



**ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN BATARYA
SİSTEMLERİNDE ISI YÖNETİMİ**

Gamze EĞİN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN BATARYA SİSTEMLERİNDE ISI YÖNETİMİ

Gamze EĞİN

Doç. Dr. Erhan PULAT
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

TEZ ONAYI

Gamze EĞİN tarafından hazırlanan "ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN BATARYA SİSTEMLERİNDE ISI YÖNETİMİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Erhan PULAT

Başkan : Prof. Dr. Muhsin KILIÇ
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik
Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza


Üye : Doç. Dr. Erhan PULAT
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik
Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza


Üye : Dr. Öğr. Üyesi Kemal Furkan SÖKMEN
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa
Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

İmza


Yukarıdaki sonucu onaylarım


Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü
17/07/2019

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

17/07/2019

Gamze EĞİN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN BATARYA SİSTEMLERİNDE ISI YÖNETİMİ

Gamze EĞİN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Erhan PULAT

Petrol ürünleri ve hava kirliliği üzerine endişelerin artmasıyla birlikte, elektrikli ve hibrit elektrikli araçların geliştirilmesine başlanmıştır. Elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar için yapılan araştırmalar, içten yanmalı motorlara fiyat ve güvenilirlik açısından alternatif olmasını da kapsamaktadır. Özellikle elektrikli araçlar üzerine yapılan çalışmalarda yarış, elektrikli araçların batarya sistemleri üzerinedir. Uygun maliyetli ve uzun ömürlü batarya sistemlerini piyasaya süren kuruluşların, gelecekteki otomotiv endüstrisine hakim olma konusunda güçlü bir konumda olacağı aşıkardır.

Elektrikli araçlar için geliştirilen batarya sistemlerindeki en büyük endişelerden birisi, bataryalardaki ısı yönetimidir. Özellikle lityum iyon (li-ion) pillerinin hücrelerindeki sıcaklık, tüm batarya paketi içinde sınırlı derecede (°C) değişime izin vermektedir. Batarya hücreleri, hızlı deşarj (boşalma), aşırı şarj ve ortam sıcaklığının fazla artmasından dolayı gerçekleşen aşırı ısınmalara karşı savunmasızdırlar. Aşırı ısınma ve dengesiz sıcaklık dağılımı, hızlı bir şekilde hücre bozulmasına ve batarya çevrim ömrünün kısalmasına sebep olmaktadır. Ayrıca bu durumlarda sıcaklık kontrolsüz bir şekilde arttığı için bataryada gerçekleşebilecek katastrofik hasar, yangına ve patlamaya sebep olabilmektedir. Tüm bu sebeplerden dolayı, batarya sistemlerindeki ısıyı uzaklaştırmak ve batarya paketi/modülü/hücresi boyunca üniform sıcaklığı sağlamak için elektrikli araç batarya paketleri kapsamlı soğutma sistemlerini içermektedir.

Bu tez çalışmasında, elektrikli araçların batarya sistemleri tasarlanmıştır ve batarya sistemlerinin ısı yönetimi gerçekleştirilmiştir. Isı yönetimi çalışmaları, ANSYS Icepak programında sonlu elemanlar analizleri ile yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, tasarımın doğrulanması ile ısı performansında iyileştirmeler yapılmıştır. Batarya sınır şartlarının batarya sistemine etkisi net bir şekilde ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, batarya sistemleri, ısı yönetimi, ısı tasarım, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), sonlu elemanlar analizi, ANSYS Icepak

2019, xi+ 86 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

THERMAL MANAGEMENT IN ELECTRIC VEHICLE BATTERY SYSTEMS

Gamze EĞİN

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Erhan PULAT

In the wake of growing concerns over petroleum supplies and air pollution, electric vehicles (EVs) including hybrid electric vehicles (HEVs) are being developed and refined as cost effective, reliable and safe alternatives to conventional gasoline and diesel engines. The race is on to design electric batteries as the power source for this new class of vehicles. Competition is intense and the stakes are high. Organizations that succeed in bringing cost-effective, long-lasting batteries to market first are in a strong position to dominate the future automotive industry, not to mention reap a sizeable share of profits. One of the major concerns in the development of lithium-ion battery packs for EVs is thermal management. The temperature of all cells must be strictly maintained within limited degrees C across the entire pack. Cells are vulnerable to overheating from rapid discharging, overcharging or excessive ambient heating. Such overheating and uneven temperature distribution can lead to rapid cell degradation and shorten battery life. In extreme cases, thermal runaway may occur in a cell as heat builds up uncontrollably, possibly causing catastrophic destruction, such as fire and explosion. For these reasons, EV battery packs/systems/cells incorporate extensive cooling systems to dissipate heat and provide for uniform temperatures throughout the battery pack

In this thesis, the design and thermal management of the electric vehicle battery systems are investigated. Thermal management works are made with finite element analyses in ANSYS Icepak programme. At the result of analyses, the design is validated and thermal performance is upgraded. The effect of the battery boundary conditions on the battery system is clearly demonstrated.

Key words: Electric vehicles, battery systems, thermal management, thermal design, computational fluid dynamics (CFD), thermal analysis, ANSYS Icepak

2019, xi + 86 pages.

TEŐEKKÖR

Tez alıőmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Erhan PULAT'a sonsuz teőekkÖrlerimi ve saygılarımı sunarım.

Analiz çalıőmalarımda bana yardımcı olarak hep yanımda olan, beni her koőulda motive eden ve destekleyen Sayın Mustafa Martin'e çok teőekkÖr ederim.

Tez çalıőmam boyunca her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve hayatım boyunca beni her koőulda motive eden aileme en içten teőekkÖr ve sevgilerimi sunarım.

Gamze EĞİN
17/07/2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	2
2.1. Elektrikli Araçlara Genel Bakış	2
2.2. Otomobil Teknolojisinin Değişimi	3
2.2.1. Teknolojideki gelişmeler.....	3
2.2.2. Elektrikli araçların Türkiye’deki gelişmeleri	17
2.3. Araç Çeşitleri	19
2.3.1 İçten yanmalı motorlu araçlar (Konvansiyonel araçlar).....	19
2.3.2. Elektrikli araçlar.....	21
2.3.3. Hibrit araçlar	23
2.3.4. Yakıt pili araçları.....	26
2.4. Enerji Depolama Sistemleri	27
2.4.1. Bataryalar	27
2.4.2. Süper kapasitörler.....	31
2.4.3. Volanlar	31
2.4.4. Yakıt pilleri	32
2.5. Elektrikli Araçların Batarya Teknolojileri	35
2.5.1. Kurşun asit (Pb-Acid) bataryalar	38
2.5.2. Nikel kadmiyum (NiCd) bataryalar	39
2.5.3. Nikel metal hidrit (NiMH) bataryalar	40
2.5.4. Lityum-iyon (Li-ion) bataryalar	42
3. MATERYAL VE YÖNTEM	47
3.1. Lityum-iyon Bataryada Çalışma Şartları	48
3.2. Bataryada Isı Yönetimi Teknolojileri	51
3.2.1. Hava ile soğutma ve ısıtma	51
3.2.2. Sıvı ile soğutma ve ısıtma	52
3.2.3. Direkt soğutucu ile soğutma ve ısıtma	54
3.2.4. Faz değişim malzemesi (PCM) ile soğutma ve ısıtma.....	55
3.2.5. Termoelektrik modül (peltier) ile soğutma ve ısıtma.....	56
3.2.6. Isı borusu.....	57
3.3. Yöntem.....	58
3.4. Isı Yönetimi Çalışmaları	58
3.5. Analize Giriş	59
3.6. Modül Özellikleri ve Geometrisi	60
3.7. Analiz Giriş Verileri.....	62
3.7.1. Isıl yük hesabı	62
3.7.2. Isı transferi denklemleri	64
3.7.3. Malzeme özellikleri.....	65

3.7.4. Sınır şartları.....	66
3.8. Batarya Modülünün Ağ Yapısı	67
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	68
4.1. İlk Sınır Şartlarının Sonuçları	68
4.2. Sınır Şartlarının Modül Isıl Performansına Etkisi.....	77
4.2.1. Su debisinin modül ısıl performansına etkisi	77
4.2.2. Ortam sıcaklığının modül ısıl performansına etkisi	79
5. SONUÇ	81
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	86



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
i	Akım yoğunluğu (A/m^2)
Q	Birim hacim başına üretilen ısı yük (W/m^3)
σ	Elektronik iletkenlik (S/m)
E	Enerji
R _g	Evrensel gaz sabiti ($8,3145 J/mol K$)
F	Faraday sabiti ($96 485 Q/mol$)
V	Hacim (m^3)
a	Hacimsel alan (m^2/m^3)
q"	Isı akısı (W/m^2)
k	Isı iletim katsayısı ($W/m \text{ } ^\circ C$)
h	Isı taşınım katsayısı ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
q	Isıl yük (W)
ϵ	Işıma katsayısı
E	Işınım akısı (W/m)
K	İyonik iletkenlik (S/m)
x	Koordinat sistemindeki x-yönü (m)
y	Koordinat sistemindeki y-yönü (m)
z	Koordinat sistemindeki z-yönü (m)
m	Kütle (kg)
c	Lityumun konsantrasyonu (mol/m^3)
f	Ortalama molar aktiflik katsayısı
RMB	Para Birimi Çin Yuanı
\$	Para Birimi Dolar
€	Para Birimi Euro (Avro)
E _{eq}	Potansiyel (V)
\emptyset	Potansiyel (V)
cp	Sabit basınçta özgül ısı ($J/kg \text{ } ^\circ C$)
T	Sıcaklık ($^\circ C$ veya K)
r	Silindir, küre yarıçapı (m)
σ	Stefan-Boltzmann katsayısı ($W/m^2 (K)^4$)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
A	Yüzey alanı (m^2)
t	Zaman (sn)

Kısaltmalar Açıklama

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
Ar-Ge	Araştırma ve Geliştirme
DMA	Derindere Motor Taşıtlar
DC	Doğru akım
EV	Elektrikli araçlar
EB	Elektrik Bataryası
EM	Elektrik Motoru
SEI	Elektrolit Ara Yüz
ECU	Elektronik kontrol ünitesi
kWh	Enerji (kilowatt-saat)
Wh/kg	Özgül enerji (Enerji yoğunluğu)
Wh/m ³	Enerji yoğunluğu
Wh/L	Enerji yoğunluğu
PCM	Faz değişim malzemesi
kW	Güç (kilowatt)
W/m ³	Güç yoğunluğu
HAD(CFD)	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği(Computational Fluid Dynamics)
Km/h	Hız
HEV	Hibrit Elektrikli Araçlar
H ₂ -O ₂	Hidrojen-oksijen
ICEV	İçten yanmalı motorlu araçlar
İYM	İçten yanmalı motorlar
Ah	Kapasite (amper-saat)
mAh/g	Kapasite (miliamper-saat/gram)
Pb-Acid	Kurşun asit
PbO ₂	Kurşun dioksit
LiFePO ₄	Lityum demir fosfat
LFP	Lityum demir fosfat
Li-ion	Lityum-iyon
LiCoO ₂	Lityum kobalt oksit
LiNiMnCoO ₂	Lityum nikel mangan kobalt
NMC	Lityum nikel mangan kobalt
LiMn ₂ O ₄	Lityum mangan oksit
Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	Lityum titanat oksit
LTO	Lityum titanat oksit
MAM	Marmara Araştırma Merkezi
km	Menzil(uzunluk)
LB-FT	Moment
NiCd	Nikel kadmiyum
LiNiCoAlO ₂	Nikel kobalt alüminyum oksit
NCA	Nikel kobalt alüminyum oksit
NiMH	Nikel metal hidrit
mAh/g	Özgül Kapasite
PEM	Proton Dönüşüm Zarlı
d/d	Radyal hız (devir/dakika)

RF	Rejeneratif Fren
SOC	Sarj durumu
PHEV	Şarj edilebilir hibrit araçlar
LPG	Sıvılaştırılmış petrol gazı
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
H ₂ SO ₄	Sülfürik asit
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
YD	Yakıt Deposu
S2S	Yüzeyden yüzeye



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Örnek bir içten yanmalı motor teknolojisine sahip dört çeker araç şasisi	4
Şekil 2.2. Tesla firmasının X model elektrikli aracının şasisi.....	5
Şekil 2.3. İçten yanmalı motor ile elektrik motoruna ait moment-hız karakteristiği	6
Şekil 2.4. 2016-2017 model tüm elektrikli araçların menzil uzunluğu (km cinsinden)..	13
Şekil 2.5. Yıllara göre dünyadaki elektrikli araç satış sayıları.....	15
Şekil 2.6. Dünya genelindeki 2018 1. çeyreğine ait elektrikli araç satışları	16
Şekil 2.7. Yıllara göre elektrikli araç satışı ve satışın büyüme oranları.....	16
Şekil 2.8. İçten yanmalı motorlu aracın genel yapısı	20
Şekil 2.9. Elektrikli aracın genel yapısı	22
Şekil 2.10. Hibrit (a) ve şarj edilebilir hibrit araçların (b) genel yapısı	25
Şekil 2.11. Tübitak MAM yakıt pili aracı	26
Şekil 2.12. Batarya tipleri ile anot, katot ve elektronlar.....	28
Şekil 2.13. Enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğuna göre enerji depolama sistemlerinin kıyaslanması.....	30
Şekil 2.14. Modern yüksek hızlı volan sistemi	32
Şekil 2.15. Yakıt pilinin genel yapısı	33
Şekil 2.16. Çeşitli uygulamalarda kullanılan batarya teknolojileri	36
Şekil 2.17. Örnek bir kurşun asit batarya	39
Şekil 3.1. Batarya sıcaklık-performans eğrisi	49
Şekil 3.2. Batarya hücrelerinin çalışma sıcaklığı-çevrim eğrisi	50
Şekil 3.3. Zorlanmış taşınım hava sistemleri	51
Şekil 3.4. Isı geri kazanımlı zorlanmış taşınım hava sistemleri.....	52
Şekil 3.5. Pasif sıvı soğutmalı sistem.....	53
Şekil 3.6. Aktif sıvı soğutmalı sistem	54
Şekil 3.7. Direkt soğutucu ile soğutma sistemi	55
Şekil 3.8. Faz değişim malzemesinin sıcaklık-enerji depolama grafiği.....	56
Şekil 3.9. Termoelektrik modül ile soğutma sistemi	57
Şekil 3.10. Isı borusu ile soğutma sistemi.....	58
Şekil 3.11. Batarya sistemlerinin seviyeleri	59
Şekil 3.12. Tasarlanan batarya modülü	61
Şekil 3.13. Hücreler arasındaki mesafe gösterimi.....	62
Şekil 3.14. 0,9C Desarj oranına sahip batarya hücrelerinde zamana bağlı olarak ısı üretimi (Basu ve ark. 2016)	64
Şekil 3.15. Batarya modülünün ağ yapısı.....	67
Şekil 4.1. Batarya modülünde meydana gelen sıcaklıklar (a) 0. saniye (b) 1 200. saniye (c) 2 400. Saniye (d) 3 600. Saniye.....	70
Şekil 4.2. Modüldeki bataryaların numaralandırılması.....	71
Şekil 4.3. Batarya modülünde meydana gelen sıcaklıklar 2 (a) 0. saniye (b) 1 200. saniye (c) 2 400. Saniye (d) 3 600. Saniye.....	72
Şekil 4.4. Bataryalardaki zamana bağlı olarak sıcaklık değişimi.....	73
Şekil 4.5. Hücrelerdeki maksimum sıcaklıkların grafiği	75

Şekil 4.6. Zamana bağlı olarak suyun giriş ve çıkış hızının değişimi.....	76
Şekil 4.7. Sudaki basınç değişimi	77
Şekil 4.8. Debi değişiminin modülün maksimum sıcaklığına etkisi.....	78
Şekil 4.9. Ortam sıcaklığının modülün maksimum sıcaklığına etkisi.....	79



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Tarihi sıralamaya göre elektrikli araç örnekleri ve özellikleri.....	10
Çizelge 2.2. ABD'deki elektrikli araçların yıl ve marka bazlı sayıları.....	14
Çizelge 2.3. ABD'deki yakıt pilli araçların yıl ve marka bazlı sayıları.....	15
Çizelge 2.4. Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri.....	34
Çizelge 2.5. Batarya çeşitleri ve özellikleri	37
Çizelge 2.6. Yaygın kullanılan lityum iyon katot kimyaları	44
Çizelge 2.7. Yaygın kullanılan lityum iyon anot ve katot kimyaları	45
Çizelge 3.1 Lityum demir fosfat (LiFePO ₄ ya da LFP) hücresinin ısıl özellikleri.....	66
Çizelge 4.1. Tüm batarya hücrelerindeki minimum, maksimum ve ortalama sıcaklık değerleri.....	74
Çizelge 4.2. Su giriş ve çıkış minimum, maksimum ve ortalama sıcaklık değerleri	75
Çizelge 4.3. Debi değişiminin modül performansına etkisi.....	78

1. GİRİŞ

Otomotiv sektörünün geleceğinde elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşacağı düşünüldüğü ve planlandığı için, elektrikli araçların güç kaynağı olan batarya paketinin performansı bu sebeple büyük önem arz etmektedir. Batarya paketinin sağlayacağı elektriksel güç birçok faktörden etkilenmektedir. Bu faktörlerin başında ısıl özellikler yer almaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda, batarya paketinin güvenli ve verimli bölgede olduğu sıcaklık sınır değerleri 20°C(alt değer) ve 40°C(üst değer)'dir. Bu tez çalışmasında, modül seviyesindeki batarya sisteminde bulunan silindirik batarya hücresinin ısıl performansı üzerine çalışılmıştır. Isıl performans testleri, ANSYS Icepak programında sonlu elemanlar analizi yapılarak gerçekleştirilmiştir.

Literatürde silindirik batarya hücresi ile yapılan sonlu eleman analizleri kısıtlıdır ve yapılan çalışmalarda da genellikle hava ile soğutma yöntemleri tercih edilmiştir. Literatürde batarya sistemlerinin ısıl performansları sonlu elemanlar yöntemleri ile incelenmesinde sistemi soğutma üzerine odaklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında silindirik batarya hücreleri ile çalışılması, batarya sisteminin hem ısıtma hem de soğutma yöntemleri ile incelenmesi, ısıl yöntem olarak su ile soğutma/ısıtma yönteminin tercih edilmesi ve son olarak sonlu elemanlar analizlerinde ANSYS Icepak programının kullanılması bu tez çalışmasının özgün ve yenilikçi özellikleridir.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında elektrikli araçlar, elektrikli araçların batarya teknolojileri, batarya sistemlerinde ısı yönetimi ve batarya sistemlerinin sonlu elemanlar analizleri üzerine detaylı bilgiler verilmiştir ve çalışmalar yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Elektrikli Araçlara Genel Bakış

Enerji, yaşamın her alanında kullanılmasıyla birlikte, insan hayatında ve ekosistemde önemli bir parça olarak düşünülmektedir. Yirmi birinci yüzyılda karşılaştığımız önemli problemlerden biri de enerji ile ilgilidir. Endüstrileşme ve küreselleşme ile birlikte her geçen yıl enerji talebi giderek artmaktadır. Özellikle, birçok ülkede gerçekleşen %2'den fazla popülasyon büyümesiyle birlikte, enerjiye ihtiyaç daha da artmaktadır. Dünyadaki enerji tüketimi göz önüne alındığında, bu enerji tüketiminin 2030 yılına kadar %50 artması ön görülmektedir (Dinçer 2010).

Dünya, günümüzde enerji gereksinimlerini karşılamak için küresel enerji taleplerinin neredeyse %80'ini sağlayan petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil yakıtları kullanmaktadır. Büyük ölçekli enerji üretiminin ve enerji tüketiminin çoğu bu kaynaklardan üretildikçe, bu kaynakların çevrenin bozulmasına neden olacağı düşünülmektedir. İnsani faaliyetlerin (özellikle sera gazı emisyonları) yönlendirdiği iklim değişikliğinin, çevre üzerinde önemli doğrudan olumsuz etkileri olduğuna ve 2020 yılına kadar iki katına çıkacağı tahmin edilen iklim değişikliğine bağlı yan etkilerden yılda 160 000'den fazla canlı ölümü olacağına inanılmaktadır. Ayrıca, perakende benzinin nominal fiyatları 1949 ve 2005 yılları arasında yaklaşık beş kat artmıştır (Asif ve Muneer 2007, Shafiee ve Topal 2008). İthal edilen petrole bağımlılık, sürekli artan petrol fiyatları ile çevre kirliliği ve küresel ısınmaya dair meydana gelen kaygılar, araştırmacıları, bilim adamlarını, mühendisleri ve teknoloji uzmanlarını enerji kullanımı için daha verimli, daha ucuz ve çevre dostu seçenekler aramaya yöneltmiştir. Bugün, yalnızca Amerika Birleşik Devletleri'nde günde yaklaşık 15 milyon varil ham petrol kullanılmaktadır. Bu ham petrolün yaklaşık %50'si ulaştırma sektöründe kullanılmaktadır, enerji arzının %95'i sıvı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır (Kristoffersen ve ark. 2011). Ayrıca ham petrol rezervlerinin büyük bir kısmı faklı siyasi ve sosyal durumlara sahip birkaç ülkede yer aldığı için bu durum, petrol tedarikinin çeşitlendirilmesine ve ülkeler arası siyasi çatılmaların meydana gelmesine neden olmaktadır.

Fosil yakıtları kullanan konvansiyonel araçlar (içten yanmalı motorlu araçlar- internal combustion engine vehicle (ICEV)), sera gazlarının aşırı atmosferik konsantrasyonlarına neden olmaktadır. Ulaştırma sektörünün bu probleme büyük katkısı olduğundan dolayı, konvansiyonel araçlara (içten yanmalı) alternatifler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bu alternatiflerin, konvansiyonel araçlara göre daha verimli ve daha çevreci olması istenilmektedir. Gelecekte konvansiyonel araçların yerini alabilecek bu alternatifler, elektrikli ve hibrit araçlardır.

Batarya teknolojilerinde yaşanan son gelişmelerle birlikte, elektrikli araç (electric vehicle (EV)) ve hibrit elektrikli araç (hybrid electric vehicle (HEV)) teknolojileri birçok alanda konvansiyonel araçlarla rekabet etmeye başlamıştır.

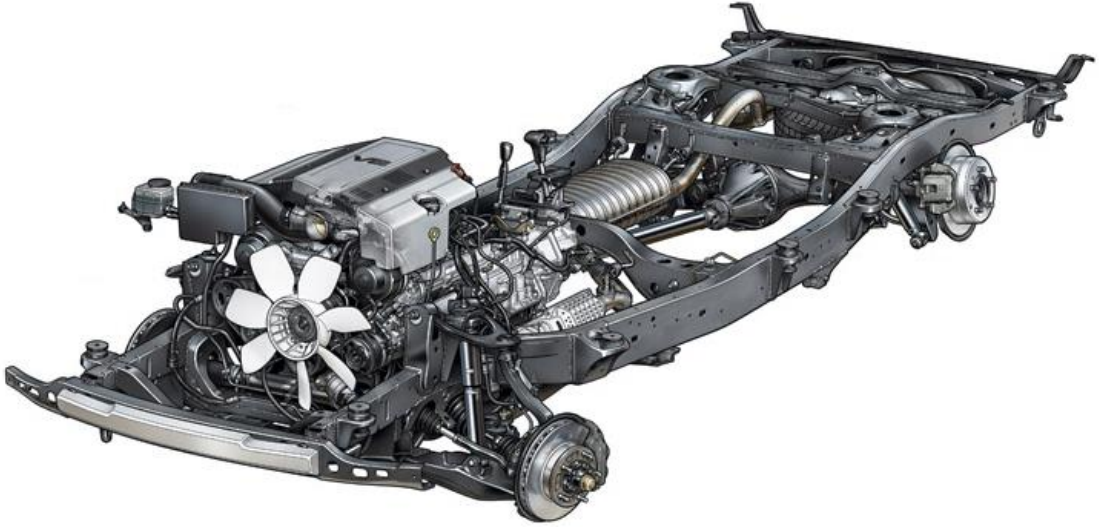
Elektrikli araçlar, enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi, gücün dengelenmesi, geliştirilmiş sürdürülebilirlik, sessiz çalışma ve düşük işletme maliyetleri ve önemli ekstra maliyetler olmadan operasyon sırasında önemli ölçüde daha düşük emisyonlar ile günümüzün konvansiyonel araçlarıyla ilgili önemli konulara çözümler sunmaktadır.

2.2. Otomobil Teknolojisinin Değişimi

2.2.1. Teknolojideki gelişmeler

Otomobil teknolojisine bakıldığında, ilk çekiş gücünün elde edilmesinden 21. yüzyılın başlarına kadar olan süreçte otomotivdeki teknolojik gelişmelerin 3 ana dönemden oluştuğu görülmektedir. Bunlar buhar motor teknolojisi, içten yanmalı motor teknolojisi ve elektrikli motor teknolojisi olarak adlandırılabilir. Aslında otomotiv teknolojisindeki bu değişimin, endüstrideki (Endüstri 1, 2, 3 ve 4) değişimle benzer özelliklere sahip olduğunu görmekteyiz. Buradan, ikisinin birbiri ile etkileşim halinde olduğunu çıkartabiliriz. Bu gelişime bakıldığında, buharlı araçların oldukça tehlikeli, kirli ve pahalı olduğu ve içten yanmalı araçların yeni geliştirildiği ve hala bazı teknik sorunları olduğu için elektrikli araçlar diğerlerine kıyasla avantajlı konumdadır.

İçten yanmalı motor teknolojisine baktığımızda, bu teknolojinin dakikada binlerce devir yapması ve bu devir sırasında valf mekanizmasından krank-biyel- piston mekanizmasına kadar uyum içerisinde çalışması, bu teknolojinin kusursuz ahenge sahip olduğunu göstermektedir. Fakat içten yanmalı motor teknolojisindeki en istenmeyen durum enerji verimindeki düşüklüktür. Yakıttaki yanma enerjisinin mekanik dönme enerjisine dönüşümü, en iyi verime sahip motorlarda bile %30 civarındadır. Enerjinin geri kalan kısmı ise ısı ve ses halinde harcanıp gitmektedir. Verim düşüklüğünün sebeplerinden biri de sahip olduğu karmaşıklığıdır. Şekil 2.1’de içten yanmalı motora sahip dört çeker bir araç şasisi gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Örnek bir içten yanmalı motor teknolojisine sahip dört çeker araç şasisi (Çetin 2016)

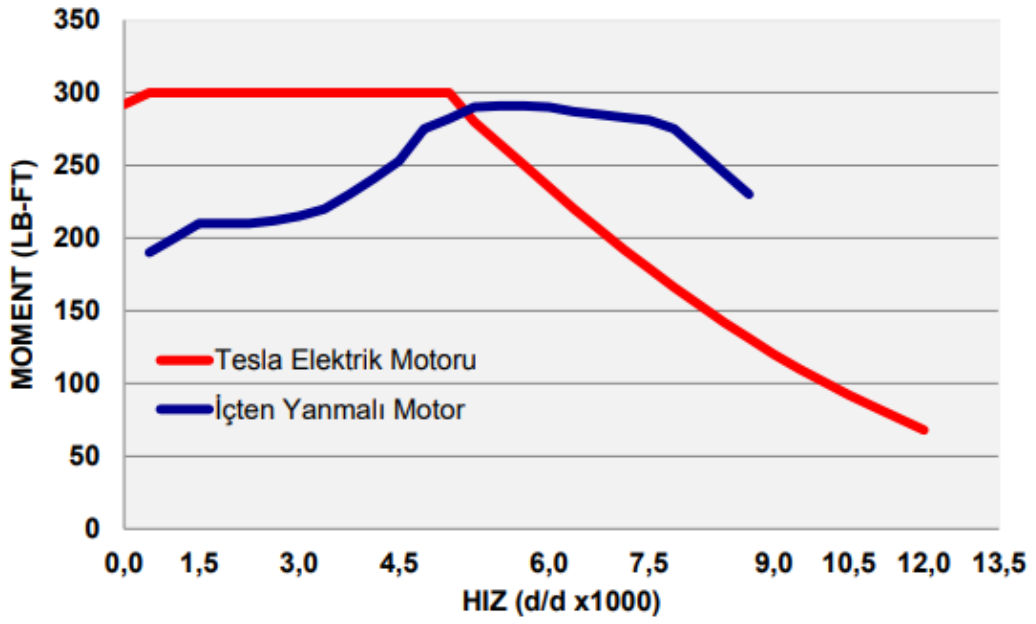
Şekle bakıldığında, bu teknolojinin çok fazla parça barındırdığı ve karmaşık olduğu görülmektedir. Fakat elektrikli motor teknolojisinde durum bu şekilde değildir. Elektrikli motor teknolojisinde, elektrikli motordaki dönme enerjisi düşük verim kaybı ile mekanik dönme enerjisine dönüştürülmektedir. Tesla'nın yayınladığı değerlere göre Roaster modeli ortalama %88 gibi oldukça yüksek verim değerinde performans göstermektedir (Denton 2012). Ayrıca içten yanmalı motorda olduğu uyumlu çalışması gereken parçalar da çok fazla bulunmamaktadır. Şekil 2.2’de elektrikli motor teknolojisine sahip bir otomobildeki sadelik gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Tesla firmasının X model elektrikli aracının şasisi (Çetin 2016)

Bu sadeliğin, verim kaybının azaltılmasında etkisi olmaktadır.

İçten yanmalı motorlardaki başka bir problem ise, motorun üretebildiği en yüksek torkun, sadece dar bir devir aralığında elde edilebiliyor olmasıdır. Elektrikli motorlarda ise herhangi bir devirde anlık moment elde edilebilir. Özellikle düşük devirlerde elde edilen bu geniş moment aralığı vites değiştirme ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Bu yüzden elektrikli araçlar büyük çoğunlukla tek vitese sahip olmaktadır. Yani sıfırdan maksimum hıza kadar tek vites kullanılmaktadır. Aracın geri gitmesi motorun ters yönde çalıştırılmasıyla gerçekleştirilebilmektedir. Dolayısıyla, elektrikli araçlarda geri vitese ihtiyaç olmamaktadır. Bu tasarım, elektrikli araçları hem inanılmaz basit, güvenilir ve kompakt yapmakta, hem de sürüş keyfini büyük ölçüde artırmaktadır (Gürbüz ve Kulaksız 2016). Şekil 2.3'te içten yanmalı motor ile elektrik motorunun sahip olduğu moment-hız karakteristiği verilmiştir.



Şekil 2.3. İçten yanmalı motor ile elektrik motoruna ait moment-hız karakteristiği (Gürbüz ve Kulaksız 2016)

Şekle bakıldığında, içten yanmalı motor maksimum momente çok yüksek devirlerde (yaklaşık 6 000d/d) ulaşmaktadır. Ancak motor maksimum momente ulaştığı anda hızı giderek düşmeye başlamaktadır. Bu sınırlı moment aralığı problemi, farklı vites dişli oranları ile giderilmeye çalışılmaktadır. Elektrikli motorda ise maksimum moment neredeyse dakikada 6 000 devire kadar sabit kalmakta ve daha sonra düşmeye başlamaktadır.

Elektrikli araçlar her ne kadar 20. yüzyılda ortaya çıksa da aslında geçmişi 18. yüzyıla kadar dayanmaktadır. İlk elektrikli araç modeli Profesör Stratingh tarafından 1835 yılında Hollanda'da geliştirmiştir (Ünlü ve ark. 2003, Sayın ve Yüksel 2011). Ardından 1838 yılında Robert Davidson 6.4 km/h hıza ulaşabilen elektrikli lokomotifini üretmiştir (Chan 2013). Kurşun-asit bataryaları 1859 yılından sonra geliştirilmiş ve elektrikli araçlarda kullanılmaya başlanmıştır (Ünlü ve ark. 2003). 1882'de Siemens, Elektromote adındaki dünyanın ilk elektrikli trolleybüsünü Berlin'de üretmiştir.

1895 yılında Morris ve Salomon iki koltuklu Electrobats isimli elektrikli aracı geliştirmişlerdir. İngiltere’de 1897 yılında “Londra Elektrikli Taksi Şirketi” tarafından 15 tane elektrikli taksi kullanıma alınmıştır (Ünlü ve ark. 2003). 1901’de “New York Taxi” firması da elektrikli araçları taksi olarak kullanmaya başlamıştır (Larminie ve Lowry 2003). İlk hibrit elektrikli araç, içten yanmalı motor ile elektrikli çekiş motoru birleştirildiğinde daha yüksek verime ulaşabileceği düşünüldüğü için 1899’un başlarında Porsche tarafından geliştirilmiştir (Dinçer ve ark. 2017).

Yolların fiziki durumu uzun menzillere elverişli olmadığı için, elektrikli araçlar için menzil uzunluğu çok fazla önem arz etmemekteydi. Fakat zamanla birlikte modern yol ağlarının genişletilmesi ve petrol istasyonlarının çoğaltılması ile birlikte içten yanmalı motor teknolojili araçlar, araç pazarında önemli ölçüde daha ucuz ve daha yaygın kullanılmaya başlanan teknoloji haline gelmeye başlamıştır. Durum böyle olunca elektrikli araçlar adına yapılan gelişmeler azalmaya başlamıştır.

Petrol fiyatlarının artmasına sebep olan 1970’lerdeki Arap petrol ambargosuyla beraber, ABD binek araçlardaki verimlerin artmasını sağlayan ve ortalama yakıt ekonomisi standartlarını beraberinde getiren yakıt tüketiminin azaltılmasını başlattı. Bunların arasında, 1965 tarihli Temiz Hava Yasası, elektrikli araçlarla ilgili araştırma yapmak için çok sayıda araştırma enstitüsünü ve firmayı da tetiklemiştir. Böylelikle, elektrikli ve hibrit elektrikli araçlara olan ilgi artmış ve günümüzün modern hibrit ve elektrikli araçlarının temelini oluşturan yakıt tüketimini azaltmak için çeşitli prototipler üretilmiştir. Fakat o dönemlerde önemli gelişmeler elde etmediler, bataryaların düşük enerji yoğunluğu ve yüksek fiyatları nedeniyle taşıt pazarına giremediler. Bu durum da onları birçok yönden içten yanmalı motorlu araçlara göre daha dezavantajlı hale getirdi (Dinçer ve ark 2017). 1970’lerin sonunda, dünya çapında 4 000’den fazla bataryalı elektrikli araç satıldı ve 1980’lerin sonu ile 1990’ların başına kadar olan süreçte araştırmalar petrol fiyatlarına ve çevresel kaygılara bağlı olarak yeniden hızlandı. Bu da elektrikli araçların hem ticari hem binek araç türlerinde geri dönüşünü sağladı (de Santiago ve ark. 2012).

Fakat 1990–2005 yılları arasında, Avrupalı otomotiv üreticileri patentlerinde %80’den fazla içten yanmalı motor teknolojilerine özellikle değişken valf zamanlama ve doğrudan yakıt enjeksiyon gibi çeşitli konulara odaklanmıştır. Patentlerin sadece %20’si elektrikli ve hidrit elektrikli araç teknolojileri üzerine olmuştur (Dijk ve ark. 2013). Aynı zamanda, Japonya’nın 1990’ların başında elektrikli ve hibrit elektrikli araç üzerine olan patent başvurularında önemli bir artış yaşanmıştır ve 1995’ten sonra patent başvuruları önemli ölçüde azalmıştır. Bu da, araştırmacıların ve otomobil üreticilerinin çoğunun bu dönemde içten yanmalı araçlara kıyasla elektrikli motor teknolojisini kârlı bulmadığını göstermektedir. İçten yanmalı motor teknolojinin yaygınlaşmasının ardındaki temel nedenler, o zamandaki kurşun asitli aküler (çok düşük enerji yoğunluğuna ve sınırlı kullanım ömrüne sahip), tatminsiz müşteriler (özellikle fiyat ve ürün çeşitliliğine göre) ve otomobil endüstrisinin lobi çalışmaları (özellikle emisyon yönetmelikleri üzerine) olarak listelenebilir. Bu sebeple, 1995 ve 2000 yılları arasında, dünya çapında az miktarda (birkaç bin seviyesinde) elektrikli ve hibrit elektrikli araç satıldı.

Bu süre zarfında, elektrikli ve hibrit elektrikli araç teknolojilerindeki en büyük başarı, piyasadaki iş fırsatlarının farkına varan ve emisyon düzenleyici ölçümler ne olursa olsun düşük emisyonu sahip araçların çoğaltılarak ticarileştirilmesi adına alternatif çekiş yöntemleri oluşturan Toyota ve Honda’ya aitti. Bu ifadeye, Toyota Prius’un 1997’de Japonya’da, Prius 2’nin 2000’de Kaliforniya’da ve Prius 3’ün dünya çapında piyasaya sunulması örnek olarak gösterilebilir. Toyota’nın Prius’u piyasaya sunmasıyla birlikte, Prius 1997 ve 2007 yılları arasında toplam 1 milyondan fazla sattı (Dinçer ve ark. 2017).

1996 yılında General Motors, elektrikli araç olan EV1’i tanıttı ve bu aracı sınırlı sayıda müşteriye kiraladı. Ancak araç, müşterilerden batarya boşalma korkusu ve menzil kaygısı gibi çeşitli konulardan olumsuz geri bildirimler aldığı için çok fazla başarılı performans gösteremedi. Bu arada diğer otomobil üreticilerinin çoğu, 2005’ten sonra artan iklim değişikliği endişeleri ve yüksek petrol fiyatları nedeniyle, elektrikli motor teknolojisine yönelik önemli Ar-Ge kaynakları ayırmaya başladı (Dinçer ve ark. 2017).

2012 yılında dünyada, ABD, Japonya ve Çin başta olmak üzere bir önceki yılın iki katından fazla olan 113 000 elektrikli araç satıldı ve 2020 yılına kadar 20 milyon elektrikli aracın yollarda olması öngörülmektedir.

Devlet teşvikleri, elektrikli araç teknolojilerindeki Ar-Ge, altyapıda önemli artış ve batarya maliyetlerinde azalma ile bu araçların pazardaki yerinin yakın gelecekte daha da etkin hale gelmesi beklenmektedir. Ayrıca, elektrikli ve hibrit elektrikli araçların pazar payını arttırmak için bazı ülkelerde bu alandaki Ar-Ge fonlarının tahsisi ile birlikte altyapı temin edilmiştir. Bugün internetteki çeşitli kaynaklardan toplanılan verilere göre, birçok ülke elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar için vergi teşvikleri vermektedir. Finlandiya (5 milyon €), Fransa (450 milyon €), İtalya (1,5 milyon €), Hollanda (araç maliyetinin %12'si), Hindistan (%20), Çin (60 000 RMB), İspanya (6 000+ €), İsveç (4 500 €) ve Amerika Birleşik Devletleri (7 500 \$) bu konuda önde gelen ülkelerdir (Dinçer ve ark. 2017).

Ayrıca, geçtiğimiz yirmi yıl içinde yakıt pili teknolojisinin, taşımacılık sektörü de dahil olmak üzere birçok sektördeki uygulamalarda yer almaya başladığı göz ardı edilmemelidir. Hidrojen yakıt pillerinin geçmişi her ne kadar 1800'lü yılların başına dayansa da asıl yakıt pillerinin tam keşfi henüz 1838'lere kadar keşfedilmemiştir. Hava ve hidrojenin doğrudan elektriğe dönüştürülmesi ile elde edilen yakıt pilinin ilk kullanıldığı zamanlarda, 1933' e kadar yakıt pili teknolojisi büyük gelişmeler gösterememiştir. Bu teknoloji daha sonra 1958'de İngiliz Donanması ve Apollo Uzay Aracı'nın denizaltılarında kullanıldı (Dinçer ve ark. 2017). 1960'larda saf oksijenin aksine doğrudan hava ile kullanılacak yakıt pilleri geliştirildi (Andújar ve Segura, 2009).

1970'den beri geliştirilen yakıt pilleri, daha az pahalı katalizörler, artırılmış performans ve daha uzun ömür gibi çeşitli avantajlar sunmuştur. Böylelikle yakıt pilleri yüksek verimlilik ve düşük emisyonlar elde etmek için elektrik enerjisi üretimi alanında önemli bir aday haline gelmiştir. Son yirmi yılda, yakıt pilleri özgül güçleri, iki kat kadar artmıştır

ve özellikle otomotiv sektörü olmak üzere çeşitli uygulamalar için düşünölmeye başlanmıştır.

Günümüzde yakıt pilleri kullanan araçların büyük bir çoğunluğu araştırma, geliştirme ve test için kullanılmaktadır. İlk ticari olarak satılan yakıt pili teknolojisine sahip araç modeli olan FCX Clarity, 2007 yılında Honda tarafından geliştirildi ve seri olarak üretildi. O zamandan beri, Fiat Panda, Ford HySeries Edge, GM provoq, Hyundai I-Blue, Peugeot H2Origin ve Toyota FCHV-adv dahil olmak üzere farklı üreticiler tarafından çeşitli araç modelleri geliştirilmiştir. Çizelge 2.1’de tarihi sıralamaya göre elektrikli araç örnekleri ve özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Tarihi sıralamaya göre elektrikli araç örnekleri ve özellikleri (Anonim 2009)

Marka-Model	Üretim Yılı	Üretilen Miktar (Adet)	Maksimum Hız (km/h)	Menzil (km)
Baker Electric	1899–1915	-	23 km/h	80 km
Studebaker Electric	1902–1912	1 841	5–29 km/h	50-130 km
Detroit Electric	1907–1939	13 000	32 km/h	130 km
Henney Kilowatt	1958–1960	<100	97 km/h	-
Enfield 8000	1966–1976	112	64 km/h	40–90 km
Sebring-Vanguard Citicar	1974–1982	Tahmini 4 444	61 km/h	~65 km
Sinclair C5	1985	14 000	24 km/h	30 km
Škoda Favorit ELTRA 151L & 151	1992–1994	<1 100	80 km/h	80 km

Çizelge 2.1. Tarihi sıralamaya göre elektrikli araç örnekleri ve özellikleri (devam)

General Motors EV1	1996–2003	1 117	129 km/h	255 km
Chevrolet S10 EV	1997–1998	492	118 km/h	145 km
Honda EV Plus	1997–1999	~300	130+ km/h	130–175 km
Toyota RAV4 EV	1997–2002	1 249	125 km/h	140 km
Ford Ranger EV	1998–2002	1 500	-	120 km
TH!NK City	1999–2002	1 000+	90 km/h	85 km
REVAi	2001–2012	4 000+	72 km/h	80 km
ZAP Xebra	2006–2009	700+	65 km/h	40 km
Tesla Roadster	2008–2012	2 500	210 km/h	355 km
Seri Üretim Elektrikli Araçlar				
Mitsubishi i MiEV (Peugeot)	2009 – ...	~37 600 (Haziran 2016 itibariyle)	130 km/h	160 km
Nissan Leaf	2010–...	350 000 (Eylül 2018 itibariyle)	-	175 km
BYD e6	2010–...	34 862 (Çin'de Kasım 2016 itibariyle)	-	-
Renault Kangoo Z.E.	2011–...	25 205 (Kasım 2016 itibariyle)	-	-
Bolloré Bluecar	2011–...	5 524 (Fransa'da Temmuz 2016 itibariyle)	-	-

Çizelge 2.1. Tarihi sıralamaya göre elektrikli araç örnekleri ve özellikleri (devam)

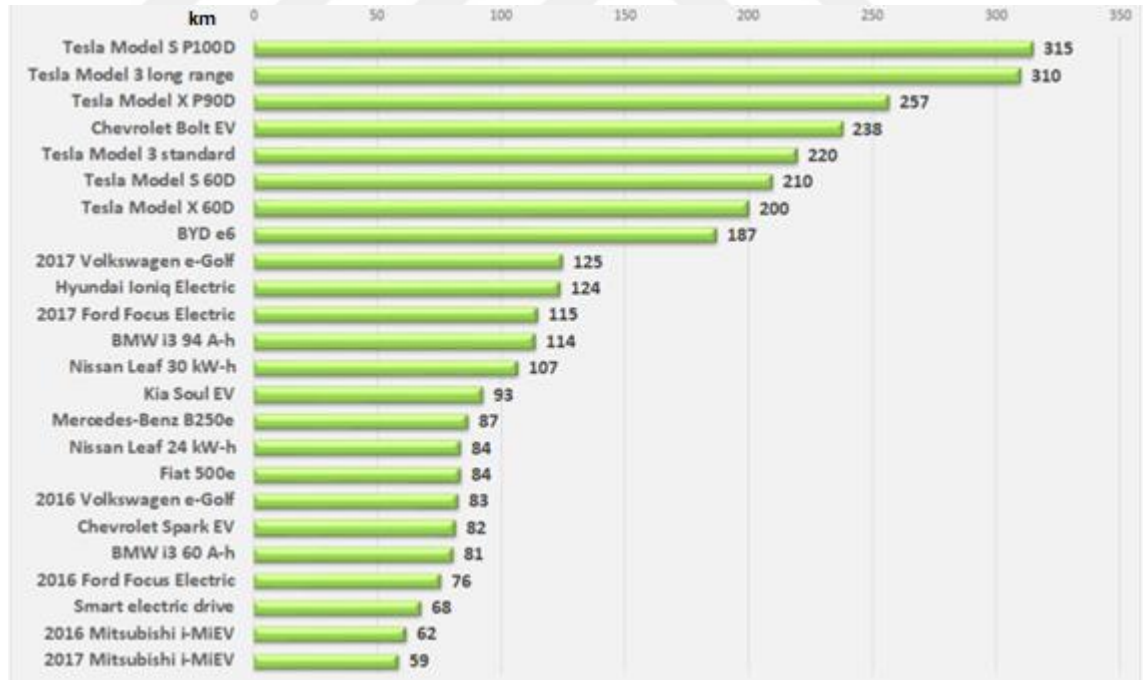
Ford Focus EV	2012-...	6 764 (Kasım 2016 itibariyle)	-	160 km
Smart ED	2012-...	9 000 (Kasım 2017 itibariyle)	-	-
Tesla Model S	2012-...	200 000 (Kasım 2017 itibariyle)	250 km/h (90+kWh sürümü için)	485 km
Renault Zoe	2013-...	61 205 (Aralık 2016 itibariyle)	-	-
Volkswagen e- Up!	2013-...	9 157 (Ekim 2015 itibariyle)	-	-
BMW i3	2013-...	65 500 (Aralık 2016 itibariyle)	-	130-160 km
Kia Soul EV	2014-...		-	150 km
Volkswagen e- Golf	2014-...	12 653 (Avrupa'da Ekim 2015 itibariyle) 3 980 (Amerika'da Kasım 2015 itibariyle)	-	130-190 km
Mercedes-Benz B-Class Electric Drive	2014-...	-	-	140 km
Tesla Model X	2015-...	25 524 (Aralık 2016 itibariyle)	-	237-289 km
BYD e5	2015-...	17 065 (Çin'de Aralık 2016 itibariyle)	-	
BYD Qin EV300	2016-...	10 656 (Çin'de Aralık 2016 itibariyle)	-	

Çizelge 2.1. Tarihi sıralamaya göre elektrikli araç örnekleri ve özellikleri (devam)

Tesla Model 3	2017–...	100 000 (Ekim 2018 itibariyle)	-	355 km (Standart sürüm için) 500 km (Uzun menzil sürüm için)
---------------	----------	--------------------------------------	---	--

Çizelge incelendiğinde yıllara göre elektrikli araçların menzil uzunluğu ve ulaştıkları maksimum hız değerlerinin önemli derecede arttığı gözlemlenmektedir.

Şekil 2.4’te 2016-2017 model tüm elektrikli araçların sahip oldukları menzil uzunlukları km cinsinden belirtilmiştir.



Şekil 2.4. 2016-2017 model tüm elektrikli araçların menzil uzunluğu (km cinsinden) (Anonim 2017)

İçten yanmalı motor teknolojisinde yakıt başına yüksek emisyonlar açığa çıktığı için, elektrikli motor teknolojisi motosiklet ve gemilerde tercih edilmeye başlanmıştır. İçten yanmalı motor teknolojisi, kentlerdeki nüfus yoğunluğunun önemli ölçüde artmasıyla birlikte bu teknolojinin çevreyi olumsuz etkileyerek (yanma sonucunda açığa çıkan karbondioksitin çevreye yayılması vb.) sağlık sorunlarına sebep olması bu teknolojinin dezavantajlarını arttırmaktadır. Pek çok kişi tarafından, Avrupa Komisyonu'nun 2050 yılına kadar şehirlerdeki içten yanmalı araçları ortadan kaldıracağı ve böylece tüm elektrikli ve yakıt pili ile çalışan araçların yakın gelecekte piyasaya hakim olmasını sağlayacağı beklenmektedir.

ABD Enerji Bakanlığı'nın 2015'te yayınladığı ABD'deki elektrikli araçların yıl ve model bazlı sayıları Çizelge 2.2. ve 2.3'ü'dür.

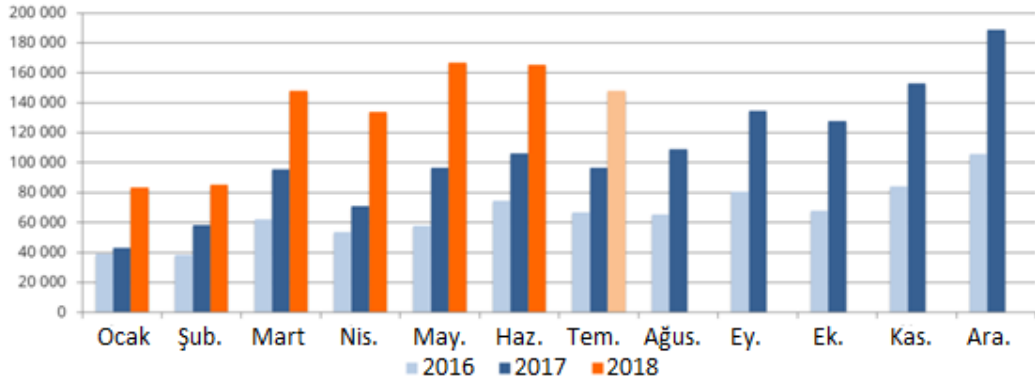
Çizelge 2.2. ABD'deki elektrikli araçların yıl ve marka bazlı sayıları (Anonim 2015)

Marka	Yıl									Toplam
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Azure Dynamics					2					2
BMW				1			1	1		3
BYD					1	1	1	1		4
Chevrolet							1	1	1	3
Coda Automotive					1	1				2
Fiat						1	1	1	1	4
Ford					1	1	1	1	1	5
Honda						1	1			2
Kia								1	1	2
Mercedes-Benz							1	1	1	3
Mini	1									1
Mitsubishi					1	1	1		1	4
Nissan				1	1	1	1	1	2	7
Scion						1				1
Smart				2		2	2	2	2	10
Tesla					1	3	3	6	2	15
Toyota					1	1	1			3
Volkswagen									1	1
Toplam	1	0	0	4	9	14	15	16	13	72

Çizelge 2.3. ABD'deki yakıt pilli araçların yıl ve marka bazlı sayıları (Anonim 2015)

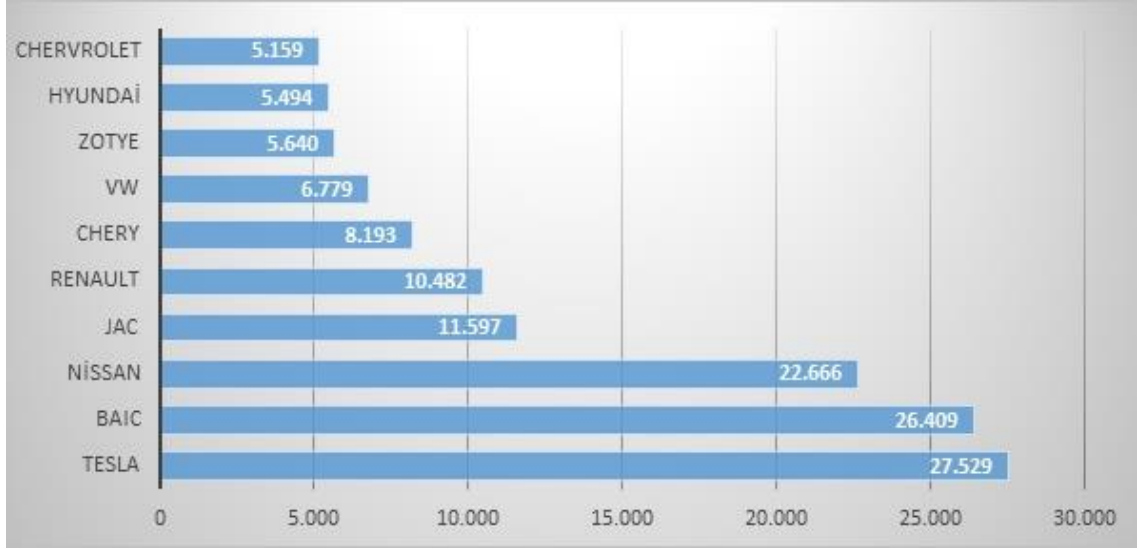
Marka	Yıl							Toplam
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Honda	1				1			2
Hyundai						1	1	2
Mercedes-Benz		1	1					2
Toyota							1	1
Toplam	1	1	1		1	1	2	7

Şekil 2.5'te 2018 Temmuz verileri itibari ile dünya genelinde yıllara göre elektrikli araçların satış miktarları gösterilmiştir.



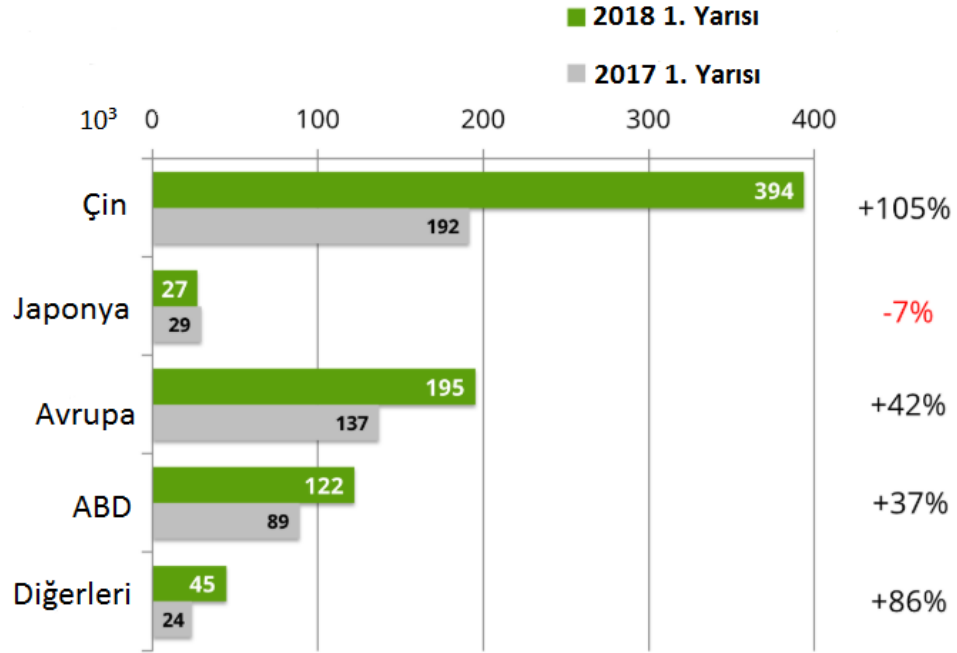
Şekil 2.5. Yıllara göre dünyadaki elektrikli araç satış sayıları (Anonim 2018a)

Şekil incelendiğinde, 2016-2017 yılları arasında gerçekleşen satış miktarındaki artışa göre, 2017-2018 yılları arasında satış miktarında daha fazla artış gerçekleşmiştir. Şekil 2.6'da dünya genelinde 2018 1. çeyreğinde gerçekleşen elektrikli araç satış miktarları gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Dünya genelindeki 2018 1. çeyreğine ait elektrikli araç satışları (Anonim 2018b)

Şekil incelendiğinde, satışların en çok Tesla firmasına ait olduğu görülmektedir. Şekil 2.7'de yıllara göre bölgesel olarak elektrikli araç satışları ve büyüme oranları gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Yıllara göre elektrikli araç satışı ve satışın büyüme oranları (Anonim 2018a)

En çok büyümenin Çin'de gerçekleştiği Şekil 2.7'ye bakıldığında anlaşılmaktadır. Japonya'da ise bir önceki yıla oranla belirtilen dönemde satış miktarında azalma gerçekleşmiştir.

2.2.2. Elektrikli araçların Türkiye'deki gelişmeleri

Elektrikli araç Ar-Ge projelerinde finansman desteği, tüketim ve araç vergilerindeki azalma ve bununla ilişkili altyapı oluşturma çabalarının artması, birçok özel şirketin, elektrikli batarya ve motor ile ilgili araştırma yapmaya başlamasını sağladı, birçok özel şirketin elektrikli batarya ve motor, emisyon azaltma yöntemleri ve araç sistemi entegrasyonu konusunda yurt içinde araştırma yapmaya başlamasını teşvik etti. Bunlar arasında, 2009 yılında, Türk otobüs üreticisi TEMSA, standart konvansiyonel otobüslere kıyasla %25 yakıt azaltma ve daha düşük CO₂ emisyonu sağlayan bir dizi hibrit güç aktarma sistemine sahip Avenue Hybrid'i piyasaya sürdü. Aynı yıl Otokar, hibrit kent otobüsü Doruk 160LE Hibra'nın elektrik bataryalı ve dizel motorlu, yakıt tüketiminde %20 azalma olduğunu iddia ettiği konseptini duyurdu.

Kasım 2009'da TOFAŞ, Türkiye'de seri üretim için tasarlanan ve geliştirilen elektrikli araç olan Doblo EV'nin elektrikli versiyonunu geliştirmeye başladı ve 2010 yılında prototipini tanıttı. Araç 105 kW maksimum güç çıkışına sahip ve tek bir şarjla 150 km yol alabilmektedir. Ayrıca rejeneratif frenleme (enerji tasarruflu frenleme) özelliğine sahiptir. Araç yaklaşık 7 saat içinde şarj edilebilmektedir, ancak bu süre hızlı şarj ile 1 saate düşürülebilmektedir (Dinçer ve ark. 2017).

Fluence Z.E.'nin 2010 yılında yalnızca Oyak Renault Bursa Fabrikasında üretimine başlanmıştır. Araç, 22 kWh Li-ion batarya, 185 km'lik menzil ve 135 km/saate kadar hız sağlayan 70 kW elektrik motoru kullanmaktadır. Evdeki bir priz kullanılarak 10-12 saatte şarj edilebilir, ancak daha hızlı şarj süreleri için hızlı şarj istasyonlarıyla da uyumludur.

Ancak, Fluence Z.E'nin Türkiye ve Avrupa'daki düşük satışları nedeniyle üretimini 2013 yılında durdurulmuştur (Dinçer ve ark. 2017).

2013 yılının başında, Derindere Motor Taşıtlar (DMA), Türkiye'deki elektrikli taşıtlar için onay sertifikasına sahip ilk Türk aracı olan elektrikli aracı DMA All Electric'i piyasaya sürdü ve ilk test sürüşlerini yaptı. Aracın, 220V'de 8 saatte şarj edilebilmesi, Avrupa Standart tip 2 şarj istasyonlarıyla uyumlu olması ve bir şarjla yaklaşık 280 km yol alması planlanmaktadır. Operasyonel filolar için hem satın alma hem de kiralama seçenekleriyle gelmesi düşünülmektedir. Firma her ay bu araçtan 100 adet üretmeyi planlamaktadır. Motor ve araçlar için batarya şu anda ithal edilmektedir, ancak elektronik kontrol ünitesi (ECU) Türkiye'de geliştirilmiştir. Araç, 40 kWh Li-ion bataryaya ve 62 kW elektrik motoruna (225–325Nm tork ile) sahiptir ve 3 yıl 100 000 km garantilidir (Dinçer ve ark. 2017).

2013'ün ortalarında Malkoçlar Otomotiv, Türkiye'de yapılan tüm Ar-Ge ve imalat ile (elektrik motoru hariç) 100 km yol alabilen elektrikli araç geliştirdi. Araç, biri 2 koltuklu diğeri 4 koltuklu olmak üzere 2 versiyona sahiptir ve temel olarak şehir içi seyahatleri ve ticari kullanım için tasarlanmıştır. Plastik ve alüminyum konstrüksiyona sahiptir. Yaklaşık 800 kg ağırlığında ve maksimum 150 km menzille 130 km / saate hıza sahip olabilmektedir. Normal prizden şarj işlemi yaklaşık 6-7 saat, hızlı şarj seçeneği ile 45 dakika sürmektedir (Dinçer ve ark. 2017).

2014 yılında kurulan GEN Otomobil tarafından, tasarlanan, prototip üretimi devam eden ve Türkiye'de üretilen elektrikli otomobil TM-480 İstanbul Lütü Kırdar Kongre Salonu'nda gerçekleşen 3'üncü Ar-Ge ve İnovasyon Zirvesi'nde 17-18 Ekim 2018 tarihinde sergilendi. Motor gücü 80 kW, maksimum hız 160 km/saat, tek oranlı redüktör ile 1 ileri ve 1 geri vites, menzil 400 km ve şarj süresi şehir şebekesi ile 8 saat, hızlı şarj ile 1 saat gibi özelliklere sahiptir. 6,5 milyon dolar Ar-Ge harcaması yapılan aracın seri üretiminin başlangıcı, sertifikasyon ve prosedür işlemleri nedeniyle 2-3 yılı bulabileceği belirtilmektedir (Anonim 2018c).

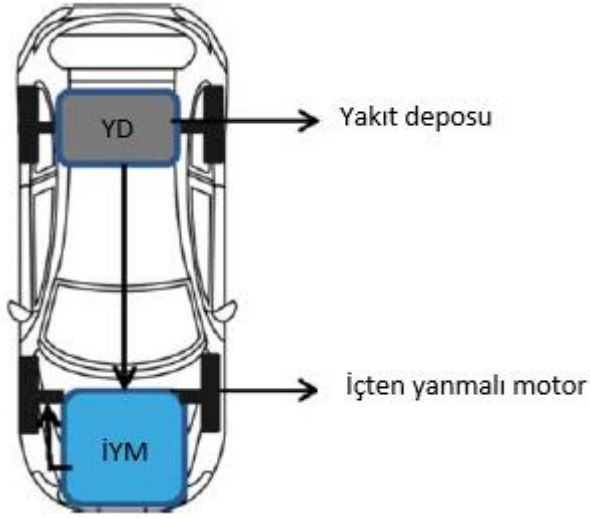
Son olarak, bilim ve teknoloji yüksek kurulu gündemi ve 2023 ulusal teknoloji hedefleri doğrultusunda bir Türk otomobil markası kurulması ve ilk ürünlerinin sanayileşmesi için Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı önderliğinde TÜBİTAK MAM, 2015 yılı başında bu konu hakkında gerekli adımlar atmıştır. Bu bağlamda TÜBİTAK MAM, 2020'den önce ilk araçları Türkiye pazarına tanıtmak için araç tasarım, mühendislik, test ve belgelendirme çalışmalarının yanı sıra ilgili iş gücünü ve altyapısını genişletmek için çalışmaktadır (Dinçer ve ark. 2017).

2.3. Araç Çeşitleri

Elektrikli araçlar ve alt sistemleri hakkında daha ayrıntılı bilgi verebilmek için ilk olarak, farklı araç çeşitleri, çeşitlerinin özelliklerinin anlatılması ve anlaşılması gerekmektedir.

2.3.1 İçten yanmalı motorlu araçlar (Konvansiyonel araçlar)

Konvansiyonel araçlar olarak da tanımlanan içten yanmalı motorlu araçlar, araçta itiş ve tekerleklerde dönüş sağlamak için kimyasal enerjiyi, ısı ve kinetik enerjisine dönüştürür. İçten yanmalı motorlu araçlar, nispeten uzun sürüş mesafelerine (menzil) ve yakıt takviyesinin kısa sürede gerçekleşmesi gibi özelliklere sahiptir fakat yakıt tüketimi ve buna bağlı olarak maliyet ve çevre etkilerinden dolayı olumsuz durumlarla karşı karşıyadır. Şekil 2.8'de içten yanmalı motorlu aracın sahip olduğu genel araç yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.8. İçten yanmalı motorlu aracın genel yapısı (Dinçer ve ark. 2017)

Şekle bakıldığında, içten motorlu araçlardaki motor ve yakıt deposunun nispeten büyük olduğu anlaşılmaktadır.

İçten yanmalı motorlu araçların temel avantajları, bu yazıyı takip eden listede sıralanmıştır.

- Araçlar, yakıt deposunda yüksek hacimde sıvı yakıt (genellikle benzin ve dizel) depolayabilir.
- Kullanılan yakıt, yakıt takviyesi olmadan birkaç yüz kilometre seyahat etmek için yeterli yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir.
- Yakıt takviyesi (dolum) kısa sürede gerçekleşmektedir.

İçten yanmalı motorlu araçların bazı dezavantajları, bu yazıyı takip eden listede sıralanmıştır.

- Araçta itiş gücü elde etmek için kullanılan yakıt enerjisinin %20'si ile verim elde edilmektedir.

- Geri kalan enerji motorda, aktarma organlarında ve rölantide çalışmada kaybolmaktadır.
- Genellikle hidrokarbon yakıt kullanılmasından dolayı, çevre kirliliğine ve küresel ısınmaya önemli derecede etki etmektedir.

İçten yanmalı motorlu araçlar, sistemi karmaşık ve bakımı zor (sürekli yağ değişimi, periyodik bakımları gb.) hale getiren ve sistem verimini önemli ölçüde düşüren çok fazla hareketli parçaya sahiptir. Ayrıca içten yanmalı motorlu araçlar, optimum yakıt-hava karışımını sağlayan yakıt sistemine, zamanında yanmayı gerçekleştiren ateşleme sistemine, güvenli bir şekilde çalışmak için soğutma sistemine, sürtünme ve aşınmayı azaltmak için yağlama sistemine ve egzoz ürünlerinin atılması için egzoz sistemine sahip olması gerekmektedir.

Geçtiğimiz yıllarda içten yanmalı motorlu araçlarda önemli ilerlemeler kaydedilmiş olsa da, dengesiz ve sürekli artan fiyatlara sahip olan, siyasi ve sosyal karışıklığa sebep olan ve çevre kirliliğine ve küresel ısınmaya neden olan fosil yakıtlara ihtiyaç duymaktadır.

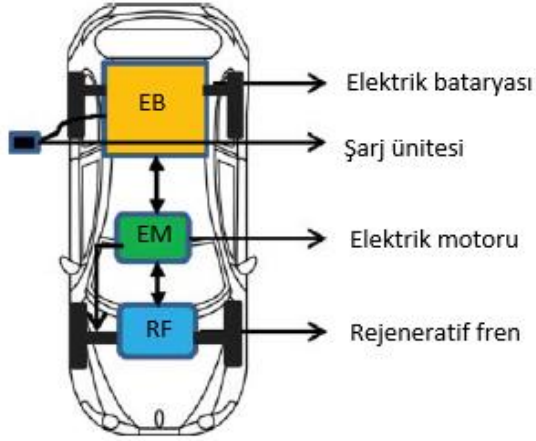
Son yıllarda, olumsuz çevresel etkilerini hafifleten gıda ürünü gibi biyolojik kaynaklardan elde edilen alkol yakıtı dahil olmak üzere alternatif yakıtların kullanımında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Fakat bu kaynaklar, yanma sürecinin yapısı nedeniyle verimsiz hale gelmektedir.

2.3.2. Elektrikli araçlar

Elektrikli araçlar, aracı hareket ettirmek için sadece elektrik gücünü kullanırlar. Araç sadece bataryalar veya diğer elektrik enerjisi kaynakları ile çalıştırıldığı için, çalışma sırasında hemen hemen sıfır emisyon elde edilebilir. Bununla birlikte enerjinin çevresel etkisi, enerji üretim yöntemine önemli ölçüde bağlıdır. Bu nedenle çevresel etkinin çok gerçekçi bir ölçüsünü elde etmek için genellikle elde edilen enerjinin ilk anından son anına kadar derinlemesine bir analize ihtiyacı vardır. Sağlıklı bir değerlendirme yapabilmek için, bu noktada arabanın tükettiği enerjiyi, enerjinin üretildiği andan itibaren takip edilmesi gerekmektedir. Yani elektrikli araç hareket halinde sıfır emisyon sağlıyor

olsa da, aracın kullandığı enerjinin üretimi sırasında üretilen emisyon miktarına da dikkat edilmesi gerekmektedir (Çetin 2016).

Elektrikli araçlar, bir içten yanmalı motor ve buna karşılık gelen mekanik veya otomatik vites kutusu içermedikleri için, mekanik dişli kutuları ortadan kaldırılabilir, bu da aracı daha basit, güvenilir ve daha verimli hale getirebilmektedir. Böylelikle elektrikli araçlar içten yanmalı motorlu araçların %30'luk verimliliğine kıyasla %90'ın üzerinde (bataryada) verim elde edebilirler. Ayrıca, çeşitli kaynaklardan üretilebilecek elektriği kullanma avantajlarına da sahiptirler. Birçok ülkede enerji portföyü, çeşitli yenilenebilir enerji türleri (özellikle güneş ve rüzgar) ile daha fazla çeşitlilik kazanırken, tüm elektrikli araçların faydaları gelecekte daha da belirginleşecektir. Şekil 2.9'da elektrikli aracın sahip olduğu genel araç yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Elektrikli aracın genel yapısı (Dinçer ve ark. 2017)

Şekle bakıldığında, elektrikli araçların kıyasla daha büyük elektrikli motora sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Tüm elektrikli araçların temel avantajları, bu yazıyı takip eden listede sıralanmıştır.

- Araç, bataryadan güç alan verimli bir elektrik motoru (motorları) kullanılarak tahrik edilir.

- Rejeneratif frenleme, frenler kullanıldığında enerjiyi bataryaya geri beslemek için kullanılır.

Tüm elektrikli araçların bazı dezavantajları, bu yazıyı takip eden listede sıralanmıştır.

- Enerji kaynağı sadece bataryalar olduğu için, bataryalar hibrit araçtakilerle kıyaslandığında oldukça büyük boyutlara sahiptir.
- İçten yanmalı motorlu araçlarla kıyaslandığında, daha kısa menzile sahiptirler.
- Uzun süren şarj sürelerine sahiptirler. Örneğin seviye 2'den tam doluma kadar süren şarj süresi, 7 saat olabilmektedir.

Ayrıca, benzinin özgül enerjisi elektrik bataryalarına kıyasla inanılmaz derecede yüksektir. Bu sebepten dolayı, aynı enerji seviyelerini sağlamak için, batarya paketi önemli ölçüde büyük olur, bu da araca büyük ölçüde ağırlık ve maliyet getirir. Açıkçası elektrikli araçlar içten yanmalı motorlu araçlarla kıyaslandığında, bu teknolojinin temel engelleri olan sınırlı menzil ve daha yüksek maliyet gibi özelliklere sahip olması, elektrikli araçların araç pazarına girdiklerinde dezavantajlarından olmuştur. Fakat bu sorunların üstesinden gelmek için bataryalar, süper kapasitörler ve yakıt pilleri ile ilgili kapasitelerin artırılması için önemli araştırmalar gerçekleştirilmektedir.

2.3.3. Hibrit araçlar

Konvansiyonel itme sistemleri ve enerji depolama sistemlerinin birleşiminden oluşan hibrit (hibrit elektrikli) araçlar, araçta hareketi sağlamak için içten yanmalı motor ve elektrik motorunu güç kaynağı olarak kullanır. Bu yüzden de içten yanmalı motorlu araçlar ile elektrikli araçlar arasında önemli bir köprü görevi görmektedir.

Hibrit araçlar, fosil yakıt kullandığı için konvansiyonel araçlara daha yakın bir araç grubudur. Elektrikli motor ve batarya, genellikle rölantiden kaçınarak ve ekstra güç sağlayarak motor verimliliğini korumak için kullanılır. Böylece hibrit elektrikli araçlar,

içten yanmalı motorlu araçlar ile kıyaslandığında geliştirilmiş yakıt ekonomisi ve elektrikli araçlar ile kıyaslandığında uzun menzil özelliklerine sahiptir.

Hibrit araçların temel avantajları, bu yazıyı takip eden listede sıralanmıştır.

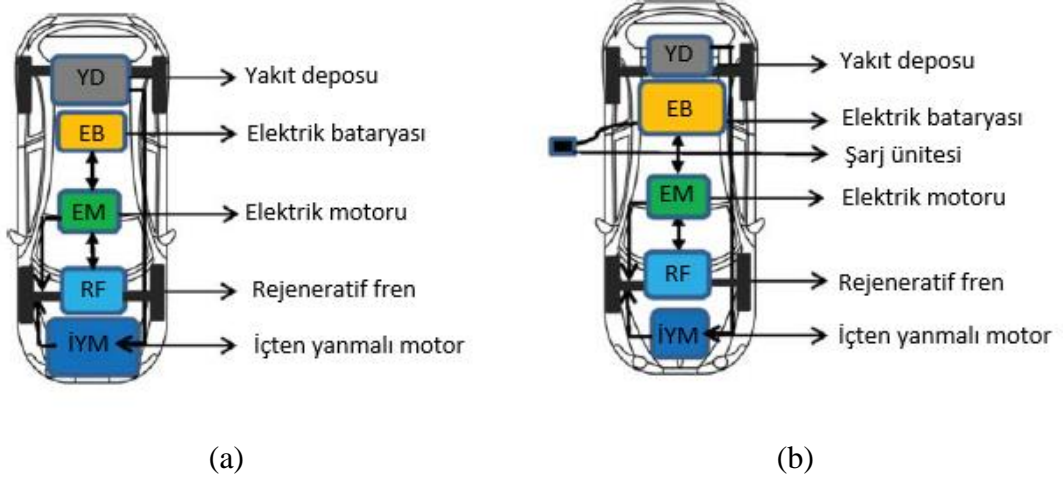
- Araç, hem elektrikli motor-batarya hem de içten yanmalı motor-yakıt deposuna sahiptir.
- Hem elektrik motor hem de içten yanmalı motor tekerleklerde tork oluşturmaktadır.
- %15–40 arasında verimlilik kazanımları elde edilebilir.

Hibrit araçların bazı dezavantajları, bu yazıyı takip eden listede sıralanmıştır.

- Araç büyük ölçüde içten yanmalı motora bağlıdır.
- Elektrikli sürüş mesafesi 40-100km ile sınırlıdır.
- Konvansiyonel araçlardan (içten yanmalı motorlu araçlar) daha maliyetlidir.

Şarj edilebilir hibrit araçlar (plug-in hybrid electric vehicle (PHEV)), pil paketinin büyüklüğüne bağlı olarak elektrikli araçlara daha yakındır, ancak bir prize takılarak yeniden şarj edilebildiklerinden elektrikli araçlara göre daha uzun sürüş menziline sahip olabilirler. Toyota Prius'un piyasadaki başarısı, şarj edilebilir hibrit araçların konvansiyonel araçlara gerçek bir alternatif olduğunu göstermektedir.

Elektriğin birleşimi ile elde edilen enerji üretimiyle ve uygun sürüş uygulamalarıyla hem hibrit araçlar hem de şarj edilebilir hibrit araçlar, konvansiyonel araçlardan çok daha az benzin kullanabilir ve daha az egzoz emisyonu üretebilirler. Şekil 2.10'da hibrit araçların sahip olduğu genel araç yapıları gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Hibrit (a) ve şarj edilebilir hibrit araçların (b) genel yapısı (Dinçer ve ark. 2017)

Şekle bakıldığında, hibrit araçlar şarj edilebilir hibrit araçlar ile kıyaslandığında, hibrit araçların kıyasla daha büyük yakıt deposuna ve içten yanmalı motora sahip olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, şarj edilebilir hibrit araçların da kıyasla daha büyük elektrik bataryasına sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Şarj edilebilir hibrit araçların temel avantajları, bu yazıyı takip eden listede sıralanmıştır.

- Bataryalar elektrik şebekesine takılarak şarj edilebilir.
- Araç kısa mesafeler arasında gidip gelmek için idealdir.
- Elektrik modunda benzin tüketimi veya emisyon yoktur.

Şarj edilebilir hibrit araçların bazı dezavantajları, bu yazıyı takip eden listede sıralanmıştır.

- Araçta kullanılan bataryalar, hibrit araçta kullanılan bataryalardan daha büyük ve daha pahalıdır.
- Şarj süreleri uzun olabilmektedir. Örneğin seviye 2'den tam doluma kadar süren şarj süresi, 4 saat olabilmektedir

Üstelik, her devirde tam kapasiteleri çekilebilen elektrikli araçlardan farklı olarak, bir şarj edilebilir elektrikli bataryasının şarj / deşarj akım dalgalanmaları ile baş edebilmek için nominal çalışma seviyesinin yaklaşık %10'u (şarjın %50'si) olan bir kapasite çekişi vardır (Dinçer ve ark. 2017).

2.3.4. Yakıt pili araçları

Yakıt hücresi araçları, yakıt hücresinin hidrojen kullanarak elde ettiği elektrikle elektrik jeneratörü olarak görev aldığı bir dizi hibrit araç olarak düşünülebilir. Yakıt hücresi tarafından üretilen elektrik, elektrik motoruna güç vermek için kullanılabilir aynı zamanda enerji depolama sisteminde (batarya, ultrakapasitör, volan gibi) enerjiyi saklamak için kullanılabilir (Chan ve ark. 2010). Böylelikle otomobil kendi enerjisini kendi üretmektedir ve menzil gibi problemlerin bu teknoloji ile ortadan kalkacağı düşünülmektedir. Şekil 2.11'de sodyum borohidrit kullanan Tübitak Marmara Araştırma Merkezi'nin yakıt pili aracı gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Tübitak MAM yakıt pili aracı

2.4. Enerji Depolama Sistemleri

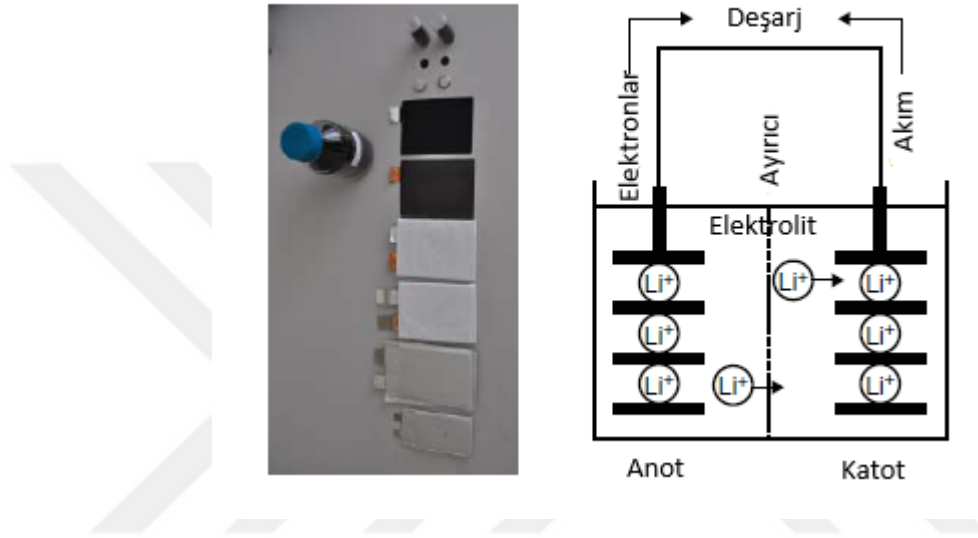
Çeşitli tipte araç konfigürasyonları ve mimarileri incelendiğinde, söz konusu uygulama için uygun enerji depolama sisteminin kullanımı, elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar için ana seçim kriterlerinden biri haline gelmektedir. Birden fazla enerji depolama sistemi bulunmaktadır. Bunlar: bataryalar, süper kapasitörler, volanlar ve yakıt pilleridir.

2.4.1. Bataryalar

Bataryalar, genellikle depolanmış kimyasal enerjiyi yüksek verimlilikte ve çalışma aşamasında herhangi bir gaz emisyonu olmaksızın elektrik enerjisine dönüştüren, çok sayıda elektrokimyasal hücreyi barındıran bir taşınabilir depolama cihazıdır. Bataryalarda, kimyasal tepkimeler katı madde kütlesi boyunca gerçekleşir. Böylece malzeme, pratik bir şarj edilebilir bataryayı sağlamak için yüzlerce / binlerce döngü ile malzemede reaksiyon türlerinin içeri girmesine ve çıkarılmasına izin verecek şekilde tasarlanmalıdır (Whittingham 2012). Geçtiğimiz yıllarda birkaç batarya kimyası geliştirilmiştir. Bununla birlikte, mevcut olanlar arasında, Lityum-iyon (li-ion) kimyası şu anda geniş bir uygulama yelpazesinde pazara sahiptir. Bataryaların, küçük ve büyük silindirik, prizmatik ve dikdörtgen şeklinde olmak üzere 4 farklı şekli bulunmaktadır. Silindirik hücreler, yüksek hacimlerde ve yüksek kalitede üretilip, şekillerini koruyabilirken, diğer şekiller genişlemesini korumak için genel batarya muhafazasının gerektirmektedir. Ayrıca, silindir hacimleri sağlam ve yapısal olarak şok ve titreşime karşı dayanıklı olma avantajına sahiptir.

Prizmatik hücreler ise yarı sert plastik muhafaza ile kaplanmıştır ve daha iyi hacim verimine sahiptir. Bunlar genellikle civata ile bağlanır ve değişimleri kolaydır, bataryanın uçlarında tutma plakaları bulunmaktadır.

Yumuşak dikdörtgen paketler, ekstra paketleme olmadan yüksek enerji / güç yoğunluklarına ve genellikle sıkıştırılmış, kaynaklanmış veya lehimlenmiş uçlara sahiptirler. Prizmatik hücreler gibi, muhafaza ve zayıf dayanıklılığını artırmak için koruyucu kılıfa ihtiyaçları vardır. Bu da hacim ve ağırlık artışına sebep olmaktadır (Pesaran ve ark. 2009). Şekil 2.12’de batarya tipleri ile anot, katot ve elektronlar gösterilmektedir.



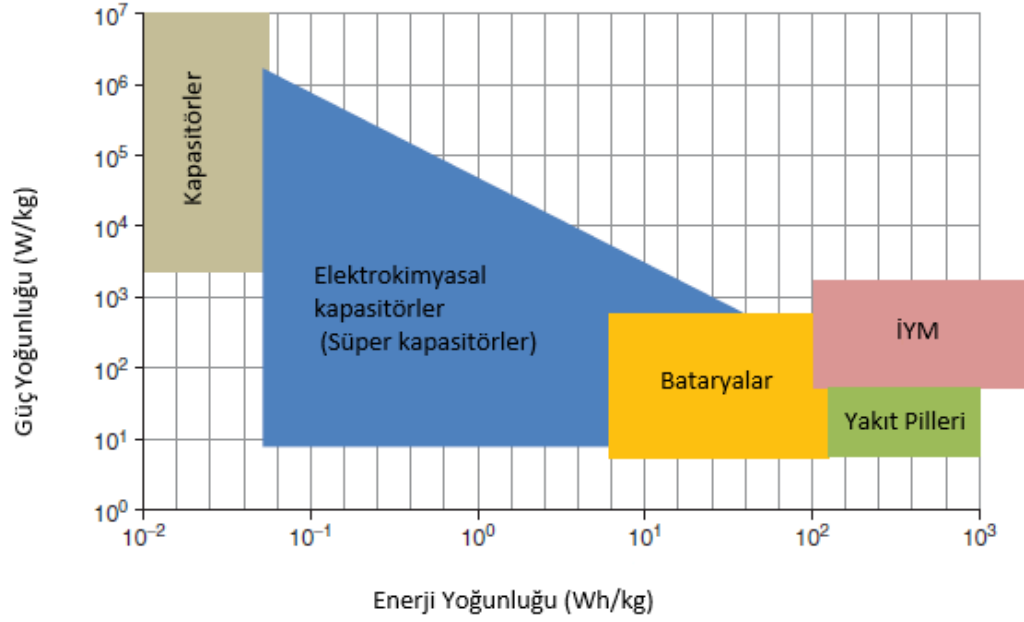
Şekil 2.12. Batarya tipleri ile anot, katot ve elektronlar (Dinçer ve ark. 2017)

Bataryalar, hibrit araçları ve elektrikli araçları nispeten verimli bir şekilde çalıştırmak için en umut verici seçeneği sunmaktadır (Dinçer ve ark. 2017).

Bataryaların ömür kavramını ay veya yıl olarak tanımlamaktan ziyade, çevrim ömrü olarak ifade etmek daha doğru olmaktadır. Bir şarj (doldurma) ve bunu takiben yapılacak bir deşarj (boşaltma) işleminin karşılığında bir çevrim denilmektedir. Tek kullanımlık veya diğer bir ifadeyle şarj edilemeyen türdeki bataryaların çevrim ömrünün bir olduğunu rahatlıkla söyleyebiliriz. Belirtilmesi gereken diğer bir husus, tanımlanan çevrim sayısı kavramında bataryaların tam şarjlı durumdan tamamen deşarj edilmiş duruma geçmeleri esas tutulmuştur. Eğer deşarj işlemleri sürekli olarak tam yapılmayıp kısmi olarak gerçekleştirilirse, çevrim ömrü çok daha uzun olacaktır.

Bataryaların en önemli özellikleri, amper-saat (Ah) cinsinden ölçülen batarya kapasitesine (maksimum deşarj akımı ile orantılıdır), kilowatt-saat (kWh)cinsinden ölçülen bataryada depolanan enerjiye (deşarj sırasındaki kapasite x ortalama voltaj) ve kilowatt (kW) cinsinden ölçülen güce (gerilim x akım) bağlıdır. Maksimum deşarj akımı (tipik olarak C indeksi ile gösterilir) pilin ne kadar hızlı tükendiğini ve pillerin kimyasal reaksiyonlardan ve üretilen ısıdan etkilendiğini gösterir. Pillerdeki bir diğer önemli parametre, bataryada bulunan şarjın yüzdesini gösteren şarj durumudur (the state of charge (SOC)) (Tie and Tan 2013). Bataryalar, şu anda elektrikli ve hibrit araçlar için en iyi verimde yüksek ve ortalama gücü sağlayabilen en çok kullanılan teknolojidir. Fakat bataryalar düşük seviyede özgül enerji, enerji yoğunluğu ve yakıt ikmali / doldurma oranlarına (fosil yakıtlara kıyasla) sahip oldukları için bu özellikler sürüş menzilini kısaltmakta ve boyut ile maliyeti arttırmaktadır. Bu sebepler bataryaların daha fazla yaygın olmasına engel olabilmektedir.

Normal süper kapasitörler ortalama olarak kilogram başına 8-10 watt saatlik (Wh/kg) enerji yoğunluğuna sahiptir. Laboratuvar ortamında grafenden üretilen süper kapasitörlerin enerji yoğunluğu ise en fazla 130 Wh/kg'ye ulaşmaktadır. Bu kapasitörler, enerji yoğunluğu 200 Wh/kg olan lityum-iyon bataryalara göre çok daha az enerji depolayabilmektedir(Anonim 2016). Şekil 2.13'te enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğuna göre enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğuna göre enerji depolama sistemlerinin kıyaslanması (Dinçer ve ark. 2017)

Şekildeki İYM diye kısaltılan ifade, içten yanmalı motorların kısaltılmasıdır. Ayrıca bu kısaltma, kısaltmalar bölümünde de yer almaktadır.

Şekil incelendiğinde, güç yoğunluğunun maksimum olduğu bölge kapasitörlere aitken, enerji yoğunluğunun maksimum olduğu bölge içten yanmalı motorlara ve yakıt pillerine aittir. Ayrıca, elektrikli ve hibrit araç uygulamalarındaki bataryalardan istenilen yaygın teknik taleplerin bazıları; yüksek deşarj gücü, yüksek batarya kapasitesine ve çevrim kapasitesi, iyi şarj kabiliyeti ve yüksek güç kapasitesi şeklindedir.

2.4.2. Süper kapasitörler

Elektrik enerjisi kondansatörlerde depolanabilir. Kondansatörler enerjiyi pozitif ve negatif elektrostatik yüklerin ayrışmasıyla depo eden cihazlardır. Kapasitörler, iki tane iletken plaka ile bunları ayıran ve dielektrik olarak adlandırılan yalıtkanlardan oluşmaktadır. Dielektrik malzeme iki levha arasında ark oluşmasını önleyerek daha fazla şarj yapılmasına yardım eder. Klasik kapasitörlerin güç yoğunlukları çok yüksektir (yaklaşık olarak 10^{12} W/m³). Fakat enerji yoğunlukları çok düşüktür (yaklaşık olarak 5 Wh/m³). Klasik kapasitörler, genel olarak elektrolitik kapasitörler olarak adlandırılırlar. Süperkapasitörler (ultrakapasitör diye de adlandırılır) ise klasik kapasitörlerin geliştirilmiş olanlarıdır. Bu kondansatörlerin güç yoğunlukları 10^6 W/m³ ve enerji yoğunlukları 10^4 Wh/m³ değerindedir. Enerji yoğunlukları az fakat deşarj süreleri hızlı ve çevrim ömrü daha fazladır. Ancak kapasitörlerin boyut problemleri vardır. Kapasitörlerin kapasitesi ve dielektrik malzeme arasında lineer bir bağlantı vardır. Bu yüzden büyük kapasite gerekli olduğunda zorunlu olarak dielektrik malzeme de büyük olmak durumundadır. Süperkapasitörler yapıldıktan sonra çok büyük kapasiteler gayet küçük boyutlardaki kapasitörlerle yüksek enerji depolamaya olanak sağlamıştır (Schaber ve ark. 2004).

2.4.3. Volanlar

Volanların kullanımı ile kinetik enerji depolanması yüzyıllardır uygulanmakta olan bilinen en eski yöntemlerden biridir. Volan, mekanik sistemlerde darbeli çalışan yüklerde tahrik gücünün fazla olduğu periyotlarda fazla enerjiyi üzerine alır, yük talebinin arttığı periyotlarda bu enerjiyi yüke aktararak yük dengelemesi yapar. Özellikle doğrusal hareketin dönme hareketine çevrildiği mekanik tahrik sistemleri için ideal bir çözümdür. Bu kapsamda volan, mekanik bir batarya görevi üstlenmektedir. Günümüzde önemli bir teknik haline gelmesinin nedeni ise yüksek dayanımlı kompozit malzemelerin ve düşük kayıplı rulmanların geliştirilmiş olmalarıdır. İlk uygulamalarda doğrudan mekanik enerjiyi depolayıp, ihtiyaç halinde kinetik enerji olarak vermekteyken, günümüzde gelişen teknoloji sayesinde elektrik – mekanik dönüşümlerinin yapıldığı uygulamalar ile

verimleri artarak kullanım alanları gittikçe yaygınlaşmaktadır. İlk kullanıma girdiği şekliyle, mekanik – mekanik dönüşümleri sadece döner bir demir kütesinden ibaret iken, günümüzde mekanik – elektrik dönüşümlerde daha hafif malzemelerden yapılmış döner küteden oluşurlar. Girişinde enerjiyi elektrik enerjisi olarak alır ve motor çalışmasıyla kinetik enerjiye dönüştürür. İhtiyaç halinde bu enerjiyi jeneratör çalışmayla tekrar elektrik enerjisi şeklinde çıkış olarak verir (Kozak ve Kozak 2012). Şekil 2.14’de modern yüksek hızlı volan sistemi gösterilmiştir.



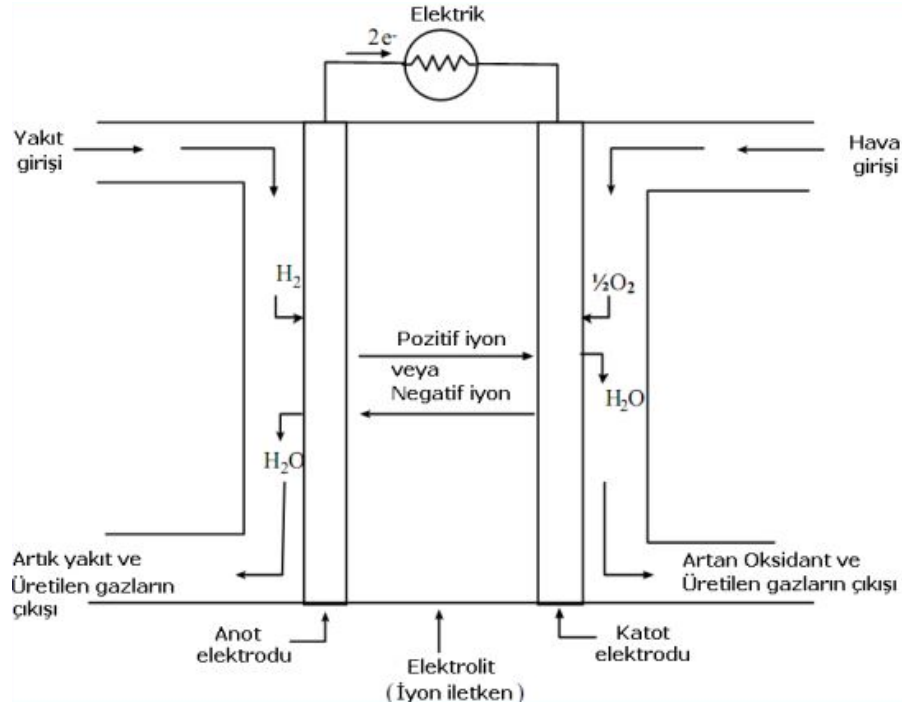
Şekil 2.14. Modern yüksek hızlı volan sistemi (Kozak ve Kozak 2012)

2.4.4. Yakıt pilleri

İlk yakıt pili çalışmaları 1838 yılında Sir William Grove tarafından H_2-O_2 pili üzerinde yapılmıştır. Mazisi oldukça eski yıllara dayanan yakıt pili, ilk kez 1958 yılında NASA’nın uzay programında Apollo, Gemini ve Space Shuttle uzay gemilerinde kullanıldığı bilinmektedir.

Yakıt pili, sisteme sağlanan uygun bir yakıt ve oksitleyicinin elektrokimyasal reaksiyonu ile elektrik enerjisi üreten bir sistemdir. Yakıt ile havanın elektrokimyasal tepkimesi sonucu yakıt kimyasal enerjisini, doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmeye yarar. Reaksiyon sonucu saf su ve ısı açığa çıkar. Elektrolizin ters reaksiyonu olarak da

tanımlanabilecek olan yakıt pili reaksiyonu sonrası doğru akım (DC) formunda elektrik üretilir. Şekil 2.15'te bir yakıt pilinin genel yapısı ve işleyişi gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Yakıt pilinin genel yapısı (Anonim 2013)

Temel olarak bir yakıt pili, elektrolit ve bunun her bir yüzeyi ile temas halinde bulunan geçirgen-gözenekli yapıda olan anot ve katot elektrotlardan oluşur. Yani elektrotlar geçirgen ve gözenekli (poröz) yapıdadır ve elektrotların arasında elektrolit yer alır. Yakıt pilinin anot (negatif) kutbuna gaz yakıt, katot (pozitif) kutbuna ise oksitleyici (hava ya da oksijen) gönderilir. Gönderilen bu yakıt ve havanın elektrokimyasal reaksiyonu sonucunda anot ve katot arasında oluşan potansiyel farkı bir elektron akışını ve elektriksel gerilimi meydana getirir. Reaksiyon sonrası ısı, saf su ve karbon içerikli bir yakıt kullanılıyorsa ilave olarak karbondioksit açığa çıkar.

Yakıt pillerinin temel avantajı, bu yazıyı takip eden listede sıralanmıştır.

- Yakıt pillerinin yüksek verimlilikleri dışında, hareketli parça içermeme, sessiz, modüler, kompakt yapılı, geniş yakıt yelpaze ile çalışabilme (doğal gaz, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), Metanol, Etanol), düşük emisyon, yüksek

güvenilirlik, kolay kurulum ve hızlı enerji dönüşümü gibi özelliklere sahip olmaları onları avantajlı kılar.

Yakıt pillerinin dezavantajı, bu yazıyı takip eden listede sıralanmıştır.

- Yüksek maliyet, büyük hacim ya da ağırlıkta yakıt depolama gereksinimi, direkt hidrojen kullanımı halinde yüksek yakıt fiyatı, kullanım ömürlerinin tam olarak bilinmemesi olarak özetlenebilir.

Yakıt pilleri çalışma sıcaklık aralığına ve elektrolit kısmını oluşturan malzeme cinsine göre farklı tiplere ayrılır. Bu çeşitlilik temel çalışma prensibini etkilemez, ancak performansları çalışma koşulları ve uygulama alanlarının farklılaşmasına yol açar.

Uygulamada en sık karşılaşılan yakıt pili çeşitleri aşağıda sıralanmıştır ve Çizelge 2.4'te özellikleri gösterilmektedir.

- Alkalin Yakıt Pili
- Proton Dönüşüm Zarlı (PEM) Yakıt Pili
- Fosforik Asit Yakıt Pili
- Erimiş Karbonat Yakıt Pili
- Katı Oksit Yakıt Pili
- Direkt Metanol Yakıt Pili

Çizelge 2.4. Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri (Anonim 2013)

Yakıt Pili	Elektrolit	Çalışma Sıcaklığı	Elektriksel Verim	Yakıt/Oksitleyici
Alkali	Potasyum Hidroksit çözeltisi	Oda sıcaklığı-250 °C	% 60–70	H ₂ /O ₂
PEM	Proton iletken elektrolit membran	Oda sıcaklığı-80 °C	% 40	60 % H ₂ /O ₂ , hava
Direkt Metanol	Polimer iletken membran	Oda sıcaklığı-130 °C	% 20–30	CH ₃ OH/O ₂ , hava
Fosforik Asit	Sıvı fosforik asit	160–220 °C	% 55	Doğalgaz, biyogaz, H ₂ /O ₂ , hava
Erimiş Karbonat	Alkali karbonatlar	620–660 °C	% 65	Doğalgaz, biyogaz, kömür gazı, H ₂ /O ₂ , hava
Katı Oksit	Erimiş alkali metal karışımı	800–1000 °C	% 60–65	Doğalgaz, biyogaz, kömür gazı, H ₂ /O ₂ , hava

Avrupa Komisyonu, Avrupa Birliği için bir dizi hidrojen senaryosunu araştıran HyWays'ın ortaklaşa finanse ettiği projenin sonucunda, 2050 yılına kadar kara taşıtlarının % 80'inin hidrojen yakıtlı olması durumunda % 50 daha az CO₂ emisyonunun açığa çıkacağının sonucuna vardı (Offer ve ark. 2010).

Sonuç olarak, yakıt pili araç performansını ve yakıt tasarrufunu artırabilir ve elektrik gibi hidrojen de yenilenebilir enerjinin birçoğu dahil olmak üzere herhangi bir birincil enerji kaynağından üretilebilir ve böylece petrol ve nakliye arasındaki bağlantıyı kırmaya da yardımcı olabilir (Dinçer ve ark. 2017).

2.5. Elektrikli Araçların Batarya Teknolojileri

Bataryalar, elektrikli araçlarda yaygın kullanılan elektrik enerjisi depolama aygıtlarıdır. Aracın performansı, maliyeti, güvenliği ve güvenilirliği bataryaların karakteristiği ve kullanımıyla yakından ilişkilidir. Bataryanın performansı ana temelde bataryanın kimyasına bağlıdır. Bu yüzden araştırmaların çoğu, bataryaların daha yüksek performans, daha fazla menzil, daha fazla güvenilirlik ve daha fazla güvenlik sağlaması için batarya kimyaları üzerine yapılmaktadır. Fakat batarya kimyaları zamanla birlikte bozulmaktadır ve bu durum aracın tüm performansını etkilemektedir. Bu yüzden, bataryadaki bozulma aşaması bataryayı şartlandırarak, bataryaların farklı yüklemeler ve evre şartları altında şarj/deşarj profillerini kontrol ederek azaltılmalıdır. Bu sebeple, bataryadan sürekli veri alan, durum tahmini yapan, şarjı eşitleyen ve batarya hücrelerinin ısıl yönetimini sağlayan batarya yönetim sisteminin, maliyetleri azaltarak bataryaların güvenliğini, ömrünü ve performansını arttırması gerekmektedir.

Otomotiv sektörü, otomobildeki güvenilirliği, güvenliği ve konforu geliştirmekle birlikte daha düşük yakıt tüketimi, emisyon ve üretim maliyetlerine ulaşmak için sürekli çaba sarf etmektedir. Elektrikli araçların konvansiyonel araçlarla rekabet edebilmesi için, yukarıdaki

kriterleri yerine getirmesi ve hatta aşması gerekmektedir. Bataryalar elektrikli araçların kalbidir ve çeşitli konfigürasyonlar, şartlar ve sürüş çevrimleri altında gereken enerjiyi sağlarlar. Bu yüzden, doğru uygulama için uygun batarya teknolojisinin seçimi elektrikli araçlarda önem arz etmektedir. Herhangi bir batarya teknolojisi araçların tüm ihtiyaçlarını karşılamamasına rağmen, batarya kullanımını optimize etmek için dengeleme yapılması gerekmektedir.

Bataryalar, batarya teknolojilerinin kompakt, uzun ömürlü, düşük maliyetli ve çevre dostu olmasıyla birlikte, çeşitli çalışma ve ortam şartlarında yeterli güç ve enerji sağlama kapasitelerine göre değerlendirilirler. Aynı zamanda bataryalarda hafıza etkisi denilen kavram da önemlidir. Hafıza etkisi (memory effect) ise tamamen boşalmamış batarya şarj edilmeye başlandığında şarjın başladığı yerin biraz gerisinde boşluk kalmasına, dolayısıyla tüketim esnasında bu boşluklara denk gelindiğinde cihazın hafıza kaybı, bilinç yitimi, düşük voltaj sebebiyle normal olmayan davranış sergilemesi gibi hadiselerle sebep olan durum olarak tanımlanmaktadır. Çeşitli uygulamalarda kullanılan batarya teknolojileri Şekil 2.16'da gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Çeşitli uygulamalarda kullanılan batarya teknolojileri (Dinçer ve ark. 2017)

Bu şekil, şekilde belirtilen kaynağa TÜBİTAK MAM tarafından sağlanmıştır.

Daha önce de bahsedildiği gibi, bataryalar negatif ve pozitif elektrotlar, elektronik yalıtıcı ayırıcılar ve elektrolitlerden oluşan elektrokimyasal hücrelerden yapılmaktadır. Her elektrot aktif malzemelerden, elektronik iletkenliği arttıran çeşitli katkı maddelerinden ve polimer bağlayıcılardan oluşmaktadır. Günümüzde elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar için limitli sayıdaki batarya teknolojileri kullanılmaktadır. Bunlara EV1 ve RAVEV’de kullanılan kurşun-asit (pb-acid), Peugeot 106, Citroen AX, Renault Clio ve Ford Think’de kullanılan nikel kadmiyum (NiCd), Toyota Prius, Toyota Highlander, Ford Escape, Honda Insight ve Saturn Vue’de kullanılan nikel metal hidrit (NiMH) ve Tesla Roadstar, Chevrolet Volt, BMW i3, i8 ve 2013 yılından sonra geliştirilen çoğu araçta kullanılan lityum-iyon (li-ion) örnek verilebilir. Çizelge 2.5’te günümüzdeki mevcut çoğu batarya çeşitleri ve özellikleri gösterilmektedir.

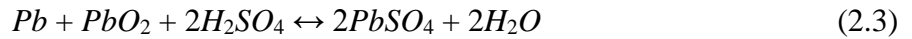
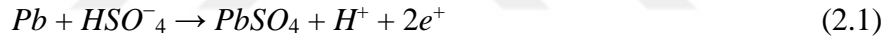
Çizelge 2.5. Batarya çeşitleri ve özellikleri (Muratoğlu 2017)

Pil Çeşitleri	Nominal Voltaj (V)	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Çevrim Ömrü (#)	Hafıza Etkisi	Çalışma Sıcaklığı (°C)
<i>Pb-acid</i>	2	35	1000	Yok	-15, +50
<i>NiCd</i>	1.2	50-80	2000	Var	-20, +50
<i>NiMH</i>	1.2	70-95	<3000	Nadir	-20, +60
<i>Zebra</i>	2.6	90-120	>1200	Yok	+245, +350
<i>Li-ion</i>	3.6	118-250	2000	Yok	-20, +60
<i>LiPo</i>	3.7	130-225	>1200	Yok	-20, +60
<i>LiFePO₄</i>	3.2	120	>2000	Yok	-45, +70
<i>Zn-air</i>	1.65	460	200	Yok	-10, +55
<i>Li-S</i>	2.5	350-650	300	Yok	-60, +60
<i>Li-air</i>	2.9	1300-2000	100	Yok	-10, +70

Türkçemizde bataryalardan sık sık pil veya akü adıyla da bahsedilmektedir. Çizelgede de pil adıyla bahsedildiği görülmektedir.

2.5.1. Kurşun asit (Pb-Acid) bataryalar

Kurşun asit bataryalar, 1800'lü yılların ortasından günümüze kadar bir geçmişe sahip olan eski ve yaygın kullanılan ticari bataryalardır. Ucuz ve kullanımı basit olduğu için günümüzde içten yanmalı motorlu araçlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kurşun-asit pillerde negatif yüklü elektrotta kurşun, pozitif yüklü elektrotta kurşun dioksit (PbO_2) ve elektrolit olarak sülfürik asit (H_2SO_4) materyalleri kullanılmaktadır. Batarya deşarj olurken pozitif plakada kurşun dioksit kurşun sülfata dönüşür, negatif plakada kurşun da kurşun sülfata dönüşür. Bu sırada elektrolit sülfürik asidini kaybederken su kazanır. Bu işlemlerin sonucunda elektrik enerjisi oluşur. Reaksiyona ait formüller (2.1), (2.2) ve (2.3) denklemlerinde gösterilmektedir.



Akü şarj olurken de bu işlemlerin tersi meydana gelmektedir. Plakalar eski haline dönerken elektrolitte sülfürik asit yeniden oluşturulmaktadır. Şekil 2.17'de örnek bir kurşun asit bataryası gösterilmektedir.



Şekil 2.17. Örnek bir kurşun asit batarya

Bu batarya kimyası ucuz olmasına rağmen, düşük enerji içeriğine sahiptir. Bu yüzden valf ile ayarlanmalı kurşun asit genellikle bakım gerektirmediği ve yüksek amper-saat çalıştığı için daha fazla kullanılmaktadır. Fakat düşük enerji yoğunlukları (40Wh/kg altında) ve çevrim ömürleri hala büyük kısıtlayıcı bir faktördür ve bu yüzden de uygulamaları endüstri ve araçlarda sınırlıdır. Uygulamalara otomobil çalıştırma, aydınlatma ve ateşleme örnek olarak verilebilir.

2.5.2. Nikel kadmiyum (NiCd) bataryalar

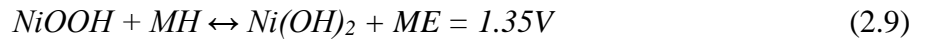
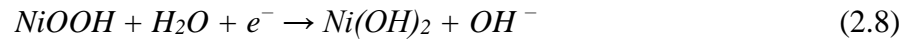
Nikel kadmiyum bataryaların tarihi 1899'a dayanmaktadır ve bu batarya anot için nikel oksihidroksit ve katot için metalik kadmiyum kullanır. Bununla birlikte, 1960'lı yılların başında yüksek hacimlerde karşımıza çıkmıştır ve kurşun asit kimyasına göre önemli derecede daha yüksek enerji yoğunluğuna ve daha uzun ömür sürelerine sahip olduğu için 20. yüzyılın son çeyreğinde çeşitli yüksek performanslı uygulamalar için (telefonlar, güç araçları, medikal aletler vb.) tercih edilen bir kimyaydı. Reaksiyona ait formüller (2.4), (2.5) ve (2.6) denklemlerinde gösterilmektedir.



Bu batarya kimyası, negatif olarak batarya kapasitesini etkilemeden ve bakım gerektirmeden yüksek deşarj oranlarının sürdürülebilmesi ile birlikte geniş sıcaklık aralığı ve kıyasla düşük iç direnç gibi avantajlara sahiptir. Fakat daha düşük enerji yoğunluğuna, kısa ömür süresine, daha belirgin hafıza etkisine ve çevresel etkilere sahip olmasından dolayı yerini nikel metal hidrit (NiMH) ve lityum iyon (li-ion) bataryalara bırakmıştır.

2.5.3. Nikel metal hidrit (NiMH) bataryalar

Nikel metal hidrit (NiMH) bataryalar, kıyasla yüksek özgül enerji ve ömür sürelerine sahip olmasıyla birlikte toksik olmayan geri dönüştürülebilir bir malzemeye sahip oldukları için 1990 ve 2000 yılları arasında elektrikli araç uygulamaları için kullanılan iyi bir batarya adayıydı. Ayrıca, aşırı şarj edildiğinde NiMH piller, bakım gerektirmeden suyu ayırmak ve yeniden birleştirmek için fazla enerjiyi kullanırlar. Bu batarya kimyasının çalışma mekanizması nikel oksit olan anot ve metal hidrit olan katot tarafından hidrojenin salınımı ve absorbe edilmesi üzerinedir. Reaksiyona ait formüller (2.7), (2.8) ve (2.9) denklemlerinde gösterilmektedir.



Bu bataryalar 1960'da beri yıllardır birçok kombinasyon ile kullanılmaktadırlar. Bunlara hidrojen, demir, kadmiyum, çinko ve en popüler olanı metal hidrit örnek olarak verilebilir. Bu kimya, nikel kadmiyum batarya kimyası ile benzerlik göstermektedir. Nikel kadmiyum bataryaların temel farkı kadmiyum maddesinin yerini hidrojen almasının almasıdır. Batarya sistemi üzerinde yapılan yoğun çalışmalar sonucunda NiMH bataryalarının birim hacim esasına göre enerji yoğunlukları (Wh/m^3), NiCd bataryasının sahip olduğu enerji yoğunluğunun çok fazla üzerine çıkartılmıştır. Aynı zamanda NiCd kimyasına kıyasla daha az etkili hafıza etkisi bulunmaktadır. Bunun yanında iç dirençleri çok düşük bataryalar üretilerek, ısı oluşumu azaltılmış ve bu suretle batarya performansı artırılmıştır.

NiMH kimyası ilk olarak EV1 aracında kullanılarak, elektrikli araçlar için ticari olarak kullanılabilir hale gelmiştir. Günümüzde, Toyota Prius batarya paketlerinde çoğunlukla bu kimya kullanılmaktadır. Bu kimyada, malzeme protonları birleştirir ve 289 mAh/g teorik olarak özel bir kapasiteye sahiptir. Bu kimyanın en büyük avantajlarından biri, aşırı şarj potansiyeli ve hücre dengelemesi için bir ölçüt sağlayan yan reaksiyonların varlığıdır. Ayrıca, nispeten yüksek bir çevrim ömrüne sahiptir. Ancak, metal hidrit elektrotun bozulması ve elektrolitten su kaybı nedeniyle esas olarak bu olaylar bu kimyanın ömrünü azaltmaktadır.

Son olarak, NiMH diğer herhangi bir özel kimyaya kıyasla gerçekten üstün özelliklere sahip olmasa da (kurşun asit daha ucuz, nikel kadmiyum daha yüksek ömür süresine, lityum-iyon daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğu için), bu kimya iyi bir uyuma ve batarya maksimum gücü ile enerji kapasitesi arasında önemli değişimlere sahiptir. Ayrıca, kurşun asitli bataryalardan belirgin şekilde daha yüksek özgül (spesifik) enerjilere (Wh/kg) sahip olmasına rağmen, mevcut bataryalı araçların yüksek talebini karşılamak için hala yeterli değildir. Ek olarak, bataryadaki nikelin nispeten pahalı olmasından dolayı bu kimyanın maliyetinin düşme olasılığı düşüktür.

2.5.4. Lityum-iyon (Li-ion) bataryalar

Elektrikli ve hibrit araçlar sahip oldukları teknolojiye dolayı bataryalardan önemli özelliklere sahip olmasını talep etmektedirler. Diğer kimyaların kıyasla düşük enerji ve güç yoğunluğuna sahip olması bu talepleri çok fazla sağlayamamaktadır.

Lityum en hafif metal elementidir ve diğerlerine kıyasla yüksek voltaj ile enerji yoğunluğu sağlayan hücrelere sahiptir. Ayrıca, Li^+ katılarda difüzyon için faydalı olan küçük bir iyon yarıçapına sahiptir (Ellis ve Nazar 2012). Bu özellikler elektrikli araç uygulamaları için lityum iyon kimyasının iyi bir aday olmasını sağlamaktadır.

İlk lityum bataryalar 1970'lerde ticari olarak piyasaya sürülmüştür. 1990'larda şarj edilebilir lityum metal piller geliştirilmeye çalışılmıştır ancak güvenlik ve uzun şarj süreleri açısından önemli sorunlar yaşanmıştır. 1970 yılında lityum metalinin enerji uygulamalarında kullanımına ait avantajlar fark edildikten sonra 1972'de Exxon ilk defa TiS_2 yapısında katot üreterek (lityum metali anot olarak kullanıldı) lityum pilini üretmiştir. 1980'de katmanlı yapıdaki sülfür içeren katot malzemelerinin uzun çevrimler boyunca kararlı kalmadığı keşfedilmiş, Goodenough ve arkadaşları alternatif malzeme olarak metal oksitlerin katot olarak kullanılmasını önermişlerdir (Polat ve Keleş 2012). 1991 yılında ilk defa Sony bu görüşü geliştirerek ilk ticari Lityum iyon pili üretmiştir. $LiCoO_2$ 'in katot, karbonun anot olarak kullanıldığı bu hücrelerde 3,6 V üstünde potansiyel elde edilmiş, uzun çevrimler boyunca kararlılık gösteren lityum iyon pillerin üretilmesi başarılmıştır. Daha sonraki yıllarda pil teknolojisindeki rekabet hızla artmış ve özellikle bataryaların çevrim ömürleri (şarj-deşarj çevrimi), özgül (spesifik) enerjileri (Wh/kg), hacimsel enerji yoğunlukları (Wh/m^3), güvenlikleri ve yüksek sıcaklıklarda kararlı yapıları üzerinde gerçekleştirilen geliştirme çabaları hız kazanmıştır.

Tekrar şarj edilebilen lityum iyon pillerde, hücreler diğer pil sistemlerinde olduğu gibi enerjiyi üretmek ve depolamaktan birincil derece sorumlu üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar anot, katot ve elektrolit olarak sıralanabilir. Anot malzeme negatif

elektrot, katot ise pozitif elektrot olarak görev alır. Pozitif elektrotlar genelde tünel veya tabakalı yapılara sahip metal oksitlerden (LiMOx) oluşurlar. Negatif elektrot malzemeler de tabakalı yapılara sahiplerdir. Bu yapılar sayesinde hücrenin/pilin şarjı ve deşarjı esnasında Li iyonları pozitif ve negatif elektrotları arasında karşılıklı olarak yer değiştirebilmektedir. Bu, yer değiştirme (topotaktik) reaksiyonu olarak tanımlanır. Bu reaksiyonda aktif malzemeler anot ve katot olup lityum için ev sahipliği görevini görürler, lityum ise misafir olarak bir elektrottan diğerine yer değiştirir (Polat ve Keleş 2012).

Örnek olarak LiCoO₂ kimyasındaki pozitif elektrottaki reaksiyon (2.10) denkleminde gösterilmektedir.



Örnek olarak negatif elektrottaki reaksiyon (2.11) denkleminde gösterilmektedir.



Hücrede bu reaksiyonların oluşması için elektrot malzemelerinin elektrik iletkenliği sağlanmalıdır. Bu amaçla, elektrot malzemeleri yüksek iletken metal folyolar üzerine lamine edilir veya folyo üzerine biriktirilir. Folyoların üzerindeki elektrotlar arasında gerçekleşmesi muhtemel kısa devreyi önlemek için mikro gözenekli ayırıcılar (seperatörler) ve iletkenliği sağlamak için sıvı/jel/ katı elektrolitler kullanılarak hücre içerisinde lityum iyonlarının yer değiştirmesi sağlanır (Polat ve Keleş 2012).

Anot ve katot malzemeleri, grafit ve lityum oksit malzemeleri olarak çeşitlendiğinde lityum iyon pillerinin kullanımı ve bataryaya karşı olan ilgi artmıştır. Piyasada kullanımı çok fazla olan katot malzemelerine lityum kobalt oksit (LiCoO₂), nikel kobalt alüminyum oksit (LiNiCoAlO₂ ya da NCA), lityum demir fosfat (LiFePO₄ ya da LFP), lityum nikel

manganez kobalt (LiNiMnCoO_2 ya da NMC) ve lityum manganez oksit (LiMn_2O_4) kimyaları örnek gösterilebilir. Çizelge 2.6'da yaygın kullanılan katot kimyaları listelenmiştir.

Çizelge 2.6. Yaygın kullanılan lityum iyon katot kimyaları (Whittingham 2012)

Kimya	Boyut	Wh/L Teorik	Wh/L Gerçek	%	Wh/kg Teorik	Wh/kg Gerçek	%
LiFePO_4	54208	1980	292	14.8	587	156	26.6
LiFePO_4	16650	1980	223	11.3	587	113	19.3
LiMn_2O_4	26700	2060	296	14.4	500	109	21.8
LiCoO_2	18650	2950	570	19.3	1000	250	25.0

LiFePO_4 kimyası, en düşük özgül enerjiye (Wh/kg) ve kısa ömür süresine sahip olmasına rağmen düşük malzeme maliyeti ve ömür beklentisiyle güvenilir bir kimyadır. LiMn_2O_4 kimyası, yüksek özgül enerji (Wh/kg), güç ve kıyasla daha düşük maliyet özelliklerine sahip olduğu için çoğunlukla cep telefonlarında, hibrit ve elektrikli araçlarda kullanılmaktadır. Fakat bu kimya yüksek sıcaklıklardan etkilenmektedir ve bu yüzden de çalışma esnasında ısı yönetimi gerektirmektedir. LiCoO_2 kimyası yüksek özgül enerjilere (Wh/kg) ulaşabilmektedir fakat yüksek oranda kobalt (Co) içerdiği için bu durum onu kıyasla daha pahalı hale getirmektedir. Bu yüzden bu kimya daha çok tüketici ürünlerinde özellikle dizüstü bilgisayarlarda kullanılmaktadır. Son olarak, LiNiMnCoO_2 ve LiNiCoAlO_2 gibi yüksek enerji yoğunluklu (Wh/L) kimyalar üzerinde önemli araştırmalar yapılmaktadır ancak elektrikli araç uygulamaları için güvenli ve düşük bir maliyetle kullanılmalardan önce daha fazla zamana ihtiyaç duyulmaktadır.

Piyasada kullanımı çok fazla olan anot malzemelerine grafit, lityum titanat oksit ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (LTO)) ve silikon örnek verilebilir. Bunların arasında grafit daha fazla tercih edilmektedir çünkü, grafit kıyasla yüksek özgül enerji ve düşük maliyetlere sahiptir. Fakat grafit stabil olmayan katı elektrolit ara yüz (solid electrolyte interface (SEI))

katmanına sahiptir bu durum yüksek şarj ve sıcaklık durumlarında çıkan gücün düşmesine sebep olmaktadır. LTO ise yüksek ömür sürelerine sahiptir fakat aynı zamanda özgül kapasitesi (mAh/g) yarıdır. Son olarak silikon, bir anot olarak düşük voltaja ve yüksek teorik özgül kapasiteye sahip olduğu için iyi bir adaydır. Bu nedenle, silikon nano tüpleri veya benzer bir işlemi yapan silikon anotlarının kullanılması, oldukça daha yüksek enerji depolaması ve daha uzun pil ömrü sağlayacaktır. Bununla birlikte silikon, lityum yerleştirme ve çıkarma sırasında önemli ölçüde genişler ve daralır. Bu durum da elektrotların mekanik bütünlüğünü bozmaktadır ve katı elektrolit ara yüz (SEI) stabilitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Çizelge 2.7’de yaygın kullanılan lityum iyon anot ve katot kimyaları listelenmiştir.

Çizelge 2.7. Yaygın kullanılan lityum iyon anot ve katot kimyaları (Wu ve ark. 2012)

Malzeme	Özgül Kapasite mAh/g	Voltaj V
LiCoO ₂	160	3.7
LiMo ₂ O ₄	130	4.0
LiFePO ₄	140	3.3
NMC	180	4.2
NCA	185	4.2
Graphite	372	<0.1
LTO	168	1.0–2.0
Silicon	3,700	0.5–1.0

Lityum iyon bataryaların yüksek sıcaklıkta ömür süreleri sınırlıdır ve geniş, çok hücreli modellerinde genellikle alakalı bazı problemleri bulunmaktadır. Yüksek sıcaklıklara ve şarj sırasında üst limitlere çıkılması gibi zorlayıcı çalışma şartlarında katotta oksijen salınımı meydana gelebilir ve oksijenin yanıcı elektrolitle reaksiyona girmesi sonucunda ısıl sürüklenme (thermal runaway) ve patlamalar meydana gelebilmektedir. Bu yüzden,

LiFePo₄ kimyası nispeten düşük nominal voltajına sahip olmasına rağmen yukarıda belirtilen kimyasallardan daha güçlü kovalent bağlara sahip olduğu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü bu durum bu kimyayı nispeten güvenli hale getirmektedir. Ek olarak, geliştirilmiş ayırıcılar hücre seviyesinde (cell level) güvenliği geliştirmek için kullanılmaktadır.

Kısacası, bu kimyanın kapalı hücre olması, bakım gerektirmemesi, uzun ömürlü olması, geniş çalışma sıcaklık aralığına sahip olması, çabuk şarj olabilme kabiliyeti, yüksek güçlü deşarj kapasitesi, yüksek enerji verimi, yüksek spesifik enerji ve enerji yoğunluğu, hafıza etkisinin olmayışı avantajları olarak gösterilebilir. Fakat fiyatı, yüksek sıcaklıklarda bozulması, koruyucu devre ihtiyacının oluşu ve aşırı şarj sonucunda kapasite kaybı veya termal bozulmaya uğraması ise dezavantajlarıdır.

Son olarak, yukarıda sözü edilen bu batarya kimyasallarının çoğunun elektrikli araçların itiş için önemli miktarda enerji ve güç sağlayabilmesine rağmen benzinin enerji yoğunluğu 13 000 Wh / kg'dır. ABD filosunun benzinli itiş sistemlerinde ortalama verimliliği (depodan tekerleklere) %12,6 civarındadır ve bu da otomotiv uygulamasında yaklaşık 1 700 Wh / kg olacak şekilde benzinin kullanılabilir enerji yoğunluğu olduğunu göstermektedir (Girishkumar ve ark. 2010). Diğer bir taraftan elektrikli itiş sistemlerinde verim(bataryadan tekerleğe) %90 mertebelerindedir. Elektrik tahrik sistemlerinin konvansiyonel araçlarla uyumlu olması için, şu anda lityum iyon bataryalarda mevcut olanlardan daha yüksek büyüklükteki enerji yoğunluklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, bugün ve gelecek için enerji depolama taleplerini yerine getirmek adına radikal olarak farklı kimyasallar ve yaklaşımlar gerekmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, tez çalışmasının konusu olan elektrikli ve hibrit araçlardaki lityum iyon bataryalarının ısı yönetimi için yapılan çalışmalarda kullanılan materyal ve yöntemler anlatılmıştır.

Lityum iyon bataryası diğer batarya türleri ile kıyaslandığında, bu bataryanın birçok avantajı olduğu görülmektedir. Avantajları ise yüksek enerji yoğunluğu, yüksek güç yoğunluğu, kıyasla daha hafif olması, hafıza etkisinin olmaması, düşük deşarj oranları ve daha yüksek ömür süreleri olarak sıralanabilir.

Bataryalardaki güvenliği sağlamak ve ısı performansını arttırmak için, bataryaların maksimum çalışma sıcaklığı ve bataryalardaki lokal sıcaklık farkının istenilen güvenli aralıklarda olması gerekmektedir. Batarya hücreleri hızlı deşarj, aşırı şarj ve yüksek ortam sıcaklığından dolayı aşırı ısınmalara karşı hassaslardır. Aşırı ısınmalar ve dengesiz sıcaklık dağılımı hücrelerin hızlı bir şekilde bozulmasına, batarya çevrim ömrünün kısalmasına, kapasite ve batarya güvenliğinin olumsuz etkilenmesine sebep olmaktadır. Sıcaklıkla alakalı ekstrem durumlarda, hücrelerde ısı sürüklenme(thermal runaway) meydana gelebilir ve ısı sürüklenme ısının kontrolsüz bir şekilde artmasına neden olarak yangın ve patlamalara sebep olabilmektedir. Motloch ve ark. (2002) yaptıkları çalışmalarda 30-40°C batarya sıcaklık aralığında bataryanın sıcaklığının 1°C artması batarya ömrü süresini 2 ay azalttığını gösterdiler. Bunların yanı sıra, batarya performansı düşük ortam sıcaklığından da olumsuz etkilenmektedir. Bu yüzden, bataryaların optimum performans göstermesini sağlamak için etkili bir ısı performans yönetimi gerekmektedir. Batarya ömrünü, elektrokimyasal performansı ve ısı güvenliği artırma açısından hem batarya içindeki ısı oluşumunu azaltma hem de ısı dağılımını arttırmak dikkate alınmalıdır.

Batarya sıcaklığının artmasına neden olan kimyasal reaksiyon ve iç direnç etkisinden dolayı bataryada şarj ve deşarj sırasında ısı açığa çıkmaktadır. Elektrot ana ısı kaynağıdır. Batarya ısı üretimini azaltmak ve termal güvenliği arttırmak için, elektrot tasarımını

optimize etmek ve yüksek sıcaklıklara daha dirençli yeni malzemeler geliştirmek tercih edilmesi gereken anahtar yöntemlerdir. Ek olarak, yüksek sıcaklıklara karşı dirençli elektrot malzemeleri ve ayırıcılar ısıl sürüklenme (thermal runaway) oluşumunu etkili bir şekilde önleyebilmektedir.

Harici bir ısı yönetim sisteminin kurulması, şarj ve deşarj sırasında bataryadan ısı transferinin daha efektif bir şekilde gerçekleşmesine, sıcaklığın hızlı bir şekilde artmasını önlemeye, kararlılığı ve güvenliği geliştirmeye yardımcı olmaktadır. Lityum iyon bataryalarında ısı yönetimi 4 ana temel fonksiyondan oluşmaktadır. Bunlar:

- 1.Soğutma: Bataryada sıcaklık artışı olduğunda, bataryaların ideal çalışma sıcaklığına gelmesi için soğutulmasıdır.
- 2.Isıtma: Bataryada sıcaklık azalışı olduğunda, bataryaların ideal çalışma sıcaklığına gelmesi için ısıtılmasıdır.
- 3.İzolasyon: Bataryanın ekstrem dış sıcaklıklardan etkilenmemesi için izolasyonun sağlanmasıdır.
- 4.Havalandırma: Batarya grubundaki tehlikeli gazları boşaltmak için havalandırma gereklidir. Bazı sistemlerde bu işlev soğutma ve ısıtma fonksiyonlarıyla birleştirilir.

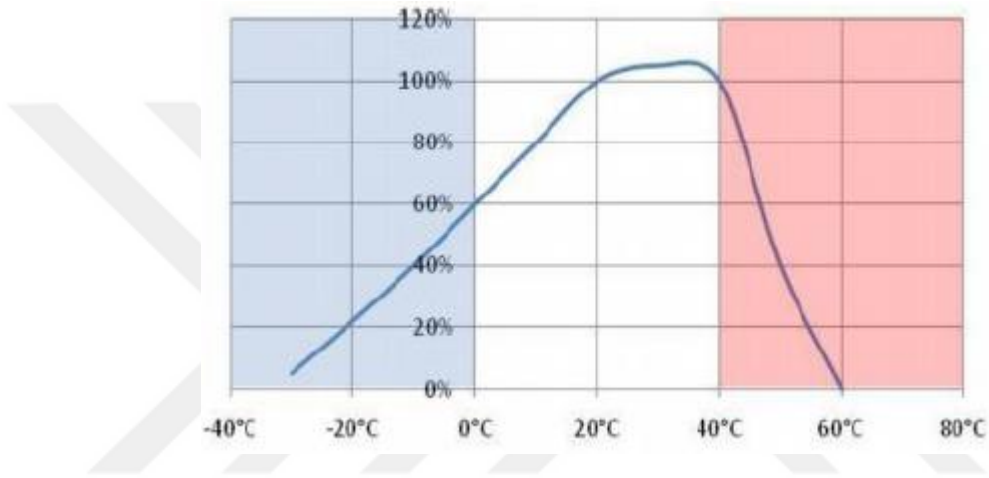
3.1. Lityum-iyon Bataryada Çalışma Şartları

Lityum-iyon hücrelerin performansı, sıcaklığa ve çalışma gerilim (voltaj) değerlerine bağlıdır. Lityum-iyon hücreler, voltaj ve sıcaklığın limit(minimum ve maksimum) değerlerinde güvenli bir şekilde çalışırlar. Aksi takdirde, hücrelerde hasar meydana gelir ve geri dönüşü olmaz.

Aşırı voltaj durumlarında, şarj voltajı dayanılabilir hücre voltajını (maksimum değeri) aştığında aşırı elektrik akımlarına neden olur ve sonunda bu durum elektrot malzemelerin bozulmasına sebep olarak elektrotlar arasında kısa devreye neden olabilir.

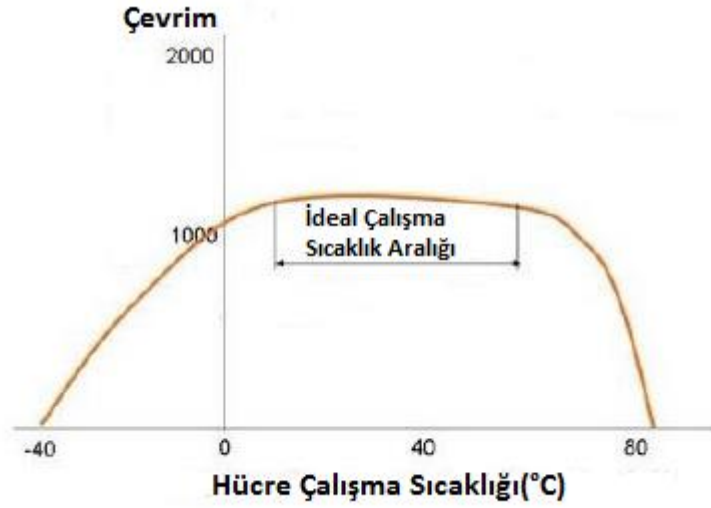
Aşırı voltajda olduğu gibi, düşük voltaj da elektrot malzemelerinin bozulmasına neden olan sorunları beraberinde getirir. Bu sorunlar bataryada kısa devreye ve/veya kapasite kayıplarına neden olabilir.

Sıcaklığın batarya performansına olan etkisinin ne derece önemli olduğu Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Batarya sıcaklık-performans eğrisi (Matthe ve ark. 2011)

Eğriye bakıldığında, bataryadan maksimum performans istenildiğinde ideal batarya sıcaklığının 20-40°C arasında olduğu görülmektedir. Bu da aralığın ne kadar dar olduğunu ve performansın ne denli önemli olduğunu göstergesidir. Şekil 3.2’de batarya hücrelerinin çalışma sıcaklığının değişimine bağlı olarak çevrim miktarı gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Batarya hücresinin çalışma sıcaklığı-çevrim eğrisi (Anonim 2019a)

Biliyoruz ki bataryaların ömür sürelerini çevrim miktarları belirlemektedir. Bir şarj (doldurma) ve bunu takiben yapılacak bir deşarj (boşaltma) işleminin karşılığında bir çevrim denilmektedir. Hücre çalışma sıcaklığındaki değişim, çevrim miktarını etkilemektedir. Burada belirtilen durum ise ideal çalışma sıcaklığı aralığı yaklaşık 10-60°C olmasıdır. 10°C'den daha düşük ve 60°C'den daha yüksek sıcaklıklar batarya malzemelerini olumsuz etkilediği için hem çalışma performansını hem de çevrim ömrünü olumsuz etkilemektedir.

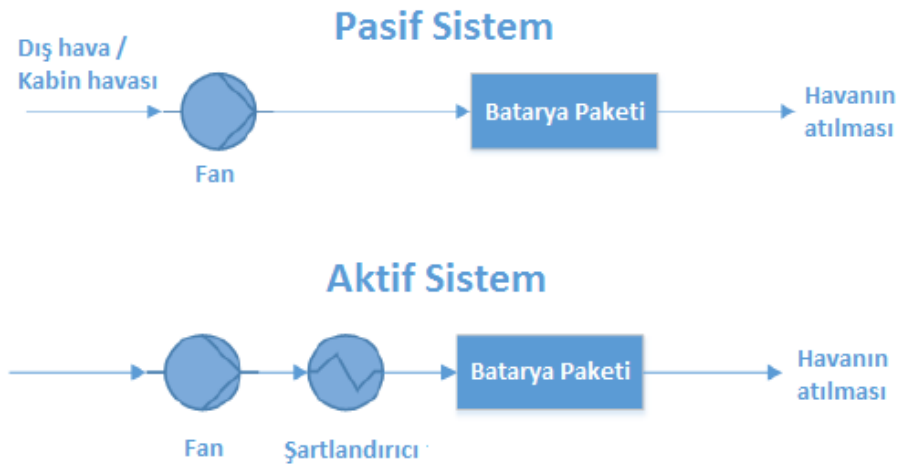
Genel olarak, hem çalışma performansı hem de çevrim ömrü parametreleri dikkate alındığında bataryanın ideal çalışma sıcaklığının 20-40°C arasında olması istenmektedir. Bataryanın soğutulmasında bu değer dikkate alınmalıdır.

3.2. Bataryada Isı Yönetimi Teknolojileri

3.2.1. Hava ile soğutma ve ısıtma

Bu ısı yönetimi teknolojisi soğutma ve ısıtma fonksiyonları için havayı kullanmaktadır. Sisteme giren hava, atmosferden veya kabininden gelen hava olabilir bu sisteme pasif soğutma/ısıtma sistemi denilmektedir. Ya da sisteme giren hava bir klimanın ısıtıcısı veya buharlaştırıcısından sonra şartlandırılmış hava olabilir. Bu sisteme de aktif soğutma/ısıtma sistemi denilmektedir. Pasif bir sistem yüz watt mertebesinde soğutma/ısıtma gücüne sahip olurken, aktif bir sistem 1 kW'a kadar soğutma/ısıtma gücüne sahip olabilir.

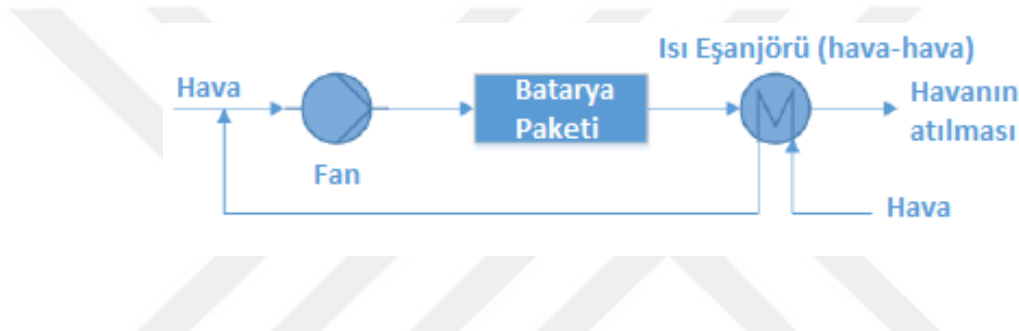
Hava hem pasif sistemde hem de aktif sistemde bir üfleyici/fan tarafından beslendiğinden, bu sistemlere zorlanmış taşınım hava sistemleri de denir. Şekil 3.3'te sistemlerin şematik açıklaması gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Zorlanmış taşınım hava sistemleri (Li ve Zhu 2014)

Zorlanmış taşınım hava sistemleri ısıtma, soğutma ve havalandırma fonksiyonlarını tek bir sistemde gerçekleştirebilmektedir. Ek bir havalandırma aygıtına (vantilatör) gerek yoktur, ancak atılan havanın tekrar kabine geri dönemeyeceği bilinmelidir.

Bazı durumlarda, ısının egzoz havasından(dışarı atılan hava) geri kazanılması için batarya paketinin arkasına bir ısı geri kazanım ünitesi (hava-hava ısı eşanjörü) monte edilir. Sistemin şematik açıklaması Şekil 3.4’te gösterilmektedir.



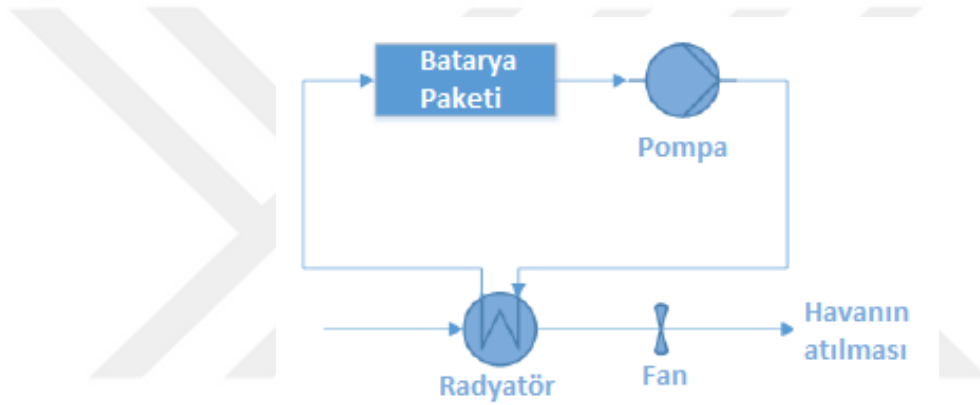
Şekil 3.4. Isı geri kazanımlı zorlanmış taşınım hava sistemleri (Li ve Zhu 2014)

3.2.2. Sıvı ile soğutma ve ısıtma

Havanın yanı sıra sıvı, ısı transferinde kullanılan bir başka ısı transfer yöntemidir. Genel olarak ısı yönetim sistemleri için uygulanan iki grup sıvı vardır. Bunlardan biri, mineral yağ gibi doğrudan batarya hücrelerine temas edebilen dielektrik sıvıdır (doğrudan temas eden sıvı). Diğeri ise etilen glikol ve su karışımı gibi yalnızca batarya hücrelerine dolaylı olarak temas edebilen sıvıdır (dolaylı temas sıvısı). Farklı sıvılara bağlı olarak, farklı sistemler tasarlanmıştır. Doğrudan temaslı sıvı için batarya paketleri mineral yağa batırılmaktadır. Dolaylı temas sıvısı için olası bir sistem batarya paketinin etrafındaki bir koruyucu kılıf ile, her paketin etrafındaki ayrı boru sistemi ile, batarya paketlerinin soğutma/ısıtma plakasına yerleştirilmesi ile ya da batarya paketinin soğutma/ısıtma kanatları ve plakaları ile birleştirilmesiyle olabilir. Bu iki grup arasında, batarya paketi ve

çevresi arasında daha iyi bir yalıtım ve böylece daha iyi güvenlik performansı elde etmek için dolaylı temas sistemleri tercih edilir.

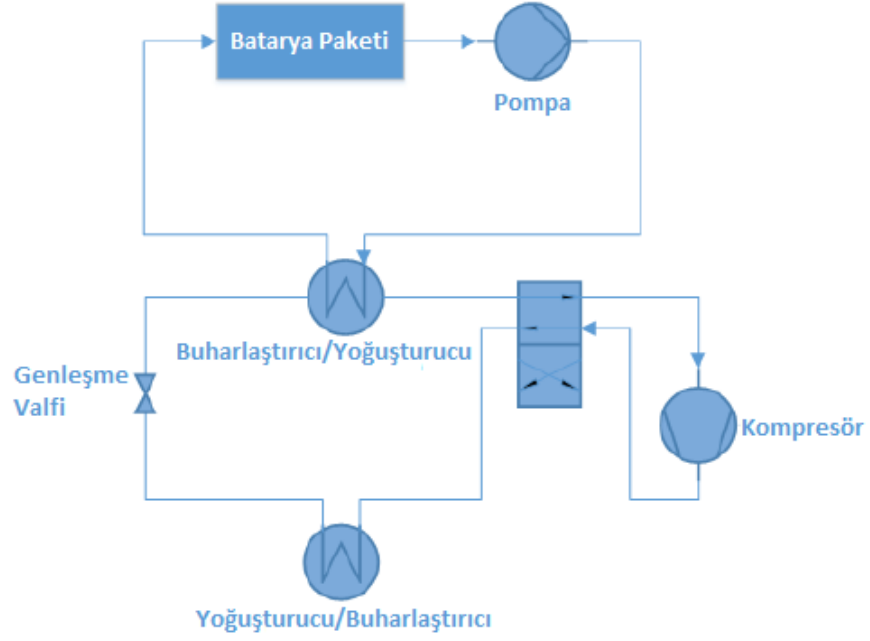
Sıvı sistemler de pasif sistemler ve aktif sistemler olarak sınıflandırılabilir. Pasif sıvı sisteminde, soğutma için kullanılan soğutucu plaka bir radyatördür. Radyatör genellikle aracın ön kısmında konumlandırılmaktadır. Şekil 3.5'te pasif bir sıvı sistemin sistematik şemasını gösterilmektedir. Isı transfer sıvısı, pompa tarafından kapalı bir sistem içinde sirküle edilir.



Şekil 3.5. Pasif sıvı soğutmalı sistem (Li ve Zhu 2014)

Dolaşımdaki sıvı batarya paketindeki ısıyı alır ve bir radyatör vasıtasıyla ısıyı atar. Soğutma gücü, ortam havası ve batarya arasındaki sıcaklığa büyük ölçüde bağlıdır. Eğer radyatörün arkasına fan konulursa soğutma performansı iyileştirebilir ancak ortam havası batarya sıcaklığından yüksekse veya aralarındaki fark çok küçükse, pasif sıvı sistem soğutma için çok fazla etkili olmaz.

Şekil 3.6'da aktif bir sıvı sistemin sistematik şeması gösterilmektedir.

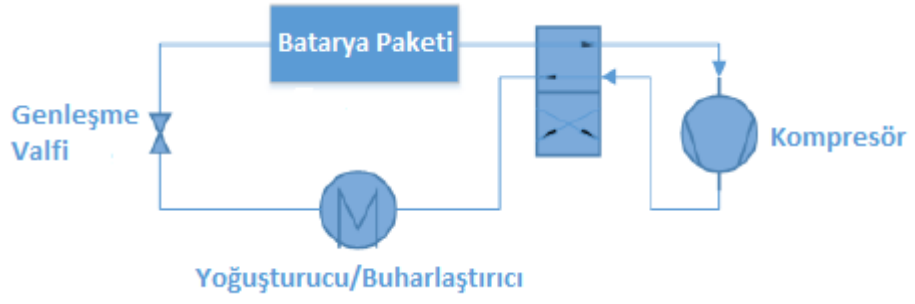


Şekil 3.6. Aktif sıvı soğutmalı sistem (Li ve Zhu 2014)

Şemaya bakıldığında bu sistemde iki tane döngünün olduğu görülmektedir. Şekildeki üst bölüm birinci döngü, alt bölüm ikinci döngü olarak adlandırılır. Birinci döngü, ısı transfer sıvısının pompa tarafından dolaştırıldığı pasif bir sıvı sistemine benzemektedir. İkinci döngü bir klima çevrimidir. İkinci döngüdeki üst ısı eşanjörü, soğutma işlemi için bir buharlaştırıcı olarak çalışır ve her iki döngüyü birbirine bağlar. Isıtma işlemi için 4 yollu vana anahtarlanır ve sistemde üst ısı eşanjörü bu sefer bir yoğusturucu (kondansatör) olarak çalışır. Isıtma işlem döngüsüne ısı pompası çevrimi de denir.

3.2.3. Direkt soğutucu ile soğutma ve ısıtma

Aktif sıvı sistemlerine benzer şekilde, doğrudan bir soğutucu akışkan sistemi bir klima döngüsünden oluşur ancak doğrudan batarya paketinde dolaşan ısı transfer sıvısı olarak soğutucu akışkan kullanır. Sistematik düzen Şekil 3.7'de verilmiştir.

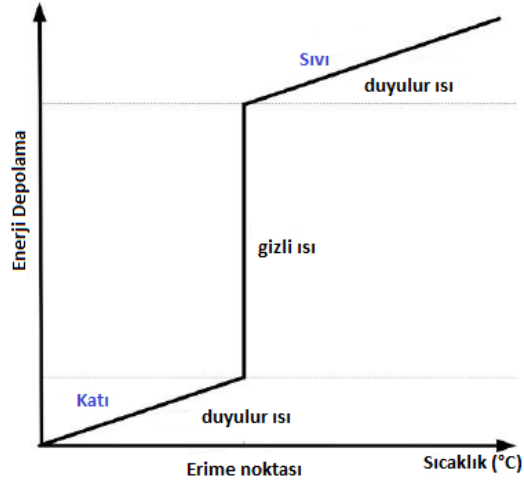


Şekil 3.7. Direkt soğutucu ile soğutma sistemi (Li ve Zhu 2014)

3.2.4. Faz değişim malzemesi (PCM) ile soğutma ve ısıtma

Faz değişim malzemeleri (phase change material(PCM)), erime ve katılaşma sırasında sabit bir noktada ısı miktarını depolayan ve serbest bırakan yüksek füzyon ısısına sahiptir.

Faz değişim malzemeleri katıdır ve sıcaklık yükselmesiyle birlikte malzemede ısı duyulur ısı olarak absorbe edilir. Sıcaklık erime noktasına ulaştığında ısı, gizli ısı olarak absorbe edilir ve depolanır. Bu durum malzemede sıcaklık artışı olmadan gizli ısının maksimum noktasına kadar devam eder. Bu sırada malzeme de katı formdan sıvı forma geçer. Daha sonra malzeme sıvı forma geçince ısı, duyulur ısı olarak absorbe edilir. Bu malzemenin sıcaklığa bağlı olarak enerji depolama özelliği Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



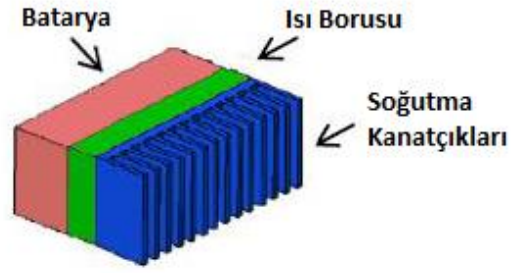
Şekil 3.8. Faz değişim malzemesinin sıcaklık-enerji depolama grafiği (Li ve Zhu 2014)

Ayrıca, faz değişim malzemeleri batarya sıcaklığını yönetmek için hava soğutmalı sistem veya sıvı soğutmalı sistem ile birleştirilebilir.

3.2.5. Termoelektrik modül (peltier) ile soğutma ve ısıtma

Termoelektrik soğutucular, bir nesnenin sıcaklığını çevre sıcaklığının altına düşürürken, çevredeki sıcaklık ne olursa olsun, nesne sıcaklığını dengede tutarlar. Termoelektrik soğutucular, bazen termoelektrik modül veya Peltier soğutucusu diye de adlandırılabilir. Termoelektrik soğutucular, küçük bir ısı pompası gibi çalışan yarı iletkenlerdir. Bir doğru akım kaynağından sağlanan küçük bir voltaj sayesinde, ısı, modülün bir ucundan diğerine doğru hareket eder. Böylece modülün bir yüzü ısınırken, diğeri de eşzamanlı olarak soğumaya başlar. Bu olay, doğru akım kaynağının artı ve eksi kutuplarının yer değiştirmesiyle aksine çevrilebilir. Bir termoelektrik modülü, kullanım amacına göre ısıtıcı veya soğutucu olarak kullanılabilir.

Termoelektrik modül ile batarya soğutulması veya ısıtılmasında iki adet fan kullanılır. Soğutma sisteme ait şema Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Isıtma işlevi için termoelektrik soğutucunun bağlantı kutuplarının değiştirilmesi yeterlidir.



Şekil 3.10. Isı borusu ile soğutma sistemi (Li ve Zhu 2014)

Termoelektrik ile kıyaslandığında, bir ısı borusu daha güvenilirdir çünkü hareketli parçası ve enerji tüketimi yoktur. Fakat ısı borusunun bataryayı ısıtma fonksiyonu da bulunmamaktadır.

3.3. Yöntem

Elektrikli araçların batarya sistemlerinde ısı yönetimi yapıldığı bu tez çalışmasında kullanılan yöntem, sıvı ile soğutma ve ısıtma sistemleridir.

3.4. Isı Yönetimi Çalışmaları

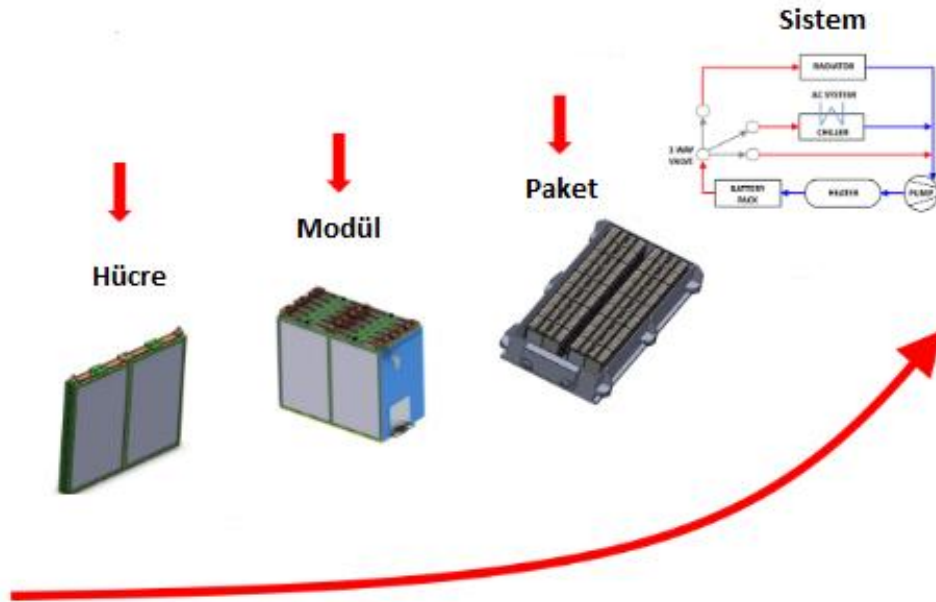
Bu bölüme kadar elektrikli araçlar, elektrikli araçların bataryaları ve elektrikli araçların batarya sistemlerinde ısı yönetimi konularında detaylı bilgi verildi. Bu bölümde, verilen bu bilgiler ışığında batarya sistemlerinin ısıl yönetimini gerçekleştirmek için bilgisayar ortamında hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD, Computational Fluid Dynamics (CFD)) analizleri (simülasyonları) zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Analizler ile batarya sisteminde meydana gelen maksimum sıcaklıkların kaç derece ve hangi bölgelerde olduğu gözlemlenmiştir. Gözlem sonucunda da ısıl performansı optimum seviyeye getirecek birçok analiz gerçekleştirilerek sonuçlar ortaya çıkarılmıştır.

Analizler sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi sayısal bir yöntem olup, özellikle katı mekaniği, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve titreşim gibi problemlerin bilgisayar yardımıyla çözümünde kullanılan çok gelişmiş bir tekniktir. Sonlu elemanlar yönteminde (Finite Elements Method (FEM)) modeller sonlu sayıda elemanlara bölünür. Bu elemanlar belli noktalardan birbirleriyle bağlanır, bu noktalara düğüm (node) denilmektedir.

Sonlu elemanlar analizleri(finite element analysis(FEA)) için ANSYS Icepak (15.0) programı kullanılmıştır. ANSYS Icepak, ANSYS Fluent tabanlı olup elektronik sistemlerin soğutulmasında kullanılan bir programdır.

3.5. Analize Giriş

Literatürde batarya sistemleri 4 seviye olarak incelenmektedir. Bunlar: hücre seviyesi(cell level), modül seviyesi(module level), paket seviyesi(pack level) ve sistem seviyesi(system level) şeklindedir. Şekil 3.11’de seviyeler gösterilmektedir.



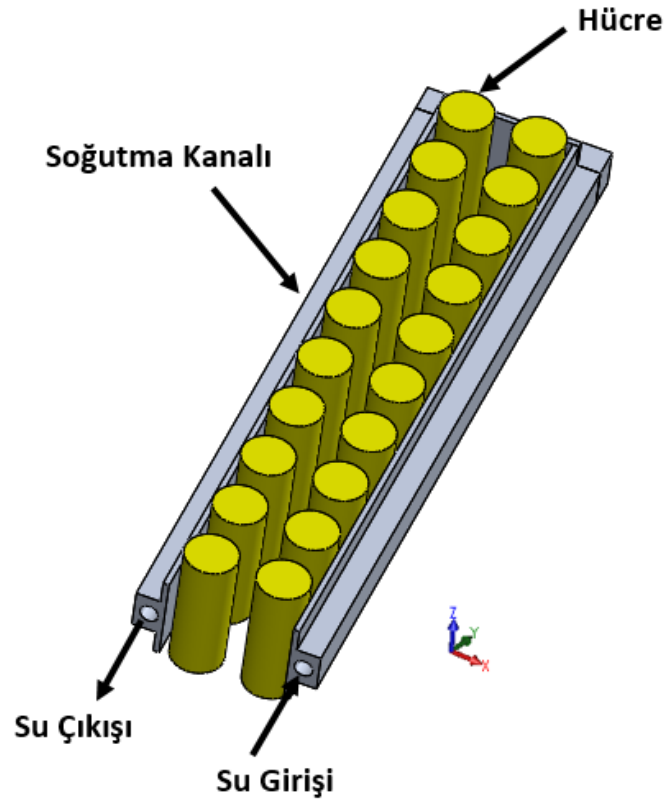
Şekil 3.11. Batarya sistemlerinin seviyeleri (Anonim 2019b)

Bir batarya modelindeki hücre sayısı ve batarya paketindeki modül sayısı bataryadan beklenen güce bağlı olarak değişmektedir. Bu tez çalışmasında modül seviyesindeki batarya sisteminde ısı yönetimini incelemek için analizler gerçekleştirilmiştir.

3.6. Modül Özellikleri ve Geometrisi

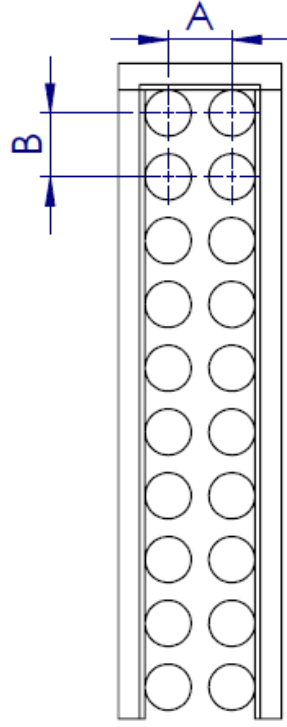
Batarya modülünde lityum-iyon batarya çeşidi olan silindir şeklindeki lityum demir fosfat (LiFePO_4 ya da LFP) batarya hücresi kullanılmıştır. Analizlerde 20 adet hücrenin bulunduğu batarya modülü kullanılmıştır. Normalde bir batarya modülünde 100'den fazla hücre, bir batarya paketinde de 1 000'den fazla hücre kullanılabilir. Fakat literatüre bakıldığında çok sayıdaki hücrelerle analizler yapmak yerine daha az sayıdaki hücrelerde ısı yönetiminde incelemeler ve geliştirmeler yapıldığı görülmektedir. Bu tez konusunda literatürdeki bu yöntem tercih edilmiştir. Soğutma yöntemi olarak sıvı ile soğutma yöntemi seçilmiştir. Çünkü diğer soğutma yöntemleri ile kıyaslandığında daha kompakt ve efektif bir soğutma yöntemidir (Liu ve ark. 2014). Soğutma sıvısı olarak su seçilmiştir. Analizlerde, modüle giren suyun debisi ve ortam sıcaklığı değişken olarak çalışılmıştır. Bu parametrelerin ısı performansına olan etkisi incelenmiştir.

Modül seviyesindeki bataryanın tasarımı SolidWorks programında gerçekleştirilmiştir. Modül tasarımında elektrikli araç üreticisi olan Tesla'dan esinlenilmiştir. Şekil 3.12'de batarya modülünün tasarımı bulunmaktadır.



Şekil 3.12. Tasarlanan batarya modülü

Modülde kullanılan batarya hücrelerinin boyutu $\text{Ø}26 \times 65$ (mm) (boyut kodu 26650) şeklindedir. Suyun modüle girdiği delik çapı $\text{Ø}9$ mm'dir. Hücreler arasındaki mesafe Şekil 3.13'te gösterildiği üzere A ve B olarak gösterilmektedir. A ve B değerleri, yapılan tasarım ve ön analiz çalışmaları sonucunda 10 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.13. Hücreler arasındaki mesafe gösterimi

3.7. Analiz Giriş Verileri

3.7.1. Isıl yük hesabı

Bir batarya hücresinde oluşan ısı, farklı mekanizmalar olan tersinir(reversible(rev)), tersinmez(irreversible(irr)) ve ohmik(ohmic(ohm)) ısı güçlerinin toplamıdır.

$$Q_{tot} = Q_{rev} + Q_{irr} + Q_{ohm} \quad (3.1)$$

Tersinir ısı üretimi, sıcaklıkla beraber akım-voltaj değerinin değişmesiyle oluşmaktadır. İlgili formül (3.2) denkleminde gösterilmektedir.

$$Q_{\text{rev}} = a_s i_n T \frac{\partial E_{\text{eq}}}{\partial T} \quad (3.2)$$

Tersinmez ısı üretimi, aşırı gerilim ya da voltaj kaybından dolayı oluşmaktadır.

$$Q_{\text{irr}} = a_s i_n (\phi_s - \phi_e - E_{\text{eq}}) \quad (3.3)$$

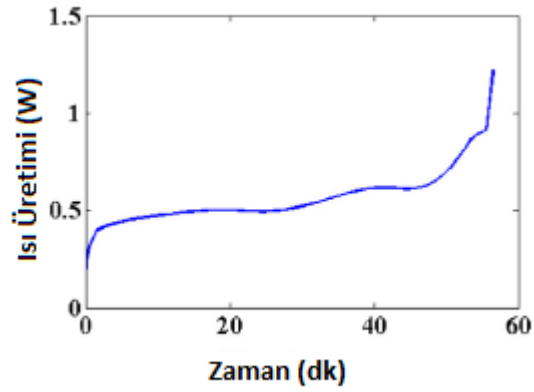
Ohmik ısı üretimi, katı fazda elektronik taşımaya direnç ve elektrolit fazda iyonik taşımaya dirençten dolayı oluşmaktadır.

$$Q_{\text{ohm}} = -i_e \left(\frac{\partial \phi_{el}}{\partial x} \right) - i_s \left(\frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right) \quad (3.4)$$

$$i_e = - \left(\kappa_s^{\text{eff}} \nabla \phi_e + \frac{2R_g T \kappa_s^{\text{eff}}}{F} (t_+^0 - 1) \left(1 + \frac{d \ln f_{\pm}}{d \ln c_e} \right) \nabla \ln c_e \right) \quad (3.5)$$

$$i_s = -\sigma_s^{\text{eff}} \nabla \phi_s \quad (3.6)$$

Bu denklemler kullanılarak ve deşarj oranı ile orantılı olarak batarya hücresinde ısı üretimi hesaplanmaktadır. Seçilen lityum-iyon batarya hücresinin 0,9C deşarj oranındaki ısı üretimi Şekil 3.14'te gösterilmektedir.



Şekil 3.14. 0,9C Desarj oranına sahip batarya hücresinde zamana bağlı olarak ısı üretimi (Basu ve ark. 2016)

Analizlerde ısı üretimi, zamana bağlı olarak sabit 0,5W olarak ve hücelere üniform olarak uygulanmıştır.

3.7.2. Isı transferi denklemleri

Isı iletimi, taşınımı ve radyasyonu olmak üzere 3 çeşit ısı transferi bulunmaktadır.

Isı iletimi denklemleri (Fourier kanunu):

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad \frac{W}{m^2} \quad (3.7)$$

$$q_x = q''_x A_c \quad W \quad (3.8)$$

Isı taşınımı denklemleri (Newton'un soğutma kanunu):

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad \frac{W}{m^2} \quad (3.9)$$

$$q = hA_s(T_s - T_\infty) \quad W \quad (3.10)$$

Radyasyon denklemleri:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad \frac{W}{m^2} \quad (3.11)$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \quad \frac{W}{m^2 K^4} \quad (3.12)$$

Hacim kontrol dengesi için enerji denklemleri:

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (3.13)$$

$$\dot{E}_{st} = \rho V c_p \frac{dT}{dt} \quad (3.14)$$

Kartezyen koordinatlarda ısı denklemleri:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.15)$$

Silindirik koordinatlarda ısı denklemleri:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.16)$$

Küresel koordinatlarda ısı denklemleri:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.17)$$

3.7.3. Malzeme özellikleri

Analizlerde kullanılan lityum-iyon bataryasının çeşidi olan silindir şeklindeki lityum demir fosfat (LiFePO₄ ya da LFP) batarya hücresinin ısı özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Lityum demir fosfat (LiFePO₄ ya da LFP) hücresinin ısıl özellikleri (Rad ve ark. 2013)

	Hücre (ort.)	Ayırıcı	Katot	Anot
C_p [J·g ⁻¹ ·K ⁻¹]	1.36	1.93-2.00	1.25	1.20
k [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0.4	0.12-0.22	0.4	1.4
ρ [g·m ⁻³]	2.047·10 ⁶	9.02 - 9.06·10 ⁵	2.208·10 ⁶	1.410·10 ⁶

Isıl analizlerde hücrenin ortalama değerleri kullanılmıştır. Batarya modülünde kullanılan soğutma kanalının malzemesi alüminyum (Al 6061) seçilmiştir.

3.7.4. Sınır şartları

Analizler zamana bağlı yapılmıştır ve burada hücrelerin deşarj oranı göz önünde bulundurularak analiz süresi 3 600 saniye olarak belirlenmiştir. Analizlere yerçekiminin etkisi eklenmiştir. Yerçekimi, Şekil 3.12’de gösterilen tasarımdaki koordinat sistemine bakıldığında -z yönündedir.

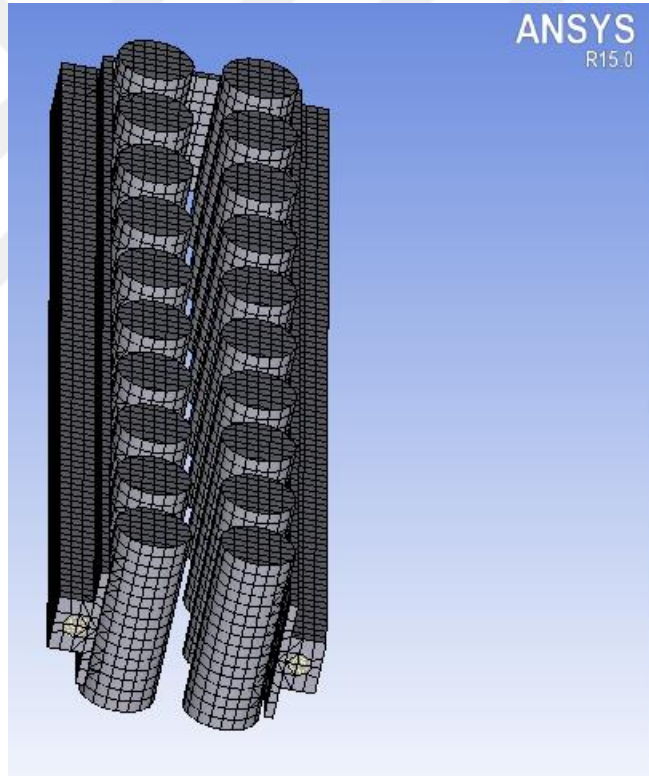
Başlangıçta modüle giren suyun sıcaklığı 20°C, suyun debisi 3,5 lt/dk ve ortam sıcaklığı yani batarya hücrelerin başlangıç sıcaklığı 20°C’dir. Daha sonra, hücrelerin başlangıç sıcaklığı (ortam sıcaklığı) ve suyun debisi değişken olarak tanımlanıp, bu değişkenlerin batarya modülüne olan etkisi incelenmiştir.

Analizlerde ısı transferinin iletim, zorlanmış taşınım ve radyasyon yöntemlerinin hepsi dahildir. Sistemde sadece doğal taşınım ihmal edilmiştir.

Radyasyonda yüzeyden yüzeye radyasyon (surface to surface (S2S)) yöntemi kullanılmıştır. Analizlerde bataryaların elektrokimyasal yapısı incelenmemiştir.

3.8. Batarya Modülünün Ağ Yapısı

Analizlerde, çözümler yapılmadan önce modele ağ örme işlemi yapılır. Bu literatürde mesh olarak da geçmektedir. Ağ örme işleminin amacı modeli fiziksel parçalara ayırarak üzerinde matematiksel işlemlerin yapılmasını sağlamaktadır. Batarya modülü ağ yapısı Şekil 3.15’te gösterilmektedir.



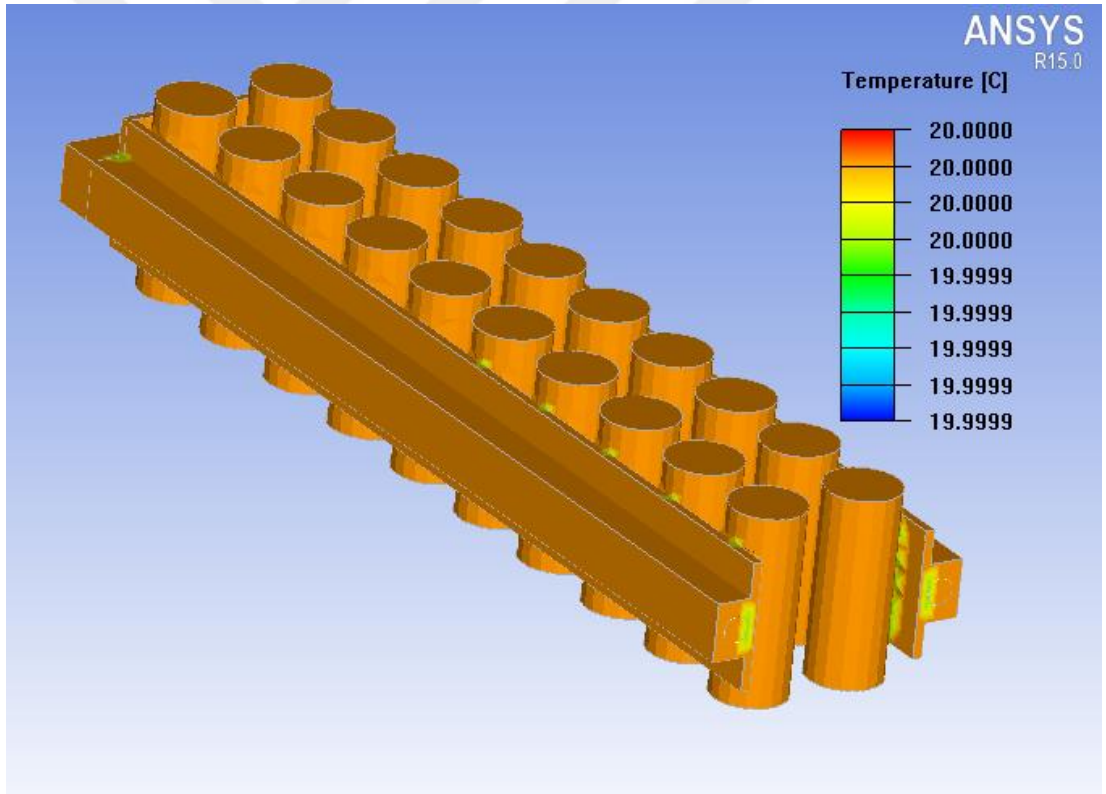
Şekil 3.15. Batarya modülünün ağ yapısı

Batarya modülü, 17 685 eleman ve 20 763 düğüm (node) sayısı ile örülmüştür.

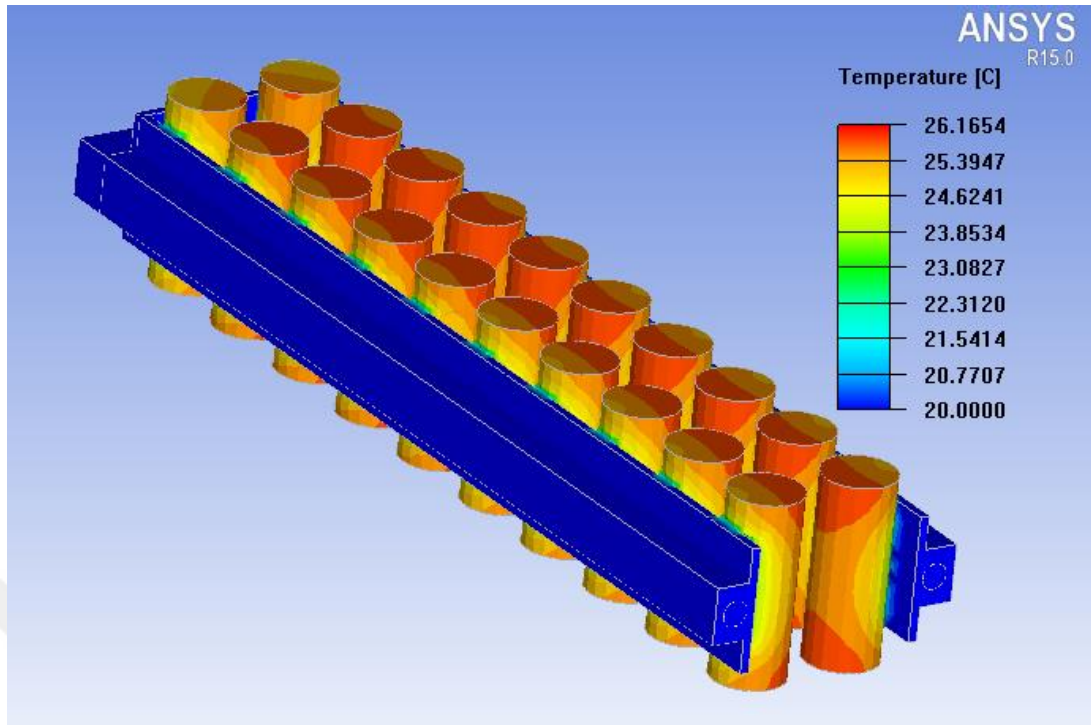
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. İlk Sınır Şartlarının Sonuçları

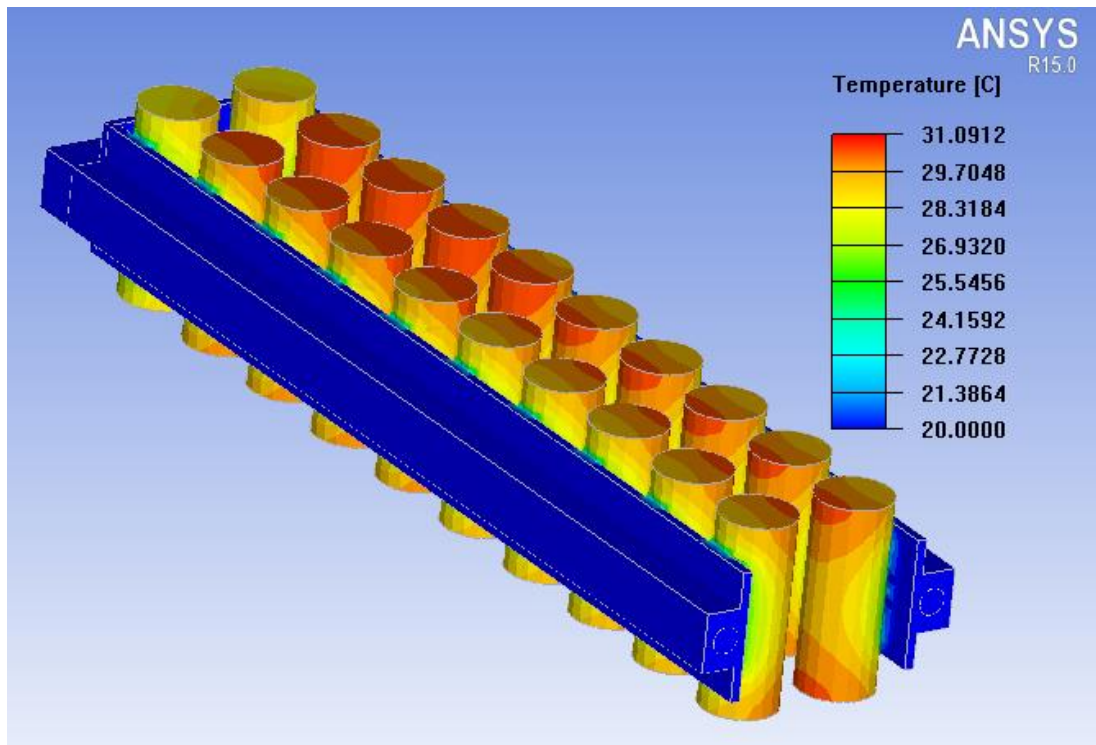
Belirtilen yönteme ait sınır şartları doğrultusunda koşturulan analizin sonuçları aşağıdaki şekillerdedir. Yine belirtmek gerekirse, bu sonuçlar ortam sıcaklığının 20°C, modüle giren suyun sıcaklığı 20°C ve suyun debisinin yaklaşık 3,5 lt/dk olduğu durumun sonuçlarıdır. Ayrıca, analiz programından alınan sonuçlarda program ondalıklı sayıları nokta ile göstermektedir. Fakat oluşturulan çizelgelerde ondalıklı sayılar doğru format olan virgöl ile gösterilmiştir. Şekil 4.1’de zamana bağlı sıcaklıklar gösterilmektedir.



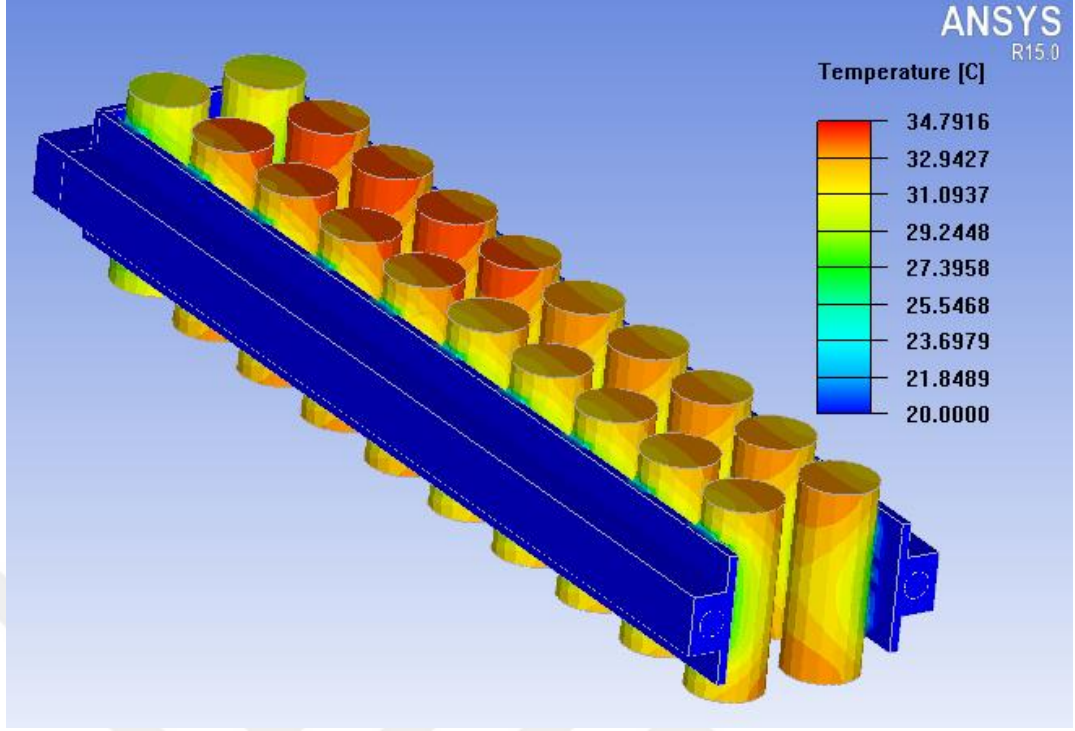
(a)



(b)



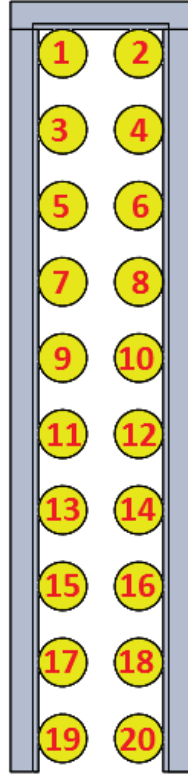
(c)



(d)

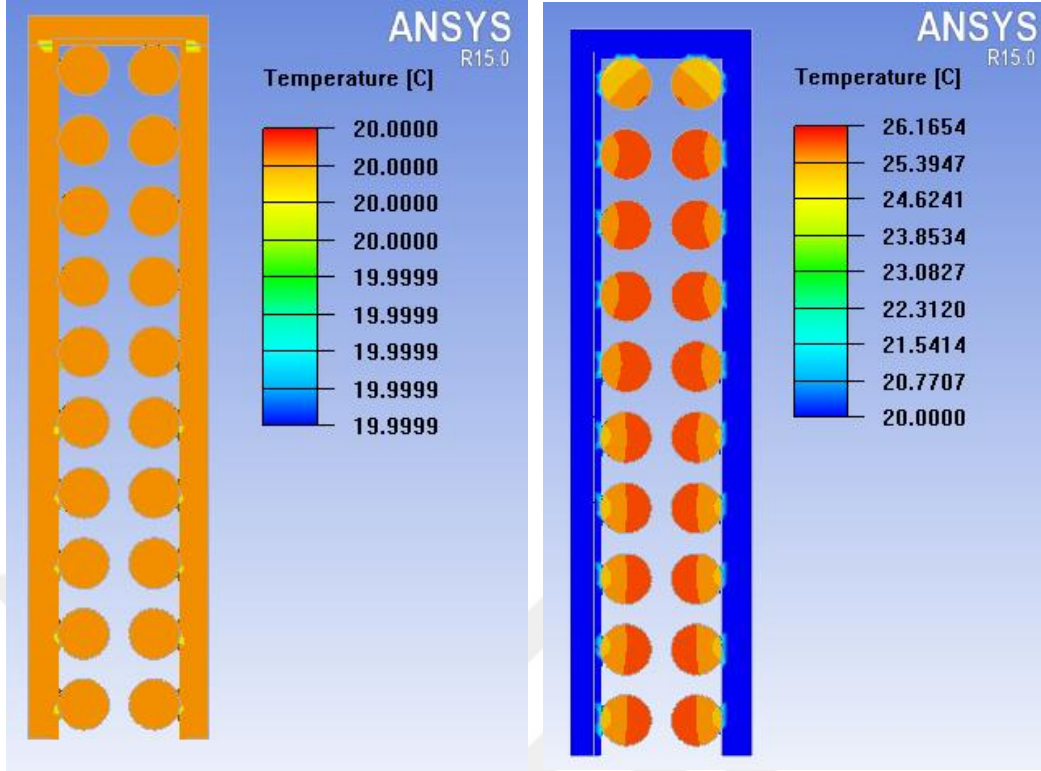
Şekil 4.1. Batarya modülünde meydana gelen sıcaklıklar (a) 0. saniye (b) 1 200. saniye (c) 2 400. Saniye (d) 3 600. Saniye

Bir de modüle yukarıdan bakıldığında sıcaklıkların nasıl bir dağılıma sahip olduğu daha net anlaşılmaktadır. Fakat bunun öncesinde bataryalar Şekil 4.2'deki gibi numaralandırılmıştır.



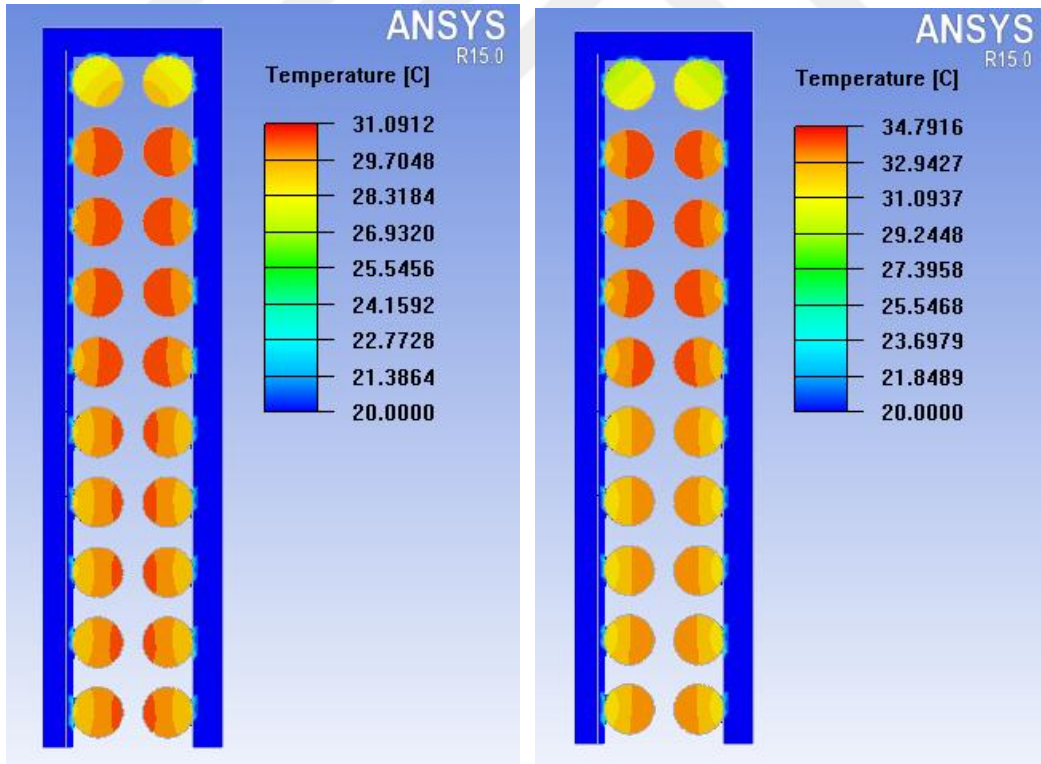
Şekil 4.2. Modüldeki bataryaların numaralandırılması

Şekil 4.1’de gösterilen zamana bağlı olarak sıcaklık değişiminin sisteme üsten bakıldığındaki görüntüsü Şekil 4.3’te gösterilmiştir.



(a)

(b)

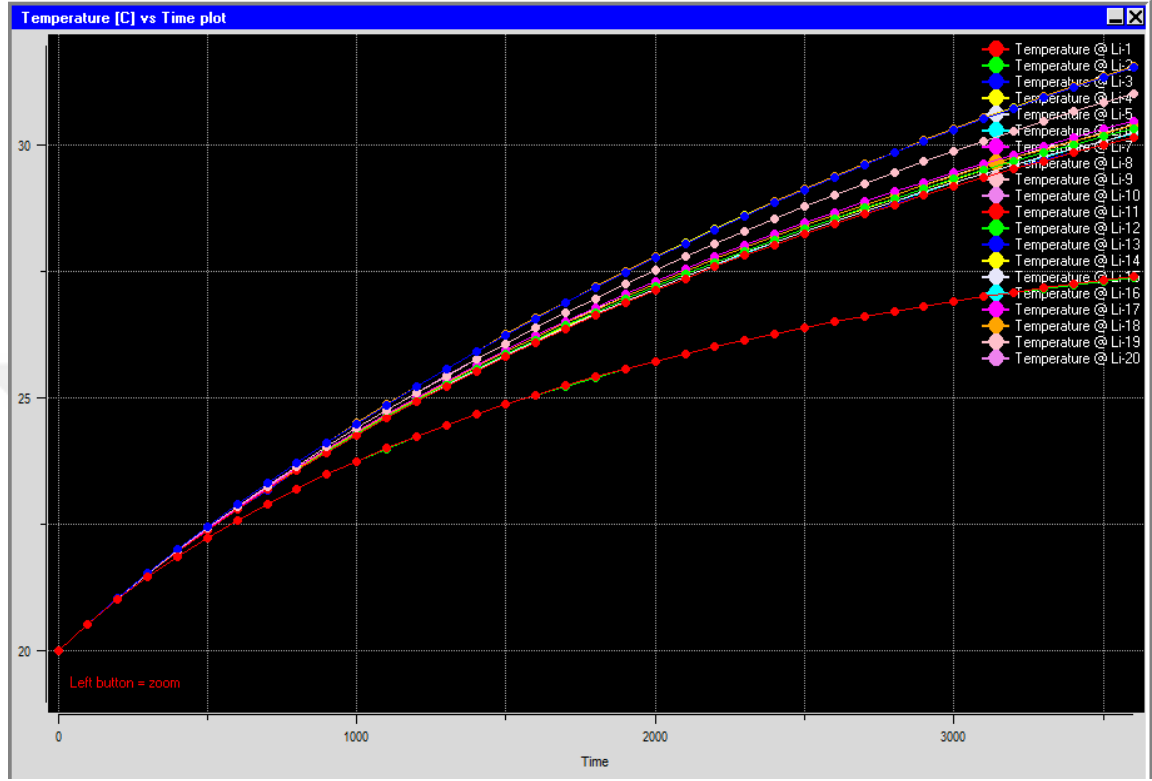


(c)

(d)

Şekil 4.3. Batarya modülünde meydana gelen sıcaklıklar 2 (a) 0. saniye (b) 1 200. saniye (c) 2 400. Saniye (d) 3 600. Saniye

Rakamlar ile numaralandırılmış olan bataryalardaki zamana bağlı olarak sıcaklık değişiminin grafiği Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Bataryalardaki zamana bağlı olarak sıcaklık değişimi

Grafiğe bakıldığında, maksimum sıcaklığın 8 numaralı batarya hücresinde ve minimum sıcaklığın 2 numaralı batarya hücresinde olduğu gözlemlenmektedir. Minimum sıcaklığın 2 numaralı hücrede olmasının sebebi, hücrenin iki taraftan soğutma kanalına temas etmesi ve 1 numaralı hücreye kıyasla kanaldan geçen suyun daha düşük sıcaklığa sahip olmasıdır. Maksimum sıcaklığın 8 numaralı hücrede olmasının sebebi, suyun giderek sıcaklığının artması ve orta bölgede hücrelerin ısıl yüklerden dolayı birbirlerinden daha çok etkilenmesidir.

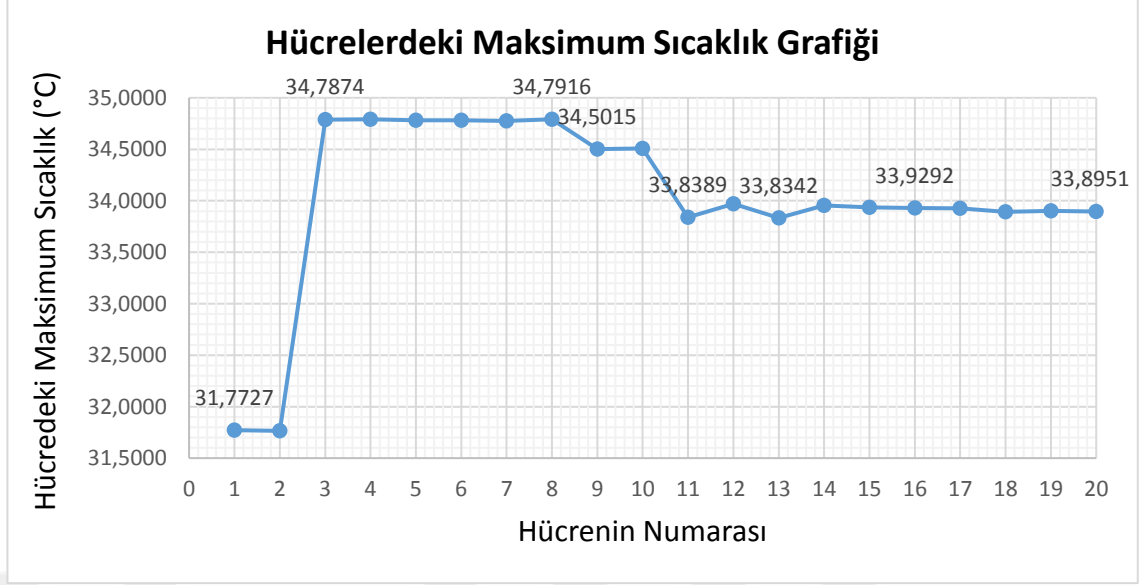
Maksimum sıcaklıkta 8 numaraya çok yakın değerde olan batarya hücreleri 3, 4, 5, 6 ve 7'dir. Minimum sıcaklıkta 2 numaraya çok yakın değerde olan ise 1'dir. Zamana bağlı

analizde tüm batarya hücrelerindeki minimum, maksimum ve ortalama sıcaklık değerlerini Çizelge 4.1’de ayrıntılı bir şekilde bulabilirsiniz.

Çizelge 4.1. Tüm batarya hücrelerindeki minimum, maksimum ve ortalama sıcaklık değerleri

Report summary data						
Object (Obj)	Section (Bölüm)	Sides (Kenarlar)	Value (Sıcaklık)	Min (Min)	Max (Maks)	Mean (Ortalama)
Li-1	All	All	Temperature (C)	20.0828	31.7727	28.0033
Li-2	All	All	Temperature (C)	20.0821	31.7649	27.9973
Li-3	All	All	Temperature (C)	20.1133	34.7874	31.9653
Li-4	All	All	Temperature (C)	20.1053	34.7916	31.9662
Li-5	All	All	Temperature (C)	20.1174	34.7829	31.967
Li-6	All	All	Temperature (C)	20.1079	34.7803	31.9631
Li-7	All	All	Temperature (C)	20.1187	34.7759	31.9669
Li-8	All	All	Temperature (C)	20.1076	34.7916	31.981
Li-9	All	All	Temperature (C)	20.1208	34.5015	31.6077
Li-10	All	All	Temperature (C)	20.1076	34.5078	31.6106
Li-11	All	All	Temperature (C)	20.1241	33.8389	30.6788
Li-12	All	All	Temperature (C)	20.1083	33.969	30.8389
Li-13	All	All	Temperature (C)	20.1275	33.8342	30.6793
Li-14	All	All	Temperature (C)	20.1076	33.9545	30.8331
Li-15	All	All	Temperature (C)	20.1281	33.9363	30.7484
Li-16	All	All	Temperature (C)	20.1069	33.9292	30.738
Li-17	All	All	Temperature (C)	20.1289	33.9279	30.8508
Li-18	All	All	Temperature (C)	20.1062	33.8931	30.7758
Li-19	All	All	Temperature (C)	20.1312	33.9013	30.7865
Li-20	All	All	Temperature (C)	20.1043	33.8951	30.8031

Çizelgedeki değerler ile hücreler arasındaki farkın daha net anlaşılması için hücrelerdeki maksimum sıcaklıkların grafiği oluşturulmuştur ve ilgili grafik Şekil 4.5’te gösterilmektedir.



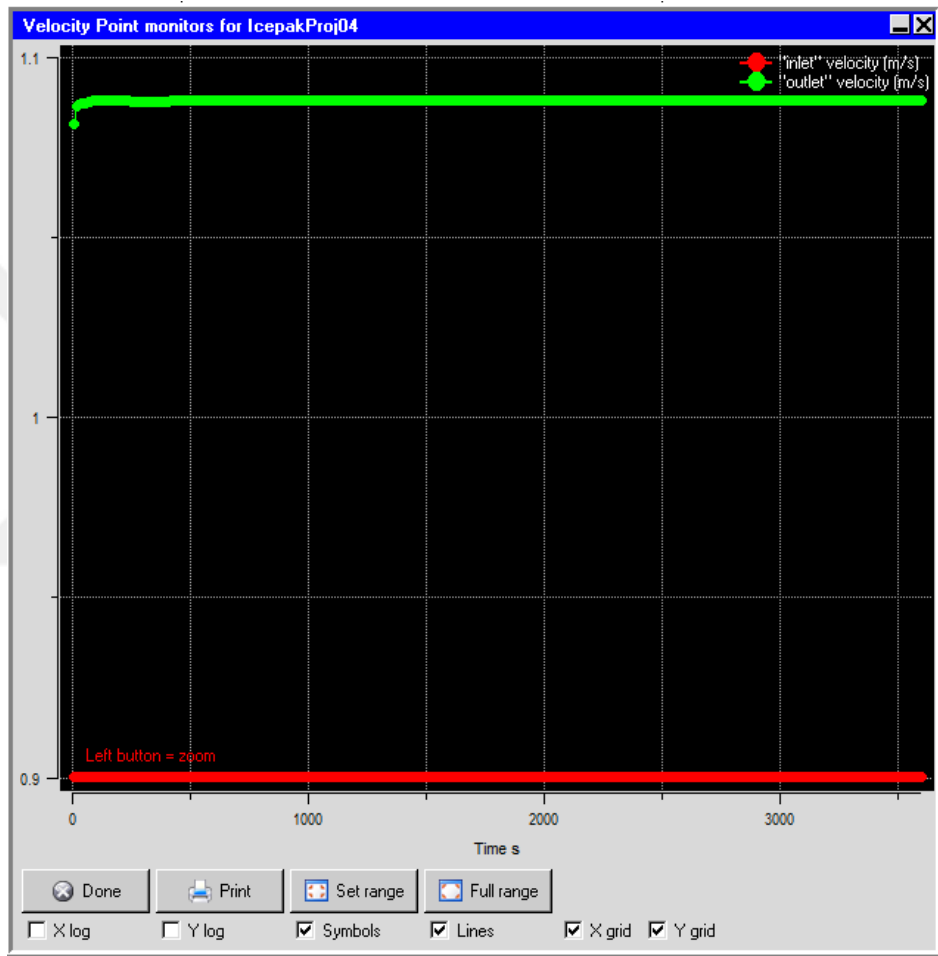
Şekil 4.5. Hücrelerdeki maksimum sıcaklıkların grafiği

Bataryanın yanı sıra suyun sıcaklık, hız ve basınç değerlerinin detaylı incelenmesi gerekmektedir. 0.9C deşarj oranında çalışan batarya modülüne 20°C’de giren ve modülden ısınarak çıkan suyun sıcaklığı maksimum 20,0962°C olmaktadır. Bu durum enerji denkleminde (5.8b) de yola çıkarak modüldeki ısıl gücün, debi ve özgül ısının sudaki sıcaklık farkına olan etkisi anlaşılmaktadır. Zamana bağlı analizde suyun minimum, maksimum ve ortalama sıcaklık değerlerini Çizelge 4.2’de ayrıntılı bir şekilde bulabilirsiniz.

Çizelge 4.2. Su giriş ve çıkış minimum, maksimum ve ortalama sıcaklık değerleri

Report summary data						
Object (Obj)	Section (Bölüm)	Sides (Kenarlar)	Value (Sıcaklık)	Min (Min)	Max (Maks)	Mean (Ortalama)
inlet	All	All	Temperature (C)	20	20.0663	20.0379
outlet	All	All	Temperature (C)	20.0243	20.0952	20.0638

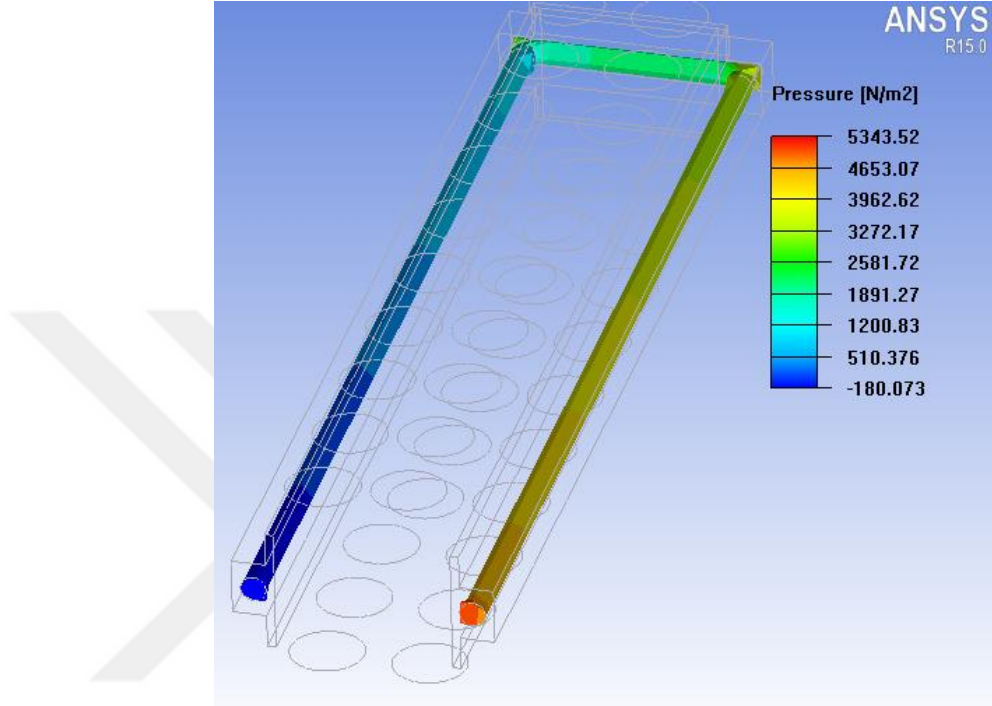
Suyun zamana bağılı olarak giriş ve çıkış hızı Şekil 4.6’da gösterilmektedir. Sonuçlar ANSYS ekranından alındığı için İngilizce’dir. Anlamları ise şu şekildedir, “inlet” yazılı olup kırmızı çizgili olan suyun giriş hızını ve “outlet” yazılı olup yeşil çizgi ile gösterilen de suyun çıkış hızını tanımlamaktadır.



Şekil 4.6. Zamana bağılı olarak suyun giriş ve çıkış hızının değişimi

Şekle baktığımızda 3,5 lt/dk debide suyun başlangıçtan itibaren hızı 0,9 m/s iken, çıkış hızı girişe göre artarak yaklaşık 1,09 m/s olmaktadır. Bu da suyun kanalda hız kazandığının göstergesidir.

Suyun hızında çok fazla değişim olmadığı için sudaki basınç kaybı her saniyede aynıdır. Sudaki toplam basınç kaybı 5 523,593 Pa yani 0,05 bar olmaktadır. Suyun basınç değişimi Şekil 4.7’de gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Sudaki basınç değişimi

4.2. Sınır Şartlarının Modül Isıl Performansına Etkisi

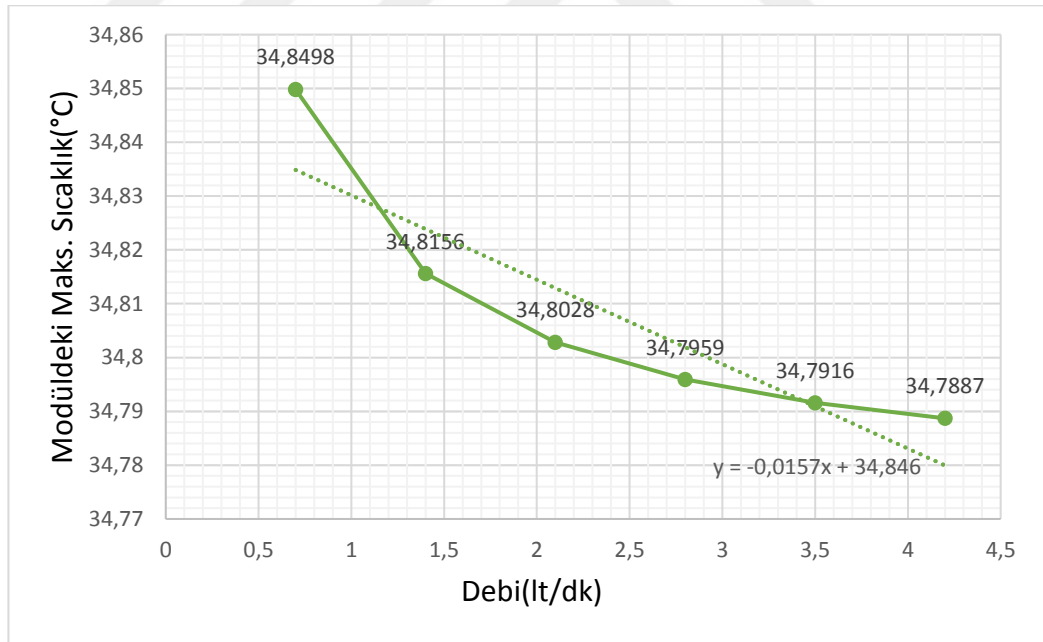
4.2.1. Su debisinin modül ısıl performansına etkisi

İlk sınır şartında su debisi 3,5 lt/dk, su giriş sıcaklığı 20°C ve ortam sıcaklığı 20°C olarak tanımlanmıştı. Bu şartlar doğrultusunda gerçekleştirilen analizin sonuçları detaylı olarak incelendi. Bu kısımdaki çalışmada, ilk sınır şartı olan 3,5 lt/dk optimize edilmiştir. Modül için en ideal debi seçimi yapılmıştır. Çizelge 4.3’te analizleri yapılan debiler ve debilere ait sonuçlar bulunmaktadır.

Çizelge 4.3. Debi değişiminin modül performansına etkisi

Debi (lt/dk)	Su Giriş Hızı (m/s)	Su Giriş Sıcaklığı (°C)	Su Çıkış Sıcaklığı (°C)	Basınç Kaybı (bar)	Modül Başlangıç Sıcaklığı (°C)	Modüldeki Maks. Sıcaklık (°C)	Hücreler Arasındaki Maks. Sıcaklık Farkı (°C)
0,7	0,18	20	20,12	0,0029	20	34,8498	2,9982
1,4	0,36	20	20,06	0,01	20	34,8156	3,0156
2,1	0,55	20	20,04	0,021	20	34,8028	3,0217
2,8	0,72	20	20,03	0,036	20	34,7959	3,0248
3,5	0,9	20	20,024	0,05	20	34,7916	3,0267
4,2	1,1	20	20,02	0,05	20	34,7887	3,0282

Debideki değişimin modüldeki maksimum sıcaklığı nasıl etkilediğinin grafiği ise Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



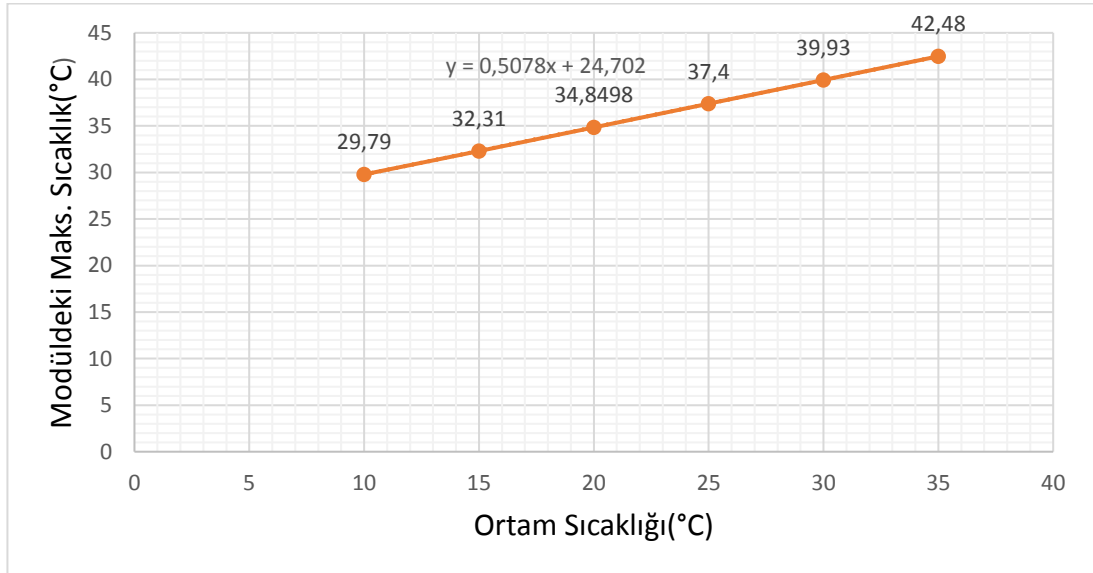
Şekil 4.8. Debi değişiminin modülün maksimum sıcaklığına etkisi

Sonuç olarak, modüle giren debi arttıkça su çıkış sıcaklığı ve modüldeki maksimum sıcaklık değeri azalmaktadır. Debi artışıyla birlikte modüldeki basınç kaybı ve hücreler

arasındaki maksimum sıcaklık farkı artmaktadır. İncelenen her bir debi değerinde modüldeki maksimum sıcaklık, batarya hücreleri için belirtilen maksimum sıcaklık değeri olan 40°C'den düşüktür. Bu yüzden incelenen debilerin hepsi modülde kullanılabilir. Fakat, maksimum sıcaklık debi için optimum değeri belirlemede tek kriter olmamalıdır. Modülden beklenen diğer kriterler ise basınç kaybının kıyasla yüksek olmaması, batarya hücrelerinin eş performans sağlaması için birbirine yakın sıcaklıklara sahip olması ve su çıkış sıcaklığı seçim için değerlendirilmesi gereken kriterlerdir. Bu kriterler doğrultusunda bu modül için debi optimum değeri 0,7 lt/dk seçilmiştir.

4.2.2. Ortam sıcaklığının modül ısıl performansına etkisi

Bu kısımdaki çalışmada, ortam yani başlangıçtaki hücre sıcaklığının değişken olmasının modülün ısıl performansına etkisi incelenmiştir. Buradaki amaç, ortam sıcaklığının farklı bölgelerde ve zamanlarda çok değişken olmasıdır. Bir otomobilin Ar-Ge'si için bu bilgi önemlidir. Bu çalışma sonucunda incelenen değer ise, modülün sahip olduğu maksimum sıcaklıktır. Modüle giriş yapan su debisi 0,7 lt/dk ve su giriş sıcaklığı 20°C'dir. Yapılan analizler sonunda elde edilen sonuçların grafiği Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Ortam sıcaklığının modülün maksimum sıcaklığına etkisi

Sonuç olarak, batarya modülünün içinde bulunduğu ortam sıcaklığı arttıkça, modülün maksimum sıcaklığı artmaktadır. Şekil incelendiğinde, 35°C ortam sıcaklığı dışındaki diğer ortam sıcaklıklarında modüldeki maksimum sıcaklık, kritik değer olan maksimum 40°C sıcaklığından düşüktür. Fakat 35°C ortam sıcaklığında bu değer aşıldığı için, modüle giren su sıcaklığı düşürülmeli veya su debisi arttırılmalıdır.

Buradaki bir diğer kritik durum ise, 20°C'den düşük ortam sıcaklığında ısıtma modunda ve 20°C'den yüksek ortam sıcaklığında ısıtma modunda çalışmaktadır.



5. SONUÇ

Otomotiv sektörünün geleceğinde elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşacağı düşünüldüğü ve planlandığı için, elektrikli araçların güç kaynağı olan batarya paketinin performansı büyük önem arz etmektedir. Batarya paketinin sağlayacağı elektriksel güç birçok faktörden etkilenmektedir. Bu faktörlerin başında ısıl özellikler yer almaktadır. Literatürde batarya ideal çalışma sıcaklığı aralığı yaklaşık 10-60°C olarak belirtilmektedir. 10°C'den daha düşük ve 60°C'den daha yüksek sıcaklıklar batarya malzemelerini olumsuz etkilediği için hem çalışma performansını hem de çevrim ömrünü olumsuz etkilemektedir. Fakat, hem çalışma performansı hem de çevrim ömrü parametreleri dikkate alındığında bataryanın ideal çalışma sıcaklığının 20-40°C arasında olması istenmektedir. Bataryanın soğutulmasında veya ısıtılmasında bu değer dikkate alınmalıdır. Tez çalışmasında yapılan çalışmalar bu değerleri sağlayacak batarya sisteminin tasarımını ve sonlu elemanlar analizlerini kapsamıştır.

Yapılan çalışmalarda ilk olarak, batarya modülünün tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ardından, modül tasarımını doğrulamak ve sistem ısıl performansını belirlemek için analizler gerçekleştirilmiştir. 3 çeşit analiz yapılmıştır. Bunlardan birincisi, ilk sınır şartları ile yapılan analizlerdir. İkincisi, debinin ısıl performansa etkisinin incelenmesi için yapılan analizlerdir. Üçüncüsü ise, ortam sıcaklığının ısıl performansa etkisi için yapılan analizlerdir. Yapılan analizlerde, batarya modülündeki hücrelerin birbirine yakın sıcaklıklarda olması, modüldeki basınç kaybı, su çıkış sıcaklığı ve modüldeki maksimum sıcaklık gibi değerler göz önüne alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda, modüle giren debi arttıkça su çıkış sıcaklığı ve modüldeki maksimum sıcaklık değerinin azaldığı görülmektedir. Debi artışıyla birlikte modüldeki basınç kaybı ve hücreler arasındaki maksimum sıcaklık farkı arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, batarya modülünün içinde bulunduğu ortam sıcaklığı arttıkça, modülün maksimum sıcaklığı artmaktadır.

Elde edilen sonuçlar neticesinde, tasarlanan ve sonlu elemanlar analizleri yapılan batarya sisteminin su ile soğutma/ısıtma yöntemi ile istenilen elektriksel performansta çalışılacağı doğrulanmıştır.

Bu çalışmaya ek olarak, batarya sisteminin seviyesi arttırılarak batarya modülü değil de batarya paketi ya da kapsamlı batarya sisteminin ısıl yönetimini üzerine çalışmalar gerçekleştirilebilir ve çalışmalarda farklı deşarj oranları ısıl yük olarak hesaba katılabilir. Ayrıca yapılan çalışmalar deneysel çalışmalar ve uygulamalar ile doğrulanabilir.



KAYNAKLAR

- Andujar, J.M., Segura, F. 2009.** Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9: 2309–2322.
- Anonim, 2009.** Electric Car Companies. Electric and Hybrid Cars, <http://electricandhybridcars.com/index.php/pages/evmanufactures.html> (Erişim tarihi: 30.11.2018).
- Anonim, 2013.** Yakıt Pilleri. Elektrikport, <https://www.elektrikport.com/universite/yakit-pilleri/10188#ad-image-0> (Erişim tarihi: 10.11.2018).
- Anonim, 2015.** Fuel Economy Data. Energy Efficiency & Renewable Energy U.S. Department of Energy and U. S. Environmental Protection Agency, 2015, USA.
- Anonim, 2016.** Pillere Yeni Alternatif Süper Kapasitörler. Elektrikport, <https://www.elektrikport.com/universite/pillere-yeni-alternatif-super-kapasitorler/17354#ad-image-0> (Erişim tarihi: 10.11.2018).
- Anonim, 2017.** Find a car-Years: 2016-2017-Vehicle Type: Electric. Energy Efficiency & Renewable Energy U.S. Department of Energy and U. S. Environmental Protection Agency, 2017, USA.
- Anonim, 2018a.** Global Plug-in Sales for the 1st Half of 2018. EV Volumes, <http://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/> (Erişim tarihi: 27.11.2018).
- Anonim, 2018b.** Battery-electric vehicle sales worldwide in the 1st quarter 2018, by brand (in units). Statista, <https://www.statista.com/statistics/666130/global-sales-of-electric-vehicles-ytd-by-brand/> (Erişim tarihi: 20.11.2018).
- Anonim, 2018c.** Türkiye'de üretilen elektrikli otomobil Yenilikçilik Zirvesi'nde. Euronews, <https://tr.euronews.com/2018/10/18/turkiye-de-uretilen-elektrikli-otomobil-yenilikcilik-zirvesinde> (Erişim tarihi: 01.12.2018).
- Anonim, 2019a.** Lithium Battery Failures. Electropedia, https://www.mpoweruk.com/lithium_failures.htm (Erişim tarihi: 20.1.2019).
- Anonim, 2019b.** Electric Vehicle Thermal Management. Atoms Lab, http://www2.mie.utoronto.ca/labs/atoms/research_battery.html (Erişim tarihi: 20.2.2019).
- Asif, M., Muneer, T. 2007.** Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 11: 1388–1413.
- Basu, S., Hariharan K.S., Kolake, S.M., Song, T., Sohn, D.K., Yeo, T. 2016.** Coupled electrochemical thermal modelling of a novel Li-ion battery pack thermal management system. *Applied Energy*, 181:1–13.
- Chan, C.C., Bouscayrol, A., Chen, K. 2010.** Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59: 589–598.
- Chan, C.C. 2013.** The rise & fall of electric vehicles in 1828–1930: lessons learned. *Proceedings of the IEEE*, 101(1): 206 – 212.
- Çetin, A., 2016.** Elektrikli otomobil teknolojisi hakkında bir değerlendirme. Mühendishane, <https://muhendishane.org/elektrikli-otomobil-teknolojisi-hakkinda-bir-degerlendirme/> (Erişim tarihi: 15.11.2018).
- Denton, T. 2012.** Alternative fuel, hybrid and electric vehicles. Routledge, New York, USA, 703 pp.

- De Santiago, J., Bernhoff H., Ekergard B., Eriksson S., Ferhatovic S., Waters R., Leijon M. 2012.** Electrical Motor Drivelines in Commercial All-Electric Vehicles: A Review. *Vehicular Technology IEEE Transactions*, 61(2): 475–484.
- Dijk, M., Renato, J. O., Kemp, R. 2013.** The emergence of an electric mobility trajectory. *Energy Policy*, 52: 135–145.
- Dinçer, İ. 2010.** Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(2): 157–175.
- Dinçer, I., Hamut, H. S., Javani, N. 2017.** Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 457 pp.
- Ellis, B.L., Nazar, L.F. 2012.** Sodium and sodium-ion energy storage batteries. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 16: 168–177.
- Girishkumar, G., McCloskey, B., Luntz, A.C., Swanson, S., Wilcke, W. 2010.** Lithium-Air Battery: Promise and Challenges. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 1(14):2193-2203.
- Gürbüz, Y., Kulaksız, A. A. 2016.** Elektrikli Araçlar ile Klasik İçten Yanmalı Motorlu Araçların Çeşitli Yönlerden Karşılaştırılması. *DergiPark*, 6(2): 117-125.
- Kozak, M., Kozak, Ş. 2012.** Enerji Depolama Yöntemleri. *SDU International Technologic Science*, 4(2): 17-29.
- Kristoffersen, T.K., Capion, K., Meibom, P. 2011.** Optimal charging of electric drive vehicles in a market environment. *Applied Energy*, 88: 1940–1948.
- Larminie, J., Lowry, J. 2003.** Electric vehicle technology explained. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 296 pp.
- Li, J., Zhu, Z. 2014.** Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles. Master's Thesis, Department of Applied Mechanics, Division of Vehicle Engineering & Autonomous Systems, Chalmers University of Technology Göteborg, Sweden.
- Liu, R., Chen, J., Xun, J., Jiao, K., Du, Q. 2014.** Numerical investigation of thermal behaviors in lithium-ion battery stack discharge. *Applied Energy*, 132:288–297.
- Matthe, R., Turner, L., Mettlach, H., 2011.** VOLTEC Battery System for Electric Vehicle with Extended Range. *SAE International Journal of Engines*, 4(1):1944-1962.
- Motloch, C.G., Christophersen, J.P., Belt, J.R., Wright, R.B., Hunt, G.L., Sutula, R.A., Duong, T., Tartamella, T.J., Haskins, H.J., Miller, T.J. 2002.** PNGV battery testing procedures and analytical methodologies for HEV's. 2002 Future Car Congress, June 3, 2002, Arlington, USA.
- Muratoğlu, Y. 2017.** Elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon pillerin şarj durumlarının kokusuz kalman filtresi ile kestirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı, Mersin.
- Offer, G.J., Howey, D., Contestabile, M., Clague, R., Brandon, N.P. 2010.** Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. *Energy Policy*, 38(1):24–29.
- Pesaran, A.A., Kim, G., Keyser, M. 2009.** Integration Issues of Cells into Battery Packs for Plug-in and Hybrid Electric Vehicles. EVS 24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, May 13-16, 2009, Stavanger, Norway.
- Polat, B.D., Keleş, Ö. 2012.** Lityum İyon Pil Teknolojisi. *Metalurji Dergisi*, 162:42-48.
- Rad, M.S., Danilov, D.L., Baghalha, M., Kazemeini, M., Notten, P.H.L. 2013.** Thermal Modeling of Cylindrical LiFePO₄ Batteries. *Journal of Modern Physics*, 4:1-7.
- Sayın, A.A., Yüksel, İ. 2011.** Elektrikli Renault Fluence aracı, lityum-iyon bataryasının modellenmesi ve batarya yönetimi. *Mühendis ve Makine*, 52(616): 75-82.

Schaber, C., Mazza, P., Hammerschlag, R. 2004. Utility-Scale Storage of Renewable Energy. *The Electricity Journal*, 17: 21-29.

Shafiee, S., Topal, E. 2008. An econometrics view of worldwide fossil fuel consumption and the role of US. *Energy Policy*, 36: 775–786.

Tie, S.F., Tan, C.W. 2013. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20: 82–102.

Ünlü, N., Karahan, Ş., Tür, O., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A., Turhan, L., Akgün, F., Tırıs, M. 2003. Elektrikli Araçlar, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü, Gebze, 145 s.

Whittingham, M.S. 2012. History, Evolution, and Future Status of Energy Storage. *Proceedings of the IEEE Special Centennial Issue*, 100:1518–1534.

Wu, H., Chan, G., Choi, J.W., Ryu, I., Yao, Y., McDowell, M.T., Lee, S.W., Jackson, A., Yang, Y., Hu, L.B., Cui, Y. 2012. Stable cycling of double-walled silicon nanotube battery anodes through solid-electrolyte interphase control. *Nature Nanotechnology*, 7:309-314.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Gamze EĞİN
Doğum Yeri ve Tarihi : Orhaneli, 04/10/1993
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Ankara Hasanoğlan Atatürk Anadolu Öğretmen Lisesi
(2007-2011)
Lisans : Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği, (2011-2015)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Ermaksan Optoelektronik Ar-Ge Merkezi
(04.2015-04.2019)
Oyak-Renault Otomobil Fabrikaları (04.2019- Halen)

İletişim (e-posta) : gamzeegin@gmail.com

Yayınları :

Genç, M., Sheremet, V., Elçi, M., Kasapoğlu, A.E., Altuntaş, İ., Demir, İ., Eğin, G., İslamoğlu, S., Gür, E., Muzafferoğlu, N., Elagöz, S., Gülseren, O., Aydınlı, A. 2019.
Distributed contact flip chip InGaN/GaN blue LED; comparison with conventional LEDs.
Superlattices and Microstructures, 128:9-13