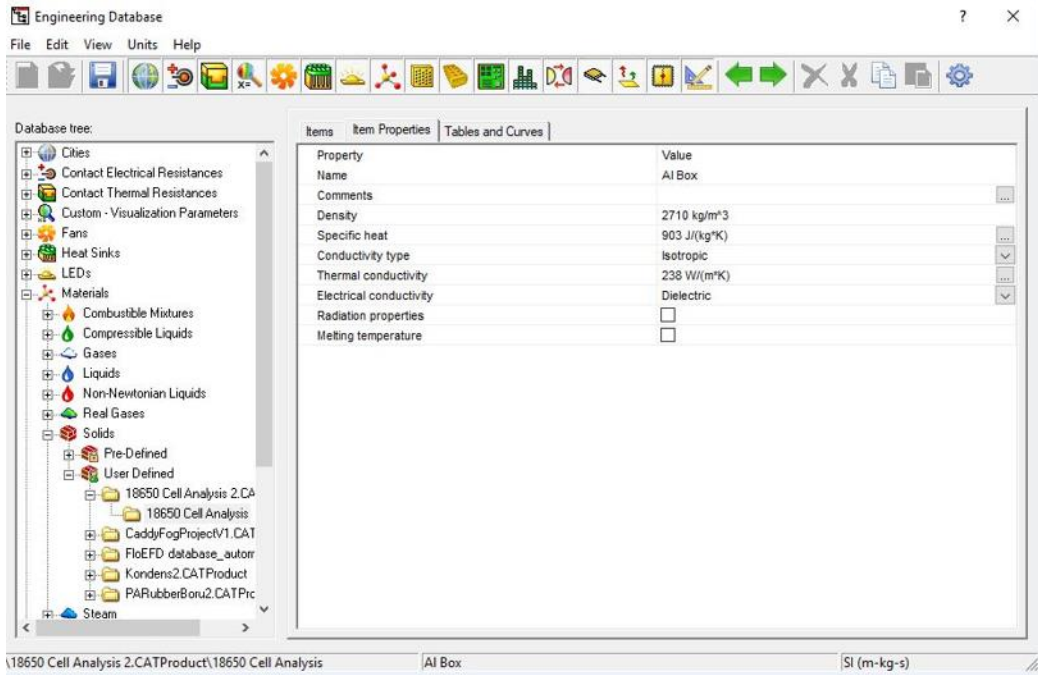
FloEFD içinde önceden tanımlanmış birkaç birim sistemi vardır. Kendi birim sistemimizi de tanımlayabilir ve istediğimiz zaman bunlar arasında geçiş yapılabilmektedir.

Analiz adımlarının ekran görüntüleri bir sonraki kısımda verilmiştir. Sırası ile bataryanın negatif ucu, batarya yüzeyi ve bataryanın hücre çekirdeğinde kullanılan malzemelerin özellikleri yazılıma aktarılmıştır.



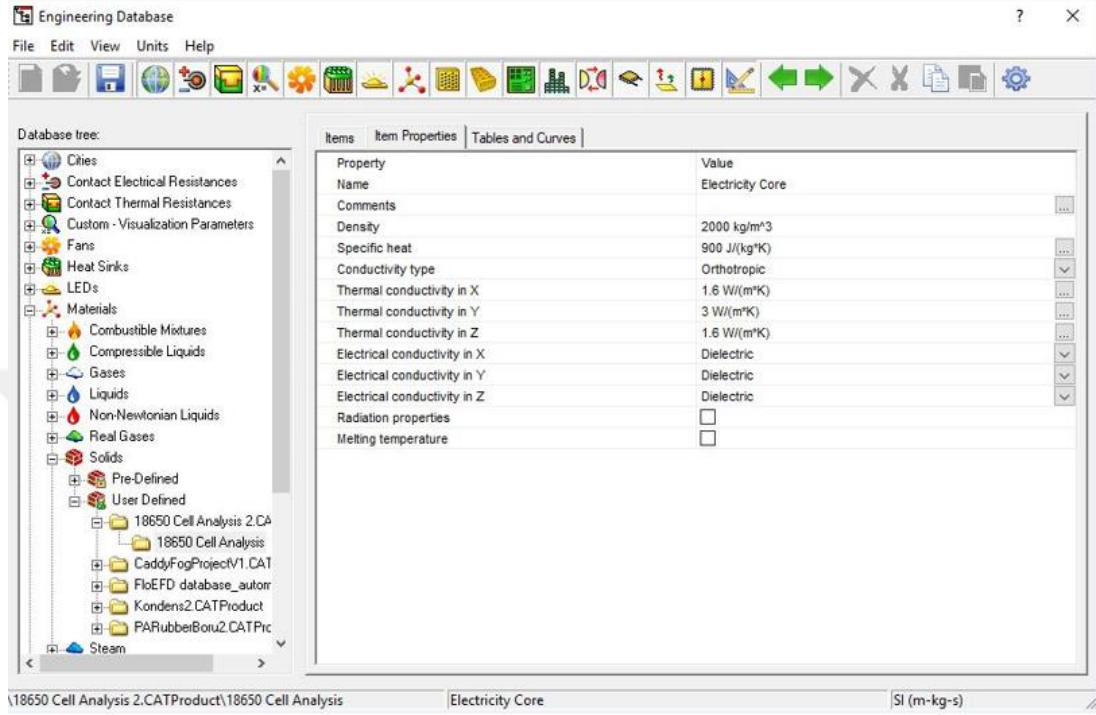
Şekil 4.8 : Bataryanın negatif ucunda kullanılan malzeme özelliklerinin programa aktarımı.

Şekil 4.8’de negatif uçta kullanılan malzeme çelik olarak seçilmiştir. Malzemenin yoğunluğu 7900 kg/m^3 , özgül ısısı 460 J/(kg*K) , kondüktivite türü izotropik, ısı iletkenlik katsayısı 20 W/(m*K) ve elektriksel iletkenlik dielektrik olarak görülmektedir.



Şekil 4.9: Batarya yüzeyinde kullanılan malzeme özelliklerinin programa aktarımı.

Şekil 4.9’de batarya yüzeyinde kullanılan malzeme alüminyum (Al) olarak seçilmiştir. Malzemenin yoğunluğu 2710 kg/m^3 , özgül ısısı $903 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, kondüktivite türü izotropik, ısı iletkenlik katsayısı $238 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ve elektriksel iletkenlik dielektrik olarak görülmektedir.



Şekil 4.10 : Hücre çekirdeğinde kullanılan malzeme özelliklerinin programa aktarımı.

Şekil 4.10’de bataryanın hücre çekirdeğinin özellikleri görülmektedir. Çekirdeğin yoğunluğu 2000 kg/m^3 , özgül ısısı $900 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, kondüktivite türü ortotropik olup x yönünde ısı iletkenlik katsayısı $1,6 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, y yönünde ısı iletkenlik katsayısı $3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, z yönünde ısı iletkenlik katsayısı $1,6 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ’dir. Elektriksel iletkenlik x, y ve z yönleri için dielektrik olduğu görülmektedir.

Bizim gözümüz sadece elektromanyetik spektrumdaki görünür ışıkları görür. Elektromanyetik spektrumdaki, gözümüzün gördüğü görünür ışıkların dışındaki diğer tüm dalga boylarını, kızılötesi ışık gibi gözümüzle göremeyiz. 0 Kelvin yani -273°C üzerinde sıcaklığa sahip olan tüm maddeler termal enerji yayarlar. Bu enerji maddelerin sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Termal enerji gözümüzün göremediği kızılötesi (Infrared) aralıkta yayılır. İşte termal kameralar ise tam olarak bu temele göre çalışır. Yani bir termal kamera, elektromanyetik spektrumdaki kızılötesi dalga boylarını görünür bir resme çevirir. Termografi (termal kamera ile sıcaklık ölçümü) edilgen ve temassız ölçüm metodudur. Termal görüntü, ölçüm

yapılan yüzeydeki sıcaklık dağılımını gösterir. Termal kameranın bu özelliği pek çok sektörde iyileştirmeler ve sorun tespitleri için kullanılabilir.



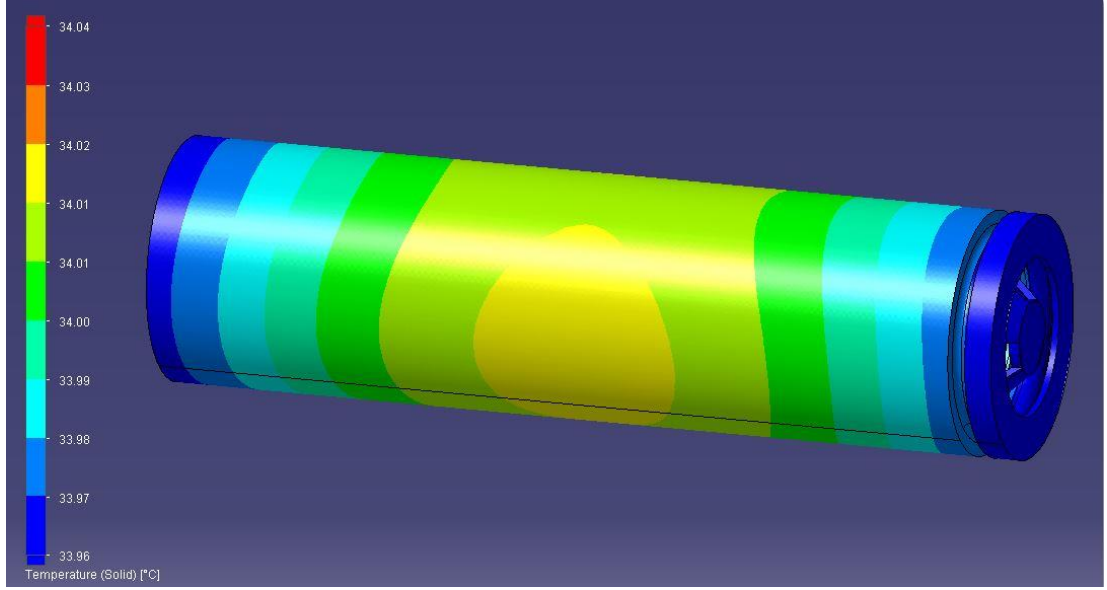
Şekil 4.11 : Test ölçümleri sırasında kullanılan termal kamera.

Şekil 4.11’de termal ölçümler sırasında kullanılan kamera görülmektedir. Termal kamera FLIR E8 tipinde ve özellikleri aşağıdaki tablodan incelenebilmektedir.

Çizelge 4.4 : FLIR E8 termal kamera özellikleri.

FLIR E8 Termal Kamera	
Sıcaklık Ölçüm Aralığı	(-20 °C) ile (+250°C)
Termal Hassasiyet	0,06 °C
Boyut	244*95*140 mm
Çalıştığı Bağıl Nem	0,95
Ölçüm Modları	Spot, Areabox, Isotherm

Termal kameranın sıcaklık ölçüm aralığı -20°C ile 250 °C arasında, termal hassasiyet 0,06 °C, kamera boyutu 244*95*140 mm, kameranın çalıştığı bağıl nem 0,95 ve ölçüm modları Spot, Areabox, Isotherm olduğu Çizelge 4.4’de görülmektedir.



Şekil 4.12 : FloEFD yazılımı ile elde edilen batarya yüzeyi sıcaklık dağılımı.

Şekil 4.12’de program yardımı ile gerçekleştirilen analiz sonucu görülmektedir. Sonuca göre, hücre yüzeyinden iç kısımlara doğru sıcaklık değerlerinin arttığı görülmektedir ve ölçülen maksimum sıcaklık değeri 34.02 °C’dir.



Şekil 4.13 : Termal kamera ile ölçülen batarya yüzeyi sıcaklık dağılımı.

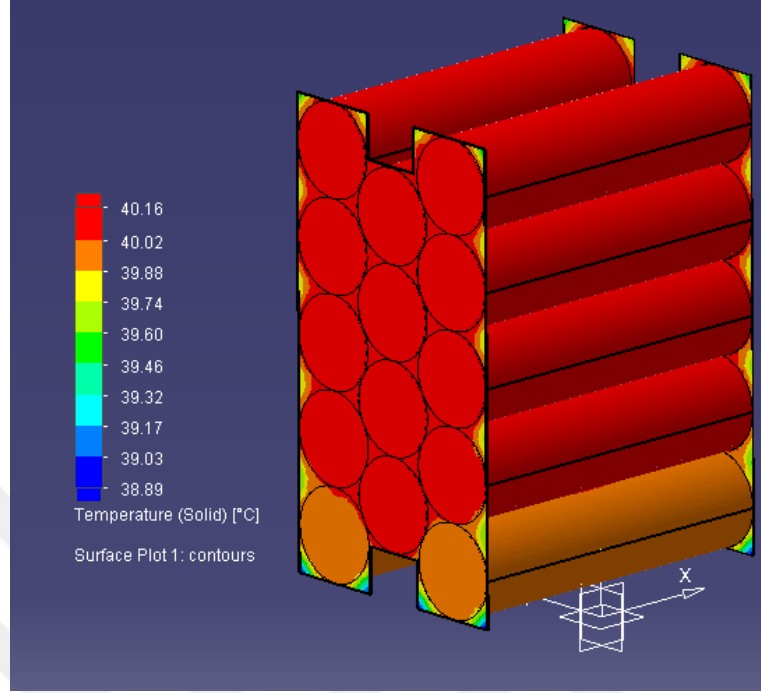
Tek bir batarya hücrenin yüzey sıcaklık dağılımı termal kamera yardımıyla ölçülmüştür ve sonuç Şekil 4.13' de görülmektedir. Termal kamera ölçüm sonuçlarına göre batarya yüzeyindeki maksimum sıcaklık 32.9°C olarak ölçülmüştür. Termal kamera sonuçlarındaki sıcaklık dağılımı ile FloEFD program yardımıyla yapılan analiz sonucu sıcaklık dağılımları birbiri ile örtüşmektedir. Ayrıca ölçülen maksimum batarya yüzey sıcaklıkları arasındaki fark da ihmal edilebilecek düzeydedir.

4.3 Modül için Deneysel Çalışma ve Sonlu Hacim Metodu

Günümüzde enerji kaynaklarının hızla tükenmesiyle birlikte alternatif enerji kaynak arayışı başlamış ve li-iyon bataryalar pek çok alanda güç kaynağı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Güç kaynağı olarak li-iyon bataryalar kullanıldığında yalnızca bir adet pil kullanılmamaktadır. Bir çok sayıda pil kullanılarak bir modül oluşturulmakta ve güç kaynağı olarak kullanılacak araç içerisine yerleştirilmektedir. Lityum iyon piller, deşarj olduktan sonra tekrar şarj edilerek kullanılan elektrokimyasal hücrelerdir. Bu pillerin uzun ömürlü olması, hafıza etkisinin olmayışı, yüksek özgül enerji ve enerji yoğunluğuna sahip olması tercih edilmesinin başlıca sebeplerinden birkaçıdır. Tezin önceki bölümlerinde tek bir pil hücresi için program yardımı ile analiz yapılmış ve bu analiz sonuçları termal kameradan alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar birbiri ile uyum göstermekte ve termal analiz için kullanılan paket programlarının pratikte uygun, kullanılabilir olduğu saptanmıştır. Bu bağlamda, pil modülleri için de program yardımıyla analiz gerçekleştirilebilmektedir. Tezin bu kısmında, pil modüllerinin termal analizi FloEFD programı ile modellenilecek ve sonuçlar termal kameradan alınan sıcaklık analizleri ile karşılaştırılacaktır.

Analizlerin gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı 25°C, deşarj hızı 1C olarak belirlenmiştir. Ayrıca 14 adet li-iyon batarya kullanılarak bir batarya modülü oluşturulmuştur. Bu piller arasında elektriksel iletkenliği sağlamak için piller, nikel bara ile birbirine bağlanmıştır. Lityum-iyon pilin çevreye yaydığı sıcaklık ile bağlı bulunduğu cihaza zararını engellemek ve bu sıcaklık dağılımını hapsetmesi için modül, polimer (PA66) malzemesi ile kaplanmıştır. FLIR E8 tipinde termal kamera yardımıyla 14 tane li-iyon pil ve modülün sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler

doğrultusunda yapılan analizler sonucu lityum iyon batarya üzerinde kurulan ısı model doğrulanmıştır.



Şekil 4.14 : FloEFD analiz sonucu.

Şekil 4.13'de 14 adet li-iyon pil kullanılarak oluşturulan batarya modülünün FloEFD yardımıyla oluşturulan sıcaklık dağılımı modellenmesi görülmektedir. Sonuca göre, modül yüzeyinden iç kısımlara doğru sıcaklık değerlerinin arttığı görülmektedir ve ölçülen maksimum sıcaklık değeri 40,16 °C'dir.

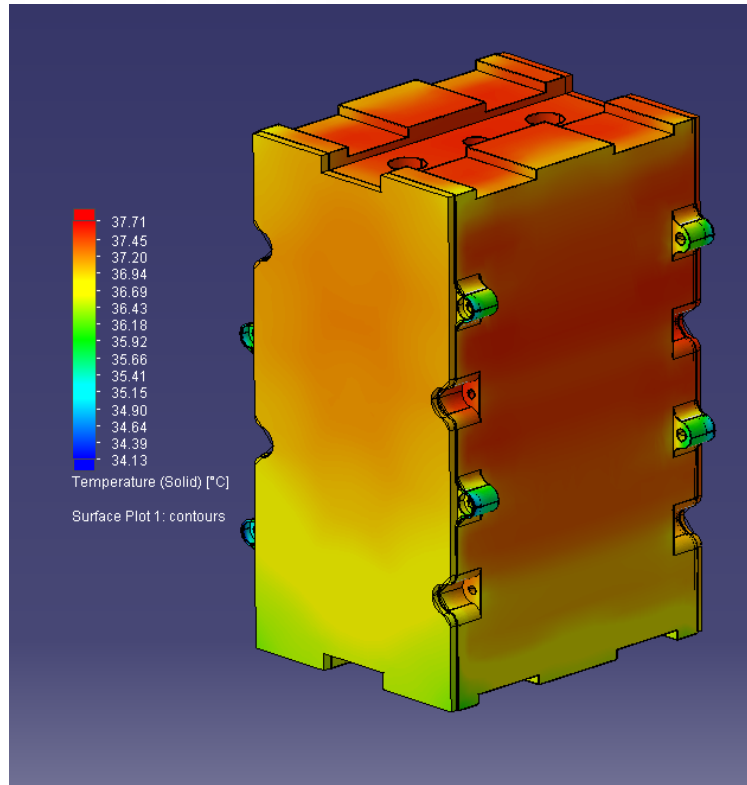


Şekil 4.15 : Termal kamera ile sıcaklık ölçüm sonuçları.

Program ile gerçekleştirilen analiz sonucunun tutarlılığını ölçmek amacıyla termal kamera ile yapılan sıcaklık ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Termal kamera ölçüm sonuçlarına göre batarya yüzeyindeki maksimum sıcaklık 40 °C olarak ölçülmüştür. Termal kamera sonuçlarındaki sıcaklık dağılımı ile program yardımıyla oluşturulan sıcaklık dağılımları birbiri ile örtüşmektedir. Ayrıca ölçülen maksimum batarya yüzey sıcaklıkları arasındaki fark da ihmal edilebilecek düzeydedir.

Bataryanın çevreye yaydığı ısı miktarı analizlerden de anlaşılacağı üzere kritik seviyelerdedir. Bataryadan çevreye yayılan ısı, kullanıldığı alanlarda etrafında bulunan diğer cihazlar üzerinde zararlı etkiler oluşturmaktadır. Cihazların, bataryanın yaydığı ısı ile fazla ısınması sonucu kullanım ömrü kısaltmakta ve bu da verimliliği azaltmaktadır. Bu bağlamda, bataryalardan etrafa yayılan ısıyı minimuma indirmek üzere çeşitli önlemler alınabilmekte ve bu önlemlerden biri de ısı geçirgenliği az olan bir malzeme ile bataryayı kaplamaktır.

Bu çalışmada, PA66 tipli polimer malzeme batarya yüzeyi üzerine yerleştirilmiş ve sonrasında yeniden program yardımıyla analiz gerçekleştirilip, analiz sonuçları termal kamera ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Ek olarak yapılan çalışmada hücreler modül içine sıkı geçme şeklinde yerleştirildiği için temas direnci ihmal edilmiştir.



Şekil 4.16 : Kaplama sonrası FloEFD analiz sonucu.

Şekil 4.15’de FloEFD modellemesi görülmektedir. Ölçülen maksimum sıcaklık değeri 37,71°C’dir. Maksimum sıcaklık değeri, PA66 tipli polimer malzeme kaplamadan önce ölçülen maksimum sıcaklık değerinden oldukça düşüktür. Analiz yardımıyla, bu tip polimer malzeme kullanıldığında, ısı yayılımından dolayı meydana gelen zararlı etkilerin minimum düzeyde olabileceği anlaşılmaktadır.

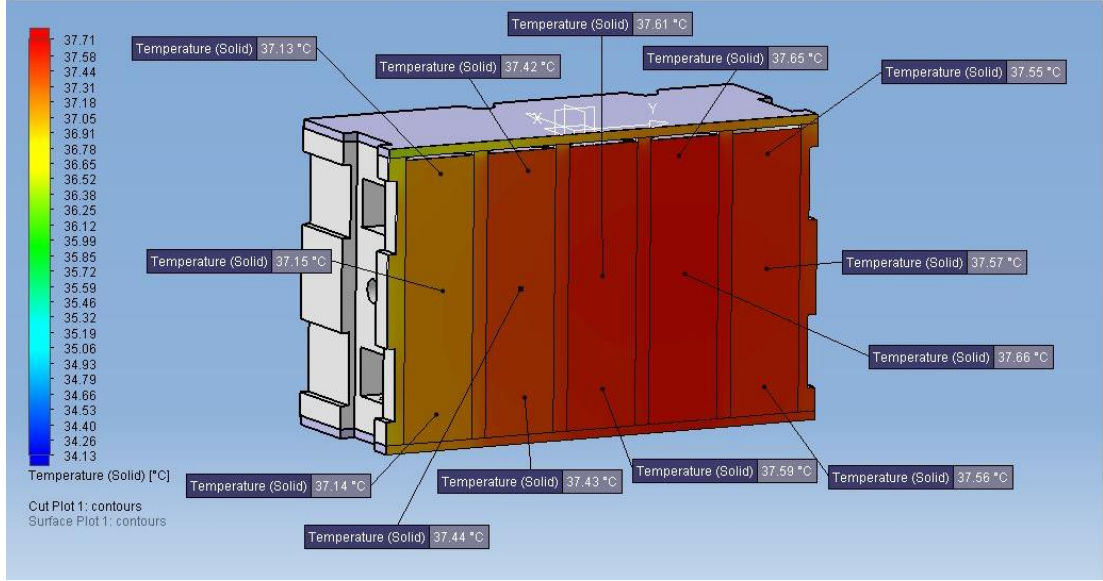


Şekil 4.17 : Kaplama sonrası termal kamera ile sıcaklık ölçüm sonuçları.

Şekil 4.16’da ise FloEFD sonuçları ile karşılaştırılmak üzere termal kamera ölçüm sonucu görülmektedir. Ölçüm sonuçlarına göre, batarya yüzeyindeki maksimum sıcaklık 38,8 °C olarak ölçülmüştür.

Termal kamera sonuçları ile FloEFD analiz sonuçları batarya modülü, PA66 tipli polimer malzeme ile kaplandığında da birbiri ile örtüşmektedir. PA66 tipli polimer malzemenin kaplama için seçilme nedeni olan termal karakteristik özellikleri şu şekildedir:

- Yüksek sıcaklıklar ve uzun zaman süreleri içinde aşınmaya karşı dayanıklılık.
- İçsel özelliğinden dolayı tutuşmaya karşı dayanıklılık.
- Aşınmaya karşı direnç.
- Yüksek dayanım ve yüksek sertlik.
- Mükemmel dielektrik özellik (Elektrik iletkenlik katsayısı ‘0’).



Şekil 4.18 : Kaplama sonrası sıcaklık dağılımını gösteren modül kesiti.

Şekil 4.18’de modül kesitinin sıcaklık dağılımı görülmektedir. Dağılıma göre; hücre sıcaklıklarının 38°C ’nin altında ve bu sıcaklık değerleri literatürde incelenen çalışmalar ile benzerlik göstermektedir. Bu bağlamda, tez çerçevesinde gerçekleştirilen analiz sonuçları kabul edilebilirdir.

FloEFD yazılımı ile tek bir li-iyon pil için ve çeşitli sayıda li-iyon batarya kullanılarak oluşturulan modül için de analiz yapılabilmektedir. Ayrıca modül yüzeyine çeşitli malzemeler kaplandığında da yüzey sıcaklık dağılım analizleri gerçekleştirilmektedir. Bahsi geçen durumlar için program yardımıyla modellenen sıcaklık dağılımları, termal kamera yardımıyla ölçülen sıcaklık değerleri ile karşılaştırılmış ve sonuçların birbiri ile örtüştüğü anlaşılmıştır. Buna göre, günümüzde pek çok alanda kullanılmakta olan li-iyon bataryaların sıcaklık dağılım analizlerini gerçekleştirmek üzere FloEFD programı uygun ve kabul edilebilirdir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Toplumların enerji tüketimlerinin zamana bağlı olarak değiştiği; bazen çok yüksek, bazen de düşük seviyelerde olduğu bilinmektedir. Binalarda, endüstriyel süreçlerde ve ulaşım sistemlerindeki enerji gereksinimi, kullanıma bağlı olarak sürekli bir değişim göstermektedir. Değişen enerji arz ve talebi arasındaki farklar enerjinin depolanmasını gerektirmekte ve önemli kılmaktadır. Enerjinin depolanması, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki zaman veya oran dengesizliğini giderdiği için mevcut enerji kaynaklarının daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Son yıllarda çok sayıda yeni pil çeşitlerinin geliştirilmesi konusunda araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmaların amacı, enerji yoğunlukları yüksek ve maliyeti düşük malzemeler kullanarak yeni enerji depolama sistemleri geliştirmeye yöneliktir. Yıllarca süren araştırmalar sonucunda enerji depolama sistemleri arasında lityum-iyon bataryanın birçok avantajı olduğu bulunmuştur. Yüksek enerji yoğunluğu, yüksek çevrim ömrü ve yüksek verimlilik lityum-iyon bataryanın tercih edilmesinin temel nedenlerindedir. Lityum-iyon batarya da ortaya çıkan sıcaklık artışı pilin kullanımını kısıtlamaktadır. Bataryadaki sıcaklık artışı, yanma ve patlama gibi istenmeyen koşullara yol açabilir. Bu nedenle, batarya ve batarya paketi için sıcaklık dağılımı analizi CFD ve sonlu hacimler metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Zhenpo ve çalışma arkadaşlarının [43] yaptığı çalışmanın kimyasal yapısı ve fizyolojisi kullanılarak 1C deşarj hızı, 25°C derecede yaptığımız çalışma ile önceki yapılan çalışmanın doğruluğunu kanıtlamış olduk. Ek olarak, çalışmada kullanılan hücre 3,7 V, 2,85 A değerlerinde çalışmaktadır. Analizde pile 10,5 W hacimsel güç uygulanmıştır. FloEFD programı ve termal kamera yardımıyla ölçülen analiz ve test sonuçlarında görülen maksimum sıcaklık değerleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir. Hata oranları hesaplanarak gerçeğe yakın veriler elde edilme durumu incelenmiştir. Çizelge incelendiğinde analiz ve test sonuçlarının birbirine yakın değerler olduğu gözlemlenmektedir. Bu da yapılan çalışmanın tutarlı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.1 : 1C deşarj hızı, 25°C çevre şartında maksimum ölçülen analiz ve test sonuçları.

Değerler	Tek Hücre PİL	Modül(14 Lityum-iyon PİL)	Polimer Kaplama Sonrası Modül
Analiz (°C)	34,02	40,16	37,71
Test (°C)	32,9	40	38,8
Sapma	1,12	0,16	1,09
Hata Oranı (%)	14,18	1,07	7,9

FloEFD programı ile yapılan analizler sonucunda minimum sıcaklık değerleri de ölçülmüştür. 14 tane lityum-iyon pil kullanılarak oluşturulan modül de minimum sıcaklık 38.89°C, kaplama sonrası modül üzerinde yapılan analiz sonucu minimum sıcaklık ise 34.13 °C olarak bulunmuştur. Literatürde incelenen çalışmalarda, Li-ion piller için optimum çalışma aralığının 25°C ila 45°C arasında olduğu, sıcaklık farkının modülü oluşturan piller arasında maksimum 5°C olması gerektiği ve pillerin bu sıcaklığı ayarlayacak şekilde dizayn edildiği görülmektedir. Bu durum eş yaşlandırma olarak adlandırılmaktadır. Bu tezde modülde oluşan maksimum ve minimum sıcaklıklar arasındaki fark yaklaşık olarak 2-3°C'dir. Sonuç olarak, yapılan analizin tutarlı olduğu ve kabul edilebilir sonuçlara ulaşıldığı anlaşılmaktadır.

İncelemeler sonucunda elde edilen veriler aşağıdaki maddeler halinde sıralanabilmektedir;

- Ölçüm hatası: Kullanılan kızılötesi görüntüleme cihazı, mutlak sıcaklıktan ziyade bağıl sıcaklığı ölçme yeteneğine sahiptir. Ölçüm hatasını telafi etmek için yüksek hassasiyete sahip termokupllar kullanılmasına rağmen, ölçüm hassasiyeti hala ortam sıcaklığına ve batarya yüzeyi ile termokupllar arasındaki temas koşullarına karşı oldukça hassastır.
- Yüzey ısı taşınım katsayısı analizde doğal taşınım için 5 W/(m²K) olduğu varsayılmıştır. Termal tankın havalandırma ortamını göz önüne alarak, yüzey ısı transfer katsayısı, bataryanın farklı kısımlarında farklılık gösterebilir.

- Sunulan sonlu hacimler modeli çeşitli varsayımlara dayanarak inşa edildi ve bazı iç kimyasal reaksiyonlar göz ardı edilmiştir. Analiz ve test sonuçlarındaki farklılığın bir diğer sebebidir bu olabilir.
- FloEFD yazılımı ile yapılan analizde ışınlam ile ısı kaybı göz ardı edilmiştir bu sebeple analiz sonuçları, deneysel sonuçlardan daha yüksek çıkmıştır.

Silindirik bir Li-ion pilin termal davranışını tahmin etmek için, bu çalışma da sonlu hacimler metoduna dayanan bir termal model önerilmiştir. Model karmaşıklığını azaltmak ve böylece hesaplama verimliliğini arttırmak için çeşitli sadeleştirme varsayımları yapılmıştır. Batarya bileşenlerinin sınır şartları ve termal parametrelerinde, teorik analiz veya deneylerle belirlenen sonuçlar kullanılmıştır. Sonuç olarak, sunulan termal modelin doğruluğu deneylerle doğrulanmıştır. Sonuçlar, analiz yapılan ve ölçülen değerler arasındaki hataların termal kamera ile ölçüm yapılan ortam sıcaklıklarına ve ışınlam ile ısı kaybının göz ardı edilmesine bağlı olduğunu göstermektedir. Sunulan model, batarya yönetim sistemlerine yerleştirilebilir ve batarya sıcaklık dağılımını simüle etmek için kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Vazquez, S., Lukic, S.M., Galvan, E., Franquelo, L.G., Carrasco, J.M., (2010). Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57 (12), 3881-3895.
- [2] Lukic, S.M., Cao, J., Bansal, R.C., Rodriguez, F., Emadi, A., (2008). Energy Storage Systems for Automotive Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55 (6), 2258-2267.
- [3] Rahimi Eichi, H., Ojha, U., Baronti, F., Chow, M.Y., (2013). Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7(2), 4-16,.
- [4] Lu, X., Sun, K., Guerrero, J.M., Vasquez, J.C., Huang, L., (2013). State-of-Charge Balance Using Adaptive Droop Control for Distributed Energy Storage Systems in DC Microgrid Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(6), 2804-2815,.
- [5] Höök, M., Tang, X., (2013). Depletion of Fossil Fuels and Anthropogenic Climate. *Energy Policy*, 52, 797-809,.
- [6] Abas, N., Kalair, A., Khan, N., (2015). Review of Fossil Fuels and Future Energy Technologies. *Futures*, 69, 31-49,.
- [7] Lenzen, M., (2008). Life Cycle Energy and Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Energy: A Review. *Energy Conversion and Management*, 49, 2178-2199,.
- [8] Adamantiades, A., Kessides, I., (2009). Nuclear Power for Sustainable Development: Current Status and Future Prospects. *Energy Policy*, 37, 5149-5166,.
- [9] Ellabban, O., Abu-Rub, H., Blaabjerg, F., (2014). Renewable Energy Resources: Current Status, Future Prospects and Their Enabling Technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748-764,.
- [10] Panwar, N.L., Kaushik, S.C., Kotrahi, S., (2011). Role of Renewable Energy Sources in Environmental Protection: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1513-1524,.
- [11] Raijmakers, L.H.J., Danilov, D.L., Eichel, R.A., Notten, P.H.L., (2019). A Review on Various Temperature-Indication Methods for Li-Ion Batteries. *Applied Energy*, 240, 918-945,.
- [12] Selman, J.R., Hallaj, S.A., Uchida, I., Hirano, Y., (2001). Cooperative Research on Safety Fundamentals of Lithium Batteries. *Journal of Power Sources*, 97-98, 726-732,.
- [13] Scrosati, B., Garche, J., (2010). Lithium Batteries: Status, Prospects and Future. *Journal of Power Sources*, 195, 2419-2430,.

- [14] **Alotto, P., Guarnieri, M., Moro, F.,** (2014). Redox Flow Batteries for the Storage of Renewable Energy: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 325-335,.
- [15] **Egbue, O., Long, S.,** (2012). Barriers to Widespread of Electric Vehicles: An Analysis of Consumer Attitudes and Perceptions. *Energy Policy*, 48, 717-729,.
- [16] **Steinhilber, S., Wells, P., Thankappan, S.,** (2013). Socio-Technical Inertia: Understanding the Barriers to Electric Vehicles. *Energy Policy*, 60, 531-539,.
- [17] **Rezvani, Z., Jansson, J., Bodin, J.,** (2015). Advances in Consumer Electric Vehicle Adoption Research: A Review and Research Agenda. *Transportation Research Part D*, 34, 122-136,.
- [18] **Opitz, A., Badami, P., Shen, L., Vignarooban, K., Kannan, A.M.,** (2017). Can Li-Ion Batteries Be the Panacea for Automotive Applications?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 685-692,.
- [19] **Diouf, B., Pode, R.,** (2015). Potential of Lithium-Ion Batteries in Renewable Energy. *Renewable Energy*, 76, 375-380,.
- [20] **Jaiswal, A.,** (2017). Lithium-Ion Battery Based Renewable Energy Solution for Off-Grid Electricity: A Techno-Economic Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 922-934,.
- [21] **Solmaz Ergun, R.**(2018). *Investigating the Hydrothermal Process Parameters' Effect on the M_xO_y (M: Ni, Mn, Co) Powder Properties and Evaluating Their Performances When Used as Anodes for Lithium Ion Batteries* (Master thesis).Istanbul Technical University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Istanbul.
- [22] **Zubi, G., Lopez, R.D., Carvalho, M., Pasaoglu, G.,** (2018). The Lithium-Ion Battery: State of the Art and Future Perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 292-308,.
- [23] **Variant Market Research.** (t.y) Erişim: 8 ocak 2019, <https://www.variantmarketresearch.com/report-categories/semiconductor-electronics/lithium-ion-battery-market>
- [24] **Whittingham, M.S.,** (2012). History, Evolution and Future Status of Energy Storage. *Proceeding of the IEEE*, 100, 1518-1534,.
- [25] **Lityum İyon Pil.** (t.y) Vikipedi Erişim: 8 Ocak 2019, https://tr.wikipedia.org/wiki/Lityum_ıyon_pil
- [26] **Butler, P., Dunleavy, J., DeAnda, M.F., Moseley, P.,** (2001). Performance of Valve-Regulated Lead-Acid Batteries in Real-World Stationary Applications-Utility Installations. *Journal of Power Sources*, 96(1), 94-101,.
- [27] **Plaza, M.G., Jimenez, D.S., Carrasco, J.E.G., Martinez, J.A.,** (2015). A Ni-Cd Battery Model Considering State of Charge and Hysteresis. *Journal of Power Sources*, 275, 595-604,.
- [28] **Ouyang, L., Huang, J., Wang, H., Liu, J., Zhu, M.,** (2017). Progress of Hydrogen Storage Alloys for Ni-MH Rechargeable Power Batteries in Electric Vehicles: A Review. *Material Chemistry and Physics*, 200, 164-178,.

- [29] Ren, G., Ma, G., Cong, N., (2015). Review of Electrical Energy Storage System for Vehicular Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 225-236,.
- [30] Fotouhi, A., Auger, D.J., Propp, K., Longo, S., Wild, M., (2016). A Review on Electric Vehicle Battery Modelling: From Lithium-Ion Toward Lithium-Sulphur. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1008-1021,.
- [31] Steen, M., Lebedeva, N., Di Persio, F., Boon-Brett, L.(2017) EU Competitiveness in Advanced Li-Ion Batteries for E-Mobility and Stationary Storage Applications-Opportunities and Actions (JRC108043). Luxembourg: Publications Office of the European Union,.
- [32] Aroa, S., Shen, W., Kapoor, A., (2016). Review of Mechanical Design and Strategic Placement Technique of a Robust Battery Pack for Electric Vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1319-1331,.
- [33] Wang, Q., Jiang, B., Li, B., Yuying, Y., (2016). A Critical Review Of Thermal Management Models And Solutions Of Lithium-Ion Batteries For The Development Of Pure Electric Vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 106-128,.
- [34] Xiong, R., Tian, J., Mu, H., Wang, C., (2017). A Systematic Model-Based Degradation Behavior Recognition And Health Monitorin Method For Lithium-Ion Batteries. *Applied Energy*, 207, 372-383,.
- [35] Ahn, W., Lim, S.N., Jung, K.N., Yeon, S.H., Kim, K.B., Song, H.S., Shin, K.H., (2014). Combustion-Synthesized $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ As Cathode Material For Lithium Ion Batteries. *Journal of Alloys and Compounds*, 609, 143-149,.
- [36] Ramadesigan, V., Northrop, P.W.C., De, S., Santhanagopalan, S., Braatz, R.D., Subramanian, V.R., (2012). Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries from a Systems Engineering Perspective. *Journal of The Electrochemical Society*, 159, R31-R45,.
- [37] Furushima, Y., Yanagisawa, C., Nakagawa, T., Aoki, Y., Muraki, N., (2011). Thermal stability and kinetics of delithiated LiCoO_2 . *Journal of Power Sources*, 196, 2260-2263,.
- [38] Thackeray, M.M., (1997). Manganese Oxides For Lithium Batteries. *Progress in Solid State Chemistry* , 25, 1-71, . doi:[https://doi.org/10.1016/S0079-6786\(97\)81003-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6786(97)81003-5).
- [39] Winter, M., Besenhard, J.O., Spahr, M.E., Novak, P., (1998). Insertion Electrode Materials for Rechargeable Lithium Batteries, *Advanced Materials*, 10 (10), 725-763.
- [40] Hung, H., Yin, S.C., Nazar, L.F., (2001). Approaching Theoretical Capacity of LiFePO_4 at Room Temperature at High Rates. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 4, A170-A172,.
- [41] Vazquez-Arenas, J., Gimenez, L.E., Fowler, M., Han, T., Chen, S., (2014). A Rapid Estimation and Sensitivity Analysis of Parameters Describing teh Behavior of Commercial Li-ion Batteries Including Thermal Anslsysis. *Energy Conversion and Management*, 87, 472-482,.

- [42] **Edouard, C., Petit, M., Forgez, C., Bernard, J., Revel, R.,** (2016). Parameter Sensitivity Analysis of a Simplified Electrochemical and Thermal Model for Li-ion Batteries Aging. *Journal of Power Sources*, 325, 482-494,.
- [43] **Wang, Z., Ma, J., Zhang, L.,** (2017). Finite Element Thermal Model and Simulation for a Cylindrical Li-ion Battery. *IEEE Special Section on Battery Energy Storage and Management Systems*, 15372-15379,.
- [44] **Bhatt, M.D., O'Dwyer, C.,** (2015). Recent Progress in Theoretical and Computational Investigations of Li-ion Battery Materials and Electrolytes. *Royal Society of Chemistry*, 17, 4799-4844,.
- [45] **Wang, Z., Zhou, L., Lou, X.W.,** (2012). Metal Oxide Hollow Nanostructures for Lithium-ion Batteries, *Advanced Materials*, 24, 1903-1911.
- [46] **Wang, L., Yin, S., Zhang, C., Huan, Y., Xu, J.,** (2018). Mechanical Characterization and Modeling for Anodes and Cathodes in Lithium-ion Batteries. *Journal of Power Sources*, 392, 266-273,.
- [47] **Cabana, B.J., Monconduit, L., Dominique, L., Palacin, M.R.,** (2010). Beyond Intercalation-Based Li-Ion Batteries: The State of the Art and Challenges of Electrode Materials Reacting Through Conversion Reactions, *Advanced Materials*, 22, E170-E192.
- [48] **Liu, H., Wei, Z., He, W., Zhao, J.,** (2017). Thermal Issues about Li-ion Batteries and Recent Progress in Battery Thermal Management Systems: A review. *Energy Conversion and Management*, 150, 304-330,.
- [49] **Lange, J.G.,** (2012). Improving Lithium-ion Battery Power and Energy Densities Using Novel Cathode Architectures and Materials (Yüksek Lisans Tezi). University of Illinois, Material Science and Engineering, Illinois.
- [50] **Ma, S., Jiang, M., Tao, P., Song, C., Wu, J., Wang, J., Deng, T., Shang, W.,** (2018). Temperature Effect and Thermal Impact in Lithium-Ion Batteries: A Review. *Progress in Natural Science: Materials International*, 28, 653-666,.
- [51] **Zhang, S.S., Xu, K., Jow, T.R.,** (2003). Low-Temperature Performance of Li-Ion Cells with a LiBF₄-Based Electrolyte. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 7(3), 147-151,.
- [52] **Saito, Y.,** (2005). Thermal Behaviors of Lithium-Ion Batteries During High-Rate Pulse Cycling. *Journal of Power Sources*, 146, 770-774,.
- [53] **Kizilel, R., Lateef, A., Sabbah, R., Farid, M.M., Selman, J.R., Al-Hallaj, S.,** (2008). Passive Control of Temperature Excursion and Uniformity in High-Energy Li-Ion Battery Packs at High Current and Ambient Temperature. *Journal of Power Sources*, 183, 370-375,.
- [54] **Nagpure, S.C., Dinwiddie, R., Babu, S.S., Rizzoni, G., Bhushan, B., Frech, T.,** (2010). Thermal Diffusivity Study of Aged Li-Ion Batteries Using Flash Method. *Journal of Power Sources*, 195, 872-876,.
- [55] **Wu, M.S., Liu, K.H., Wang, Y.Y., Wan, C.C.,** (2002). Heat Dissipation Design for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources*, 109, 160-166,.
- [56] **Gong, X., Mi, C.C.** (2015). Temperature-Dependent Performance of Lithium Ion Batteries in Electric Vehicles, *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, (ss.1065-1072). Charlotte, NC, USA: March 15-19.

- [57] Schweiger, H.G., Multerer, M., Berberich, M.S., Gores, H.J., (2008). Optimization of Cycling Behavior of Lithium Ion Cells at 60°C by Additives for Electrolytes Based on Lithium bis[1,2-oxalato(2-)-O,O']Borate, *International Journal of Electrochemical Science*, 3, 427-443.
- [58] Adair, D., Ismailov, K., Bakenov, Z. (2014). Thermal Management of Lithium-Ion Battery Packs, *COMSOL Conference*, (ss.1065-1072). Cambridge, UK: Sept 17-19.
- [59] Kizilel, R., Sabbah, R., Selman, J.R., Al-Hallaj, S., (2009). An Alternative Cooling System to Enhance The Safety of Li-Ion Battery Packs. *Journal of Power Sources*, 194, 1105-1112,.
- [60] Wright, D.R., Araez, N.G., Owen, J.R., (2018). Review on High Temperature Secondary Li-Ion Batteries. *Energy Procedia*, 151, 174-181,.
- [61] Pesaran, A.A., (2001). Battery Thermal Management in EVs and HEVs Issues and Solutions, *2015 IEEE Advanced Automotive Battery Conference*, Las Vegas, Nevada, USA: February 15-19.
- [62] Pesaran, A.A., Burch, S., Keyser, M., (1999). An Approach for Designing Thermal Management Systems for Electric and Hybrid Vehicle Battery Packs, *Fourth Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition*. London, UK: May 24-27.
- [63] Hu, X. & Stanton, S., (2014) A Total Li-Ion Battery Simulation Solution ANSYS Confidential A Total Li-Ion Battery Simulation Solution.
- [64] Wang, Q., Piing, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., Chen, C., (2012). Thermal Runaway Caused Fire and Explosion of Lithium Ion Battery. *Journal of Power Sources*, 208, 174-181,.
- [65] Tarascon, J.M., Armand, M., (2001). Issues and Challenges Facing Rechargeable Lithium Batteries. *Insight Review Articles*, 414, 359-367,.
- [66] Hallaj, S.A., Maleki, H., Hong, J.S., Selman, J.R., (1999). Thermal Modeling and Design Consideration of Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources*, 83, 1-8,.
- [67] Inui, Y., Kobayashi, Y., Watanabe, Y., Watase, Y., Kitamura, Y., (2007). Simulation of Temperature Distribution in Cylindrical and Prismatic Lithium Ion Secondary Batteries. *Energy Conversion and Management*, 48, 2103-2109,.
- [68] Du, S., Ming, J., Cheng, Y., Tang, Y., Zhang, H., Ai, L., (2015). Study on the Thermal Behaviors of Power Lithium Iron Phosphate(LFP) Aluminum-laminated Battery with Different Tab Configurations. *International Journal of Thermal Sciences*, 89, 327-336,.

ÖZGEÇMİŞ

TARANMIŞ
VESİKALIK
FOTOĞRAF

Ad-Soyad : Gizem TAYLAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 30.04.1993/IĞDIR
E-posta : gizemkrdg@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği