

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ENERJİ DEPOLAMA ÜNİTELİ TRİJENERASYON MİKRO ŞEBEKE
SİSTEMİNDE ÇİZELGELEME OPTİMİZASYONU: HASTANE UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Anıl DOĞAN

İşletme Anabilim Dalı

İşletme Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. M. Özgür KAYALICA

Eş Danışman: Doç. Dr. Ayşe Aylin BAYAR

2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ENERJİ DEPOLAMA ÜNİTELİ TRİJENERASYON MİKRO ŞEBEKE
SİSTEMİNDE ÇİZELGELEME OPTİMİZASYONU: HASTANE UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Anıl DOĞAN
(403181001)**

İşletme Anabilim Dalı

İşletme Yüksek Lisans Programı

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Özgür KAYALICA
Eş Danışman: Doç. Dr. Ayşe Aylin BAYAR**

2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 403181001 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Anıl DOĞAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ENERJİ DEPOLAMA ÜNİTELİ TRİJENERASYON MİKRO ŞEBEKE SİSTEMİNDE ÇİZELGELEME OPTİMİZASYONU: HASTANE UYGULAMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. M. Özgür KAYALICA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Doç. Dr. Ayşe Aylin BAYAR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Cumhur Enis EKİNCİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Üner ÇOLAK
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi İrem Düzdar ARGUN
Düzce Üniversitesi

Teslim Tarihi : 21 Mayıs 2021
Savunma Tarihi : 28 Mayıs 2021





Aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek Lisans hayatım boyunca ve tez çalışması süreçlerinde bana her türlü desteği veren saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. M. Özgür Kayalica'ya çok teşekkür ederim. Bilgi birikimleri ve tecrübeleriyle bana destek olan eş danışman hocam Doç. Dr. A. Aylin Bayar'a teşekkür ederim. Yüksek Lisans'a başladığım andan itibaren beni motive eden, tez çalışmasının bütün süreçlerinde desteğini benden esirgemeyen değerli arkadaşım Arş. Gör. Denizhan Güven'e çok teşekkür ederim. Beni destekleyen ve bana değer veren bütün arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca bana güvenen, maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda duran aileme sonsuz teşekkür ederim.

Özenle ve ilgiyle yazdığım “Enerji Depolama Üniteli Trijenerasyon Mikro Şebeke Sisteminde Çizelgeleme Optimizasyonu: Hastane Uygulaması” adlı yüksek lisans tez çalışmamın okuyan herkese faydalı olmasını dilerim.

2021

ANIL DOĞAN
(Enerji Sistemleri Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı ve Önemi	1
1.2 Tez Akış Şeması.....	2
2. MİKRO ŞEBEKELER VE ENERJİ DEPOLAMA: TEMEL KAVRAMLAR5	
2.1 Mikro Şebekeler	5
2.1.1 Enerji güvenliği.....	6
2.1.1.1 Hava koşulları	7
2.1.1.2 Basamaklı kesintiler	7
2.1.1.3 Siber ve fiziksel saldırılar	8
2.1.2 Ekonomik fayda	8
2.1.2.1 Altyapı maliyeti tasarrufu	8
2.1.2.2 Yakıt tasarrufu.....	9
2.1.2.3 Yan hizmetler	9
2.1.3 Temiz enerji entegrasyonu	10
2.2 Mikro Şebekelerin Teknik Özellikleri.....	12
2.3 Mikro Şebeke Piyasasının Özellikleri	15
2.4 Mikro Şebeke Türleri	21
2.4.1 Kampüs tipi mikro şebekeler	21
2.4.2 Ana şebekeden bağımsız ve ada tipi mikro şebekeler.....	23
2.4.3 Ticari ve endüstriyel mikro şebekeler	24
2.4.4 Kamu, topluluk ve askeri mikro şebekeleri.....	25
2.5 Enerji Depolama Sistemleri.....	26
2.6 Enerji Depolama Sistemlerinin Sınıflandırılması	33
2.6.1 Mekanik depolama	34
2.6.1.1 Volanlar (Flywheels).....	34
2.6.1.2 Hazneli pompalı hidrolik enerji depolama (PHES)	35
2.6.1.3 Sıkıştırılmış hava ile depolama (CAES)	36
2.6.2 Termal depolama sistemleri (TES)	37
2.6.3 Elektrokimyasal enerji depolama (EESS).....	37
2.6.3.1 Kapasitörler	38
2.6.3.2 Yakıt hücreleri.....	39
2.6.3.3 Bataryalar	40

2.6.4 Süperiletken manyetik enerji depolama (SMES)	45
2.7 Enerji Depolama Sistemlerinin Karşılaştırılması	45
2.7.1 Teknik performans	48
2.7.1.1 Enerji ve güç yoğunluğu	49
2.7.1.2 Çevrim ömrü ve verimliliği	51
2.7.1.3 Depolama kapasitesi ve deşarj süresi	52
2.7.1.4 Teknolojik olgunluk	53
2.7.2 Ekonomik çerçeve	55
2.7.3 Çevresel etkiler	61
3. LİTERATÜR TARAMASI	65
3.1 Mikro Şebekelerde Optimizasyon Çalışmaları	65
3.1.1 Yatırım problemleri	67
3.1.2 Tasarım problemleri	68
3.1.3 Çizelgeleme problemleri	70
3.2 Hastanelerde Enerji Yönetimi ve Optimizasyonu Çalışmaları	78
3.3 Elektrikli Araçlarda Batarya Sistemleri	83
3.3.1 EV bataryalarının özellikleri	84
3.3.2 EV bataryaların yaşam döngüleri	86
3.3.3 İkinci yaşam döngüsündeki EV bataryalarının kullanıldığı çalışmalar	89
4. OPTİMİZASYON SİSTEM ÖNERİSİ	95
4.1 Problem Tanımı	95
4.2 Yöntem	99
4.3 Model	101
4.4 Uygulanan Veriler ve Varsayımlar	108
4.5 Model Çıktıları	115
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	117
KAYNAKLAR	121
EKLER	139
ÖZGEÇMİŞ	141

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AC	: Alternative Current (Alternatif Akım)
CAES	: Compressed Air Energy Storage (Sıkıştırılmış Hava Enerji Depolama Sistemleri)
CHP	: Combined Heat and Power (Kombine Isı ve Güç Sistemleri)
DER	: Distributed Energy Resources (Dağıtılmış Enerji Kaynakları)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DMFC	: Direct Methanol Fuel Cell (Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi)
DoD	: Depth of Discharge (Deşarj Derinliği)
DP	: Doğrusal Programlama
EDS	: Enerji Depolama Sistemleri
EES	: Electrochemical Energy Storage Systems (Elektrokimyasal Enerji Depolama Sistemleri)
EIA	: Energy Information Administration (Enerji Bilgi Yönetim İdaresi)
EMI	: Electromagnetic Interference (Elektromanyetik Girişim)
ENTSO-E	: European Network of Transmission System Operators (Avrupa Elektrik İletim Sistemi İşleticileri Birliği)
EPIAŞ	: Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketi
FED	: Federal Reserve (ABD Merkez Bankası-Federal Rezerv)
HOMER	: Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables
ISS	: International Space Station (Uluslararası Uzay İstasyonu)
KPI	: Key Performance Indicator (Anahtar Performans Göstergeleri)
KTDP	: Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama
KTDOP	: Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama
LCOE	: Levelized Cost Of Energy (Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti)
MCFC	: Molten Carbonate Fuel Cell (Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi)
NASA	: National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
NPV	: Net Present Value (Net Bugünkü Değer)
PCM	: Phase-Change Material (Faz Değişim Materyali)

PEMFC	:Proton-Exchange Membrane Fuel Cell (Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi)
PV	: Photovoltaic (Fotovoltaik)
SCADA	: Supervisory Control And Data Acquisition (Merkezi Denetim ve Veri Toplama)
SMES	: Superconducting Magnetic Energy Storage (Süperiletken Manyetik Enerji Depolama Sistemi)
SoC	: State of Charge (Şarj Durumu)
SOFC	: Solid Oxide Fuel Cell (Katı Oksit Yakıt Hücresi)
SWOT	: Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats (Güçlü Yanlar, Zayıflıklar, Fırsatlar, Tehditler)
TCM	: Thermochemical Material (Termokimyasal Materyali)
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TES	: Thermal Energy Storage (Termal Enerji Depolama)
TSKB	: Türkiye Sınai Kalkınma Bankası
UPS	: Uninterruptible Power Supply (Kesintisiz Güç Kaynağı)
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları

SEMBOLLER

$E_{\text{Ş,B}}^t$	: Bataryayı şarj etmek için şebekeden alınan elektrik (kWh)
$E_{\text{Ş,T}}^t$	: Talebi karşılamak için şebekeden alınan elektrik (kWh)
$E_{\text{Ş,EÇ}}^t$	: Elektrikli çiller için şebekeden alınan elektrik (kWh)
$E_{\text{PV,B}}^t$	: Bataryayı şarj etmek için PV sisteminden alınan elektrik (kWh)
$E_{\text{PV,T}}^t$	: Talebi karşılamak için PV sisteminden alınan elektrik (kWh)
$E_{\text{PV,EÇ}}^t$	: Elektrikli çiller için PV sisteminden alınan elektrik (kWh)
$E_{\text{MT,B}}^t$	: Bataryayı şarj etmek için mikro türbinden alınan elektrik (kWh)
$E_{\text{MT,T}}^t$	: Talebi karşılamak için mikro türbinden alınan elektrik (kWh)
$E_{\text{MT,EÇ}}^t$	: Elektrikli çiller için mikro türbinden alınan elektrik (kWh)
$H_{\text{İK,AS}}^t$	: Absorpsiyonlu soğutucu için ısı kazanım cihazından alınan ısı (kWh)
$H_{\text{İK,IE}}^t$	: Isı eşanjörü için ısı kazanım cihazından alınan ısı
$H_{\text{İK,TD}}^t$	: Termal depolama sisteminde depolanması için ısı kazanım cihazından alınan ısı (kWh)
$H_{\text{GK,AS}}^t$	: Absorpsiyonlu soğutucu için gaz kazanından alınan ısı (kWh)
$H_{\text{GK,IE}}^t$	: Isı eşanjörü için gaz kazanından alınan ısı (kWh)
$H_{\text{GK,TD}}^t$	: Termal depolama sisteminde depolanması için gaz kazanından alınan ısı (kWh)
$E_{\text{DŞR,T}}^t$	: Talebi karşılamak için bataryadan çekilen elektrik (kWh)
$E_{\text{DŞR,EÇ}}^t$	: Elektrikli çiller için bataryadan çekilen elektrik (kWh)
$H_{\text{DŞR,AS}}^t$	: Absorpsiyonlu soğutucu için termal depolama sisteminden çekilen ısı (kWh)
$H_{\text{DŞR,IE}}^t$	: Isı eşanjörü için termal depolama sisteminden çekilen ısı (kWh)
$U_{\text{ŞR,B}}^t$	: Batarya şarj değişkeni
$U_{\text{DŞR,B}}^t$	: Batarya deşarj değişkeni
$U_{\text{ŞR,TD}}^t$	: Termal depolama şarj değişkeni
$U_{\text{DŞR,TD}}^t$	: Termal depolama deşarj değişkeni
COPEÇ	: Elektrikli çillerin performans katsayısı
COPAS	: Absorpsiyonlu soğutucunun performans katsayısı

η_{IE}	: Isı eşanjörü verimliliği (%)
η_{GK}	: Gaz kazanı verimliliği (%)
$\eta_{MT,E}$	: Mikro türbin elektrik verimliliği (%)
$\eta_{MT,IK}$	: Mikro türbin ısı verimliliği (%)
$\eta_{B,SR}$	: Batarya şarj verimliliği (%)
$\eta_{B,DŞR}$	: Batarya deşarj verimliliği (%)
$\eta_{TD,SR}$	: Termal depolama şarj verimliliği (%)
$\eta_{TD,DŞR}$	: Termal depolama deşarj verimliliği (%)
H_{DG}	: Doğal gazın ısı değeri (kWh/m ³)
P_{DG}^t	: Doğal gaz fiyatı (\$/kWh)
$P_{şebeke}^t$	: Şebeke elektriği fiyatı (\$/kWh)
$k_{td,kayıp}$	: Termal depolama için kendi kendine deşarj oranı (%/h)
$k_{b,kayıp}$	: Batarya depolama için kendi kendine deşarj oranı (%/h)
γ	: Batarya amortismanının kontrollü aşınma maliyeti ile ilişkisinin miktarı (%)
N	: Batarya döngü sayısı
$C_{sermaye}$	: Bataryanın sermaye maliyeti (\$/kWh)
$R_{iB,B}$	: Batarya işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
C_{CO2}	: Şebeke elektrik üretiminden salınan karbon emisyonlarının sosyal maliyeti (\$/kWh)
L_{TD}	: Termal depolama güvenlik limiti (kWh)
L_B	: Batarya güvenlik limiti (kWh)
$L_{ş}$	: Şebeke elektrik limiti (kWh)
Cap_{PV}	: Güneş paneli elektrik üretim kapasitesi (kWh)
Cap_B	: Batarya kapasitesi (kWh)
Cap_{TD}	: Termal depolama kapasitesi (kWh)
$C_{iB,MT}$	: Mikro türbin işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
$C_{iB,GK}$	: Gaz kazanı işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
$C_{iB,IE}$	: Isı eşanjörü işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
$C_{iB,AS}$	: Absorpsiyonlu soğutucu işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
$C_{iB,EÇ}$	: Elektrikli çiller işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
$C_{iB,PV}$	: PV sistemi işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
$C_{iB,TD}$	: Termal depolama işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
α	: Türkiye için CO ₂ sosyal maliyeti (\$/ton)
β_{DG}	: Doğal gazın CO ₂ miktarı (g CO ₂ /kWh)
C_{carb}^t	: Şebeke elektriği kullanımında salınan CO ₂ miktarı (g CO ₂ /kWh)

D_E^t	: Hastanenin anlık elektrik talebi (kWh)
D_C^t	: Hastanenin anlık soğutma talebi (kWh)
D_H^t	: Hastanenin anlık ısıtma talebi (kWh)
SoC^t	: Bataryadaki anlık enerji durumu (kWh)
SoS^t	: Termal depolama sistemindeki anlık enerji durumu (kWh)
E_{kritik}^t	: Hastane kritik birimlerinin elektrik yükü (kWh)
C_{kritik}^t	: Hastane kritik birimlerinin soğutma yükü (kWh)
H_{kritik}^t	: Hastane kritik birimlerinin ısıtma yükü (kWh)
E_{ybu}^t	: Yoğun bakım ünitelerinin elektrik yükü (kWh)
E_{ao}^t	: Ameliyathanelerin elektrik yükü (kWh)
E_{res}^t	: Resüsitasyon birimlerinin elektrik yükü (kWh)
C_{ybu}^t	: Yoğun bakım ünitelerinin soğutma yükü (kWh)
C_{ao}^t	: Ameliyathanelerin soğutma yükü (kWh)
C_{res}^t	: Resüsitasyon birimlerinin soğutma yükü (kWh)
H_{ybu}^t	: Yoğun bakım ünitelerinin ısıtma yükü (kWh)
H_{ao}^t	: Ameliyathanelerin ısıtma yükü (kWh)
H_{res}^t	: Resüsitasyon birimlerinin ısıtma yükü (kWh)
DoD^t	: Batarya anlık deşarj derinliği (%)
f_{age}^t	: Batarya anlık yıpranma maliyeti (\$/kWh)
f_{bkm}^t	: Batarya anlık işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
$C_{IB,TD}^t$	: Termal depolama sistemi anlık işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
$C_{IB,MT}^t$	: Mikro türbin anlık işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
$C_{IB,GK}^t$	: Gaz kazanı anlık işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
$C_{IB,IE}^t$	: Isı eşanjörü anlık işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
$C_{IB,AS}^t$	: Absorbsiyonlu soğutucu anlık işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
$C_{IB,EÇ}^t$	: Elektrikli çiller anlık işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
$C_{IB,PV}^t$	: PV sistemi anlık işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
$R_{IB,B}$	: Batarya işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
$R_{IB,MT}$	: Mikro türbin işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
$R_{IB,GK}$	: Gaz kazanı işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
$R_{IB,IE}$	: Isı eşanjörü işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
$R_{IB,AS}$	: Absorpsiyonlu soğutucu işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)

R_{İB,EÇ}	: Elektrikli çiller işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
R_{İB,PV}	: PV sistemi işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
R_{İB,TD}	: Termal depolama sistemi işletme ve bakım maliyeti (\$/kWh)
Q_{alan}	: Hastanenin alan soğutma ve ısıtması için enerji ihtiyacı (kWh)
Q_{iletim}	: Hastane binasının toplam iletim ısı kaybı (kWh)
Q_{hava kaçağı}	: Hava kaçaklarından dolayı oluşan ısı kaybı (kWh)
Q_{hava akışı}	: Hava akışı ile iletilen ısı (kWh)
Q_c	: Bina bileşeninden geçen iletim ısı kaybı (kWh)
U_i	: Bina bileşeninin ısıl geçirgenlik katsayısı (W/m ² K)
A_i	: Bina bileşeninin yüzey alanı (m ²)
T_{iç}	: İç hava sıcaklığı (°C)
T_{dış}	: Dış hava sıcaklığı, (°C)
Q_{hava kaçağı}	: Hava kaçağı ısı kaybı için gerekli enerji (kWh)
ρ_i	: Hava yoğunluğu (kg/m ³)
C_{pi}	: Havanın özgül ısı kapasitesi (Ws/kgK)
q_{v,hava kaçağı}	: Hava kaçağı akışı (m ³ /s)
q₅₀	: Bina kabuğunun hava kaçağı numarası (m ³ /hm ²)
ACH	: Hava değişikliği faktörü
NNA_n	: Yıllık net nakit akışı (\$)
k	: Yıllık faiz oranı (%)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Mikro şebekelerin faydalarının özeti.....	11
Çizelge 2.2 : Mikro şebekeler ile uyumlu yenilenebilir enerji teknolojileri.....	14
Çizelge 2.3 : Mikro şebekeler ile uyumlu konvansiyonel enerji teknolojileri.....	14
Çizelge 2.4 : Mikro şebeke türlerinin benimsenme faktörleri	21
Çizelge 2.5 : Kampüs tipi mikro şebeke örnekleri	22
Çizelge 2.6 : Ana şebekeden bağımsız ve ada tipi mikro şebeke örnekleri.....	23
Çizelge 2.7 : Ticari ve endüstriyel alanlarda kullanılan mikro şebeke örnekleri	24
Çizelge 2.8 : Kamu, topluluk ve askeri mikro şebeke örnekleri.....	26
Çizelge 2.9 : Enerji depolama teknolojilerinin enerji uygulamaları ve hizmetlerine uygunluklarının karşılaştırılması	32
Çizelge 2.10 : Şebeke ölçeğinde enerji depolama sistemleri için SWOT analizi.....	47
Çizelge 2.11 : Batarya sistemleri için 2018 maliyet parametreleri ve bulgularından yola çıkarak 2025 tahminlerinin özeti	58
Çizelge 2.12 : Mekanik ve elektriksel depolama sistemleri için 2018 maliyet parametreleri ve bulgularından yola çıkarak 2025 tahminlerinin özeti ..	59
Çizelge 2.13 : Enerji depolama teknolojilerinin teknik ve ekonomik özelliklerinin karşılaştırılması.....	60
Çizelge 2.14 : Farklı tiplerdeki batarya depolama sistemlerinin çevresel etkileri.....	63
Çizelge 3.1 : Yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemlerinin kullanıldığı mikro şebekelerde yatırım optimizasyonu çalışmaları.....	68
Çizelge 3.2 : Yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemlerinin kullanıldığı mikro şebekelerde tasarım optimizasyonu çalışmaları.....	70
Çizelge 3.3 : Yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemlerinin kullanıldığı mikro şebekelerde çizelgeleme optimizasyonu çalışmaları.....	77
Çizelge 3.4 : Hastanelerde enerji yönetimi ve optimizasyonu çalışmaları.....	82
Çizelge 3.5 : İkinci ömürlü bataryaların kullanıldığı örnek proje uygulamaları	91
Çizelge 4.1 : Hastanenin elektrik kesintisi durumunda kritiklik düzeyleri	97
Çizelge 4.2 : Hastanelerdeki uygulamaların elektrik kesintisi durumundaki kritiklik düzeyleri.....	98
Çizelge 4.3 : Karar değişkenleri ve açıklamaları.....	102
Çizelge 4.4 : Parametreler ve açıklamaları	103
Çizelge 4.5 : İletim ısı kaybı hesabındaki parametreler ve açıklamaları.....	110
Çizelge 4.6 : Hava kaçağı ısı kaybı parametreleri ve açıklamaları.....	111
Çizelge 4.7 : Hava kaçağı akış hesabı parametreleri ve açıklamaları.....	111
Çizelge 4.8 : İnşaat ve uygulama yöntemlerine bağlı olarak farklı binalar için tipik hava kaçağı sayıları (n50)	112
Çizelge 4.9 : Enerji üretim kaynağına bağlı olarak CO2 salım miktarı.....	114
Çizelge 4.10 : Sistem ilk yatırım maliyetleri	115
Çizelge 5.1 : Model çıktılarının özeti	117



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Tez çalışmasının organizasyonu için akış şeması	3
Şekil 2.1 : Mikro şebeke sistemi yapısının şematik gösterimi	6
Şekil 2.2 : ABD’deki mikro şebekelerde yakıt türüne bağlı üretim teknolojileri.....	15
Şekil 2.3: Küresel çapta bölgelere göre mikro şebeke kapasitesi (MW).....	16
Şekil 2.4 : 2011-2018 yıllar arası mikro şebeke gelirleri, ABD ve küresel çapta milyar dolar cinsinden kıyaslanması	17
Şekil 2.5 : Dünya pazarında mikro şebekelerin iş modeli olarak dağılımı	19
Şekil 2.6 : Mikro şebeke türlerinin kapasitelerinin küresel pazar payları	20
Şekil 2.7 : Enerji depolama sistemlerinin sağladığı hizmetler	28
Şekil 2.8 : Enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması.....	33
Şekil 2.9 : Küresel enerji depolama sistemleri kapasitesi oranları	34
Şekil 2.10 : Volan depolama sistemi bileşenleri.....	35
Şekil 2.11 : Sıkıştırılmış hava ile depolama sistem şeması	36
Şekil 2.12 : Kapasitör bileşenlerinin şematik gösterimi	39
Şekil 2.13 : Yakıt hücresinin şematik gösterimi.....	40
Şekil 2.14 : Dünya çapında batarya sistemlerinin kurulu kapasite karşılaştırması....	41
Şekil 2.15 : Kurşun asit pillerin çalışma tepkimesi ve şeması.....	43
Şekil 2.16 : Li-iyon pil çalışma şeması.....	44
Şekil 2.17: SMES sistem şeması	45
Şekil 2.18 : EDS'nin güç çıkışı ve modül boyutlandırması ile karşılaştırılması.....	49
Şekil 2.19 : EDS'nin enerji ve güç yoğunluklarının hacimsel olarak karşılaştırılması.....	50
Şekil 2.20 : EDS'nin enerji ve güç yoğunluklarının kütleli olarak karşılaştırılması.....	50
Şekil 2.21: EDS'nin çevrim ömrü ve çevrim verimliliği karşılaştırılması	52
Şekil 2.22 : Enerji depolama sistemlerinin deşarj sürelerinin karşılaştırılması.....	53
Şekil 2.23 : EDS'nin teknoloji hazırlık düzeyine bağlı olarak teknolojik olgunluk süreci.....	54
Şekil 3.1 : Senaryolara göre küresel EV stoku, 2019, 2025 ve 2030.....	83
Şekil 3.2 : Senaryolara göre küresel EV satışları, 2019, 2025 ve 2030	84
Şekil 3.3 : Li-iyon bataryaların kWh başına maliyetleri	85
Şekil 3.4 : EV bataryaların yaşam döngülerinin şematik gösterimi	87
Şekil 3.5 : 2018-2025 dünyada Li-iyon pillerin geri dönüşüm miktarları (ton)	89
Şekil 3.6: İkinci yaşam döngüsündeki Li-iyon bataryaların senaryolara göre batarya talepleri	90
Şekil 3.7 : EV bataryaların kapasite kaybı	93
Şekil 4.1 : Modelde kullanılan trijenerasyon hastane mikro şebeke sisteminin şematik gösterimi	99
Şekil 4.2 : Hastanenin saatlik elektrik talebi grafiği.....	109
Şekil 4.3 : Hastanenin saatlik sıcaklık grafiği	110
Şekil 4.4 : Hastanenin saatlik ısıtma talebi	114

Şekil 4.5 : Hastanenin saatlik soğutma talebi.....	114
Şekil 4.6 : Saatlik tasarruf/zarar grafiği	116



ENERJİ DEPOLAMA ÜNİTELİ TRİJENERASYON MİKRO ŞEBEKE SİSTEMİNDE ÇİZELGELEME OPTİMİZASYONU: HASTANE UYGULAMASI

ÖZET

Teknolojik gelişmeler ve dijitalleşmenin gittikçe hız kazanması ile enerji ihtiyacı artmaya devam etmektedir. Dünya Enerji Görünümü raporlarındaki olağan durum senaryolarına göre talep edilen enerjinin sağlanması amacıyla fosil yakıtların kullanılmaya devam edilmesi ile hava kirliliği giderek artarak küresel ısınmaya sebep olacağı belirtilmiştir. Fosil yakıtların sınırlı olması nedeniyle ülkeler arasında enerji rekabeti ortamı oluşmaktadır. Bu enerji rekabeti sayesinde karbonsuzlaşma, enerji tasarrufu, verimlilik ve sürdürülebilirlik kavramları değer kazanmaya başlamıştır.

Karbondioksit salınımının azaltılması ve küresel ısınmanın önüne geçilebilmesi için yenilenebilir enerji kaynakları en iyi çözüm olarak gösterilmektedir. Yenilenebilir enerji sistemlerinin giderek azalan enerji üretim maliyetleri ve teşvik edici politikalar sayesinde hızla büyümeye devam etmektedir. Böylece karar vericilerin yenilenebilir enerji sistemlerine yatırım yapmasının önü açılmaktadır.

Yenilenebilir enerji sistemlerinin aralıklı üretiminden dolayı belirsizlikler ve dengesizlikler bulunmaktadır. Aralıklı üretimden kaynaklı belirsizliklerin giderilmesi, enerji yönetimi, enerji arz güvenliği ve enerji kalitesinin sağlanması problemlerini ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle yenilenebilir enerji sistemleri, konvansiyonel enerji üretim sistemlerinin tam ikamesi olamamaktadır. Bu problemlerin çözümü olarak enerji depolama sistemleri gösterilmektedir. Çoğu güç uygulamaları ile entegre çalışabilen enerji depolama sistemlerinin sağladığı faydalar göz önünde bulundurulduğunda enerji depolama sistemleri teknolojik olarak gelişmekte ve giderek düşmekte olan maliyetleri ile yaygınlaşmaya devam etmektedir.

Sürdürülebilir enerji yönetimi ve arz güvenliğinin sağlanması amacıyla dünya çapındaki güç uygulamalarında merkezsizleştirme, karbondan arındırma ve demokratikleşme eğilimleri ortaya çıkmıştır. Böylece ana şebekeye bağlı veya bağımsız olarak çalışabilen, enerji depolama, yenilenebilir ve konvansiyonel enerji üretim sistemlerinin entegre edilebildiği mikro şebeke uygulamalarının sayısı giderek artmaktadır.

Mikro şebeke sistemi, dağıtılmış enerji kaynakları olarak güneş panelleri, rüzgâr türbinleri, kombine ısı ve güç santralleri, küçük doğal gaz yakıtlı jeneratörler, dizel jeneratörler, elektrikli araçlar, iklimlendirme sistemleri ve enerji depolama sistemleri gibi yük kontrolünün sağlanabildiği sistemlerle entegre bir şekilde çalışabilmektedir. Böylelikle son kullanıcının talep ettiği elektrik, ısıtma ve soğutma yükü talepleri ana şebekeden bağımsız bir şekilde kontrol edilebilmektedir.

Enerji depolama sistemlerinin entegre edildiği mikro şebekeler sayesinde elektrik kesintilerine karşı enerji güvenliği sağlanmakta, çevre dostu enerji üretimi yapılmakta, yakıt tasarrufu, altyapı maliyet tasarrufu ve yardımcı enerji hizmetleri ile ekonomik fayda sağlanmaktadır.

Mikro şebekelerde istenilen güç uygulamasının karakteristiğine göre kullanılabilecek birçok enerji depolama sistemi mevcuttur, fakat güç uygulamalarındaki hizmetlerin hepsinin karşılandığı bir enerji depolama sistemi bulunmamaktadır. Her enerji depolama sisteminin birbirleri ile karşılaştırıldığında teknik performans, ekonomik çerçeve ve çevresel etkiler kapsamında avantajlı ve dezavantajlı olduğu durumlar söz konusudur. Bu nedenle kurulması planlanan güç uygulamalarında seçilecek olan enerji depolama sistemleri, uygulamanın ihtiyaçlarını ve gerekli kısıtlarını karşılaması gerekmektedir.

Dünya genelinde fosil yakıtların tükenmeye başlaması ve küresel ısınmadan kaynaklı iklim değişiklikleri nedeniyle karayolu taşımacılığında alternatif olarak elektrikli araçlar gösterilmektedir. Sürdürülebilir kalkınma senaryolarında 2030 yılına gelindiğinde elektrikli araçların pazar payı yüzde 30 ve araç stoğu 250 milyon adet olacağı tahmin edilmektedir. Elektrikli araç pazarının büyümesindeki en önemli etkenlerden biri olarak gittikçe maliyetleri azalan Lityum-iyon bataryalar gösterilmektedir.

Lityum-iyon bataryalar yüksek enerji yoğunluğu, düşük oranda kendi kendine deşarj olma ve düşük bakım maliyetleri sayesinde elektrikli araçlarda en fazla kullanılan batarya sistemleridir. Diğer yandan yapılan araştırmalara göre Li-iyon bataryaların kullanım ömürleri elektrikli aracın özelliklerine ve sürücüye bağlı olarak 8-15 yıl arasında olmakta ve yüzde 80 kapasiteye ulaştığında elektrikli araçlardaki kullanımı sonlandırılmaktadır. Elektrikli araçlardan çıkarılan bataryaların bertaraf edilmesi büyük bir ekonomik kayıp oluşturmaktadır. Ayrıca batarya sistemleri, ikamesi az olan materyaller içerdiği için geri dönüştürme maliyetleri oldukça yüksektir. Bu nedenle elektrikli araçlarda kullanım ömrünü tamamlamış bataryaların ekonomik değerinin en üst düzeye çıkarılması için ikinci yaşam döngüsünde sabit depolama sistemi olarak kullanılması önerilmektedir.

Bu tezin amacı, insan hayatı üzerinde kritik öneme sahip hastanelerin elektrik kesintileri ve enerji kalitesi problemlerine karşı enerji arz güvenliğinin sağlanmasıdır. Bununla birlikte hastanenin talep ettiği kritik elektrik, ısıtma ve soğutma yüklerinin güvenliği için trijenerasyon mikro şebeke sistemi tasarlamaktır. Sistemde enerji depolama sistemi olarak termal enerji ve ikinci yaşam döngüsündeki Lityum-iyon elektrikli araç bataryalarından oluşan depolama sistemleri dahil edilmiştir. Enerji üretim sistemi olarak güneş paneli, mikro türbin ve gaz kazanı kullanılmıştır. Soğutma yüklerinin sağlanması için ise absorpsiyonlu soğutucu ve elektrikli çiller sistemleri entegre edilmiştir. Diğer yandan güç ve ısı kontrol üniteleri ile sistemler arasındaki enerji yönlendirilerek hastanenin talep ettiği elektrik, ısı ve soğutma talepleri karşılanmaktadır.

Tasarlanan trijenerasyon hastane mikro şebeke sisteminin en ekonomik şekilde çalışması ve kritik enerji yüklerinin her zaman karşılanabilmesi için çizelgeleme optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Çizelgeleme optimizasyonu ile sistem bileşenlerinden alınan ve yönlendirilen enerji yüklerinin kontrolü sağlanacaktır. Önerilen çizelgeleme optimizasyon modeli ile elektrik kesintisi ve enerji kalitesi problemlerine karşı hastanenin enerji güvenliğinin sağlanmasının yanı sıra yenilenebilir enerji ve depolama sistemlerinin entegre edilmesi ile enerji tasarrufu elde edilerek hem ekonomik hemde çevreci bir sistem tasarlanması hedeflenmiştir.

Hastanenin çizelgeleme optimizasyonu için bir yıldaki saatlik elektrik tüketimi ve sıcaklık verileri kullanılmıştır. Optimizasyon probleminin çözdürülmesi amacıyla karma tamsayılı doğrusal programlama kullanılarak Excell Solver programında kodlanmıştır. Yapılan araştırma ile hastane birimleri arasında kesintisiz enerji talebinin en yüksek olduğu ameliyathane, resüsitasyon birimi ve yoğun bakım ünitelerinin kritik enerji yükü talepleri modele dâhil edilmiştir. Oluşturulan modelin uygulanması için 197 yataklı, 4 ameliyathaneli, 2 resüsitasyon birimli ve 13 yoğun bakım üniteli hastane seçilmiştir. Hastanenin kat planlarından ve sıcaklık verilerinden yola çıkarak alan soğutma ve ısıtma için enerji ihtiyacı hesabı yapılmış ve bir yıldaki saatlik ısıtma ve soğutma yük talepleri belirlenmiştir.

Kurulan model ile doğal gaz, batarya yıpranma, işletme ve bakım, şebeke elektriği ve CO₂ salınımindan kaynaklı oluşan sosyal maliyetlerden oluşan amaç fonksiyonu optimize edilmiştir. Model çıktısında 8670 saat için yıllık toplam enerji maliyeti, batarya depolama sisteminin deşarj sayısı ve CO₂ salımı tasarruf miktarları hesaplanmıştır. Tasarruf edilen CO₂ salımının ekonomik değeri yapılan araştırmalar çerçevesinde belirlenmiştir. Bununla birlikte yapılan araştırmaya göre trijenerasyon sistemi için ilk yatırım maliyeti belirlenmiş ve geri ödeme süresi hesabı yapılmıştır. Yıllık net nakit akışı olarak elde edilen tasarruf miktarı kullanılarak sistemin ne kadar sürede amorti edeceği hesaplanmıştır.

Tez çalışmasının sonucunda, insan hayatını tehlikeye atabilecek elektrik kesintilerine karşı batarya ve termal enerji depolama sistemleri sayesinde hastanenin kritik enerji yüklerini sürekli olarak karşıladığı gösterilmiştir. Diğer yandan şebekeden çekilen yüksek elektrik fiyatına karşı batarya sistemi deşarj edilerek yüksek miktarda elektrik maliyeti tasarrufu elde edilmiştir. Bunun yanı sıra mikro türbinden çıkan ısı enerjisi ise ısı kazanım cihazı ile tekrardan değerlendirilmiştir. Gaz kazanı ve mikro türbinden yönlendirilen ısı enerjisi, termal depolama sisteminde depolanmış ve gerekli durumlarda depolama sistemi deşarj edilerek kritik ısıtma ve soğutma yük talepleri karşılanmıştır. Böylece yüksek miktarda CO₂ emisyon tasarrufu elde edilmiştir.

Elde edilen bu sonuçlar ile birlikte sağlık sektörü haricindeki diğer kamu, hizmet ve endüstri sektöründeki tesislerde de enerji güvenliği ve tasarrufunun sağlanması konusunda enerji depolamalı trijenerasyon mikro şebekesinin önemi gösterilmiştir. Elektrikli araçlarda kullanımı sonlandırılmış yüzde 80 kapasitesini koruyan Lityum-iyon bataryaların yüksek geri dönüşüm ücretlerine karşı tekrardan sabit depolama sistemi olarak kullanılması ile önemli bir tasarruf kalemi elde edilmektedir. Bununla birlikte yakın gelecekte elektrikli araç sayısının artmasına bağlı olarak ikinci yaşam döngüsündeki bataryaların sabit depolama sistemi olarak kullanıldığı güç uygulamalarının sayısı artarak ülke ekonomisine fayda sağlayacaktır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda hastanenin ilk kurulumundan itibaren kurulum yapılacak bölgenin özelliklerine göre enerji kaynağının seçilmesi, sistem boyutlandırılması ve tasarımının optimizasyonu çalışmaları yapılabilir. İlerleyen zamanlarda atık batarya pazarı oluşması ile yaşam döngüsü maliyet analizi yapılabilir; sistem boyutlandırma optimizasyonu ve enerji arbitrajı hizmetinin modele dâhil edildiği yatırım fizibilitesi çalışmaları yapılabilir. Ülkemizde karbon vergilendirme sistemi ve karbon piyasasının oluşması ve optimizasyon modeline eklenmesi ile birlikte elde edilen tasarrufun ekonomik değeri daha güncel olabilecektir.



SCHEDULING OPTIMIZATION IN THE TRIGENERATION MICROGRID SYSTEM WITH ENERGY STORAGE UNIT: HOSPITAL APPLICATION

SUMMARY

With technological developments and the acceleration of digitalization, energy demand continues to increase. According to the World Energy Outlook reports, it is stated that using fossil fuels to meet the energy demand, leads to an increase in air pollution and global warming. Because of the limited fossil fuels, competition between countries increases. Due to this energy competition, the concepts of decarbonization, energy-saving, efficiency, have started to become important.

Renewable energy sources are indicated as the best solution to reduce carbon emissions and prevent climate change. Renewable energy systems continue to grow rapidly because of the gradually decreasing energy production costs and incentive policies. This paves the way for decision-makers to invest in renewable energy systems.

There are uncertainties and imbalances due to the intermittent generation of renewable energy systems. Elimination of uncertainties arising from intermittent generation leads to challenges in energy management, energy supply security, and ensuring energy quality. Therefore, renewable energy systems cannot be a complete substitute for conventional energy generation systems. Energy storage systems are claimed as the solution to these problems. Considering the benefits of energy storage systems that can work in integration with most power systems, energy storage systems are developing technologically and continues to become widespread with decreasing costs.

In order to ensure sustainable energy management and energy supply security, decentralization, decarbonization, and democratization trends have emerged in power systems worldwide. Thus, the number of microgrid applications is enhancing, by the integration of energy storage, renewable and conventional energy systems.

As distributed energy sources, the micro-grid system can work in an integrated manner with systems that allow load control such as solar panels, wind turbines, combined heat and power plants, small natural gas-fueled generators, diesel generators, electric vehicles, air conditioning systems, and energy storage systems. Therefore, the electricity, heating, and cooling load demands requested by the end-user can be controlled independently from the main network.

Thanks to the microgrids where energy storage systems are integrated, energy security is ensured against power outages, environment-friendly energy production is carried out, economic benefits are provided with fuel savings, infrastructure cost savings, and ancillary energy services.

Many energy storage systems can be used according to the characteristics of the desired power systems in microgrids, but there is no energy storage system where all the services in power systems are met. There are situations where each energy storage system is advantageous and disadvantageous in terms of technical performance, economic framework and environmental impacts compared to each other. For this reason, the energy storage systems to be selected in the power systems that are planned to be installed must meet the needs and necessary constraints of the application.

Electric vehicles are considered as an alternative in transportation due to the depletion of fossil fuels and to prevent climate changes caused by global warming. In the sustainable development scenarios, it is estimated that by 2030, the market share of electric vehicles will be 30 percent and the vehicle stock will be 250 million units. Lithium-ion batteries, whose costs are gradually decreasing, are known as one of the most important factors in the growth of the electric vehicle market.

Lithium-ion batteries are the most commonly used battery systems in electric vehicles, thanks to their high energy density, low self-discharge, and low maintenance costs. On the other hand, according to researches, the lifetime of Lithium-ion batteries is between 8-15 years depending on the characteristics of the electric vehicle and the driver. Lithium-ion batteries are terminated when it reaches 80 percent of its capacity. Disposing of batteries removed from electric vehicles creates a great economic loss. In addition, since battery systems contain materials with fewer substitutes, recycling costs are quite high. For this reason, it is recommended to be used as a stationary storage system in the second life cycle to maximize the economic value of batteries that have completed their useful life in electric vehicles.

This thesis aims to provide a solution to energy supply security against power outages and energy quality problems in hospitals. In addition, to design a trigeneration micro-grid system for the safety of critical electric, heating, and cooling loads demanded by the hospital. Storage systems consisting of thermal energy and second-life lithium-ion batteries are integrated into the micro-grid system. Photovoltaic panels, microturbines, and gas boilers are used as energy generation systems. Absorption chiller and electric chiller systems are integrated to provide cooling loads. On the other hand, the electricity, heat, and cooling energy demands of the hospital are met by directing the energy between power and heat control units and other systems components.

A scheduling optimization model is developed for the designed trigeneration hospital micro-grid system to operate most economically and to meet critical energy loads, constantly. With the scheduling optimization, the control of the energy loads received and directed from the system components will be provided. With the proposed scheduling optimization model, it is aimed to ensure the energy security of the hospital against power outage and energy quality problems, as well as to design an economic and environment-friendly system by achieving energy savings and by integrating renewable energy and storage systems.

Hourly electricity consumption and temperature data for one year are used for scheduling optimization of the hospital. To solve the optimization problem, it is coded in Excell Solver using mixed-integer linear programming. With the research, the critical energy load demands of the operating room, resuscitation unit, and intensive care units, which have the highest uninterrupted energy demand among hospital units, are included in the model. A hospital with 197 beds, 4 operating rooms, 2 resuscitation units, and 13 intensive care units is chosen for the implementation of the model. Based on the floor plans and temperature data of the hospital, energy need for space cooling and heating calculation is made and the hourly heating and cooling load demands in a year are determined.

With the created model, the objective function consisting of natural gas, battery wear, operation and maintenance, grid electricity, and social costs arising from carbon emissions is optimized. In the model output, the annual total energy cost, the number of discharges of the battery storage system, and the amount of carbon emission savings are calculated for 8670 hours equivalent to one year.

The economic value of the saved carbon emissions is determined within the framework of researches. Additionally, according to the research, the investment cost for the trigeneration system is determined, and using the amount of energy cost savings obtained as the annual net cash flow the payback period is calculated.

As a result of the thesis study, it is stated that the hospital continuously meets the critical energy loads thanks to the battery and thermal energy storage systems against power outages. On the other hand, considering the high electricity price drawn from main the grid, the battery system is discharged and resulted in high electricity cost savings. In addition, the heat energy output from the microturbine is re-evaluated with the heat recovery device. The heat energy directed from the gas boiler and microturbine is stored in the thermal storage system and the critical heating and cooling load demands are met by discharging the storage system in necessary situations. Thus, a high amount of carbon emission saving is achieved.

With these results, the importance of energy storage trigeneration micro-grid is demonstrated in providing energy safety and saving in facilities in the public, service, and industry sectors too. The use of lithium-ion batteries, which maintain their 80 percent capacity, as a stationary storage system against high recycling costs, an important saving item is achieved. Thus, due to the increase in the number of electric vehicles in the near future, the number of power applications in which batteries in the second life cycle are used as a stationary storage system will increase and benefits our country's economy.

In future studies, starting from the first establishment of the hospital, the selection of the energy source, system sizing, and optimization of the design can be carried out according to the characteristics of the area to be installed. Life cycle cost analysis can be done with the formation of a waste battery market in the future; Investment feasibility studies can be conducted in which system sizing optimization and energy arbitrage services are included in the model. With the formation of the carbon taxation system and carbon market in our country and adding it to the optimization model, the economic value of the obtained savings will be more up-to-date.



1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı ve Önemi

Son yıllarda dünyada hızlı bir seviyede teknolojinin ilerlemesi ve dijitalleşmenin artması ile elektrik enerjisinin önemi giderek artmaktadır. International Energy Agency (IEA) Dünya Enerji Görünümü (2012) raporuna göre 2012 yılında dünya çapında elektrik üretimi yaklaşık 22200 TWh olup, bu enerji üretiminin %70'i fosil yakıtlardan üretilmiştir. Enerji üretiminde fosil yakıtların kullanılması, havadaki CO₂ miktarını artırmakta, hava kirliliği oluşturmakta ve küresel ısınmaya neden olmaktadır. Enerji politikalarında bir değişiklik olmadığı takdirde, 2050 yılına gelindiğinde dünya çapında CO₂ emisyonunda %130, petrol tükeminde %70 artış gerçekleşerek küresel çapta 6 °C sıcaklık artışı meydana geleceği tahmin edilmektedir (Anake ve Wang, 2016). Diğer yandan IEA Dünya Enerji Görünümü (2020) raporuna göre enerji kullanımında %6'lık bir düşüş beklenmekte ve küresel CO₂ emisyonlarında %8'lik bir düşüş beklenmektedir. Fakat olağan iş senaryosunda küresel politika tepkileri ve uzun yıllar devam eden karbondan arındırma çalışmaları devam etmediği takdirde bu düşüşlerin uzun vadede kayda değer bir etki bırakmayacağı belirtilmiştir.

Küresel ısınmanın önüne geçilmesi ve CO₂ emisyonlarının azaltılması için en iyi çözüm olarak yenilenebilir enerji sistemleri gösterilmektedir. IEA Dünya Enerji Görünümü (2020) raporuna göre enerji sektöründe kullanılan güneş, rüzgâr, biyokütle ve jeotermal enerji sistemlerinin düşen üretim maliyetleri ve düşük karbonlu enerji kaynaklarına geçişi teşvik eden politikalar sayesinde bütün senaryolarda yenilenebilir enerji sistemlerine geçişin hızlandığı belirtilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından (YEK) üretilen enerjinin doğası gereği kesikli (aralıklı) üretim olduğundan arz ve talep arasında belirsizlikler oluşturmaktadır. Bu nedenle YEK'in kullanıldığı uygulamalarda belirsizliklerin önüne geçilmesi için esnek bir şekilde çalışabilen Enerji Yönetim Sistemlerine (EYS) ihtiyaç vardır.

Çevresel sorunlar, fosil yakıtların kapsamı, enerji talebinin karşılanması ve ekonomik faydalar göz önünde bulundurulduğunda yenilenebilir kaynaklara ve yerel üretime olan ilgi giderek artmaktadır. Mikro şebekeler gibi küçük ölçekli ağlarda enerji yönetimini sağlamak, güç kayıplarını azaltmak ve kontrol sürecini basitleştirmek gibi

birçok avantaja sahiptir. Bu nedenle, sistem bileşenleri, ağ yapıları, çalışma modları, enerji depolama sistemleri, yük türleri, problemin modellenmesi, çözme prosedürleri ve daha fazlasını içeren mikro şebeke yönetiminin çeşitli yönleri, mikro şebeke yönetimi bakış açısıyla incelenmelidir (Parag ve Ainspan, 2019).

Bu tez çalışmasının amacı; halka hizmet veren en kritik tesislerden biri olan hastanelerin faaliyetlerinin sürdürülebilmesi ve talep edilen elektrik, ısıtma ve soğutma kritik yüklerin sağlanmasıdır. Bununla birlikte ana şebeke, konvansiyonel enerji, yenilenebilir enerji ve enerji depolama sistemlerinden gelen enerji ve ısıtmanın çözelgeleme optimizasyonu ile koordinasyonun sağlanması ve akıllı bir şebeke sisteminin yönetimi için karar destek mekanizması geliştirilmesidir.

Önerilen optimizasyon modeli ile;

- Yenilenebilir ve konvansiyonel enerji sistemlerinin koordinasyonlu bir şekilde çalıştığı trijenerasyon sisteminin hastane mikro şebekesine entegrasyonu ile kritik enerji yüklerinin sağlanması,
- Enerji depolama sistemlerinin entegre edilmesi ile elektrik kesintisine karşı esneklik sağlanması,
- Sera gazı emisyonlarının azaltılması ile çevre dostu enerji üretimi yapılması,
- Hastane trijenerasyon mikro şebeke sisteminin en ekonomik şekilde çalışması ile elde edilen tasarruf miktarının maksimizasyonunun yapılması amaçlanmaktadır.

1.2 Tez Akış Şeması

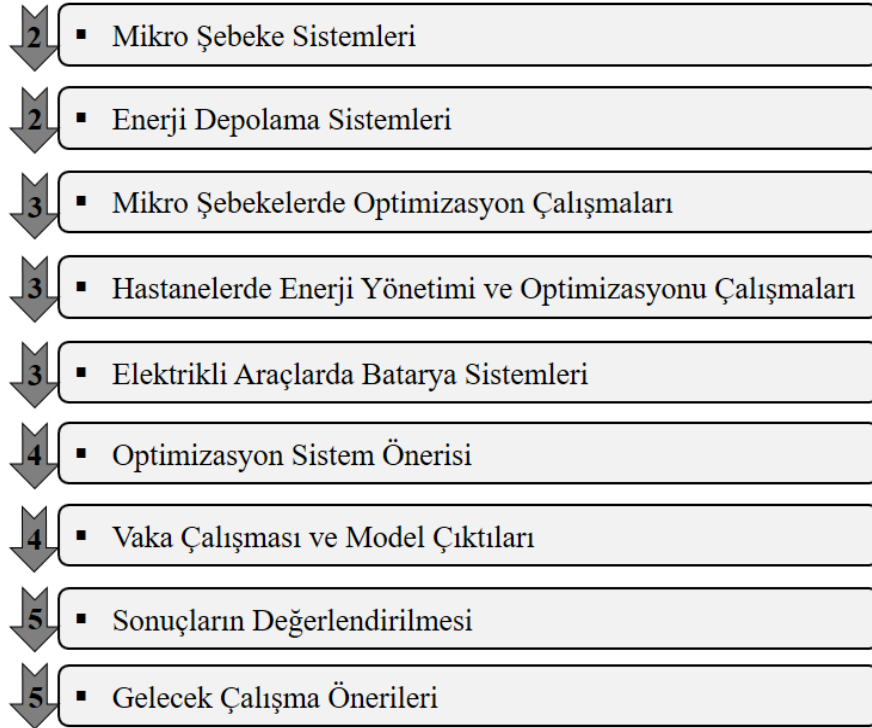
Tez çalışmasının kapsamının gösterildiği Şekil 1.1’de tezin organizasyonu için oluşturulan akış şemasında ilk olarak mikro şebekelerin genel özellikleri incelenmiştir. Bu bölümde mikro şebekelerin sağladığı faydalar, uygulamalarda karşılaşılan zorluklar, teknik ve piyasa özellikleri üzerinde durulmuştur. Ardından uygulamaya ve istenilen hizmetlere bağlı olarak değişen mikro şebeke türleri örneklerle anlatılmıştır.

Bu bölümün ardından, ikinci bölümde diğer önemli kavram olan enerji depolama sistemlerinin özellikleri, kullanıldığı alanlar, sağladığı hizmet ve faydalar enerji depolama türüne bağlı olarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca enerji depolama sistemlerinin kullanılacağı uygulamalar için seçim kriterlerinin belirlenmesi amacıyla teknik, ekonomik ve çevresel etkiler çerçevesinde kapsamlı bir şekilde karşılaştırılmıştır.

Üçüncü bölümde ise literatürdeki yenilenebilir enerji sistemleri ve enerji depolama sistemlerinin kullanıldığı mikro şebekelerde optimizasyon çalışmaları irdelenmiştir. Bu çalışmalar, optimizasyon probleminin türüne bağlı olarak farklı kapsamlarda incelenmiştir. Ardından hastanelerde enerji yönetimi çalışmalarına yer verilmiştir. Bununla birlikte çalışmalar, kullanılan optimizasyon yöntemi, enerji üretim ve depolama sistemine göre sınıflandırılarak özet bir tablo halinde gösterilmiştir. Üçüncü bölümün son alt başlığında ise enerji depolama sistemi olarak kullanılan elektrikli araçlardan çıkma bataryaların özellikleri, yaşam döngüsü süreçleri ve ikinci yaşam döngüsündeki elektrikli araç bataryalarının enerji depolama sistemi olarak kullanıldığı çalışmalar yer almaktadır.

Problem tanımına göre optimizasyon sistem önerisi ve tasarımına dördüncü bölümde yer verilmiştir. Optimizasyonda uygulanacak model için kullanılan veriler ve yapılacak varsayımlar bu bölümde yer almaktadır. Bu bölümde ayrıca optimizasyon probleminin çözümü için oluşturulan model çıktıları da gösterilmektedir.

En son bölümde ise trijenerasyon hastane mikro şebekesinin enerji optimizasyonu için oluşturulan model çıktılarından yola çıkarak sonuç ve değerlendirmeler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre karar vericiler için sağlanacak faydalar belirtmiş ve tez çalışması kapsamında gelecek çalışma önerilerine değinilmiştir.



Şekil 1.1 : Tez çalışmasının organizasyonu için akış şeması



2. MİKRO ŞEBEKELER VE ENERJİ DEPOLAMA: TEMEL KAVRAMLAR

Bu bölümde mikro şebekeler ve enerji depolama sistemleri ile ilgili genel bilgiler verilmektedir. Mikro şebekelerin sağladığı faydalar, teknik özellikleri ve piyasa özellikleri kapsamlı olarak incelenmektedir. Ardından istenilen uygulamaların ve hizmetlerin özelliklerine göre mikro şebeke türleri açıklanmaktadır.

Bu bölümünün devamında mikro şebekelerin en önemli bileşenlerinden biri olan enerji depolama sistemleri (EDS) detaylandırılmaktadır. EDS'nin türleri ayrıntılı bir şekilde açıklanarak EDS türleri arasında teknik, ekonomik ve çevresel açıdan karşılaştırılması yapılmıştır.

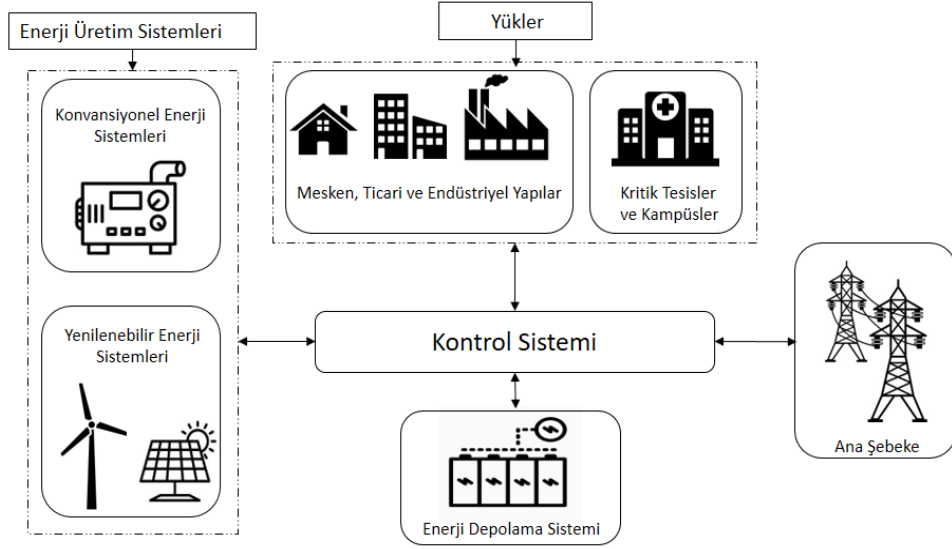
2.1 Mikro Şebekeler

Mikro şebekeler genellikle küçük jeneratörler, depolama sistemleri ve yerel yükler içeren bir ağ türüdür. Ayrıca, gereken fiziksel donanım ve ekonomik koşullar sağlandığı sürece ana şebekeden bağımsız çalışabilen ada modunda ve otonom olarak çalışabilen enerji dağıtım sistemleridir.

Jirdehi ve diğ. (2020) mikro şebekeyi, tüketicilerin yanına kurulan dağıtılmış jeneratörlerden veya küçük kaynaklardan oluşan entegre bir güç sistemi olarak tanımlamışlardır. Bir mikro şebeke, şebekeye göre tek bir kontrol edilebilir varlık olarak hareket eden, açıkça tanımlanmış elektrik sınırları içinde birbirine bağlı yükleri ve dağıtılmış enerji kaynakları (DER-Distributed Energy Resources) olan grupların bütünüdür (Ton ve Smith, 2012). DER, kritik tesisler, kampüsler, mesken, ticari ve endüstriyel yapılarda enerji talebini karşılayan üretim sistemlerini içermektedir.

DER arasında güneş panelleri, rüzgâr türbinleri, kombine ısı ve güç santralleri, küçük doğal gaz yakıtlı jeneratörler, dizel jeneratörler, elektrikli araçlar, iklimlendirme sistemleri ve enerji depolama sistemleri gibi kontrol edilebilir yükler yer alabilmektedir. Bir mikro şebeke hem şebekeye bağlı olarak hem de ada modunda çalışmasını sağlamak için şebekeye bağlanabilir veya şebekeden ayrılabilir. Şekil 2.1'de mikro şebeke yapısının şematik gösterimi bulunmaktadır.

Mikro şebekeler, yirmi yılı aşkın süredir gelecekteki akıllı şebekeler için yapı taşları olarak geliştirilmiş, kontrol esnekliği, yenilenebilir kaynakların kolay bağlantısı, yüksek verimlilik ve geniş alan kesintilerine karşı dayanıklılık gibi avantajlarla ortaya çıkmışlardır (Zhu ve diğ, 2015). Bu sayede mikro şebekelerin kullanıldığı bölgelerde enerji yönetimi ve optimizasyonu çalışmaları yapılabilmektedir.



Şekil 2.1 : Mikro şebeke sistemi yapısının şematik gösterimi

Mikro şebeke uygulamalarının sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Son zamanlarda dünyanın elektrik sistemlerinin birçok durumunda aşağıdan yukarıya “merkezsizleştirmeye, karbondan arındırmaya ve demokratikleşmeye” başlama eğilimi bulunmaktadır (Hirsch ve diğ, 2018). Bu eğilimlerden de yola çıkarak mikro şebeke uygulamalarının sağladığı birçok fayda ve hizmetler bulunmaktadır. Bu faydalar; enerji güvenliği, ekonomik fayda ve temiz enerji entegrasyonu olmak üzere üç başlık altında incelenebilmektedir.

2.1.1 Enerji güvenliği

Enerji güvenliği mikro şebeke uygulamalarının gelişmesinde ve yayılmasında ana faktörlerden birisidir. Ulaşım, iletişim, içme suyu ve atık arıtma, sağlık hizmetleri, gıda ve acil müdahale altyapısı gibi kritik hizmet veren tesislerde oluşabilecek elektrik kesintisi ve enerji kalitesi problemlerine karşı esnekliğin ve hizmetlerin devam edebilmesi için enerji güvenliğinin sağlanması konusunda mikro şebekeler büyük fayda sağlamaktadır (Hirsch ve diğ, 2018). Mikro şebekeler, kötü hava koşulları, doğal afetler, basamaklı kesinti, siber ve fiziksel saldırı olma durumlarında enerjinin sürdürülebilir hale gelmesi konusunda büyük bir öneme sahiptir.

2.1.1.1 Hava koşulları

Hava kirliliği ve küresel ısınmanın etkisiyle özellikle son yıllarda iklim değişiklikleri yaşanmaya başlamıştır. Bu değişiklikler nedeniyle hava koşulları kaynaklı elektrik kesintilerinin sayısı artmaktadır. Özellikle kritik öneme sahip tesislerde, elektrik kesintilerinde enerji sağlanması konusunda mikro şebekeler önemli bir rol almaktadır.

Tuttokmağı ve Kaygusuz (2019)'a göre yağmur ve kasırga sonucu elektrik kesintilerinin en çok olduğu Güney Amerika'da, 10-11 Kasım 2009'da Brezilya ve Paraguay'ı kapsayan büyük bir elektrik kesintisi yaşanmış ve 87 milyon insanın enerji güvenliği kötü bir şekilde etkilenmiştir. Ayrıca, 30-31 Temmuz 2012'de Hindistan'da, aşırı sıcaklıktan dolayı trafoların ısınması ve hatların aşırı yüklenmesi nedeniyle dünya tarihinin en büyük elektrik kesintisi yaşanmıştır. 2 ile 8 saat süren kesintiler yüzünden 48000 MW'lık bir yük kaybı oluşmuş ve sosyal anlamda da büyük bir kayıp yaşanmıştır (Saini, 2014). Mikro şebekeler ana şebekeden bağımsız çalışabildikleri için doğal afet ve kötü hava koşulları nedeniyle elektrik kesintisi durumlarında tesislerin talep ettiği kritik yükü sağlayabilmektedirler.

2.1.1.2 Basamaklı kesintiler

Basamaklı bir arıza; birbirine bağlantılı parçaların olduğu bir sistemde, bir veya daha fazla parçada meydana gelen arızanın diğer parçaların arızasını tetiklemesidir. Kritik yük kapasitesinin yakınlarında çalışmakta olan elektrik şebekesi üzerinde oluşabilecek küçük bir sorun domino etkisi yaratarak bütün şebekede elektrik kesintisine yol açabilmektedir (Newman, 2015). Türkiye'de 31 Mart 2015 tarihinde meydana gelen 22 ilin etkilendiği büyük elektrik kesintisinin sebebi olarak; Avrupa Elektrik İletim Ağı (ENTSO-E) Türkiye Proje Grubu ve Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından ortaklaşa olarak hazırlanan "31 Mart Sistem Çökmesi Raporu"na göre 400 kV Osmanca-Kurşunlu iletim hattındaki bir bölgede koruma kapasitörlerinin devre dışı kalması nedeniyle hızlı ve ardışık bir şekilde sistemin çökmesine neden olmuştur (Url-1). Mikro şebekelerin bu konudaki avantajı ise genel elektrik şebekesinden bağımsız bir şekilde işletilebilecek daha küçük fonksiyonel birimlere bölünebildiği için bu tür durumların etkisini hafifletebilmekte ve talep edilen kritik yükü sağlayabilmektedirler.

2.1.1.3 Siber ve fiziksel saldırılar

Son zamanlardaki teknolojik gelişmeler ile birlikte elektrik şebekelerinde bilgi ve iletişim teknolojisi daha entegre hale gelmeye başlamıştır. Dolayısıyla bu durum şebekeleri siber saldırılara daha açık hale getirmiştir (Mrabet ve diğ, 2018). Ayrıca fiziksel bir hasar durumunda, elektrik şebekeleri merkezi halde bulunabilen transformatör sistemleri gibi karmaşık ve pahalı parçalara sahip olması zaman, maliyet ve sosyal anlamda büyük zararlara sebep olabilmektedir. Mikro şebekeler, merkezi olmayan bir yapıya sahip oldukları için elektrik şebekesine kıyasla daha az hasar alma olasılığı söz konusudur.

Dünya’da en çok bilinen elektrik şebekelerine yapılan siber saldırılar Ukrayna ve İsrail’de meydana gelmiştir (Wang ve Lu, 2013). Ukrayna’da 23 Aralık 2015 tarihinde ve Kiev merkezinde gerçekleşen siber saldırıda 6 saat elektrik kesintisi yaşanmıştır (Sullivan ve Kamensky, 2017). İsrail’de ise 2016 yılında Enerji Bakanı Yuval Steinitz’in açıklamalarına göre ülke çapında elektrik şebekelerine büyük bir saldırı meydana gelerek mücadele ettiklerini belirtmiş ve siber güvenlik önlemi alınması için 3 milyar dolarlık yatırım yaptıklarını belirtmiştir (Staff, 2016).

2.1.2 Ekonomik fayda

Mikro şebekeler, yerel dengeleme gerçekleştirmek ve ekonomik faydayı en üst düzeye çıkarmak için özel kontrol yöntemlerini ve stratejileri içermektedir. Bu yöntemler sayesinde ana şebekeden bağımsız çalışabilmekte ve senkronizasyonu sağlayarak voltaj ve frekans kontrolü sağlayabilmektedirler (Hirsch ve diğ, 2018). Mikro şebekeler ekonomik fayda olarak; altyapı maliyeti tasarrufu, yakıt tasarrufu ve yan hizmetler olmak üzere üç başlıkta incelenebilmektedirler.

2.1.2.1 Altyapı maliyeti tasarrufu

Elektrik şebekelerinin değişmesi veya yeni kurulumların yapılması mikro şebekelere göre daha pahalı olacaktır. Buna sebep olarak kurulum yapılacak yerin coğrafi özellikleri, yeraltı ve yerüstü hatlardaki inşaat kısıtları, işçilik maliyetleri ve zaman kısıtları gibi konular maliyet unsuru olarak gösterilebilir. Bununla birlikte hava koşullarına bağlı elektrik kesintileri üzerine yapılan bir çalışmada, Amerika Birleşik Devletleri (ABD)’nde iletim hatlarının yaklaşık %70’nin 25 yıldan daha eski olduğunu ve bu iletim hatlarının oluşabilecek yüksek enerji talebinde yeterli kapasiteyi sağlayamadığı belirtilmiştir (Url-2). Diğer yandan Parag ve Ainspan (2019) mikro

şebekelerin ekonomik faydalarını araştırdıkları kapsamlı çalışmalarında literatürdeki iletim ve dağıtım maliyetlerinden kaçınma veya erteleme maliyetlerinin geniş bir yelpazesini göstermişlerdir. Ayrıca mikro şebekelerin kurulum yapılacak yerin koşulları gözetilerek maliyetlerinin tahmini olarak MW başına 60-80 bin \$ veya MW başına 100 bin \$ 'ın üzerinde olduklarını belirtmişleridir.

2.1.2.2 Yakıt tasarrufu

Mikro şebekeler; kombine ısıtma-soğutma güç üretimi (Combined Heat and Power CHP) ve yenilenebilir enerji sistemlerine imkân vermesi, azalan iletim hattı kayıpları alternatif akım (AC)-doğru akım (DC) voltaj dönüşüm sistemlerinde oluşacak kayıpları azaltma konusunda verimli çalışma fırsatı sunmaktadır.

Divshali ve diğ. (2013) çalışmalarında sistem kayıplarını, reaktif güç gereksinimini, ayrıca voltaj ve frekans işletim kısıtlamalarını hesaba katmış, düşme kontrollü ada tipi mikro şebekelerin yakıt tüketimini en aza indirmek için mikro şebeke merkezi kontrolünün sağlandığı çok aşamalı bir optimizasyon algoritması sunmuşlardır. Çalışmanın sonucuna göre mikro şebekelerde enerji yönetimi ve optimizasyonu sayesinde kayıplar azaltılabilmekte ve büyük oranda yakıt tasarrufu sağlanabilmektedir.

2.1.2.3 Yan hizmetler

Mikro şebekeler, daha yüksek seviyeli merkezi üretim ve iletim planlaması ile koordinasyon sağlayabilen gelişmiş kontroller sağlayarak, yüksek penetrasyonlu dağıtılmış üretimin teknik ve ekonomik zorluklarını çözmek için uygulanan bir çözüm olarak gösterilmektedir (Nelson ve Johnson, 2020).

Mikro şebekelerde yan (yardımcı) hizmetler olarak; kör başlangıç (black start), yük takibi, voltaj ve frekans regülasyonu gibi uygulamalar bulunmaktadır. Bu hizmetler ve servisler sayesinde mikro şebekeler düşük maliyetli enerji sunarken, şebeke kesintisi durumunda enerji arzının güvenilirliğini ve esnekliğini de arttırmaktadır (Hussain ve diğ, 2019).

2.1.3 Temiz enerji entegrasyonu

Mikro şebekeler güneş ve rüzgâr gibi fosil kaynaklı olmayan temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları ile entegre bir şekilde çalışabilmektedir. Rüzgâr ve güneş kaynaklarının kesintili olmasından kaynaklanan ek voltaj desteği, frekans regülasyonu ve ramping (Fotovoltaik panel (PV) sistemlerinde AC-DC dönüştürücülerden pürüzsüz çıkış gücü almak için güç oranı kısıtlama uygulaması) maliyetleri oluşturmaktadır (Parag ve Ainspan, 2019). Ayrıca yenilenebilir enerji sistemleri ile ilişkili frekans ve voltaj dalgalanma risklerini azaltmak için de enerji depolama sistemleri (EDS) kullanılmaktadır. Böylelikle, mikro şebekelerde YEK ve enerji depolama sistemleri entegrasyonu sayesinde temiz enerji üretilmekte ve işletme maliyetleri düşmektedir.

Mikro şebekelerin birçok konuda faydalı özelliklerinin bulunmasına rağmen, kurulum ve yönetim konularında çeşitli sorunlarla karşılaşabilmektedir. Bu sorunlar arasında dağıtılmış enerji kaynaklarının yüksek maliyetleri, teknik deneyim eksikliği, standartların yokluğu, idari ve yasal engeller ve piyasa tekeli bulunmaktadır (Chowdhury ve diğ, 2009). Ayrıca yasal engeller arasında düzenleyici, politik ve ekonomik engellerin olması söz konusudur (Bronin, 2010).

Çok az sayıda devletin mikro şebekelere hitap eden yasaları olduğundan dolayı mevcut yasalar çelişkili veya belirsiz olabilmektedir. Kamu hizmeti ve komşu ülkeler gibi gruplar mikro şebeke projelerine itiraz edebilmekte ve bunlara karşı lobi yapabilmektedir. Bunun yanı sıra gereken büyük miktarda sermaye yatırımlarının caydırıcı etkisi olabilmektedir (Bronin, 2010). Çizelge 2.1’de mikro şebekelerin faydaları özet şeklinde gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 : Mikro şebekelerin faydalarının özeti, Purser (2014)'den uyarlanmıştır.

Fayda Kategorisi	Fayda	Fayda Kaynağı
Ekonomik	Elektrik maliyet tasarrufu	- Düzgün yük eğrisi - Dinamik fiyatlandırma ve/veya daha düşük elektrik oranları - Daha düşük toplam elektrik tüketimi
	Geliştirilmiş varlık kullanımından kaynaklanan düşük üretim maliyetleri	- Düzgün yük eğrisi - Dinamik fiyatlandırma ve/veya daha düşük elektrik oranları - Daha düşük toplam elektrik tüketimi
	İletim ve dağıtım sermaye tasarrufu	- Ertelenmiş iletim ve dağıtım kapasitesi yatırımları - Azaltılmış ekipman arızaları
	İletim ve dağıtım işletme-bakım tasarrufları	- İşletme ve bakım masraflarının azaltılması - Daha az sayaç okuma maliyeti
	Azalan iletim sıkışıklığı maliyetleri	Ek iletim kapasitesi oluşturmada artırılmış iletim aktarım yapılabilirliği
	İletim ve dağıtım kayıplarının azaltılması	- Optimize edilmiş iletim ve dağıtım şebeke verimliliği - Üretimin yüke yakın olması
	Hırsızlığın azaltılması	Elektrik hırsızlığının azaltılması
Güvenilirlik ve Güç Kalite Düzeyi	Düşük elektrik kesintileri maliyeti	- Daha az sürekli kesinti - Daha kısa kesintiler - Daha az büyük kesinti
	Daha kaliteli güç için azalan maliyetler	- Daha az anlık kesinti - Daha az harmonik bozulmalar - Daha az şiddetli yükselmeler ve alçalmalar
Çevresel	Sera gazı, Karbon, SO _x , NO _x ve zararlı partiküllerin emisyonunun azaltılması	- Düşük elektrik tüketimi, iletim ve dağıtım kayıpları - Yenilenebilir üretim ve CHP uyumu ile daha düşük emisyon
Enerji Güvenliği	Petrolün kullanımının azalmasıyla oluşan daha büyük enerji güvenliği,	Elektrifikasyonun giderek petrolün yerini alması, akıllı şebekelerle elektrikli araçların sayısının artması
	Geniş çaplı elektrik kesintilerinden kaynaklanan hasarın azaltılması	Geniş çapta elektrik kesintisinin azaltılması

2.2 Mikro Şebekelerin Teknik Özellikleri

Mikro şebekeler tipik olarak dağıtılabılır ve aralıklı üretimin bir birleşimini içermektedir. Mikro şebekeler çoğunlukla sökülebilir üretim, doğal gaz ve dizel gibi geleneksel termal yakıtlı sistemlerden oluşmaktadır. Aralıklı üretim yapan ve yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir yakıtları da içermektedir. Bunun yanı sıra enerji depolama ile birlikte yenilenebilir yakıtların aralıklı yapısını dengelemeye yardımcı olarak bataryalar ve yakıt hücreleri aracılığıyla mikro şebekeye dâhil edilebilmektedir.

Mikro şebekelerin bazı teknik özellikleri olup bu özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir (Salam ve diğ, 2008):

- Mikro şebekeler kapasite anlamında 1 kW ile 10 MW arası ölçeklendirilebilirler.
- Ana şebekede acil bir durumda veya güç kesintisi sırasında iyi bir çözüm üretmek için gerekli teknik unsurları ve özellikleri içermektedir.
- Tak ve çalıştır işlevselliği, şebekeye bağlı veya adalı işletimde uygun çalışma moduna geçme, adalı çalışma modu sırasında voltaj ve frekans koruması sağlama ve mikro şebekeyi ana şebekeye güvenli bir şekilde yeniden senkronize etme yeteneği bulunmaktadır.
- Mikro şebekeler, ada modu sırasında ana dağıtım şebekesine bağlanmadan bağımsız olarak çalışabilir ve elektrik dağıtımı bu sistem tarafından sağlanabilir.
- Mikro şebekeler PV, rüzgâr ve yakıt hücresi gibi yenilenebilir enerji üretiminin entegrasyonuna izin verir.
- Tipik mikrogrid sistemi, invertörlü dağıtılmış üretim ünitelerinden oluşur ve esnek operasyonlar sağlayan kontrol sistemleri içerir.
- Mikro şebekeler, reaktif ve aktif güç kontrolü, sistem dengesizlikleri, voltaj sarkmalarını düzeltme yeteneği ve artan enerji talebini karşılamak için uygulanabilir.

Mikro şebekeler yenilenebilir, konvansiyonel enerji ve yakıt hücre sistemleri ile uyumlu çalışabilmektedir. Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3'te mikro şebekelerde enerji üretim teknolojilerinin sosyal, ekonomik ve çevre açısından kapsamlı bir özeti bulunmaktadır. Mikro şebekelerin çalışma altyapısına uygun enerji üretim sistemleri aşağıdaki gibi özetlenebilir (Purser, 2014):

- Konvansiyonel enerji sistemleri ile uyumu: Mevcut dizel ve doğal gaz yedek jeneratörlerinin veya türbinlerinin mikro şebeke üretim kaynakları olarak kullanılabilir. Yük takip edebildikleri için optimize edilmiş kaynaklarla da kullanılabilir. İçten yanmalı motorlar çok olgun bir teknolojidir ve diğer nesil teknolojilere kıyasla genellikle cazip bir fiyat noktası sergilemektedirler. Dezavantajları arasında yüksek emisyon oranları ve düşük verimlilik seviyeleri ile hidrokarbon yakıtların azalan tedariki bulunmaktadır. Yine de, düşük maliyetleri, mevcut kullanılabilirliği ve çalışma esnekliği sayesinde mikro şebekelerle çalışma uyumu oldukça yüksektir. Ayrıca CHP ve mikro türbin sistemleri ile uygun çalışabilmektedirler.
- Yenilenebilir enerji sistemleri ile uyumu: Yenilenebilir enerji kaynakları doğada boldur ve sürekli bir kaynaktır. Dünyanın değişik noktalarında, farklı biçim ve oranlarında bulunan YEK'in birbirlerini tamamlayıcı özellikleri bulunmaktadır. Modüler yapıda oldukları için yük merkezlerine yakın kurulum yapılabilir. Mikro şebekeler, güneş, rüzgâr, hidrolik, biyokütle ve jeotermal enerji sistemleri ile uygun bir şekilde çalışabilmektedir.
- Yakıt hücreleri sistemleri ile uyumu: Yakıt hücreli hidrojen enerjisi kullanılarak çalışmaktadır. Modüler bir yapısı bulunmakta ve kullanıcı yüküne yakın şekilde çalışabilmektedir. Sessiz, minimum emisyonda ve yüksek verimlilikle çalışmaktadırlar.

Çizelge 2.2 : Mikro şebekeler ile uyumlu yenilenebilir enerji teknolojileri, Purser (2014) ve Hossain ve diğ. (2014)’ten uyarlanmıştır.

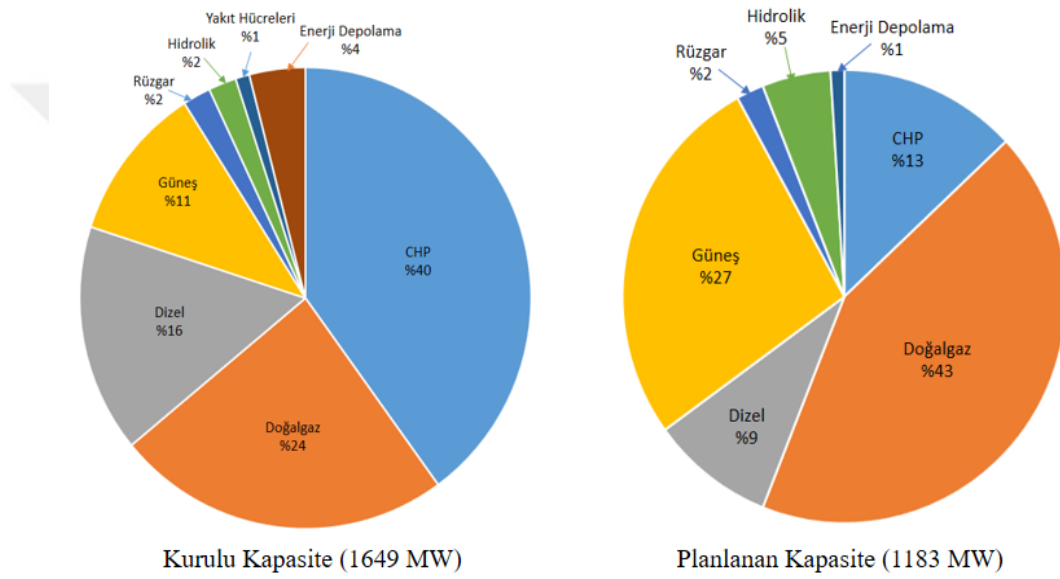
Teknoloji	PV	Rüzgâr Onshore	Rüzgâr Offshore	Hidrolik	Jeotermal	Solar Termal
Kapasite (Kw)	<1-5000	500-6000+	5000-10000+	50-1000	500-3000+	1-2000
Ekonomiklik	Orta-Pahalı	Orta	Pahalı	Orta	Orta-Pahalı	Orta
Çevresel Etki	Tam Uygun	Tam Uygun	Tam Uygun	Tam Uygun	Tam Uygun	Tam Uygun
Sosyal Motivasyonu	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek
Yayılma Düzeyi	Yüksek	Orta	Orta	Orta	Düşük	Orta
CHP Uyumu	Yok	Yok	Yok	Yok	Var	Var
Sermaye Maliyeti (Euro/kW)	4000-8000	800-2000	1200-3000	1400-5000	800-400	1500-2000
Kurulum (Euro/kW)	40-150	100-200	600-800	100-2000	200-400	100-200
Elektrik Üretim (Eurocent/kWh)	20-40	6-10	8-15	6-14	-	-
Beklenen Ömür	20-30	20	20	60	20	20

Çizelge 2.3 : Mikro şebekeler ile uyumlu konvansiyonel enerji teknolojileri, Purser (2014) ve Hossain ve diğ. (2014)’ten uyarlanmıştır.

Teknoloji	Buhar Türbini	Gaz Türbini	Mikro Türbin	İçten Yanmalı Motorlar	Yüksek Isılı Yakıt Hücreleri	Düşük Isılı Yakıt Hücreleri
Yakıt Tipi	Gaz, Kömür, Biyokütle	Gaz	Gaz	Dizel, Biyoyakıt, Gaz, Petrol	Gaz, Hidrojen	Gaz, Hidrojen
Kapasite (kW)	500-10000	500-10000	30-500	500-10000	1000-10000	100-3000+
Ekonomiklik	Ucuz	Ucuz	Orta	Ucuz	Pahalı	Pahalı
Çevresel Etki	Az-Orta Uygun	Az-Orta Uygun	Orta Uygun	Az Uygun	Orta Uygun	Orta Uygun
Sosyal Motivasyonu	Düşük	Orta	Orta	Düşük	Yüksek	Yüksek
Yayılma Düzeyi	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek	Düşük	Düşük
CHP Uyumu	Var	Var	Var	Var	Var	Var
Sermaye Maliyeti (Euro/kW)	550-1250	500-1100	200-1000	350-1000	3500-10000	2000-8000
Kurulum (Euro/kW)	100-200	65-150	50-200	60-120	500-850	500-850
Elektrik Üretim (Eurocent/kWh)	3-7	3-5	8-15	4-7	15-35	10-25
Beklenen Ömür	20	20	20	20	10	10

2.3 Mikro Şebeke Piyasasının Özellikleri

Mikro şebekelerin üretim kaynaklarının ve sistem bileşenlerinin pazar payının araştırıldığı GTM Research (2016) çalışmasında, Amerika ve Asya kıtalarında mikro şebeke proje sayılarının gün geçtikçe arttığını belirtilmiş ve ABD’de bulunan mikro şebekelerin enerji üretim kaynağına göre sınıflandırılmıştır. Şekil 2.2’de ABD’de bulunan enerji üretim kaynağına göre mikro şebekelerin kurulu kapasitesi ve kurulması planlanan projelerin oranları gösterilmektedir. Şekil 2.2 incelendiğinde ise mikro şebekelerdeki güneş enerjisi üretim sistemlerinin kapasitesinin ilerleyen yıllarda büyük oranda artmakta olduğu görülmektedir.



Şekil 2.2 : ABD’deki mikro şebekelerde yakıt türüne bağlı üretim teknolojileri, GTM Research (2016)’dan uyarlanmıştır.

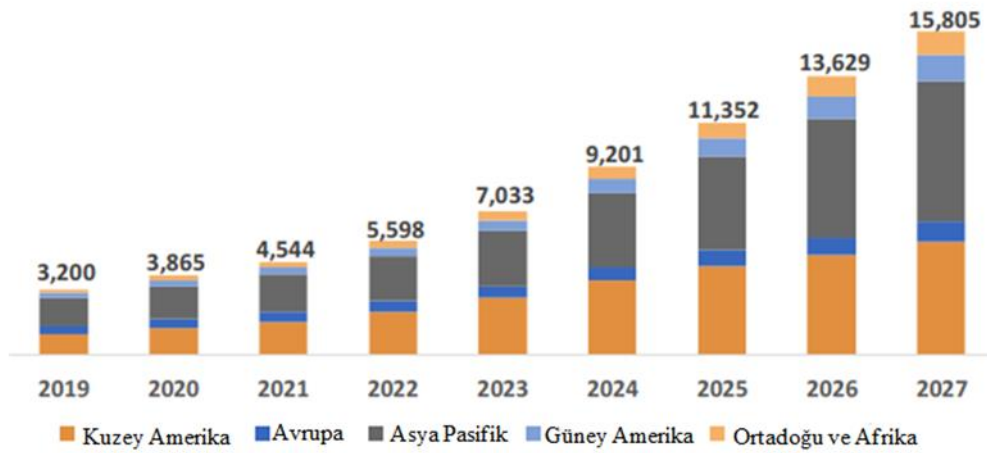
Hızlı gelişen teknoloji ile birlikte yenilenebilir enerji ve enerji depolama sistemlerinin giderek ucuzlaşması ile mikro şebekelerin uygulanabilirliğini kolaylaştırmaktadır. ABD Enerji Bilgi Yönetim İdaresi (EIA), Uluslararası Enerji Görünümü (2019) raporuna göre 2050 yılına gelindiğinde toplam elektrik üretiminin %62’si rüzgâr ve güneş enerjisinden sağlanacağı belirtilmiştir. Türkiye Sınai Kalkınma Bankası (TSKB) Enerji Sektör Görünümü (2020) raporuna göre ise yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekelere entegre olması ile beraber dağıtık enerji şebekelerinin sayısı giderek artarak merkezi şebekelerin yerini alması beklenmektedir. Mikro şebekelerin sayısının artması ile yerinde üretim yapılarak tüketicilerin enerji talepleri karşılanacak ve ana şebekeden kaynaklı iletim kayıpları, elektrik kesintisinin etkileri gibi faktörlerin etkisi

azalacaktır. Küçük boyutlarda rüzgâr türbünleri ve çatı tipi güneş panellerinin kurulumunun artması ile tüketiciler, enerji üreticisi rolüne geçebilecek ve yeni iş modelleri oluşarak enerji pazarındaki dengeler değişecektir.

Navigant Research (2016) raporunda, bölgelere göre operasyonel mikro şebeke kapasitelerinin pazar payı araştırması yapılmıştır. Kuzey Amerika, %54'lük payı ile bugünün dünyasına sabit işletme ve bakım fırsatlarına öncülük etmektedir. Sabit operasyonel mikro şebeke gelir tutarının yıllık %15,9 bileşik büyüme oranı ile 2026 yılında yıllık 1,6 milyar dolara yükselmesi beklenmektedir.

Navigant Research (2017) raporunda ise Asya-Pasifik bölgesi kapasite bakımından %40, ardından %34 ile Kuzey Amerika takip etmiştir. Bunun sebebi olarak, Asya-Pasifik bölgelerinde bulunan Avustralya'da ve adalardaki enerji talebinin artmasıyla beraber uzaktan ve ada tipi mikro şebekelerin önemi ve kullanımının giderek artmaya başlaması gösterilebilir.

Navigant Research (2019) raporuna bakıldığında ve Şekil 2.3'ten yola çıkarak, yapılan tahmin çalışmalarına göre 2027 yılına geldiğinde, mikro şebeke kapasitelerinde yaklaşık 5 kat artış olacağı görülmektedir.

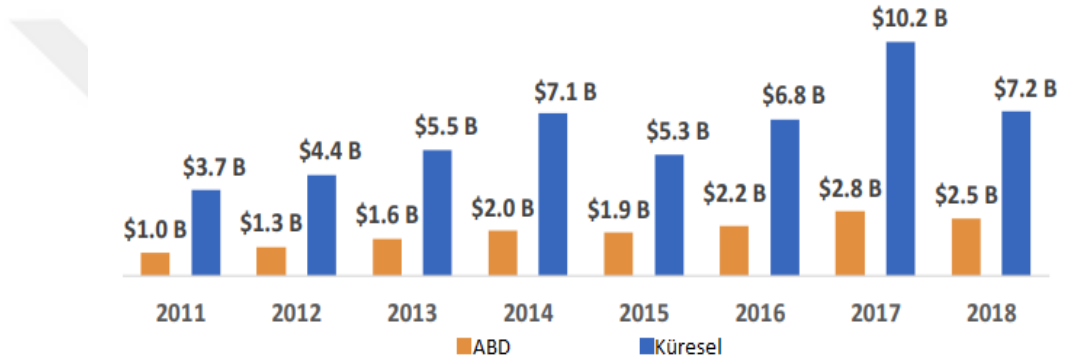


Şekil 2.3: Küresel çapta bölgelere göre mikro şebeke kapasitesi (MW), 2019-2027, Navigant Research (2019)'dan uyarlanmıştır.

Navigant (2019) raporuna göre, Güney Amerika en hızlı büyüyen mikro şebeke pazarına sahiptir fakat pazar liderliğini Asya-Pasifik bölgesi devam ettirmektedir. Güney Amerika pazarının büyümesindeki en önemli etken Porto Riko'daki 14 milyar dolarlık uzun vadeli mikro şebeke yatırımlarıdır. Bununla beraber, 2019 yılında Porto

Riko'daki mikro şebeke kapasitesi 194.4 MW iken, %35.1 büyüme oranı ile 2028 yılında kapasitelerini 2919.4 MW'a çıkarmayı hedeflemektedirler.

Mikro şebekelerin pazar payı ve kapasiteleri, yeni enerji yönetim sistemlerinin geliştirilmesi ve teknolojik gelişmelerle beraber gün geçtikçe artmaktadır. Navigant Research (2019) raporundan yola çıkarak; Şekil 2.4'te görüldüğü üzere 2017 yılında küresel çapta mikro şebeke gelirleri ve yatırımları önemli bir derecede artmıştır. 2018 yılına gelindiğinde ise küresel çapta bir gelir azalması yaşanmasına rağmen Şekil 2.3'te görüldüğü üzere mikro şebeke kapasiteleri giderek artmaya devam ettiği görülmektedir.



Şekil 2.4 : 2011-2018 yılları arası mikro şebeke gelirleri, ABD ve küresel çapta milyar dolar cinsinden kıyaslanması, Navigant Research (2018)'den uyarlanmıştır.

Dünya çapındaki mikro şebeke pazarına bakıldığında, bu pazarın gelişmesine katkıda bulunan çevresel ve enerji verimliliği faydaları sunmanın yanı sıra, mikro şebekeler bir tesisin veya bölgenin enerji harcamalarını kontrol altında tutması da dahil edilebilir. Bu faydalar aşağıda gösterildiği üzere sıralanabilir (Url-3):

- Enerji kullanımını yöneterek talep yükünü azaltmaktadır.
- En iyi fiyatlandırma için normal şebeke kaynaklarına karşı avantaja sahiptir.
- En düşük maliyet için yakıt tedariğinden faydalanabilmektedir
- Şebekeye satış kapasitesi ve hizmetleri bulunmaktadır.

Global Market Insights'ın (2019) mikro şebeke pazar araştırmasında, 2015'ten 2019'a kadar tarihsel veriler incelenmiş ve 2026 yılına kadar pazar tahmin modelleri hazırlanmıştır (Url-4). Araştırmada dünyanın farklı bölgelerinden 24 ülke ve 16 mikro şebeke teknolojileri sağlayan firma katılmıştır. Araştırma sonucunda bölgelerin mikro

şebeke pazarlarının büyümesinde rol alacak faktörler belirlenmiştir. Bu faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir:

- Kuzey Amerika: Yenilenebilir enerji entegrasyonu
- Avrupa: Yenilenebilir enerji teknolojilerinin artırılması
- Asya-Pasifik, Ortadoğu ve Afrika: Şebekeden bağımsız elektrik için artan talep, elektrifikasyona yönelik hükümet programı, artan elektrik talebi

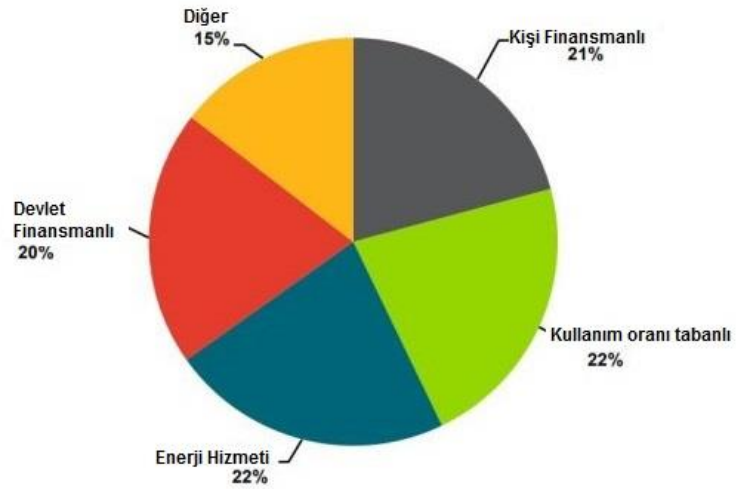
Navigant (2019) raporunda Avrupa, mikro şebeke kapasite bakımından %9'luk bir paya sahiptir. Avrupa bölgesindeki mikro şebeke pazarına bakıldığında başta Finlandiya olmak üzere İspanya ve Danimarka gibi ülkelere ait yatırımlar devam etmektedir (Url-5). Güneş panellerinin fiyatlarının düşmesi, CHP sistemlerinin düşük işletme maliyetleri, yakıt fiyatlarının azalması ve devlet teşviklerinin artmasıyla 2024 yılına gelindiğinde, Avrupa mikro şebeke pazarının 6 GW kapasite ulaşacağı öngörülmektedir (Gupta ve Bais, 2017).

Günümüzde mikro şebekelerin faydalarının yanında, enerji karar alma mekanizmalarına etki eden bir takım akımlardan söz edilmektedir (Url-6). Bu akımlar yatırımcıların ve karar vericilerin mikro şebekelere karşı tutumunu önemli ve pozitif bir şekilde etkilemekte ve mikro şebeke yatırımlarını teşvik etmektedir. Enerji karar alma mekanizmasına etki eden en büyük 4 akım aşağıdaki gibi sıralanabilir (Url-6):

- Büyümekte olan elektrik talebi: Telekomünikasyon, iklimlendirme, endüstriyel motorlar, bilgisayarlar, tıbbi bakım ve modern yaşam araçları, elektrikli taşıtların sayısının giderek artması gibi birçok konu için büyük bir güç gereklidir. Sonuç olarak, dünya çapında elektrik talebi diğer enerji türlerinden daha hızlı büyümektedir. Ayrıca Asya-Pasifik bölgesinde bulunan Çin ve Hindistan'da 1 milyara yakın insana halen elektriğe ulaşamamıştır.
- Dijitalleşme: Teknolojinin gelişmesi ile beraber toplum daha dijital bir hale gelmektedir. İnternet ve bilgisayar tabanlı hizmetler, hanehalkı, iş sektörü yönetimi, gıda ve su yönetimi, ulaşım, iletişim, askeri ve hükümet hizmetleri gibi konularda dijitalleşme çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Enerji altyapısının dijitalleştirilmesi ile beraber daha iyi bir esneklik, sürdürülebilirlik ve daha öngörülebilir maliyetler söz konusu olabilmektedir.

- **Karbonsuzlaştırma:** Konvansiyonel enerji kaynakları yüksek seviyede karbon üretmekte ve üretilen karbon doğaya salınmaktadır. ABD’de, 2019 yılındaki elektrik üretiminde konvansiyonel kaynak kullanımına bağlı karbon üretimi, ABD karbon piyasasının yaklaşık %31’ini kapsamaktadır (Url-7). Çevre kirliliği ve küresel ısınmanın önlenmesi amacıyla karbonsuzlaştırma çalışmaları giderek artmakta ve önem kazanmaktadır. Bu kapsamda karbonsuzlaştırma çalışmaları, teknolojinin gelişmesi ve dijitalleşme ile beraber yürütülmektedir. Dijitalleşmenin etkisiyle elektrik tüketimi artmış olmasına rağmen bina otomasyon sistemleri, akıllı mikro şebeke kontrol gibi sistemler enerji israfını önlemekte ve operasyonel verimliliği arttırmaktadır.
- **Merkezsizleştirme:** Belirli bir şebekeye bağlı iletim ve dağıtım hatlarında, hatların uzunluğu arttıkça elektrik ısıya dönüşmekte ve kayıplar artmaktadır. Ayrıca merkezi şebekeler elektrik kesintilerine karşı esnek değildir. DER verimliliklerinin yüksek olması, yenilenebilir enerji sistemlerinin işletmelere yakın kurulabilmesi ve kolay bir şekilde kontrol edilebilmesi gibi avantajlarla enerji yöneticilerine bu konuda daha tercih edilebilir bir alternatif sunmaktadır.

Mikro şebekelerin gelişen teknoloji ile beraber avantajlarını değerlendirmek isteyen birçok potansiyel yatırımcı bulunmaktadır. Mikro şebekelere artan ilgi ile beraber birçok iş modeli geliştirilmektedir. Navigant Research (2019) raporundan yola çıkarak mikro şebekelerin iş modeli olarak dağılımı aşağıdaki Şekil 2.5’te gösterilmiştir.

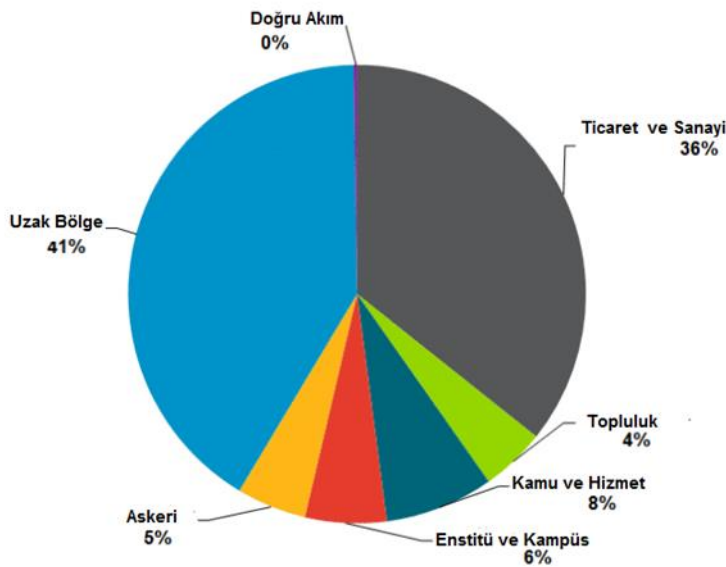


Şekil 2.5 : Dünya pazarında mikro şebekelerin iş modeli olarak dağılımı, Navigant Research (2019)’dan uyarlanmıştır.

Bu iş modelleri aşağıda gösterildiği üzere tanımlamaları yapılabilir:

- Enerji Hizmeti: Enerji satın alma anlaşmaları ile sağlanan modellerdir.
- Devlet Finansmanlı: Birincil finansman kaynağının devlet kaynaklarından doğrudan hibe şeklinde olduğu projelerdir; bu projeler pilot projeler olma ya da kamusal amaçlara hizmet etme eğilimindedir.
- Kişi/Sahip Finansmanlı: Bu modeller özellikle kampüs tipinde üniversiteler ve hastaneler içinde kullanılır. Genellikle fosil kaynaklı dizel jeneratörler, CHP ve YEK kullanılabilen, dağıtılmış enerji kaynaklarına sahiptirler.
- Kullanım oranı tabanlı: Bu modelde ana şebekeye uzak bölgelerde ve adalarda enerji sağlanması amacıyla kullanılan mikro şebeke iş modelidir.
- Diğer: Mesken, topluluk ve askeri alanlarda kullanılan modellerdir.

Navigant Research (2019) raporundan yola çıkarak, mikro şebeke türlerine bağlı olarak küresel kapasite oranları Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Mikro şebekelerin kurulum yapılacağı bölgelere göre yapıları ve özellikleri değişebilmektedir. Mikro şebeke türlerine bağlı olarak sağlayacağı faydalar çeşitlilik gösterebilmektedir.



Şekil 2.6 : Mikro şebeke türlerinin kapasitelerinin küresel pazar payları, Navigant Research (2019)'dan uyarlanmıştır.

Günümüzdeki piyasalarda çok sayıda mikro şebeke türü vardır. Mikro şebekelerin özelliklerine göre kurulum amaçları benzer olsa da, önemleri ve nüfuz etme olasılığı uygulama türüne bağlı olarak değişmektedir (Url-8). Çizelge 2.4'te bu faktörler göz

önünde bulundurulurken öncelik sırasına göre mikro şebeke türlerinde benimsenmesi gösterilmiştir. Çizelge 2.4 incelendiğinde güvenilirlik, enerji tüketicilerin öncelikli faktörü olduğu ve mikro şebeke sistemlerinin hastaneler, üniversiteler ve askeri üslerde uygulanabilirliğinin yüksek olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.4 : Mikro şebeke türlerinin benimsenme faktörleri, GTM Research (2016)'dan uyarlanmıştır.

Mikro Şebeke Türü	1. Faktör	2. Faktör	3. Faktör	Nüfus etme olasılığı
Kritik Servisler/Hastaneler	Güvenilirlik	Maliyet Azaltma	Emisyon Azaltma	Yüksek
Kampüs/Üniversite	Maliyet Azaltma	Güvenilirlik	Emisyon Azaltma	Yüksek
Askeri	Güvenilirlik	Maliyet Azaltma	Çevre Yönetimi	Yüksek
Şehir/Kamu	Güvenilirlik	Çevre Yönetimi	Maliyet Azaltma	Orta
Ticari	Güvenilirlik	Maliyet Azaltma	Çevre Yönetimi	Düşük
Veri Merkezi	Güvenilirlik	Maliyet Azaltma	Çevre Yönetimi	Düşük
Endüstriyel	Güvenilirlik	Maliyet Azaltma	Emisyon Azaltma	Düşük

2.4 Mikro Şebeke Türleri

Mikro şebeke pazarı incelendiğinde enerji kullanıcılarının içerisinde bulundukları sektörlere ve bölgeye göre farklı enerji tüketim davranışları gösterdikleri görülmektedir. Bu farklılıklar mikro şebeke teknolojilerinin faydaları, çevre etkisi, ekonomiklik, kontrol edilebilirlik ve güvenlik açısından değişiklik göstermesi nedeniyle oluşmaktadır. Bu tüketim davranışlarının farklı olması nedeniyle sektörler arası mikro şebeke teknolojileri seçimi arasında farklılıklar olması da söz konusudur. Bu farklılıklar göz önünde bulundurularak mikro şebeke türleri dört alt başlık altında incelenebilmektedir.

2.4.1 Kampüs tipi mikro şebekeler

Bu tip mikro şebeke örnekleri, kampüs şeklinde olan hastaneler ve üniversitelerde kullanılmaktadır. Kampüs tipi mikro şebekeler, mikro türbin, dizel jeneratörler, rüzgâr türbini, PV, CHP, yakıt hücresi gibi enerji üretim sistemleriyle uyumlu bir şekilde çalışabilmektedir. Kampüs tipi mikro şebekelerin bu tesislerde kullanılmasının amacı, güç kalitesini ve enerji verimliliğini arttırmak, depolama sistemlerinin entegrasyonu ile enerji güvenliği ve esnekliğini sağlamaktır. Ayrıca yüksek güç kapasitesiyle beraber kampüsün elektrik talebini kontrol etme yeteneğine de sahiptirler.

Üniversite kampüsleri mikro şebeke teknolojisini ilk benimseyen alanlardan biridir (Url-9). Çizelge 2.4'te anlaşıldığı üzere kampüslerde mikro şebeke teknolojilerinin benimsenmesi yüksektir. Mikro şebekeler, ayrı bir coğrafi alanda yer alan birkaç bina arasında verimli bir şekilde dağıtılabilen yerel üretim sunabilmektedir. Ayrıca kampüsler kurulduğu arazinin sahibi olduğu için, mikro şebekeler kamu hizmetleri, özel sektöre ait elektrik dağıtım tellerinin kampüslerin üzerinden geçmesi gibi bazı düzenleyici yüklerden kaçabilme özelliğine sahiptir. Bu da mikro şebekelerin kampüslerde kurulumunu ve yönetimini oldukça kolaylaştırmaktadır. Akıllı enerji yazılımı tarafından yönetilebilen mikro şebekeler, verimli ve düşük maliyetli enerjiyi sağlayacak şekilde programlanabilirler. Ayrıca, mikro şebekeler, elektrik şebekesine kapasite veya şebeke dengeleme gibi hizmetleri satabilme gibi potansiyel gelir fırsatları da sunmaktadır. Çizelge 2.5'te kampüs tipi mikro şebeke çalışmaları örnekleri bulunmaktadır.

Çizelge 2.5 : Kampüs tipi mikro şebeke örnekleri

Detaylar			Üretim Kaynakları							Depolama		Kapasite (kW)
Ad	Ülke	Yıl	D	S	G	R	P	H	Y	B	C	
Algonquin Koleji-CHP entegreli	Kanada	2017					X			X		4500
Bronzeville Mikro Şebekesi	ABD	2018					X			X		2500
Prince Laboratuvarı-CHP entegreli	İtalya	2020			X	X	X			X		260
Gazi Üniversitesi Enerji Parkı	Türkiye	2007				X	X			X		5
Griffith Üniversitesi	Avustralya	2017	X		X	X	X			X		110
San Diego Mikro Şebekesi	ABD	2007		X	X		X					18000
Tianjin Üniversitesi	Çin	2007				X	X			X		5
Miami Üniversitesi	ABD	2007					X		X	X		10
Genoa Üniversitesi-CHP entegreli	İtalya	2013			X	X	X			X		200
Sandia Laboratuvarı	ABD	2012	X			X	X			X		60
BCIT Mikro Şebekesi	Kanada	2008		X		X	X			X		1200
Kaliforniya Üniversitesi	ABD	2016	X		X		X		X	X		43000
D: Dizel Jeneratör	S: Buhar Türbini	G: Gaz Türbini	R: Rüzgâr Türbini									
P: Güneş Paneli	H: Hidrolik	Y: Yakıt Hücresi	B: Batarya C: Kapasitör									

2.4.2 Ana şebekeden bağımsız ve ada tipi mikro şebekeler

Bu mikro şebeke türleri, adalarda ve ana şebeke ile bağlantının olmadığı uzak yerleşim yerlerinde bulunmaktadır. Dünyada ekonomisi gelişmekte olan veya gelişmemiş birçok ülke bulunmakta ve bu ülkelerde gıda, ısıtma ve aydınlatma için hala enerjiye erişimi olmayan insanlar bulunmaktadır. Dünya Bankası'nın raporuna göre dünya nüfusunun yaklaşık %11'inin elektriğe erişimi bulunmamaktadır (Url-10). Diğer yandan Kanada gibi ekonomisi güçlü olan ülkelerde temiz enerji kaynaklarına sahip olmasına rağmen, 239 farklı topluluğun yaşadığı bölgelerin şebekeye bağlantısı bulunmamaktadır (Arriaga ve diğ, 2017). Bu topluluklar uçaklarla gelen fosil yakıtlara bağımlı olarak yaşamaktadır.

Mikro şebekeler coğrafi açıdan ana şebekelerin ulaşmasının zor olduğu bölgelere, kırsal alanlara ve adalara enerji sağlanması konusunda en iyi seçenektir (Meena ve diğ, 2019). Rüzgâr, güneş, hidrolik gibi yenilenebilir enerji sistemleri ve dizel yakıtlı jeneratörlerle bu bölgelere enerji sağlanmaktadır. Ayrıca bu sistemlerin enerji talebini kontrol etme, fosil yakıt tüketimini azaltma ve elektrik güvenliğini sağlayabilme özelliği bulunmaktadır. Navigant Research (2018) raporuna göre dünya çapındaki uzak mikro şebeke yatırımlarının 2018 yılında 3 milyar dolardan, 2027 yılına gelindiğinde 10.2 milyar dolar olması beklenmektedir. Çizelge 2.6'da ana şebekeden bağımsız ve ada tipi mikro şebeke örnekleri gösterilmektedir.

Çizelge 2.6 : Ana şebekeden bağımsız ve ada tipi mikro şebeke örnekleri

Detaylar		Üretim Kaynakları								Depolama		Kapasite (kW)
Ad	Ülke	Yıl	D	S	G	R	P	H	Y	B	C	
Alto Baguales Mikro Şebekesi	Şili	2001	X			X		X				23000
Subax Mikro Şebekesi	Çin	2006	X		X	X	X			X		50
Mawson İstasyonu	Antarktika	2002	X			X						1150
Newall Dağı	Antarktika	2002	X			X	X					10
Hawaii Hydrogen	USA	2012				X	X		X	X		200
Yokohama M.Ş. Biyogaz Entegreli	Japonya	2008			X	X	X					100
Mad River Park	ABD	2005	X				X			X		500
Bonaire Adası	Hollanda	2015	X			X				X		25000
King Adası	Avustralya	2015	X			X	X			X		8840
Eigg Adası	İskoçya	2015	X			X	X	X		X		250
Rottneast Adası	Avustralya	2018	X			X	X				X	4000
Tilos Adası	Yunanistan	2017				X	X					1000
D: Dizel Jeneratör S: Buhar Türbini G: Gaz Türbini R: Rüzgâr Türbini P: Güneş Paneli H: Hidrolik Y: Yakıt Hücresi B: Batarya C: Kapasitör												

2.4.3 Ticari ve endüstriyel mikro şebekeler

Mikro şebekeler, hem rüzgâr hem de güneş kaynaklarını dâhil ederek çeşitli yenilenebilir kaynakları toplama ve kontrol etme yeteneğine sahiptir. Ayrıca CHP gibi sistemlerle entegre çalışarak düşük maliyetli elektrik üretimi sağlayabilmektedir. Ticari ve endüstriyel alanlarda elektrik kesintileri için enerji güvenliğinin sağlanması, enerji talep kontrolü, temiz ve ucuz elektrik üretiminde önemli bir paya sahiptir.

Son yıllarda yapılan araştırmalarda veri merkezleri, alışveriş merkezleri, tatil köyleri, oteller, fabrikalar ve diğer iş operasyonları gibi ticari ve endüstriyel alanlarda mikro şebeke çalışmalarının diğer mikro şebeke türlerine kıyasla daha hızlı büyümektedir (Url-11). Navigant Research (2017) raporuna göre ticari ve endüstriyel mikro şebeke uygulamalarının dünya çapındaki 448.3 MW kapasitesi, 2026 yılına geldiğinde 5.389,1 MW'a kadar çıkacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca, ticari ve endüstriyel şebekelerin en çok görüldüğü Kuzey Amerika'da 2017 yılında 215.5 MW olan kapasite 2026 yılında 870.8 MW'a çıkacağı öngörülmektedir. Harcamalar perspektifinden bakıldığında ise %16.8 yıllık büyüme oranı göz önünde bulundurarak 2017'de 857,0 milyon dolar olan hacim, 2026'ya kadar yaklaşık 3,3 milyar dolar olan yıllık harcama yapılacağını göstermektedir. Çizelge 2.7'de ticari ve endüstriyel alanlardaki mikro şebeke uygulamalarının örnekleri bulunmaktadır.

Çizelge 2.7 : Ticari ve endüstriyel alanlarda kullanılan mikro şebeke örnekleri

Detaylar			Üretim Kaynakları							Depolama		Kapasite (kW)
Ad	Ülke	Yıl	D	S	G	R	P	H	Y	B	C	
Aichi Havalimanı M.Ş.-Biyogaz entegreli	Japonya	2005					X		X	X		1200
Hachinohe M.Ş.-Biyokütle entegreli	Japonya	2005			X	X	X			X		1000
Albuquerque M.Ş.-CHP entegreli	ABD	2010			X		X		X	X		2500
Palmdale M.Ş.	ABD	2006	X		X	X		X			X	4000
Fortis-Alberta M.Ş.	Kanada	2006				X		X				7000
Essakane Madeni	Burkina Faso	2017	X				X					70000
ABB Longmeadow Park	Güney Afrika	2016	X				X			X		3250
Establishment Labs	Kosta Rika	2016	X				X					2800
Niobrara Enerji Parkı	ABD	2015			X	X	X		X	X	X	300000
D: Dizel Jeneratör P: Güneş Paneli	S: Buhar Türbini H: Hidrolik	G: Gaz Türbini Y: Yakıt Hücresi	R: Rüzgâr Türbini B: Batarya C: Kapasitör									

2.4.4 Kamu, topluluk ve askeri mikro şebekeleri

Bir kamu veya topluluk mikro şebekesi teknik olarak, ana şebeke sisteminden bağımsız bir şekilde kontrol edilebilen, belirli elektrik sınırları içerisinde birbirine bağlı yüklerin yönlendirildiği DER grubu olarak tanımlanabilmektedir (Walker ve Devine-Wright, 2008). Bir topluluk mikro şebekesi, şebekeye bağlı veya ada modunda çalışmasını sağlamak için şebekeye bağlanabilir veya bağlantısını kesebilir. Dağıtılmış kaynakların büyümesi, kamu hizmetleri ve şebeke operatörlerini standart operasyonlardan daha merkezi olmayan güç sistemlerine geçiş yapmaya zorlamaktadır. DER kamu bölgelerine doğrudan elektrik sağlayabilmekle beraber EDS ile entegre çalışabilmektedirler; fakat uygulama maliyetleri yüksek olabilmektedir. Son zamanlarda yapılan çalışmalara göre mikro şebekeler, kamu alanlarının yenilenebilir, düşük maliyetli enerji tedarik etmelerini ve güvenilirliği sürdürmelerini sağlamak için güneş enerjisi, gelişmiş EDS, enerji verimliliği ve diğer kaynakların kullanımını optimize ederek yüksek olan maliyetleri düşürebilmektedirler (Url-12).

Dünya kamu türündeki mikro şebeke durumuna bakıldığında, Avrupa Birliği (AB)'nin toplum odaklı bir yaklaşımı olduğu görülmektedir (Van der Schoor ve Scholtens, 2015). Bazı Avrupa ülkelerinin enerji sektörünü karbondan arındırmak için iddialı hedefleri vardır (Warneryd ve diğ, 2020). Avrupa ülkelerindeki teşvikler ve politikalar sayesinde yenilenebilir enerji üretimi (çoğunlukla rüzgâr ve güneş enerji sistemleri) büyük ölçüde artırmıştır. Almanya, Hollanda ve Finlandiya gibi ulusların topluluk enerjisini çeşitli şekillerde teşvik etme politikaları vardır. Koirala ve diğ. (2016), Avrupa genelinde 2016 yılı itibarı ile 2800'den fazla topluluk şebekesi olduğunu belirtmişlerdir. Günümüze yaklaştıkça bu tarzdaki mikro şebeke örneklerinin artması ile beraber, mikro şebeke teknolojilerinin topluluk içinde daha hızlı bir şekilde öğrenme süreci ve topluluğun kendi kendine sürdürülebilirliği sağlanmaktadır.

Mikro şebekeler elektrik güvenliğinin öncelikli olduğu askeri alanlar, veri merkezleri ve hastane gibi kritik yük ve operasyonel yüklerin önemli olduğu yerlerde kullanılmaktadır. Navigant Research (2017) tarafından hazırlanan rapora göre dünyadaki askeri mikro şebeke yatırımları incelenmiş ve gelecek için tahminler yapılmıştır. Rapora göre, askeri mikro şebeke yatırımlarının 453,3 milyon dolardan 2026'ya kadar 1,4 milyar dolara ulaşacağı tahmin edilmektedir. Askeri mikro şebeke pazarına bakıldığında en büyük pay sahibinin ABD Savunma Bakanlığı olduğu

görülmektedir. Dünyada en büyük petrol alıcılarından biri olan ABD Savunma bakanlığı, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak, enerji verimliliği, enerji yönetimi ve operasyonel maliyetlerinin düşürülmesi için mikro şebeke yatırımları yapmaktadır. Navigant Research (2017) raporuna göre 523 adet askeri üs için yapılacak mikro şebeke yatırımları ile 20 yıl içerisinde 8-20 milyar dolar tasarruf sağlanabileceği öngörülmüştür. Çizelge 2.8’de kamu, topluluk ve askeri mikro şebeke uygulama örnekleri gösterilmektedir.

Çizelge 2.8 : Kamu, topluluk ve askeri mikro şebeke örnekleri

Detaylar			Üretim Kaynakları							Depolama		Kapasite (kW)
Ad	Ülke	Yıl	D	S	G	R	P	H	Y	B	C	
Mannheim-Wallstadt Santrali	Almanya	2003					X					30
Continuon’s MV/LV Santrali	Hollanda	2003					X			X		315
SGEM Mikro Şebekesi	Finlandiya	2012	X			X						2000
Bornholm M.Ş. Biyogaz entegreli	Danimarka	2007	X	X		X	X		X			55000
Azores M.Ş.	Portekiz	2005	X			X	X	X				2000
CSIRO Energy-Biyogaz entegreli	Avustralya	2010			X	X	X			X		500
Santa Rita Hapishanesi	ABD	2011	X			X	X		X	X		5000
Montgomery County-CHP entegreli	ABD	2017	X		X		X					7600
Kansas Hayatta Kalma Barınağı	ABD	2013	X			X	X			X		450
Albany Askeri Üssü Biyogaz-CHP entegreli	ABD	2018	X		X							15600
Kaiser Richmond Sağlık Merkezi	ABD	2017					X			X		250
St. Marys Lacor Hastanesi	Uganda	2019					X			X		250
D: Dizel Jeneratör P: Güneş Paneli	S: Buhar Türbini H: Hidrolik	G: Gaz Türbini Y: Yakıt Hücresi	R: Rüzgâr Türbini B: Batarya	C: Kapasitör								

2.5 Enerji Depolama Sistemleri

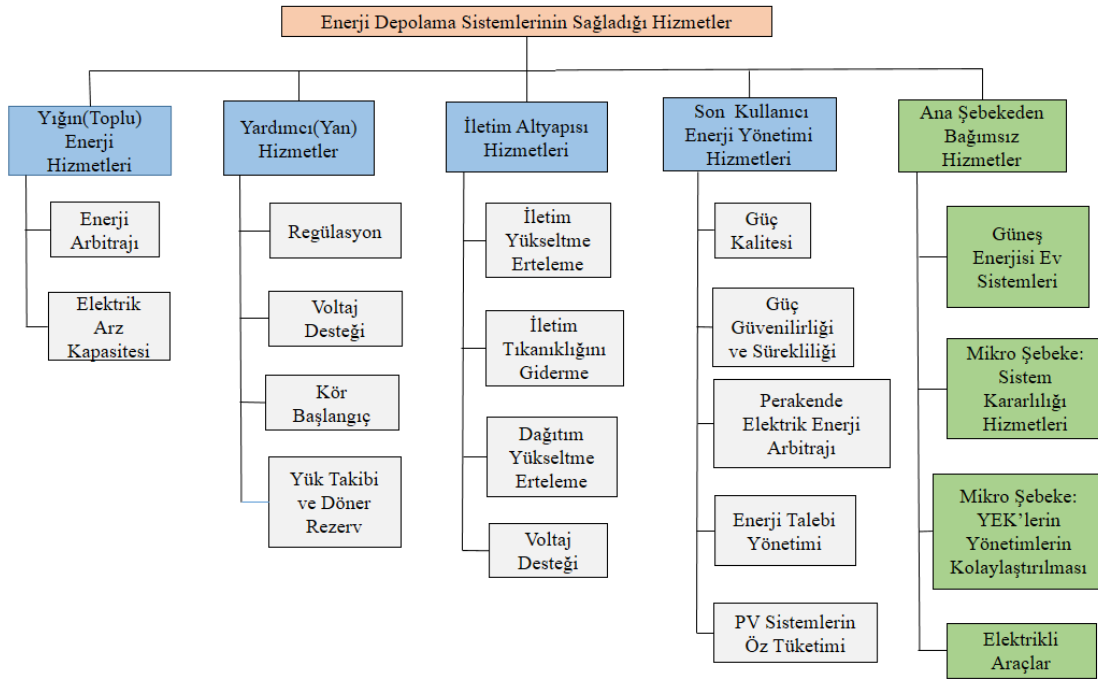
21. yüzyılın başından günümüze kadar, teknolojinin hızlı bir şekilde gelişmesi ile beraber enerji tüketimi ve buna bağlı olarak enerji üretiminde de küresel çapta bir artış meydana gelmiştir. Enerji talebinin artması ile beraber enerji arz güvenliğinin sağlanması ve sürdürülebilirliğin sağlanması büyük öneme sahiptir. Diğer yandan talep edilen enerjinin sağlanması amacıyla fosil yakıtların kullanılması da hava kirliliği ve küresel ısınma gibi büyük sorunlara yol açmaktadır. Bu sorunlara en büyük

özüm yanıtını veren enerji üretim sistemleri ise yenilenebilir enerji sistemleridir. Bu durumda sosyal ve ekonomik şartlar göz önünde bulundurulduğu zaman, sonsuz enerji kaynağı olan rüzgâr ve güneş enerjisi sistemleri ön plana çıkmakta ve teknolojileri geliştirilmektedir (Arani ve diğ, 2019). Fakat güneş ve rüzgâr enerjisi sistemleri doğası gereği kesikli üretim yapma durumu söz konusu olduğu için enerji arz güvenliğinin sağlanması noktasında enerji depolama sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Mikro şebeke yönetiminde EDS yenilenebilir enerji büyümesini desteklemek için ek bir yedek üretim kapasitesi sunmaktadır. EDS'nin mikro şebekelerde kullanılmasının birçok amacı bulunmaktadır. Bu amaçlar şu şekilde özetlenebilir;

- Yenilenebilir enerji kaynaklarının kesikli üretimlerini yerel olarak stabilize ederek enerji üretiminin, enerji taleplerine eşleşmesini sağlamak (Hartmann ve Dan, 2012).
- Frekans düzenleme sürecine katılmak ve yenilenebilir enerji mikro şebekelerinde üretim ve talep arasındaki enerji dengesini sağlamak (Vadana ve diğ, 2016).
- Depolanan enerjiyi, enerji talebinin en yüksek olduğu zamanda kullanarak yükün azaltılmasını sağlamak (Robert ve diğ, 2018).
- Yenilenebilir enerji kaynaklı yerel tepe talebini veya yerel ihracat gücünü sınırlandırarak mikro şebekeler tarafından iletim hattı üzerinden geçen voltaj trafîği sırasındaki gerilimi azaltmak (Robert ve diğ, 2018).
- Enerji güvenilirliğini arttırmaktır.
- Yenilenebilir enerjinin entegrasyonu ile fosil yakıt tüketiminin azaltılmasını sağlamak ve CO₂ salım miktarını düşürmektedir.
- Ana şebekeden gelen yüksek fiyatlı elektriğe karşı, yenilenebilir enerji sistemlerinin ürettiği enerjinin depolanması ve gerektiğinde kullanılması (arbitraj) ile ekonomik fayda sağlanması amaçlanmaktadır.

Enerji depolama sistemleri topluluk, yenilenebilir enerji kullanımı, gelişmiş bina enerji sistemleri ve gelişmiş ulaşım gibi çeşitli uygulamalar için olanak sağlayan bir teknolojidir. Enerji depolama sistemleri uygulamaya göre farklı şekillerde kategorize edilebilir. Şekil 2.7’de görüldüğü üzere enerji depolama sistemlerinin uygulamaları ve bu uygulamaların hizmetleri gösterilmektedir. Genellikle tek bir enerji depolama teknolojisi tüm uygulama gereksinimlerini etkili bir şekilde karşılayamadığında, hibrit enerji depolama sistemleri kullanılabilir. Enerji depolama uygulamaları sürekli genişlemektedir.



Şekil 2.7 : Enerji depolama sistemlerinin sağladığı hizmetler, Nadeem ve diğ. (2019)’dan uyarlanmıştır.

Enerji depolama uygulamaları genellikle çok çeşitli enerji ve güç yoğunluklarına sahip çok yönlü enerji depolama ve enerji kaynağı sistemlerinin tasarımını ve yönetimini gerektirmektedir. Enerji depolama uygulamaları genel olarak beş bölüme ayrılmaktadır (Koohi-Fayegh ve Rosen, 2020):

- Genel Uygulamalar: Enerji depolama genel kullanımında birçok farklı depolama uygulaması mevcuttur. Termal depolama ve volan sistemleri gibi uygulamalar burada görülebilmektedir. Örnek olarak; güneş enerjisini kullanarak depolanan enerji sayesinde su ve hava ısıtma, binaların iklimlendirilmesi, kurutma ve pişirme işlemleri, atık ısı geri dönüşümü, seracılık gibi alanlarda kullanımı vardır (Nazir ve diğ, 2019). Dawson ve diğ.

(2012)'in araştırmasında volan (flyweels) depolama sistemlerinin kullanımı ile elektrik depolama çalışmaları incelenmiştir. Bu çalışmada, volanlar hibrit bir sistemle Uluslararası Uzay İstasyonu (ISS)'nda kullanılarak elektrikli araçların çalıştırılması, enerji verimliliğinin ve güç kalitesinin arttırılması çalışmalarında kullanılmıştır.

- Enerji Kullanım Uygulamaları: Enerji depolama sistemlerinin şebeke ağılarında kullanımı giderek daha önemli hale gelmiştir. Enerji depolama sistemleri elektrik güç sistemlerindeki beş ana alt sistemden; üretim, iletim, trafo merkezleri, dağıtım ve nihai tüketicilere dağıtılan enerji depolaması, müşteri talebi ve üretimini dengelemeye yardımcı olmaktadır (Koohi-Fayegh ve Rosen, 2020).
- Yenilenebilir Enerji Uygulamaları: Yenilenebilir enerji kullanımının hızla büyümesi ile dünyadaki enerji talebinin bir kısmı karşılanmaktadır ve bununla birlikte ticari ve endüstriyel alanların çevresel etkilerini azaltmak için elektrik enerjisinin sağlanmasına yardımcı olmaktadır. Enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji sistemlerinin kesikli üretim yapmasından dolayı oluşan güç dengesizliğinin önlenmesi, jeneratör ve motor ekipmanlarında olası zararların engellenmesinde kullanılmaktadır (Carnegie ve diğ, 2013). Bunun yanı sıra, yenilenebilir enerji sistemleri ile enerji depolama teknolojisinin birleşmesi ile yenilenebilir enerjinin güç uygulamalarındaki nüfuzu artmakta ve genel sistem performansı artarken, şebeke kontrolü ve bakımı için esneklik sağlanmaktadır. Yenilenebilir enerjinin entegrasyonu ve kamu uygulamalarında enerji depolama sistemleri olarak genellikle elektrik alanlar (kapasitörler), süperiletken manyetik alanlar (SMES), kimyasal reaksiyonlar (bataryalar), mekanik (volan) veya potansiyel enerji (PHES), basınçlı enerji (CAES) sistemleri kullanılmaktadır (Rohit ve Rangnekar, 2017).
- Bina ve Topluluk Uygulamaları: Ticari, kurumsal, endüstriyel ve konut sektörlerindeki binalarda YEK'in kullanımı devletler ve özel sektör teşvikleri ile giderek artmaktadır. Enerji depolama, yenilenebilir enerjinin binaların üretim tarafındaki entegrasyonunu kolaylaştırmanın önemli bir yoludur ve binalardaki kullanıcı talep değışkenliğinin (talep tarafında) karşılanmasına izin veren bir tampon olarak kabul edilmektedir (Koohi-Fayegh ve Rosen, 2020). Del Pero ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada binalardaki enerji depolama

sistemlerinin performans göstergelerini belirlemişlerdir. Bu göstergeler; depolama kapasitesi, maksimum şarj ve deşarj gücü, şarj derinliği, dayanıklılık, spesifik depolama maliyeti, maksimum kendi kendine deşarj oranı, depolama ağırlığı ve üretilen enerji/maliyet tasarruflarını içermektedir.

- Ulaşım Uygulamaları: Kara, su ve hava taşımacılığı teknolojileri geçmişten bu yana giderek gelişimini sürdürmektedir. Bu teknolojiler gelişmiş enerji depolama sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. Enerji depolama sistemleri, geleneksel ulaşım teknolojisi olan içten yanmalı araçların motorlarının ateşlenmesinin yanında elektrikli ve hibrit araçlarda da kullanılmaktadır. Ulaşım araçlarında en çok görülen enerji depolama sistemleri yakıt hücreleri için hidrojen depolama tankları, volanlar, ultra kapasitörler ve bataryalar gibi yerleşik enerji depolama sistemlerini kullanılmaktadır (Koochi-Fayegh ve Rosen, 2020). Enerji depolama sistemlerinin ulaşım araçlarında kullanılmasının amacı, yüksek verimlilik, kolay kontrol edilebilirlik, rejeneratif frenleme kapasitesi hızlı güç deşarjı için yüksek güç yoğunluğu sağlamasıdır (Arani ve diğ, 2017a).

Rohit ve Rangnekar (2017)'ın çalışmasına göre enerji depolama sistemleri uygulama alanları dört kategoriye ayrılmıştır. Bu uygulamalar; yığın (toplu) enerji uygulamaları, yardımcı (yan) hizmet uygulamaları, son kullanıcı enerji uygulamaları (müşteri enerji yönetimi uygulamaları) ve yenilenebilir enerji entegrasyon uygulamaları olarak belirtilmiştir. Ayrıca ulaşım sektöründe ve şebeke dışı uygulamaların sayısının artmasında bir ivme olduğunu belirtmişlerdir.

Enerji depolama sistemleri kullanılacağı alanın gerekliliklerine ve teknolojik yapılarına göre deşarj süresine bağlı kısa vadeli (sn-dk), orta vadeli (dk-sa) ve uzun vadeli (sa-gün) şeklinde de sınıflandırılabilir. Çizelge 2.9'da toplamda 6 kategoride olmak üzere, enerji depolama sistemlerinin bu kategorilere ve teknik konularına uygunlukları incelenmiştir. Çizelge incelendiğinde CAES (Sıkıştırılmış hava ile depolama), PHES (Hazneli pompalı hidrolik depolama) ve TES (Termal enerji depolama) gibi depolama sistemleri toplu enerji hizmetleri için uygun sistemler olarak görülmektedir. Diğer yandan elektrokimyasal enerji depolama sistemlerine bakıldığında yardımcı servisler, son kullanıcı, yenilenebilir enerji, ulaşım ve şebeke dışı hizmetlere karşı daha uygun sistemler olduğu görülmektedir. Özellikle de çizelgede, yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonunun sağlandığı şebeke dışı

mikro şebeke uygulamalarında batarya sistemlerinin hizmetleri ve teknolojik uygunlukları göze çarpmaktadır.

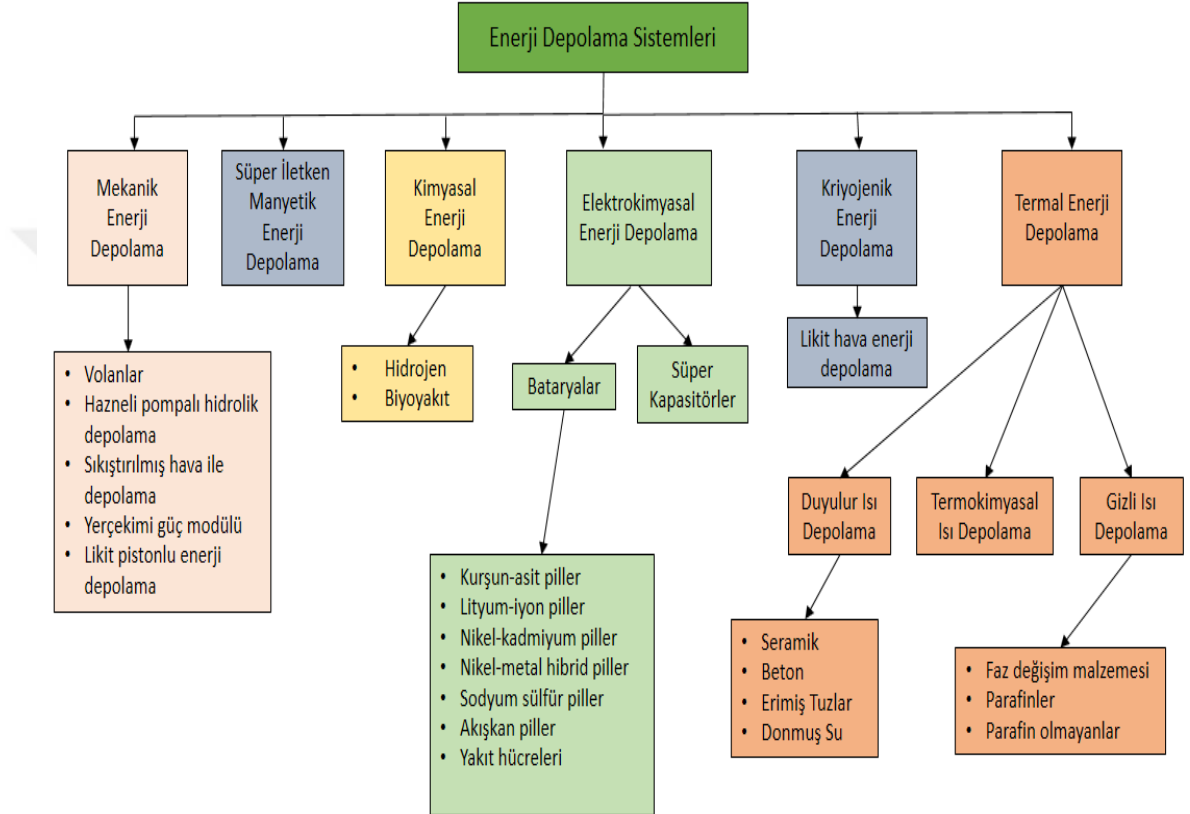


Çizelge 2.9 : Enerji depolama teknolojilerinin enerji uygulamaları ve hizmetlerine uygunluklarının karşılaştırılması, Rohit ve Rangnekar (2017)’dan uyarlanmıştır.

Enerji Uygulamaları / Teknolojiler	Yığın(Toplu) Enerji Hizmetleri		Yardımcı(Yan) Hizmet Uygulamaları					Son Kullanıcı Uygulamaları		YEK Uyg.	Ulaşım Uyg.	Off-Grid Uyg.
	Enerji Arbitrajı	Tepe Tıraşlama	Yük Takibi	Döner Rezerv	Kör Başlangıç	Frekans Regülasyonu	Voltaj Desteği	Güç Güvenilirliği	Güç Kalitesi			
Mekanik Enerji Depolama												
CAES	E	E	E	E	E	E	H	E	H	E	H	H
PHES	E	E	H	H	E	E	H	H	H	E	H	H
Volanlar	H	H	E	E	H	H	E	E	E	H	H	H
Elektrokimyasal Enerji Depolama												
Kurşun-asit	H	H	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
Akışkan Piller	E	E	E	H	E	E	E	E	E	E	H	E
NaS	H	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
Li-iyon	H	H	E	H	E	E	E	E	E	E	E	E
Yakıt Hücresi	E	H	H	H	H	H	H	H	H	H	E	E
Kapazitörler	H	H	H	H	H	H	H	H	E	H	E	H
Manyetik Enerji Depolama												
SMES	H	H	H	H	H	H	H	H	E	H	H	H
Termal Enerji Depolama												
TES	E	E	E	E	H	H	H	H	H	H	H	H
E: Uygun bir teknoloji H: Uygun olmayan bir teknoloji												

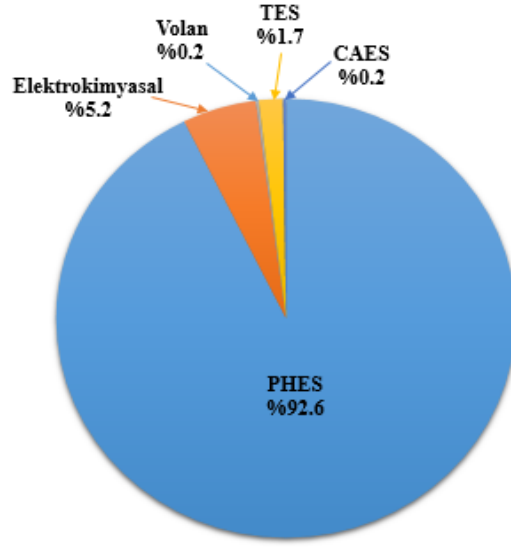
2.6 Enerji Depolama Sistemlerinin Sınıflandırılması

Enerji depolama uygulamalarında kullanılan birçok çeşit depolama teknolojileri ve sistemleri mevcuttur. Bu depolama teknolojileri enerji üretim kaynağına bağlı olarak 6 başlık altında sınıflandırılmaktadır. Şekil 2.8’de bu ana başlıklara ait farklı enerji depolama sistemlerinin sınıflandırması mevcuttur.



Şekil 2.8 : Enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması

Dünya çapında enerji depolama sistemlerinin kapasiteleri gün geçtikçe artmaktadır. Enerji depolama sistemlerinin dünyada çapında izlenmesi amacıyla yapılan bir araştırmaya göre 2020 yılındaki küresel operasyonel enerji depolama proje kapasitesi (mekanik, elektrokimyasal ve termal enerji depolaması dahil) toplam 184,7 GW'a ulaşarak 2019' un ilk çeyreğine göre %1,9 artış göstermiştir (Url-13). Ayrıca küresel elektrokimyasal enerji depolama kapasitesi toplam 9660,8 MW'a ulaştığı belirtilmiştir. Şekil 2.9'da ise 2020 yılında EDS'nin küresel kapasitelerinin oranları gösterilmektedir.



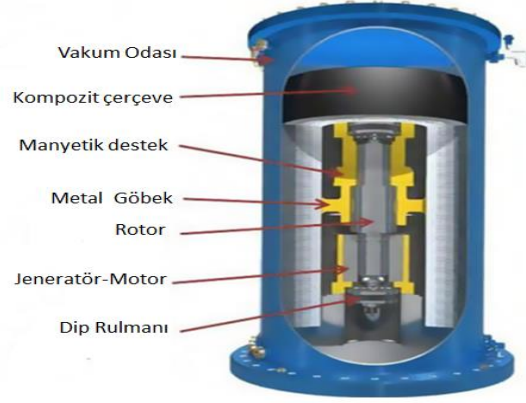
Şekil 2.9 : Küresel enerji depolama sistemleri kapasitesi oranları, 2020, Url-13'ten uyarlanmıştır.

2.6.1 Mekanik depolama

Mekanik enerji depolama sistemleri kinetik ve potansiyel enerjinin depolanıp, elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sistemlerdir. Birçok kullanım uygulaması olması ile beraber en çok kullanılan sistemler volanlar, pompalı hidroelektrik depolama ve sıkıştırılmış hava depolama sistemleridir.

2.6.1.1 Volanlar (Flywheels)

Volanlar eski bir enerji depolama tekniği olup makinelerin düzgün çalışmasını ve yüksek güç ve enerji yoğunluğunu sağlamak için uygun bir mekanik enerji depolama şeklidir (Koohi-Fayegh ve Rosen, 2020). Bir volan, enerjiyi kinetik enerji şeklinde depolayan elektromekanik bir sistemdir; şarj sırasında motor ve deşarj sırasında jeneratör görevi gören bir elektrikli makine ile birleştirilmiş manyetik yataklar üzerinde dönen bir silindirden oluşmaktadır (Diaz-Gonzalez ve diğ, 2013). Şekil 2.10'da volan depolama sistemi bileşenlerinin örnek bir şeması görülmektedir.



Şekil 2.10 : Volan depolama sistemi bileşenleri, Ruddell (2010)’dan uyarlanmıştır.

Volan depolama sistemleri dönmenin oluşturduğu atalet momentinin boyutuna göre ikiye ayrılır; yüksek hızlı volanlar (10000-100000 rpm ile dönen) ve düşük hızlı volanlar (10000 rpm) (Teleke, 2011). Volanlar, jeneratör veya motor modunda çalışabilen elektrikli bir makineye bağlanmaktadır. Sistem şarj modunda iken elektrik enerjisi ağdan volana doğru akar ve disk hızı artar (motor modu), boşaltma modunda ise disk hızı azalır ve motor jeneratör modunda çalışır (Arani ve diğ, 2017b). Volanlar kendiliğinden deşarj olmalarından dolayı görece düşük enerji yoğunluğuna sahiptir, enerji kısa süreli depolanmaktadır ve uzun dönemli depolama ihtiyacı olan sistemlerde kullanılması uygun gösterilmemektedir (Pena-Alzola ve diğ, 2011). Şekil 2.10’da gösterilen volanlarda yüksek dönme verimliliği (%90-95) ve 20 yıl üzeri kullanım ömürleri bulunmaktadır (Chen ve diğ, 2009).

2.6.1.2 Hazneli pompalı hidrolik enerji depolama (PHES)

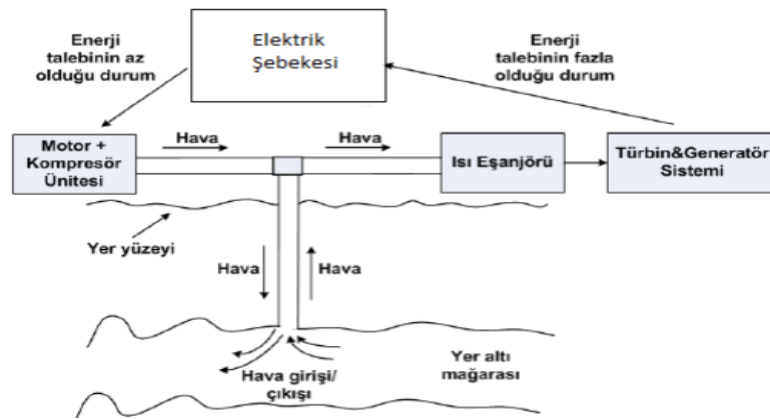
PHES, suyu düşük bir yükseklikteki bir borudan daha yüksek bir su deposuna taşımak için bir elektrikli pompa kullanarak elektrik enerjisini hidrolik potansiyel enerji şeklinde depolayan, kaynak güdümlü bir tesistir. Suyun yüksek kaynağa pompalanması sırasında rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji sistemleri ile entegre çalışma imkanı vardır. Enerji, suyun bir hidro türbin içinden yüksek bir yükseklikten daha düşük bir yüksekliğe geçmesine izin verilerek deşarj edilmektedir.

Kaynaktan gelen hidrolik enerji türbine girer ve türbinin içinde bulunan jeneratörden geçerek elektrik enerjisine dönüşmektedir. Suyun türbine giriş akışı, değişken bir güç çıkışı sağlamak için kapılar kullanılarak kontrol edilmektedir ve PHES’lerin hızlı tepki

süreleri olduğu için frekans regülasyonunu da sağlamaktadırlar (Chen ve diğ, 2009). Pompalı hidro enerji depolama sistemleri, yükseklik ve suya erişim farkı olan yerlerin mevcudiyeti gibi çevresel koşullar gerektirir. Koşullar karşılandığında, yenilenebilir enerji depolaması ve şebekeler için uygun bir seçenektir. PHES sistemlerinin enerji verimliliği %70-80 arasında değişmekte ve yaygın olarak 1000-1500 MW arasında boyutlandırılmaktadır (Rehman ve diğ, 2015). PHES'lerin 50 ile 100 yıl arası uzun varlık ömürleri, düşük işletme ve bakım maliyeti vardır. PHES'lerin yüksek kurulum maliyetleri, boyutları ve çevresel sınırlamaların olması gibi dezavantajları bulunmaktadır (Menendez ve diğ, 2019).

2.6.1.3 Sıkıştırılmış hava ile depolama (CAES)

Sıkıştırılmış hava ile deplama sistemleri genellikle hava sızdırmayan yeraltı mağaraları, terk edilmiş madenler ve delinmiş kaya yapılarında büyük kapasitelerde kompresörler aracılığıyla sıkıştırılmakta ve depolanmaktadır. Sıkıştırılan ve ısınan hava bir türbinden geçirilerek elektrik enerjisi üretilir. CAES'ler %85 enerji çevrim verimliliğine sahip olmakla beraber 20 ile 40 yıl arası varlık ömürleri bulunmaktadır (Foley ve Diaz Lobera, 2013). Şekil 2.11'de gösterildiği üzere enerji talebi olduğunda sıkıştırılan hava eşanjörlerle ısıtılarak türbine gönderilmektedir. Ayrıca talebin az olduğunda kompresörlerle hava tekrardan depolanmaktadır. CAES'ler ile birlikte yenilenebilir enerji entegrasyonu sağlanarak kompresörlerin elektrik ihtiyacının karşılanmasında da kullanılabilmektedir.



Şekil 2.11 : Sıkıştırılmış hava ile depolama sistem şeması, Erdinç ve diğ. (2011)'den uyarlanmıştır.

2.6.2 Termal depolama sistemleri (TES)

Termal depolama tesisleri, bölgesel ısıtma sistemlerinin dinamik özelliklerinin en iyi şekilde ele alınması için bir ısı rezervuarı sağlamaktadır. Üç ana TES sistemi bulunmaktadır: Duyulur, gizli ve termokimyasal ısı depolamadır.

Duyulur enerji depolama sistemlerine örnek olarak sıcak su depolama (hidro-birikim), yeraltı termal enerji depolama (akifer, sondaj deliği, mağara, toprak kanalları, çukurlar) ve kaya ısı depolama (kaya, seramik, çakıl) sayılabilir (Fleuchaus ve diğ, 2018).

Gizli ısı depolama, fazlar arasında, katı-gaz, sıvı-gaz ve katı-katı faz değişiklikleri de mevcut olmasına rağmen, depolama malzemesinin fazının değiştirilmesini içeren gelişmekte olan bir teknolojidir. Gizli ısı depolama, özellikle faz değişim sürecinin izotermal doğası, yüksek enerji yoğunluğu ve birim depolama kapasitesi başına daha düşük ağırlığı nedeniyle önemli ölçüde dikkat çekmektedir (Baker, 2008). Kararlı faz değişim sıcaklığı ve yüksek gizli ısı gibi hissedilir ısı depolama malzemelerine kıyasla gelişmiş termal özellikleri de ortaya çıkmasına katkıda bulunan faktörlerdir. Gizli ısı depolama ortamı olarak tipik faz değiştirme malzemeleri (PCM'ler), kullanılmaktadır. Bu malzemeler; parafin mumları, esterler, yağ asitleri ve tuz hidratları, metal ve alaşım malzemeleri olarak sıralanabilir.

Termal ısı depolama konut, sanayi, tarım ve ulaşım sektörlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca, fosil yakıtlardan oluşan atık ısıların değerlendirilmesi, güneş ve rüzgâr gibi enerji sistemleri uygulamaları ile enerji verimliliğinin sağlanmasında önemli bir rol almaktadırlar.

2.6.3 Elektrokimyasal enerji depolama (EESS)

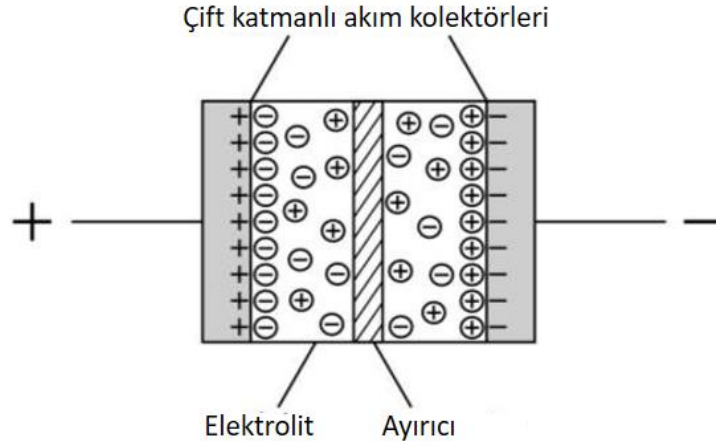
EESS'lerde elektrik enerjisi, elektrokimyasal olarak piller ve kapasitörlerde depolanmaktadır. Bataryalar yüksek enerji yoğunluklarına ve yüksek gerilimlere sahip olgun enerji depolama sistemleridir. Lityum-iyon (Li-iyon), sodyum-sülfür (NaS), nikel-kadmiyum (NiCd), kurşun-asit (Pb-asit), kurşun-karbon piller, zebra pilleri (Na-NiCl₂) ve akış bataryaları olmak üzere birçok çeşit batarya mevcuttur. Kapasitörler ise elektrokimyasal olarak enerji depolamakta ve elektrostatik kapasitörler, elektrolitik kapasitörler ve elektrokimyasal kapasitörler olarak sınıflanmaktadır.

2.6.3.1 Kapasitörler

Kapasitörler, elektronların kutuplanıp elektriksel yükünü, elektrik alanının içerisinde depolayabilme özelliklerinden faydalanılarak bir yalıtkan malzemenin iki metal tabaka arasına yerleştirilmesiyle oluşturulan temel elektrik ve elektronik devre elemanıdır. Elektrik yükü depolama, reaktif güç kontrolü, bilgi kaybı engelleme, AC/DC arasında dönüşüm yapmada kullanılır ve tüm entegre elektronik devrelerin vazgeçilmez elemanıdır (Shukla ve diğ, 2012). Kapasitörlerin özellikleri olarak; plakalar arasında kullanılan yalıtkanın cinsi, çalışma ve dayanma gerilimleri, depolayabildikleri yük miktarı gösterilmektedir (Koochi-Fayegh ve Rosen, 2020). Şekil 2.12’de kapasitör sisteminin şematik gösterimi bulunmaktadır.

Kapasitörlerin belli başlı kullanım uygulamaları ve özellikleri vardır (Shukla ve diğ, 2012);

- Hafıza yedekleme uygulamasında, enerji yönetim araçlarındaki dijital kaynakların aktarılmasında kısa süreli güç kesintilerinin oluşması durumunda geçici güç kaybını önleyerek bilgilerin depolanmasını sağlamaktadır.
- Elektrikli ve hibrit araçların dur-kalk esnasındaki yakıt tüketiminin azaltılmasında güç desteği sağlamaktadır.
- Şebekede oluşabilecek voltaj dalgalanmasını önlemekte kullanılmaktadır.
- Sistemlerde kullanılan bataryaların uzun şarj edilme süresi durumuna karşı yerine hızlı şarj ve deşarj edilebilen kapasitörler portatif şekilde kullanılabilir.
- Yenilenebilir enerji sistemlerinin sürekli çalışmasından dolayı bataryalar üzerinde zararlı etkilerine karşın süperkapasitörler, uzun çalışma döngüleri için kısa bir süre içerisinde şarj ve deşarj edilebilmektedirler.
- %95 varan depolama verimliliğine sahiptir.
- Verimlilik ve yaşam döngüleri çok yüksek olmasına rağmen, elektrokimyasal kapasitörler kendi kendine deşarj olma eğilimindedir ve çalışma voltajları elektrolitin kimyasal reaksiyonlara girme potansiyelini aşamaz (Zhang ve Pan, 2015).

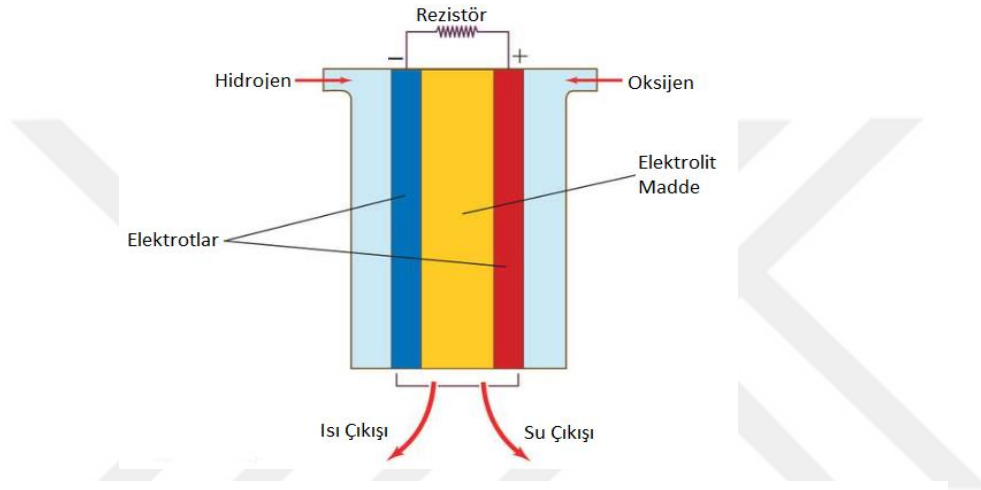


Şekil 2.12 : Kapasitör bileşenlerinin şematik gösterimi, Tuukkanen ve Krebs (2016)'dan uyarlanmıştır.

2.6.3.2 Yakıt hücreleri

Yakıt hücreleri 1800'lü yıllarda, Sir William Grove tarafından keşfedilmiştir. Fakat 1950 yılına kadar üretimi yapılmamıştır. Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA)'nın uzay çalışmalarında elektrik üretimi çalışmaları ile beraber kullanım alanı genişlemeye başlamıştır (Wilberforce ve diğ, 2016). Şekil 2.13'te görüldüğü üzere, bir yakıt hücresinin temel fiziksel yapısı, iki gözenekli elektrot ile temas halinde olan bir elektrolit katmanından oluşmaktadır. Pozitif ve negatif elektrotta elektrokimyasal işlemleri hızlandırmak için katalizörler bulunmaktadır. Bir elektrik akımı üretmek için elektrotlarda elektrokimyasal reaksiyonlar gerçekleşir. Hidrojen yakıt hücresinin temel çalışma şekli elektroliz işleminin ters durumudur; hidrojen ve oksijen yeniden birleştirilmesi ve elde edilen su ile birlikte bir elektrik akımı üretilir. Kullanım alanları, çalışma sıcaklıkları ve kullanılan malzeme içeriklerine göre çeşitlilik gösterebilmektedir. Kullanım alanlarına göre portatif ve sabit uygulamalar bulunmaktadır. Wilberforce ve diğ. (2016) göre yakıt hücresi uygulamaları; yüksek güç güvenilirliğine sahip uygulamalar (telekomünikasyon, yüksek teknoloji üretim tesisleri, veri işleme ve çağrı merkezleri), emisyon minimizasyonu (kentsel alanlar, endüstriyel tesisler, havaalanları, taşıtlar), ana şebekeye sınırlı erişimi olan alanlar için uygulamalar (taşınabilir uygulamalar ve uzak alanlar) ve biyolojik atık gaz yönetimi uygulamalarıdır (atık arıtma tesisleri). Yakıt hücreleri teknolojik olgunluk, kullanılan

yakıt ve elektrolit ayrıcıların türüne bağlı olarak 4 farklı çeşidi bulunmaktadır (Sabihuddin ve diğ, 2015): Proton Değişim Membranı (PEMFC), Doğrudan Metanol (DMFC), Erimiş Karbonat (MCFC) ve Katı Oksit (SOFC). Dehghani-Saniş ve diğ. (2019) göre yakıt hücrelerinin avantajları arasında çıkış güç çevriminde etkin dönüşüm, güvenilirlik, esnek ölçeklendirme ve minimum bozulma sayılabilir. Yakıt hücrelerinin dezavantajları arasında pahalı sermaye maliyeti, fosil yakıtlara (veya diğer metanol kaynaklarına) duyulan ihtiyaç, metanol üretmek için maliyetli dönüşüm reaksiyonları ve yakıt hücreli araçlar için minimum yakıt altyapısı sayılabilir.



Şekil 2.13 : Yakıt hücresinin şematik gösterimi, Url-14'ten uyarlanmıştır.

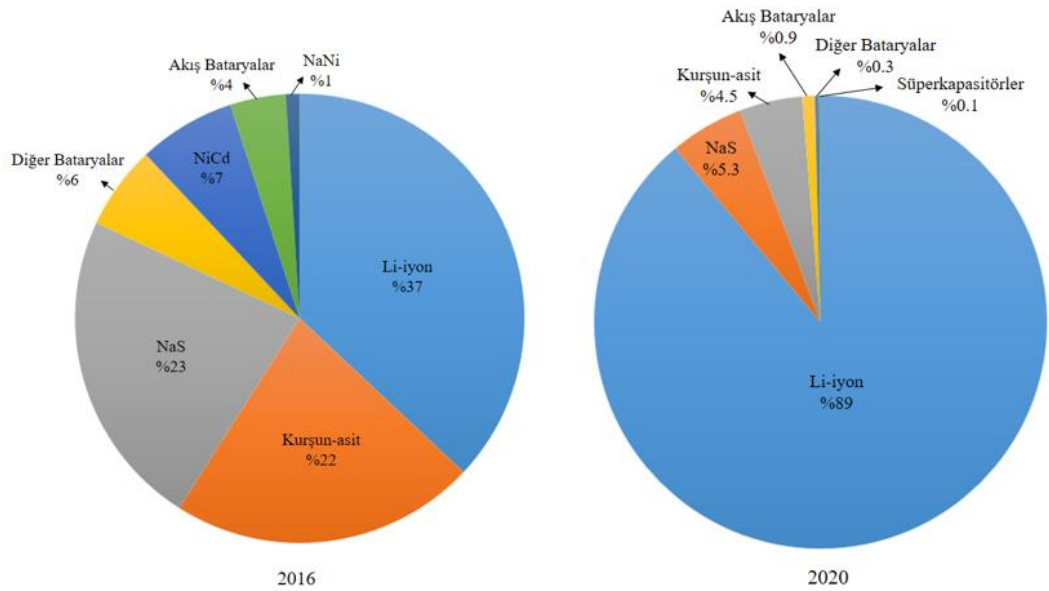
2.6.3.3 Bataryalar

Bataryalar, kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü biriktirilmiş hücrelerden oluşur. Hücrelerde pozitif (+) kutup ve negatif kutup (-) mevcuttur ve deşarj durumunda hücreler kimyasal tepkime ile elektrik enerji üreterek döngü devam etmektedir. Ayrıca bu hücrelerin etrafında iyonik iletken bir elektrolit madde bulunmaktadır. Bu maddeler sıvı, jel ve kuru fazda olup farklı batarya sistemlerinde kullanılmaktadırlar. Bataryalar istenilen voltaj ve akımın sağlanması için elektriksel olarak seri veya paralel bağlanmaktadır. Bataryalar güç ve enerji kapasitelerine göre sınıflandırılabilir. Bataryaların; enerji sektörü, elektronik cihazlar, telekomünikasyon cihazları, hibrit ve elektrikli araçlar, deniz, hava ve kara taşımacılığı gibi çok geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır.

Batarya teknolojisi geliştikçe kullanım alanlarının genişlemesinin yanı sıra gelecekte şebeke ölçeğinde depolama yapılabileceği öngörülmüştür. Taylor ve diğ. (2013) yaptıkları bir çalışmada şebeke ölçeğinde batarya uygulamalarının karakteristiklerini

belirtmişlerdir. Bu çalışmaya göre, şebeke ölçeğinde batarya depolama sistemi, en yüksek güç talebini karşılamaya yardımcı olmalı, şebeke stabilitesini iyileştirmeli, hızlı ve uzun bir süre boyunca yüksek miktarda yüksek kaliteli güç sağlayabilmelidir. Şebeke çalışmalarında batarya sistemi olarak akış pilleri ve sodyum sülfür pillerin uygun olduğunu belirtmişlerdir. Dehghani-Sanij ve diğ. (2019) ise bu depolama teknolojilerinin yanında gelişmiş kurşun-asit (PbA, Lead Acid) ve Lityum-iyon(Li-ion) bataryaların şebeke boyutunda kullanılabileceğini fakat düşük ölçekte enerji talebini karşılayabildiklerini, yalnızca yerel kullanıma veya mikro şebekelere uygun olduklarını belirtmişlerdir. Şekil 2.14'te bataryaların dünya çapındaki kurulu kapasitelerinin yüzdesel olarak dağılımı görülmektedir. Teknolojik gelişmelerle beraber elektronik cihazlar, elektrikli araçlar ve enerji uygulamalarında Li-iyon bataryaların kullanımının artması göz önünde bulundurularak, Şekil 2.14 incelendiğinde 2016 ve 2020 yılları arasındaki Li-iyon bataryaların kapasiteleri büyük oranda arttığı dikkat çekmektedir.

Diğer yandan bataryaların verimlilik, kullanım ömrü, çalışma sıcaklığı, deşarj derinliği, kendi kendine deşarj ve enerji yoğunluğu ölçütlerine göre farklı çeşitleri ve uygulama alanları mevcuttur.



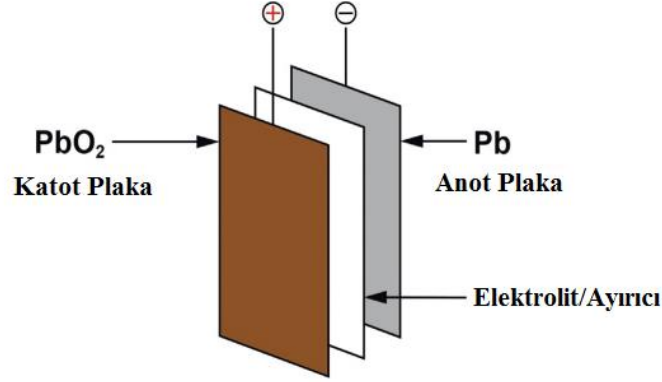
Şekil 2.14 : Dünya çapında batarya sistemlerinin kurulu kapasite karşılaştırması, Anake ve Wang (2016) ve Url-15'ten uyarlanmıştır.

Sodyum-Sülfür piller (Na-S): Sodyum-sülfür bataryaları içerisinde sıvı sodyum, kükürt ve katı elektrolit malzeme olarak alümina seramik kullanılan potansiyel olarak şebeke ölçeğinde kullanılabilen yüksek sıcaklıklı enerji depolama sistemleridir. Kumar ve diğ. (2017) göre Na-S pillerin avantajları arasında, malzemelerin geniş kullanılabilirliği, yüksek çevrim ömrü, yüksek enerji yoğunluğu, esnek çalışma ve ortam koşullarına duyarsızlık nedeniyle düşük maliyet bulunmaktadır (Kumar ve diğ, 2017). Dezavantajı ise 300-350 °C sıcaklıklarda çalıştıkları için sıcaklığı korumanın ve reaksiyon güvenliğinin sağlanmasında yaşanan sıkıntılar sayılabilir.

Nikel-kadmiyum piller(Ni-Cd): Nikel-kadmiyum piller elektrot olarak nikel-oksit hidroksit ve metalik kadmiyum kullanan olgun bir enerji depolama sistemidir ve yaygın olmayan bir kullanımı vardır. Nikel-kadmiyum piller genellikle telefonlar, oyuncaklar ve el aletleri gibi cihazlarda kullanılmaktadır (Sullivan ve Gaines, 2010). Ni-Cd piller -25 ile 40 °C sıcaklıkları arası ve %75 verimle çalışabilmektedir. Ayrıca uzun çevrim ömrü, dayanıklılık, iyi şarj tutma, uzun süreli depolama, düşük bakım gereksinimi ve düzgün deşarj olabilme avantajları bulunmaktadır. Dezavantajları ise toksik maddeler içerdiği için çevresel etkileri, görece düşük enerji yoğunluğu ve yüksek maliyetlerdir (Hazotte ve diğ, 2016).

Kurşun-asit piller (Pb-A, Lead-acid): Kurşun asit bataryalar ilk ticari kullanıma sunulan ve 1859 yılında Fransız bilim adamı Gaston Plante tarafından geliştirilen enerji depolama sistemidir (Kurzweil, 2010). Aşağıdaki şekilde gösterildiği üzere, katot plaka PbO₂, anot plaka Pb ve ayırıcı olarak sülfirik asit kullanılarak gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucu enerji açığa çıkmaktadır. Kurşun asit piller MWh olarak dünyada en çok pazar payına sahip şarj edilebilir depolama sistemidir. Endüstriyel alanlarda, otomotiv sektöründe, telekomünikasyon ve veri ağı sistemlerinde kullanımı yaygındır (May ve diğ, 2018). Günümüz otomotiv sektöründe %90 verimle çalışabilen Pb-A pilleri, düşük üretim maliyeti, geniş bir boyut aralığı, iyi yüksek oran performansı, değişen sıcaklıklarda iyi performans, yüksek voltaj ve iyi şarj tutma özelliğine sahiptir (Davidson ve diğ, 2016). Pb-A pillerin dezavantajları arasında nispeten düşük çevrim ömrü, sınırlı enerji yoğunluğu, asit tabakalaşması, asit sızıntıları ve aşağı ölçeklendirme zorluğu sayılabilir. Ayrıca çevresel etkilerinin azaltılması için atık yönetimi ve geri dönüşüm çalışmalarının yapılması

gerekmektedir. Şekil 2.15'te kurşun-asit pillerin çalışma şekli ve bileşenlerinin şematik gösterimi bulunmaktadır.



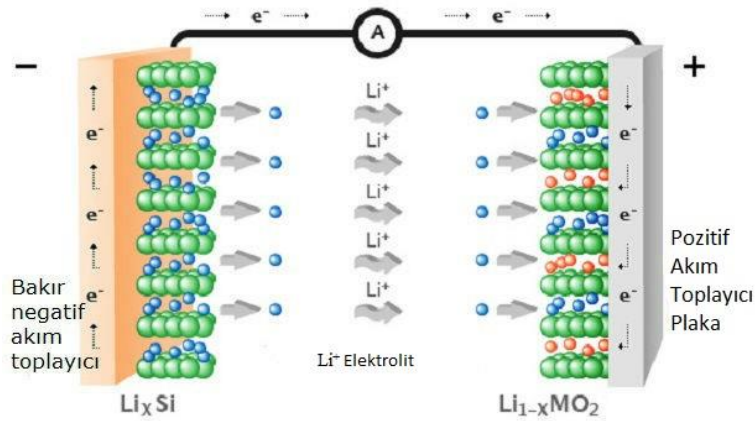
Şekil 2.15 : Kurşun asit pillerin çalışma tepkimesi ve şeması, May ve diğ. (2018)'den uyarlanmıştır.

Sodyum-nikel klorür piller (Na-NiCl₂): Sodyum-nikel klorür piller, sodyum sülfür pillerle benzer çalışma şekline sahiptir. Katı bir elektrolit ayırıcı ile birleşim halinde bir sodyum-metal anot kullanan bu depolama sistemleri 300 °C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışmaktadır. Yüksek verimlilik, uzun raf ve çevrim ömrü bulunmaktadır. Hibrit ve elektrikli araçlarda kullanılmasıyla beraber görece yüksek güç ve voltaj kapasitesi düşük miktarda kendi kendine deşaj olma kapasitesi bulunmaktadır.

Akışkan piller: Redoks akış pilleri olarak da bilinen akış pilleri, reaksiyon tankının dışındaki bir tankta depolanan elektrolitlerle kimyasal reaksiyon oluşturularak çalışmaktadır (Taylor ve diğ, 2013). Elektro-aktif materyallerin sıvı bir elektrolit içine çözüldüğü akışkan batarya sistemleri, ayrı yarım hücrelerde meydana gelen indirgeme ve oksidasyon reaksiyonları yoluyla enerji üretmektedir. Akışkan piller, esnek tasarım kabiliyeti, kontrol edilebilir hücre sıcaklığı, kolay izleme, basit ölçeklendirme, kendi kendine deşarj olmaması ve hızlı tepki süresi gibi avantajları bulunmaktadır. Olumsuz yanları ise düşük güç ve enerji yoğunluğu, pompa ve akış gücü yönetimi zorluğu ve çoğunlukla içerdiği Vanadyum maddesinin pahalı olmasından dolayı oluşan maliyetler sayılabilir (Weber ve diğ, 2011).

Lityum-iyon piller (Li-ion): Li-iyon piller, elektrot malzemesi olarak araya yerleştirilmiş bir lityum bileşiği kullanan bir batarya türüdür. Li-iyon pillerdeki kullanılan malzemeler ve yüzdeleri boyut, uygulama ve tüketilen katot tipi gibi çeşitli faktörlere göre farklılık gösterebilmektedir. Boyden ve diğ. (2016) yaptıkları bir çalışmada pil geri dönüşüm şirketlerinden elde edilen istatistiklere dayanarak, tipik taşınabilir Li-iyon pillerinin içerdiği malzemelere göre yüzdeleri şu şekildedir; lityum kobalt oksit (%27.5), çelik (%20.2), grafit (%16), polimer (%14), bakır (%9), alüminyum (%5.5), nikel (%4.3) ve elektrolit (%3.5). Lityum piller %90'lara varan yüksek depolama verimliliği sağlayabilir ve sürdürülebilir taşıma için elektrikli ve hibrit araçlar için tercih edilen güç kaynaklarıdır (Scrosati ve Garche, 2010).

Li-iyon piller küçük ölçekli elektronik cihazlar için idealdir. Ayrıca Li-iyon bataryalar; elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji ve mikro şebeke sistemlerinde yaygın bir şekilde enerji depolama sistemi olarak kullanılmaktadır (Zhang ve diğ, 2018). Li-iyon pillerin avantajları arasında bakım, uzun çevrim ömrü, geniş bir çalışma aralığı, hızlı şarj, yüksek şarj/deşarj verimliliği, yüksek enerji yoğunluğu ve geniş tasarım esnekliği gerektirmeyen kapalı hücreler bulunmaktadır. Dezavantajları ise yüksek maliyetlidir, sıcaklığa bağlı kapasite kayıpları oluşabilmektedir ve görece çevrim ömürleri kısadır (Luo ve diğ, 2015). Şekil 2.16'da Li-iyon batarya sisteminin çalışma şekli ve bileşenlerinin şematik gösterimi bulunmaktadır.

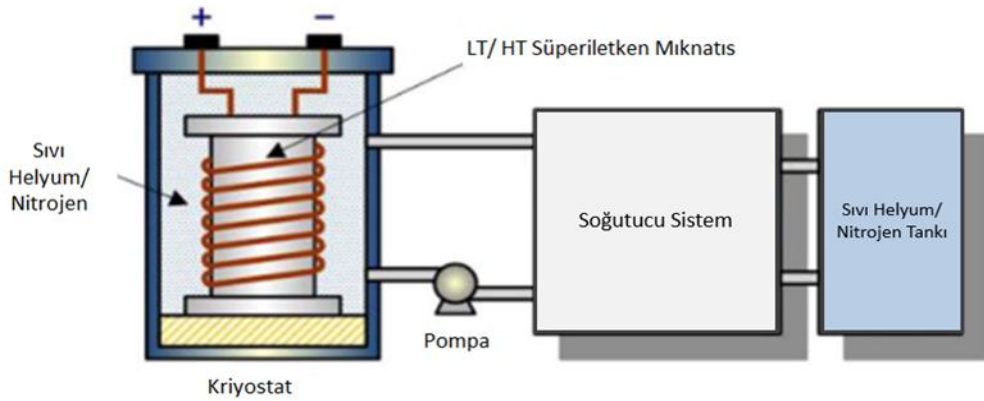


Şekil 2.16 : Li-iyon pil çalışma şeması, Url-16'dan uyarlanmıştır.

2.6.4 Süperiletken manyetik enerji depolama (SMES)

Süperiletken manyetik enerji depolama sistemleri, mutlak sıfır sıcaklığın yakınında neredeyse hiç elektrik direnci olmayan ve içinden geçen akımın oluşturduğu manyetik alanda elektrik enerjisi depolayabilen büyük bir süper iletken bobin kullanılarak gerçekleştirilen sistemlerdir. Sistem içindeki süper iletken bobin sıvı helyum veya azot kapları kullanılarak kriyojenik sıcaklıkta (yaklaşık -270°C) tutulur. Sıcaklığa bağlı olarak elektrik akışına direnç göstermediğinden dolayı süper iletken bobin içerisinde enerji kayıpları neredeyse yoktur. Sistemin kayıpları genellikle soğutucu sistemi ile ilgilidir. SMES bobinleri neredeyse anında büyük miktarda güç deşarj edebilir ve yüksek verimlilikte sınırsız sayıda şarj ve deşarj döngüsüne maruz kalabilmektedirler.

SMES iletken bobininin depolama performansı enerji kapasitesi, yapı ve çalışma sıcaklığına bağlıdır. SMES uygulamaları yük dengeleme, sistem dengesi, voltaj dengesinin sağlanması, frekans regülasyonu, iletim kapasitesini artırma, güç kalitesinin iyileştirilmesi, otomatik üretim kontrolü ve kesintisiz güç kaynaklarını içermektedir. Sıcaklık kontrolünün zor olması ve maliyetlerinin oldukça yüksek olması bu sistemlerin dezavantajları olarak gösterilebilir (Guney ve Tepe, 2017). Şekil 2.17’de SMES sistemlerinin çalışma şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.17 : SMES sistem şeması, Molina (2010)’dan uyarlanmıştır.

2.7 Enerji Depolama Sistemlerinin Karşılaştırılması

Enerji depolama sistemleri kullanıldığı yenilenebilir enerji, ulaşım, bina ve topluluk uygulamaları gibi farklı gereksinimlere göre değişim göstermektedir. Şebeke ölçeğinde ve şebeke dışı uygulamalarda her enerji depolama sisteminin kendine ait belirli bir karakteristiği bulunmaktadır. Çizelge 2.10’da şebeke ölçeğindeki

uygulamalarda kullanılan EDS'nin SWOT (Güçlü Yanlar, Zayıflıklar, Fırsatlar ve Tehditler) analiziyle karşılaştırması bulunmaktadır. Bu karakteristikler teknik performans, ekonomik çerçeve ve çevresel etkiler olarak 3 başlık altında incelenebilir.



Çizelge 2.10 : Şebeke ölçeğinde enerji depolama sistemleri için SWOT analizi, Dehghani-Sanij ve diğ (2019) ve Guney ve Tepe (2017)’den uyarlanmıştır.

Sistemler	Güçlü Yanlar	Zayıf Yanlar	Fırsatlar	Tehditler
CAES	Yüksek kapasiteli, kWh başına düşük maliyet. Güç elektroniği dönüştürücülerine görece az derece ihtiyaç. İhmal edilebilir depolama kayıpları. Enerjiyi aylarca depolayabilme.	Yeraltı boşluklarına ihtiyaç. Gaz türbini kullanıldığında yakıt ihtiyacına gereksinim (Ör; H2 ve CH4).	İleriye dönük olarak dağıtılmış depolama için uyarlanabilir.	Gelecek zamanda yakıt fiyatlarının artmasına bağlı olarak popülerliği, termik santrallerle ilişkilidir.
PHES	Yüksek kapasiteli. kWh başına düşük maliyet. Güç elektroniği dönüştürücülerine görece az derece ihtiyaç. Güvenilir ve uzun yaşam ömrü. Enerjiyi aylarca depolayabilme.	Merkezi depolama. Coğrafi kısıtlamalar. Yüksek derecede kurulum maliyeti. Çevresel etkiler.	Açık deniz rüzgâr parkları için ve deniz seviyesinin altında daha düşük bir rezervuar ile kullanılabilir.	Dağıtılmış depolama tercih edildiğinde sistem tekrardan kullanılamaz veya tercih edilemez hale gelebilir. Çevresel etkilerden dolayı yerel halk tepkileri artabilir.
Batarya Depolama Sistemleri	Dağıtılmış depolama, İyi düzeyde konfigüre edilebilirlik, Hızlı tepki süresi, Yüksek enerji verimliliği ve yoğunluğu.	Yüksek yatırım maliyetleri, Görece düşük çevrim ömrü, Sıcaklığa karşı duyarlılık.	Hızlı ve sürekli gelişen bir teknoloji.	Sürekli geliştirme aşamasında olması aralarında seçim yapılmasını zorlaştırabilir.
Hidrojen Depolama Sistemleri	Dağıtılmış depolama, Üretilen hidrojenin farklı şekillerde kullanılabilirliği, Çevreye karşı görece daha duyarlı	Düşük verimlilik Yüksek yatırım maliyetleri Güç elektroniği ve kontrol sistemleri ihtiyacı Stabil yük ihtiyacı	Pazara nüfus etme, Perspektif nanotüp depolama ortamı, Özel(adanmış) ve paylaşımsız çeviriciler olması.	Güç elektroniği dönüştürücülerinin kullanımıyla elektromanyetik girişim etkisinin(EMI) oluşması. Fosil ham maddelerinin sınırlı olması.

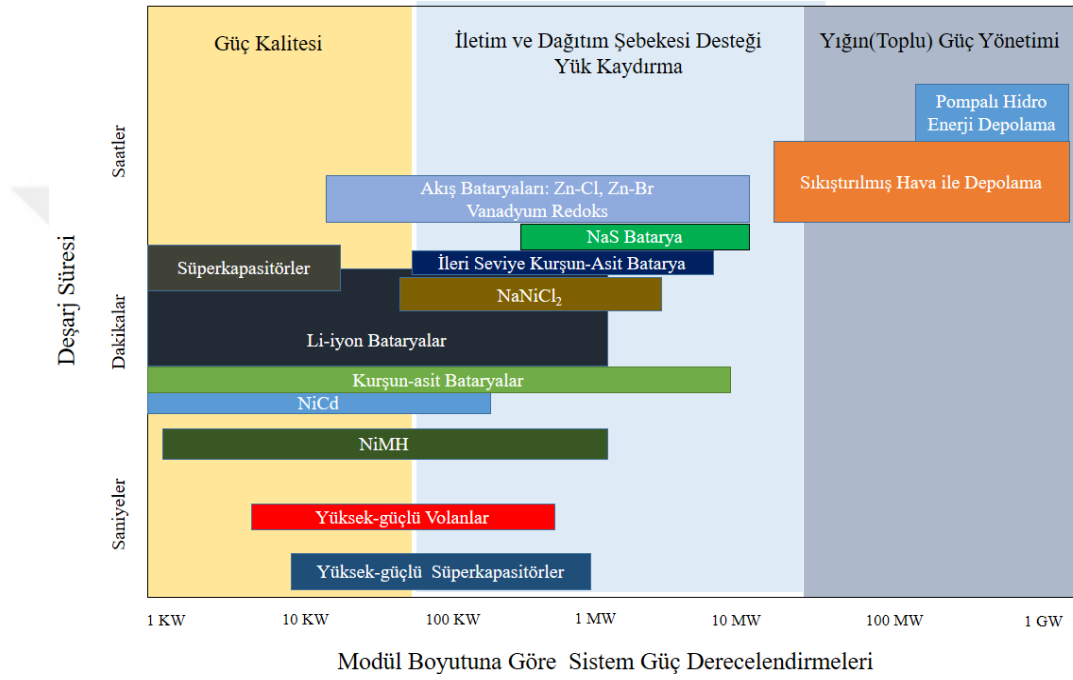
2.7.1 Teknik performans

Çeşitli enerji depolama türlerinin teknik performansını değerlendirmek için birçok tasarım ve performans göstergesi bulunmaktadır. Bu göstergeler; enerji ve güç yoğunluğu, ömür ve çevrim sayısı, depolama kapasitesi ve deşarj süresi, çevrim verimi, tepki süresi, kendi kendine boşalma süresi ve teknolojik olgunluk olarak gösterilebilir. Literatürde enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılma ve kıyaslanma çalışmaları incelendiğinde, çalışmalar arasında teknik göstergelerde bazı farklılıklar görülebilmektedir. Bu farklılıkların sebebi ise enerji depolama sistemlerinin sürekli gelişmekte olan bir teknolojiye sahip olması ve kullanıldığı uygulamaların gerekliliklerinden dolayı teknik özelliklerindeki değişikliklerin literatüre yansımından kaynaklandığı söylenebilir. Çizelge 2.13, son 10 yılda enerji depolama sistemlerindeki gelişmeler göz önünde bulundurularak, birçok çalışma ile kıyaslanarak hazırlanmıştır. Çizelge 2.13'te enerji depolama sistemlerinin teknolojik ve ekonomik göstergeler çerçevesinde ayrıntılı olarak karşılaştırılması bulunmaktadır.

Teknolojik gelişmelerle beraber EDS'nin kullanım hacmi ve buna bağlı olarak önemi giderek artmaktadır. Akıllı şebekeler ve mikro şebekeler gibi dağıtılmış enerji kaynağı kullanan sistemlerin evrimi, enerji depolama sistemlerindeki ilerlemelere bağlı olarak mümkün hale gelecektir. Değişen güç dağıtım eğilimlerinin yanı sıra talep tarafı yönetimi, kullanılan enerji depolama sistemlerine bağlı olarak gerçekleştirilebilir. Fiziksel kısıtlamalara ve ekolojik özelliklere dayalı olarak enerji depolama sistemi çeşitliliğine ilişkin çalışmaların ve araştırmalarının kapsamlı bir analizi, enerji depolama sistemlerinin gelişimini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle de ideal bir enerji depolama sistemi, kullanılacağı güç sisteminin ihtiyaçlarına bağlı olarak seçilmektedir (Luo ve diğ, 2015).

EDS'nin tasarım parametreleri sistemin boyutlandırılmasına, teknolojik olgunluğuna, kapasitesine, depolama, yanıt ve deşarj süresine göre belirlenmektedir. Otomasyonun uyumluluğu, depolama kayıpları ve yaşam döngüsü sayısı gibi dikkat edilmesi gereken başka önemli faktörler de vardır (Vasconcelos ve diğ, 2012). Bu önemli parametrelerin ve göstergelerin hepsinin tek bir enerji depolama sisteminde bulunması mümkün değildir. Bu nedenle EDS'nin kullanılacağı uygulamaya göre güç kapasitesi gereksinimi, maksimum depolama ve boşaltma süresine bağlı olarak optimum bir EDS teknolojisi seçilmelidir.

EDS'nin kullanıldığı uygulamaya göre deşarj ve modül boyutuna göre güç derecelendirmeleri karşılaştırması Şekil 2.18'de gösterilmektedir. Şekil 2.18, EDS'lerin güç çıkışlarının ne kadar yüksek olduğunu ve bunu ne kadar sürede deşarj edebileceklerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde ise mikro şebekelerde istenilen yük takibi, yük kaydırma, güç kalitesi ve kesintisiz güç sağlama konusunda enerji depolama sistemleri karşılaştırıldığında özellikle batarya sistemlerinin uygunluğu dikkat çekmektedir.

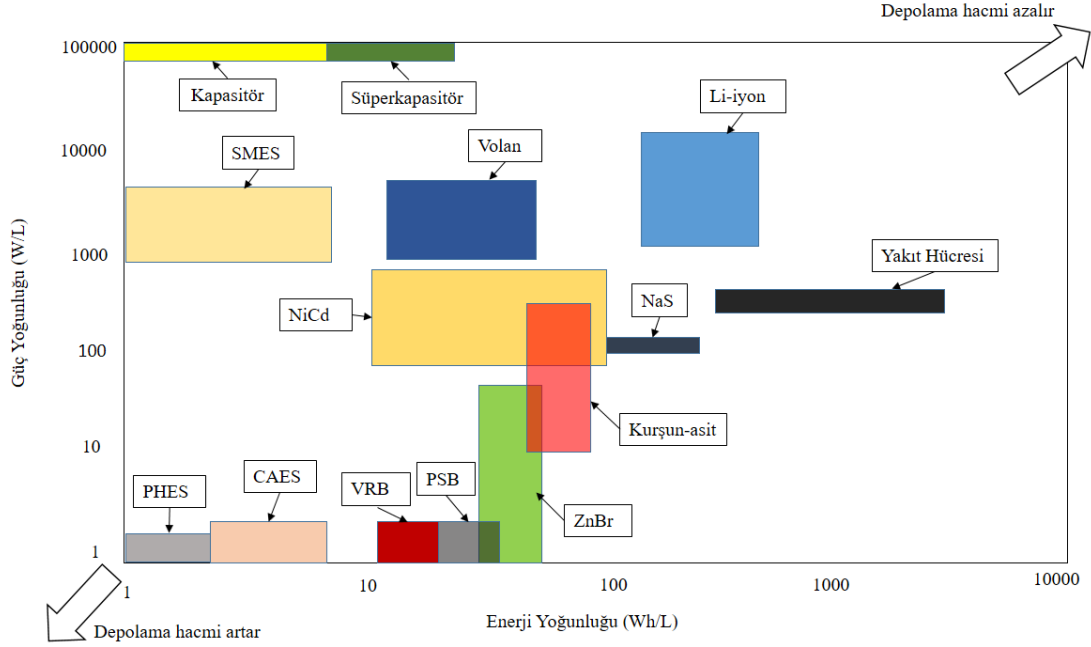


Şekil 2.18 : EDS'nin güç çıkışı ve modül boyutlandırması ile karşılaştırılması, Guney ve Tepe (2017)'den uyarlanmıştır.

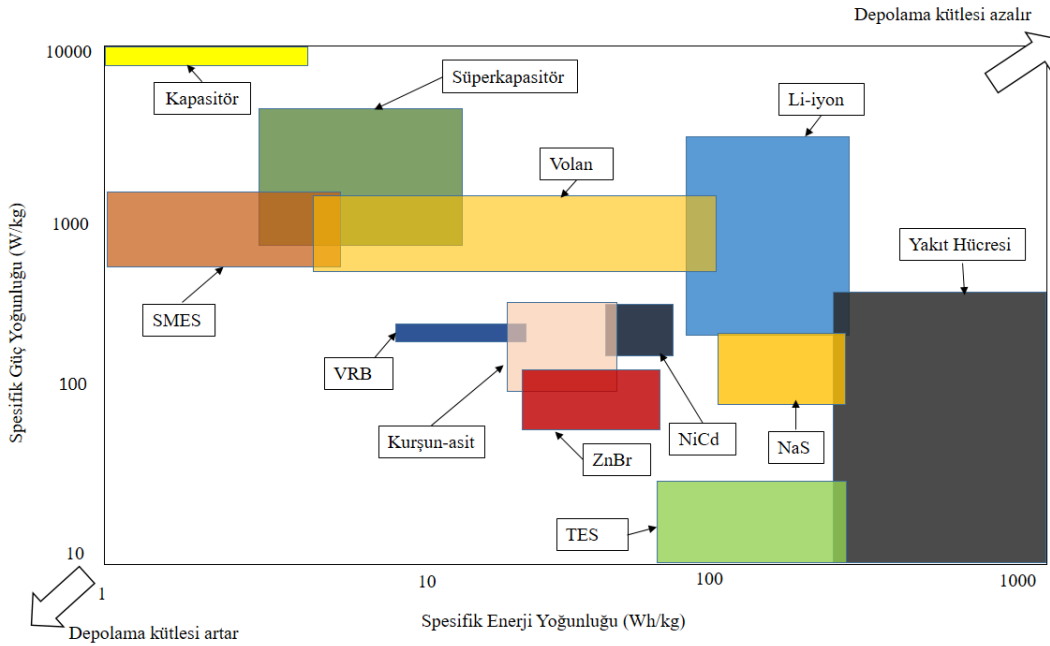
2.7.1.1 Enerji ve güç yoğunluğu

Güç sistemlerinde kullanılan EDS sistemlerinin tasarımında önemli faktörlerden biri ise enerji ve güç yoğunluğu kavramıdır. Enerji ve güç yoğunluğu, uygulamada kullanılacak depolama sisteminin hacmini ve kütlesini belirleyen bir kavramdır. Şebeke gerilimi bakımı, frekans regülasyonu, güç kalitesi ve sürekliliğinin sağlanması gibi hızlı yanıt gerektiren kısa süreli uygulamalar için yüksek güç yoğunluğuna sahip enerji depolama sistemlerinin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Görece daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip depolama sistemleri ise genellikle yenilenebilir enerji yük kaydırma gibi uzun süreli uygulamalar için kullanılmaktadır (Koohi-Fayegh ve Rosen, 2020). Literatürde EDS'nin enerji ve güç yoğunlukları, hacimsel (litre) veya kütleli (kg) olarak iki şekilde belirlenebilmektedir. Şekil 2.19'da EDS'nin hacimsel

kıyaslaması, Şekil 20’de ise kütleli olarak kıyaslanması görülmektedir. EDS’nin enerji ve güç yoğunlukları arttıkça kaplayacakları alan ve ağırlıkları o kadar az olacaktır.



Şekil 2.19 : EDS’nin enerji ve güç yoğunluklarının hacimsel olarak karşılaştırılması, Luo ve diğ. (2015)’den uyarlanmıştır.



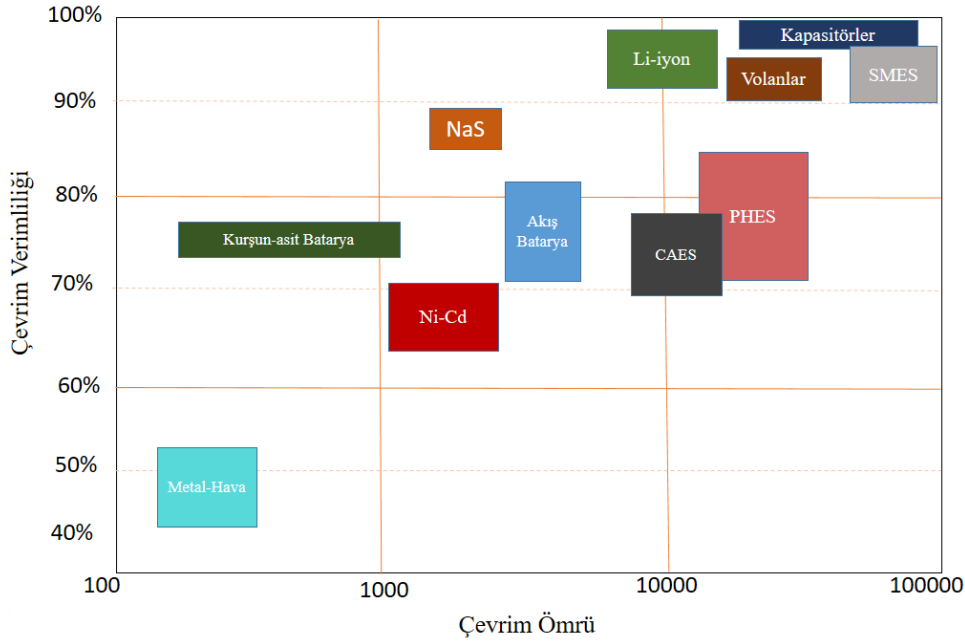
Şekil 2.20 : EDS’nin enerji ve güç yoğunluklarının kütleli olarak karşılaştırılması, Dehghani-Saniy ve diğ. (2019)’dan uyarlanmıştır.

Şekil 2.19 ve Şekil 2.20 incelendiğinde sağ ve üst tarafta yer alan depolama sistemlerinin daha az hacimde ve kütlede olduğu, sol alt kısımda yer alan sistemlerin ise daha fazla hacime ve kütleye sahip oldukları görülmektedir. Enerji ve güç yoğunluğu düşük olan CAES ve PHES sistemleri geniş bir depolama hacmi ve rezervuar gerektiren sabit sistemlerdir ve topluluk (yığın) servisler için uygun sistemlerdir. SMES ve kapasitörler ise çok yüksek güç yoğunluğuna sahip olmasına karşın düşük enerji yoğunluğuna sahip sistemlerdir. Bataryalar ise orta seviyede enerji ve güç yoğunluğuna sahip depolama sistemleridir. Şekiller incelendiğinde, bataryalar arasında ise Li-iyon pillerin enerji ve güç yoğunluğunun hem kütsel hemde hacimsel olarak yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle Li-iyon bataryalar; taşınabilir, hareketli ve operasyonel anlamda kolaylık sağlayabilen depolama sistemleri olarak gösterilebilir. Diğer yandan Wenxing ve Lu (2013)'nın çalışmasında, mikro şebekeler için uygun enerji depolama sisteminin seçilmesinde, Li-iyon bataryaların enerji yoğunluklarının yüksek olmasından dolayı seçilebilecek en uygun sistem olduğunu belirtmişlerdir.

2.7.1.2 Çevrim ömrü ve verimliliği

EDS'nin teknik olarak performansını etkileyen göstergelerden biri ise kullanım ömrü, çevrim sayısı ve çevrim verimliliğidir. Bu göstergeler depolama sistemlerinin ekonomik açıdan yatırım maliyetlerini de belirlemektedir. Depolama sistemlerinin ömrü arttıkça birim maliyetler düşeceği için tercih edilebilirliği arttırmaktadır. Şekil 2.21'de çevrim ömrü ve çevrim verimliliği kapsamında enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması görülmektedir.

Mekanik enerji depolama sistemlerinin kullanım ömrü, sistem içerisinde bulunan mekanik parçaların ömrünün yüksek olmasından dolayı fazladır. Şekil 2.21 incelendiğinde, PHES, CAES ve volan depolama sistemlerinin çevrim ömrünün 10000 ve üzeri olsada çevrim verimliliği bakımından (volanlar hariç) görece normal seviyededirler. SMES ve süperkapasitörlerin de çevrim ömrü ve verimliliği oldukça yüksektir. Fakat enerji yoğunlukları düşük olan sistemlerdir. Yüksek güç çıkışı gerektiren sistemler için daha uygun sistemler olarak gösterilebilir. Batarya sistemlerine bakıldığında ise çevrim ömrü mekanik ve manyetik depolama sistemlerine kıyasla daha düşüktür. Fakat Şekil 2.21 incelendiğinde ise Li-iyon bataryaların yüksek çevrim ömrü ve yüksek çevrim verimliliğine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 2.21: EDS'nin çevrim ömrü ve çevrim verimliliği karşılaştırılması, Koohi-Fayegh ve diğ. (2020) ve Guney ve Tepe (2017)'den uyarlanmıştır.

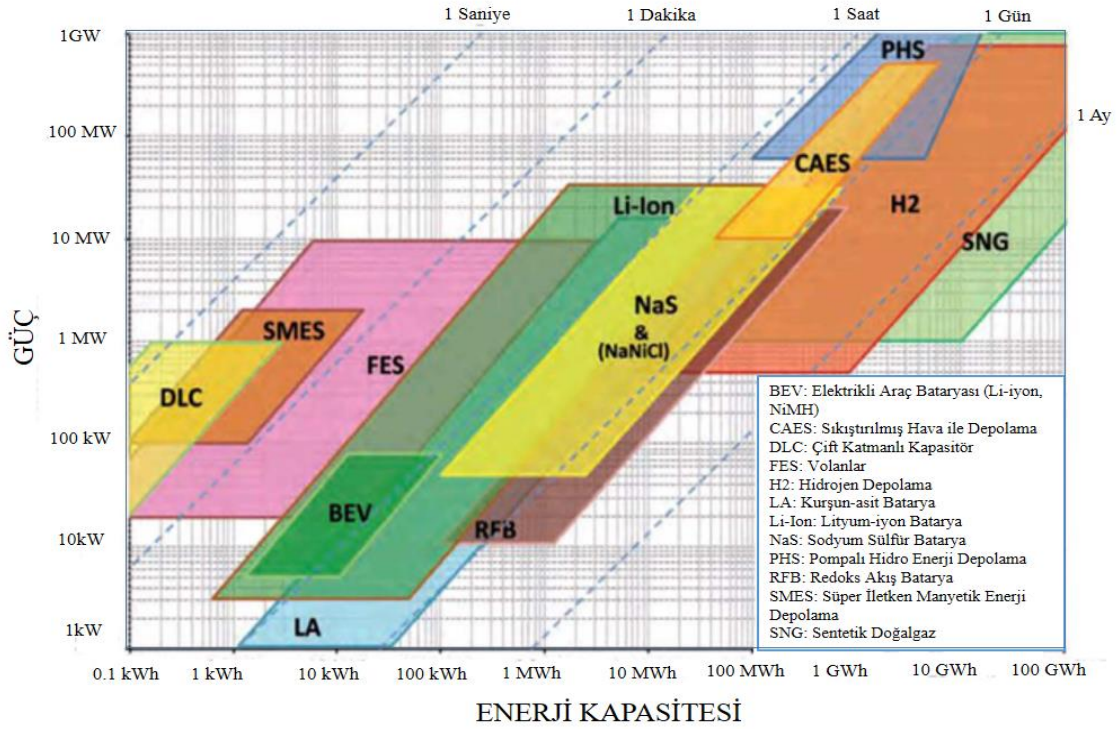
2.7.1.3 Depolama kapasitesi ve deşarj süresi

Güç uygulamalarının ihtiyaçlarına göre uygun bir enerji depolama sisteminin seçilmesindeki önemli faktörlerden biri ise depolama kapasitesi ve deşarj süresidir. Şekil 2.22'de EDS'nin deşarj süreleri bakımından karşılaştırılması mevcuttur. Uzun süreli ve yüksek depolama kapasitesine sahip PHEs, CAES gibi enerji depolama sistemleri genellikle enerji arbitrajı ve tepe tıraşlama gibi toplu (yığın) enerji uygulamalarında kullanılmaktadır ve tepki süreleri (dakika) görece diğer sistemlere göre yavaştır. Depolama süresinin yüksek olduğu sistemlerde genellikle kendi kendine deşarj olma süreleri oldukça düşüktür. Bu nedenle PHEs, CAES ve yakıt hücreleri gibi sistemler uzun süre boyunca enerjiyi sistemlerinde depolayabilmektedirler.

Bataryalar ise elektrokimyasal tepkimelerden kaynaklı depolama kapasitelerinin %5'ine kadar kendi kendine deşarj olabilmektedirler ve orta vadeli (dakika-gün) depolama kapasitesine sahiptirler (Güven, 2019). Bataryaların tepki süresi görece mekanik depolama sistemlerine göre daha hızlıdır. Voltaj desteği, frekans regülasyonu, güç kalitesi ve sürekliliğinin sağlanması gibi hızlı tepki süresi gerektiren uygulamalarda bataryalar milisaniye gibi sürelerde tepki hızına sahiptirler.

Süperkapsitör, volan ve SMES gibi sistemler ise kendi kendine deşarj olma kapasitesi çok yüksektir ve kısa süreli (sn-dk) depolama sağlarlar. Tepki süreleri ise göre depolama sistemleri arasında en hızlı olanlardır. Tepki sürelerinin çok hızlı

olmasından dolayı anlık enerji talebinin karşılanması, iletim ve dağıtım şebeke desteği gibi uygulamalar için uygun sistemlerdir.



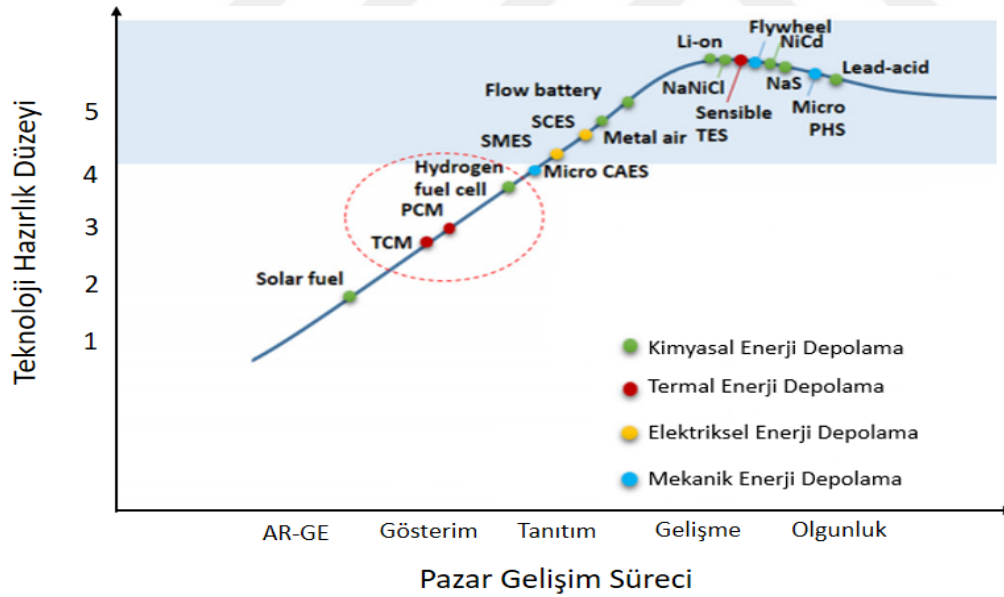
Şekil 2.22 : Enerji depolama sistemlerinin deşarj sürelerinin karşılaştırılması, Guney ve Tepe (2017)'den uyarlanmıştır.

2.7.1.4 Teknolojik olgunluk

Enerji depolama uygulamalarının tasarımında önemli faktörlerden biri ise teknolojik olgunluktur. Teknolojik olgunluk uygun depolama sisteminin seçilmesinde önem arz eden bir konudur. Bir depolama sisteminin teknolojik olgunluk düzeyi yüksek olursa sistemin maliyeti düşebilmekte ve yatırımcılar tarafından tercih edilebilirliği de artabilmektedir. Çünkü alınabilecek risk, ticarileşme ve ekonomik fayda açısından güç uygulamasının ihtiyacına göre uygun bir depolama sistemi seçilmelidir. EDS'nin teknolojik olgunlukları, teknolojik hazırlık düzeyleri ve depolama sistemlerinin pazar gelişim sürecine göre belirlenmektedir. Nguyen ve diğ. (2017) yaptıkları bir çalışmada sınırlı topluluklar, işletmeler, binalar ve mikro şebekeler gibi küçük ölçekte enerji uygulamalarında (<1MW) kullanılan EDS'lerin teknolojik olgunluklarını incelemişlerdir. Çalışmalarında birçok çalışmadan alınan veriler analiz edilmiş ve teknolojik olgunluk eğrisi oluşturmuşlardır. Şekil 2.23'te gösterildiği üzere EDS'nin teknolojik hazırlık sürecine bağlı olarak teknolojik olgunluk süreci görülmektedir.

EDS'nin pazar gelişimini etkileyen teknoloji hazırlık düzeyleri bulunmaktadır. Bir enerji depolama sistemi pazar gelişim sürecine girmeden önce belirli fazlardan geçmektedir. Bir sistem ilk olarak temel prensipleri belirlenir, konsept olarak formüle edilir ve laboratuvar ortamında test edilerek teknolojik olarak doğrulanmaktadır (Nguyen ve diğ., 2017). Ardından da depolama sistemlerinin teknolojik gelişimine bağlı olarak hazırlık düzeyleri artmaktadır. Şekil 2.23'te gösterilen teknoloji hazırlık düzeyleri 5'e ayrılmaktadır:

- Operasyonel ortamda kanıtlanmış gerçek sistem (5)
- Tamamlanmış ve test edilmiş nitelikli sistem (4)
- Tam ölçekte ve operasyonel ortamda prototip gösterimi (3)
- Mühendislik/pilot ölçeğinde ve ilgili bir ortamda prototip olarak doğrulanmış sistem (2)
- Laboratuvar ölçeğinde ve ilgili ortamda doğrulanmış teknoloji (1)



Şekil 2.23 : EDS'nin teknoloji hazırlık düzeyine bağlı olarak teknolojik olgunluk süreci, Nguyen ve diğ. (2017)'den uyarlanmıştır.

Nyugen ve diğ. (2017) çalışmalarında, küçük ölçekli depolama sistemi ihtiyacı bulunan işletmeler, binalar ve mikro şebekeler için teknolojik olgunluk bakımından mikro pompalı hidro depolama, volanlar, duyulur ısı depolama, kurşun-asit, NaS, NiCd, NaNiCl ve Li-ion bataryaların küçük ölçekli enerji sistemleri için en olgun teknolojiler olduğunu göstermektedir. Şekil 2.23'te gösterildiği üzere de hidrojenli yakıt hücreleri, faz değişim malzemesi (PCM) ve termokimyasal ısı depolama (TCM) sistemlerinin yakın gelecekte enerji depolama pazarında daha popüler hale gelecekleri vurgulanmıştır. Diğer yandan Luo ve diğ. (2015) göre EDS'nin teknolojik hazırlık düzeylerine bağlı olarak pazar gelişim süreçleri 5 kategoriden oluşmaktadır. Araştır-Geliştirme (Ar-Ge, 1), gösterim (demonstrasyon, 2), tanıtım (erken ticarileşme, 3), gelişme (ticarileşmiş, 4) ve ticari olgunluk (5) dönemleri olarak sıralanmaktadır. Çizelge 2.23'te EDS'nin teknolojik olgunluk düzeyleri bütün ölçeklerdeki enerji depolama sistemleri dahil olmak üzere 5 kategoride sınıflandırılmıştır.

2.7.2 Ekonomik çerçeve

Enerji depolama teknolojilerinin uygulanma alanlarına bağlı olarak çeşitli ekonomik avantajları ve zorlukları mevcuttur. Belirli bir güç uygulaması için bir enerji depolama sisteminin maliyeti, özellikle konuma, yapım yöntemine, sistem boyutuna, maliyet etkinliğine ve doğalgaz gibi enerji kaynaklarının fiyatına bağlıdır (Carnegie ve diğ, 2013). Bu nedenle güç sistemi kurmak isteyen yatırımcılar için EDS'nin ekonomik çerçevesi göz önünde bulundurulması gereken en önemli konulardan birisidir. Çizelge 2.13'te gösterildiği üzere EDS'nin yatırım maliyetleri enerji ve güç çerçevesinde karşılaştırılmıştır. EDS'nin genel olarak maliyetleri teknolojik hazırlık düzeyleri ve pazar gelişim sürecine bağlı olarak düşme eğilimindedir. Fakat bu konular dahil olmak üzere EDS'nin maliyetine etki eden birçok teknolojik maliyet parametreleri mevcuttur.

Mongird ve diğ. (2019) EDS'nin maliyet karakterizasyonu üzerine kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Geniş bir literatür taramasından derledikleri bulgularla depolama teknolojilerinin maliyet parametreleri çerçevesinde karşılaştırarak 2025 yılı için maliyet tahminleri yapmışlardır. Enerji depolama sistemlerinin Çizelge 2.11 ve Çizelge 2.12'de maliyet parametrelerine göre karşılaştırmaları bulunmaktadır. EDS'nin maliyet parametreleri aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

- Kurulum Maliyeti: Depolama sistemlerinin sermaye maliyetleri, teknolojik olarak türüne göre değişen farklı bileşenleri kapsamaktadır. Elektrokimyasal

depolama birimleri için, sermaye maliyeti elektrotları, elektrolitleri ve ayırıcıları içermektedir. PHES için ise su yolları, rezervuarlar, pompalar ve elektrik jeneratörlerini ve CAES için oyuklar, kompresörler ve jeneratörler içermektedir. Elektrokimyasal depolama cihazları için sermaye maliyetleri tipik olarak kilowatt-saat başına dolar (\$/kWh) olarak ifade edilirken, volanlar, PHES, CAES ve gaz türbinleri için olanlar kilowatt başına dolar (\$/kW) olarak ifade edilmektedir.

- **Güç Dönüşüm Sistemi:** Bu sistem maliyetleri genellikle yakıt hücreleri, batarya, süperkapasitör ve SMES depolama sistemlerini ilgilendirmektedir. Bu depolama sistemlerin bileşeni, invertör ve paketleme maliyetinin yanı sıra konteyner ve invertör kontrol maliyetlerini de içermektedir (Mongird ve diğ., 2019). Enerji depolama sisteminin kullanılacağı güç uygulamasında; aynı güç oranında daha yüksek akım daha yüksek maliyete yol açtığı için sistem voltajları arttıkça güç dönüşüm sistemi maliyetinin düşmesi beklenmektedir (Mongird ve diğ., 2020).
- **Tesis Dengesi:** BOP (Balance of Plant) olarak bilinen enerji depolama sistemi dengesi, tipik olarak saha kabloları, ara bağlantı transformatörleri ve diğer ek yardımcı ekipmanlar gibi bileşenleri içermekte ve \$/kW bazında ölçülmektedir.
- **İnşaat ve Devreye Alma:** İnşaat ve devreye alma maliyetleri, sistem mimarisi ve saha tasarım maliyetlerinden, ekipman tedariki/nakliyesine ilişkin maliyetlerden ve kurulum için işçilik/parça maliyetlerinden oluşmakta ve \$/kWh bazında hesaplanmaktadır. Mongird ve diğ. (2019)'ın çalışmalarında bir güç sisteminin şebeke entegrasyonunun maliyetini, satış vergisini, ödenen ücretleri, genel ve idari giderler için maliyetleri rapor etmişlerdir. Bu maliyetlerden yola çıkılarak inşaat ve devreye alma maliyetlerinin ve tesis denge maliyetlerinin tahmin edilebileceğine değinmişlerdir.
- **Sabit İşletme ve Bakım Maliyeti:** Sabit işletme ve bakım maliyeti, enerji kullanımına bağlı olarak dalgalanma göstermeyen, ekonomik ömrü boyunca depolama sistemini çalışır durumda tutmak için gereken tüm maliyetleri içermektedir. Bu maliyet, depolama sisteminin nominal gücüne bağlı olarak normalleştirilir ve \$/kW-yıl olarak ifade edilir. Mongird ve diğ. (2019), tüm

batarya sistemleri için mevcut işletme ve bakım maliyetlerinin 6–20 \$/kW-yıl aralığında olduğu ve en çok kullanılan batarya sistemlerinin genellikle 10 \$/kW-yıl seviyesinde olduğunu gözlemlemişlerdir.

- Değişken İşletme ve Bakım Maliyeti: Değişken işletme ve bakım maliyeti, enerji depolama sisteminin ekonomik ömrü boyunca sistemin çalıştırmak için gerekli tüm maliyetleri içerir ve yıllık deşarj enerji çıkışına göre normalleştirilir. Bu nedenle değişken işletme ve bakım maliyetleri cents/kWh olarak ifade edilmektedir. Bu maliyet, EDS'nin ömürlerine bağlı olarak, çevrim verimliliği, şarj ve deşarj maliyeti, sistem aşınması ve yıpranmasını hesaba katmaktadır. Mongird ve diğ. (2019) çalışmalarında, EDS'nin değişken maliyetleri ile ilgili literatürde bulunan birçok çalışma incelenmiş ve batarya sistemlerinin değişken maliyetleri genel olarak 0.03 cents/kWh olarak belirlenmiştir.

Çizelge 2.11 : Batarya sistemleri için 2018 maliyet parametreleri ve bulgularından yola çıkarak 2025 tahminlerinin özeti, Mongird ve diğ. (2019)’dan uyarlanmıştır.

Parametreler	Lityum-İyon Batarya		Sodyum-Sülfür Batarya		Kurşun-Asit Batarya		Redoks Akışkan Batarya		Çinko-Hibrid Batarya	
	2018	2025	2018	2025	2018	2025	2018	2025	2018	2025
Kurulum Maliyeti-Enerji Kapasitesi (\$/kWh)	223-323 271	156-203 (189)	400-1,000 661	300-675 (465)	120-291 260	102-247 (220)	435-952 555	326-643 (393)	265-265 265	179-199 (192)
Güç Dönüşüm Sistemi (\$/kW)	230-470 288	184-329 (211)	230-470 350	184-329 (211)	230-470 350	184-329 (211)	230-470 350	184-329 (211)	230-470 350	184-329 (211)
Tesis Dengesi (BOP) (\$/kW)	80-120 100	75-115 (95)	80-120 100	75-115 (95)	80-120 100	75-115 (95)	80-120 100	75-115 (95)	80-120 100	75-115 (95)
İnşaat ve Devreye Alma (\$/kWh)	92-110 101	87-105 (96)	121-145 133	115-138 (127)	160-192 176	152-182 (167)	173-207 190	164-197 (180)	157-188 173	149-179 (164)
Toplam Proje Maliyeti (\$/kW)	1570-2322 1876	1231-1676 (1446)	2394-5170 3626	1919-3696 (2674)	1430-2522 2194	1275-2160 (1854)	2742-5226 3430	2219-3804 (2598)	1998-2402 2202	1571-1956 (1730)
Toplam Proje Maliyeti (\$/kWh)	393-581 469	308-419 (362)	599-1293 907	480-924 (669)	358-631 549	319-540 (464)	686-1307 858	555-951 (650)	500-601 551	393-489 (433)
İşletme ve Bakım Sabit Maliyeti (\$/kW-yıl)	10	(8)	10	(8)	10	(8)	10	(8)	10	(8)
İşletme ve Bakım Değişken Maliyeti (cents/kWh)	0.03		0.03		0.03		0.03		0.03	
Yıllık Bozulma Faktörü (%)	0.50		0.34		5.4		0.4		1.5	

Çizelge 2.12 : Mekanik ve elektriksel depolama sistemleri için 2018 maliyet parametreleri ve bulgularından yola çıkarak 2025 tahminlerinin özeti, Mongird ve diğ. (2019)'dan uyarlanmıştır.

Parametreler	Pompa Hidro Depolama	Gaz Türbini	CAES	Volan	Süperkapasitör
Kurulum Maliyeti- Enerji Kapasitesi(\$/kWh)	1700-3200 2638	678-1193 940	1050- 2544 1669	600-2400 2400	240-400 400
Güç Dönüşüm Sistemi (\$/kW)	Kurulum maliyetine dâhil.	-	-	Kurulum maliyetine dâhil.	211-350
Tesis Dengesi(BOP) (\$/kW)	-	-	-		95-100
İnşaat ve Devreye Alma(\$/kWh)	-	-	-	480	80
Toplam Proje Maliyeti (\$/kW)	1700-3200 2638	678-1193 940	1050- 2544 1669	600-2400 2400	835-900
Toplam Proje Maliyeti (\$/kWh)	106-200 165	-	94-229 105	4320-11520 11520	66640-74480
İşletme ve Bakım Sabit Maliyet (\$/kW- yıl)	15.9	13	16.7	5.6	1
İşletme ve Bakım Değişken Maliyet (cents/kWh)	0.00025	1.05	0.21	0.03	0.03
Yıllık Bozulma Faktörü (%)	-	-	-	0.14	0.14

Çizelge 2.11 ve Çizelge 2.12 incelendiğinde \$/kWh bazında toplam proje maliyeti açısından PHES ve CAES en uygun maliyete sahip sistemler olduğu görülmektedir. Bu nedenle enerji talebi fazla olan topluluk uygulamaları için ekonomik olarak uygun bir seçenektir. Diğer yandan batarya sistemlerine bakıldığında, 2025 yılında gelindiğinde genel olarak tüm maliyet parametreleri düşmektedir. Batarya depolama sistemleri teknolojik gelişmelerle ve yapılan Ar-Ge çalışmalarıyla maliyetleri giderek daha uygun hale gelmekte ve batarya sistemlerinin kullanım hacmi de buna bağlı olarak artmaktadır. Batarya sistemlerinde 2025 yılına gelindiğinde toplam proje maliyeti olarak en düşük olan sistemin Li-iyon bataryalar olduğu dikkat çekmektedir. Ayrıca, yardımcı (yan) hizmet, son kullanıcı, yenilenebilir enerji, ulaşım ve mikro şebeke uygulamaları gibi çok geniş hizmet alanı bulunan batarya sistemleri arasında teknolojik performans ve ekonomik açıdan en uygun sistemin Li-iyon bataryalar olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.13 : Enerji depolama teknolojilerinin teknik ve ekonomik özelliklerinin karşılaştırılması, Koochi-Fayegh ve Rosen (2020), Dehghani-Sanij ve diğ. (2019), Guney ve Tepe (2017), Aneke ve Wang (2016) ve Luo ve diğ (2015)’ten uyarlanmıştır.

Enerji Depolama Sistemleri	Teknoloji	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Güç Yoğunluğu (W/kg)	Güç Kapasitesi	Deşarj Süresi	Uygun Depolama Süresi	Ömür (Yıl)	Çevrim Sayısı	Yatırım Maliyeti		Verim (%)	Teknolojik Olgunluk
									\$/kW	\$/kWh		
Mekanik	Volan	5-200	50-12000	10 kW-20MW	ms-15 dk	sn-dk	15-20	10000+	250-2000	600-14000	70-95	3
	CAES	3-60	<2	5-300 MW	1-24sa +	sa-ay	30-60	10000+	400-1500	2-250	41-90	3-4
	PHES	0.2-1.5	0.01-1.5	10-5000 MW	1-24sa +	sa-ay	20-60	5000+	500-4600	5-100	65-90	5
Elektrokimyasal	FC	600-10000	5-800	0-50 MW	sn-24sa +	sa-ay	5-15	1000+	500-10000+	15	20-66	1-2
	SC	1-15	500-5000	0-500 kW	ms-dk	sn-sa	10-30	50000+	100-515	300-10000	65-99	2-3
	NaS	100-250	115-240	50 kW-10 MW	sn-8sa	sn-sa	10-15	1000-5000	1000-3000	300-500	65-90	4
	NaNiCl	100-120	150-200	0-300 kW	sn-sa	sn-sa	10-14	3000	500-1500	100-200	85-90	3-4
	NiCd	10-80	30-350	0-45 MW	sn-sa	dk-gün	10-20	300-3500	500-1500	400-2400	60-90	4
	Pb-asit	10-50	180-400	0-40 MW	sn-sa	dk-gün	5-15	100-2000	200-600	50-400	60-90	5
	VRB	10-50	<2	10 kW-10 MW	sn-10sa	sa-ay	5-20	10000+	600-1500	150-1000	60-90	2-3
	ZnBr	30-50	100	50 kW-2 MW	sn-10sa	sa-ay	5-10	1500+	700-2500	150-1000	65-80	2
	Zn-Hava	10-1300	60-225	0-10 kW	sn-24sa +	sa-ay	>1	100-2000	100-250	10-160	50-65	2
	Li-iyon	60-300	500-2000	0-100 MW	dk-sa	dk-gün	5-16	<20000	900-4000	200-2500	85-98	2-3
	SMES	0.5-5	500-2000	100 kW-10 MW	ms-sn	dk-gün	20-30	100000+	130-489	1000-10000	95-98	2-3
Termal	TES	80-250		00.1-300 MW	1-24sa +	dk-gün	5-30		200-400	20-60	30-60	2-3

2.7.3 Çevresel etkiler

Güç uygulamalarında enerji depolama kapasitesinin artmasının teknolojik ve ekonomik açıdan birçok olumlu etkisi bulunmaktadır; fakat buna bağlı olarak çevresel etkiler de artmaktadır. Genel olarak EDS'nin çevreye olumsuz etkileri; geniş alanların işgal edilmesi, PHES ve CAES gibi sistemlerin rezervuar ihtiyacı, iklim değişikliği, batarya sistemlerinin kimyasal kirliliği, çevrim verimliliğinde oluşan kayıplar ve çevreye zararlı kimyasal dönüşümler olarak sayılabilir (Güney ve Tepe, 2017).

Mekanik, manyetik ve elektriksel enerji depolama sistemleri üretim, işletme, ortadan kaldırma ve geri dönüşüm çevresel etkilere göre nispeten daha az etki göstermektedirler. Volanlar, yüksek güç yoğunluğu ve çevrim verimliliğine sahip çevreye karşı duyarlı olan sistemler olmasına karşın görece hızlı deşarj olmakta ve düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. SMES ise yüksek güç yoğunluğuna sahip, sera gazı üretmeyen, düşük sıcaklıklarda çalışan ve çevrim verimliliği yüksek olan sistemlerdir. Fakat ısı kayıpları, yanıcı madde içeren depolama problemleri ve yüksek yatırım maliyetlerine sahiptirler. PHES sistemleri topluluk güç uygulamaları için en etkili depolama sistemlerinden birisidir fakat coğrafi bağıllık, yüksek yatırım maliyetleri, toprak erozyonu, su baskınları ve barajlarda biriken alüvyon ve silt tabakalarının oluşması gibi dezavantajları bulunmaktadır (Güney ve Tepe, 2017).

Hidrojenli yakıt hücreleri çevreye karşı en duyarlı depolama sistemlerinden birisi olarak kabul edilmektedir (Dehghani-Sanij ve diğ, 2019). Fakat yüksek maliyet, fosil yakıtlara ihtiyaç, yüksek maliyetli dönüşüm reaksiyonlarına ihtiyaç, depolama problemleri ve düşük verimlilikleri gibi dezavantajları bulunmaktadır.

Batarya sistemleri birçok uygulama alanı ve avantajları bulunmasına rağmen diğer enerji depolama sistemlerine ile karşılaştırıldığında çevresel etkileri daha fazladır. Batarya sistemlerinin çevresel etkilerinin özet tablosu Çizelge 2.14'te gösterilmektedir. Dehghani-Sanij ve diğ (2019) batarya sistemlerinin çevresel etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında ise batarya depolama sistemlerinin çevresel etkilerini 3 madde altında irdelemişlerdir:

- Hammadde girdileri: Batarya üretiminde gerekli olan maddeler; kurşun (Pb), lityum (Li), nikel (Ni), kobalt (Co), çinko (Zn), manganez (Mn), magnezyum (Mg), cıva (Hg), gümüş (Ag), kadmiyum (Cd), vanadyum (V), potasyum (K), titanyum (Ti), krom (Cr), sodyum (Na), kalay (Sn), alüminyum (Al), demir

(Fe), bakır (Cu), indiyum (In) ve ametal madde olarak ise; karbon veya grafit (C), flor (F), klor (Cl), brom (Br), kükürt (S), silisyum (Si) ve germanyum (Ge) girdileridir.

- Bataryaların kullanımından kaynaklanan zararlı etkiler ve çevre kirliliği: Bataryaların üretimde kullanılan kurşun, kadmiyum, civa ve krom gibi ağır maddeler soluma, deri veya göz teması, yutma ve enjeksiyon gibi farklı maruz kalma biçimleriyle insan sağlığını tehdit edebilmektedir.
- Nikel ve kadmiyum metalleri ise oldukça toksik olan maddeler arasındadır ve suya karıştığında çevreyi ve insanları kötü etkiler bırakabilmektedirler. Metaller ve ametal bileşikler, madencilik ve endüstriyel faaliyetler sırasında birçok farklı yoldan toprağa, yeraltı sularına ve yüzey sularına girebilmektedir. Bu nedenle bataryaların üretiminde ve geri dönüşüm süreçlerinde atmosfere salınan gazlarda çevre ve insan sağlığına etki edebilmektedir.
- Bataryaların atılması ve geri dönüşüm süreci: Çevre duyarlılığını artırılması için daha iyi geri dönüşüm prosedürleri ve teknolojileri oluşturulmaktadır. Ayrıca çoğu batarya malzemesi, batarya üretiminde ve diğer amaçlarda yeniden kullanım için kimyasal ve mekanik teknikler kullanılarak ucuz olmasa da geri dönüştürülebilmektedir. Gelişen teknoloji ve bilimsel çalışmalarla birlikte bataryaların geri dönüşüm süreçleri gün geçtikçe kolaylaşmakta ve maliyetleri buna bağlı olarak azalmaktadır. Ayrıca yeni batarya hammadelerinin bulunmasının yolunu açmakta, üretim maliyetlerini ve hammadde tüketimini azaltarak çevresel etkileri de azaltılabilmektedir.

Çizelge 2.14 : Farklı tiplerdeki batarya depolama sistemlerinin çevresel etkileri, Dehghani-Sanij ve diğ. (2019)'dan uyarlanmıştır.

Batarya Tipi	Çevresel Etki
Li-iyon	- İçeriğinde bulanabilen elementler; kobalt, manganez ve demir ikameleri yeşildir (doğada bol miktarda bulunur ve sürdürülebilirlerdir). - Lityum kimyası nispeten yeşildir (Batarya kimyası gelişmeye devam etmektedir). - Geri dönüşüm uygulanabilir (Ekstra enerji maliyeti bulunmaktadır).
Li-hava ve Li-organik	- AR-GE aşamasında. - Yeniden şarj edilebilir. - Çok düşük seviyede karbon ayak izine sahiptir. - Yenilenebilir elektrotlara sahiptir. - Kolay geri dönüşüm uygulanabilir.
Pb-A	- Yüksek sıcaklık çevrilebilirliği sınırlıdır. - Toksik bir maddedir. - Yüksek oranda geri dönüştürülebilir. - Asit sızıntıları oluşabilmektedir.
Ni-MH	- Nikel yeşil olmayan (ekstraksiyonu zor ve sürdürülemez) bir maddedir. - Toksik bir metaldir. - Nadir değildir fakat limitli tedariki bulunmaktadır. - Geri dönüşüm uygulanabilir.
Zn-hava	- Mekanik olarak yeniden şarj edilebilir. - Metal eritme işlemleri yeşil değildir. - Kolay geri dönüştürülebilir.
NaS	- Sodyum yeşildir, doğada bol miktarda bulunur ve ucuzdur. - Yüksek sıcaklık yönetimi problemleri mevcuttur. - İçerdiği maddelerin reaksiyonları ilgili güvenlik sorunları vardır.
Magnezyum-Sülfür	- AR-GE aşamasında. - Magnezyum ve kükürt yeşildir. - Geri dönüştürülebilir. - Düşük seviyede karbon ayak izine sahiptir.



3. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde literatürdeki enerji yönetimi ve optimizasyonu çalışmaları incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalar mikro şebekelerde optimizasyon problemlerinin türlerine bağlı olarak ayrı başlıklarda incelenmiş, kullanılan enerji sistemleri, yöntem ve depolama sistemine göre kategorize edilerek tablo halinde gösterilmiştir. Ardından tezin ana konusu olan hastanelerin enerji yönetimi ve optimizasyon çalışmaları bu kapsamda incelenmiştir.

Literatür çalışmasının devamında elektrikli araçlarda batarya sistemlerinin özellikleri, teknolojik gelişimi, pazar araştırması ve yaşam döngü süreçleri açıklanmaktadır. Ardından literatürde bulunan ikinci yaşam döngüsündeki Li-iyon EV batarya sistemlerinin kullanıldığı sabit enerji depolama sistemlerinin çevresel ve ekonomik faydaları, optimizasyonu ve fizibilite çalışmaları gösterilmektedir.

3.1 Mikro Şebekelerde Optimizasyon Çalışmaları

Mikro şebekeler, enerji depolama cihazları ve kendi kendine yeten enerji sistemlerine sahip olmakla beraber; kontrol edilebilir yükler ile birlikte dağıtılmış enerji kaynaklarının kontrolünü sağlayan sistemlerdir. Ana şebeke tarafından bakıldığında ise bir mikro şebeke, bir arıza ana şebekeyi etkilediğinde sorunsuz bir şekilde bağlantısını kesebilen ve otonom olarak çalışabilen eşdeğer bir jeneratör olarak görülmektedir (Cagnago ve diğ, 2020). Mikro şebekelerde enerji yönetimi ve kontrolü, yenilenebilir enerji sistemleri ve enerji depolama sistemlerinin dahil edilmesi ile uygulandığı alanın enerji talebi karşılanmakta ve çevre kirliliğinin azaltılmasında büyük fayda sağlamaktadır. Bununla birlikte, dağıtılmış yenilenebilir enerji kaynaklarının geniş entegrasyon alanı ve kesikli üretimleri nedeniyle mikro şebekelerin karmaşık yapılarının hızlı genişlemesi, güç sistemi istikrarını ve güvenliğini etkileyebilmektedir (Hannan ve diğ, 2020). Bu nedenle, mikro şebekelerde; verimli, güvenli ve yüksek kaliteli bir güç aktarımının sağlanması için uygun şekilde optimize edilmiş bir kontrol yöntemi gerekmektedir.

Enerji talebinin artması ile beraber mikro şebeke uygulamalarının sayısı giderek artmakta ve uygulamalarda istenilen özelliklere göre kontrol yöntemlerinde değişiklik görülebilmektedir. Mikro şebeke uygulamalarında sistemin kurulumu, tasarımı, kapasitesi, işletimi, ekonomisi, kontrolü, koruma ve altyapı gereksinimleri dahil olmak üzere bir dizi teknik ve operasyonel problemler bulunmaktadır. Bu problemler; yatırım, tasarım ve çizelgeleme problemleri olarak 3 başlık altında incelenmektedir.

Yatırım problemleri için literatürde önerilen modellerde, mikro şebeke uygulamalarında talep edilen enerjinin sağlanması amacıyla yenilenebilir enerji sistemleri ve depolama sistemlerinin kapasitelerinin optimizasyonu yer almaktadır.

Tasarım problemlerinde ise mikro şebekenin uygulandığı bölgede enerji talebinin karşılanması ve ilk yatırım maliyetlerinin azaltılması için YEK ve enerji depolama sistemlerinin konumlandırılması, boyutlandırılması ve tasarım parametrelerinin optimizasyonu yer almaktadır.

Çizelgeleme problemlerinde; mikro şebekenin ekonomik planlamasını, dahili üretim ve elektrik şebekesinden ithal edilen enerji maliyetlerinin en aza indirilmesi, zamana bağlı olarak değişen enerji talebini, operasyonel kısıtlamaların karşılanması ve kritik yükün sağlanması için mikro şebeke operasyonlarını, yenilenebilir enerji ve depolama sistemlerini optimize eden çalışmaları içermektedir.

Optimizasyon problemleri kapsamında literatürde birçok mikro şebeke optimizasyon çalışması ve metodu bulunmaktadır. Yenilenebilir enerjinin kullanıldığı uygulamalar için Iqbal ve diğ. (2014), optimizasyon metodlarını sınıflandırmışlardır. Bu metodlar 4 bölümde incelenmiştir; karar verme tabanlı modeller, matematiksel modeller, sezgisel modeller ve bulanık modeller. Ayrıca çalışmalarında bu modeller arasında, literatürdeki dağıtılmış enerji uygulamaları çalışmalarında; matematiksel programlama türlerinden biri olan doğrusal programlamanın diğer metodlara kıyasla daha çok kullanıldığını belirtmişlerdir.

Literatür taramasında farklı mikro şebekelerde optimizasyon problemleri göz önünde bulundurularak doğrusal programlama metodlarının kullanıldığı, enerji depolama sistemleri ve yenilenebilir enerji sistemlerinin entegre edildiği mikro şebekelerde enerji optimizasyonu çalışmalarına ağırlıklı olarak yer verilmiştir.

3.1.1 Yatırım problemleri

Yenilenebilir, konvansiyonel enerji sistemleri ve enerji depolama sistemlerinin dahil edildiği bir mikro şebeke çalışmasında; Pourbehzadi ve diğ. (2019) yenilenebilir enerji kaynaklarının belirsizliği altında hibrit AC/DC mikro şebekelerin kapasite optimizasyonunun sağlanması için kapsamlı bir literatür incelemesi yapmışlardır. Çalışmalarında YEK'in kesikli üretiminden kaynaklanan belirsizliklerden dolayı oluşan operasyon problemi formülasyonuna ilişkin farklı metodolojiler ve bakış açıları ile güç akışı problemlerinin çözümleri analiz edilmiş ve bu kapsamdaki çalışmalar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda Doğrusal Programlama (DP) metodlarının Stokastik Programlama metodlarına kıyasla belirsizliklere karşı daha sağlam eylem gerçekleştirdiklerini belirtmişlerdir. Uygulamada PV, rüzgâr türbini, yakıt hücresi, mikro türbin ve batarya sistemlerinin kapasite optimizasyonu için metoda eklenen değişkenlerin tamsayılı veya kesirli olabilen Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (KTDP) modeli önermişlerdir. Çok amaçlı optimizasyon sonucunda hibrit mikro şebekenin yönetiminde büyük iyileşmeler gözlemlenmiştir.

Mikro şebekelerde enerji üretim sistemleri ve batarya sistemlerin kapasite optimizasyonun ve operasyonel çizelgelemesinin yapıldığı bir çalışmada; Garmabdari ve diğ. (2017) üniversite kampüsünde bulunan, ana şebekeye bağlı 3 binanın elektrik talebinin karşılanması için enerji üretim sistemi olarak PV, rüzgâr türbini, mikro türbin ve dizel jeneratörün bulunduğu bir mikro şebekede batarya sisteminin kapasite optimizasyon problemi için iki katmanlı karma tamsayılı doğrusal ve kuadratik (ikinci dereceden fonksiyon) programlama önermişlerdir. Batarya sisteminin optimum kapasitede kullanılması için enerji üretim sistemi, batarya sistemi ve işletme maliyetleri modele dahil edilmiştir. Çalışmanın sonucunda mikro şebeke için gerekli olan batarya kapasitesi belirlenmiş, sistem performansı yükselmiş ve toplam maliyetler en aza indirilerek kullanılan hibrit metodun etkinliğini ve verimliliğini doğrulamışlardır. Garmabdari ve diğ. (2020) benzer bir çalışmayı DP ve Stokastik Programlama'nın kullanıldığı hibrit bir model ile yapmışlardır. Çalışmada ana şebekeye bağlı bir mikro şebekede kullanılan tüm sistemlerin teknik ve ekonomik kriterleri ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili üretiminden kaynaklı belirsizlikler göz önünde bulundurularak enerji üretim sistemlerinin ve bataryaların hem kapasite hem de çizelgeleme optimizasyonlarını yaparak 4 farklı senaryoda incelenmiştir. Ana şebekeye bağlı mikro şebekelerde güç dalgalanmalarının önlenmesi

ve enerji arz güvenliğinin sağlanması için gerekli batarya kapasitesi bu kapsamlarda belirlenmiş ve metodun etkinliği doğrulanmıştır.

Bu çalışmalardan farklı olarak; Zhang ve diğ. (2017) ada ve uzak köy olmak üzere, Çin'in güney bölgesinde bulunan Dong'ao Adası'nda elektrik sağlamak amacıyla güneş panellerinin, rüzgâr türbinlerinin ve dizel jeneratörlerin kullanıldığı hibrit bir sistem tasarlayıp, analizini ve optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında adanın, sanayi, otel, aydınlatma ve hanehalkının geçmiş elektirik tüketim talebini ortalama 600 kW olarak belirlemişlerdir. Yaptıkları hibrit sistemle bu talebi güvenli ve verimli bir şekilde karşılamışlardır.

Çizelge 3.1'de yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemlerinin kullanıldığı mikro şebekelerdeki yatırım optimizasyon problemleri çalışmalarının özet tablosu bulunmaktadır.

Çizelge 3.1 : Yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemlerinin kullanıldığı mikro şebekelerde yatırım optimizasyonu çalışmaları

Yazar	Yöntem	Yıl	Depolama Ünitesi			Enerji Kaynağı			
			B	T	D	G	R	Ş	D
Ho ve diğ.	KTDP	2016	X			X			X
Nugraha ve diğ.	DP ve Stokastik P.	2016				X	X		X
Zhang ve Jia	KTDP ve Stokastik P.	2016	X			X		X	
Garmabdari ve diğ.	KTDP ve Kuadratik P.	2017	X			X	X	X	X
Mashayekh	KTDP	2017	X			X			X
Zhang ve diğ.	Maks. Güç Noktası İzleme	2017	X			X			X
Liu ve diğ.	KTDP ve Parçacık Sürü Optimizasyonu	2017	X		X	X	X		X
Pourbehzadi ve diğ.	Metot karşılaştırma	2019	X		X	X	X	X	X
Garmabdari ve diğ.	KTDP ve Stokastik P.	2020	X			X	X	X	X

Depolama; B: Batarya, T: Termal, D:Diğer **Enerji Kaynağı;** G: Güneş, R: Rüzgâr, Ş: Ana Şebeke, D:Diğer (Mikro Türbin, Dizel Jeneratör, Yakıt Hücreleri, Biyokütle ve CHP)

3.1.2 Tasarım problemleri

Yenilenebilir enerji ve depolama sistemlerinin dahil edildiği hibrit bir mikro şebeke optimizasyon çalışmasında; Dawoud ve diğ. (2018) hibrit yenilenebilir enerji

sistemlerini ve batarya ünitelerini hem bağımsız hem de ana şebekeye bağlı mikro şebekeler için literatürdeki optimum tasarım optimizasyonu çalışmaları incelenerek bir metod karşılaştırma çalışması yapmışlardır. PV ve rüzgâr türbinlerinin kesikli üretimi nedeniyle enerji sürdürülebilirliğinin sağlanması için batarya sistemlerinin boyutları optimize edilerek, mikro şebekenin kritik yük talebinin karşılanması amaçlanmıştır. Çalışmada, enerji üretim ve depolama sistemlerinin maliyeti, çevrim ömrü maliyetleri, yük kaybı olasılığı, güç kaynak kaybı olasılığı ve ana şebeken talep edilen yüklerin sağlanmaması durumları tasarım parametreleri olarak belirlenmiştir. Bu çalışmaya benzer olarak; Fontenot ve Dong (2019) optimum enerji yönetimi için binaya entegre edilen mikro şebekelerin modellenmesi ve kontrolünün sağlanması amacıyla kapsamlı bir inceleme yapmışlardır. Çalışmalarında PV, rüzgâr türbinine ek olarak mikro türbin, dizel jeneratör, kojenerasyon, yakıt hücresi ve biyokütle enerji sistemlerini dahil ederek bina tipi mikro şebekelerin tasarımını optimize eden modelleri ve formülleri çalışmalarında belirtmişlerdir. Klasik yöntemler, metasezgisel algoritmalar ve stokastik programlama dahil olmak üzere optimizasyon tekniklerinin araştırıldığı bu çalışmada; mikro şebekelerdeki belirsizliklerin önlenmesi için optimizasyon metodlarının uygulanabilirliğinin artırılması için metodların daha az karmaşık hale getirilmesi gerektiğinin altını çizmişlerdir. Mikro şebeke çalışmalarında sistem kısıtlarının sayısı azaldıkça, uygulanabilirliği yüksek ve daha az karmaşık olan Doğrusal Programlama metodlarının, mikro şebekelerde başlangıç durumuna göre %23'e kadar maliyet tasarrufu ve %63 oranında CO₂ emisyonu azaltımının sağlanabileceğini belirtmişlerdir.

Modüler bir enerji yönetim sisteminin modellenmesinin, tasarımının ve bu sistemin şebekeye bağlı bir batarya tabanlı mikro şebekeye entegrasyonunun yapıldığı deneysel bir çalışmada; Luna ve diğ. (2017) PV, rüzgâr türbini ve bataryaların tasarım optimizasyonunun yanında çizelgeleme optimizasyonu yaparak, KTDP metodunun kullanıldığı hibrit bir yöntem önermişlerdir. Bu model ile depolama birimlerinin uygun şekilde şarj edilmesi, 24 saat ileri tahmin verilerine dayanarak işletme maliyetlerinin en aza indirilmesi ve öz tüketimin teşvik edilmesi amaçlanmaktadır. Teorik varsayımlarla ve deneysel çalışmaların sonucunda oluşturulan enerji yönetim sisteminin mikro şebekenin toplam maliyetleri düşürdüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca, mikro şebekedeki belirsizliklerin azaltılması için gürbüz metodların yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Pecenak ve diğ. (2020) ana şebekeye bağlı mikro

şebekelerin elektrik kesintisi durumunda enerji güvenliğinin sağlanması, kritik yükün sağlanması, dağıtılmış enerji ve batarya sistemlerinin boyutlandırılması için gürbüz tasarım optimizasyonu çalışması yapmışlardır. Çalışmada, hesaplama karmaşıklığının az olduğu ve iki katmanlı bir DP modeli kullanılarak belirsizliklere karşı modelin sağlamlığı garanti edilmiştir. Bununla birlikte, bataryaların şarj durumları (SoC-State of Charge) modele dahil edilerek belirsizliklere karşı 24 saatlik enerji arz güvenliği sağlanmış ve işletme maliyetleri düşürülmüştür.

Çizelge 3.2’de yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemlerinin kullanıldığı mikro şebekelerdeki tasarım optimizasyon problemleri çalışmalarının özet tablosu bulunmaktadır.

Çizelge 3.2 : Yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemlerinin kullanıldığı mikro şebekelerde tasarım optimizasyonu çalışmaları

Yazar	Yöntem	Yıl	Depolama Ünitesi			Enerji Kaynağı			
			B	T	D	G	R	Ş	D
Mohammadi ve Mohammadi	Stokastik P.	2014	X	X		X	X		X
Wouters ve diğ.	KTDP	2015	X			X	X	X	
Zhang ve diğ.	KTDP	2015		X	X			X	X
Anglani ve diğ.	KTDP	2017	X			X			X
Luna ve diğ.	KTDP	2017	X			X	X	X	
Dawoud ve diğ.	Metot karşılaştırma	2018	X			X	X	X	
Fontenot ve Dong	Metot karşılaştırma	2019	X			X	X	X	X
Barbaro ve Castro	Stokastik P.	2020	X	X		X	X		X
Pecenak ve diğ.	DP	2020	X			X			
Rigo-Mariani ve diğ.	KTDP	2020	X	X		X			X
Swaminathan ve diğ.	Parçacık Sürü Optimizasyonu	2020	X	X		X			X
Depolama; B: Batarya, T: Termal, D:Diğer Enerji Kaynağı; G: Güneş, R: Rüzgâr, Ş: Ana Şebeke, D:Diğer (Mikro Türbin, Dizel Jeneratör, Yakıt Hücreleri, Biyokütle ve CHP)									

3.1.3 Çizelgeleme problemleri

Mikro şebekelerde enerji kaynaklarının kapasite, tasarım ve çizelgeleme optimizasyonu için yöntemler, çözümler ve destekler hakkında bir metod karşılaştırması çalışması yapan Zia ve diğ. (2018), mikro şebeke enerji yönetim

sistemleri için karar verme stratejileri ve bunların çözüm yöntemleri hakkında eleştirel bir analiz sunmaktadır. Ayrıca çalışmalarında mikro şebeke enerji yönetim sistemlerinin uygun maliyetli uygulaması için iletişim teknolojilerinin önemini vurgulamışlardır. Çalışmada enerji yönetimi ve optimizasyon metodlarının uygulanabilirliğinin artırılması için denetim, kontrol ve veri toplama sisteminin (SCADA) entegrasyonu ile verilerin izlenmesi ve analiz edilmesinin kolaylaştığı savunulmaktadır. Mikro şebekelerin tasarımı, kurulumu ve işletimi, kontrol, koruma, iletişim ve altyapı gereksinimleri dahil olmak üzere çeşitli teknik ve operasyonel zorlukların üstesinden gelinmesi amacıyla; Cagnano ve diğ. (2020) literatürdeki mikro şebekelerde tasarım ve çizelgeleme optimizasyonu çalışmalarını inceleyerek, araştırmacıların bu zorlukları ele almalarına ve pratik mikro şebeke uygulamaları için potansiyel önerilerde bulunmalarına yardımcı olması amaçlanmaktadır. İtalya’da bulunan Prince Lab kampüs tipi mikro şebekenin ekonomik ve güvenilir bir şekilde çalışmasını garanti etmek için gereken ana kontrol işlevleri özetlenmiştir. Ana şebekeye bağlı ve CHP entegreli mikro şebeke; YEK (PV ve rüzgâr türbini) ve konvansiyonel enerji sistemlerinin (mikro türbin ve senkron jeneratör) kullanımı ile toplamda 260 kW’lık bir kurulu güce sahiptir. Sistemde tüm mikro şebeke operasyonlarının sürdürülebilirliğin sağlanması için batarya ünitesi dahil edilerek programlanabilir toplam 240 kW nominal güç sağlanmıştır.

Ana şebekeye bağlı bir mikro şebekenin ekonomik opresyonları ve batarya boyutlandırılması optimizasyonunun yapılması amacıyla; Sukumar ve diğ. (2017) çizelgeleme probleminin çözülmesi amacıyla DP ve KTDP metodlarının kullanılmasını önermişlerdir. PV, yakıt hücresi üretim sistemleri ve batarya ünitesinin dahil edildiği mikro şebeke vaka çalışmasında; 24 saatlik zaman periyodunda “sürekli çalışma modu, güç paylaşım modu ve açık/kapalı modu” olmak üzere 3 modun birleştirilmesiyle karma bir işletim stratejisi geliştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda güneş fotovoltaik santrallerinden elde edilen PV gücün mikro şebekenin işletme maliyetini ve batarya ünitesinin çalışmasını etkilediği bulunmuştur. Ayrıca, mikro şebekenin batarya ünitesinin farklı SoC seviyelerine göre işletme maliyetindeki değişim analiz edilerek; yüksek bir başlangıç SoC seviyesine sahip en uygun batarya kapasitesinin mikro şebekenin ilk yatırım maliyetini ve işletim maliyetlerini düşürdüğü tespit edilmiştir. Bu çalışmadan farklı olarak ana şebekeye bağlı ve konvansiyonel enerji üretim sistemlerinin dahil edildiği başka bir çalışmada; Kumar

ve Saravanan (2019) yenilenebilir (PV ve rüzgâr türbini) ve konvansiyonel enerji kaynakları (dizel jeneratör ve mikro türbin), depolama (batarya ve yakıt hücresi), dinamik fiyatlandırma ve 24 saat boyunca talep tarafı yönetiminin bir kombinasyonunu göz önünde bulundurarak bir mikro şebekede gün öncesi planlama sorununu çözmek ve üretim maliyetlerinin azaltılması amacıyla çizelgeleme optimizasyonu kullanılarak bir enerji yönetimi algoritması önermişlerdir. Optimizasyon çalışmasında amaç fonksiyonu, YEK için doğrusal bir maliyet fonksiyonu ve kovansiyonel enerji sistemleri için kuadratik bir maliyet fonksiyonu dikkate alınarak formüle edilen bir metod kullanılmıştır. Metotta, YEK'den gelen güç ve yüklerin belirsizliği, yenilenebilir ve konvansiyonel enerji sistemlerinin farklı işletim maliyetleri göz önünde bulundurulmuştur. Oluşturulan enerji yönetimi algoritmasının sonucunda en ucuz kaynakların %100 oranına kadar kullanıldığı ve diğer kaynakların ise artan üretim maliyetlerine göre kullanım oranının azalarak kullanıldığı tespit edilmiştir.

Yenilenebilir enerji ve batarya sistemlerinin dahil edildiği mikro şebeke çalışmalarından farklı olarak; Zheng ve diğ. (2018a) CHP ve biyokütle enerji sisteminin de entegre edildiği bir mikro şebeke optimizasyon çalışması yapmışlardır. Biyokütle ve CHP tabanlı mikro şebeke sisteminin tasarımını ve planlamasını değerlendirmek için ekonomik bir Doğrusal Programlama modeli geliştirmişlerdir. Mikro şebeke sisteminde enerji talebinin karşılanması için küçük ölçekli rüzgâr türbini, PV, batarya depolama, termal depolama ve ısı kazanları kullanılmıştır. YEK'in kesikli üretimlerinden kaynaklı belirsizlikler göz önünde bulundurularak oluşturulan optimizasyonun sonucunda; Biyokütle ve CHP entegreli mikro şebekenin elektrik ve ısı taleplerini karşılamak için şebeke elektriği ve geleneksel üretim sistemleri ile karşılaştırıldığında bu tür bir mikro şebekenin maliyet etkinliğini önemli ölçüde artırabileceği gösterilmiştir. Aynı mikro şebeke sisteminin kullanarak yapıldığı diğer bir çalışmada ise Zheng ve diğ. (2018b) önceki çalışmalarından farklı olarak belirsizlik altında talep tarafı yönetimi ile biyokütle ve yenilenebilir enerji entegreli mikro şebekesinin optimizasyonu yapmışlardır. Kaliforniya Üniversitesi, Davis kampüs mikro şebekesinin işletim maliyetini en aza indirmek için, model tahmin kontrollü, ekonomik ve doğrusal programlamaya dayalı bir yük kaydırma algoritması geliştirilmiştir. Optimizasyon sonucunda işletim maliyetleri %6 azaltılarak, talep tarafı yönetimi olmayan bir önceki çalışmasına kıyasla mikro şebekelerde PV sistemlerinin

kurulmasının diğer üretim sistemlerine kıyasla daha uygun maliyetli olacağını ve sistem performansını arttıracığını belirtmişlerdir.

Üretim maliyetlerinin en aza indirilmesi, güç kalitesinin ve çevresel endekslerin maksimize edilmesi amacıyla yapılan ana şebekeye bağlı bir mikro şebeke çalışmasında; Bonfiglio ve diğ. (2013) Genoa Üniversitesi'nde Savona kampüsü için bir optimizasyon çalışması yapmışlardır. YEK (PV ve rüzgâr türbini) ve konvansiyonel (mikro türbin) enerji üretim sistemleri, batarya ve termal enerji depolama sistemleri ve elektrikli araçların entegre edildiği mikro şebekenin elektriksel ve termal analizi için karma tamsayılı doğrusal programlama tabanlı bir optimizasyon algoritması önermişlerdir. Çalışmanın sonuçları 24 saatlik ayrı ayrı zaman dilimleri ile örneklendirilerek %20'e kadar para tasarrufu sağladığı belirtilmiştir. Diğer bir kampüs tipi mikro şebeke çalışmasında, Malta Koleji'nde bulunan mikro şebeke projesinin enerji optimizasyonu çalışmasını yapan Zacharia ve diğ. (2019) operasyonel kazancın artırılması amacıyla çizelgeleme probleminin çözülmesi için KTDP metodu önermişlerdir. Çalışmada her moddaki önceliklere ve hedeflere göre mikro şebeke operasyonunu şebekeye bağlı ve adalı modlarda programlamak için iki optimizasyon algoritması uygulanmaktadır. Operasyonel ve güvenlik kısıtlamalarının tam olarak karşılanması, mikro şebekenin işletme maliyetinin en aza indirilmesi, geçmiş enerji tüketim verileri ve kritik yük profili göz önünde bulundurularak yapılan optimizasyonda iki mod arasında hızlı geçişin sağlanması amaçlanmıştır. Optimizasyon çalışmasının sonucunda önerilen programlamanın, şebekeye bağlı ve adalı modlar arasında çeşitli geçişler durumunda bile benimsenen mikro şebekeyi en iyi ve sorunsuz şekilde çalıştırmadaki etkinliğini göstermektedir.

Diğer mikro şebeke çalışmalardan farklı olarak, YEK'in kesikli üretimi ve elektrik piyasasındaki fiyatların belirsizliği dikkate alınarak oluşturulan çizelgeleme optimizasyonu çalışmasında; Bournapour ve diğ. (2016) hidrojen depolama ve yakıt hücresi ile CHP entegreli bir mikro şebekenin çizelgeleme problemi için Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama (KTDOP) önermişlerdir. Ana şebekeye bağlı mikro şebekede, 33 hanenin termal ve elektrik yükü karşılanarak sistemin operasyonel güvenliği sağlanmıştır. Bu çalışmadan farklı olarak; Bournapour ve diğ. (2017) proton değişim membranlı yakıt hücresi (PEMFC) ve CHP entegreli mikro şebeke optimizasyonu için KTDOP tabanlı Stokastik Programlama metodu önermişlerdir. Çalışmada PV, rüzgâr türbini ve CHP sistemlerinin koordineli olarak

çalışarak mikro şebekenin elektrik piyasasına katılımının sağlanması için kâr maksimizasyonunun yapılması amaçlanmaktadır. Senaryo bazlı optimizasyon yönteminin faydalı ve etkili performansı simülasyon sonuçları ile doğrulanmıştır.

Ana şebekeden bağımsız uzak topluluklar için hibrit AC/DC mikro şebekelerde farklı üretim teknolojilerini en uygun şekilde planlanması amacıyla yapılan bir çalışmada; Helal ve diğ. (2017) 38 haneli mikro şebekenin çizelgeleme optimizasyonu için KTDOP metodu kullanmışlardır. Önerilen optimizasyonun amacı, mikro şebekenin kararlı çalışmasını sağlamak, haneler için temiz bir su kaynağı sağlamak ve günlük işletme maliyetini en aza indirmek için tüm sistem varlıklarını yönetmektir. Enerji depolama sisteminin olmadığı ve enerji üretim sistemi olarak PV ve jeneratör sistemlerinin kullanıldığı çalışmanın simülasyon sonuçlarına göre genel işletim maliyetlerini azaltılmakta ve adalı mikro şebekenin güvenli bir şekilde çalışmasındaki etkinliğini kanıtlamaktadır. Ana şebekeden bağımsız diğer bir mikro şebeke çalışmasında; Moradi ve diğ. (2018) sistem belirsizlikleri altında bağımsız bir mikro şebekenin optimal enerji çizelgelemesini araştırmış ve sistem performansını değerlendirmek için çeşitli operasyonel stratejileri test etmişlerdir. Önerilen optimizasyon enerji yönetim sisteminin temel amacı, ertesi gün enerji kaynağı üretimlerini saatlik olarak planlayarak enerji kullanım verimliliğini artırmak, sistem yakıt maliyetini düşürmek ve gaz emisyonlarını azaltmaktır. Mikro şebekenin operasyon ve üretilen emisyon maliyetlerinin en aza indirilmesi için kısıtlı tek amaçlı Dinamik Programlama metodu önermişlerdir. Mikro şebeke sisteminde talep edilen enerjinin sağlanması için YEK (PV, rüzgâr türbini) ve konvansiyonel (dizel jeneratör ve mikro türbin) enerji üretim sistemlerinin yanında yakıt hücresi ve batarya depolama sistemleri sisteme dahil edilmiştir. Batarya ünitesinin etkinliği göz önünde bulundurularak oluşturulan optimizasyonun sonucunda batarya sistemine bağlı ve bağlı olmadığı durum olmak üzere 2 senaryo değerlendirilmiştir. Karşılaştırma sonucunda batarya ünitesinin bağlı olduğu adalı modda %8.5 genel maliyet tasarrufunun sağlandığı belirtilmiştir.

Elektrikli araçların ana şebekeye bağlı konut tipi mikro şebekeye entegre edildiği bir mikro şebeke çalışmasında; Igualada ve diğ. (2014) hane halkı elektrik yükü, kullanıcıların hareketlilik profiline bağlı araç bataryası yönetimi ve yerli YEK (PV ve rüzgâr türbini) kullanımı dikkate alınarak oluşturulan çizelgeleme ve tasarım optimizasyonu için KTDP modelini önermişlerdir. Mikro şebekenin

optimizasyonunda; elektrikli araçların varış ve kalkış saatleri, bataryaların şarj durumları ve yıpranma maliyetleri, bir hanenin enerji tüketimi ve mikro şebeke bileşenlerinin gün öncesi elektrik fiyatları modele dahil edilerek işletme maliyetlerinde tasarruf edilmesi planlanmaktadır. Ayrıca kullanıcılara bataryaların şarj durumlarının kontrolü için “menzil kaygısı” kavramını tanıtarak, sistemin potansiyel tasarrufunun menzil kaygısına bağlı olduğunu ve orta kaygı düzeyinde %9,45 oranında tasarruf elde ettiklerini belirtmişlerdir. Elektrikli araçların dahil edildiği diğer bir çalışmada, Thomas ve diğ. (2018) PV sisteminin belirsizliğini ve stokastik elektrikli araçların sürüş programını dikkate alan ana şebekeye bağlı akıllı bir bina için bir enerji yönetim sisteminin çizelgeleme optimizasyonunu yapmışlardır. Bina tipi mikro şebekenin çizelgeleme probleminin çözülmesi için KTDP metodu önerilmiştir. Mikro şebekede enerji güvenliğinin ve operasyonların sürdürülebilirliği için batarya ünitesi ve elektrikli araçların bataryalarının entegre edildiği sistemde, araç ve mikro şebeke arasında iki yönlü bir enerji operasyonu ele alınmıştır. Optimizasyon çalışmasında 2 yıllık akıllı ölçüm verileri kullanılarak PV üretimi için bir saatlik olasılıklarla ifade edilen 6 farklı senaryo oluşturulmuştur. Çalışmada, PV üretimi için en iyi senaryo altında, enerji yönetim sisteminin şebekeye daha fazla güç enjekte edebildiğini ve dağıtılmış enerji kaynaklarına güç tahsis etmede daha fazla esnekliğe sahip olduğu gösterilmiştir.

Ana şebekeden bağımsız bir mikro şebekenin enerji talebinin karşılanması için yapılan optimizasyon çalışmasında, Amrollahi ve Bathaee (2017) sistem boyutlarının belirlenmesi ve işletme maliyetlerinin azaltılması için KTDP metodu önermişlerdir. Optimizasyon probleminin çözümü hibrit optimizasyon modeli (HOMER) ve GAMS yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Geleneksel enerji üretim sistemleri ve kaynaklarına ulaşamama durumları göz önünde bulundurularak; PV, rüzgâr türbini, batarya ve invertör sistemlerinin kullanıldığı çalışmada, üretim ve tüketim profilleri arasındaki uyumsuzluğun azaltılması amacıyla gerekli sistem boyutunun optimizasyonu sağlanmıştır. Mikro şebeke bileşenlerinin maksimum 25 yıllık kullanım ömürleri göz önünde bulundurularak tasarlanan mikro şebekenin talep edilen yükün karşılanması için çizelgeleme optimizasyonu yapılarak operasyon maliyetleri (yatırım, onarım, bakım ve değiştirme) %17 oranında azaltılmıştır. Ana şebekeden bağımsız diğer bir mikro şebeke çalışmasında, Nemati ve diğ. (2018) farklı üretim, çevresel ve teknik kısıtlamalar altında değişen yükler ve enerji üretimleri ile her saat

aralığında üretim birimlerinin çalışma programını belirlemek için kullanılan birim taahhütü (Unit Commitment) ve ekonomik çizelgeleme optimizasyon problemi için KTDP tabanlı bir metod önermişlerdir. Ayrıca enerji depolama sistemi olarak Li-iyon bataryaların kullanıldığı sistemde, batarya ünitesinin SoC seviyeleri göz önünde bulundurularak yaşlandırma modeli geliştirilmiştir. Optimizasyon sonucunda 5 farklı enerji yönetim politikası birbiriyle karşılaştırılarak mikro şebeke bileşenlerinin operasyon ve yaşlanma maliyetlerinin en aza indirilmesi konusunda KTDP metodunun etkinliği gözlemlenmiştir. Yenilenebilir enerji tabanlı, ana şebekeden bağımsız bir mikro şebekenin operasyonel ve finansal optimizasyonu çalışmasını yapan Tu ve diğ. (2019) PV, rüzgâr türbini, dizel jeneratör ve batarya depolama sistemi içeren bir mikro şebeke için genel seviyelendirilmiş elektrik maliyetinin en aza indirilmesi için iki aşamalı KTDP modeli geliştirmişlerdir. Konut tipi mikro şebekenin talep edilen yükün karşılanması için optimum boyutlandırma ve çizelgelemesinin yapıldığı çalışmanın sonucunda talep tarafı kontrol stratejisinin, uygun maliyetli ve kesintiye uğramayan bir strateji olduğu gösterilmiştir.

Önceki çalışmalardan farklı olarak Vergara ve diğ. (2017) enerji güvenliği açısından kısıtlı üç fazlı konut mikro şebekeleri için optimum enerji yönetimi çalışması yapmışlardır. Ana şebeye bağlı ve enerji talebinin değişken olduğu bir mahallenin elektrik kesintisi durumunda enerji güvenliğinin sağlanması ve maliyetlerin düşürülmesi amacıyla oluşturulan çizelgeleme optimizasyonu için KTDOP problemi olarak formüle edilmiştir. Ardından, kesin bir KTDP modeli elde etmek için bir dizi doğrusal yaklaşım ve eşdeğer matematiksel temsiller kullanılmıştır. PV ve batarya depolama sistemlerinin kullanıldığı mikro şebekede yapılan optimizasyon sonucunda güç akışı kısıtlamaları ve kritik yükün sağlanması konusunda batarya depolama sistemlerinin bu problemler karşısında esneklik ve etkin çalışma sağladığını göstermişlerdir. Diğer bir konut tipi mikro şebeke çalışmasında, Akter ve diğ. (2020) mikro şebekelerdeki işlemsel enerji paylaşımı sorunlarını çözmek için en uygun şekilde dağıtılmış bir enerji yönetimi optimizasyon çalışması yapmışlardır. Çalışmada, optimum enerji kullanım problemlerinin farklı tipteki evler için dağıtılmış KTDP problemleri olarak formüle edildiği konut mikro şebekeleri için bir enerji yönetimi şeması sunulmuştur. Mikro şebekenin enerji yönetiminde, PV ve batarya ünitesinin olduğu evler ve bu sistemlerin bulunmadığı evler arasında enerji paylaşımı sağlanarak optimum kaynak yönetimi ve maliyetlerin en aza indirilmesi amaçlanmaktadır.

Önerilen planın çözümleri, farklı evlerin, herhangi bir özel bilgiyi merkezi işlemsel enerji yönetim sistemi ile paylaşmadan kaynaklarını en iyi şekilde kullanmak için kararlar almalarına izin vermektedir. Konut tipi mikro şebekesindeki farklı evlerdeki simülasyon sonuçlarına göre optimum kaynak kullanımı ve etkili enerji paylaşımı açısından önerilen yaklaşımın etkinliğini göstermektedir. Jo ve diğ. (2020) bu çalışmaya benzer konut tipi mikro şebeke optimizasyonu için DP tabanlı bir metod önermişlerdir. Çalışmada, mahalledeki hanelerin elektrik talebinin karşılanması, maliyetlerin düşürülmesi ve ana şebekenin etkilerinin en aza indirilmesi için sıfır net enerjili bir enerji yönetimi sunulmaktadır. Bir önceki çalışmadan farklı olarak enerji üretim sistemi olarak yakıt hücreleri ve PV panelleri kullanılmıştır. Enerji depolama sistemi olarak hanelerin sahip olduğu farklı güç kapasitesindeki bataryaların SoC seviyeleri dikkate alınarak toplu bir depolama ünitesi olarak kullanılması amacıyla çizelgeleme optimizasyonu uygulanmıştır. Optimizasyon sonucunda haneler için ikili piyasa modeli geliştirilmiş ve toplu depolama sistemi kapasitesi düşürülerek maliyet tasarrufu sağlanmıştır.

Çizelge 3.3'te yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemlerinin kullanıldığı mikro şebekelerdeki çizelgeleme optimizasyon problemleri çalışmalarının özet tablosu bulunmaktadır.

Çizelge 3.3 : Yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemlerinin kullanıldığı mikro şebekelerde çizelgeleme optimizasyonu çalışmaları

Yazar	Yöntem	Yıl	Depolama Ünitesi			Enerji Kaynağı			
			B	T	D	G	R	Ş	D
Parisio ve Glielmo	KTDP	2011	X			X		X	
Bonfiglio ve diğ.	KTDP	2013	X	X		X	X		X
Zhang ve diğ.	KTDP	2013		X	X		X		X
Igualada ve diğ.	KTDP	2014	X			X	X	X	
Mazidi ve diğ.	Stokastik P.	2014	X			X	X	X	X
Comodi ve diğ.	KTDP	2015	X	X		X			X
Luna ve diğ.	KTDOP ve Stokastik P.	2015	X			X	X	X	
Tenfen ve Finardi	KTDP	2015	X			X	X	X	X
Bournapour ve diğ.	KTDOP	2016			X	X	X	X	X
Amrollahi ve Bathaee	KTDP	2017	X			X	X		
Bournapour ve diğ.	KTDOP ve Stokastik P.	2017			X	X	X	X	X
Helal ve diğ.	KTDOP	2017				X			X

Çizelge 3.3 (devam): Yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemlerinin kullanıldığı mikro şebekelerde çizelgeleme optimizasyonu çalışmaları

Yazar	Yöntem	Yıl	Depolama Ünitesi			Enerji Kaynağı			
			B	T	D	G	R	Ş	D
Jin ve diğ.	KTDP	2017	X	X		X		X	X
Liu ve diğ.	KTDP	2017	X		X	X	X		X
Luna ve diğ.	KTDP	2017	X			X	X	X	
Silvente ve Papageorgiou	KTDP	2017		X	X		X	X	
Sukumar ve diğ.	DP ve KTDP	2017	X		X	X		X	
Vergara ve diğ.	KTDP ve KTDP	2017	X			X		X	
Moradi ve diğ.	Dinamik P.	2018	X		X	X	X		X
Nemati ve diğ.	KTDP	2018	X		X	X			X
Thomas ve diğ.	KTDP	2018	X			X		X	
Zheng ve diğ.	DP	2018a	X	X	X	X	X		X
Zheng ve diğ.	DP	2018b	X	X	X	X	X		X
Zia ve diğ.	Metot karşılaştırma	2018	X	X	X	X	X	X	X
Kumar ve Saravanan	DP	2019	X		X	X	X	X	
Tu ve diğ.	KTDP	2019	X			X	X		X
Zacharia ve diğ.	KTDP	2019	X			X		X	X
Akter ve diğ.	KTDP	2020	X			X		X	
Cagnago ve diğ.	Metod karşılaştırma	2020	X			X	X	X	X
Jo ve diğ.	DP	2020	X		X	X		X	

Depolama; B: Batarya, T: Termal, D:Diğer **Enerji Kaynağı;** G: Güneş, R: Rüzgâr, Ş: Ana Şebeke, D:Diğer (Mikro Türbin, Dizel Jeneratör, Yakıt Hücreleri, Biyokütle ve CHP)

3.2 Hastanelerde Enerji Yönetimi ve Optimizasyonu Çalışmaları

Hastaneler, halka hizmet veren en kritik tesisler arasındadır. Bu nedenle kritik tesislerde enerjinin tedarikinin sağlanması büyük bir önem arz etmektedir ve kritik yük talebinin karşılanması için de güvenli ve çevre dostu bir alternatif gerekmektedir. Tıbbi sektördeki tesislerin operasyonlarının iyileştirilmesi amacıyla kritik öneme sahip tıbbi cihazların elektrik tüketiminin boyutunun belirlenmesi, elektrik sistemlerinin geliştirilmesi, modellenmesi ve analizi ile ilgili literatürde sınırlı sayıda enerji yönetimi ve optimizasyonu çalışması bulunmaktadır. Hastaneler ve sağlık tesislerinde iklimlendirme ve aydınlatma ekipmanlarının enerji ihtiyaçlarının belirlenmesi, enerji tedariki sorunu, yüksek enerji gereksinimleri ve tıbbi ekipmanlarla ilişkili temel yükler

nedeniyle enerji güvenliğinin sağlanması için enerji yönetimi ve optimizasyonu çalışmaları bu konuda yol gösterici bir rol almaktadır.

Hastane tipi bir mikro şebekeye kurulacak bir kojenerasyon (CHP) tesisinin boyutlandırılması için Costa ve Fichera (2014) optimal enerji yönetimi çalışması yapmışlardır. Önerilen optimizasyon yöntemi, yıllık operasyonel stratejiyi belirlemek için hastanenin termal ve elektrik güç tüketimi açısından bir dizi deneysel girdi verisi kullanan ve iki yönlü bir hedefe ulaşabilen KTDP modeline dayanmaktadır. Çalışmada 300 yataklı bir hastane mikro şebekesinin işletme maliyetlerinin en aza indirilmesi ve kurulacak olan CHP tesisinin optimum boyutlandırılması amaçlanmaktadır. Yapılan tasarım ve çizelgeleme optimizasyonu sonucunda hastanenin mevcut enerji konfigürasyonuna göre %20'ye kadar enerji performansında önemli bir artış ve kayda değer bir maliyet tasarrufu sağlanmıştır. Başka bir hastane enerji yönetimi çalışmasında, Christiansen ve diğ. (2015) modern hastanelerde ve hastane laboratuvarlarında çalıştırılan tıbbi ekipmanın elektrik enerjisi talebinin daha doğru bir şekilde değerlendirilmesi için hastanenin iki ana laboratuvarında bulunan toplam 10000 tıbbi ekipmanın yaklaşık 33500 saatlik elektrik tüketim verileri kullanılarak haftalık elektrik tüketim taleplerinin modeli oluşturulmuştur. Yapılan yük tahmin çalışmasının sonucunda binanın kümülatif yük tahminleri %6'lık bir hata payıyla doğrulanmıştır. Bu çalışmaya benzer diğer bir çalışmada, Christiansen ve diğ. (2016) Hamburg Tıp Merkezi'nde bulunan farklı departmanların ve büyük ölçekli tıbbi ekipmanların elektrik enerjisi tüketimi ve kullanım süreleri tahminlerinin yapılması için toplamda yaklaşık 20000 saatlik ölçüm yapmışlardır. Elde edilen verilerin analizi sonucunda, yoğun bakım ünitelerinin günün her saatinde çalıştığı, ameliyathanelerin sabit ve belirli bir çalışma düzenleri olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmalardan farklı olarak, Bagnasco ve diğ. (2017) İtalya'da özel bir şirkete bağlı olan ve farklı lokasyonlarda bulunan sağlık tesislerinin enerji tüketiminin gerçek zamanlı izlenmesi amacıyla bir enerji yönetimi uygulaması yapmışlardır. Birbirlerinden farklı kapsitedeki sağlık tesislerinin enerji tüketim profillerinin izlenmesi ve aralarında ortak bir zeminde en iyi uygulamaların belirlenmesine yardımcı olmak için Anahtar Performans Göstergeleri (KPI) önermişlerdir. Çalışmada 3 sağlık tesisinin bulunduğu bir örnek olayda tesislerin toplam enerji tüketimi izlenerek enerji kaynaklarının kullanımı optimize edilmiştir. Sağlık tesislerinin elektrik enerjisi tüketimi 3 yıl içinde oranında %27 oranında azaltılarak işletme maliyetleri düşürülmüştür.

Ana şebekeden bağımsız bir hastanenin tıbbi ve elektronik cihazların elektrik tüketimleri göz önünde bulundurularak yapılan bir optimizasyon çalışmasında, Dufo-Lopez ve diğ. (2016), yük taleplerinin karşılanması ve maliyetlerin düşürülmesi amacıyla stokastik programlama tabanlı Monte Carlo simülasyonu önermişlerdir. Enerji kaynağı olarak dizel jeneratör, PV ve batarya sistemlerinin kullanıldığı optimizasyonun sonucunda enerji maliyetleri %28 ve dizel jeneratörlerde kullanılan yakıtlarda %54 azalma sağlanabileceği gösterilmiştir. Benzer bir çalışmada ise Bosisio ve diğ. (2019) Uganda'daki Lacor Hastane'sinin kritik yük talebinin karşılanması için mikro şebeke tasarım ve çizelgeleme optimizasyonu çalışması yapmışlardır. Ana şebekeye bağlı hastanenin enerji güvenliği ve sürdürülebilirliğinin sağlanması amacıyla ana şebeye bağlı ve bağımsız olarak iki yönlü Monte Carlo simülasyonu önermişlerdir. Tasarlanan mikro şebekede enerji kaynağı olarak dizel jeneratörler, PV ve batarya sistemlerinin kullanılmıştır. Hastanenin yük talepleri, elektrik kesintileri ve PV üretiminin belirsizliği dikkate alınarak yapılan optimizasyon sonucunda iki yönlü simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve optimal boyutlar belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada, elektrik enerjisi maliyeti ve tedarik güvenilirliği açısından önerilen optimizasyonun etkinliğinin yüksek olduğu belirtilmiştir.

Ana şebekeye bağlı bir mikro şebekenin tasarımının, performans analizinin ve enerji optimizasyonun yapıldığı bir çalışmada, Çetinbaş ve diğ. (2019) Eskişehir Osmangazi Üniversitesi kampüsünde bulunan hastane birimlerinin yük talebinin karşılanması için HOMER yazılımını kullanarak bir simülasyon çalışması yapmışlardır. Mikro şebekenin tasarımında, kampüsün güneş enerjisi potansiyeli ve hastanenin bir yıllık bir süre içinde toplanan gerçek elektrik tüketimi verileri kullanılarak oluşturulan modelde dizel jeneratörler, PV modüller ve batarya depolama sistemi kullanılmıştır. Optimizasyon sonucunda oluşturulan senaryolarda, mikro şebekenin 25 yıllık hizmet süresi boyunca gerçekçi çalışması göz önünde bulundurulmuş ve talebin karşılanması için optimum boyutlandırmalar yapılmıştır. En kötü senaryo altında genel olarak maliyetlerde artış gözlemlenmiştir. Fakat talep edilen enerjinin doğrudan yenilenebilir kaynaklardan sağlandığı takdirde %33,30'a varan genel maliyet azalması gözlemlenmiştir. Diğer yandan Dangond ve diğ. (2020); sağlık tesislerinde YEK entegrasyonun sağlanması ve optimum boyutlarının belirlenmesi amacıyla HOMER yazılımını kullanarak stokastik bir yaklaşım önermişlerdir. Oluşturulan optimizasyon sonucunda enerji talebi ve enerji verimliliği senaryosu altında sağlık tesisinin enerji

yönetimi, boyutlandırma ve işletim stratejisiyle ilgili problemlerin çözüldüğünü belirtmişlerdir.

Diğer çalışmalardan farklı olarak; V ve diğ. (2020) ana şebekeye bağımlılığın azaltılması ve yük taleplerinin karşılanması amacıyla çoklu enerji üretim sistemlerini barındıran kritik sağlık hizmetleri, eğitim ve endüstriyel tesisler için optimizasyon çalışması yapmışlardır. Yapılan optimizasyon çalışmasında mikro şebeke konfigürasyonunda dağıtım sistemi ile entegre edilmiş bir batarya ünitesi, PV sistemi, biyokütle ve dizel jeneratör için en uygun boyutları tekno-ekonomik kapsamında bulunması amaçlanmaktadır. Çalışmada, fosil yakıtların spesifik yakıt tüketimini ve karbon ayak izini en aza indirerek işletme maliyetlerini en aza indirmek için KTDP modeli geliştirmişlerdir. Ayrıca oluşturulan modelde yük tahminine dayalı olarak kapsamlı bir üretim genişletme planlaması eklenmiştir ve önerilen modelin uygulanabilirliğini tespit etmek için seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) ve net bugünkü değer (NPV-Net Present Value) değerlendirilerek mikro şebekelerin ayrıntılı bir ekonomik analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre KTDP modelinin problemin çözümünde sağlamlığı kanıtlanmış, mikro şebekenin planlanması ve tekno-ekonomik işletilmesi için faydalı olduğu bulunmuştur.

Hastaneler ve sağlık birimlerinin enerji yönetimi ve optimizasyonu için yapılan bir çalışmada; Seçkiner ve Koç (2020) kapsamlı ve sistematik bir literatür taraması yapmışlardır. Çalışmada öncelikli 176 yakın çalışma sistematik bir şekilde incelenerek, kullanılan enerji üretim kaynağı ve uygulanan modeller dahil birçok konu altında sınıflandırılmıştır. Çalışmanın sonucunda enerji maliyetlerinin ve atık enerjinin minimize edilmesi problemlerinin en fazla işlenen problemler olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bu problemlerin çözümü olarak en fazla kullanılan ve önerilen metodun KTDP olduğu belirtilmiştir.

Çizelge 3.4'te hastaneler, sağlık tesisleri gibi kritik tesislerin enerji yönetimi ve optimizasyonunun yapıldığı çalışmalara yer verilmiştir. Çizelgenin problem tipi bölümünde yer alan Ç çizelgeleme, Y yatırım, D tasarım optimizasyon problemleri için kullanılan kısaltmalardır.

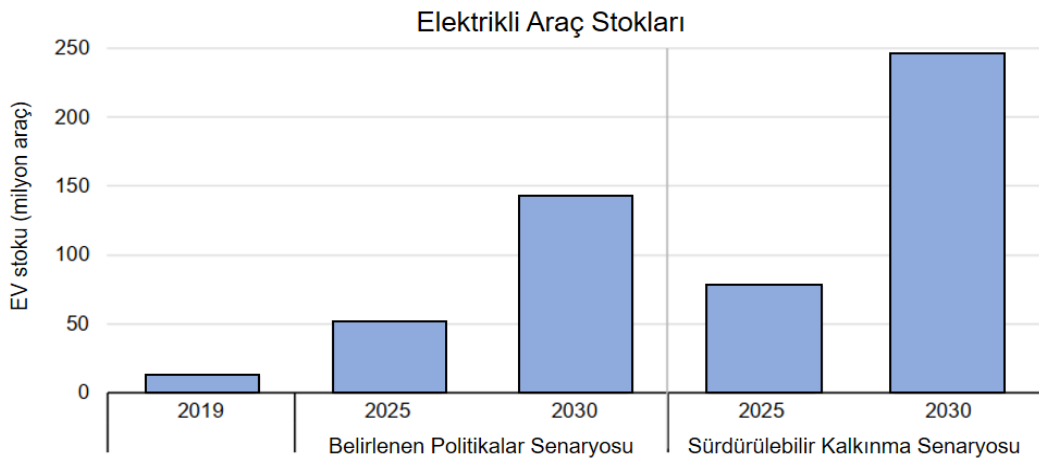
Çizelge 3.4 : Hastanelerde enerji yönetimi ve optimizasyonu çalışmaları

Yazar	Yöntem	Problem Tipi			Yıl	Depolama Ünitesi			Enerji Kaynağı					
		Ç	Y	D		B	T	D	G	R	J	C	Ş	D
Akbari ve diğ.	KTDP			X	2014		X		X			X	X	X
Costa ve Fichera	KTDP	X		X	2014		X					X	X	
Cristiansen ve diğ.	Yük Tahmin Metodu	X			2015								X	
Cristiansen ve diğ.	Yük Tahmin Metodu	X			2016								X	
Dufo-Lopez ve diğ.	Stokastik Programlama	X			2016	X			X		X			
Isa ve diğ.	HOMER	X		X	2016	X			X			X	X	X
Morgenstern ve diğ.	Kıyaslamalı Enerji Yönetimi	X			2016								X	
Bagnasco ve diğ.	KPI	X			2017								X	
Howard ve Modi	KTDP	X		X	2017		X				X	X	X	X
Sigarchian ve diğ.	Parçacık Sürü Optimizasyonu			X	2018	X	X		X	X				X
Alotaibi ve diğ.	HOMER	X	X		2019	X			X		X			X
Bosisio ve diğ.	Stokastik Programlama			X	2019	X			X				X	
Çetinbaş ve diğ.	HOMER	X		X	2019	X			X		X		X	
Ilunga ve diğ.	KTDP		X	X	2019	X			X				X	
Güven	DP	X			2019	X			X				X	
Dangond ve diğ.	Hibrit Sezisel Algoritma			X	2020	X			X		X		X	
Lagrange ve diğ.	KTDP	X		X	2020	X			X		X		X	
V ve diğ.	KTDP	X		X	2020	X			X		X		X	
Depolama; B: Batarya, T: Termal, D:Diğer														
Enerji Kaynağı; G: Güneş, R: Rüzgâr, J: Dizel Jeneratör C:CHP Ş:Ana Şebeke, D:Diğer														

3.3 Elektrikli Araçlarda Batarya Sistemleri

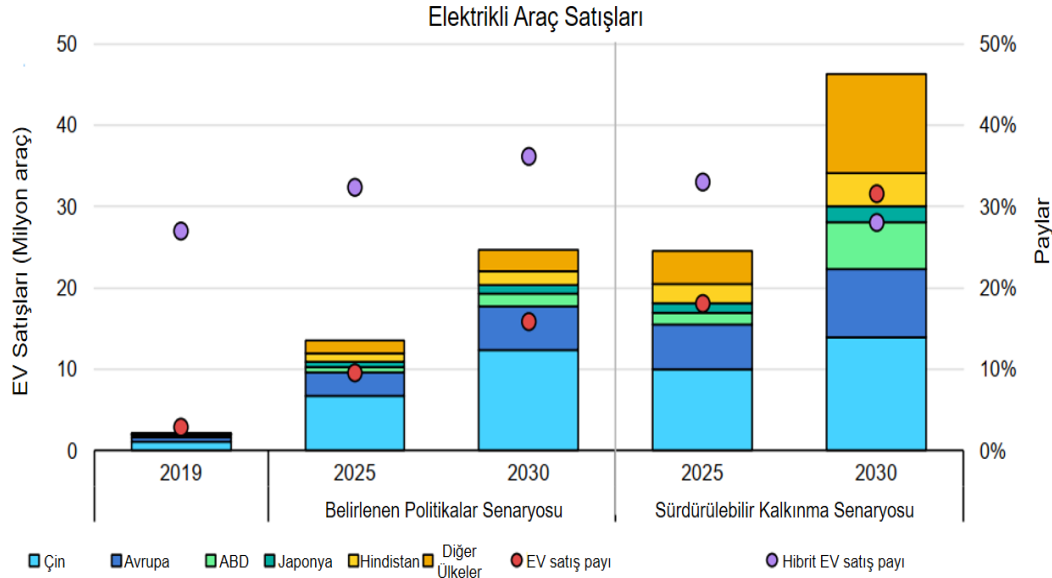
Dünyada fosil yakıtların tükenmesi ve arz güvenliği ile ilgili endişeler gün geçtikçe şiddetli olmaya devam etmekte ve sera gazı emisyonlarından kaynaklanan iklim değişikliğinin sonuçlarıyla karşı karşıya kalınmaktadır. Bu nedenle dünya genelinde ülkeler giderek geleneksel karayolu taşımacılığı teknolojilerine alternatifler aramaktadır. Bataryalı elektrikli araçlar, hafif hizmet araç filosunun karbonsuzlaştırılmasına ve petrolden bağımsız olmasına yol açabilecek ümit verici bir teknoloji olarak görülmektedir (Andwari ve diğ, 2017). Dünyanın dört bir yanındaki hükümetlerin uygulamaya koyduğu politika ve düzenlemelerin yanı sıra, açıklanan hedeflerin ve planlar doğrultusunda elektrikli araçların pazar payının artırılması hedeflenmektedir.

IEA Global EV Outlook (2020) raporuna göre elektrikli araçlar için sürdürülebilir kalkınma senaryosunda, 2030 yılına kadar tüm modlarda EV'ler için %30'luk küresel pazar payının oluşacağı belirtilmiştir. Belirlenen politikalar senaryosunda ise küresel elektrikli araç stoğu (iki/üç tekerlekli araçlar hariç), 2019'da yaklaşık 8 milyondan 2025'e kadar 50 milyona ve ardından 2030'a kadar 140 milyon araca çıkarak yıllık ortalama %30'a yakın bir büyüme oranına karşılık gelmesi tahmin edilmektedir. Diğer yandan evrensel enerji erişiminin sağlandığı, sera gazı emisyonlarında keskin düşüşler sağlandığı ve küresel iklim hedeflerinin sağlandığı sürdürülebilir kalkınma senaryosunda ise 2030 yılına gelindiğinde 250 milyon araç stoğu bulunacağı tahmin edilmektedir. Böylece EV'lerin satış payları da artarak küresel araç filosunda büyük bir yer edinmesi beklenmektedir. Şekil 3.1'de IEA Global EV Outlook (2020) senaryolarına göre küresel elektrikli araç stoklarının artışı görülmektedir.



Şekil 3.1 : Senaryolara göre küresel EV stoğu, 2019, 2025 ve 2030, IEA Global EV Outlook (2020)'dan uyarlanmıştır.

Elektrikli araçların küresel görünümü senaryolarında, dünya çapında EV stoklarının artışı ile birlikte satış miktarının arttığı görülmektedir. Elektrikli araç satışları 2025'te yaklaşık 14 milyon ve 2030'da ise 25 milyon araca ulaşarak tüm karayolu taşıt satışlarının yıllara göre sırasıyla %10 ve %16'sını temsil etmektedir. Şekil 3.2'de senaryolara göre elektrikli ve hibrit araçların satış miktarları ve payları, EV pazarının gelişmekte olduğu ülkeler çerçevesinde gösterilmektedir.



Şekil 3.2 : Senaryolara göre küresel EV satışları, 2019, 2025 ve 2030, IEA Global EV Outlook (2020)'dan uyarlanmıştır.

Sürdürülebilir kalkınma senaryoları kapsamında EV'lerin sayısının artmasındaki en önemli etkenlerden biri batarya sistemleridir. Bu nedenle EV batarya teknolojilerinin hazırlık düzeyleri ve maliyet boyutları büyük önem taşımaktadır. Diğer yandan satılan tüm elektrikli hafif hizmet araçlarındaki (Elektrikli ve hibrit araçlar dahil) ortalama batarya kapasitesi de büyümektedir. IEA Global EV Outlook (2020) raporuna göre 2018 yılında batarya kapasiteleri 37 kWh'ten 44 kWh'a çıkmıştır ve günümüze yaklaştıkça araç markalarına ve modellerine göre kapasiteler değişiklik gösterse de çoğu ülkede EV batarya kapasitelerinin 50-70 kWh aralığında olduğu belirtilmiştir.

3.3.1 EV bataryalarının özellikleri

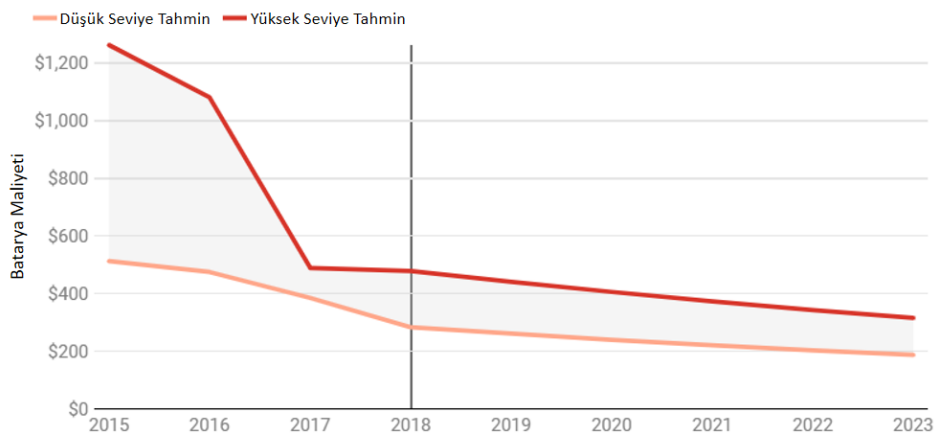
Elektrikli ve hibrit araçlarda en fazla kullanılan batarya sistemleri ise Lityum-iyon bataryalardır. Mevcut yüksek yoğunluklu EV batarya hücreleri, kilogram başına 240-300 Watt-saat (Wh/kg) aralığında enerji yoğunluklarına sahip olabilmektedir. Diğer yandan Li-iyon bataryalar: (i) yüksek enerji yoğunluğu, (ii) düşük oranda kendi kendine deşarj olma, (iii) az oranda bakım ihtiyacı, (iv) mevcut çeşitli şekiller,

kimyalar ve performanslarda üretilebilirliği gibi sağladığı avantajlardan dolayı EV araçlarda en fazla kullanılan batarya sistemleridir (Gandoman ve diğ, 2019).

IEA Global EV Outlook (2020) raporuna göre önümüzdeki on yıl boyunca, Li-iyon bataryaların EV pazarında üç nedenden dolayı hakim olması beklenmektedir. Bu nedenler aşağıdaki maddelerde anlatılmaktadır (Lee ve diğ, 2020);

- Li-iyon batarya teknolojisi sağlam bir şekilde oluşturulmuştur. Büyük ölçekli üretiminde önemli bir deneyim ve uzun vadeli dayanıklılık özelliklerine ilişkin sağlam bir anlayış bulunmaktadır.
- Bugüne kadar Li-iyon üretim ve tedarik zincirlerine yapılan büyük yatırımlar, alternatif batarya teknolojilerine giriş için bir engel oluşturmaktadır.
- Alternatif batarya teknolojileri hala bir dizi düşük teknolojik hazırlık seviyelerindedir. Ayrıca hiçbir ticari araç uygulamalarında ve gerçek yaşam koşullarında henüz kullanılmamıştır.

Li-iyon bataryaların genel olarak küresel batarya pazarına hakim olabilmesindeki en önemli etkenlerden biri ise maliyetlerdir. Batarya sistemlerinin teknolojik seviyesi yükseldikçe batarya maliyetleri düşme eğilimindedir. Li-iyon batarya sistemlerinin maliyetleri düştükçe EV'ler dâhil tüm enerji uygulamalarında kullanımı giderek artması beklenmektedir (Url-17). Şekil 3.3'te yıllara göre Li-iyon bataryaların kWh başına seviyelendirilmiş enerji maliyetlerinin grafiği gösterilmektedir. Şekil 3.3 incelendiğinde Li-iyon bataryaların maliyetlerinde gittikçe büyük ölçüde azalma olduğu ve gelecek yıllarda da maliyetlerdeki azalmanın devam ettiği görülmektedir.



Şekil 3.3 : Li-iyon bataryaların kWh başına maliyetleri, Url-17'den uyarlanmıştır.

Li-iyon bataryalar son yıllarda enerji yoğunluğu, çevrim ömrü ve batarya maliyetleri konusunda büyük bir gelişme kaydetmiş olsa da sürdürülebilir kalkınma senaryolarının gerçekleşebilmesi için batarya yaşam döngüsü (battery life-cycle) aşamalarındaki iyileştirme çalışmalarının devam etmesi gerekmektedir. Bu iyileştirme çalışmaları şu şekilde sıralanabilir:

- Batarya çevrim ömürlerinin ve enerji yoğunluklarının artırılması,
- Batarya üretimi için geri dönüşümü kolay, düşük maliyetli ve düşük karbon ayak izli hammaddelerin kullanılması,
- Ömrünü tamamlamış EV bataryalarının yeniden üretimi, yeniden kullanımı ve geri dönüşüm süreçlerinin yönetimi ile ekonomik katkı sağlanması,
- Batarya sistemlerinin güvenliğinin sağlanması için batarya yönetim sistemlerinin geliştirilmesidir.

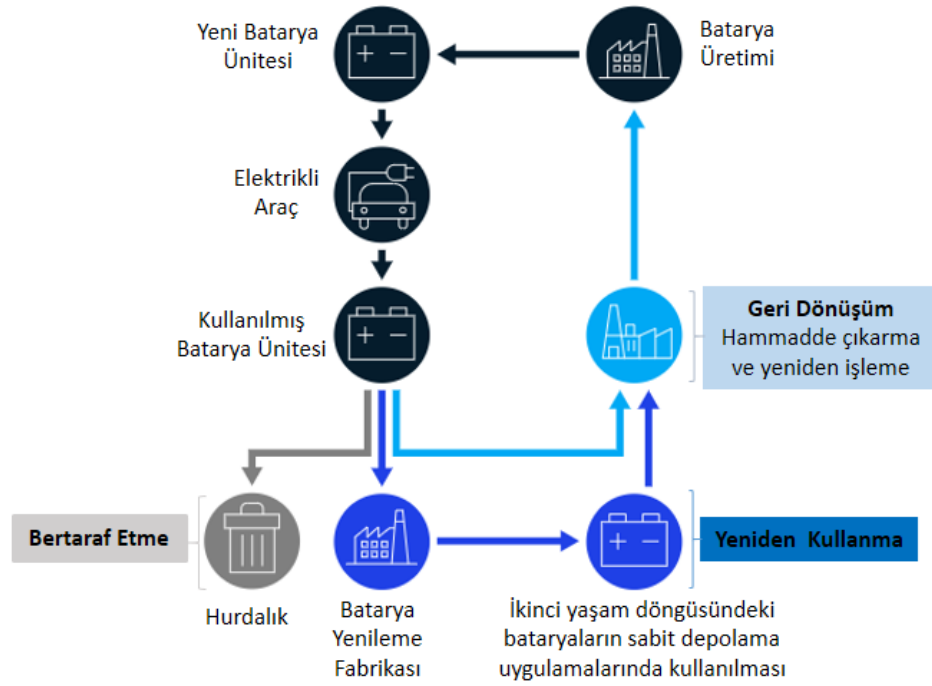
Bir bataryanın nominal kapasitesinin belirli bir payını kaybetmeden önce geçirebileceği bir dizi şarj ve deşarj döngüsü bulunmaktadır. Tipik olarak, Li-iyon pillerin 500-1000 şarj döngüsünden sonra nominal kapasitelerinin yaklaşık %80'ini koruması beklenmektedir (Harlow ve diğ, 2019). Diğer yandan batarya çevrim ömürlerinin artırılması ve enerji yoğunluklarının artırılması batarya hücrelerinde kullanılan materyaller ve batarya kimyası büyük önem taşımaktadır. Bu konuda en umut verici kısa vadedeki kimyasal çalışma ise lityum-metal katı hal (lithium-metal solid-state) batarya hücreleri olarak gösterilmektedir (Lee ve diğ, 2019).

Li-iyon batarya hücrelerinin kimyası üzerinde yapılan bir çalışmada Harlow ve diğ. (2019), lityum-metal-katı halde bulunan Nikel-Manganez-Kobalt (NMC532/grafit) hücreleri geliştirmişlerdir. Batarya hücrelerinde kullanılan elektrot bileşimleri, elektrot yüklemeleri, elektrolit bileşimleri ve kullanılan katkı maddeleri dahil olmak üzere batarya hücreleri 3 yıllık çeşitli testler yapmışlardır. Testlerin sonucunda batarya sisteminin 20 °C'de tutulduğu koşullarda; EV'lerde kullanılacak batarya sistemi için 10 yıllık çevrim ömründe bataryaların %70 kapasitesini koruduklarını belirterek, 3700 şarj döngüsü ve 1200000 km sürüş mesafesi öngördüklerini belirtmişlerdir.

3.3.2 EV bataryaların yaşam döngüleri

EV'lerde kullanılan batarya sistemlerinin belirli bir kullanım ömrü bulunmaktadır. EV bataryaları sıcaklık, şarj/deşarj düzeni, pasif kimyasal süreçler ve ortam koşulları

nedeniyle performanslarını zamanla kaybetmektedirler. EV bataryaları tipik olarak başlangıç kapasitelerinin %80'ini koruduklarında kullanım ömrünün sonuna ulaştığı varsayılmaktadır. EV bataryalarının ömrü, araç tüketicilerin sürüş modellerine ve tüketici tercihlerine göre değişiklik göstermekte, markaya ve modele bağlı olarak 8-15 yıl arasında olması beklenmektedir (Randall ve diğ, 2019). EV'lerde kullanılan ömrünü doldurmuş bataryalar, ikamesi az olan kritik maddelere sahip olmasından dolayı atık yönetimi stratejisinin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Atık batarya yönetimi sayesinde bataryaların kullanılabilir ömrünün uzatılması, ekonomik değerinin en üst düzeye çıkarılması ve kWh başına yaşam döngüsü etkisinin azaltılması sağlanabilmektedir (Engel ve diğ, 2019). Şekil 3.4'te batarya üretiminin geri dönüşüme kadar olan EV bataryaların yaşam döngüsü süreçleri şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.4 : EV bataryaların yaşam döngülerinin şematik gösterimi, Engel ve diğ. (2019)'dan uyarlanmıştır.

Kullanım ömrünü doldurmuş bataryaların Şekil 3.4'te görüldüğü üzere hurdaya ayrılarak bertaraf edilebilir, geri dönüşüm sürecine gönderilebilir veya yeniden kullanım seçenekleri değerlendirilebilir. Verimliliği düşmüş ikinci ömür (second-life) EV bataryaların geri dönüşüm süreçlerine bakıldığında teknik, çevresel ve maliyet

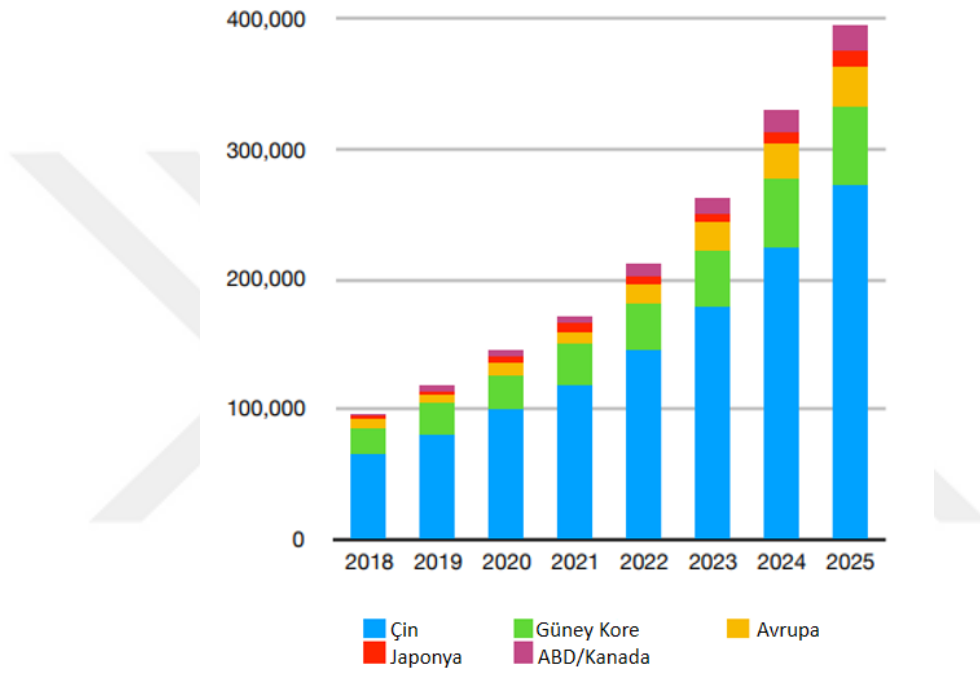
çerçevesi altında bir takım sınırlamalar bulunmaktadır. Elektrikli araçlarda kullanılan NiMH (Nikel-Metal-Hidrit) ve Li-iyon batarya sistemleri elektrolit ve katot maddeleri, plastik bileşenler, cam elyafı ve soğutma sistemleri gibi çeşitli materyaller içerdiği için geri dönüşüm süreci karmaşılaşmaktadır (API Energy, 2019). Bataryalarda kullanılan materyallerin geri dönüşümü için API Energy (2019) raporuna göre 4 ayrı süreç bulunmaktadır:

- Manuel süreçler: Geri dönüşüm fabrikalarına gelen çeşitli formatlarda ve kimyalardaki batarya sistemlerinin manuel ve elektrikli aletler kullanılarak sökülme işlemidir.
- Mekanik süreçler: Metalleri konsantre etmek, işlenmelerini kolaylaştırmak için elektroliti güvenli bir şekilde çıkarmak ve EV pil bileşenlerini parçalamak için mekanik işlemler kullanılmasıdır.
- Hidrometalurjik süreçler: Mekanik ayırmadan elde edilen metal çıktıları (katot metalleri) ayırmak için yapılan bir dizi elektroliz ve kimsayal süreçlerdir.
- Pirometalurjik süreçler: Metalleri dönüştürmek, ayırmak ve saflaştırmak için yüksek sıcaklıklar kullanılması işlemleridir.

Batarya geri dönüşüm teknolojileri gelişmekte olmasına rağmen geleneksel Li-iyon bataryaların geri dönüşüm sürecinde malzemelerin yaklaşık %40'ı bertaraf edilmektedir. Dünya çapında 23 batarya geri dönüşüm firması bulunmakta ve batarya sistemlerinde kullanılan materyallerin sınırlı bir tedarik zinciri bulunmaktadır. Bu nedenlerden dolayı Li-iyon batarya sistemlerinin geri dönüştürme maliyetleri yüksektir (Mayyas ve diğ, 2019).

Batarya dönüştürme maliyetleri giderek düşme eğiliminde olmasına karşın bölgelere göre değişiklik gösterebilmektedir. Şekil 3.5'te ülkelerin batarya geri dönüştürme miktarları gösterilmektedir. Şekil 3.5 incelendiğinde Çin'in en fazla batarya geri dönüşümü yapan ülke olduğu görülmektedir. Bataryaların geri dönüşüm sürecinde gerekli hammaddeler, işlenmiş materyaller, elektrot maddeler, batarya hücreleri ve paketleri için tedarik zinciri Asya bölgelerinde yoğunlaşması ile geri dönüşüm maliyetleri bu bölgelerde düşme eğilimindedir (Melin, 2019). ABD'de bulunan Argonne National Laboratory tarafından yapılan çalışmaya göre Li-iyon bataryaların bertaraf etme (disposal) maliyeti ton başına 4000-5000 \$ olarak belirtilmiştir (Url-18). Diğer yandan Element Energy (2019) raporunda yapılan analiz çalışmasına göre geri

dönüşüm maliyetlerinin 1700-2000 \$/ton olduğu belirtilmiştir. Yapılan analize göre verimliliği düşmüş EV bataryaların yeniden kullanımı ile batarya maliyetleri kWh başına 62 \$ olduğu belirtilerek 2030 yılına gelindiğinde yaklaşık 40 \$/kWh olacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca analizde belirtilen senaryolar çerçevesinde bataryaların yüksek geri dönüşüm maliyetlerine karşı bataryaların tekrardan kullanılması önerilmektedir ve AB şirketleri için mecburi maliyet azaltma stratejisi olarak gösterilmektedir (Element Energy, 2019).



Şekil 3.5 : 2018-2025 dünyada Li-iyon pillerin geri dönüşüm miktarları (ton), Melin (2019)'dan uyarlanmıştır.

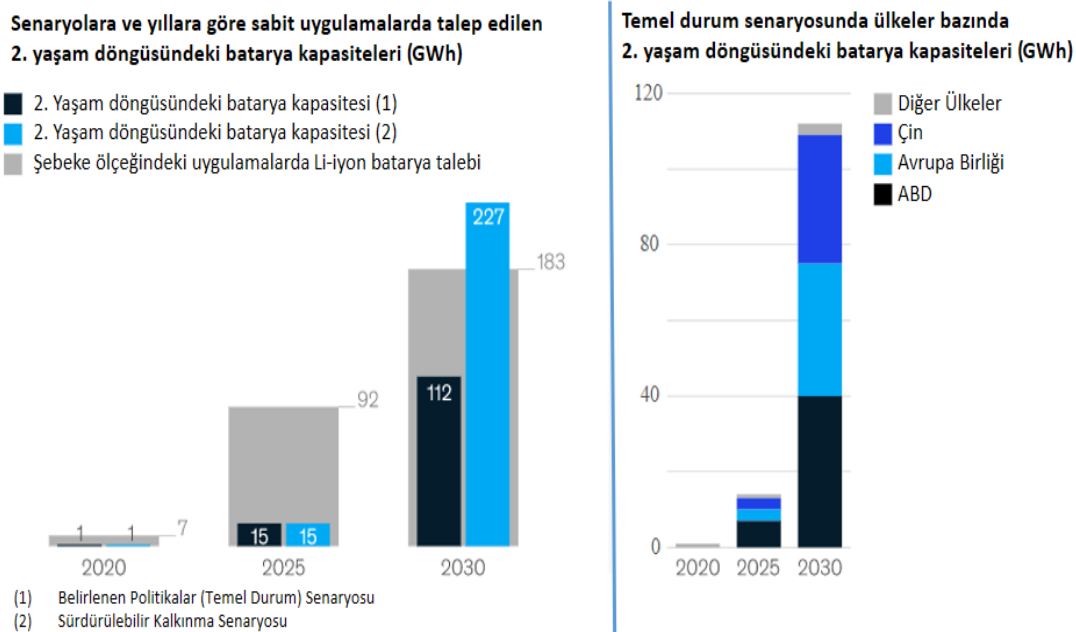
3.3.3 İkinci yaşam döngüsündeki EV bataryalarının kullanıldığı çalışmalar

Başlangıç kapasitelerinin %70-80'ini koruyan kullanımdan kaldırılmış EV bataryalarının yeniden kullanımı, daha az sıklıkta batarya döngüsü gerektiren sabit enerji depolama uygulamalarında yüksek oranda fayda sağlayabilmektedir. Verimliliği düşmüş EV bataryaların kullanıldığı uygulamaların döngü gereksinimine bağlı olarak aşağıda belirtilen maddelere göre fayda sağlamaktadırlar (Engel ve diğ, 2019):

- Daha pahalı ve daha az verimli varlıkların yerini alarak (örneğin, eski kombine çevrim gaz türbinleri) güç güvenilirliğini daha düşük maliyetle sürdürmek için yedek enerji kapasitesi sağlamak,

- Yenilenebilir enerji üretim sistemlerine entegre olarak aralıklı üretimi dengelemek,
- Kritik enerji talebinin olduğu durumlarda kullanılmak üzere yenilenebilir enerjiyi depolayarak güç-arbitraj fırsatlarından yararlanarak ana şebekeye karşı esneklik sağlamak.

İkinci yaşam döngüsündeki Li-iyon EV bataryaların sabit uygulamalarda kullanılmasının araştırıldığı Mckinsey&Company-Automotive&Assembly Insights (2019) raporuna göre; son yıllarda elektrikli araçların hızlı yükselişi ve önümüzdeki on yıl içinde sürdürülebilir kalkınma senaryolarında beklenen daha hızlı büyüme nedeniyle, sabit uygulamalar için ikinci yaşam döngüsündeki batarya kapasitesinin 2030 yılına kadar yılda 200 GWh'i aşabileceği belirtilmiştir (Engel ve diğ, 2019). Araştırma çalışmasına göre düşük ve yüksek döngülü uygulamalar için Li-iyon bataryaların şebeke ölçeğindeki depolama sistemlerine olan talebi Şekil 3.6'da gösterildiği üzere giderek artmaktadır. Ayrıca 2030 yılına kadar küresel değeri 30 milyar dolar olan bir pazarın oluşması beklenmektedir.



Şekil 3.6 : İkinci yaşam döngüsündeki Li-iyon bataryaların senaryolara göre batarya talepleri, Engel ve diğ. (2019)'dan uyarlanmıştır.

İkinci yaşam döngüsündeki EV bataryaların kullanımı ile ilgili kapsamlı bir literatür çalışması yapan Hossain ve diğ. (2019), batarya sistemlerinin mevcut durumu, üretim hususları, uygulamaları, engeller ve potansiyel çözümler, iş stratejileri ve politikalar

hakkında detaylı bilgi vermeyi amaçlamışlardır. Çalışmanın sonucunda ikinci yaşam döngüsündeki batarya sistemlerinin kullanılmasının ekonomik ve çevresel anlamda fayda sağladığını, elektrik şebekesi gibi sabit kullanımlarda önemli değerler yaratarak kullanılabilirdiği ve standart batarya modellemeye benzer süreçlerle modelleme yapılabileceğine değinmişlerdir. Diğer yandan Hua ve diğ. (2020) kullanımdan kaldırılmış EV Li-iyon pillerin sürdürülebilir olarak yeniden kullanımının araştırılması amacıyla literatür çalışması yapmışlardır. Çalışmalarında bataryaların atık olarak berteraf edilmesinin büyük israfa ve geri dönüşü olmayan çevresel zararlara neden olacağını vurgulamışlardır. Bataryaların değerli hammadelerinin geri kazanılması için yapılan geri dönüşüm sürecinde ise uygun maliyetli ve çevre dostu geri dönüşüm yaklaşımlarının zor olduğunu belirtmişlerdir. Kullanımdan kaldırılmış EV Li-iyon bataryaların tekrardan kullanılması, batarya sisteminin faydalı ömürlerini uzatabileceğini ve şebekeye bağlı depolama, konut hizmetleri ve yenilenebilir enerji gibi uygulamalarda hizmet verebileceğini belirtmişlerdir. En iyi ekonomik ve çevresel kârı elde etmek için yeniden kullanım uygulamalarının öncelikli olması gerektiğine değinmişlerdir.

Gelecekteki temel fırsatları ve tehditleri anlamak için makro çevre perspektifinden gelişmekte olan ikinci yaşam döngüsündeki batarya pazarının değerlendirildiği bir çalışmada; Reinhardt ve diğ. (2017) EV bataryaların kullanıldığı uygulamaların, iş stratejilerinin geliştirilmesi için bilimsel literatüre katkıda bulunmayı amaçlamışlardır. Çalışmalarında Çizelge 3.5'te görüldüğü üzere dünya çapında ikinci yaşam döngüsündeki bataryaların kullanıldığı pilot proje uygulamalarını incelemişlerdir.

Çizelge 3.5 : İkinci ömürlü bataryaların kullanıldığı örnek proje uygulamaları, Reinhardt ve diğ. (2017)'den uyarlanmıştır.

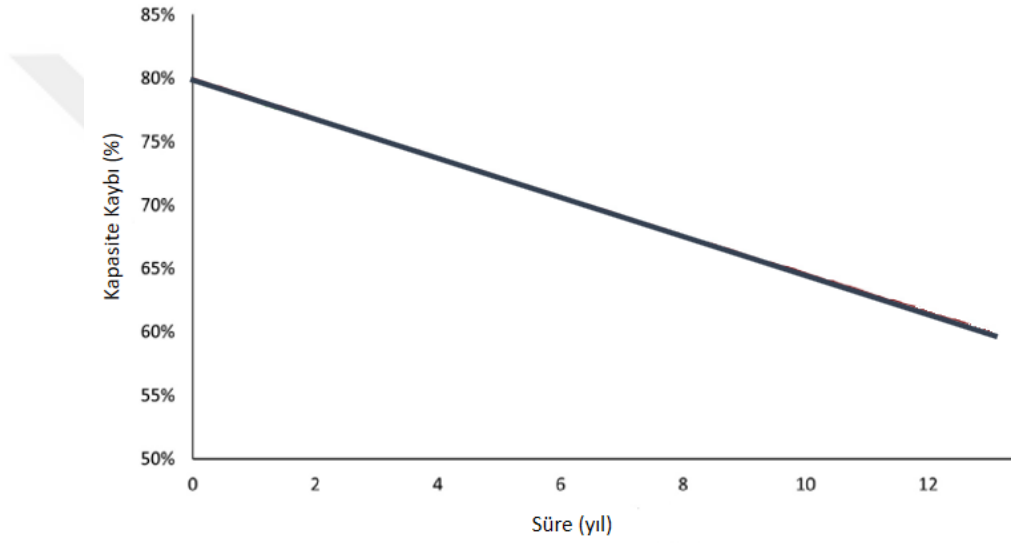
Ortak Girişimler	Açıklamalar	Konum
Daimler GETEC/ The Mobility House Remondis/ EnBW	Daimler marka EV bataryaların tekrardan kullanılması ile 13 MWh kapasiteli sabit enerji depolama sistemi kurulmuştur.	Luenen, Almanya
BMW/ PG&E	100 adet BMW i3 araç sahibinin katılımıyla, EV akıllı şarj ve şebeke verimliliğinin optimizasyonu için 18 aylık pilot proje yapılmıştır.	San Francisco, ABD
Nissan Sumitomo (4R Energy)/ Green Charge Networks	600-400 kWh sabit depolama sistemi için 16 adet Nissan Leaf Li-iyon batarya kullanılarak güneş santralinden gelen elektriğin regülasyonu sağlanmıştır.	Osaka, Japonya

Çizelge 3.5 (devam) : İkinci ömürlü bataryaların kullanıldığı örnek proje uygulamaları, Reinhardt ve diğ. (2017)'den uyarlanmıştır.

Ortak Girişimler	Açıklamalar	Konum
BMW/Vattenfall/ Bosch	Yapılan çalışmada 100 elektrikli arabadan 2.600 batarya modülü çıkarılmış, 2 MW güç çıkışı ve 2.8 MWh enerji kapasitesi sağlanmıştır.	Hamburg, Almanya
Renault/Connected Energy Ltd	E-STOR uygulaması ile elektrik şebekesinin aşırı yüklenmesini önleyen ve enerji arz ile talebi dengeleyen enerji depolama sistemi kurulması amaçlanmıştır.	İngiltere, Avrupa
Mitsubishi/ PSA EDF/ Forsee Power/ MMC	Kullanımdan kaldırılmış EV pillerinden çift yönlü batarya enerji tüketimi optimizasyonu çalışması yapılmıştır.	Paris, Fransa
General Motors/ ABB	General Motors ofis binası alanına güç sağlamak için 5 Chevrolet Volt Li-iyon batarya, 74 kW güneş paneli ve 2 kW rüzgâr türbini kullanılmıştır.	Michigan, ABD

Kullanım ömrünü tamamlamış EV bataryalarının sabit enerji depolama uygulamalarında kullanılmasının ekonomik ve çevresel faydalarının açıklanması için Cusenza ve diğ. (2019) ana şebekeye bağlı, PV ve batarya sisteminin kullanıldığı bir binanın vaka çalışmasını yapmışlardır. Batarya sistemi olarak yeni ve ikinci yaşam döngüsündeki batarya sistemleri kullanılarak ayrı ayrı analiz edilmiştir. Analiz sonucunda kullanılmış bataryaların konut binalarında sabit depolama sistemleri olarak yeniden kullanılmasının, ele alınan iki batarya sisteminin genel çevresel sürdürülebilirliğin artırabileceğini göstermektedir. Bu çalışmadan farklı olarak Kamath ve diğ. (2020) çalışmalarında, konut ve şebeke ölçeğindeki uygulamalarda ikinci ömür elektrikli araç bataryalarının maliyetlerini ve karbon ayak izlerini değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında; konutlar için enerji depolama sistemi , şebeke ölçeğinde PV sistemlerinin aralıklı üretiminin dengelenmesi (PV firming) ve şebeke ölçeğindeki uygulamalar için tepe tıraşlama (peak-shaving) uygulamaları olmak üzere 3 farklı uygulamanın yeni Li-iyon batarya sistemi ve ikinci yaşam döngüsündeki EV batarya sistemleri kullanılmasının karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda 41 farklı senaryo değerlendirilerek; yeni Li-iyon bataryalar yerine ikinci yaşam döngüsündeki bataryaların kullanılması ile 2024'te konut ve şebeke düzeyinde enerji depolama ihtiyaçlarının %19-26'sını potansiyel olarak karşılayabileceğini, ortalama maliyetlerin %11-15 ve ortalama karbon ayak izini %7-9 azaltabileceği gösterilmektedir.

İkinci yaşam döngüsündeki Li-iyon EV bataryaların, sabit enerji depolama sistemi olarak kullanıldığı fizibilite çalışmasında Rallo ve diğ. (2020) İspanya'daki maksimum güç talebi 80 kW olan bir fabrika ve 490 kW olan bir otel olmak üzere iki farklı vakada batarya yaşlandırmasını ekonomik bir perspektiften ele alarak, bir enerji depolama sistemi kurulumunun uygulanabilirliği üzerine yapılan analizlere odaklanmaktadır. Şekil 3.7'de gösterildiği üzere vaka çalışmalarına göre batarya yaşlandırma analizi yapmışlardır. Yapılan analize göre şarj-deşaj döngüsünün fazla olmadığı sabit depolama uygulamalarında kullanılan %80 verimlilikte olan EV bataryaları 12 yıla kadar kullanıldığı durumlarda %15- 20 kapasite kaybı yaşamaktadırlar.



Şekil 3.7 : EV bataryaların kapasite kaybı, Rallo ve diğ. (2020)'den

Batarya ömrü ve şarj/deşarj döngüleri göz önünde bulundurularak yeni Li-iyon ve 2. yaşam döngüsündeki batarya sistemlerinin tekno-ekonomik olarak karşılaştırılması amacıyla şebeke ölçeğinde PV sisteminin dahil edil edildiği bir vaka çalışmasında Mathews ve diğ. (2020) enerji depolama sistemlerinin ekonomik performanslarını değerlendirmişlerdir. Batarya sisteminin yalnızca PV panellerden şarj olacağı şartı ile modelleme yapmışlardır. Yapılan modelleme sonucunda %65-15 aralığında şarj durumu (SoC) limitlerine sahip bir sistemin proje ömrünü 16 yıldan fazla uzattıklarını göstermişlerdir. Yeni batarya sistemi ile karşılaştırıldığında 2. yaşam döngüsündeki bataryaların kullanıldığı sistemde %60 oranında daha uygun maliyet ve başa baş noktasına ulaşma sağlanmıştır.

Diğer çalışmalardan farklı olarak Falk ve diğ. (2020) ana şebekeden uzak, 150 kişinin yaşadığı Tanzanya'da bulunan kırsal bölgedeki hanelerin, okul, hastane ve yerel balıkçılık sektörünün talep ettiğı enerjinin sağlanması amacıyla PV ve 2. yaşam döngüsündeki bataryaların kullanıldığı hibrit sistem tasarlamışlardır. Tasarlanan sistem sayesinde 15 yıllık batarya ömrü varsayılarak sistemin 4. yılında amorti edeceğini göstermektedirler.



4. OPTİMİZASYON SİSTEM ÖNERİSİ

Bu bölümde tezin konusunu oluşturan entegre sistemin optimizasyon probleminin açıklaması yapılmakta ve problemin seçilmesindeki faktörler belirtilmektedir. Ardından problemin çözümü için önerilen yöntemin tanımı ve özellikleri anlatılmaktadır. Entegre sistemin optimizasyon probleminin çözülmesi amacıyla model geliştirilmiştir. Modelde optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu, karar değişkenleri, kısıtlar ve eşitliklerde kullanılan parametrelerin açıklamaları gösterilmektedir. Bölümün devamında ise modelde kullanılması amacıyla örnek bir vaka çalışmasının verileri ve gerekli varsayımları açıklanmaktadır.

4.1 Problem Tanımı

Enerji güvenliği ve güç kaynağının kalitesi, giderek artan elektrik talebiyle karşılaşılan temel konulardır. Enerji güvenliğinin sağlanması, kritik enerji talebinin karşılanması ve sera gazı emisyonlarının azaltılabilmesi konusunda mikro şebeke sistemleri büyük faydalar sağlamaktadır. Fosil yakıtların kıtlığı ve çevresel sorunlar nedeniyle yenilenebilir enerjiye olan ilgi giderek artmaktadır. Fakat YEK'in kesikli üretimi nedeniyle enerji depolama sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. İkinci yaşam döngüsündeki EV batarya depolama sistemi ile ekonomik ve çevresel olarak fayda sağlanabilmektedir.

Mikro şebekelere entegre edilen enerji depolama sistemleri, YEK'in kesikli üretimindeki varyasyonların etkilerini yumuşatarak ve kritik yüklerin sağlanması konusunda hibrit enerji sistemlerinde önemli bir rol oynayacak şekilde ayarlanabilmektedir (V ve diğ, 2020). Diğer yandan bina tipi, bina boyutu, iklimlendirme, şebeke elektriği ve enerji üretim sistemlerinden kaynaklanan mevcut sera gazı emisyonları bina ölçeğinde doğal gaz yakıtlı CHP sistemiyle azaltılabilmektedir (Howard ve Modi, 2017). Böylelikle yenilenebilir enerji, doğal gaz yakıtlı CHP ve enerji depolama sistemlerinin mikro şebekeye entegre edilmesi ile elektrik, ısıtma ve soğutma talebinin karşılanabileceği bir trijenerasyon sistemi oluşturabilmektedir. Fakat YEK'in kesikli üretimindeki belirsizlikler, kritik enerji taleplerinin (elektrik, ısıtma ve soğutma) karşılanması, enerji depolama sistemleri ve

mikro şebeke sistem bileşenlerinin koordineli şekilde çalıştırılabilmesi karmaşık bir problemdir. Bu problemin çözümü için optimize edilmiş bir modele ihtiyaç vardır.

Hastaneler halk sağlığı ve güvenliğinin sağlanması konusunda çok büyük öneme sahiptir. Hastaneler, elektrik kesintilerine neden olabilecek kötü hava koşulları, doğal afetler, fiziksel ve siber saldırılar ve basamaklı elektrik kesintisi gibi tehditlere karşı savunmasızdır. Hastaneler, aydınlatma, iletişim, ısıtma ve soğutma gibi elektrik hizmeti tarafından gerçekleştirilen olağan işlemlere ek olarak, diyaliz makineleri, yaşam destek sistemleri, acil durum ekipmanları, kalp monitörleri, oksijen dağıtım sistemleri, teşhis ekipmanları ve izleme sistemleri dahil olmak üzere tüm kritik işlevler için elektriğe ihtiyaç duymaktadır (Url-19). Bu kritik sistemlerde güç kaybı insan yaşamını tehdit edebilir. Bu nedenle hastanelerde güç kaybının yaşanması durumunda çok kötü sonuçlarla karşılaşılabilir.

Hastane elektriğinin kesilmesi durumunda birçok can kaybı meydana gelebilmektedir. Bu nedenle enerji güvenliğinin sağlanması hastaneler ve sağlık tesisleri için çok büyük öneme sahiptir. Hastaneler için enerji güvenliğinin ve arzının önemini gösteren birçok vaka bulunmaktadır. Uganda'da elektrik tedarikçisi tarafından haber verilmeden elektriğin kesilmesi nedeniyle Jinja'daki bir hastanede oksijen cihazını kullanan 150 bebek hayatını kaybetmiştir (Url-20). Başka bir vakada ise 2015'te ABD'de gerçekleşen Sandy Kasırgası sırasında, acil sağlık hizmetleri kuruluşlarının %16'sı dizel jeneratörlerin beklendiği gibi çalışmadığını bildirilmiştir ve gerçekleşen elektrik kesintisi nedeniyle New York eyaletinde bulunan 6 hastane tamamen kapanarak 6.400 hasta tahliye edilmiştir (Url-21). Diğer bir vakada ise 2012 yılında gerçekleşen Sandy Kasırgası'nda New York'un Bellevue Hastanesi güç yedekleme arızası nedeniyle tahliye edilmek zorunda kalırken, bazı şehir üniversitelerinin kendi mikro şebeke üretim sistemlerine sahip olduklarından çalışmaya devam ettiği belirtilmiştir (Url-22). 2001 yılında ABD'de gerçekleşen Allison Kasırgası Teksas'ta 22 hastanenin kapanmasına neden olmuştur. Bu olayın üzerine enerji güvenliğinin sağlanması amacıyla Texas Medical Center tarafından kurulan mikro şebeke, 2017'de gerçekleşen Harvey Kasırgası süresince sağlık merkezinin tamamen çalışır durumda kalmasına yardımcı olmuştur (Url-22). Küresel çapta elektrik kesintilerinin hastanelerdeki olumsuz etkilerinin belirtildiği birçok vaka bulunmaktadır. Bu olumsuz etkilerin ve vakaların gerçekleşmemesi için hastanelerdeki kritik hizmetlerin talep ettiği elektriğin temin edilmesi gerekmektedir.

Şebekede elektrik kesintisi durumunda hastanenin enerji güvenliğinin ve kritik enerjisinin sağlanması için yedek güç sistemi ve kesintisiz güç kaynağı (UPS- Uninterruptible Power Supply) gibi sistemlere ihtiyaç vardır. Elektrik kesilmesi durumunda geleneksel jeneratör sistemleri motorun çalışır duruma gelmesi için 5sn beklemektedir ve sürenin sonunda 3 sn boyunca marş devreye girerek jeneratörün aktif olarak çalışmasını sağlamaktadır (Daldal, 2019). Jeneratörler devreye girene kadar UPS tarafından sisteme güç verilmektedir. Bu nedenle enerji üretim ve depolama sistemlerinin koordinasyonlu bir şekilde çalışması kritik öneme sahiptir.

Çizelge 4.1’de şebekede elektrik kesintisi durumunda hastane hizmetlerinin sürekliliğinin sağlanması için kritiklik düzeyleri ve yedek güç sistemine geçiş süreleri gösterilmektedir. Çizelge 4.2’de ise hastanedeki tüm birimlerin elektrik kesilmesi durumunda kritiklik seviyelerine göre toleransları gösterilmektedir. Çizelge 4.2 incelendiğinde kritiklik düzeyi en yüksek olan hastane uygulamalarında yedek güce geçiş süresinin 0.5 saniyeden az olması gerekmektedir. Diğer yandan hastanelerde enerji güvenliği ve kalitesinin artırılması amacıyla yapılan kesintisizlik analizine göre ameliyathane, yoğun bakım ünitesi ve resüsitasyon birimleri, hastanede kesintisiz elektrik talebinin en fazla olduğu birimler olarak gösterilmektedir (İmal ve Kale, 2013).

Çizelge 4.1 : Hastanenin elektrik kesintisi durumunda kritiklik düzeyleri, Url-23’den uyarlanmıştır.

Kritiklik Düzeyi	Hizmet Sürekliliği	Elektrik kesintisi durumunda yedek güce geçiş süresi	Yedek güç kaynağının minimum dayanıklılık süresi
3	Daimi güç kaynağı	< 0.5 sn	3 saat
2	Kısa kesinti	<15 sn	24 saat
1	Uzun kesinti	< 3 dk	24 saat

Hastanelerde kritik uygulamaların kesintisiz olarak hizmetlerinin devam edilebilmesi için elektrik, ısıtma ve soğutma taleplerinin karşılandığı sağlam bir şekilde planlanmış ve modellenmiş trijenerasyon mikro şebeke sistemiyle kesintisiz ve düşük enerji maliyeti sağlanabilir. Şekil 4.1’de gösterilen hastane mikro şebekesine entegre edilen trijenerasyon sistem şeması gösterilmektedir. Şekilde gösterilen “E” sistemlerdeki elektrik akışını; “N” sistemlere gönderilen yakıtı; “H” sistemlerdeki ısı akışını; “S” ise soğutma talebi için gerekli olan soğuk havayı ifade etmektedir.

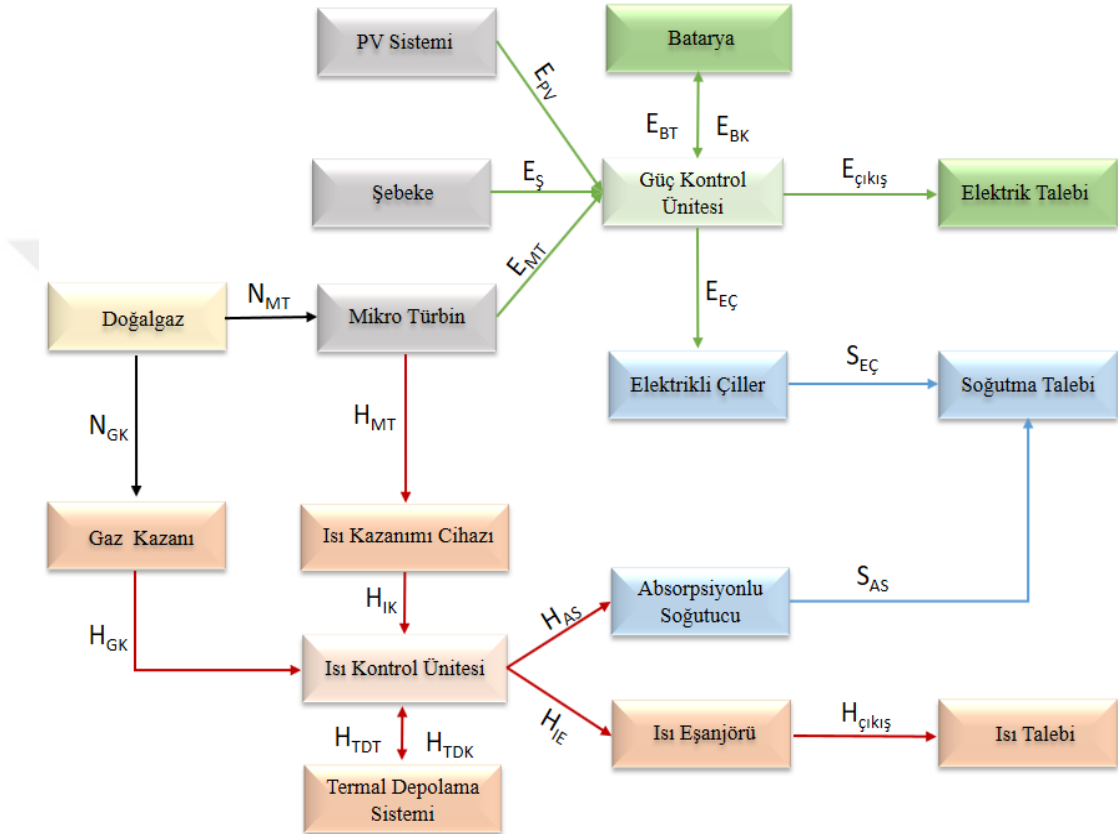
Çizelge 4.2 : Hastanelerdeki uygulamaların elektrik kesintisi durumundaki kritiklik düzeyleri, Url-23'den uyarlanmıştır.

Hastane Uygulamaları		Kritiklik Düzeyi		
		3	2	1
Teknik Ekipmanlar	Ameliyathane	X		
	Yoğun Bakım Ünitesi	X		
	Acil Servis (Resüsitasyon)	X		
	Doğumhane	X		
Hastaneye yatış	Özenli Bakım	X	X	
	Yoğun Bakım	X		
	Standart Bakım			
Medikal Görüntüleme	Bilgisayar ve görüntüleme ekipmanı	X	X	
Yönetim	Bilgi ve iletişim sistemleri ekipmanları	X	X	
Laboratuvarlar	Otomatik analiz ekipmanları	X	X	
	İlaç Saklama			X
Ekipman Odaları	Asansörler			X
	Hijyenik İklimlendirme			X
	Genel İklimlendirme			X
	Soğuk Oda			X
	Otomasyon Sistemleri	X		
Yangın Güvenliği	Algılama ve Duman Tahliye	X		

Entegre sistemde hastanenin elektrik talebinin karşılanması amacıyla şebeke, güneş panelleri, doğalgaz yakıtlı mikro türbin ve 2. yaşam döngüsündeki Li-iyon EV bataryalarından oluşan enerji depolama sistemi olmak üzere toplamda 4 adet enerji kaynağı bulunmaktadır. Diğer yandan enerji kaynaklarından gelen elektriğin kontrolü ve elektrikli çillerin çalışması için gerekli elektriği sağlayarak soğutma talebinin karşılanması amacıyla güç kontrol ünitesi bulunmaktadır.

Isı talebinin karşılanması için 3 adet termal enerji kaynağı bulunmaktadır: Mikro türbinden çıkan atık ısının, ısı kazanımı cihazı ile tekrardan kullanılması; doğalgaz yakıtlı gaz kazanı ve termal depolama sistemi. Termal enerji kaynaklarından gelen ısının ısı eşanjörüne gönderilerek ısı talebinin karşılanması, ısının absorpsiyonlu soğutucuya gönderilerek soğutma talebinin karşılanması ve termal depolama için gerekli olan ısının kontrolü amacıyla ısı kontrol ünitesi bulunmaktadır.

Hastane mikro şebekesi için geliştirilen model ile tüm hastanenin ve kesintisiz elektrik talebinin en fazla olduğu kritik bölümlerin elektrik, ısıtma ve soğutma talepleri için doğalgaz, şebekeden çekilen elektrik, batarya yaşlandırma, sosyal, işletme ve bakım maliyetleri değişkenleri kullanılarak ne kadar tasarruf veya kayıp yaşandığına dair saatlik bir plan oluşturulacaktır.



Şekil 4.1 : Modelde kullanılan trijenerasyon hastane mikro şebeke sisteminin şematik gösterimi

4.2 Yöntem

Hastane ve sağlık birimlerinde enerji yönetimi ve optimizasyon çalışmalarında en çok kullanılan yöntem KTDP metodudur (Seçkiner ve Koç, 2020). Şekil 4.1’de gösterilen entegre trijenerasyon hastane mikro şebeke sisteminin çizelgeleme optimizasyonunun modellenmesi amacıyla doğrusal programlama (DP) yöntemlerinden olan karma tamsayılı doğrusal programlama (KTDP) metodu önerilmektedir.

Doğrusal programlama metodu, bir veya daha fazla kısıtlamaya tabi olan doğrusal bir amaç işlevini en üst düzeye çıkaran veya en aza indiren matematiksel modellemelerden biridir. DP problemi, karar vericinin kullanabileceği uygun alternatifler kümesinden en iyi alternatifi seçerek optimum çözümü belirlemek için formüle edilmektedir. DP metodları birçok alanda karşılaşılan problemlerde kullanılabilen sayısal bir yöntemdir. DP metodunun çıktıları genellikle pozitif ve tamsayı olmayan değerlerden oluşmaktadır. Genel olarak karşılaşılan problemlerde makine, insan gibi unsurlar bölünemediği ve tamsayı değerler alması gerektiği için tamsayı doğrusal programlama metodları geliştirilmiştir (Özder, 2009). Modelin çözülmesinde önerilen karma tamsayı doğrusal programlama metodunun DP'den farkı ise değişkenlerden en az birinin yalnızca tamsayı değerleri alabileceği ek bir koşul eklenmesidir. KTDP metodunda karar değişkenleri kesirli değerler alabilmektedir.

DP metodlarının uygulanabilmesi için problemin tanımının yapılması ve varılmak istenilen en yüksek kâr ve en düşük maliyet gibi en iyi sonuçlar belirlenmelidir. Sonrasında ise gerekli veriler toplanarak problemin türüne bağlı olarak model kurulmalıdır. Genel olarak KTDP modelin kurulması için gerekli unsurlar aşağıda gösterilmektedir (Özder, 2009). Aşağıda gösterilen modelde gösterilen x_j ifadesi karar değişkenidir ve k adet kadar karar değişkeni bulunmaktadır. KTDP modelinde karar değişkenleri pozitif olmak koşulu ile bazı değişkenler kesirli olabileceği için x_i ifadesi kadar tamsayı olabileceği belirtilmiştir. Modeldeki kısıtların sayısı ise m ile gösterilmektedir. Amaç fonksiyonu ve kısıtlarda gösterilen c_j , a_{ij} ve b_i ifadeleri kesin olarak bilenen sabit parametreleri ifade etmektedir.

- Amaç Fonksiyonu: Ulaşılabilecek en iyi sonuç için optimize edilen matematiksel ifadedir.

$$\text{Min(Max)} Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

- Karar Değişkenleri: Kısıtları ve amaç fonksiyonunu oluşturan değişkenlerdir.
 $j=1,2,\dots,k$ $j > i$ olmak üzere; $x_j \geq 0$ ve x_i : tamsayı
- Parametreler: Karar değişkenlerinin değişim aralıklarının matematiksel olarak ifade edilmesidir.

- Kısıtlar: Karar değişkenlerinin elde bulunan sınırlı kaynakları nasıl kullanılacağını belirleyen unsurlardır.

$$i=1,2,\dots,m \quad \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq b_i$$

Doğrusal programlama metodlarında en iyi alternatifi seçilebilmesi ve programın çalışması amacıyla gerekli olan varsayımlar vardır. Bu varsayımlar aşağıdaki gibi sıralanmaktadır (Url-24):

- Orantılılık: Amaç fonksiyonunda tüm karar değişkenleri için ulaşılması istenen hedefe marjinal katkı oranının problemdeki tüm faaliyet seviyeleri boyunca sabit kaldığı varsayımı anlamına gelmektedir.
- Toplanabilirlik: Karar değişkenlerinin birlikte eklendiği veya çıkarıldığı, asla birbiriyle çarpılmadığı veya bölünmediği anlamına gelmektedir. Toplanabilirlik, amaç fonksiyonundaki değişkenlerin amaca katkısının, bireysel ağırlıklı katkılarının toplamı olarak kabul edildiğini ifade etmektedir.
- Süreklilik-Bölünebilirlik: Karar değişkenlerinin tamsayı ve kesirli değerleri ile birlikte bir çıktı kombinasyonunda kullanılabileceği anlamına gelmektedir.
- Kesinlik: Amaç fonksiyonu katsayılarının parametreleri ve kısıtlama eşitsizliklerinin katsayıları kesin olarak bilinmektedir. Böylelikle deterministik bir yaklaşım sunulduğu için kısa vadedeki problemlerdeki belirsizlikler minimum seviyededir.
- Sonlu Seçimler: Karar vericinin belirli seçeneklere sahip olduğu ve karar değişkenlerinin negatif olmayan değerler aldığı anlamına gelmektedir.

4.3 Model

Hastanenin elektrik, ısıtma ve soğutma taleplerinin karşılandığı trijenerasyon mikro şebekesinin çizelgeleme optimizasyonu için KTDP metodu kullanılmıştır. Hastanenin elektrik, ısıtma ve soğutma taleplerinin karşılanması amacıyla Şekil 4.1’de gösterildiği gibi enerji üretim ve depolama sistemlerinden çıkan ve kontrol sistemleriyle

yönlendirilen enerji akışları için karar değişkenleri tanımlanmıştır. Çizelge 4.3'te karar değişkenlerinin açıklamaları gösterilmektedir. Çizelgede gösterilen karar değişkenleri zamana bağlı olarak değişkenlik gösterebildiği için t zamanında yönlendirilen elektrik, ısı, şarj ve deşarj ifadeleri olarak belirtilmektedir.

Çizelge 4.3 : Karar değişkenleri ve açıklamaları

Karar Değişkeni	Açıklama
$E_{S,B}^t$	Bataryayı şarj etmek için şebekeden alınan elektrik
$E_{S,T}^t$	Talebi karşılamak için şebekeden alınan elektrik
$E_{S,EC}^t$	Elektrikli çiller için şebekeden alınan elektrik
$E_{PV,B}^t$	Bataryayı şarj etmek için PV sisteminden alınan elektrik
$E_{PV,T}^t$	Talebi karşılamak için PV sisteminden alınan elektrik
$E_{PV,EC}^t$	Elektrikli çiller için PV sisteminden alınan elektrik
$E_{MT,B}^t$	Bataryayı şarj etmek için mikro türbinden alınan elektrik
$E_{MT,T}^t$	Talebi karşılamak için mikro türbinden alınan elektrik
$E_{MT,EC}^t$	Elektrikli çiller için mikro türbinden alınan elektrik
$H_{IK,AS}^t$	Absorpsiyonlu soğutucu için ısı kazanım cihazından alınan ısı
$H_{IK,IE}^t$	Isı eşanjörü için ısı kazanım cihazından alınan ısı
$H_{IK,TD}^t$	Termal depolama sisteminde depolanması için ısı kazanım cihazından alınan ısı
$H_{GK,AS}^t$	Absorpsiyonlu soğutucu için gaz kazanından alınan ısı
$H_{GK,IE}^t$	Isı eşanjörü için gaz kazanından alınan ısı
$H_{GK,TD}^t$	Termal depolama sisteminde depolanması için gaz kazanından alınan ısı
$E_{DSR,T}^t$	Talebi karşılamak için bataryadan çekilen elektrik
$E_{DSR,EC}^t$	Elektrikli çiller için bataryadan çekilen elektrik
$H_{DSR,AS}^t$	Absorpsiyonlu soğutucu için termal depolama sisteminden çekilen ısı
$H_{DSR,IE}^t$	Isı eşanjörü için termal depolama sisteminden çekilen ısı
$U_{SR,B}^t$	Batarya şarj değişkeni
$U_{DSR,B}^t$	Batarya deşarj değişkeni
$U_{SR,TD}^t$	Termal depolama şarj değişkeni
$U_{DSR,TD}^t$	Termal depolama deşarj değişkeni

Oluşturulan model ile hastanenin faaliyetlerini sürdürmesi ve kesintisiz elektrik talebinin en fazla olduğu ameliyathane, yoğun bakım üniteleri ve resüsitasyon birimlerinin elektrik, ısıtma ve soğutma taleplerinin karşılanması için minimum 1 saat enerji alınması sağlanmaktadır. Çizelge 4.4'te ise modelde kullanılan eşitlikler ve kısıtlarda kullanılan parametrelerin açıklamaları bulunmaktadır.

Çizelge 4.4 : Parametreler ve açıklamaları

Parametre	Açıklama	Parametre	Açıklama
$COP_{E\check{C}}$	Elektrikli çillerin performans katsayısı (4)	$R_{IB,B}$	Batarya işletme ve bakım maliyeti (0.001 \$/kWh)
COP_{AS}	Absorpsiyonlu soğutucunun performans katsayısı (0.7)	C_{CO_2}	Şebeke elektrik üretiminden salınan CO ₂ emisyonlarının sosyal maliyeti (\$/kWh)
η_{IE}	Isı eşanjörü verimliliği (0.9)	L_{TD}	Termal depolama güvenlik limiti (x kWh)
η_{GK}	Gaz kazanı verimliliği (0.73)	L_B	Batarya güvenlik limiti (x kWh)
$\eta_{MT,E}$	Mikro türbin elektrik verimliliği (0.416)	$L_{\check{S}}$	Şebeke elektrik limiti (kWh)
$\eta_{MT,IK}$	Mikro türbin ısı verimliliği (0.75)	Cap_{PV}	Güneş paneli elektrik üretim kapasitesi (180 kWh)
$\eta_{B,\check{S}R}$	Batarya şarj verimliliği (95%)	Cap_B	Batarya kapasitesi (150 kWh)
$\eta_{B,D\check{S}R}$	Batarya deşarj verimliliği (95%)	Cap_{TD}	Termal depolama kapasitesi (100 kWh)
$\eta_{TD,\check{S}R}$	Termal depolama şarj verimliliği (90%)	$R_{IB,MT}$	Mikro türbin işletme ve bakım fiyatı (0.024 \$/kWh)
$\eta_{TD,D\check{S}R}$	Termal depolama deşarj verimliliği (90%)	$R_{IB,GK}$	Gaz kazanı işletme ve bakım fiyatı (0.0003 \$/kWh)
H_{DG}	Doğal gazın ısı değeri (10.64 kWh/m ³)	$R_{IB,IE}$	Isı eşanjörü işletme ve bakım fiyatı (0.001 \$/kWh)
P_{DG}^t	Doğal gaz fiyatı (\$/kWh)	$R_{IB,AS}$	Absorpsiyonlu soğutucu işletme ve bakım fiyatı (0.0025 \$/kWh)
$P_{\check{S}ebeke}^t$	Şebeke elektriği fiyatı (\$/kWh)	$R_{IB,E\check{C}}$	Elektrikli çiller işletme ve bakım fiyatı (0.0016 \$/kWh)
$k_{td,kayıp}$	Termal depolama için kendi kendine deşarj oranı (0.03 %/h)	$R_{IB,PV}$	PV sistemi işletme ve bakım fiyatı (0.062 \$/kWh)
$k_{b,kayıp}$	Batarya depolama için kendi kendine deşarj oranı (0.2 %/h)	$R_{IB,TD}$	Termal depolama işletme ve bakım fiyatı (0.0031 \$/kWh)
γ	Batarya amortismanının (yıpranma payı) kontrollü aşınma maliyeti ile ilişkisinin miktarı (0.5)	α	Türkiye için CO ₂ sosyal maliyeti (4.46 \$/ton)
N	Batarya döngü sayısı (4000)	β_{DG}	Doğal gazın CO ₂ miktarı (g CO ₂ /kWh)
$C_{sermaye}$	Bataryanın sermaye maliyeti (50 \$/kWh)	C_{carb}^t	Şebeke elektriği kullanımında salınan CO ₂ miktarı

Amaç Fonksiyonu:

Amaç fonksiyonunda t zamanında olmak üzere 5 adet maliyet unsuru bulunmaktadır: Mikro türbin ve gaz kazanında kullanılan doğal gaz maliyeti, deşarj derinliğine (DoD) bağlı olarak batarya yaşlandırma (yıpranma) maliyeti, sistemlerin işletme ve bakım

maliyetleri, güç kaynağına bağlı olarak salınan CO₂ miktarına bağlı olarak oluşan sosyal maliyetler. Bu maliyet unsurları çerçevesinde en küçükleme çalışılan amaç fonksiyonu denklem 4.1’de gösterilmektedir.

$$\text{Min. } \sum_{t=1}^{8760} [C_{DG}^t + C_{\text{Şebeke}}^t + C_{\text{Batarya Yaşlandırma}}^t + C_{\text{İşletme ve Bakım}}^t + C_{\text{Sosyal}}^t] \quad (4.1)$$

Amaç fonksiyonunda kullanılan maliyet unsurları sistemler arasındaki enerji akışına göre değişkenlik göstermektedir. Doğal gaz maliyeti mikro türbin ve gaz kazanından çıkan t anındaki enerji akışına ve doğal gaz fiyatına bağlı olarak denklem 4.2’de gösterilmektedir. Diğer yandan denklem 4.3’te gösterilen şebekeden alınan elektrik maliyeti; t anındaki şebekeden çekilen elektrik fiyatı, hastane elektrik talebi, batarya sisteminin şarjı ve elektrikli çiller sistemi arasındaki enerji akışına bağlı olarak değişmektedir. Diğer maliyet unsurlarından olan batarya yıpranma maliyetleri denklem 4.4’te gösterilmekte ve ikinci ömürlü Li-iyon EV bataryanın özelliklerine bağlı olarak belirlenmektedir. Hastane mikro şebekesinde kullanılan tüm sistemlerin işletme ve bakım maliyetleri denklem 4.5’te gösterilmektedir. Hastanenin elektrik, ısı ve soğutma taleplerinin karşılanması amacıyla güç kaynakları tarafından salınan CO₂ miktarına göre oluşan sosyal maliyet ise denklem 4.6’da ifade edilmektedir.

$$C_{DG}^t = P_{DG}^t \left[\left((E_{MT,B}^t + E_{MT,T}^t + E_{MT,EÇ}^t) \right) + (H_{GK,AS}^t + H_{GK,IE}^t + H_{GK,TD}^t) / \eta_{GK} \right] / H_{DG} \quad (4.2)$$

$$C_{\text{Şebeke}}^t = P_{\text{Şebeke}}^t (E_{S,T}^t + E_{S,B}^t + E_{S,E}^t) \quad (4.3)$$

$$C_{\text{Batarya Yaşlandırma}}^t = [(E_{DŞR,T}^t + E_{DŞR,EÇ}^t) \cdot \gamma \cdot C_{\text{sermaye}}] / [L_B \cdot \eta_{B,DŞR} \cdot N] \quad (4.4)$$

$$C_{\text{İşletme ve Bakım}}^t = C_{IB,MT}^t + f_{bkm}^t + C_{IB,IE}^t + C_{IB,AS}^t + C_{IB,EÇ}^t + C_{IB,TD}^t + C_{IB,GK}^t + C_{IB,PV}^t \quad (4.5)$$

$$C_{\text{Sosyal}}^t = \alpha \{ \beta_{DG} [(E_{MT,B}^t + E_{MT,T}^t + E_{MT,EÇ}^t) + (H_{GK,AS}^t + H_{GK,IE}^t + H_{GK,TD}^t) / \eta_{GK}] + C_{\text{carb}} (E_{S,T}^t + E_{S,B}^t + E_{S,EÇ}^t) \} \quad (4.6)$$

Kısıtlar:

Hastane trijenerasyon mikro şebeke sisteminin çizelgeleme probleminin çözülebilmesi için kısıtlar tanımlanmıştır. Güç kaynaklarından gelen elektriğin, hastanenin elektrik talebinden büyük olması gerektiği eşitsizlik 4.7’de gösterilmektedir. Diğer yandan soğutma cihazlarının performans katsayılarına, sistemler arasındaki ısı ve enerji akışlarına bağlı olarak soğutma talebi kısıtı eşitsizlik 4.8’de gösterilmektedir. Isı

eşanjörünün verimliliğine ve ısı kaynaklarından çıkan ısı akışına göre belirlenen ısı talebi kısıtı ise eşitsizlik 4.9’da gösterilmektedir.

$$E_{\text{Ş,T}}^t + E_{\text{PV,T}}^t + E_{\text{MT,T}}^t + U_{\text{DŞR,B}}^t E_{\text{DŞR,T}}^t \geq D_E^t \quad (4.7)$$

$$\text{COP}_{\text{EÇ}} (E_{\text{Ş,EÇ}}^t + E_{\text{PV,EÇ}}^t + E_{\text{MT,EÇ}}^t + U_{\text{DŞR,B}}^t E_{\text{DŞR,EÇ}}^t) + \text{COP}_{\text{AS}} (H_{\text{IK,AS}}^t + H_{\text{GK,AS}}^t + H_{\text{DŞR,AS}}^t \cdot U_{\text{DŞR,TD}}^t) \geq D_C^t \quad (4.8)$$

$$\eta_{\text{IE}} (H_{\text{IK,IE}}^t + H_{\text{GK,IE}}^t + H_{\text{DŞR,IE}}^t \cdot U_{\text{DŞR,TD}}^t) \geq D_H^t \quad (4.9)$$

$$\text{Şebeke limiti: } E_{\text{Ş}}^t \leq L_{\text{Ş}} \quad (4.10)$$

PV sisteminin elektrik kapasitesi, mikro türbinin ısı ve elektrik kapasitesi, batarya ve termal depolama sistemlerinin şarj durumları, depolama kapasiteleri ve verimliklerine göre oluşturulan kısıtlar aşağıdaki eşitsizliklerde gösterilmektedir.

$$\text{PV sistemi kapasite üst limit kısıtı: } E_{\text{PV}}^t \leq \text{Cap}_{\text{PV}} \quad (4.11)$$

$$\text{Batarya kapasite üst limit kısıtı: } \text{SoC}^t \leq \text{Cap}_B \quad (4.12)$$

$$\text{Termal depolama kapasite üst limit kısıtı: } \text{SoS}^t \leq \text{Cap}_{\text{TD}} \quad (4.13)$$

$$\text{Batarya deşarj limiti: } U_{\text{DŞR}}^t \cdot E_{\text{DŞR}}^t \leq [\text{SoC}^t - L_B] \cdot \eta_{B,\text{DŞR}} \quad (4.14)$$

$$\text{Termal depolama deşarj limiti: } H_{\text{DŞR}}^t \cdot U_{\text{DŞR,TD}}^t \leq [\text{SoS}^t - L_{\text{TD}}] \cdot \eta_{\text{TD,DŞR}} \quad (4.15)$$

$$\text{Batarya kritik yük kısıtı: } \text{SoC}^t \geq E_{\text{kritik}}^t + C_{\text{kritik}}^t / \text{COP}_{\text{EÇ}} \quad (4.16)$$

$$\text{Termal depolama kritik yük kısıtı: } \text{SoS}^t \geq H_{\text{kritik}}^t + C_{\text{kritik}}^t / \text{COP}_{\text{AS}} \quad (4.17)$$

$$\text{Mikro türbin elektrik kapasite kısıtı: } E_{\text{MT}}^t \leq \text{Cap}_{\text{MT}} \cdot \eta_{\text{MT,E}} \quad (4.18)$$

$$\text{Mikro türbin ısı kapasite kısıtı: } H_{\text{IK}}^t \leq \text{Cap}_{\text{MT}} \cdot \eta_{\text{MT,IK}} \quad (4.19)$$

En son olarak batarya ve termal depolama sistemlerinin şarj ve deşarj değişkenleri toplamının 1’den büyük olamayacağı ve tüm karar değişkenlerinin pozitif değer alması gerektiği kısıtlar aşağıdaki eşitsizliklerde ifade edilmektedir.

$$U_{\text{ŞR,B}}^t + U_{\text{DŞR,B}}^t \leq 1 \quad (4.20)$$

$$U_{\text{ŞR,TD}}^t + U_{\text{DŞR,TD}}^t \leq 1 \quad (4.21)$$

$$U_{\text{SR},B}^t, U_{\text{DŞR},B}^t, U_{\text{SR},TD}^t, U_{\text{DŞR},TD}^t \in \{0,1\}$$

Tüm karar değişkenleri ≥ 0

Eşitlikler:

Hastane trijenerasyon mikro şebeke sisteminde güç kaynaklarından üretilen elektrik akışları için denklemler oluşturulmuştur. Aşağıda gösterilen denklemlerde t anında güç kaynaklarından diğer mikro şebeke sistem bileşenlerine iletilen elektrik miktarları belirtilmektedir. Ayrıca şebeke elektriğinin kullanılmasına bağlı olarak salınan CO₂ miktarının hesabı denklem 4.23'te gösterilmektedir.

$$\text{Şebeke elektriği: } E_{\text{Ş}}^t = E_{\text{Ş},B}^t + E_{\text{Ş},T}^t + E_{\text{Ş},E\check{C}}^t \quad (4.22)$$

$$C_{\text{CO2}}^t = \frac{\sum_{i=1}^{13} P_i^t \text{Carb}_i}{\sum_{i=1}^{13} P_i^t} \quad (4.23)$$

$$\text{PV Sistemi: } E_{\text{PV}}^t = E_{\text{PV},B}^t + E_{\text{PV},T}^t + E_{\text{PV},E\check{C}}^t \quad (4.24)$$

$$\text{Mikro türbin sistemi: } E_{\text{MT}}^t = E_{\text{MT},B}^t + E_{\text{MT},T}^t + E_{\text{MT},ES}^t \quad (4.25)$$

Hastane ısı talebinin karşılanması amacıyla ısı üretim kaynaklarından üretilen ısısın diğer sistemlere yönlendirilmesi için denklemler oluşturulmuştur. Denklem 4.26'da gösterildiği üzere mikro türbinine bağlı olan ısı kazanımı cihazı sayesinde atık ısı değerlendirilerek diğer sistemlere olan ısı akışı sağlanmaktadır.

$$\text{Isı kazanımı cihazı: } H_{\text{IK}}^t = H_{\text{IK},AS}^t + H_{\text{IK},IE}^t + H_{\text{IK},TD}^t \quad (4.26)$$

$$\text{Gaz kazanı: } H_{\text{GK}}^t = H_{\text{GK},AS}^t + H_{\text{GK},IE}^t + H_{\text{GK},TD}^t \quad (4.27)$$

$$\text{Absorpsiyonlu soğutucu: } H_{\text{AS}}^t = H_{\text{GK},AS}^t + H_{\text{IK},AS}^t \quad (4.28)$$

Enerji depolama sistemlerinin t anındaki şarj ve deşarj edilmesi durumlarının belirtildiği denklemler aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\text{Batarya şarjı: } E_{\text{ŞR}}^t = E_{\text{Ş},B}^t + E_{\text{PV},B}^t + E_{\text{MT},B}^t \quad (4.29)$$

$$\text{Batarya deşarjı: } E_{\text{DŞR}}^t = E_{\text{DŞR},T}^t + E_{\text{DŞR},E\check{C}}^t \quad (4.30)$$

$$\text{Termal depolama sistemi şarjı: } H_{\text{ŞR}}^t = H_{\text{IK},TD}^t + H_{\text{GK},TD}^t \quad (4.31)$$

$$\text{Termal depolama sistemi deşarjı: } H_{DŞR}^t = H_{DŞR,AS}^t + H_{DŞR,IE}^t \quad (4.32)$$

Batarya depolama sistemlerinin çevrim verimliliği, kendi kendine deşarj olma oranı, şarj ve deşarj edilen enerji miktarına bağlı olarak değiştiği t anındaki enerji miktarı hesabı denklem 4.33'te gösterilmektedir. Benzer olarak termal depolama sistemi için enerji miktarı hesabı denklem 4.34'te gösterilmektedir.

$$SoC^t = \left[SoC^{t-1} + U_{ŞR,B}^t \cdot E_{ŞR}^t \cdot \eta_{B,ŞR} - \frac{U_{DŞR}^t \cdot E_{DŞR}^t}{\eta_{B,DŞR}} \right] (1 - k_{b,kayıp}) \quad (4.33)$$

$$SoS^t = \left[SoS^{t-1} + H_{ŞR}^t \cdot \eta_{TD,ŞR} \cdot U_{ŞR,TD}^t - \frac{H_{DŞR}^t \cdot U_{DŞR,TD}^t}{\eta_{TD,DŞR}} \right] (1 - k_{td,kayıp}) \quad (4.34)$$

İkinci ömürlü ve verimliliği düşmüş EV batarya depolama sisteminin faydalı çevrim ömrünün artırılması amacıyla deşarj derinliği hesabı denklem 4.35'te gösterilmektedir. Batarya deşarj derinliğine bağlı olarak batarya yıpranma maliyeti hesabı ise denklem 4.36'te ifade edilmektedir. Batarya sisteminin çevrim verimlilikleri, şarj ve deşarj edilen enerji miktarına göre oluşan işletme ve bakım maliyeti ise denklem 4.37'de gösterilmektedir. Benzer bir şekilde termal depolama sistem maliyeti denklem 4.38'de ifade edilmektedir.

$$DoD^t = U_{DŞR,B}^t E_{DŞR}^t / [Cap_B \cdot \eta_{B,DŞR}] \quad (4.35)$$

$$f_{age}^t = \frac{[DoD^t \cdot \gamma \cdot C_{sermaye}]}{N} \quad (4.36)$$

$$f_{bkm}^t = \left[U_{ŞR,B}^t \cdot E_{ŞR}^t \cdot \eta_{B,ŞR} + U_{DŞR,B}^t \cdot E_{DŞR}^t / \eta_{B,DŞR} \right] R_{İB,B} \quad (4.37)$$

$$C_{İB,TD}^t = \left[H_{TD,ŞR}^t \cdot \eta_{TD,ŞR} \cdot U_{ŞR,TD}^t + H_{TD,DŞR}^t \cdot U_{DŞR,TD}^t / \eta_{TD,DŞR} \right] R_{İB,TD} \quad (4.38)$$

Hastane trijenerasyon mikro şebekesinin sistem bileşenlerinin işletme ve bakım maliyetlerinin hesapları aşağıdaki denklemlerde gösterilmektedir. Sistem bileşenlerine t anında yönlendirilen enerji miktarı, işletme ve bakım fiyatına bağlı olarak maliyetler değişim göstermektedir.

$$\text{Mikro türbin işletme ve bakım maliyeti: } C_{IB,MT}^t = E_{MT}^t R_{IB,MT} \quad (4.39)$$

$$\text{Gaz kazanı işletme ve bakım maliyeti: } C_{IB,GK}^t = H_{GK}^t R_{IB,GK} \quad (4.40)$$

$$\text{Isı eşanjörü işletme ve bakım maliyeti: } C_{IB,IE}^t = D_H^t / \eta_{IE} R_{IB,IE} \quad (4.41)$$

$$\text{Absorbsiyonlu soğutucu işletme ve bakım maliyeti: } C_{IB,AS}^t = H_{AS}^t R_{IB,AS} \quad (4.42)$$

$$\text{Elektrikli çiller işletme ve bakım maliyeti: } C_{IB,EÇ}^t = E_{EÇ}^t R_{IB,EÇ} \quad (4.43)$$

$$\text{PV sistemi işletme ve bakım maliyeti: } C_{IB,PV}^t = E_{PV}^t R_{IB,PV} \quad (4.44)$$

Hastanenin kesintisiz enerji talebinin en fazla olduğu yoğun bakım üniteleri, resüsitasyon birimi ve ameliyat odalarının kritik elektrik, ısıtma ve soğutma yüklerinin hesapları ise aşağıdaki denklemlerde ifade edilmektedir.

$$\text{Elektrik kritik yük hesabı: } E_{kritik}^t = E_{ybu}^t + E_{res}^t + E_{ao}^t \quad (4.45)$$

$$\text{Soğutma kritik yük hesabı: } C_{kritik}^t = C_{ybu}^t + C_{res}^t + C_{ao}^t \quad (4.46)$$

$$\text{Isıtma kritik yük hesabı: } H_{kritik}^t = H_{ybu}^t + H_{res}^t + H_{ao}^t \quad (4.47)$$

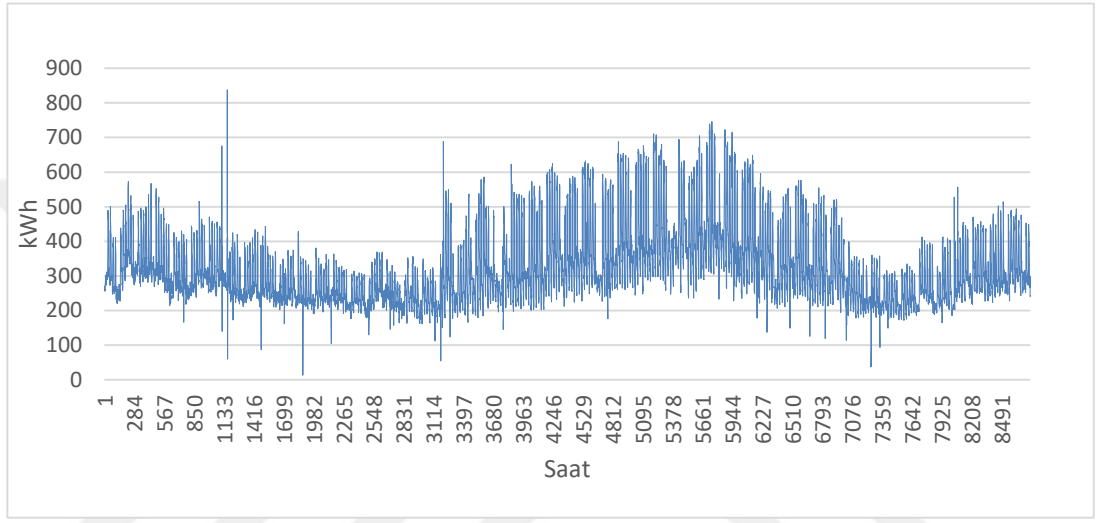
4.4 Uygulanan Veriler ve Varsayımlar

Hastane trijenerasyon mikro şebekesinin çizelgeleme optimizasyonunun yapılması amacıyla oluşturulan modelin uygulanması için örnek bir hastane seçilmiştir. Hatay'ın Antakya ilçesinde bulunan 197 yataklı, 4 ameliyathaneli, 2 resüsitasyon birimli (travma odası) ve yoğun bakım ünitesi olarak; 4 muayene odası ve 9 müşahade (gözlem) odasına sahip bir hastane seçilmiştir. Modelde elektrik talebinin belirlenmesi amacıyla hastanenin saatlik gerçek elektrik tüketim verileri kullanılmıştır. Hastanenin elektrik tüketim verilerinden yola çıkarak yıllık toplam elektrik talep miktarı 2811403 kWh olarak belirlenmiştir ve Şekil 4.2'de gösterildiği üzere hastanenin bir yıldaki saatlik elektrik talebi grafiği oluşturulmuştur.

Seçilen hastanenin kritik birimlerinin en yüksek elektrik taleplerinin belirlenmesi için ise Morgenstern ve diğ. (2016) yapmış olduğu hastane departmanlarının elektrik tüketim yoğunluğu çalışmasından yararlanılmıştır. Bu çalışmadan yola çıkarak modelde kullanılması amacıyla ameliyathane (E_{ao}^t) 17 Wh/m², resüsitasyon birimi

(E_{res}^t) 68.7 Wh/m^2 ve acil/yoğun bakım ünitesi (E_{ybu}^t) 28.9 Wh/m^2 ortalama olarak en yüksek elektrik tüketim yoğunluğu değerleri alınmıştır.

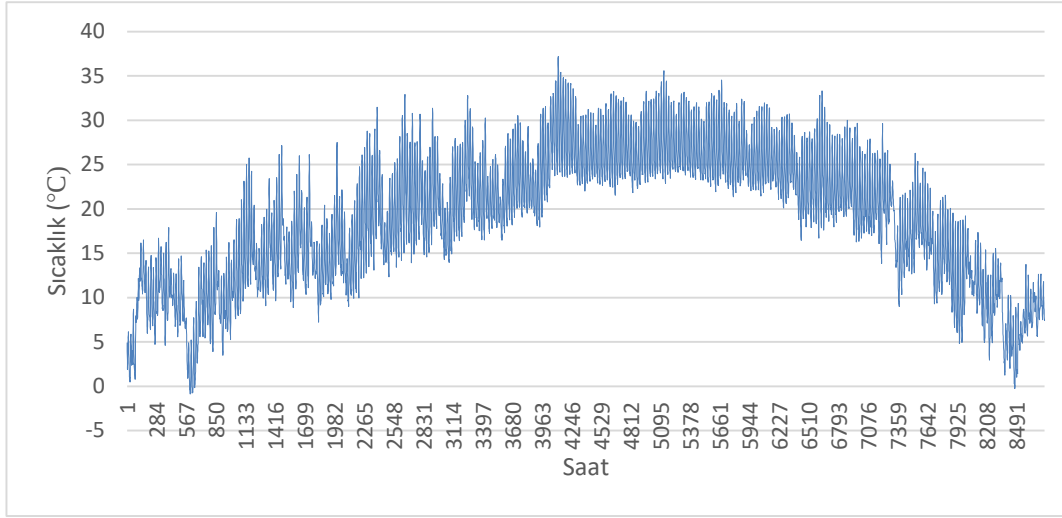
Ameliyathane birimi hafta içi her gün ve cumartesi günleri olmak üzere ofis çalışma saatlerine (09.00-12.00 ve 13.00-17.00) göre hizmet vermektedir. Resüsitasyon birimi ve yoğun bakım ünitesi ise haftanın bütün günleri 24 saat hizmet vermektedir. Denklem 4.45'te belirtilen elektrik kritik yükü (E_{kritik}^t) bu bilgiler göz önünde bulundurularak hesaplanmaktadır.



Şekil 4.2 : Hastanenin saatlik elektrik talebi grafiği

Hastane kat planlarına göre hastanenin ve kritik bölümlerin ısıtma ve soğutma talebinin belirlenmesi amacıyla iklimlendirme hesabı yapılmıştır. Hesabın yapılması amacıyla EU Science Hub PVGIS veritabanından yola çıkılarak hastanenin bulunduğu bölgenin saatlik sıcaklık verileri kullanılmıştır (Url-25). Ayrıca Şekil 4.3'te ise hastanenin bulunduğu bölgenin bir yıldaki saatlik sıcaklık grafiği gösterilmektedir.

Hastanenin alan soğutma ve ısıtması için enerji ihtiyacının hesaplanması denklem 4.48'de gösterilmektedir. Hastanenin ısıtma ve soğutma ihtiyacı; iletim ısı kaybı, hava kaçağı ısı kaybı ve hava akışına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.



Şekil 4.3 : Hastanenin saatlik sıcaklık grafiği

$$Q_{\text{alan}} = Q_{\text{iletim}} + Q_{\text{hava kaçığı}} + Q_{\text{hava akışı}} \quad (4.48)$$

Hastane binasının toplam iletim ısı kaybı (Q_{iletim}) hesabı denklem 4.49’da gösterilmektedir. Denklem 4.50’de ise bina bileşenlerinin iletim ısı kaybı hesabı gösterilmektedir. Hesap için gerekli dış duvar alanı ($A_{\text{dış duvar}} = 3091 \text{ m}^2$), çatı alanı ($A_{\text{çatı}} = 1064 \text{ m}^2$) ve pencere alanı ($A_{\text{pencere}} = 605 \text{ m}^2$) değerleri hastane kat planlarından alınmıştır. Bina bileşenlerinin ısıl geçirgenlik katsayıları ise şu şekildedir (Zangheri ve diğ., 2014): $U_{\text{dış duvar}} = 1.37 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $U_{\text{çatı}} = 0.45 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ve $U_{\text{pencere}} = 1.4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Çizelge 4.5’te ise denklemde kullanılan parametrelerin açıklamaları bulunmaktadır.

$$Q_{\text{iletim}} = Q_{\text{dış duvar}} + Q_{\text{çatı}} + Q_{\text{pencere}} \quad (4.49)$$

$$Q_c = \sum U_i A_i (T_{iç} - T_{dış}) / 1000 \text{ [kWh]} \quad (4.50)$$

Çizelge 4.5 : İletim ısı kaybı hesabındaki parametreler ve açıklamaları

Parametre	Açıklama
Q_c	Bina bileşeninden geçen iletim ısı kaybı, kWh
U_i	Bina bileşeninin ısıl geçirgenlik katsayısı, $\text{W/(m}^2\text{K)}$
A_i	Bina bileşeninin yüzey alanı, m^2
$T_{iç}$	İç hava sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$
$T_{dış}$	Dış hava sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$

Hava kaçaklarından dolayı oluşan ısı kaybı hesabı denklem 4.51’de ifade edilmektedir. Çizelge 4.6’da ise hava kaçağı ısı kaybı denkleminde kullanılan parametrelerin açıklamaları gösterilmektedir.

$$Q_{\text{hava kaçağı}} = \rho_i \cdot c_{pi} \cdot q_{v,\text{hava kaçağı}} (T_{iç} - T_{dış}) / 1000 \text{ [kWh]} \quad (4.51)$$

Çizelge 4.6 : Hava kaçağı ısı kaybı parametreleri ve açıklamaları

Parametre	Açıklama
$Q_{\text{hava kaçağı}}$	Hava kaçağı ısı kaybı için gerekli enerji, kWh
ρ_i	Hava yoğunluğu, 1.2 kg/m^3
c_{pi}	Havanın özgül ısı kapasitesi, 1000 Ws/(kgK)
$q_{v,\text{hava kaçağı}}$	Hava kaçağı akışı, m^3/s
$T_{iç}$	İç hava sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$
$T_{dış}$	Dış hava sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$

Hava kaçağı ısı kaybı hesabının yapılabilmesi için hastane bina özelliklerine bağlı olarak hava kaçağı akışı ($q_{v,\text{hava kaçağı}}$) hesabının yapılması gerekmektedir. Hava kaçağı akış hesabı denklem 4.52’de ifade edilmektedir. Ayrıca denkleminde kullanılan parametreler ve açıklamaları Çizelge 4.7’de gösterilmektedir. Bina kabuğu yüzey alanı (A) olarak dış duvar ve pencere alanlarının toplamı olan 3696 m^2 değeri alınmıştır. Hastane binası, zemin kat hariç 8 kattan oluştuğu için x parametresi 15 değeri almaktadır (Kalliomäki, 2010).

$$q_{v,\text{hava kaçağı}} = \frac{q_{50}}{3600 \cdot x} A \quad (4.52)$$

Çizelge 4.7 : Hava kaçağı akış hesabı parametreleri ve açıklamaları

Parametre	Açıklama
q_{50}	Bina kabuğunun hava kaçağı numarası, $\text{m}^3/(\text{hm}^2)$
A	Bina kabuğunun yüzey alanı (zemin dâhil), m^2
x	Tek katlı binalar için 35; İki katlı binalar için 24; Üç ve dört katlı binalar için 20 ve beş veya daha yüksek katlı binalar için 15 değeri alan faktör
3600	Hava akışını birim m^3/h ’den birim m^3/s ’ye çeviren faktör

Bina kabuğunun hava kaçağı numarasının (q_{50}) belirlenmesi denklem 4.53’te gösterilmektedir. Hava kaçağı numarasının (q_{50}) belirlenmesi için bina kabuğu yüzey alanı (A, m^2), binanın hava hacmi (V, m^3) ve Çizelge 4.8 ‘de gösterildiği üzere hava

geçirimsizliği seviyesine göre 50 Pa basınç farkı olan bir binanın tipik hava kaçak numarası (n_{50} , 1/h) sayısı gerekmektedir.

Hastanenin inşaatı ve uygulama yöntemlerine göre hava geçirimsizliği seviyesi hakkında bilgi bulunmadığı için tipik n_{50} numarasının değeri bilinmemektedir. Hava geçirimsizlik seviyesinin bilinmediği durumlarda ise ısıtma enerjisi ihtiyacının hesaplanabilmesi amacıyla q_{50} için $4 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ değeri alınmaktadır (Kalliomäki, 2010).

$$q_{50} = \frac{n_{50}}{A} V \quad (4.53)$$

Çizelge 4.8 : İnşaat ve uygulama yöntemlerine bağlı olarak farklı binalar için tipik hava kaçağı sayıları (n_{50}), Kalliomäki (2010)'den uyarlanmıştır.

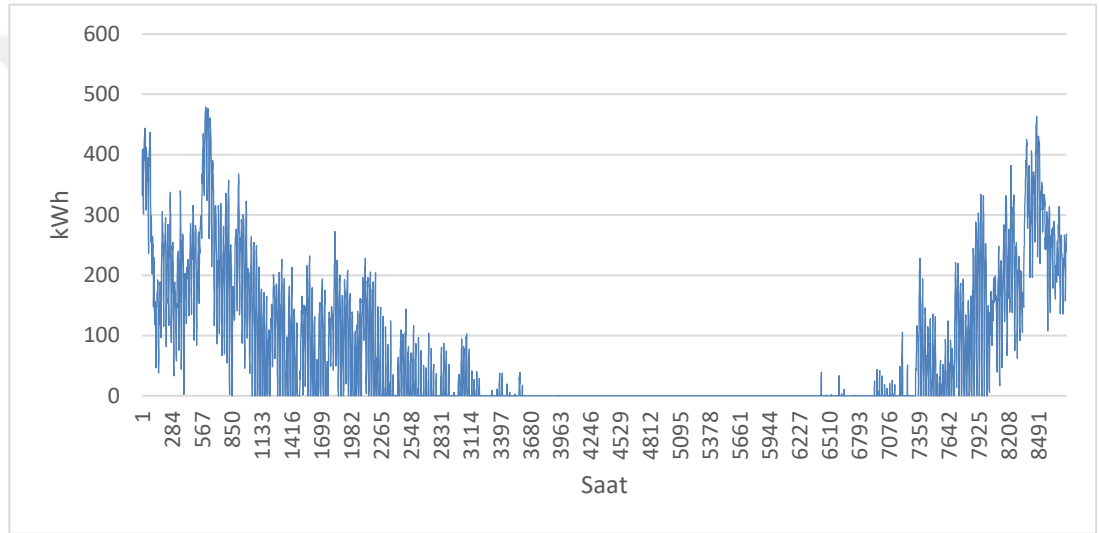
Hava Geçirimsizliği Seviyesi	Açıklama	Tipik n_{50} numarası (1/h)
İyi	Planlama ve inşaat işlerinin yürütülmesi ve izlenmesinin yanı sıra kenarların ve derzlerin hava sızdırmazlığına özel dikkat gösterilmiştir.	Evler için 1... 3.0
		Apartman binası ve ofis binası için 0.5.... 1.5
Orta	Hava sızdırmazlığının yanı sıra planlama ve inşaat işlerinin yürütülmesi ve izlenmesinde standart özen gösterilmiştir.	Evler için 3....5
		Apartman binası ve ofis binası için 1.5.....3
Zayıf	Hava geçirimsizliği, planlama ve inşaat işlerinin yürütülmesi ve izlenmesi konusunda neredeyse hiç özen gösterilmemiştir.	Evler için 5....10
		Apartman binası ve ofis binası için 3.....7

Hastanenin alan soğutma ve ısıtma talebinin hesaplanabilmesi için denklem 4.54'te belirtildiği üzere hava akışı hesabı yapılmıştır. Ayrıca hastane birimlerinin özelliklerine göre belirlenen iç sıcaklıkları ($T_{iç}$) şu şekildedir (Özel ve Hançer, 2005): Ameliyathane (22 °C), yoğun bakım ünitesi (22 °C), resüsitasyon birimi (22 °C) ve diğer hastane bölümleri (24 °C). Denklemden belirtilen hastane birimlerinin saat başına hava değişikliği faktörleri (ACH) şu şekildedir: Ameliyathane 15, yoğun bakım ünitesi 12, resüsitasyon birimi 12 ve dinlenme alanları için 2 değeri almaktadır (Url-26). Hastane planlarına göre hastane birimlerinin hacim (V , m^3) değerleri şu şekildedir:

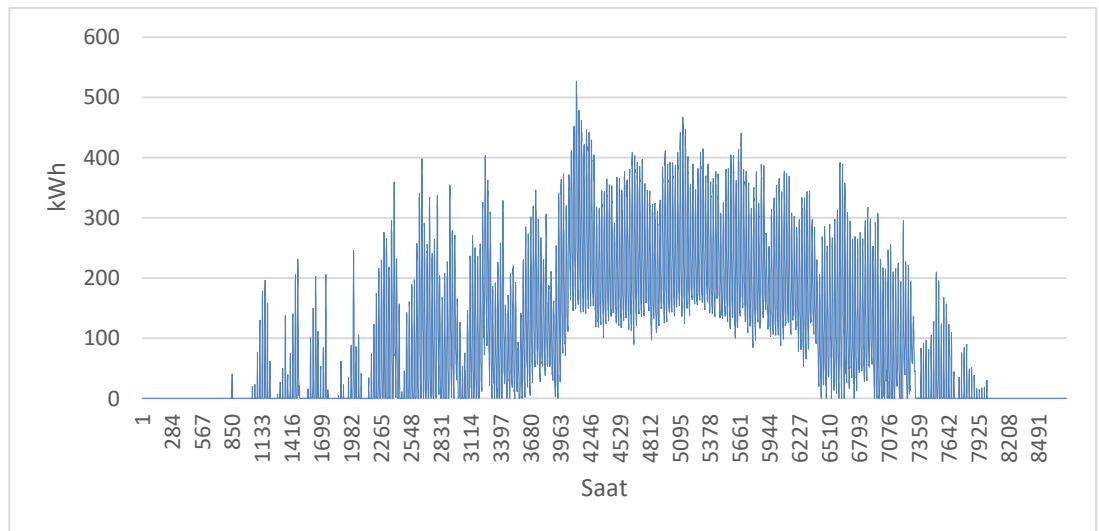
Ameliyathane 441.6 m³, yoğun bakım ünitesi 327 m³, yoğun bakım ünitesi 1386 m³ ve dinlenme alanları 27637 m³.

$$Q_{\text{hava akışı}} = \frac{ACH \cdot V}{3600} c_p \rho (T_{\text{iç}} - T_{\text{dış}}) \quad (4.54)$$

Hastanenin alan ısıtma ve soğutma taleplerinin hesaplanmasının ardından ısıtma talebi 610391 kWh ve soğutma talebi 881175 kWh olarak belirlenmiştir ve ardından yıllık soğutma ve ısıtma talebi grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 4.4'te bir yıl için hastanenin saatlik ısıtma talebi (kWh) grafiği gösterilmektedir. Diğer yandan Şekil 4.5'te ise soğutma talebi (kWh) grafiği gösterilmektedir.



Şekil 4.4 : Hastanenin saatlik ısıtma talebi grafiği



Şekil 4.5 : Hastanenin saatlik soğutma talebi grafiği

Hastanenin çatısında bulunan PV sisteminden üretilecek elektrik miktarının hesaplanması için EU Science Hub PVGIS modeli kullanılmıştır (Url-25). Güneş paneli elektrik üretim kapasitesi 180 kWh olarak belirlenmiştir.

Şebeke, PV sistemi ve mikro türbinden yönlendirilen elektriğin depolanabilmesi ve gerekli durumlarda kullanılması amacıyla 150 kWh kapasitesinde ikinci yaşam döngüsündeki EV Li-iyon bataryalar kullanılmıştır. Bataryaların kendi kendine deşarj olma oranı olarak %0.2 değeri alınmıştır. Yüzde 80 kapasitedeki ikinci yaşam döngüsündeki batarya sisteminin enerji yoğunluğu 180 W/kg, çevrim sayısı 4000 ve çevrim verimliliği ise %95 olarak alınmaktadır (Güven, 2019).

Hastanenin talep ettiği enerjinin sağlanması için güç kaynakları tarafından çevreye salınan CO₂'den dolayı sosyal maliyet oluşmaktadır. Hastane trijenerasyon sisteminde elektrik, ısıtma ve soğutma talepleri için yakılan doğalgaz miktarı (gCO₂/kWh), CO₂ salım maliyeti (\$/ton) ve şebeke kullanımına bağlı olarak salınan CO₂ miktarına (C^t_{CO2}) bağlı olarak sosyal maliyet (C^t_{sosyal}) değişmektedir. Şebeke elektriği kullanıldığı durumda enerji üretim kaynağına bağlı olarak CO₂ salım miktarları Çizelge 4.9'da gösterilmektedir. Ayrıca sosyal maliyetin hesaplanması amacıyla Türkiye için CO₂ salım maliyeti (α) 4.46 \$/ton olarak alınmıştır (Ricke ve diğ, 2018).

Çizelge 4.9 : Enerji üretim kaynağına bağlı olarak CO₂ salım miktarı, IPCC (2014)'ten uyarlanmıştır.

Enerji Kaynağı	g CO2-eq/kWh
Doğal gaz	370
Linyit	810
Hidrolik	10
İthal Kömür	750
Rüzgâr	8
Güneş	19
Petrol	600
Kömür	810
Biyokütle	40

Şebekeden çekilen elektrik maliyeti (C^t_{şebeke}) hesabı için gerekli olan ve EPIAŞ'ın üç zamanlı ticarethane tarifesi verisine göre elektrik fiyatları (P^t_{şebeke}) şu şekildedir: 06:00-17:00 saatleri arası 0.11 \$/kWh, 17:00-22:00 saatleri arası 0.166 \$/kWh ve 22:00-06:00 saatleri arası 0.065 \$/kWh. Gaz kazanı ve mikro türbin yakıtı olarak kullanılan doğal gaz fiyatı, EPIAŞ'ın verilerine göre 1.25 \$/m³ olarak alınmıştır. Sistemlerin 1 m³ doğal gaz yakıt tüketiminden elde edilen enerji miktarı 10.64 kWh

olarak kabul edilmiştir. Bu bilgilerden yola çıkarak doğal gaz yakıt tüketiminin enerji fiyatı (P_{DG}^t) 0.12 \$/kWh olmaktadır.

Hastane trijenerasyon mikro şebekesinin çizelgeleme modelinde kullanılan tüm sistemlerin işletme ve bakım maliyetleri hesabı için gerekli fiyatlar Çizelge 4.4'te ifade edilmektedir. Diğer yandan hastanenin enerji talebini karşılaması için gerekli olan sistemlerin kapasitesi ve buna bağlı olarak ilk yatırım maliyetleri Çizelge 4.10'da gösterilmektedir.

Çizelge 4.10 : Sistem ilk yatırım maliyetleri, Feldman ve diğ. (2021), Zhang ve diğ. (2020) ve Jiang ve diğ. (2019)'den uyarlanmıştır.

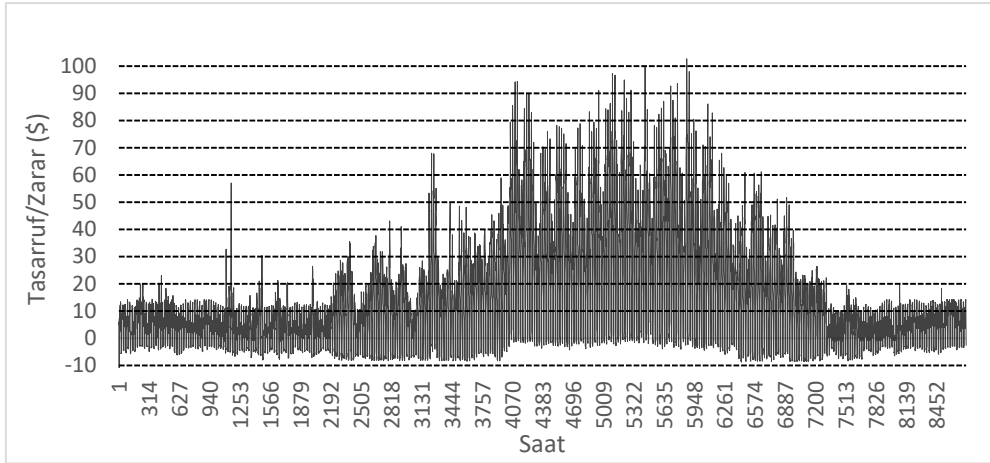
Sistem	Kapasite	İlk yatırım maliyeti	Sistemin ilk yatırım maliyeti (\$)
PV Sistemi	180 kW	1800 \$/kW	324000
Mikro Türbin	400 kW	971 \$/kW	388400
Isı Kazanımı Cihazı	400 kW	130 \$/kW	52000
Gaz Kazanı	300 kW	43 \$/kW	12900
Elektrikli Çiller	100 kW	139 \$/kW	13900
Absorpsiyonlu Soğutucu	150 kW	172 \$/kW	25800
Isı Eşanjörü	500 kW	33 \$/kW	16500
Termal Depolama Sistemi	100 kWh	40 \$/kWh	4000
Batarya Sistemi	150 kWh	50 \$/kWh	7500

4.5 Model Çıktıları

Hastane trijenerasyon mikro şebekesinin çizelgeleme optimizasyonu için bir önceki bölümde belirtilen veriler ve varsayımlar modele dâhil edilerek *Excel Solver* programında 1 yıldaki her saat (8760 saat) için çalıştırılmıştır. Programın ekran görüntüleri EK-A'da gösterilmektedir.

Oluşturulan model ile hastanenin elektrik, ısıtma ve soğutma taleplerinin karşılanması ve amaç fonksiyonunda belirtilen maliyetin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Amaç fonksiyonundaki doğalgaz kullanım maliyeti, şebekeden çekilen elektrik maliyeti, batarya sisteminin yaşlandırma maliyeti, CO₂ salımına bağlı sosyal maliyet, sistemlerin işletme ve bakım maliyetleri için sistemin optimum kullanımı ile 8760 saatte sağlanan tasarruf miktarı hesaplanmıştır.

Hastanenin gerçek elektrik tüketim verilerine göre talep edilen enerjinin yalnızca şebekeden çekildiği durumda 482641 \$ maliyet oluşmaktadır. Oluşturulan model ile trijenerasyon mikro şebeke sistemi sayesinde batarya sistemi 2238 deşarj yapmıştır ve yıllık toplam 120767 \$ tasarruf sağlanmıştır. Böylece önceki enerji maliyetine kıyasla yaklaşık %25 tasarruf elde edilmiştir. Diğer yandan Türkiye’de CO₂ salımının sosyal maliyeti kapsamında 1528.3 ton eşdeğer CO₂ salımı azaltılarak 6816.22 \$ tasarruf sağlanmıştır. Şekil 4.6’da oluşturulan model ile saatlik olarak tasarruf/zarar durumu grafiği gösterilmektedir.



Şekil 4.6 : Saatlik tasarruf/zarar grafiği

Hastane trijenerasyon mikro şebeke sisteminin kurulması amacıyla Çizelge 4.10’dan yola çıkarak gerekli sistem bileşenlerinin toplam ilk yatırım maliyeti 845000 \$ olarak belirlenmiştir. Yapılması planlanan sistemin ilk yatırım maliyetinin finansal olarak değerlendirilmesi amacıyla net bugünkü değer (NBD) hesabı ile sistemin geri ödeme süresi hesaplanması amaçlanmıştır. Net bugünkü değer hesabı denklem 4.55’te ifade edilmektedir. Sistemin kurulmasının 1. yılından itibaren her yıl için net nakit akışı (NNA) olarak sistemin toplam tasarruf miktarı (120767 \$) alınmıştır. Ayrıca faiz oranı (k) olarak ABD Merkez Bankası Federal Rezerv (FED)’in belirlediği dolar faizi %0.25 olarak alınmıştır (Url-27). Yapılan hesap sonucunda bugünkü zamanda yapılan 842500 \$ sistem maliyetinin geri ödeme süresi yaklaşık 7 yıl olarak hesaplanmıştır.

$$NBD = \sum_{n=0}^d \frac{NNA_n}{(1+k)^n} \quad (4.55)$$

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında, toplum sağlığı ve güvenliği için çok büyük öneme sahip olan hastanelerin kritik enerji talebinin karşılanması, enerji depolama sistemleri ile kesintisiz enerjinin sağlanmasının önemi gösterilmiştir. Hastaneye entegre edilen trijenerasyon mikro şebeke sistemi ile enerji güvenliğinin sağlanması, enerji maliyetlerinin en aza indirilmesi ve çevresel etkilerin azaltılması amaçlanmıştır.

İnsan hayatını riske edecek olası elektrik kesintilerinde, hastanelerdeki kritik tesislerin enerji güvenliğinin sağlanması amacıyla batarya ve termal depolama sistemleri kullanılmıştır. Hastanenin talep ettiği elektrik, ısıtma ve soğutma taleplerinin karşılanması amacıyla enerji yüklerinin koordinasyonu sağlanmıştır. Oluşturulan trijenerasyon mikro şebeke sistemi sayesinde çevresel etkiler azaltılmış ve enerji maliyetlerinde büyük oranda tasarruf elde edilmiştir.

Trijenerasyon hastane mikro şebekesinin çizelgeleme optimizasyonu için oluşturulan model, 197 yataklı bir hastanenin enerji tüketim verileri kullanılarak çalıştırılmıştır. Model çıktılarının özeti Çizelge 5.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 : Model çıktılarının özeti

Deşarj Sayısı	Emisyon Kazancı (ton eşdeğer CO ₂)	Türkiye CO ₂ salımı sosyal maliyet tasarrufu	Toplam Tasarruf Miktarı	Tasarruf Oranı	Sistem Geri Ödeme Süresi
2238	1528.3	6816.22 \$	120767 \$	%25	7 yıl

Model çıktılarına göre kurulan trijenerasyon mikro şebeke sistemindeki enerji depolama sistemleri sayesinde elektrik kesintisine karşı hastanenin enerji güvenliği yükseltilmiştir. Ayrıca şebekeden çekilen elektriğin fiyatının yüksek olduğu veya kritik elektrik talebinin olduğu zamanlarda PV, mikro türbin ve ana şebekeden çekilen enerjinin güç kontrol sistemi tarafından yönlendirildiği batarya depolama sistemi deşarj edilerek yüksek miktarda elektrik maliyeti tasarrufu mümkün olmuştur. Diğer yandan mikro türbin ve gaz kazanından yönlendirilen ısı, ısı kontrol ünitesi ile termal depolama sisteminde depolanarak kritik birimlerin ısıtma ve soğutma talebinin

karşılanması durumlarında deşarj edilmesi sağlanmıştır. Şebeke elektriği kullanımı ve enerji üretim sistemlerinin CO₂ salımları minimize edilerek büyük miktarda sosyal maliyet tasarrufu elde edilmiştir.

Oluşturalan model sağlık sektörü haricindeki diğer kamu, hizmet ve endüstri sektöründeki tesisler için de entegre edilebilmektedir. Elde edilen bu sonuçlar çerçevesinde hastane için oluşturulan sistem ile 2015 yılında yayımlanan Avrupa Birliği Enerji Birliği Çerçeve Stratejisi belgesi kapsamında belirtilen enerji tasarrufunun elde edilmesi, enerji arz güvenliğinin sağlanması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması ve sera gazı emisyonlarının azaltılması hedeflerine ulaşması konusunda önemli bir gösterge sunulmuştur (Url-28).

Tez çalışmasının ana yapı taşlarından enerji depolama sistemi olarak elektrikli araçlarda kullanım ömrünü tamamlamış yüzde 80 kapasitedeki Li-iyon bataryaların sabit depolama sistemi olarak kullanımı ile yüksek geri dönüşüm maliyetlerine karşı büyük bir ekonomik kazanç sağlanmaktadır. Böylece gelecekte büyük bir pazar payına sahip olacak elektrikli araçlardan çıkma bataryaların tekrardan kullanılması ile ülke ekonomisine fayda sağlayacak güç uygulamalarının önü açılmaktadır.

Hastane trijenerasyon mikro şebeke sisteminin alt bileşenlerinin farklı faydalı ömürleri göz önünde bulundurulduğunda sistem ömürünün 15 ile 20 yıl arasında olacağı tahmin edilmektedir. Sistemin geri ödeme süresinin 7 yıl olması ile sisteme yatırım yapılabileceği bir durum söz konudur. İnsan hayatından daha değerli birşey yoktur. Bu nedenle hastanelere bu yatırımın yapılması ile herhangi bir nedenden dolayı oluşabilecek elektrik kesintisi durumunda insan hayatının güvende tutulması için gerekli kritik elektrik, ısıtma ve soğutma yüklerinin güvence altına alınmış olacaktır. Ayrıca enerji ve CO₂ salımı tasarrufunun sağlanması ile hem ekonomik hemde çevresel fayda sağlanabilecektir.

Tez çalışmasında, hastanenin mimarisi trijenerasyon mikro şebeke sisteminin kurulması için uygun tasarım kriterlerini karşıladığı varsayılmaktadır. Hastane mikro şebeke sisteminin enerji optimizasyonu ve yönetimi üzerine gelecekte yapılacak çalışmalarda, hastanenin bulunduğu bölgenin özelliklerine uygun olarak gerekli enerji kaynağının seçilmesi, sistemin boyutlandırılması ve sistem tasarımının optimizasyonu çalışmaları yapılabilir.

Bu çalışmada elde edilen toplam tasarruf miktarı, net nakit akışı olarak kabul edilmiştir. Hastane mikro şebeke sisteminin ilk yatırım maliyetinden yola çıkarak geri ödeme süresi hesaplanmıştır. Yaşam döngüsü maliyet analizi ile hastanenin ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin dahil edilerek net tasarruf miktarının optimize edilmesi amacıyla daha kapsamlı yatırım fizibilitesi çalışmaları yapılabilir. Diğer yandan mikro şebeke sisteminde kullanılan güç kaynakları ve enerji depolama sistemlerinin kapasitelerinin optimizasyonu ve enerji arbitrajı modele dâhil edilerek mikro şebeke yatırım problemlerinin kapsamı genişletilebilir.

Gelecek yıllarda dünya çapında elektrikli araçların sayısında büyük bir artış beklenmektedir. Buna bağlı olarak enerji depolama sistemleri piyasasında kapasitesini büyük oranda koruyan atık durumunda EV bataryalarda artış meydana gelecektir. Böylece dünya çapında atık batarya piyasasının oluşması söz konusudur. Yakın zamanda bataryaların geri dönüşüm maliyetlerinde düşüş beklenmediği için kapasitesini büyük oranda koruyan Li-iyon EV bataryaların sabit depolama sistemi olarak kullanılması çalışmaları giderek artacaktır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda trijenerasyon mikro şebeke sisteminde enerji depolama sistemlerinin sağladığı faydaların daha iyi gözlemlenebilmesi için enerji depolama sistemlerinin sisteme entegre edildiği ve edilmediği durumların karşılaştırılması yapılabilir.

Tez çalışmasında, Türkiye’de karbon vergilendirme sistemi ve karbon piyasası olmadığı için CO₂ salımının sosyal maliyeti olarak sabit bir değer kullanılmıştır. İlerleyen yıllarda bu sistem ve piyasaların oluşması ile CO₂ salımının azaltılması ile elde edilen tasarruf miktarının hesaplanması daha gerçekçi olacaktır.

Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi’nde 2021 yılındaki CO₂ fiyatı artarak gün içi piyasasında rekor seviyeye ulaşmıştır (Url-29). Hastane trijenerasyon mikro şebeke sisteminin sağladığı yüksek emisyon kazancı ile elde edilen tasarruf miktarı daha da artacağı için karbon piyasalarının ve vergilerinin optimizasyon modeline eklendiği çalışmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

- Akbari, K., Nasiri, M. M., Jolai, F. ve Ghaderi, S. F.** (2014). Optimal investment and unit sizing of distributed energy systems under uncertainty: A robust optimization approach. *Energy and Buildings*, 85, pp. 275-286.
- Akter, M. N., Mahmud, M. A., Haque, M. E. ve Oo, A. M. T.** (2020). An optimal distributed energy management scheme for solving transactive energy sharing problems in residential microgrids. *Applied Energy*, 270, 115133.
- Alotaibi, D. M., Akrami, M., Dibaj, M. ve Javadi, A. A.** (2019). Smart energy solution for an optimised sustainable hospital in the green city of NEOM. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 35, pp. 32-40.
- Amrollahi, M. H. ve Bathaee, S. M. T.** (2017). Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind generation together with energy storage system in a stand-alone micro-grid subjected to demand response. *Applied Energy*, 202, pp. 66-77.
- Andwari, A. M., Pesiridis, A., Rajoo, S., Martinez-Botas, R. ve Esfahanian, V.** (2017). A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, pp. 414-430.
- Aneke, M. ve Wang, M.** (2016). Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. *Applied Energy*, 179, pp. 350-377.
- Anglani, N., Oriti, G. ve Colombini, M.** (2017). Optimized Energy Management System to Reduce Fuel Consumption in Remote Military Microgrids. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(6), pp. 5777-5785.
- API Energy.** (2019). Research Study On Reuse And Recycling Of Batteries Employed In Electric Vehicles: The Technical, Environmental, Economic, Energy And Cost Implications Of Reusing And Recycling EV Batteries.
- Arani, A. A. K., Gharehpetian, G. B. ve Abedi, M.** (2019). Review on Energy Storage Systems Control Methods in Microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 107, pp. 745-757.
- Arani, A. A. K., Karami, H., Gharehpetian, G. B. ve Hejazi, M. S. A.** (2017a). Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, pp. 9-18.
- Arani, A. A. K., Zaker, B. ve Gharehpetian, G. B.** (2017b). A Control Strategy for Flywheel Energy Storage System for Frequency Stability Improvement in Islanded Microgrid. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 13, pp. 10-21.

- Arriaga, M., Nasr, E. ve Rutherford, H.** (2017). Renewable Energy Microgrids in Northern Remote Communities. *IEEE Potentials*, 36(5), pp. 22-29.
- Baker, J.** (2008). New technology and possible advances in energy storage. *Energy Policy*, 36(12), pp. 4368-4373.
- Bagnasco, A., Catanzariti, R., Coppi, L., Fresi, F., Silvestro, F. ve Vinci, A.** (2017). Multi facility energy monitoring in medical structures: Defining KPIs for energy saving and exporting best practices. *International Journal of Heat and Technology*, 35, pp. 214-220.
- Barbaro, M. ve Castro, R.** (2020). Design optimisation for a hybrid renewable microgrid: Application to the case of Faial island, Azores archipelago. *Renewable Energy*, 151, 434-445.
- Bonfiglio, A., Barillari, L., Brignone, M., Delfino, F., Pampararo, F., Procopio, R., Rossi, M., Bracco, S. ve Robba, M.** (2013). An optimization algorithm for the operation planning of the University of Genoa smart polygeneration microgrid. *2013 IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control - IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid*, pp. 1-8.
- Bornapour, M., Hooshmand, R.-A., Khodabakhshian, A. ve Parastegari, M.** (2016). Optimal coordinated scheduling of combined heat and power fuel cell, wind, and photovoltaic units in micro grids considering uncertainties. *Energy*, 117, pp. 176-189.
- Bornapour, M., Hooshmand, R.-A., Khodabakhshian, A. ve Parastegari, M.** (2017). Optimal stochastic coordinated scheduling of proton exchange membrane fuel cell-combined heat and power, wind and photovoltaic units in micro grids considering hydrogen storage. *Applied Energy*, 202, pp. 308-322.
- Bosisio, A., Moncecchi, M., Cassetti, G. ve Merlo, M.** (2019). Microgrid design and operation for sensible loads: Lacor hospital case study in Uganda. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 36, 100535.
- Boyden, A.** (2016). The Environmental Impacts of Recycling Portable Lithium-Ion Batteries. *Procedia CIRP*, 48, pp. 188-193.
- Bronin, S. C.** (2010). Curbing Energy Sprawl with Microgrids. *Connecticut Law Review*. 43(2), pp. 547-583
- Cagnano, A., De Tuglie, E. ve Mancarella, P.** (2020). Microgrids: Overview and guidelines for practical implementations and operation. *Applied Energy*, 258, 114039.
- Carnegie, R., Gotham, D., Nderitu, D. ve Preckel, P. V.** (2013). Utility Scale Energy Storage Systems Benefits, Applications, and Technologies. State Utility Forecasting Group. Erişim adresi:
<https://www.purdue.edu/discoverypark/energy/assets/pdfs/SUFG/publications/SUFG%20Energy%20Storage%20Report.pdf>
- Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y. ve Ding, Y.** (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3), pp. 291-312.

- Chowdhury, S., Chowdhury, S.P. ve Crossley, P.** (2009). Microgrids and Active Distribution Networks. London: The Institute of Engineering and Technology. pp 10-11
- Christiansen, N., Kaltschmitt, M. ve Dzukowski, F.** (2016). Electrical energy consumption and utilization time analysis of hospital departments and large scale medical equipment. *Energy and Buildings*, 131, pp. 172-183.
- Christiansen, N., Kaltschmitt, M., Dzukowski, F. ve Isensee, F.** (2015). Electricity consumption of medical plug loads in hospital laboratories: Identification, evaluation, prediction and verification. *Energy and Buildings*, 107, pp. 392-406.
- Comodi, G., Giantomassi, A., Severini, M., Squartini, S., Ferracuti, F., Fonti, A., Nardi Cesarini, D., Morodo, M. ve Polonara, F.** (2015). Multi-apartment residential microgrid with electrical and thermal storage devices: Experimental analysis and simulation of energy management strategies. *Applied Energy*, 137, pp. 854-866.
- Costa, A. ve Fichera, A.** (2014). A mixed-integer linear programming (MILP) model for the evaluation of CHP system in the context of hospital structures. *Applied Thermal Engineering*, 71(2), pp. 921-929.
- Cusenza, M. A., Guarino, F., Longo, S., Ferraro, M. ve Cellura, M.** (2019). Energy and environmental benefits of circular economy strategies: The case study of reusing used batteries from electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 25, 100845.
- Çetinbaş, İ., Tamyurek, B. ve Demirtaş, M.** (2019). Design, Analysis and Optimization of a Hybrid Microgrid System Using HOMER Software: Eskişehir Osmangazi University Example. *International Journal of Renewable Energy Development*, 8, pp. 65-79.
- Daldal, N.** (2019). Manuel Jeneratörün Otomatik Jeneratöre Dönüştürülmesi ve Uzaktan İzleme. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7, s. 755-764.
- Dangond, J. D. A., Pantoja, I. O., Soto, J. D., Solano, L. R. ve López, L.** (2020). A Review of Use of non-Conventional Renewable Energies in Healthcare Facilities and Hospitals. *2020 IEEE ANDESCON*, pp. 1-6.
- Davidson, A., Binks, S. ve Gediga, J.** (2016). Lead industry life cycle studies: Environmental impact and life cycle assessment of lead battery and architectural sheet production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(11), pp. 1624-1636.
- Dawoud, S. M., Lin, X. ve Okba, M. I.** (2018). Hybrid renewable microgrid optimization techniques: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp. 2039-2052.
- Dawson, A. R., Dehdezi, P. K., Hall, M. R., Wang, J. ve Isola, R.** (2012). Enhancing thermal properties of asphalt materials for heat storage and transfer applications. *Road Materials and Pavement Design*, 13(4), pp. 784-803.

- Dehghani-Sanij, A. R., Tharumalingam, E., Dusseault, M. B. ve Fraser, R.** (2019). Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, pp. 192-208.
- Del Pero, C., Aste, N., Paksoy, H., Haghighat, F., Grillo, S. ve Leonforte, F.** (2018). Energy storage key performance indicators for building application. *Sustainable Cities and Society*, 40, pp. 54-65.
- Diaz-Gonzalez, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O. ve Bianchi, F. D.** (2013). Energy harlowmanagement of flywheel-based energy storage device for wind power smoothing. *Applied Energy*, 110, pp. 207-219.
- Divshali, P. H., Hosseinian, S. H. ve Abedi, M.** (2013). A novel multi-stage fuel cost minimization in a VSC-based microgrid considering stability, frequency, and voltage constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(2), pp. 931-939.
- Dufo-López, R., Pérez-Cebollada, E., Bernal-Agustín, J. L. ve Martínez-Ruiz, I.** (2016). Optimisation of energy supply at off-grid healthcare facilities using Monte Carlo simulation. *Energy Conversion and Management*, 113, pp. 321-330.
- Element Energy.** (2019). Batteries on wheels: the role of battery-electric cars in the EU power system and beyond. Erişim adresi:
https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2019_06_Element_Energy_Batteries_on_wheels_Public_report.pdf
- Engel, H., P. Hertzke ve G. Siccardo.** (2019). Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage. Erişim adresi:
<https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/second-life-ev-batteries-the-newest-value-pool-in-energy-storage>
- Erdoğan O., Uzunoğlu M. ve Vural B.** (2011). Hibrit Alternatif Enerji Sistemlerinde Kullanılan Enerji Depolama Üniteleri. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, (s. 116-121). Elazığ: Fırat Üniversitesi, Ekim 5-7.
- Falk, J., Nedjalkov, A., Angelmahr, M. ve Schade, W.** (2020). Applying Lithium-Ion Second Life Batteries for Off-Grid Solar Powered System-A Socio-Economic Case Study for Rural Development Lithium-Ionen-Batterien in zweiter Lebensdauer für netzunabhängige Solaranlagen – Eine sozioökonomische Fallstudie für die ländliche Entwicklung. *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 44.
- Feldman, D., Ramasamy, V., Fu, R., Ramdas, A., Desai, J. ve Margolis, R.** (2021). U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2020. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A20-77324. Erişim adresi: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/77324.pdf>
- Fleuchaus, P., Godschalk, B., Stober, I. ve Blum, P.** (2018). Worldwide application of aquifer thermal energy storage – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, pp. 861-876.

- Foley, A. ve Díaz Lobera, I.** (2013). Impacts of compressed air energy storage plant on an electricity market with a large renewable energy portfolio. *Energy*, 57, pp. 85-94.
- Fontenot, H. ve Dong, B.** (2019). Modeling and control of building-integrated microgrids for optimal energy management – A review. *Applied Energy*, 254, 113689.
- Gandoman, F. H., Jaguemont, J., Goutam, S., Gopalakrishnan, R., Firouz, Y., Kalogiannis, T., Omar, N. ve Van Mierlo, J.** (2019). Concept of reliability and safety assessment of lithium-ion batteries in electric vehicles: Basics, progress, and challenges. *Applied Energy*, 251, 113343.
- Garmabdari, R., Moghimi, M., Yang, F., Gray, E. ve Lu, J.** (2017). Battery energy storage capacity optimisation for grid-connected microgrids with distributed generators. *2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp. 1-6.
- Garmabdari, Rasoul, Moghimi, M., Yang, F., Gray, E. ve Lu, J.** (2020). Multi-objective energy storage capacity optimisation considering Microgrid generation uncertainties. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 119, 105908.
- Ghaem Sigarchian, S., Malmquist, A. ve Martin, V.** (2018). Design Optimization of a Complex Polygeneration System for a Hospital. *Energies*, 11, 1071.
- GTM Research** (2016). US Microgrid Tracker Q3.
- Guney, M. S. ve Tepe, Y.** (2017). Classification and assessment of energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1187-1197.
- Gupta, A. ve Bais, A. S.** (2017). Microgrid Market Growth Potential - Industry Size Outlook Report 2024 (Rapor No. GMI1187). Global Market Insights.
- Güven, D.** (2019). *Verimliliği Düşmüş Bataryaların Hizmet Sektöründe Kullanımı: Akıllı Tesis Uygulaması* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Hannan, M. A., Tan, S. Y., Al-Shetwi, A. Q., Jern, K. P. ve Begum, R. A.** (2020). Optimized controller for renewable energy sources integration into microgrid: Functions, constraints and suggestions. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120419.
- Harlow, J., Ma, X., Li, J., Logan, E., Liu, Y., Zhang, N., Ma, L., Glazier, S., Cormier, M., Genovese, M., Buteau, S., Cameron, A., Stark, J. ve Dahn, J.** (2019). A Wide Range of Testing Results on an Excellent Lithium-Ion Cell Chemistry to be used as Benchmarks for New Battery Technologies. *Journal of The Electrochemical Society*, 166, pp. 3031-3044.
- Hartmann, B. ve Dan, A.** (2012). Cooperation of a Grid-Connected Wind Farm and an Energy Storage Unit—Demonstration of a Simulation Tool. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 3(1), pp. 49-56.
- Hazotte, C., Leclerc, N., Meux, E. ve Lapique, F.** (2016). Direct recovery of cadmium and nickel from Ni-Cd spent batteries by electroassisted

leaching and electrodeposition in a single-cell process. *Hydrometallurgy*, 162, pp. 94-103.

- Helal, S. A., Najee, R. J., Hanna, M. O., Shaaban, M. F., Osman, A. H. ve Hassan, M. S.** (2017). An energy management system for hybrid microgrids in remote communities. *2017 IEEE 30th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, pp. 1-4.
- Hirsch, A., Parag, Y. ve Guerrero, J.** (2018). Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 402-411.
- Ho, W. S., Macchietto, S., Lim, J. S., Hashim, H., Muis, Z. Ab. ve Liu, W. H.** (2016). Optimal scheduling of energy storage for renewable energy distributed energy generation system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, pp. 1100-1107.
- Hossain, E., Kabalci, E., Bayindir, R. ve Perez, R.** (2014). Microgrid testbeds around the world: State of art. *Energy Conversion and Management*, 86, pp. 132-153.
- Hossain, E., Murtaugh, D., Mody, J., Faruque, H. M. R., Sunny, M. S. H. ve Mohammad, N.** (2019). A Comprehensive Review on Second-Life Batteries: Current State, Manufacturing Considerations, Applications, Impacts, Barriers Potential Solutions, Business Strategies, and Policies. *IEEE Access*, 7, pp. 73215-73252.
- Howard, B. ve Modi, V.** (2017). Examination of the optimal operation of building scale combined heat and power systems under disparate climate and GHG emissions rates. *Applied Energy*, 185, pp. 280-293.
- Hua, Y., Liu, X., Zhou, S., Huang, Y., Ling, H. ve Yang, S.** (2020). Toward Sustainable Reuse of Retired Lithium-ion Batteries from Electric Vehicles. *Resources, Conservation and Recycling*, 105249.
- Hussain, A., Bui, V.-H. ve Kim, H.-M.** (2019). Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience. *Applied Energy*, 240, pp. 56-72.
- IEA (International Energy Agency).** (2020). Global EV Outlook 2020. Erişim adresi: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>
- IEA (International Energy Agency).** (2012). World Energy Outlook 2012. Erişim adresi: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2012>
- IEA (International Energy Agency).** (2020). World Energy Outlook 2020. Erişim adresi: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
- Igalada, L., Corchero, C., Cruz-Zambrano, M. ve Heredia, F.-.** (2014). Optimal Energy Management for a Residential Microgrid Including a Vehicle-to-Grid System. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(4), pp. 2163-2172.
- Ilunga, G. M., Thompson, M., Obadlagbonyi, O. ve Grijalva, S.** (2019). Optimal Energy Storage-Grid Coordination for Hospitals: Prototype Development. *2019 North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1-6.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).** (2014). Annex II: Metrics & Methodology. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Iqbal, M., Azam, M., Naeem, M., Khwaja, A. S. ve Anpalagan, A.** (2014). Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, pp. 640-654.
- Isa, N. M., Das, H. S., Tan, C. W., Yatim, A. H. M. ve Lau, K. Y.** (2016). A techno-economic assessment of a combined heat and power photovoltaic/fuel cell/battery energy system in Malaysia hospital. *Energy*, 112, pp. 75-90.
- İmal, N. ve Kale, M. C.** (2013). Kesintisizlik Analizi İle Hastaneler İçin Elektrik Enerjisi Kalitesi İyileştirilmesi. *Elektrik Mühendisleri Odası III. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi*, İzmir: Kasım 21-24
- Jiang, J., Gao, W., Wei, X., Li, Y. ve Kuroki, S.** (2019). Reliability and cost analysis of the redundant design of a combined cooling, heating and power (CCHP) system. *Energy Conversion and Management*, 199, 111988.
- Jin, M., Feng, W., Liu, P., Marnay, C. ve Spanos, C.** (2017). MOD-DR: Microgrid optimal dispatch with demand response. *Applied Energy*, 187, pp. 758-776.
- Jirdehi, M. A., Tabar, V. S., Ghassemzadeh, S. ve Tohidi, S.** (2020). Different aspects of microgrid management: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 30, 101457.
- Jo, H.-C., Byeon, G., Kim, J.-Y., & Kim, S.-K.** (2020). Optimal Scheduling for a Zero Net Energy Community Microgrid with Customer-Owned Energy Storage Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 1-8.
- Kalliomäki, P.** (2010). Calculation of power and energy needs for heating of buildings. *National Building Code of Finland*, Part D, 5.
- Kamath, D., Shukla, S., Arsenault, R., Kim, H. C. ve Ancil, A.** (2020). Evaluating the cost and carbon footprint of second-life electric vehicle batteries in residential and utility-level applications. *Waste Management*, 113, pp. 497-507.
- Kandeeban, R., Saminathan, K., Manojkumar, K., Dilsha, C. G., & Krishnaraj, S.** (2020). Battery economy: Past, present and future. *Materials Today: Proceedings*.
Erişim Adresi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.238>
- Koirala, B. P., Koliou, E., Friege, J., Hakvoort, R. A. ve Herder, P. M.** (2016). Energetic communities for community energy: A review of key issues and trends shaping integrated community energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, pp. 722-744.
- Koohi-Fayegh, S. ve Rosen, M. A.** (2020). A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*, 27, 101047.

- Kumar, D., Rajouria, S. K., Kuhar, S. B. ve Kanchan, D. K.** (2017). Progress and prospects of sodium-sulfur batteries: A review. *Solid State Ionics*, 312, pp. 8-16.
- Kumar, K. P. ve Saravanan, B.** (2019). Day ahead scheduling of generation and storage in a microgrid considering demand Side management. *Journal of Energy Storage*, 21, pp. 78-86.
- Kurzweil, P.** (2010). Gaston Planté and his invention of the lead–acid battery-The genesis of the first practical rechargeable battery. *Journal of Power Sources*, 195(14), pp. 4424-4434.
- Lagrange, A., de Simón-Martín, M., González-Martínez, A., Bracco, S. ve Rosales-Asensio, E.** (2020). Sustainable microgrids with energy storage as a means to increase power resilience in critical facilities: An application to a hospital. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 119, 105865.
- Lee, Y.-G., Fujiki, S., Jung, C., Suzuki, N., Yashiro, N., Omoda, R., Ko, D.-S., Shiratsuchi, T., Sugimoto, T., Ryu, S., Ku, J., Watanabe, T., Park, Y., Aihara, Y., Im, D. ve Han, I.** (2020). High-energy long-cycling all-solid-state lithium metal batteries enabled by silver–carbon composite anodes. *Nature Energy*, 5, pp. 1-10.
- Liu, G., Starke, M., Xiao, B., Zhang, X. ve Tomsovic, K.** (2017). Microgrid optimal scheduling with chance-constrained islanding capability. *Electric Power Systems Research*, 145, 197-206.
- Luna, A. C., Diaz, N. L., Andrade, F., Graells, M., Guerrero, J. M. ve Vasquez, J. C.** (2015). Economic power dispatch of distributed generators in a grid-connected microgrid. *2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)*, pp. 1161-1168.
- Luna, A. C., Diaz, N. L., Graells, M., Vasquez, J. C. ve Guerrero, J. M.** (2017). Mixed-Integer-Linear-Programming-Based Energy Management System for Hybrid PV-Wind-Battery Microgrids: Modeling, Design, and Experimental Verification. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(4), pp. 2769-2783.
- Luo, X., Wang, J., Dooner, M. ve Clarke, J.** (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137, pp. 511-536.
- Mashayekh, S., Stadler, M., Cardoso, G. ve Heleno, M.** (2017). A mixed integer linear programming approach for optimal DER portfolio, sizing, and placement in multi-energy microgrids. *Applied Energy*, 187, pp. 154-168.
- Mathews, I., Xu, B., He, W., Barreto, V., Buonassisi, T. ve Peters, I. M.** (2020). Technoeconomic model of second-life batteries for utility-scale solar considering calendar and cycle aging. *Applied Energy*, 269, 115127.
- May, G. J., Davidson, A. ve Monahov, B.** (2018). Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*, 15, pp. 145-157.

- Mayyas, A., Steward, D. ve Mann, M.** (2019). The case for recycling: Overview and challenges in the material supply chain for automotive li-ion batteries. *Sustainable Materials and Technologies*, 19, e00087, pp. 1-12.
- Mazidi, M., Zakariazadeh, A., Jadid, S. ve Siano, P.** (2014). Integrated scheduling of renewable generation and demand response programs in a microgrid. *Energy Conversion and Management*, 86, pp. 1118-1127.
- Meena, N. K., Yang, J.ve Zacharis, E.** (2019). Optimisation framework for the design and operation of open-market urban and remote community microgrids. *Applied Energy*, 252, 113399.
- Melin, H. E.** (2019). State-of-the-Art in Reuse and Recycling of Lithium-Ion Batteries—A Research Review. Report Commissioned by The Swedish Energy Agency. Erişim adresi:
<https://www.energimyndigheten.se/globalassets/forskning--innovation/overgripande/state-of-theart-in-reuse-and-recycling-of-lithium-ion-batteries-2019.pdf>
- Mohammadi, S. ve Mohammadi, A.** (2014). Stochastic scenario-based model and investigating size of battery energy storage and thermal energy storage for micro-grid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 61, pp. 531-546.
- Molina, G. M.** (2010). Dynamic modelling and control design of advanced energy storage for power system applications. In V. B. Alisson, *Dynamic Modelling* (p. 52). Erişim adresi:
https://www.researchgate.net/publication/221906868_Dynamic_Modelling_and_Control_Design_of_Advanced_Energy_Storage_for_Power_System_Applications
- Mongird, K., Viswanathan, V., Balducci, P., Alam, J., Fotedar, V., Koritarov, V. ve Hadjerioua, B.** (2020). An Evaluation of Energy Storage Cost and Performance Characteristics. *Energies*, 13(13), 3307.
- Mongird, K., Fotedar, V., Viswanathan, V., Balducci, P., Alam, J., Koritarov, V. ve Hadjerioua, B.** (2019). Energy Storage Technology and Cost Characterization Report. Pacific Northwest National Laboratory, pp. 1–120. Erişim adresi:
[https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/07/f65/Storage Cost and Performance Characterization Report_Final.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/07/f65/Storage_Cost_and_Performance_Characterization_Report_Final.pdf). July
- Moradi, H., Esfahanian, M., Abtahi, A. ve Zilouchian, A.** (2018). Optimization and energy management of a standalone hybrid microgrid in the presence of battery storage system. *Energy*, 147, pp. 226-238.
- Morgenstern, P., Li, M., Raslan, R., Ruyssevelt, P. ve Wright, A.** (2016). Benchmarking acute hospitals: Composite electricity targets based on departmental consumption intensities? *Energy and Buildings*, 118, pp. 277-290.
- Mrabet, Z. E., Kaabouch, N., Ghazi, H. E. ve Ghazi, H. E.** (2018). Cyber-security in smart grid: Survey and challenges. *Computers & Electrical Engineering*, 67, pp. 469-482.

- Nadeem, F., Hussain, S. M. S., Tiwari, P. K., Goswami, A. K. ve Ustun, T. S.** (2019). Comparative Review of Energy Storage Systems, Their Roles, and Impacts on Future Power Systems. *IEEE Access*, 7, pp. 4555-4585.
- Navigant Research** (2016). Microgrid Deployment Tracker 4Q2016.
- Navigant Research** (2017). Microgrid Deployment Tracker 2Q2017.
- Navigant Research** (2018). Microgrid Deployment Tracker 4Q2018.
- Navigant Research** (2019). Microgrid Deployment Tracker 2Q2019.
- Nazir, H., Batool, M., Bolivar Osorio, F. J., Isaza-Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., Phelan, P., Inamuddin ve Kannan, A. M.** (2019). Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, pp. 491-523.
- Nelson, J. R. ve Johnson, N. G.** (2020). Model predictive control of microgrids for real-time ancillary service market participation. *Applied Energy*, 269, 114963.
- Nemati, M., Braun, M. ve Tenbohlen, S.** (2018). Optimization of unit commitment and economic dispatch in microgrids based on genetic algorithm and mixed integer linear programming. *Applied Energy*, 210, pp. 944-963.
- Newman, D.** (2015). Right-Sizing the Grid. *Mechanical Engineering*, 137(1), pp. 34-39.
- Nguyen, T. T., Martin, V., Malmquist, A. ve Silva, C.** (2017). A review on technology maturity of small scale energy storage technologies. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 2, pp. 36.
- Nugraha, P. Y., Widyotriatmo, A. ve Samsi, A.** (2016). Optimization of capacity and operational scheduling for microgrid system using two-stage stochastic linear programming. *2016 International Conference on Instrumentation, Control and Automation (ICA)*, pp. 178-183.
- Özder, Ö.** (2009). *Kobilerde Otomasyona Geçiş Sürecinde Tamsayılı Doğrusal Programlama Yöntemini Kullanarak Karar Verme* (Doktora tezi). Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Erzurum.
- Özel, F. ve Hançer, M. Z.** (2005). Hastanelerde İklimlendirme Sistemleri. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 89, s. 27-42
- Parag, Y. ve Ainspan, M.** (2019). Sustainable microgrids: Economic, environmental and social costs and benefits of microgrid deployment. *Energy for Sustainable Development*, 52, pp. 72-81.
- Parisio, A. ve Glielmo, L.** (2011). A mixed integer linear formulation for microgrid economic scheduling. *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, pp. 505-510.
- Pecenak, Z. K., Stadler, M., Mathiesen, P., Fahy, K. ve Kleissl, J.** (2020). Robust design of microgrids using a hybrid minimum investment optimization. *Applied Energy*, 276, 115400.

- Pena-Alzola, R., Sebastián, R., Quesada, J. ve Colmenar, A.** (2011). Review of flywheel based energy storage systems. *2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, pp. 1-6.
- Pourbehzadi, M., Niknam, T., Aghaei, J., Mokryani, G., Shafie-khah, M. ve Catalão, J. P. S.** (2019). Optimal operation of hybrid AC/DC microgrids under uncertainty of renewable energy resources: A comprehensive review. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 109, pp. 139-159.
- Purser, Matthew S.** (2014). A Technical and Economic Feasibility Study of Implementing a Microgrid at Georgia Southern University. *Electronic Theses and Dissertations*, 1087.
Erişim adresi: <https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/etd/1087>
- Rallo, H., Canals Casals, L., De La Torre, D., Reinhardt, R., Marchante, C. ve Amante, B.** (2020). Lithium-ion battery 2nd life used as a stationary energy storage system: Ageing and economic analysis in two real cases. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122584.
- Randall, T., Halford, D. ve Sam, C.** (2019). Tesla Model 3 Survey: Owners on Repairs, Battery Range, Service. Erişim adresi: <https://www.bloomberg.com/graphics/2019-tesla-model-3-survey/customer-service-battery.html>, accessed 22 April 2020.
- Rehman, S., Al-Hadhrami, L. M. ve Alam, Md. M.** (2015). Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, pp. 586-598.
- Reinhardt, R., Domingo, S. G., García, B. A. ve Christodoulou, I.** (2017). Macro environmental analysis of the electric vehicle battery second use market. *2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, pp. 1-6.
- Ricke, K., Drouet, L., Caldeira, K. ve Tavoni, M.** (2018). Country-level social cost of carbon. *Nature and Climate Change*, 8, pp. 895-900
- Rigo-Mariani, R., Chea Wae, S. O., Mazzoni, S. ve Romagnoli, A.** (2020). Comparison of optimization frameworks for the design of a multi-energy microgrid. *Applied Energy*, 257, 113982.
- Robert, F. C., Sisodia, G. S. ve Gopalan, S.** (2018). A critical review on the utilization of storage and demand response for the implementation of renewable energy microgrids. *Sustainable Cities and Society*, 40, pp. 735-745.
- Rohit, A. K. ve Rangnekar, S.** (2017). An overview of energy storage and its importance in Indian renewable energy sector: Part II – energy storage applications, benefits and market potential. *Journal of Energy Storage*, 13, pp. 447-456.
- Ruddell, A. J.** (2010). 11—Flywheel energy storage technologies for wind energy systems. J. K. Kaldellis (Ed.), *Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems* (pp. 366-392). Woodhead Publishing.

- Sabihuddin, S., Kiprakis, A. E. ve Mueller, M.** (2015). A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies. *Energies*, 8(1), pp. 172-216.
- Saini, A. K.** (2014). Benefit-Function of Two- Identical Cold Standby System subject to Failure due to Power Outage and Human Errors. *International Journal of Electrical, Electronics and Computer Systems*, 2(8), pp. 10-14.
- Salam, A., Mohamed, A. ve Hannan, M. A.** (2008). Technical Challenges of Microgrids. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3, pp. 64-69.
- Scrosati, B. ve Garche, J.** (2010). Lithium batteries: Status, prospects and future. *Journal of Power Sources*, 195(9), pp. 2419-2430.
- Seçkiner, S. U. ve Koç, A.** (2020). Energy applications and studies for healthcare facilities- a systematic literature review. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), pp. 838-859.
- Shukla, A. K., Banerjee, A., Ravikumar, M. K. ve Jalajakshi, A.** (2012). Electrochemical capacitors: Technical challenges and prognosis for future markets. *Electrochimica Acta*, 84, pp. 165-173.
- Silvente, J. ve Papageorgiou, L. G.** (2017). An MILP formulation for the optimal management of microgrids with task interruptions. *Applied Energy*, 206, pp. 1131-1146.
- Staff, T.** (2016, Ocak 26). Steinitz: Israel's Electric Authority hit by 'severe' cyber-attack. *The Times Of Israel*. Erişim adresi <https://www.timesofisrael.com/steinitz-israels-electric-authority-hit-by-severe-cyber-attack/>
- Sukumar, S., Mokhlis, H., Mekhilef, S., Naidu, K. ve Karimi, M.** (2017). Mix-mode energy management strategy and battery sizing for economic operation of grid-tied microgrid. *Energy*, 118, pp. 1322-1333.
- Sullivan, J. E. ve Kamensky, D.** (2017). How cyber-attacks in Ukraine show the vulnerability of the U.S. power grid. *The Electricity Journal*, 30(3), pp. 30-35.
- Sullivan, J. L. ve Gaines, L.** (2010). *A review of battery life-cycle analysis: State of knowledge and critical needs*. (ANL/ESD/10-7). Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States).
- Swaminathan, S., Pavlak, G. S. ve Freihaut, J.** (2020). Sizing and dispatch of an islanded microgrid with energy flexible buildings. *Applied Energy*, 276, 115355.
- Taylor, P. G., Bolton, R., Stone, D. ve Upham, P.** (2013). Developing pathways for energy storage in the UK using a coevolutionary framework. *Energy Policy*, 63, pp. 230-243.
- Teleke, S.** (2011). Energy storage overview: Applications, technologies and economical evaluation. *White Paper, Quanta Technology*. pp. 1-11.
- Tenfen, D. ve Finardi, E. C.** (2015). A mixed integer linear programming model for the energy management problem of microgrids. *Electric Power Systems Research*, 122, pp. 19-28.

- Thomas, D., Deblecker, O. ve Ioakimidis, C. S. (2018).** Optimal operation of an energy management system for a grid-connected smart building considering photovoltaics' uncertainty and stochastic electric vehicles' driving schedule. *Applied Energy*, 210, pp. 1188-1206.
- Ton, D. T. ve Smith, M. A. (2012).** The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative. *The Electricity Journal*, 25(8), pp. 84-94.
- Tu, T., Rajarathnam, G. P. ve Vassallo, A. M. (2019).** Optimization of a stand-alone photovoltaic–wind–diesel–battery system with multi-layered demand scheduling. *Renewable Energy*, 131, pp. 333-347.
- Tuttokmağ, Ö. ve Kaygusuz, A. (2019).** Büyük Ölçekli Elektrik Kesintilerinin İncelenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), s. 664-676.
- Tuukkanen, S. ve Krebs, M. (2016).** *Printable Power Storage: Batteries and Supercapacitors* (pp. 265-291). Erişim adresi: <https://doi.org/10.1201/b20043-9>
- Türkiye Sınai Kalkınma Bankası (TSKB) (2020).** Enerji Görünümü 2020. Erişim Adresi: <https://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji-sektor-gorunumu-2020.pdf>
- US Energy Information Administration (EIA). (2019).** International Energy Outlook 2019. Erişim adresi: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2019.pdf>
- V, A. K., Verma, A. ve Talwar, R. (2020).** Optimal techno-economic sizing of a multi-generation microgrid system with reduced dependency on grid for critical health-care, educational and industrial facilities. *Energy*, 208, 118248.
- Van der Schoor, T. ve Scholtens, B. (2015).** Power to the people: Local community initiatives and the transition to sustainable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, pp. 666-675.
- Vadana P., Rajinikandh ve Kottayil S. K. (2016)** Dynamic Energy Management on a Hydro-Powered Smart Microgrid. In: Suresh L., Panigrahi B. (eds) Proceedings of the International Conference on Soft Computing Systems. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 397. Springer, New Delhi. Erişim adresi: https://doi.org/10.1007/978-81-322-2671-0_60
- Vergara, P. P., López, J. C., da Silva, L. C. P. ve Rider, M. J. (2017).** Security-constrained optimal energy management system for three-phase residential microgrids. *Electric Power Systems Research*, 146, pp. 371-382.
- Vasconcelos J., Rueter S., He X., Chong E. ve Glachant J.-M. (2012).** Electricity storage: How to facilitate its deployment and operation in the EU. *Policy Brief*, pp.1-6.
- Walker, G. ve Devine-Wright, P. (2008).** Community renewable energy: What should it mean? *Energy Policy*, 36(2), pp. 497-500.

- Wang, W. ve Lu, Z.** (2013). Cyber security in the Smart Grid: Survey and challenges. *Computer Networks*, 57(5), pp. 1344-1371.
- Warneryd, M., Håkansson, M. ve Karltorp, K.** (2020). Unpacking the complexity of community microgrids: A review of institutions' roles for development of microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121. 109690
- Weber, A. Z., Mench, M. M., Meyers, J. P., Ross, P. N., Gostick, J. T. ve Liu, Q.** (2011). Redox flow batteries: A review. *Journal of Applied Electrochemistry*, 41(10), pp. 1137-1164.
- Wenxing W. ve Lu J.** (2013). Choice of micro-grid energy storage and its hybrid energy storage. *Power Supply Technology*, 37, pp. 1697-1699
- Wilberforce, T., Alaswad, A., Palumbo, A., Dassisti, M. ve Olabi, A. G.** (2016). Advances in stationary and portable fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(37), pp. 16509-16522.
- Wouters, C., Fraga, E. S. ve James, A. M.** (2015). An energy integrated, multi-microgrid, MILP (mixed-integer linear programming) approach for residential distributed energy system planning – A South Australian case-study. *Energy*, 85, pp. 30-44.
- Zacharia, L., Tziovani, L., Savva, M., Hadjidemetriou, L., Kyriakides, E., Bintoudi, A. D., Tsolakis, A., Tzovaras, D., Martinez-Ramos, J. L., Marano, A., Azzopardi, B., Martensen, N., Khiat, M., Onen, A. ve Al-Agtash, S.** (2019). Optimal Energy Management and Scheduling of a Microgrid in Grid-Connected and Islanded Modes. *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, pp. 1-6.
- Zangheri, P., Armani, R., Pietrobon, M., Pagliano, L., Boneta, M., Müller, A., Kockat, J., Rohde, C. ve Fraunhofer, I.** (2014). Heating and cooling energy demand and loads for building types in different countries of the EU.
- Zhang, C., Wei, Y.-L., Cao, P.-F. ve Lin, M.-C.** (2018). Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp. 3091-3106.
- Zhang, D., Evangelisti, S., Lettieri, P. ve Papageorgiou, L. G.** (2015). Optimal design of CHP-based microgrids: Multiobjective optimisation and life cycle assessment. *Energy*, 85, pp. 181-193.
- Zhang, D., Shah, N. ve Papageorgiou, L. G.** (2013). Efficient energy consumption and operation management in a smart building with microgrid. *Energy Conversion and Management*, 74, pp. 209-222.
- Zhang, J., Huang, L., Shu, J., Wang, H. ve Ding, J.** (2017). Energy Management of PV-diesel-battery Hybrid Power System for Island Stand-alone Micro-grid. *Energy Procedia*, 105, pp. 2201-2206.
- Zhang, L., Gao, W., Yang, Y. ve Qian, F.** (2020). Impacts of Investment Cost, Energy Prices and Carbon Tax on Promoting the Combined Cooling, Heating and Power (CCHP) System of an Amusement Park Resort in Shanghai. *Energies*, 13, 4252.

- Zhang, S. ve Pan, N.** (2015). Supercapacitors performance evaluation. *Advanced Energy Materials*, 5, 1401401.
- Zhang, Y. ve Jia, Q.-S.** (2016). Operational Optimization for Microgrid of Buildings with Distributed Solar Power and Battery. *Asian Journal of Control*, 19(3), pp. 996-1008.
- Zheng, Y., Jenkins, B. M., Kornbluth, K., Kendall, A. ve Træholt, C.** (2018). Optimization of a biomass-integrated renewable energy microgrid with demand side management under uncertainty. *Applied Energy*, 230, pp. 836-844.
- Zheng, Y., Jenkins, B. M., Kornbluth, K. ve Træholt, C.** (2018). Optimization under uncertainty of a biomass-integrated renewable energy microgrid with energy storage. *Renewable Energy*, 123, pp. 204-217.
- Zhu, X., Han, X., Qin, W. ve Wang, P.** (2015). Past, today and future development of micro-grids in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, pp. 1453-1463.
- Zia, M. F., Elbouchikhi, E. ve Benbouzid, M.** (2018). Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. *Applied Energy*, 222, pp. 1033-1055.
- Url-1**<https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean_documents/SOC%20documents/Regional_Groups_Continental_Europe/20150921_Black_Out_Report_v10_w.pdf>, Erişim tarihi 24.12.2020
- Url-2**<<https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2016/02/R42696.pdf>>, Erişim tarihi 24.12.2020
- Url-3**<<https://microgridknowledge.com/microgrid-drivers-schneider/>>, Erişim tarihi 24.12.2020
- Url-4**<<https://www.gminsights.com/industry-analysis/microgrid-market>>
- Url-5**<<https://energypost.eu/microgrids-from-niche-to-mainstream/>>
- Url-6**<<https://microgridknowledge.com/energy-as-a-service-microgrids>>
- Url-7**<<https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=77&t=11>>
- Url-8**< <https://www.bk.mufg.jp/report/indexpt2016/Microgrids.pdf>>
- Url-9**< https://www.hitachi.com/rev/archive/2017/r2017_05/Global/index.html>
- Url-10**<<https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS>>
- Url-11**<<https://microgridknowledge.com/ci-microgrids/>>

Url-12<<https://microgridknowledge.com/community-microgrids-with-energy-storage/>>

Url-13<<http://en.cnesa.org/latest-news/2020/5/28/cnesa-global-energy-storage-market-analysis-2020q1-summary>>

Url-14<<https://www.britannica.com/technology/fuel-cell>>

Url-15<<http://en.cnesa.org/latest-news/2020/5/28/cnesa-global-energy-storage-market-analysis-2020q1-summary>>

Url-16<<https://teknolojiProjeleri.com/elektronik/lityum-iyon-pil-nedir-nasil-calisir-ne-ise-yarar>>

Url-17<<https://theconversation.com/utilities-are-starting-to-invest-in-big-batteries-instead-of-building-new-power-plants-110961>> Erişim tarihi 26.02.2021

Url-18<https://batteryuniversity.com/learn/article/battery_recycling_as_a_business>

Url-19<<https://microgridknowledge.com/microgrids-in-hospitals/#:~:text=A%20microgrid%20can%20combine%20and,the%20surrounding%20grid%20goes%20down.>> Erişim tarihi 30.03.2021

Url-20<https://www.osiea.org/amplifying_voices/when-electricity-means-life-or-death-in-public-health-facilities/>

Url-21<<https://microgridknowledge.com/hospital-microgrid-options/>>

Url-22<https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=998-20624705>

Url-23<https://www.emo.org.tr/ekler/505c46adf12b8c3_ek.pdf> Erişim tarihi 31.03.2021

Url-24<<https://businessjargons.com/assumptions-of-linear-programming.html>> Erişim tarihi 06.04.2021

Url-25<https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html>

Url-26

<<https://www.cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/environmental/appendix/air.html>>, Erişim tarihi: 20.04.2021

Url-27<<https://tr.investing.com/central-banks/>>, Erişim tarihi: 20.04.2021

Url-28<<https://www.ab.gov.tr/p.php?e=80>>, Erişim tarihi: 29.04.2021

Url-29<<https://balkangreenenergynews.com/eu-carbon-price-surpasses-eur-43-to-reach-new-record/>>, Erişim tarihi: 01.05.2021





EKLER

EK A: Modelin Excel Solver programındaki ekran görüntüleri



[illegible]

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Anıl Doğan

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü