

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**VERİMLİLİĞİ DÜŞMÜŞ BATARYALARIN HİZMET SEKTÖRÜNDE  
KULLANIMI:  
AKILLI TESİS UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Denizhan GÜVEN**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı  
Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**HAZİRAN 2019**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**VERİMLİLİĞİ DÜŞMÜŞ BATARYALARIN HİZMET SEKTÖRÜNDE  
KULLANIMI:  
AKILLI TESİS UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Denizhan GÜVEN  
(301161009)**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı  
Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Özgür KAYALICA**

**HAZİRAN 2019**



İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301161009 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Denizhan GÜVEN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “VERİMLİLİĞİ DÜŞMÜŞ BATARYALARIN HİZMET SEKTÖRÜNDE KULLANIMI: AKILLI TESİS UYGULAMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

**Jüri Üyeleri:**        **Prof. Dr. Ensar YILMAZ** .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Ü. Burak BARUTÇU** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi**        :   **2 Mayıs 2019**

**Savunma Tarihi**     :   **13 Haziran 2019**



*Aileme,*







## ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam sırasında her türlü konuda değerli zamanını bana ayıran, desteğini hiçbir şekilde esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. M. Özgür Kayalica'ya çok teşekkür ederim. Bütün bilgi birikimini ve engin tecrübesini her fırsatta benimle paylaşan Prof. Dr. Gülgün Kayakutlu hocama ve yazılım konusunda desteğini esirgemeyen Öğr. Gör. Dr. Ali Aydeniz hocama teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca en umutsuzluğa kapıldığım anlarımda yanımda olan, desteklerini her zaman hissettiren ve aldığım her kararda arkamda olduğunu bildiğim aileme sonsuz teşekkür ederim.

Mayıs 2019

Denizhan GÜVEN  
Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ .....	vii
KISALTMALAR .....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET .....	xix
SUMMARY .....	xxiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Tezin Amacı ve Önemi .....	1
1.2. Tezin Organizasyonu .....	2
<b>2. TEMEL KAVRAMLAR .....</b>	<b>5</b>
2.1. Mikro Şebekeler.....	5
2.1.1. Kampüs/kuruluş bünyesindeki mikro şebekeler .....	13
2.1.2. Uzak ana şebekeden bağımsız mikro şebekeler .....	14
2.1.3. Ticari ve endüstriyel mikro şebekeler .....	15
2.1.4. Diğer mikro şebekeler .....	16
2.2. Enerji Depolama Teknolojileri.....	17
2.2.1. Mekanik enerji depolama .....	22
2.2.1.1. Volanlar (Fly-wheels) .....	23
2.2.1.2. Hazneli pompalı hidro enerji depoları (PHES) .....	24
2.2.1.3. Basınçlı hava enerji sistemleri (CAES).....	25
2.2.1.4. Yerçekimi enerjisi depolama sistemleri (GPM).....	25
2.2.1.5. Sıvı pistonlu enerji depolama sistemleri (LPES) .....	26
2.2.2. Termal enerji depolama (TES).....	26
2.2.3. Elektrokimyasal enerji depolama (EESS).....	29
2.2.3.1. Süper kapasitörler .....	29
2.2.3.2. Bataryalar .....	30
2.2.4. Süper iletken manyetik enerji depolama (SMES).....	35
2.2.5. Kimyasal enerji depolama .....	36
2.2.6. Kriyojenik enerji depolama.....	36
2.3. Depolama Sistemlerinin Karşılaştırılması .....	36
2.3.1. Enerji ve güç yoğunluğu .....	37
2.3.2. Ömür ve çevrim sayısı .....	38

2.3.3. Depolama kapasitesi ve depolama süresi .....	38
2.3.4. Çevrim verimliliği .....	39
2.3.5. Tepki süresi .....	40
2.3.6. Kendi kendine boşalma oranı .....	40
2.3.7. Yatırım ve operasyon maliyeti .....	41
2.3.8. Teknolojik olgunluk .....	42
2.4. Enerji Depolama İçeren Mikro Şebekelerde Optimizasyon Çalışmaları.....	44
2.5. Hastane Yük Analizi Çalışmaları .....	51
2.6. Elektrikli Araçlarda Batarya Sistemleri.....	53
<b>3. KARAR DESTEK SİSTEMİ ÖNERİSİ.....</b>	<b>59</b>
3.1. Problemin Tanımı.....	59
3.2. Yöntem .....	61
3.3. Model .....	63
3.4. Veriler ve Varsayımlar .....	66
<b>4. ÇIKTI ANALİZLERİ.....</b>	<b>71</b>
4.1. Senaryo 1 .....	71
4.2. Senaryo 2.....	72
4.3. Senaryo 3.....	73
4.4. Senaryo 4.....	74
4.5. Senaryo 5.....	74
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>77</b>
5.1. Sonuçlar.....	77
5.2. Gelecek Çalışma Önerileri .....	78
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>81</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>97</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>105</b>

## KISALTMALAR

<b>ABD</b>	: Amerika Birleşik Devletleri
<b>AFC</b>	: Alkaline Fuel Cell (Alkalin Yakıt Pili)
<b>ARES</b>	: Advanced Rail Energy Storage
<b>BCHP</b>	: Biomass Combined Heat and Power (Biokütle kombineli Isı ve Güç Sistemleri)
<b>CAES</b>	: Compressed Air Energy Storage (Sıkıştırılmış Hava Enerji Depolama Sistemleri)
<b>CCHP</b>	: Combined Cooling Heat and Power (Kombine Soğutma Isıtma ve Güç Sistemleri)
<b>CHP</b>	: Combined Heat and Power (Kombine Isı ve Güç Sistemleri)
<b>CSP</b>	: Concentrated Solar Power (Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Santralleri)
<b>DLC</b>	: Double Layered Capacitor (Çift Katmanlı Kapasitör)
<b>DMFC</b>	: Direct Methanol Fuel Cell (Direkt Metanol Yakıt Pili)
<b>DoD</b>	: Depth of Discharge (Boşalma Derinliği)
<b>DOP</b>	: Doğrusal Olmayan Programlama
<b>DP</b>	: Doğrusal Programlama
<b>EDS</b>	: Enerji Depolama Sistemleri
<b>EES</b>	: Elektrokimyasal Enerji Depolama Sistemleri
<b>EPIAŞ</b>	: Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketi
<b>EV</b>	: Electrical Vehicle (Elektrikli Taşıt)
<b>EVYS</b>	: Enerji Verimliliği Yükümlülüğü Sistemi
<b>EYS</b>	: Enerji Yönetim Sistemi
<b>FC</b>	: Fuel Cell (Yakıt Hücresi)
<b>FES</b>	: Flywheel Energy Storage (Volan Enerji Depolama Sistemi)
<b>GPM</b>	: Gravitiy Power Modul (Yerçekimi Güç Modülü)
<b>HT-PEMFC</b>	: High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Yüksek Sıcaklıklı Proton Değişim Membran Yakıt Pili)
<b>IEA</b>	: International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
<b>KTDO</b>	: Karma Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama
<b>KTDP</b>	: Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama
<b>LAES</b>	: Liquid Air Energy Storage (Sıvı Havalı Enerji Depolama Sistemi)
<b>LHTES</b>	: Latent Heat Thermal Energy Storage (Gizli Isı Depolama Sistemi)
<b>LPES</b>	: Liquid-Piston Energy Storage (Sıvı Pistonlu Enerji Depolama Sistemi)
<b>MCFC</b>	: Molten Carbonate Fuel Cell (Erimiş Karbonat Yakıt Pili)
<b>MPC</b>	: Model Predictive Control (Model Tahmin Kontrolü)
<b>NPV</b>	: Net Present Value (Net Bugünkü Değer)
<b>PAFC</b>	: Phosphoric Acid Fuel Cell (Fosforik Asit Yakıt Pili)
<b>PCM</b>	: Phase Change Materials (Faz Değiştiren Materyaller)
<b>PEMFC</b>	: Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Proton Değişim Memb. YP)

<b>PHEV</b>	: Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Plug-in Hibrit Elektrikli Araç)
<b>PHEs</b>	: Pumped Hydro Energy Storage (Pompalı Hazneli Hidro Elektrik Depolama Sistemi)
<b>PTF</b>	: Piyasa Takas Fiyatı
<b>PV</b>	: Photovoltaik
<b>SC</b>	: Super capacitor (Süper kapasitör)
<b>SHTES</b>	: Sensible Heat Thermal Energy Storage (Duyulur Isı Depolama Sistemleri)
<b>SMES</b>	: Superconducting Magnetic Energy Storage (Süper İletken Manyetik Enerji Depolama Sistemi)
<b>SoC</b>	: State of Charge (Şarj Durumu)
<b>SOFC</b>	: Solid Oxide Fuel Cell (Katı Oksit Yakıt Pili)
<b>TES</b>	: Thermal Energy Storage (Isıl Enerji Depolama Sistemleri)
<b>UPS</b>	: Uninterruptible Power Supplies (Kesintisiz Güç Kaynağı)
<b>VRB</b>	: Vanadium Redox Battery (Vanadyum Redoks Batarya)
<b>YEK</b>	: Yenilenebilir Enerji Kaynağı



## SEMBOLLER

- $E_t^{CH}$  : Bataryayı depolamak için yönlendirilen enerji miktarı (kWh)  
 $E_t^{DCH}$  : Bataryadan çekilen enerji miktarı (kWh)  
 $E_t^{PVD}$  : Güneş panellerinde üretilip talebe yönlendirilen enerji miktarı (kWh)  
 $E_t^{PVB}$  : Güneş panellerinde üretilip bataryaya yönlendirilen enerji miktarı (kWh)  
 $E_t^{GD}$  : Şebekeden satın alınıp talebe yönlendirilen enerji miktarı (kWh)  
 $E_t^{GB}$  : Şebekeden satın alınıp bataryaya yönlendirilen enerji miktarı (kWh)  
 $D_t$  : Toplam enerji talebi (kWh)  
 $D_t^{crit}$  : Kritik enerji talebi (kWh)  
 $D_t^{sur}$  : Ameliyathaneler için enerji talebi (kWh)  
 $D_t^{icu}$  : Acil servis/yoğun bakım ünitesi için enerji talebi (kWh)  
 $D_t^{res}$  : Resisütasyon birimi için enerji talebi (kWh)  
 $P_t^{pur}$  : Şebekeden satın alınan enerjinin birim fiyatı (TL/kWh)  
 $r_t$  : Işıma seviyesi (kW/m<sup>2</sup>)  
 $A_{PV}$  : Güneş paneli alanı (m<sup>2</sup>)  
 $DoD_t$  : Batarya boşalma derinliği (%)  
 $SoC_t$  : Bataryadaki anlık enerji miktarı (kWh)  
 $C_{mnt}$  : Batarya işletme ve bakım birim fiyatı (TL/kWh)  
 $C_{capt}$  : Batarya maliyeti (TL)  
 $PPV$  : Güneş panellerinden birim enerji üretim maliyeti (TL/kWh)  
 $N$  : Batarya çevrim sayısı  
 $B_{cap}$  : Batarya depolama kapasitesi (kWh)  
 $B_{safety}$  : Batarya güvenli depolama seviyesi (kWh)  
 $\gamma$  : Batarya değer kaybının ne kadarının kontrollü yıpranma maliyeti ile ilişkili olduğu (%)  
 $k_{loss}$  : Batarya kendi kendine boşalma oranı (%)  
 $\eta_{dis}$  : Batarya deşarj verimlilik kat sayısı (%)  
 $\eta_{ch}$  : Batarya şarj verimlilik kat sayısı (%)  
 $\eta_{PV}$  : PV sisteminin toplam verimliliği (%)  
 $f_t^{mnt}$  : Batarya bakım ve işletme maliyeti (TL)  
 $f_t^{dep}$  : Batarya yıpranma maliyeti (TL)  
 $M_t^B$  : Bataryayla ilgili toplam maliyet (TL)  
 $M_t^{pur}$  : Şebekeden çekilen enerjinin maliyeti (TL)  
 $M_t^{PV}$  : Güneş panellerinden üretilen enerjinin maliyeti (TL)





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Yenilenebilir enerjiye dayalı mikro şebeke teknolojileri.....	11
Çizelge 2.2 : Konvansiyonel enerjiye dayalı mikro şebeke teknolojileri.....	11
Çizelge 2.3 : Mikro şebeke mimarileri ve karakteristikleri.....	13
Çizelge 2.4 : Kampüs tipi mikro şebeke uygulama örnekleri.....	14
Çizelge 2.5 : Ada tipi mikro şebeke uygulama örnekleri.....	15
Çizelge 2.6 : Ticari ve endüstriyel mikro şebeke uygulama örnekleri.....	16
Çizelge 2.7 : Enerji depolama sistemleri ve uygulama uygunlukları.....	21
Çizelge 2.8 : Enerji depolama teknolojilerinin teknik özelliklerinin karşılaştırılması.....	43
Çizelge 2.9 : Yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama ünitesi kullanılan mikro şebekelerde optimizasyon çalışmaları.....	50
Çizelge 3.1 : Hastane birimlerinin elektrik kesintisi/kesintisizlik yüzdeleri.....	60
Çizelge 3.2 : Karar değişkenleri ve açıklamaları.....	63
Çizelge 3.3 : Parametreler ve açıklamaları.....	64
Çizelge 3.4 : Üretim kaynağına bağlı gaz salınım miktarı.....	68
Çizelge 4.1 : Senaryo sonuçlarının özeti.....	77



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Tez akış şeması.....	3
Şekil 2.1 : Mikro şebeke yapısı örneği.....	5
Şekil 2.2 : 1984-2012 yılları arasında ABD’de rapor edilen hava şartlarına bağlı ve bağlı olmayan elektrik kesintilerinin yıllık sayıları.....	7
Şekil 2.3 : Avrupa’da enerji kaynağına bağlı mikro şebeke piyasa büyüklüğü.....	12
Şekil 2.4 : Lokasyon ve amaca göre mikro şebeke kurulumu.....	17
Şekil 2.5 : Enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması.....	22
Şekil 2.6 : Tipik bir volan depolama sisteminin kritik bileşenleri ve kesit görünüşü.....	23
Şekil 2.7 : Pompalı hazneli hidro enerji depolama sisteminin çalışma prensibi.....	24
Şekil 2.8 : Basınçlı hava enerji sistemlerinin çalışma prensibi.....	25
Şekil 2.9 : Termokimyasal ısı depolama süreci.....	27
Şekil 2.10 : Süper kapasitörün yapısı.....	30
Şekil 2.11 : Lityum-iyon pil çalışma prensibi.....	32
Şekil 2.12 : SMES sisteminin şematik diyagramı.....	35
Şekil 2.13 : Depolama teknolojilerinin enerji yoğunluğunun ve güç yoğunluğunun karşılaştırılması.....	37
Şekil 2.14 : Enerji depolama sistemlerinin boşalma sürelerinin karşılaştırılması.....	39
Şekil 2.15 : Küresel EV sayısı senaryoları.....	54
Şekil 2.16 : EV bataryalarının kapasite kaybı grafiği.....	55
Şekil 3.1 : Modelde kullanılan entegre sistemin yapısı.....	61
Şekil 3.2 : Saatlik enerji talebi grafiği.....	67
Şekil 3.3 : Saatlik güneş radyasyonu miktarı.....	68
Şekil 4.1 : Senaryo 1 için saatlik tasarruf/zarar grafiği.....	72
Şekil 4.2 : Senaryo 2 için saatlik tasarruf/zarar grafiği.....	73
Şekil 4.3 : Senaryo 3 için saatlik tasarruf/zarar grafiği.....	73
Şekil 4.4 : Senaryo 4 için saatlik tasarruf/zarar grafiği.....	74
Şekil 4.5 : Senaryo 5 için saatlik tasarruf/zarar grafiği.....	75



## VERİMLİLİĞİ DÜŞMÜŞ BATARYALARIN HİZMET SEKTÖRÜNDE KULLANIMI: AKILLI TESİS UYGULAMASI

### ÖZET

2030 yılı itibariyle dünyadaki elektrikli araç sayısının yaklaşık 220 milyon adete çıkacağı tahmin edilmektedir. Gün geçtikçe yaygınlaşan elektrikli araçların sayısına bağlı olarak kullanılan batarya sayısı da artmaktadır. Ancak, yapılan araştırmalara ve üretici garantisine göre elektrikli araçlarda kullanılan Lityum-iyon bataryalar, yaklaşık 8 yıl içinde kapasitelerinin yüzde 20'sini kaybetmektedirler ve bataryaların elektrikli araçlarda kullanımı sonlandırılmaktadır. Elektrikli araç sayısındaki artışla beraber oluşacak verimliliği düşmüş bataryaların tekrar değerlendirilmesi ise hem çevre hem de ekonomi için oldukça önemlidir.

Her geçen gün artan enerji tasarruf bilinci, verimli, çevreci, sürdürülebilir ve yüksek kaliteli enerji çözümlerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Halen enerji üretimi yüksek oranda fosil kaynaklara bağlıdır ve bu kaynaklar sınırlıdır. Bu durum ülkeler arasında enerji rekabetine neden olmaktadır. Bu nedenle, ülkeler ve şirketler daha sürdürülebilir bir enerji çeşidi olan yenilenebilir enerji kaynakları yatırımlarına başlamışlardır.

Ne yazık ki, yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlara olan ihtiyacı tamamen ortadan kaldıramamaktadır. En önemli sebebi ise kaynakların belirsizliklerinden dolayı enerji arzındaki dengesizlikleri, tahmin edilmesinin değişken ve zor olması gösterilmektedir. Sisteme eklenecek depolama sistemleri ile bu dengesizlikten doğacak enerji fazlası ve açığı dengelenebilmektedir. Ayrıca, gelişen teknolojileri ve düşen fiyatlarıyla enerji depolama sistemleri daha da yaygınlaşmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının depolama sistemleri ile olan entegrasyonu sonucu şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız mikro şebeke yapıları ortaya çıkmaktadır. Mikro şebeke sistemlerinin enerji üretim altyapısı, mikro şebekenin kurulması planlanan konumdaki mevcut olan kaynağın türüne bağlı olarak, yenilenebilir ve geleneksel kaynaklar olarak sınıflandırılan farklı türlerdeki enerji kaynaklarına dayanabilir. Bu sistemlerde yenilenebilir enerji; güneş, rüzgâr, hidrolik, biokütle ve jeotermal içerirken, geleneksel enerji kaynakları arasında buhar / gaz türbinleri, mikro türbinler, pistonlu içten yanmalı motorlar ve yakıt hücreleri bulunur.

Bu tür yenilenebilir enerji kaynağı ve depolama ünitesi içeren mikro şebekelerin birçok faydası vardır. Daha çevre dostu enerji üretimine olanak sağlaması, enerjide dışa bağımlılığın azaltılması, hem üretici hem de tüketici için maliyetin görece azalması, depolama ünitesi sayesinde hem kaliteli hem de kesintisiz enerji sağlanması ve yenilenebilir enerji kaynaklarındaki belirsizliğin azaltılması bu faydalar arasında sayılabilir.

Mikro şebekelerde kullanılacak EDS'lerin birbirlerine göre birçok avantajı ve dezavantajı bulunmaktadır. Hiçbir depolama sisteminin; güç sistemi uygulamalarının

bütün gereksinimlerini tek başına sağlaması mümkün değildir. Her bir depolama sisteminin kendine has farklı özellikleri vardır. Bu özelliklere uygun olarak, depolama sistemleri bazı uygulamalar için daha uygun olurken bazı uygulamalarda istenilen performansı gösterememektedirler. Kurulacak sistemin ihtiyaçlarını ve kısıtlarını karşılayacak teknolojik altyapı seçiminde önem arz eden kriterler göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu tezin amacı; insanlar için oldukça önemli bir hizmet binası olan hastanelerde, elektrik kesintilerinden ve enerji kalite problemlerinden kaynaklanacak sorunlara karşı kurulacak enerji depolama sisteminin önemini göstermektir. Hastanelerde yaşanan elektrik kesintilerinin insan hayatı üzerindeki olumsuz etkilerinin oluşturulan model ile en aza indirgenmesi sağlanacaktır. Bunun yanı sıra, en yaygın yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş panelleriyle üretim yapılan ve elektrikli araçlardan alınmış verimliliği düşmüş Lityum-iyon bataryalı enerji depolama ünitesinin hastanelerin enerji ihtiyacını, çizelgeleme modeline dayanarak en düşük maliyetle karşılayacak karar destek mekanizması tasarlamaktır. Tasarlanan sistem, hastane uygulamasına özel olarak çeşitli kısıtlar içermektedir. Bu kısıtlar göz önünde bulundurularak sistemdeki kritik yüklerin her zaman enerji taleplerinin karşılanması hedeflenmektedir. Geliştirilen çizelgeleme modelinin optimizasyonu ile saatlik olarak hangi kaynaktan ne kadar enerji alındığı ve nereye yönlendirildiği planlanmış olacaktır. Önerilen tasarım ile birlikte hastanedeki kritik yüklerin hiçbir şekilde enerjisiz kalmaması ve böylece hastanedeki operasyonların elektrik kesintilerinden ve elektrik kalitesi problemlerinden etkilenmemesinin yanı sıra hastane için elektrik maliyetinin azaltılması, depolama ünitesi ile enerji tasarrufu yapılması ve yenilenebilir enerji kaynağından yüksek oranda yararlanılması ile daha çevre dostu enerji üretimine katkı sağlanması hedeflenmektedir.

2016 yılına ait veriler kullanılarak oluşturulan çizelgeleme modeli, Excel Solver VBA programında doğrusal programlama modeli olarak kodlanmıştır. Yapılan araştırma sonucunda, hastaneler için en kritik üniteler olan yoğun bakım ünitelerinin, resüsitasyon ünitelerinin ve ameliyathanelerin yük miktarları bulunmuştur ve modele entegre edilmiştir. Kurulan modelin, 150 yataklı, 7 ameliyathaneli, 25 yataklı yoğun bakım ünitesi ve 4 resüsitasyon ünitesi olan bir hastanede uygulanması yapılmıştır. Bu kapsamda, hastanenin yatak kapasitesine bağlı olarak yıllık elektrik tüketimi hesaplanmış ve çeşitli katsayılar yardımıyla saatlik elektrik tüketimi bulunmuştur.

Kurulan model 5 farklı senaryo ile incelenerek sistemin tasarruf miktarları ve bataryaların deşarj sayıları karşılaştırılmıştır. Bunlara ek olarak, şebekeden çekilen enerjinin azalmasına bağlı bir senede ne kadar karbondioksit eşleniği doğrudan gaz emisyonu azaltılmasına katkı sağlandığı da verilmiştir. Tasarruf edilen bu miktarın ekonomik değeri, benzer kişi başına düşen milli gelir düzeyine sahip olan Meksika'daki karbon vergisi üzerinden ve Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi'ndeki değerlendirme üzerinden hesaplanmıştır.

İlk üç senaryoda, batarya dolmuş koşulu farklı piyasa takas fiyatlarına göre değerlendirilmiştir. Bu senaryolarda haftanın her günü ameliyat olduğu göz önünde bulundurulmuş ve bataryadaki enerji miktarının kritik yükleri en az bir saat elektriksiz bırakmaması kısıtı sağlanmıştır. Dördüncü senaryoda ise önceki üç senaryoya arasından en verimli temel alınarak, ameliyatların sadece hafta içi ve cumartesi günleri olduğu daha gerçekçi bir yaklaşım denenmiştir. En son senaryoda ise model,

dördüncü senaryodan farklı olarak depolama sistemindeki enerji kısıtı kritik yükleri en az iki saat destekleyecek kadar enerji bulunduracak şekilde çalıştırılmıştır.

Bu çalışmanın sonucunda, sisteme entegre edilen enerji depolama sisteminin, hastanedeki kritik öneme sahip elektrik yüklerini sürekli beslemesi sağlanmış, böylece insan hayatını riske edecek elektrik kesintilerinin önüne geçilmiştir. Bunun yanı sıra, güneş panellerinin ve batarya sistemlerinin koordinasyonu ile elektrik harcamalarından tasarruf sağlanmıştır. 23 Aralık 2016 tarihinde yaşanan elektrik kesintisinde ve olağanüstü artan elektrik fiyatlarına karşın, kurulan enerji depolama sistemi sayesinde hastane bu dönemde elektriksiz kalmamıştır. Bunun yanı sıra, bu süreçte yüksek elektrik fiyatlarına karşılık şebekeden temin edilen elektrik en düşük düzeyde tutulup depodaki elektrik kullanılarak oldukça yüksek miktarda tasarruf sağlandığı gözlenmiştir. Bu durum, enerji depolama sisteminin sadece hastaneler için değil birçok kamu kurumunun, hizmet ve endüstri tesisinin de enerji tasarrufu ve güvenliği için ne kadar önem arz ettiğinin oldukça çarpıcı bir göstergesidir.

Bu tezde önerilen sistemin ana yapısını meydana getiren EV'lerden alınan verimliliği düşmüş lityum-iyon bataryaların tekrardan ülkemiz içinde değerlendirilmesi sonucu, ülke ekonomisi önemli bir tasarruf kalemi daha elde etmektedir. İlk yaşam döngüsünü EV'lerde tamamlayan bataryaların, yüzde 80 kapasiteleri kullanılabilir durumda iken geri dönüşüme sokulması ülke ekonomisi için büyük bir kayıp olacaktır. Bataryaların yüksek geri dönüşüm maliyetlerinin yanında yurtdışından temin edilmelerinin de getirdiği yüksek kur maliyeti düşünüldüğünde, bataryaların sabit batarya olarak uzun yıllar boyunca hizmet etmesi ekonomimiz açısından da yararlı olacaktır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı hastane bölgeleri için o alana uygun diğer alternatif enerji kaynakları (rüzgar, biogaz vb.) ve şebekeye enerji satışı imkanı da bu sisteme eklenerek, ihtiyaca göre modelde değişikliğe gidilebilir; günümüzde henüz oluşmamış atık pil piyasasının oluşumu tamamlandıktan sonra, gelecekteki araştırmaların boyutu yatırım fizibilitesi yapmaya da olanak verecek şekilde genişletilebilir, sistemde kullanılan güneş panellerinin açılarının ay bazında optimum düzeylerinin belirlenmesiyle birlikte güneşten elde edilen enerji miktarı daha yüksek seviyelere çıkartılabilir ve ileride ülkemizde karbon vergilendirme sistemlerin ve/veya karbon piyasalarının kurulması ile daha gerçekçi ve güncel tasarruf miktarları hesaplanabilir.





## **USE OF REPURPOSED EV BATTERIES IN THE SERVICE SECTOR: A SMART FACILITY APPLICATION**

### **SUMMARY**

By the year 2030, it is estimated that the number of electric vehicles in the world will increase to approximately 220 million. Meanwhile, the number of batteries used in electric vehicles also increases. However, it is a well-known fact that the lithium-ion batteries used in electric vehicles lose 20 percent of their capacity in about 8 years and the use of batteries in electric vehicles is terminated. The re-use of the batteries, whose efficiency is diminished sufficient enough not to run the vehicles, is very important for both the environment and the economy in parallel with the increase in the number of electric vehicles.

Increasing energy demand necessitates the development of efficient, environmentally friendly, sustainable and high quality energy solutions. The energy produced is highly dependent on fossil sources and these resources are limited. This causes energy competition among countries. For this reason, countries and companies have started to invest in renewable energy resources, a more sustainable energy type.

However, renewable energy sources can not be a complete substitute for fossil fuels. The most important reasons are the imbalances in energy supply due to uncertainties of sources and difficulties to predict. With the storage systems to be added to the system, the energy surplus and the deficit arising from this imbalance can be balanced. In addition, energy storage systems are becoming more widespread with developing technologies and decreasing prices.

As a result of the integration of renewable energy sources with storage systems, on-grid or off-grid microgrid structures are emerging. The power generation infrastructure of micro-grid systems can be based on different types of energy sources classified as renewable and traditional sources, depending on the type of resource available at the planned location of the micro grid. While renewable energy systems include solar, wind, hydraulic, biomass and geothermal, the traditional sources of energy systems comprise steam/gas turbines, micro turbines, reciprocating internal combustion engines and fuel cells.

Micro grids including renewable energy sources and energy storage units have many benefits. These benefits include the reduction of the dependence on foreign energy, environment friendly energy production, the reduction of the cost for both the producer and the consumer, the provision of high quality and uninterrupted energy through the storage unit and the reduction of the uncertainty in renewable energy sources.

Energy Storage Systems that can be used in micro grids have many advantages and disadvantages compared to each other. None of the storage systems is able to provide all the requirements of power system applications alone. Each storage system has its own distinct features. In accordance with these features, storage systems are more

suitable for some applications, and in some applications they do not have the desired performance. Critical criterias should be taken into consideration when selecting the technological infrastructure to meet the needs and constraints of the system to be established.

The aim of this thesis is; to show the importance of the energy storage system to be installed against the problems that will arise from power outages and energy quality problems in hospitals, which is a very important service building for people. The negative effects of the power outages in hospitals on human life will be minimized by the model. In addition, another objective is to design a decision support mechanism based on the scheduling model to meet the lowest cost of a system containing solar panels, which are one of the most widely used renewable energy sources, and energy storage units which are repurposed Lithium-ion batteries from EVs. The designed system contains various constraints specific to the hospital application. Considering these constraints, it is aimed to meet the energy demands of the critical loads in the system at all times. With the optimization of the developed scheduling model, it will be planned how much energy is taken from the source and where it is directed. In addition to the proposed design, the critical loads in the hospital are not de-energized and thus the operations of the hospital are not affected by the power outages and electrical quality problems. As well as reducing the cost of electricity for the hospital, saving energy with the storage unit and high utilization of the renewable energy source are aimed.

The scheduling model created by using 2016 data was coded as linear programming model in Excel Solver VBA program. As a result of the research, electricity load amounts of intensive care units, resuscitation units and operating rooms which are the most critical units for hospitals were found and integrated into the model. The established model was run for a hospital with 150 beds, 7 operating rooms, 25 beds with intensive care units and 4 resuscitation units. In this context, annual electricity consumption was calculated depending on the bed capacity of the hospital and hourly electricity consumption was found with various coefficients.

The model was analyzed with 5 different scenarios and the saving amounts of the system and the discharge numbers of the batteries were compared. In addition, due to the decrease in the energy drawn from the grid, it is also stated that how much carbon dioxide equivalent in a year contributes to the reduction of the direct gas emissions. The economic value of this saving was calculated based on (i) the carbon tax in Mexico, which has a similar per capita income level, and (ii) the valuation in the European Union Emission Trading System.

In the first three scenarios, the battery charge condition was evaluated according to different market clearing prices. In these scenarios, it is assumed that the surgery operations are executed every day of the week, and the amount of energy in the battery is provided to prevent critical loads from being left without electricity for at least one hour. In the fourth scenario, a more realistic approach was attempted on the basis of the most efficient of the previous three scenarios, with surgery operations being only on weekdays and Saturdays. In the latest scenario, unlike the fourth scenario, the model was run in such a way that the energy constraint in the storage system contained enough energy to support critical loads for at least two hours.

As a result of this study, it was ensured that the energy storage system integrated in the system continuously feeds the critical electric loads in the hospital, thus preventing power outages that would risk human life. In addition, electricity expenditures were

reduced by the coordination of solar panels and battery systems. Despite the power outage and the remarkably increased electricity prices on 23 December 2016, the energy storage system provided the hospital enough electricity. In addition to this, it is observed that the electricity taken from the grid was kept at the lowest level in comparison to the high electricity prices, a considerable amount of saving is provided by using the electricity from the storage system. This is a striking indication of the importance of the energy storage system not only for hospitals, but also for many public institutions, services and industrial facilities for energy savings and security.

In this thesis, as a result of the re-use of the repurposed lithium-ion batteries, which constitute the main structure of the proposed system, the country economy obtains an important saving item. Recycling of batteries, which have completed their first life cycle in EVs, will be a great loss for the country's economy while 80 percent capacity is still available. Considering the high cost of foreign exchange, besides the high recycling costs of the batteries, it would be beneficial for our economy to serve as a fixed battery for many years.

In future studies, other suitable alternative energy sources (wind, biogas, etc.) for the location can be added to this system and the model can be changed according to the need. After the formation of the waste battery market, which has not yet established, is completed, the size of future researches can be extended to allow investment feasibility. By determining the optimum angles of the solar panels used in the system, the amount of energy obtained from the sun can be increased to higher levels. In the future, more realistic and updated savings can be calculated with the establishment of carbon taxation systems and / or carbon markets in our country.



# 1. GİRİŞ

## 1.1. Tezin Amacı ve Önemi

Günümüz dünyası elektrik arzında ve tüketiminde büyük bir değişim geçirmektedir. 1993 ve 2012 yılları karşılaştırıldığında enerji arz ve talebinin neredeyse yüzde 50 artmış olduğunu söyleyebiliriz. Bununla birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji 2500 TWh'ten 5000 TWh'e ulaşarak ikiye katlanmıştır (U.S. Energy Information Administration, 2015; BP, 2018). Geleneksel enerji sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) şebekeye girmesiyle birlikte, YEK'ten üretilen enerjinin tahmin edilmesinin zor ve değişken olması, kısıtlı iletim ve dağıtım sistemlerinin yeterli olmaması sonucu daha yüksek üretime izin vermemesi gibi bazı zorluklar yaşamaya başlanmıştır (Weitzel ve Glock, 2018). Yeni gelişmeler, Enerji Yönetim Sistemlerinin (EYS), enerji arzının ve talebini yönetimin daha esnek olmasını gerektirmektedir.

Arz ve talep arasındaki dengesizliği çözmekte Enerji Depolama Sistemleri (EDS) oldukça uygun bir çözüm olarak düşünülmektedir. Kurulacak sistemin hem ekonomik hem de teknik olarak uygulanabilir olması için iyi kurgulanmış bir operasyon modeline gereksinim vardır. İyi tasarlanmış bir operasyon modeli, uygun maliyetli ve yüksek verimlilikte güvenilir bir entegre enerji sistemini sunmaktadır (Chauhan ve Saini, 2014).

Bu tezde amaç, hayati öneme sahip hastanelerde, elektrik kesintilerinden ve enerji kalite problemlerinden kaynaklanacak sorunlara karşı enerji depolama sisteminin önemini göstermektir. Bunun sağlanması için, yenilenebilir enerji kaynağı ve depolama birimi içeren bir sistem için operasyon ve çizelgeleme optimizasyonu yapılarak hastane yüklerine özel olarak karar destek mekanizması geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Önerilen tasarım ile:

- Hastane için elektrik maliyetinin azaltılması,
- Depolama ünitesi ile enerji tasarrufu yapılması,
- Yenilenebilir enerji kaynağından yüksek oranda yararlanılması ile daha çevre dostu enerji üretimine katkı sağlanması,
- Hastanedeki kritik yüklerin hiçbir şekilde enerjisiz kalmaması hedeflenmektedir.

## 1.2. Tezin Organizasyonu

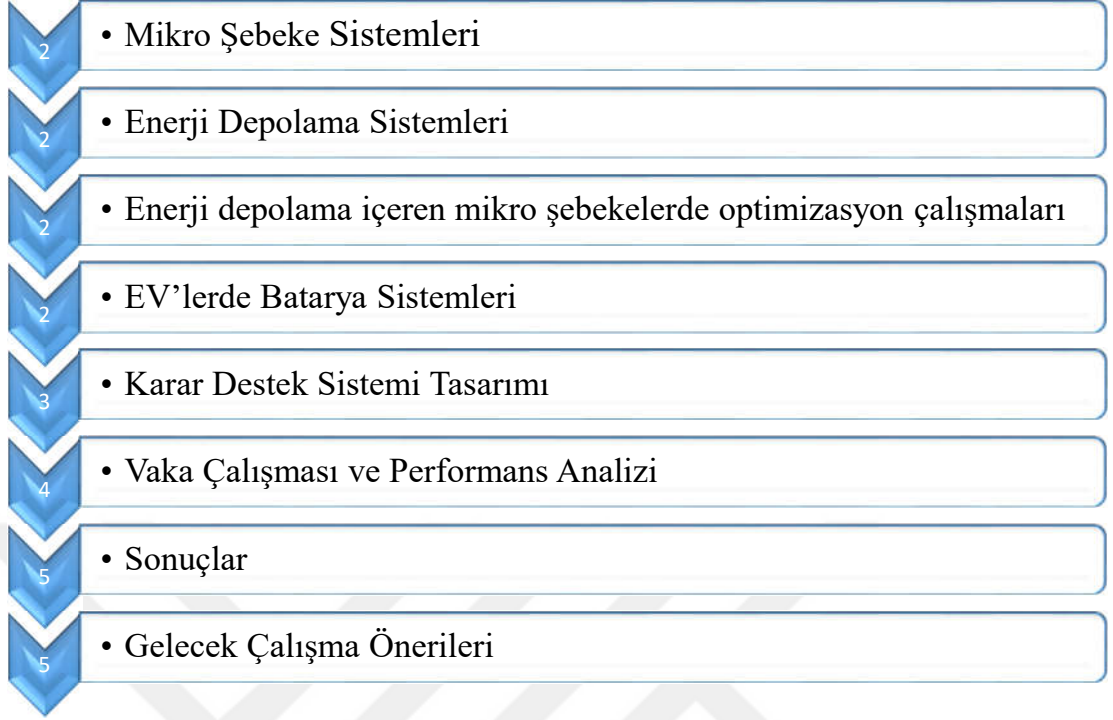
Akış şeması Şekil 1.1’de verilmiş olan tezde, ilk olarak mikro şebeke sistemlerinin özellikleri, tipleri ve kriterleri üzerinde durulmuştur. Mikro şebekelerin faydaları ve uygulama aşamasında karşılaştıkları sorunlar belirtilmiş, farklı tipteki mikro şebeke örnekleri verilmiş ve gelecekteki durumları anlatılmıştır. İkinci temel kavram olarak enerji depolama sistemleri incelenmiştir. Enerji depolama seçenekleri arasında seçim kriterleri, birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Daha sonra mikro şebeke sistemleri ve enerji depolama sistemlerinin literatürdeki optimizasyon çalışmaları incelenmiştir. Bu çalışmalar; yönteme, depolama sistemi tipine, enerji kaynaklarına ve problem tipine göre kategorize edilip tablo halinde gösterilmiştir.

Bu bölümde ayrıca elektrikli araçlarda kullanılan batarya sistemleri, özellikleri ve gelecekteki potansiyel uygulamaları üzerinde durulmuş ve böylece üçüncü bölümde kurulacak olan karar destek sistemine zemin oluşturulmuştur.

Üçüncü bölümde problem tanımına bağlı olarak karar destek sistemi anlatılmıştır. Sistemde kullanılacak olan veriler ve yapılan varsayımlar bu bölümde ele alınmıştır.

Son bölümde ise kurulan sistemin bir hastane üzerinde vaka çalışması yapılmış ve performans analizine yer verilmiştir. Farklı senaryolar altında karar destek sisteminin sağladığı faydalar değerlendirilmiştir.



**Şekil 1.1** : Tez akış şeması





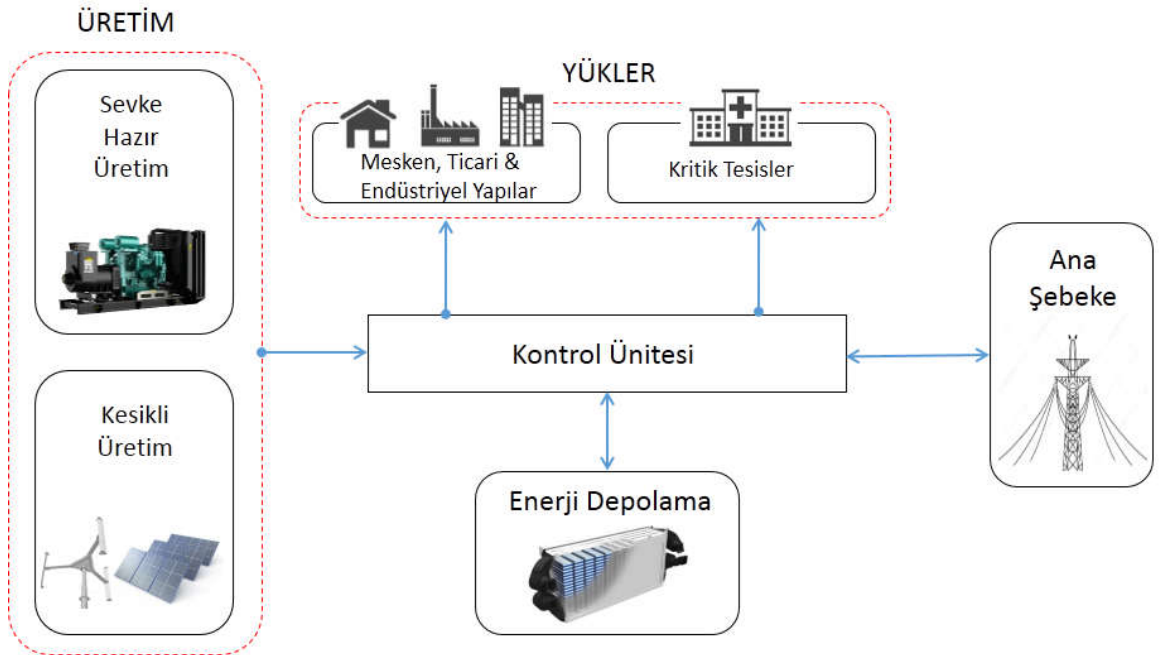
## 2. TEMEL KAVRAMLAR

### 2.1. Mikro Şebekeler

Mikro şebeke, bir grup lokalize enerji kaynağı ve yükün ana şebekeyle senkronize olarak çalıştığı, ayrıca fiziksel ve ekonomik şartlar sağlandığı takdirde ana şebekeden bağımsız “ada modu”nda otonom olarak çalışan enerji dağıtım sistemleridir.

Liu ve diğ. (2018) mikro şebekeyi, dağıtılmış jeneratörlerden, yüklerden, enerji depolama sistemlerinden ve koruma kontrol sistemleri içeren, tam güç üretimini, iletimini, dağıtımını ve enerji kullanımını sağlayan bağımsız kontrol edilebilir bir sistem olarak tanımlanmıştır.

Myles ve diğ. (2011) yerel bir enerji şebekesi olan mikro şebekenin tanımını; şebekeye paralel olarak ya da ada modunda çalışabilen, dağıtılmış enerji kaynaklarının (distributed energy resources) yerel elastik yüklerle entegrasyonunu sağlayan ve böylece özelleştirilmiş yüksek güvenilirlik ve şebeke düzensizliklerine karşı dayanıklılık sağlayan sistemler olarak verir. Şekil 2.1’de bir mikro şebeke yapısı örneği görülebilir.

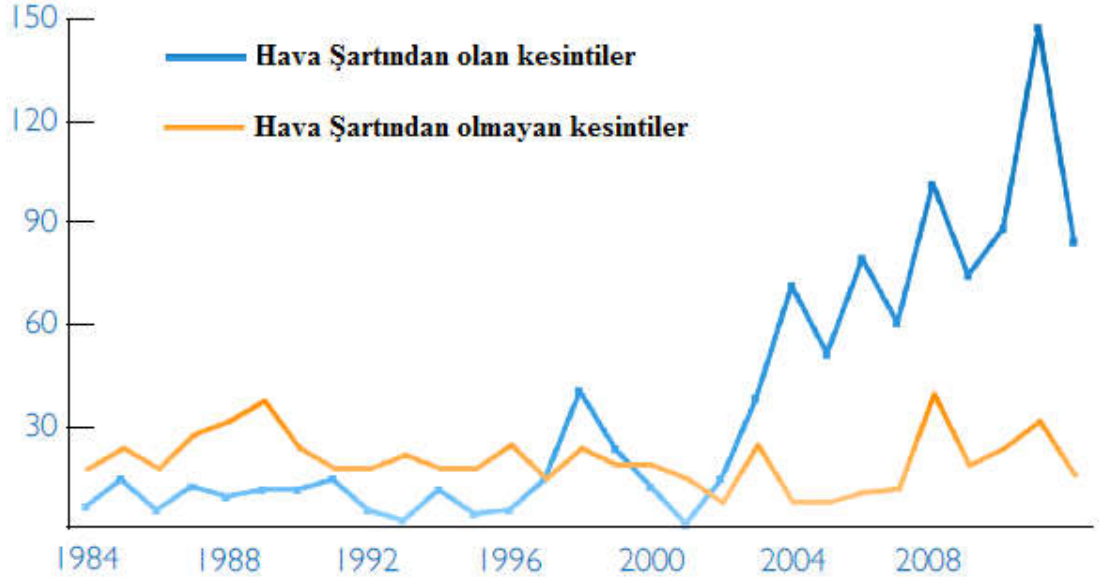


Şekil 2.1 : Mikro şebeke yapısı örneği.

Ana şebeke elektriğinden faydalanamayan kırsal bölgelerde veya ana şebekeye uzak bölgelerde (anakaraya uzak adalarda vs.) off-grid (ada modu) mikro şebeke uygulamaları yapılabilmektedir. Literatürde birçok ada modunda çalışan mikro şebeke optimizasyon çalışması bulunmaktadır. Örnek olarak, Backes ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada; elektriğe erişim oranının kentlerde %65,3, kırsal bölgelerde %17,1 (IEA) olduğu Tanzanya’da, ada modunda bir mikro şebekenin uygulamasını yapmışlardır. Enerji kaynağı olarak güneş panellerinin, rüzgâr türbinlerinin ve dizel jeneratörlerin kullanıldığı sistemin analizini ve optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir.

Gün geçtikçe uygulama sayısı artan mikro şebekelerin birçok faydası bulunmaktadır. Bu faydaları üç ana başlık altında toplayabiliriz (Hirsch ve diğ, 2018):

- Enerji Güvenliği
  - Hava koşulları: İklim değişikliğinin yarattığı olumsuz etkilerin artmasıyla birlikte hava koşullarına bağlı elektrik kesintileri daha sık yaşanmaktadır. Mikro şebeke sistemleri dağıtılmış enerji kaynaklarını kullanarak, ana şebeke elektriği kesildiğinde, özellikle kritik öneme sahip tesislere enerji sağlayabilmektedirler. Kenward ve Raja (2014) yayınladıkları raporda; Amerika Birleşik Devletleri (ABD)’nde 2003-2012 yılları arasında yaşanan elektrik kesintilerinin yüzde 80’inin hava şartları nedeniyle gerçekleştiğini ve bu kesintilerin yıllık yaklaşık 20-55 milyar dolara mal olduğunu belirtmişlerdir. Bu bağlamda Şekil 2.2’de ABD’deki 1984-2012 yılları arasındaki elektrik kesintilerinin hava şartlarına bağlı yıllık sayılarını gösteren grafik verilmiştir.
  - Basamaklı kesinti: Elektrik şebekeleri kritik kapasiteye yakın çalıştığından, sistemin küçük bir bölümünde görünüşte masum bir sorun tüm elektrik şebekesini içine alan bir domino etkisine yol açabilir (Newman, 2015). Mikro şebekeler, elektrik şebekesini, gerektiğinde özerk olarak izole edilebilecek ve işletilebilecek daha küçük fonksiyonel birimlere bölerek hafifletir. 14 Ağustos 2003’te ABD’nin Ohio eyaletindeki yüksek voltaj hattına devrilen ağaçlar bir dizi hatalar zinciri sonunda 50 milyon kişinin etkilendiği – en az 11 kişinin hayatını kaybettiği- ve yaklaşık 6 milyar dolara mal olan bir felakete yol açmıştır (Minkel, 2008).



**Şekil 2.2 :** 1984-2012 yılları arasında ABD’de rapor edilen hava şartlarına bağlı ve bağlı olmayan elektrik kesintilerinin yıllık sayıları, Kenward ve Raja (2014)’ten uyarlanmıştır.

- Siber ve fiziksel saldırı: Günümüzde, elektrik şebekeleri giderek daha fazla bilgi ve iletişim teknolojisine dayanmakta ve bu durum onu siber saldırılara karşı savunmasız kılmaktadır (Wang ve Lu, 2013). Merkezileştirilmiş elektrik şebekeleri, ayrıca hasar görmesi durumunda değiştirilmesi pahalı ve yavaş olan büyük, karmaşık bileşenler içerir. Mikro şebekeler ise, merkezi olmayan mimarileri sayesinde, üretim veya iletim altyapısının ayrık parçalarına saldırılara karşı daha az hassastır. Elektrik şebekesine saldıran belgelenmiş ilk siber saldırı, 23 Aralık 2015 tarihinde Ukrayna’nın başkenti Kiev’de ve çevresinde yaklaşık 6 saat etkili oldu ve yüz binlerde kişinin elektriksiz kalmasına neden oldu (Sullivan ve Kamensky, 2017).
- Ekonomik Fayda
  - Altyapı maliyeti tasarrufu: Mikro şebekeler, elektrik şebekelerini değiştirmek ve/veya genişletmek için yapılacak yatırımları önleyebilir veya erteleyebilirler. Bunun en büyük örneklerinden biri, ABD’deki elektrik şebekesine yapılan yatırımların üretimin hızına ayak uyduramamasıdır. İletim hatlarının ve trafoların yüzde 70’i 25 yaşın üzerinde ve oldukça eski olduğundan kapasite birçok bölgede kısıtlıdır (Campbell, 2012). Ayrıca; eski iletim hatları, yeni olanlara oranla daha fazla enerji harcamakta ve yüksek enerji talebinin olduğu zamanlarda

arız kısıtlamaktadırlar (ABB Inc., 2007). Ortalama bir ana iletim hattının maliyeti yaklaşık olarak 150.000\$/mil olmakla birlikte, coğrafi özelliklere, konstrüksiyon kısıtlarına ve işçilik maliyetlerine bağlı olarak bazı durumlarda 55.000 \$/mil kadar düşük veya 500.000 \$/mil kadar da yüksek de olabilmektedir (Willis ve Schrieber, 2017).

- Yakıt tasarrufu: Mikro şebekeler; azalan iletim hattı kayıpları, kombine ısıtma-soğutma-güç üretimi imkânı vermesi, doğru akım dağıtım sistemleri ile verimsiz/savurgan DC-AC dönüşümlerini önlemek gibi çeşitli verimlilik iyileştirmeleri sunar. Ayrıca, dağıtılmış/dağıtık jeneratörlerden ısı geri kazanımı gerçekleştirilirse ve etkili bir şekilde kullanılırsa, çok iyi tasarlanmış bir CHP uygulamasında işlemin toplam enerji verimliliği %90'a kadar çıkabilmektedir (Barker ve diğ, 2001).
- Yan hizmetler: Geleneksel yan hizmetler; frekans regülasyonu ve yük takibi, kör başlangıç (black start), reaktif güç ve voltaj kontrolü ve enerji kalitesi (reaktif güç ve voltaj harmonik kompanzasyonu) içerir. Mikro şebekeler ise bunlara ek olarak, doğal olarak ada modunda çalışma özelliği de katar (Lopes ve diğ, 2013).
- Temiz Enerji Entegrasyonu: İklim değişikliği ile mücadelede önemli bir yere sahip olan güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken ve kontrol edilemez oluşları; mevcut elektrik şebekesinde büyük miktarda bulunması durumunda aşırı üretim ve voltaj kontrolü gibi problemler yaratabilmektedirler (Liu ve Bebic, 2008). Mikro şebekeler; sahip oldukları enerji depolama sistemleri (EDS) ile değişken üretimi ile yükleri dengeleyebilmektedirler.

İdeal mikro şebeke teknolojileri aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır (Barker ve diğ, 2001):

- Modüler tasarım (1 kW'dan 10 MW'a kadar ölçeklenebilir)
- Düşük sermaye maliyeti
- Düşük işletme ve bakım maliyeti
- Konut, ticari ve endüstriyel izin kısıtlamalarına uygunluk
- Düşük emisyon
- Geniş yüklemeye koşullarında yüksek verimlilik (En az %40)
- Kullanılabilir atık ısı (Daha yüksek egzoz sıcaklığı genellikle daha iyidir)

- Yüksek güç kalitesi (Düşük harmonikler, iyi voltaj ve frekans regülasyonu)
- İyi yük takip özellikleri (Büyük yük adımları ve geçici motor startları için)
- Hızlı başlatma (Soğuk başlatma ve bekleme koşullarından)
- İyi enerji yoğunluğu (Yüksek güç/ağırlık ve kapladığı alanına göre yüksek güç gerekir)
- Yüksek güvenilirlik ve emre amadelik
- Güç sistemi gerilimi ve akım anomalileri (dalgalanmalar, gerilim) hasarlarına karşı dayanıklı olma
- Sahaya kolayca taşınabilen veya temin edilebilen yakıtla çalışma
- Mükemmel destek altyapısına sahip olgun bir teknoloji

Mikro şebekelerin birçok faydası olmasına rağmen, günümüzde kurulum aşamasında ve yönetim sürecinde bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. Kumar ve diğ., 2018 ve Lopes ve diğ., 2013 yaptıkları çalışmalarda mikro şebekelerin yaşadıkları zorlukları yedi ana başlık altında toplayabiliriz:

- Topluluk Eksikliği: Arazi konusu, organizatörler, mühendisler, acenteler veya finansal uzmanlar, yasama organları ve iletişim ağları arasında ortak bir anlayış bulunmadığı durumlarda olağanüstü bir sorun oluşturmaktadır.
- Eğitimin olmaması: Enerjiden yararlanabilmek için ideal yaklaşımın öğrenilmesinde bir eksiklik bulunmaktadır. Örnek olarak, bakım gerekliliği hakkında eğitim almamak; güneş paneli sistemlerinin düşük bakım gerekliliği yanlış anlaşılacak şekilde bakım gerektirmeyen sistem olarak yorumlandı ve birçok güneş paneli santrali kuruluşundan birkaç yıl sonra atıl olarak kalmalarına neden oldu.
- Maliyet sorunları: Yüksek kurulum masrafları mikro şebekeler için büyük bir dezavantaj yaratmaktadır. Yatırımcılar, geri ödeme süresi konusunda oldukça endişe duyabilmektedirler. Devletlerin, vergi indirimi, düşük faizli kredi gibi politikalarla sübvansiyonu yararlı olabilmektedir.
- Zayıf ve uygunsuz tasarım: Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik şebekesine entegrasyonunda şebekenin yeterli esnekliğe sahip olmaması engel teşkil etmektedir.
- Kötü proje yönetimi: En iyi performans garanti edilmeden ve ücretlendirilmeden önce faaliyetlerin uzman bir kişi tarafından yönetilmesi

gerekir. Ancak, birçok teşebbüs, geçici işçilerin denetimine bırakılır ve bu yüzden sayısız girişimin niteliği zarar görmüştür.

- Standardizasyon sorunu: Mikro şebekelerin görece yeni bir çalışma alanı olmasından, standartlar henüz enerji kalitesi, operasyon ve koruma sistemleri gibi konularda yetersiz kalmaktadır.
- İdari/yasal sorunlar: Bazı ülkelerde, mikro şebekelerin işletilmesiyle ilgili olarak mevzuat ve regülasyon eksikliği bulunmaktadır.

Mikro şebeke sistemlerinin enerji üretim altyapısı, mikro şebekenin kurulması planlanan konumdaki mevcut olan kaynağın türüne bağlı olarak, yenilenebilir ve geleneksel kaynaklar olarak sınıflandırılan farklı türlerdeki enerji kaynaklarına dayanabilir.

Yenilenebilir enerji; güneş, rüzgâr, hidrolik, biokütle ve jeotermal içerirken, geleneksel enerji kaynakları arasında buhar / gaz türbinleri, mikro türbinler, pistonlu içten yanmalı motorlar ve yakıt hücreleri bulunur.

Kapasite, gelişme ve ekonomik durum, çevresel etki, sosyal motivasyon, fiili dağıtım, sektörlere dayalı farklı uygulamalar, maliyetler ve birleşik ısı ve güç (CHP) uygulaması imkânı bilgilerini içeren mikro şebeke enerji kaynakları teknolojileri Çizelge 2.1’de ve Çizelge 2.2’de özetlenmiştir.

2011 yılından beri mikro şebekelerin dağılımını inceleyen Navigant Research (2016)’e göre, Amerika Birleşik Devletleri kurulu kapasite bakımından %54 Pazar payı ile liderliğini sürdürmekle beraber, Asya Pasifik pazar payı %22’dir. Ayrıca, Avrupa %18, Latin Amerika %4, Orta Doğu ve Afrika %2 paya sahip oldukları raporda belirtilmiştir.

Navigant Research (2017)’ün bir diğer raporuna göre ise toplam kurulu gücün mikro şebeke tiplerine göre dağılımı; ada modunda çalışan mikro şebekeler %45 ile ilk sırada yer almakla birlikte, ticari ve endüstriyel mikro şebekeler %16, kamu yararına olan mikro şebekeler %15, mesken/topluluk mikro şebekeleri %10, kampüs tipi mikro şebekeler %9 ve askeri mikro şebekeler ise %5 pazar payına sahip olarak verilmektedir.

**Çizelge 2.1 : Yenilenebilir enerjiye dayalı mikro şebeke teknolojileri (Url-1).**

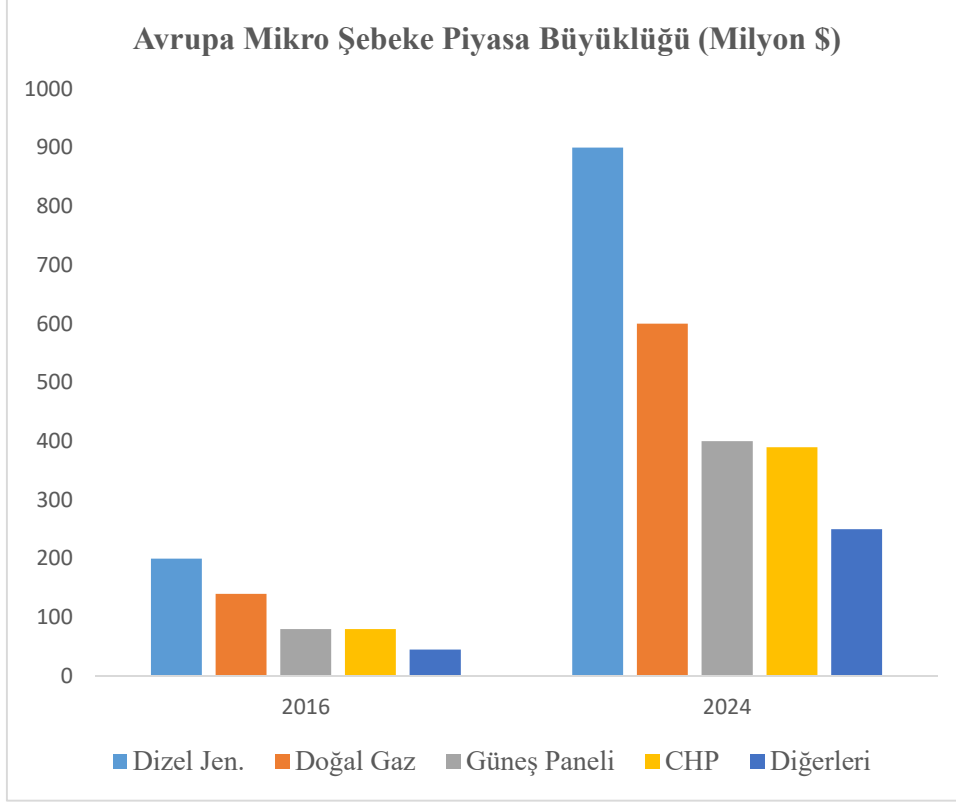
Teknoloji	PV	Hidrolik	Rüzgar	Açık Deniz	Biokütle	Jeotermal
Kapasite(MW)	<0.001-5	0.05-1	0.5-6+	5-10+	0.001-5	0.5-3+
Ekonomik Durumu	Ucuz	Orta	Orta	Pahalı	Orta	Pahalı
Çevresel Etki	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
Ortalama Yatırım Maliyeti(\$/kW)*	1388	1535	1477	4239	2668	2959
Kapasite Faktörü*	0.18	0.48	0.30	0.39	0.86	0.79
Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (\$/kWh)*	0.10	0.05	0.06	0.14	0.07	0.07
Ömür (yıl)	20-30	60	20	20	20-30	20
CHP imkanı	Var	Yok	Yok	Yok	Var	Var

**Çizelge 2.2 : Konvansiyonel enerjiye dayalı mikro şebeke teknolojileri (Url-1).**

Teknoloji	Buhar Türbini	Gaz Türbini	Mikro Türbin	Dizel Jeneratör	Yüksek Sıcaklık Yakıt Hücresi	Düşük Sıcaklık Yakıt Hücresi
Yakıt Türü	Gaz Kömür Biokütle	Gaz	Gaz	Dizel Gaz Biyoyakıt	Gaz Hidrojen	Gaz Hidrojen
Kapasite (MW)	0.5-10+	0.5-10+	0.03-0.5	0.05-10+	1-10+	<0.1-3+
Ekonomik Durumu	Ucuz	Ucuz	Orta	Ucuz	Pahalı	Pahalı
Çevresel Etki	Orta/Ciddi	Ciddi	Orta	Ciddi	Orta	Orta
Ortalama Yatırım Maliyeti (\$/kW)	3000-4800	700-1300	1500-2700	500-800	3800-7500	3800-7500
Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (\$/kWh)	0.06-0.14	0.04-0.08	0.05-0.09	0.19-0.28		
Ömür (yıl)	20	20	20	20	10	10
CHP imkânı	Var	Var	Var	Var	Var	Var

Diğer raporlara paralel olarak, Şekil 2.3'te görüldüğü üzere, Gupta ve Bais (2017)'in raporunda, Avrupa'da mikro şebeke market büyüklüğünün 2024 yılı itibariyle 4 milyar dolar hacme ve 6 GW kapasiteye ulaşması bekleniyor. Enerji kaynağı olarak CHP'nin

düşük işletim maliyeti, düşen gaz fiyatları ve yüksek verimliliği nedeniyle 2024 yılına kadar yaklaşık %19; gelişen teknolojisi ve düşen panel fiyatlarıyla PV'lerin ise devlet teşvikleri ile önemli yer teşkil edeceğini belirtmişlerdir.



**Şekil 2.3 :** Avrupa’da enerji kaynağına bağlı mikro şebeke piyasa büyüklüğü, Gupta ve Bais (2017)’den uyarlanmıştır.

Birçok farklı mikro şebeke türü olmakla birlikte, mikro şebekelerde kullanılan teknolojiler, kurulumdaki ana faktörler ve sağlayacağı faydalar kurulum amacına göre değişmektedir.

Kamuya ait mikro şebekelerin kurulma amacı daha çok elektrik kesintisinin yönetimi, YEK’lerin ve CHP sistemlerinin şebekeye entegrasyonu iken endüstriyel uygulamalarda güç kalitesi, güvenilirlik ve enerji verimliliği gibi başlıklar öne çıkmaktadır. Çizelge 2.3’te farklı mikro şebeke mimarilerinin uygulama alanları, kullanılan enerji üretim teknolojileri, kurulumdaki ana faktörler ve sağlayacağı faydalar gösterilmiştir.

Burada adı geçen mikro şebeke yapıları bir sonraki başlıkta daha ayrıntılı şekilde ele alınmıştır.



**Çizelge 2.3 : Mikro şebeke mimarileri ve karakteristikleri, Driesen ve Katiraei (2008)'den uyarlanmıştır.**

	Kamu Mikro Şebekeleri		Endüstriyel/Konut Mikro Şebekeleri		Uzak Bölge Mikro Şebekeleri
	Kentsel	Kırsal	Çoklu Tesis	Tekil Tesis	
Uygulama	Şehir Merkezi	Planlı Adalama	-Endüstriyel parklar -Üniversite kampüsleri -Alışveriş merkezleri	-Ticari binalar -Konutlar	-Uzak yerleşim birimleri -Adalar
Teknoloji	-PV -Rüzgâr -Mikro türbin -CHP	-Hidro -PV -Rüzgâr	-Mikro türbin -PV -CHP -Yakıt Hücresi	-Mikro türbin -PV -CHP -Yakıt Hücresi	-Hidro -PV -Rüzgâr
Ana Faktör	-Kesinti yönetimi -YEK entegrasyonu -CHP entegrasyonu		-Güç kalitesi artırma -Güvenilirlik -Enerji verimliliği		-Elektrifikasyon -Yakıt kullanımı azaltma
Faydalar	-GHG azaltma -Tedarik dağıtım -Yoğunluk yönetimi -Yenileme erteleme -Yan hizmetler		-Yüksek güç kalitesi -Hizmet farklılaşması -CHP entegrasyonu -Talep karşılama yönetimi		-Tedarik imkânı -YEK entegrasyonu -GHG azaltma -Talep karşılama yönetimi
Operasyon Modları	-Enterkonekte mod -Ada modu		-Enterkonekte mod -Ada modu		-Ada modu
Plansız Geçiş	-Giriş veya bitişik besleyicilerdeki arızalar		-Ana şebeke arızaları -Güç kalitesi sorunları		-
Planlı Geçiş	-Bakım/onarım		-Bakım/onarım -Enerji fiyatları (Pik zamanları)		-

### 2.1.1. Kampüs/kuruluş bünyesindeki mikro şebekeler

Yerinde üretim, kombine soğutma, ısı ve güç (CCHP, “trijenerasyon” olarak da bilinir) uygulaması ile özellikle üniversite veya endüstri parkı gibi tek bir kuruluşun sahip olduğu bir kampüslerde şu ana kadar başarılı bir model olmuştur ve tipik olarak en büyük mikrogridleri içerir (Asmus ve Stimmel, 2012).

Çizelge 2.4’te günümüz kampüs tipi mikro şebeke örneklerinden bazıları verilmiştir. Enerji üretiminde konvansiyonel olarak dizel jeneratörün, yenilenebilir enerji kaynağı

olarak da güneş panellerinin oldukça yaygın olduğu görülmektedir. Depolama sistemi olarak da batarya sistemlerinin ağırlıkta olduğu göze çarpmaktadır. Ayrıca; yüksek enerji kapasitesi ihtiyacı olan mikro şebeke sistemlerinde gaz türbini uygulamasına daha sık başvurulduğu anlaşılmaktadır.

**Çizelge 2.4 : Kampüs tipi mikro şebeke uygulama örnekleri.**

Detay			Üretim							Depolama		Kapasite kW
Ad	Ülke	Yıl	D	S	G	W	PV	H	FC	B	C	
San Diego M.Ş.	ABD	2007		X	X							18000
Gazi Üniversitesi Enerji Parkı	Türkiye	2007				X	X			X		5
NTUA	Yunanistan	2004				X	X			X		10
Aichi M.Ş.	Japonya	2005	X				X					1200
HFUT M.Ş.	Çin	2006										300
Illinois Teknoloji Enstitüsü	ABD	2013	X		X	X	X			X		12000
Sendai M.Ş.	Japonya	2008			X		X			X		750
Santa Rita Hapishanesi	ABD	2012	X				X		X	X		2200
New York Üniversitesi	ABD	2011		X	X							13400
Hangzhou Dianzi Üniversitesi	Çin	2007	X				X		X	X	X	240
Santa Rita Okullar Bölgesi	ABD	2018					X			X		1000
UC San Diego	ABD	2016	X		X		X		X	X		43000

D: Dizel jeneratör S: Buhar Türbini G: Gaz Türbini W: Rüzgâr Türbini PV: Güneş Paneli H: Hidrolik FC: Yakıt Hücresi B: Batarya C: Kapasitör

### 2.1.2. Uzak ana şebekeden bağımsız mikro şebekeler

Dünya Bankası Elektriğe Ulaşım verilerine göre, gelişmekte olan ve az gelişmiş ülkelerde 1 milyardan fazla insan şu anda güvenilir elektriğe- veya elektriğe hiçbir şekilde erişememektedir. Özellikle bu ülkelerdeki kırsal bölgelerde, temel insani ihtiyaçları karşılamak için, elektrik en önemli anahtar kaynak durumundadır. Mikro şebekeler bu bölgelere elektriği ulaştırmak için en iyi yol olarak gözükmektedir (Williams ve diğ, 2015).

Ada modundaki mikro şebekeler genellikle, fotovoltaik paneller, rüzgâr türbinleri, biokütle enerji sistemleri, dizel jeneratörler ve kontrol edilebilir yükler dahil olmak

üzere çeşitli yenilenebilir ve konvansiyonel enerji üretim sistemlerinden oluşurlar. Ancak, yenilenebilir enerji kaynaklarının aralıklı ve düzensiz oldukları göz önüne alındığında, sistem genellikle ağırlıklı olarak -yenilenebilir enerjinin düşük penetrasyonu ile- dizel jeneratörlerin ana güç kaynağı olduğu modda çalışır. Bu nedenle, bağımsız mikro şebekenin genellikle EDS ile desteklenmesi gerekir.

Çizelge 2.5'te ada tipi mikro şebekelere ait örnekler verilmiştir. Konvansiyonel üretimde dizel jeneratörün, yenilenebilir enerji kaynağı olarak da rüzgâr türbini ve güneş panellerinin ağırlıkta olduğu görülmektedir.

**Çizelge 2.5 : Ada tipi mikro şebeke uygulama örnekleri.**

Detay			Üretim							Depolama		Kapasite kW
Ad	Ülke	Yıl	D	S	G	W	PV	H	FC	B	C	
Hartley Bay	Kanada	2009	X									1050
Eigg Adası	İskoçya	2008					X	X	X		X	156
Bornholm Adası	Danimarka	2007	X	X		X	X					112500
Kythnos Adası	Yunanistan	2001	X					X			X	17
San Juanico	Meksika	2008	X			X	X					200
Campinas	Brezilya	2001	X					X			X	150
Isla Tac	Şili	2002			X	X					X	40
Subax	Çin	2006	X		X	X	X				X	50
Mt. Newall	Antarktika	2002	X			X	X					10
Alto Baguales	Şili	2001	X			X			X			23000
Ascension Adası	Kanada	1996	X			X						225

D: Dizel jeneratör S: Buhar Türbini G: Gaz Türbini W: Rüzgâr Türbini PV: Güneş Paneli H: Hidrolik FC: Yakıt Hücresi B: Batarya C: Kapasitör

### 2.1.3. Ticari ve endüstriyel mikro şebekeler

Güvenilir ve uygun fiyatlı elektrik arzı, endüstriyel operasyonlar ve ekonomik büyüme için kritik bir unsurdur. Sık yaşanan elektrik kesintilerine ek olarak düşük enerji kalitesine sahip elektrik tedariki, ticari işletmelerin ve endüstri tesislerinin elektriğe erişim maliyetlerini arttırmaktadır. Maliyetlere ilaveten sürdürülebilir kalkınma modelini benimseme konusundaki ilave baskı, kendi kendine elektrik üretmeyi tek uygun seçenek haline getirmektedir.

Bunu destekler nitelikte; Abbott (2018)'in Rocky Mountian Enstitüsü'nde yayınladığı internet bildirisine göre, Fortune 100 şirketlerinin yaklaşık üçte ikisi ve Fortune 500 şirketlerinin yaklaşık yarısı iddialı yenilenebilir enerji hedefleri belirledi. Navigant Research (2017) raporuna göre 2017 yılında 1,9 milyar dolar olan Ticari ve Endüstriyel mikro şebeke harcamalarının katlanarak artarak 2026 yılı itibariyle 18.3 milyar dolara ulaşması bekleniyor.

**Çizelge 2.6 : Ticari ve endüstriyel mikro şebeke uygulama örnekleri.**

Detay			Üretim							Depolama			Kapasite kW
Ad	Ülke	Yıl	D	S	G	W	PV	H	FC	B	T	C	
Mesa del Sol	ABD	2014	X		X		X		X	X	X		370
CSIRO Energy Center SGEM	Avustralya	2010			X	X	X			X			500
“Hailuoto” Micro şebekesi	Finlandiya	2012	X			X							2000
FordZED	ABD	2011	X		X		X		X		X		1110
Continuon's MV/LV	Hollanda	2003					X			X			315
Los Angeles Limanı	ABD	2016					X			X			1030
Niobrara Enerji Parkı	ABD	2015			X	X	X		X	X	X	X	300000

D: Dizel jeneratör S: Buhar Türbini G: Gaz Türbini W: Rüzgâr Türbini PV: Güneş Paneli H: Hidrolik FC: Yakıt Hücresi B: Batarya T: Termal C: Kapasitör

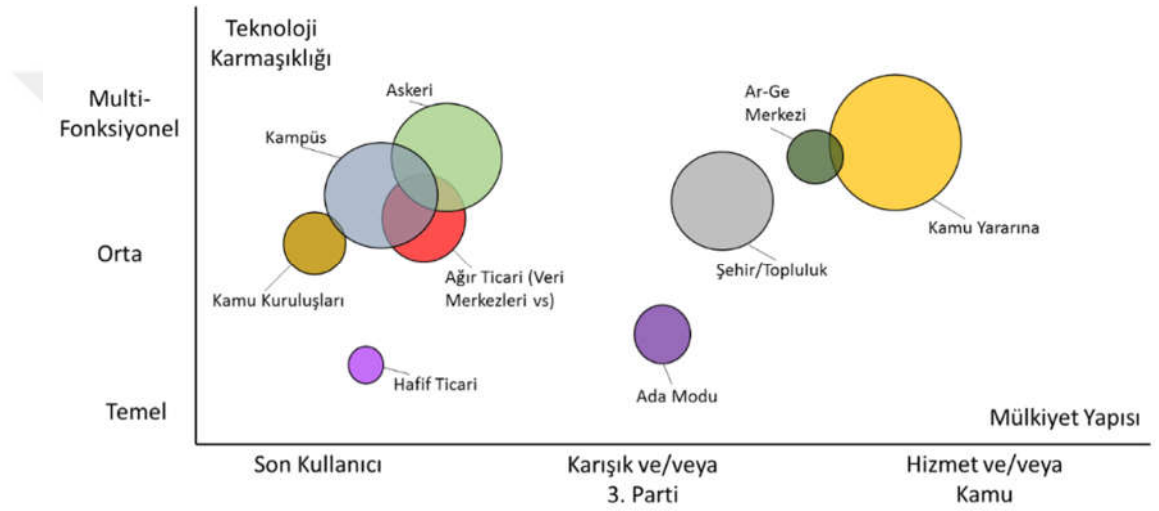
Çizelge 2.6'da görüldüğü gibi ticari ve endüstriyel mikro şebeke uygulamalarında, tesisin konumuna bağlı da olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş panelleri oldukça yaygındır. Güneş panelleri; çatı veya otopark üstü uygulamalarda sık kullanılmaktadır. Ayrıca, depolama sistemi olarak da bataryaların daha yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir.

#### 2.1.4. Diğer mikro şebekeler

Fiziksel ve siber korumanın ön plana çıktığı askeri mikro şebekeler, Afganistan benzeri operasyon üslerinde kullanılmaktadır. Ada modunda da çalışma özelliği de

bulunan askeri mikro şebekeler için en önemli faktör güvenilirliktir. Kritik yüklerin ve operasyonel yüklerin kesintisiz, yüksek kalitede karşılanması için mikro şebeke altyapısı Şekil 2.4'te görüldüğü gibi diğer mikro şebekelere kıyasla daha karmaşıktır.

Diğer bir mikro şebeke türü olan mesken/topluluk mikro şebekesi, bir veya daha fazla dağıtım trafo merkezi tarafından desteklenen, yerel yenilenebilir enerji kaynaklarının ve enerji depolama sistemlerinin ve diğer dağıtılmış enerji kaynaklarının yüksek oranda kullanımlıyla, koordineli çalışan bir yerel şebekedir. Dağıtılmış enerji kaynağı olarak giderek daha fazla güneş panelleri (Çatı üstü uygulamalar, otopark üstü uygulamaları vb.) ve batarya depolama sistemleri öne çıkmaktadırlar.



**Şekil 2.4** : Lokasyon ve amaca göre mikro şebeke kuruluşu, GTM Research (2016)'dan uyarlanmıştır.

Yaklaşık %15 pazar payı ile en yaygın mikro şebeke türlerinden biri olan kamu mikro şebekeleri için ana faktör olarak kesinti yönetimi, tedarik dağıtımını ve yoğunluk yönetimi önem arz etmektedir. Kamu mikro şebekeleri piyasası, gelişmekte olan ekonomilerdeki hızlı sanayileşme ve kentleşme nedeniyle büyüme gösterme potansiyeli yüksektir. Buna paralel olarak, Navigant Research (2014) bu tip mikro şebekelerin yıllık gelirlerinin 2023 yılında yaklaşık 5,8 milyar dolara yükseleceğini öngörmektedir.

## 2.2. Enerji Depolama Teknolojileri

CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltma hedefine ulaşmak için, gelecekteki elektrik üretimi, fosil yakıtlara olan bağımlılığın azalması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının

artması ve çevreye daha fazla saygı gösterilmesi ile ilerleyecektir (Skea ve Nishioka, 2008). Elektrik enerji sistemlerinin evriminde yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu yeni olmasına rağmen, güç kalitesinin ve voltaj profilinin iyileştirilmesi, voltaj kararlılığının artırılması da dahil olmak üzere sunduğu bazı teknik faydalar nedeniyle, dünya genelinde artan ilgi görmektedir (Hernandez ve diğ, 2013).

Ancak, enerji şebekeleri iletim ve dağıtımda; öngörülemeyen günlük ve mevsimsel değişimlerle talebi karşılamak için büyük zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Enerji Depolama Sistemleri, bu zorlukların üstesinden gelme potansiyeline sahip temel teknolojiler olup, kullanılan teknolojiye göre enerjinin belirli bir durumda depolanması ve gerektiğinde elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlamaktadırlar.

Enerji depolamanın birçok faydası vardır. Bu faydaları teknik, mali ve çevresel olarak üç ana başlık altında toplayabiliriz (Koç ve diğ, 2015):

- Teknik Faydalar
  - Güç Kalitesi: Bara voltajlarında ve yük akımlarında, ani gerilimlerde ve anlık düşük voltajlarda harmonik sinyallerin varlığını ve bazı hassas ekipman parçalarının performansını etkileyebilecek diğer bozulma sorunlarını belirtir. Bu durum, iletim hatlarında kararsızlığa neden olabilir veya üretim çıktılarının kaybına neden olabilir. Örneğin, endüstriyel firmalarda, güç dalgalanmalarındaki geçici dalgalanmalar üretim süreçlerinde aksamalara neden olabilir. Güç dalgalanmalarının etkilerini azaltmak için, elektrikli bir depolama sistemi kullanılabilir. Volanlar, bataryalar (konvansiyonel kurşun-asit bataryalar hariç), süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri (SMES), kapasitörler ve süper kapasitörler milisaniye bazında hızlı bir tepkiye sahiptir ve bu nedenle bu hizmet için kullanılabilirler (Chen ve diğ, 2009). Bataryalar, akışkan piller ve yakıt hücreleri sadece hızlı tepkiye sahip değil, aynı zamanda nispeten uzun boşalma sürelerine (saat) sahiptir, bu nedenle köprüleme gücü için daha uygundur (Kousksou ve diğ, 2014).
  - Regülasyon: Elektrik santralinde üretilen frekanstaki sapmalar ekipmanlarda hasara neden olabilmektedir. Frekanstaki hızlı bir düşüş aynı zamanda üretici birimlerde şalterlerin atmasına, yüklerin boşalmasına ve hatta sistemin çökmesine neden olabilir (Kousksou ve diğ, 2014). Üretim ve yük arasındaki bu dengesizlik, enerji depolama

sistemleri kullanılarak azaltılabilir. Enerji depolama sisteminde depolanan enerji, arzda ani bir düşüşü karşılamak için kullanılabilir. Frekans desteği, çok kısa bir süre için güç sağlanmasını gerektirir. Volanlar, SMES, bataryalar ve akışkan piller gibi enerji depolama sistemleri hem düzenleme hem de güç kalitesi uygulaması için uygun özelliklere sahiplerdir (Diaz-Gonzales ve diğ, 2012; Beaudin ve diğ, 2010).

- Yük Kaydırma (Load shifting): Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin stokastik yapısından dolayı, santral enerji çıkışı genellikle hafta içi saat 9.00 ile 17.00 arasında gerçekleşen yoğun talep dönemleriyle iyi uyuşmaz. Bu, elektrik sisteminin çalışmasıyla ilgili çeşitli teknik ve ekonomik sorunlara yol açmaktadır. Elektrik üretimi ile talep arasındaki dengesizliklerden kaynaklanan voltaj ve frekans değişimleri gibi teknik sorunlar, yenilenebilir teknolojilerin elektrik şebekesine girmesini sınırlamaktadır. Bunun bir sonucu olarak, modern enerji yönetim sistemleri, enerji arz ve talep dengesizliğini yönetmede daha esnek olmak zorundadır (Kondziella ve Bruckner, 2016). Yenilenebilir enerji üretim yapabiliyorken, enerji depolanır ve talep yüksek olduğunda şebekeye salınır. Bu, şebekedeki aşırı talebi yumuşatmaya yardımcı olur ve yenilenebilir enerjinin değerini maksimuma çıkarır. Bu uygulama için etkili olan depolama teknolojileri ölçeklenebilir olmalı ve dakikalar ile 10 saatlik arasındaki zaman diliminde enerji sağlayabilmelidir (Barton ve Infield, 2004). Bu hizmet için en uygun teknolojiler ise sıkıştırılmış havalı enerji depolama sistemleri (CAES), pompalı hidro elektrik santralleri (PHES), bataryalar, akışkan piller ve ayrıca hidrojen bazlı enerji depolama sistemleridir (Little ve diğ, 2007; Koshizuka ve diğ, 2003).
- Mali Faydalar: Enerji Depolama sistemi sayesinde, şebeke elektrik fiyatının görece düşük olduğu zamanlarda ve yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji depolanırken, fiyatın yüksek olduğu dönemlerde şebekeye elektrik satışı mümkündür. Buna ek olarak, EDS varlığında yenilenebilir enerji kaynaklarından daha fazla miktarda yararlanılabileceği için enerji kaybı azalacak ve mali fayda daha yüksek olacaktır (Ufluoğlu, 2018).

- Çevresel Faydalar: Teknik ve mali faydalar kısmında da belirtildiği üzere, enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegrasyonunu daha fazla mümkün kılar. Bu kaynakların verimli kullanılması, ana şebekeden çekilen enerji miktarını kısarak daha az fosil yakıt tüketilmesini sağlayacaktır. Bu şekilde, atmosfere daha az sera gazı salınımı gerçekleşecektir.

Enerji depolama uygulamaları dört kategoriye ayrılabilir; toplu (bulk) enerji uygulamaları, yardımcı uygulamalar, son kullanıcı uygulamaları (müşteri enerji yönetimi uygulamaları) ve yenilenebilir enerji entegrasyon uygulamaları. Enerji depolama teknolojileri, deşarj süresine bağlı olarak üç gruba ayrılabilir; kısa vadeli (saniye- dakika), orta vadeli (dakika- saat) ve uzun vadeli (saat- gün). Kısa ve orta vadeli deşarj süresine sahip depolama teknolojileri, son kullanıcı uygulamaları ve şebekelerde yardımcı hizmetler için uygundur, oysa uzun vadeli deşarj süresine sahip olanlar toplu enerji uygulamaları ve yenilenebilir enerji entegrasyon uygulamaları için daha uygundur (Akhil ve diğ, 2013). Toplu enerji uygulamaları, modern şebekelere büyük miktarda enerji entegre edilmesinde önemli bir rol oynar. Yardımcı hizmetler uygulaması ise şebekenin sorunsuz ve kararlı çalışması için modern şebekelerde önemli bir yere sahiptir.

Çizelge 2.7’de ileride daha detaylı da incelenecek enerji depolama sistemlerinin, toplu enerji uygulamaları, yardımcı uygulamalar, son kullanıcı uygulamaları, yenilenebilir enerji entegrasyonu uygulamaları, ulaşım uygulamaları ve şebekeden bağımsız uygulamalar için uygunlukları verilmiştir. Ayrıca, bu uygulamalarda, enerji depolama sistemlerinin hangi teknik faydalarından yararlandığı da Çizelge 2.7’de detaylıca görülebilmektedir. Bataryaların geniş güç ve enerji yoğunluğu, şekilleri, ebatları ve taşınabilirliği nedeniyle toplu enerji uygulamaları dahil olmak üzere tüm farklı uygulama kategorileri için uygun olduğu görülmektedir. Mekanik, termal ve yakıt hücresi enerji depolama teknolojileri, büyük enerji depolama kapasiteleri ve uzun deşarj süreleri sayesinde toplu enerji uygulamaları için daha uygundur.

Süper iletken manyetik enerji depolaması, temel olarak acil durum cihazlarında ve yüksek güç yoğunluğu, hızlı tepki ve güç kalitesinin iyileştirilmesi gerektiren uygulamalarda kullanılır. Ulaşım uygulamalarında, yakıt hücreleri, bataryalar ve süper kapasitörler (özellikle çift katmanlı kapasitör -DLC), tüm enerji depolama teknolojileri arasında en umut verici olanlardır.

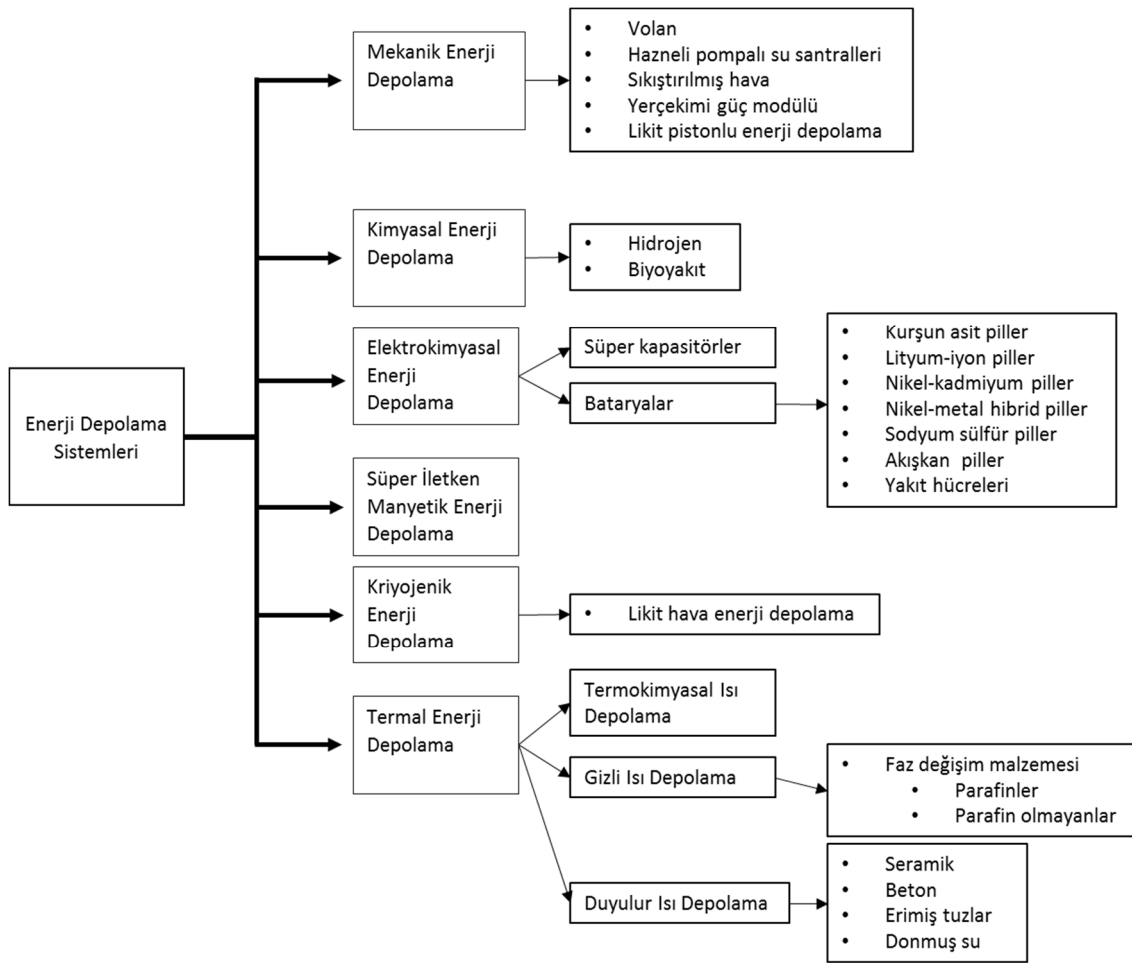


**Çizelge 2.7 : Enerji depolama sistemleri ve uygulama uygunlukları, Rohit ve Rangnekar (2017)'dan uyarlanmıştır.**

Uygulamalar/ Teknolojiler	Toplu Enerji Uyg.		Yardımcı Servis Uyg.					Son kullanıcı Uyg.		YEK Uyg.	Ulaşım Uyg.	Off Grid Uyg.
	Enerji Arbitrajı	Tepe tıraşlama	Yük takibi	Döner rezerv	Voltaj desteği	Kör başlangıç	Frekans regülasyonu	Güç sürekliliği	Güç kalitesi			
PHEs	X	X				X	X			X		
CAES	X	X	X	X		X	X	X		X		
FES			X	X	X			X	X			
Kurşun asit			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
NaS		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Lityum-iyon			X		X	X	X	X	X	X	X	X
Akışkan pil	X	X	X		X	X	X	X	X	X		X
DLC									X		X	
SMES									X			
Yakıt hücresi	X										X	X
TES	X	X	X	X								

Termal enerji depolaması çoğunlukla toplu enerji uygulamaları ve bazı yardımcı hizmetler için uygundur. Yavaş cevap vermesi ve büyük boyutları nedeniyle diğer uygulamalar için uygun değildir. Yenilenebilir enerji penetrasyonu için kullanılacak enerji depolama teknolojileri ise PHES'lerden, CAES'lerden ve bataryalardan oluşur (Rohit ve Rangnekar, 2017).

Enerji depolama sistemlerini; mekanik, kimyasal, elektrokimyasal, süper iletken manyetik, kriyojenik ve termal depolama sistemleri olarak altı ana başlık altında toplayabiliriz. Sınıflandırmalar ve alt başlıkları ile enerji depolama sistemleri aynı başlıklar altında incelenmek üzere Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması.

### 2.2.1. Mekanik enerji depolama

Mekanik enerji depolama sistemleri, elektrik enerjisini kolayca depolanabilen enerji formlarına dönüştüren elektromekanik sistemlerdir. Mekanik bazlı enerji depolama sistemlerinin örnekleri arasında volanlar, hazneli pompalı hidro enerji depoları,

yerçekimi enerjisi depolama sistemleri, basınçlı hava enerji depoları, sıvı pistonlu enerji depolama sistemleri bulunur.

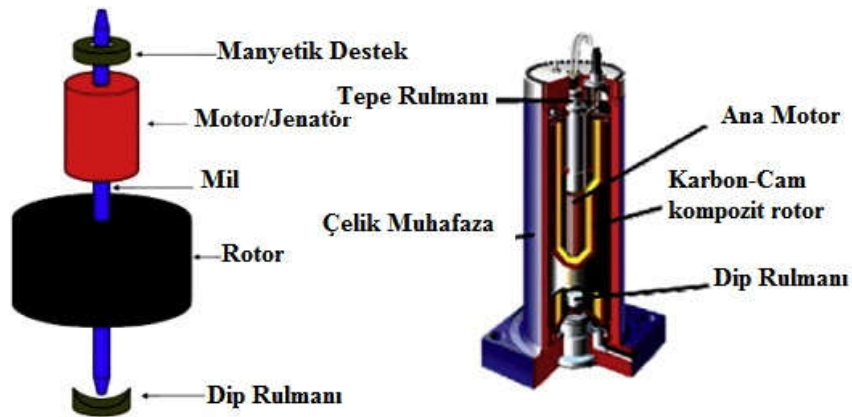
### 2.2.1.1. Volanlar (Fly-wheels)

Volanlar, enerji depolamak için binlerce yıldır kullanılmaktadır (Weinstock, 2002). Bu sistemler, enerjiyi kinetik enerji olarak depolamak için dizayn edilmiş mekanik cihazlardır. Silindirik disk şeklinde bir geometriye sahip olan volanlar, atalet momentlerinden faydalanarak enerjiyi muhafaza ederler. Ayrıca; volanlar, güç kalitesini artırmak için kısa voltaj bozukluğuyla başa çıkmak için tasarlanmışlardır (Hasan ve diğ, 2013).

Tepki süreleri mili-saniye bazı gibi çok kısa olduğundan ve boşaltım sürelerinin saniyeler içinde olmasından; kesintisiz güç kaynaklarında (UPS), frekans regülasyonlarında ve kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu uygulamaları için volanlar oldukça uygundurlar (Zakeri ve Syri, 2015).

Volanlar oldukça yüksek (yüzbinlerce) dolum/boşaltım döngüsüne sahip sistemlerdir ve bu döngü sayısı sıcaklık ve deşarj derinliğinden bağımsızdır. Bu yüzden, volanların kullanım ömürleri uzundur (>20 yıl) ve ömürlerinin sonunda herhangi bir çevresel soruna sebebiyet vermezler (Kousksou ve diğ, 2014).

Şekil 2.6'da bileşenleri ve kesit görünüşü verilen tipik bir volan sisteminin en büyük dezavantajları, görece düşük enerji yoğunluğu ve saatte yüzde 20'ye varan yüksek kendiliğinden boşalma kayıplarıdır (Hadjipaschalis ve diğ, 2009). Bu sebeplerden, volanlar uzun vadeli depolama için uygun sistemler değildir.



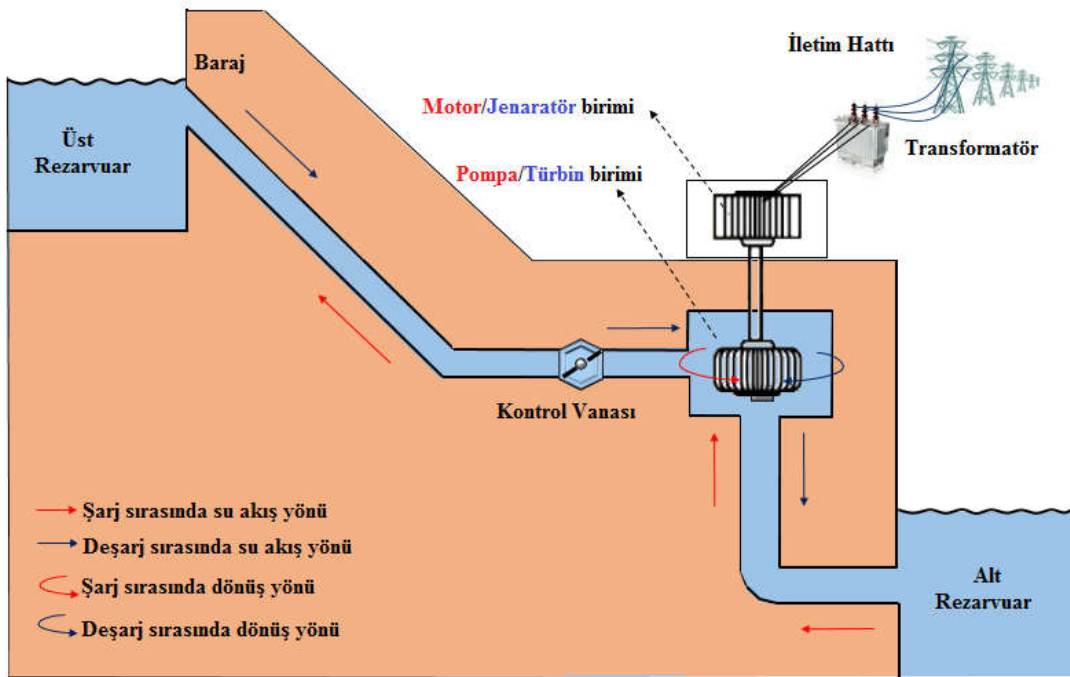
Şekil 2.6 : Tipik bir volan depolama sisteminin kritik bileşenleri ve kesit görünüşü, Koohi-Kamali ve diğ. (2013)'den uyarlanmıştır.

### 2.2.1.2. Hazneli pompalı hidro enerji depoları (PHES)

Pompalı hidro enerji depolama sistemleri, yüksek enerji talebi periyotlarında talebi karşılamak veya enerji depolamak için, iki farklı irtifadaki suyu hareket ettirirler (Hadjipaschalis ve diğ, 2009). Günümüzde bu tip depolama sistemleri; rüzgâr, güneş ve dalga gücü gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitliliğini sağlamlaştırmaktadırlar.

Şekil 2.7’de pompalı hazneli hidro enerji depolama sisteminin çalışma prensibi gösterilmektedir. Piyasa fiyatının ve talebin düşük olduğu dönemlerde, pompalar vasıtasıyla düşük irtifada bulunan rezervuarda bulunan su, yukarı noktada bulunan rezervuara pompalanır. Talebin yüksek olduğu zamanlarda bu işlem tersine çevrilerek sistemin enerji üretmesi sağlanır (Aneke ve Wang, 2016). Depolanan enerji miktarı ise iki hazne ve depolanan su hacmi arasındaki yükseklik farkıyla orantılıdır (Kousksou ve diğ, 2014).

Genel olarak, pompalı hazneli hidro enerji depolama sistemlerinin ömrü yaklaşık 40-60 yıl olmakla birlikte verimleri yüzde 65 ile yüzde 87 arası değişmektedir (Aneke ve Wang, 2016). Chen ve diğ, (2009), hızlı tepki süresi sayesinde, bu depolama sistemin şebeke frekansının kontrolü için önemli bir parça olduğunu vurgulamaktadır.

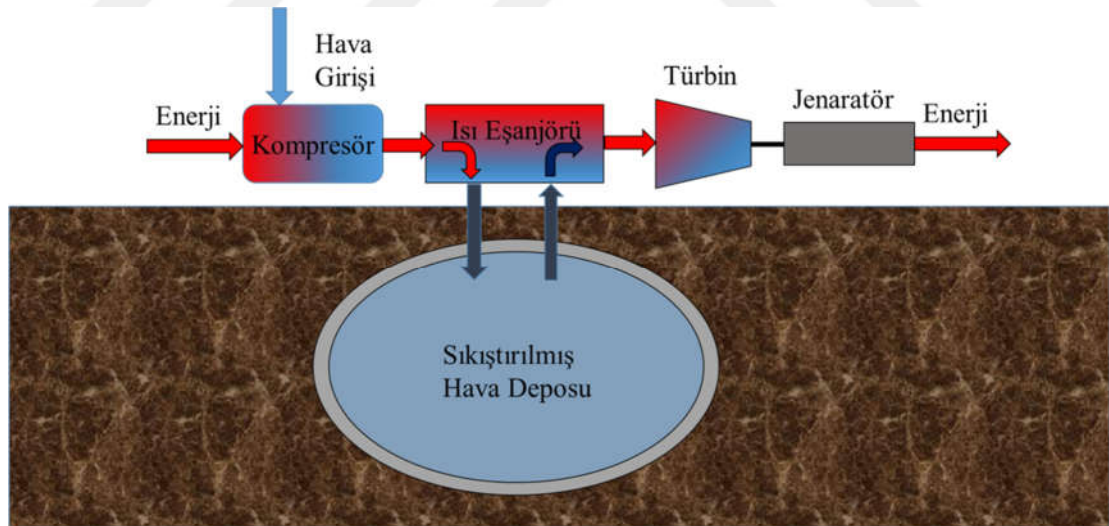


Şekil 2.7 : Pompalı hazneli hidro enerji depolama sisteminin çalışma prensibi, Nikolaidis ve Poullikkas (2017)’den uyarlanmıştır.

### 2.2.1.3. Basınçlı hava enerji sistemleri (CAES)

Pompalı hidro elektrik sistemlerine benzer şekilde çalışan basınçlı hava enerji sistemlerinde; çalışma prensibi Şekil 2.8’de gösterildiği gibi, enerji talebinin düşük olduğu zamanlarda ortamdaki hava kompresörler vasıtasıyla sıkıştırılarak ya yeraltı mağaralarında ya da basınçlı tanklara sıkıştırılır. Taze havayı tuz mağaralarında depolamak, kendini kanıtlanmış, güvenilir ve güvenli bir yöntemdir. Bu tuz mağaraları konumun jeolojik yapısına bağlı olarak yerin bir kilometre altına kadar inebilmektedirler (Güney ve Tepe, 2017). Enerji talebi arttığında ise depolanmış hava ısıtılır. Bu ısı kaynağı fosil yakıtlardan veya yüksek verimlilikte olmak koşuluyla, sıkıştırma işleminde tekrar kazanılan ısı olabilmektedir (Azzuni ve Breyer, 2018). Isınan hava genişler ve türbinlerden geçirilerek enerji üretilir. Kosksou ve diğ., (2014) bu sistemlerin verimliliklerinin yaklaşık yüzde 70 ve ortalama ömürlerinin 40 yıl olduğunu belirtmişlerdir.

Büyük kapasiteli basınçlı hava enerji sistemlerinin şebeke uygulamaları, yük kaydırma, frekans kontrolü ve mevsimsel dalgalanmalar için toplu enerji depolama olarak gösterilmektedir (Mahlia ve diğ., 2014; Gulagi ve diğ., 2017).



Şekil 2.8 : Basınçlı hava enerji sistemlerinin çalışma prensibi.

### 2.2.1.4. Yerçekimi enerjisi depolama sistemleri (GPM)

Hazneli pompalı hidro enerji depolama sistemlerinin coğrafik limitleri ve su ihtiyacı yüzünden bu sistemler birçok adaptasyon geçirmişlerdir; ancak, çalışma prensipleri yine PHES’lerde olduğu gibi yerçekimi kuvvetine bağlı kalmıştır (Aneke ve Wang, 2016).

Bu sistemler, kapalı sistemler olup piston şaftı sadece bir kere su ile doldurulur. Depolama sürecinde motor/jeneratör yardımıyla su pistonun alt kısmına basılır ve piston yukarı itilir. Elektrik ihtiyacı duyulana kadar piston en üst pozisyonda sabit tutulur, enerji talebi ortaya çıktığında piston suyu şaft boyunca iterek motor/jeneratörlerin enerji üretmesi sağlanır. Henüz herhangi bir uygulaması olmayan bu sistemin veriminin yüzde 80'den fazla olduğu geliştiricileri tarafından iddia edilmektedir (Url-2).

#### **2.2.1.5. Sıvı pistonlu enerji depolama sistemleri (LPES)**

Bu nispeten henüz ticarileştirilmemiş yeni bir enerji depolama konseptidir. Tüm depolama tanklarına dağıtılan sıkıştırma / genişleme işleminin düşük hızından dolayı, neredeyse izotermal bir davranış sağlar (Van de Ven ve Li, 2009).

Sistem; depolamada bir gaz hacminin –genellikle azot- sıkıştırılması ve genişmesinin modüle edilmesiyle çalışır. Bir enerji depolama sistemi olarak, doldurma aşamasında; elektrik, sıvıyı kaba akıtan ve burada bulunan gazı sıkıştıran yüksek verimli sabit deplasmanlı pompasına/motoruna aktarılır. Enerji, ihtiyaç duyulana kadar sıkıştırılmış gazda depolanır. Deşarj aşamasında ise, sıkıştırılmış gaz genişir ve sıvı pompa-motoru çalıştırıp enerji üretmek üzere tanktan dışarı atılır.

Hadjipaschalis ve diğ, (2009) belirttiği üzere; limitsiz döngü sayısı, düşük bakım masrafı, kullanım ömründen bağımsız depolama kapasitesi, tamamen boşaltıldığında performans kaybı yaşamaması ve neredeyse kendi kendine deşarj olmaması bu teknolojinin kurşun-asit bataryalara karşı en büyük avantajlarıdır. Ancak, düşük enerji yoğunlukları (3.2-5.55 Wh/kg) ve yaklaşık yüzde 73 verimlilikleri dezavantaj yaratmaktadır.

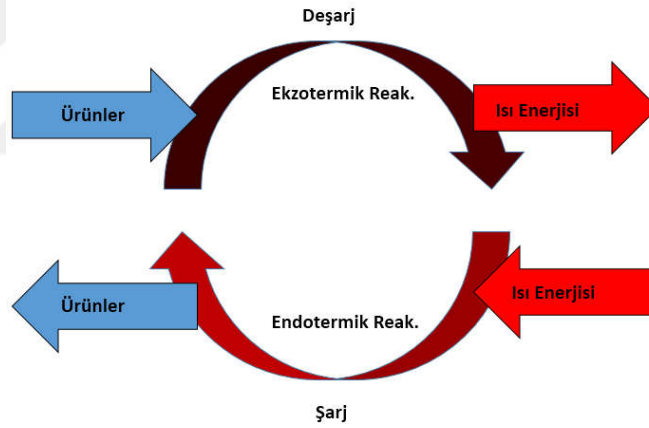
#### **2.2.2. Termal enerji depolama (TES)**

Termal enerji depolama sistemleri; sıcaklık, yer ve güç gibi farklı şartlar altında, daha sonra kullanılmak üzere ısıyı veya soğuğu depolama ortamlarıdır (Cabeza ve diğ, 2015). Bu sistemlerin, mahal ısıtma veya soğutmada, ısıl işlemlerde, sıcak su ve enerji üretiminde endüstride ve meskenlerde kullanımı uygunlardır.

TES sistemleri, enerji ihtiyacını karşılamak için kullanıldığı zamana kadar elektrik veya diğer atık ısı kaynaklarını termal enerji biçiminde depolamak için kullanılan cihazlardan oluşur. TES sistemleri genellikle malzemenin çalışma sıcaklığının oda

sıcaklığından daha yüksek olup olmamasına bağlı olarak düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık sistemlerinde sınıflandırılır (Chen ve diğ, 2009; Fernandez ve diğ, 2012). Düşük sıcaklıkta TES'in 200 C'nin altındaki bir sıcaklıkta çalıştığı varsayılmıştır. Bu tipteki sistemler genellikle bina ısıtma ve soğutma uygulamalarında, güneş enerjisi ile pişirme, güneş enerjili su kazanı ve hava ısıtma uygulamalarında kullanılırlar. Yüksek sıcaklık TES sistemleri ise, yenilenebilir enerji teknolojilerinde, atık ısı geri kazanımında ve termal güç sistemlerinde kullanılır (Aneke ve Wang, 2016).

Termokimyasal ısı depolama sistemlerinde Şekil 2.9'da görüldüğü gibi, endotermik reaksiyon sırasında enerji depolama süreci, deşarj sürecinde ise ekzotermik bir reaksiyon gerçekleşir (Pardo ve diğ, 2014). Şarj sırasında, kimyasal reaksiyona giren maddeyi ve ürünleri endotermik reaksiyonda ayırmak için termal enerji kullanılır. Endotermik reaksiyon sonucu ortaya çıkan ürünler ayrı olarak depolanır ve enerji ihtiyacı duyulduğunda bu ürünler tekrar bir araya getirilerek ekzotermik reaksiyon sonucu ısı açığa çıkması sağlanır. Bu ısı da enerji olarak kullanılır.



**Şekil 2.9 :** Termokimyasal ısı depolama süreci, Rammelberg ve diğ (2016)'dan uyarlanmıştır.

Kousksou ve diğ, (2014) ve Agrafiotis ve diğ, (2014)'e göre; termokimyasal ısı depolama sistemlerinin enerji yoğunluğu gizli ısı depolama ve hassas ısı depolama sistemlerinininkiyle karşılaştırıldığında sırasıyla 5 kat ve 10 kat daha fazla olmak birlikte; depolama sürecinde ürünler dış ortam sıcaklığında depolandığından dolayı ısı kaybı yoktur ve bu yüzden depolama süreleri teorik olarak sınırsızdır.

Gizli ısı depolama sistemleri, depolama biriminde meydana gelen faz değişikliğinde ortaya çıkan gizli ısıyı saklayan sistemlerdir. Bu sistemlerde kullanılan malzemeler "Faz Değiştiren Materyaller" (Phase Change Materials- PCM) olarak bilinirler. Enerji

depolama sürecinde, faz değişikliği genellikle katı fazdan sıvı faza olmaktadır (Aneke ve Wang, 2016). Katı-katı faz değişiminde özgül gizli ısı düşük olmasına rağmen; sızdırma problemi olmaması ve muhafaza içine yerleştirme gereksinimi olmaması avantaj sağlamaktadır (Alva ve diğ, 2018). Sıvı-gaz faz değişiminde ise en yüksek gizli ısı ortaya çıkmaktadır, ancak; depolama materyalinin hacmindeki büyük değişiklik yüzünden genel olarak pek tercih edilmezler (Cardenas ve Leon, 2013).

#### *Faz değişim malzemesi (PCM)*

Gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılan faz değişim malzemeleri organik faz değişim malzemeleri ve inorganik faz değişim malzemeleri olmak üzere iki gruba ayrılırlar.

Organik faz değişim malzemeleri kendi içinde iki gruba ayrılır: Parafinler ve Parafin olmayanlar.

- Parafinler: Parafin mumları; genel olarak düz alkan zincirlerinin ( $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_n\text{-CH}_3$ ) karışımından oluşurlar ve güvenli olmaları, kimyasal olarak eylemsiz, güvenilir, 500 °C'nin altında stabil olmaları, tahmin edilebilir olmaları, korozif olmamaları, erime sürecinde küçük hacim değişimi ve erimiş formdaki düşük buhar basıncı sayesinde tercih edilmektedirler (Kousksou ve diğ, 2014). Bu avantajlarına karşı, düşük ısı iletkenlikleri, plastik konteynırlar ile uyumsuz olmaları ve alevlenebilmeleri dezavantaj yaratmaktadır.
- Non-Parafinler: Parafin olmayan organik faz değişim malzemeleri, termal ısı depolama için daha yüksek faz değişim sıcaklık aralığı sağlamaktadırlar. Yağ asitleri, esterler, alkoller, glikoller bu tip faz değişim malzemelerin örnek verilebilirler (Alva ve diğ, 2018). Faz değişimi sürecinde yüksek gizli ısı depolama kapasiteleri, yağ asitler için limitli veya hiç aşırı soğutma, belli sıcaklık değerleri altında uzun süreli kimyasal stabilite göstermeleri avantaj yaratırken; düşük ısı iletkenlikleri, alevlenebilirlikleri, toksisite göstermeleri, yüksek sıcaklıklarda stabilite kaybı, yağ asitlerinin hala pahalı ve hafif korozotif olmaları dezavantajları olarak gösterilmektedir (Sharma ve diğ, 2009).

İnorganik faz değişim malzemeleri hidrat tuzları, tuzlar, metal ve alaşım malzemelerini içerirler. Sodyum sülfat dekahidrat (Glauber tuzu), kalsiyum klorid heksahidrat, sodyum tiyosülfat pentahidrat gibi hidrat tuzları düşük maliyetleri sayesinde oldukça araştırılmışlardır (Sharma ve diğ, 2009; Zalba ve diğ, 2003).



Duyulur ısı depolama sistemlerinde enerji, enerji depolama araçlarının sıcaklığı değiştirilerek depolanır. Depolanan ısı miktarı, depolama malzemesinin yoğunluğu, özgül ısısı, hacmi ve sıcaklık değişimi ile orantılıdır. Depolama sisteminin performansı esas olarak, gerekli hacmi etkileyen maddenin yoğunluğuna ve özgül ısısına bağlıdır (Fernandez ve diğ, 2010).

Genel olarak duyulur ısı depolama sistemleri, depolama aracı, muhafaza aracı (genellikle tank) ve giriş/çıkış donanımlarından oluşurlar. Muhafaza tankları hem depolama materyalini barındırmak hem de ısı kayıplarını önlemek zorundadır. Bu sistemler sıvı araçlardan (su, yağ bazlı sıvılar, erimiş tuzlar vb.) veya katı araçlardan (kaya, metal vb.) yapılabilir. Ancak, bu sistemlerin iki adet dezavantajı bulunmaktadır; büyük yer ihtiyacı ve duyulur enerji eklenmesi ve çekilmesinden kaynaklanan sıcaklık salınımları (Fernandez ve diğ, 2010; Laing ve diğ, 2011).

### **2.2.3. Elektrokimyasal enerji depolama (EESS)**

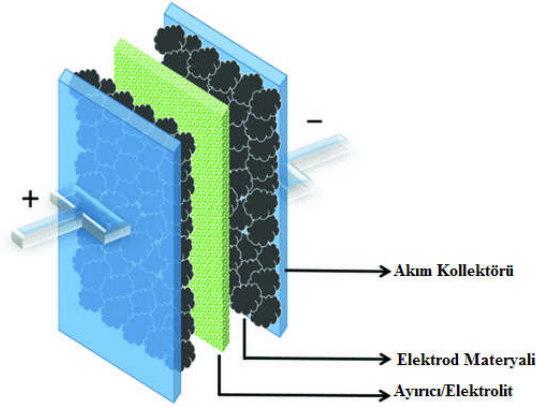
Güç sistemleri için en eski enerji depolama teknolojisi elektrokimyasal enerji depolama sistemleridir. En büyük karakteristik özellikleri, depolanmış kimyasal enerjisi elektrik enerjisine çevirme yetenekleridir. Bu kimyasal süreç boyunca ne az iki reaksiyon partneri kullanılır. Bu reaksiyonun sonucu ortaya belirli voltajda ve sürede elektrik akımı çıkar (Güney ve Tepe, 2017).

Elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinin süper kapasitörler ve bataryalar olmak üzere iki ana kolu vardır.

#### **2.2.3.1. Süper kapasitörler**

Süper kapasitörler ayrıca elektrokimyasal kapasitörler, ultra kapasitörler veya çift katlı elektrik kapasitörleri olarak da bilinmektedirler. Bu tip kapasitörler katı bir elektrodan ve bir elektrolitten oluşurlar. Şekil 2.10'da süper kapasitörün iç yapısı gösterilmiştir. Şarj durumunda, negatif iyonlar elektronlarını kaybederek pozitif plaka (elektrod) etrafında toplanırlar ve pozitif iyonlar negatif elektrodta biriktirilirlen. Kapasitör enerji kaynağından çıkarıldığında, plakalar arasındaki potansiyel farkından dolayı bir elektromanyetik alan oluşur. Deşarj durumunda ise iyonlar ilk pozisyonlarına geri dönerler. Süper kapasitörlerin davranışları iki plaka arasında bulunan malzemenin (sıvı veya katı elektrolit) özelliklerine çok bağlıdır ve güç yoğunluğu en yüksek depolama araçlarının başında gelir (Koochi-Kamali ve diğ, 2013).

Bunun yanı sıra, milisaniyeler içinde tepki verebilmektedirler ve neredeyse sınırsız şarj/deşarj döngüsüne girebilmektedirler. Verimlilikleri yüzde 95 civarındadır ve kendi başınadeşarjları günde yüzde 5'tir, bu yüzden, depolanan enerji olabildiğince çabuk kullanılmalıdır (İbrahim ve diğ, 2008).



**Şekil 2.10 :** Süper kapasitörün yapısı, Samantara ve Ratha (2018)'den uyarlanmıştır.

Yüksek güç depolama kapasitelerinin yanında, hızlı şarj/deşarj yetenekleri ile süper kapasitörler anlık enerji talebi karşılama uygulamaları için çok uygundur. Süper kapasitörlerin bataryalar ile kombine edilmesi sonucu yük paylaşımı yapılarak (sadece uzun süreli kesintilerde bataryalar kullanılarak) bataryaların ömrü uzatılabilmektedir (Hadjipaschalis ve diğ, 2009).

### 2.2.3.2. Bataryalar

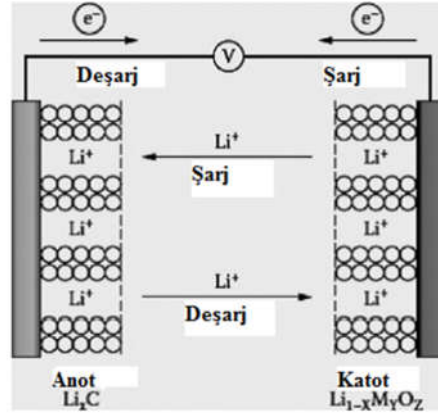
Bataryalar kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren araçlardır ve bu durum hem enerji depolamalarına hem de doğrudan doğru akım (DC) üretmelerine imkân tanımaktadır. Elektrik enerjisi batarya içerisinde, elektrokimyasal oksidasyon indirgemesi (Redox) tepkimesi yoluyla üretilir (Linden ve Reddy, 2001). Bütün batarya tipleri bir pozitif elektrot (katot), bir negatif elektrot (anot) ve bir iyonik iletken (elektrolit) oluşurlar. Bataryalar, içerdikleri elektrolit tipine göre; elektrolit sıvıysa yaş batarya (pil), elektrolit jel veya katıysa kuru batarya (pil) olarak ayrılabilirler.

Batarya depolama sistemleri güç uygulamalarında en sık kullanılan teknolojilerdir (Divya ve Ostergaard, 2009). Elektrik şebekelerinin haricinde; hibrid elektrikli araçlarda, deniz üstü ve deniz altı araçlarında, uzay ve havacılık endüstrisinde, taşınabilir elektronik cihazlarda ve kablosuz ağ sistemlerinde kullanılmaktadırlar.

Uygulama alanına bağılı olarak kullanılacak batarya tipi seçiminde; kapasite, güç, şarj/deşarj oranı, tepki süresi gibi kriterlere dikkat edilmelidir (Zhang ve diğ, 2018). Bu teknolojiler içinde; kurşun asit piller, lityum-iyon piller, nikel-kadmiyum piller, sodyum-nikel klorür piller, nikel-metal hidrit piller, sodyum-sülfür piller ve akışkan piller en öne çıkanlardan bazılarıdır.

- *Kurşun asit piller:* Kurşun asit piller ilk olarak 1860 yılında Raymond L.G. Plante tarafından geliştirildi ve ilk kullanılabilir şarjlı batarya sistemleri oldular (Kurzweil, 2010). Günümüzde de oldukça yaygın kullanılan kurşun asit pillerin katodu  $PbO_2$ 'den, anodu  $Pb$ 'den oluşur ve elektrolit olarak da sülfürik asit kullanılır. Düşük maliyeti, güvenilirliği, teknolojik olarak eriştiği seviye ve hızlı tepki süreleri ile özellikle otomotiv sektöründe oldukça yaygın kullanılırlar (Suberu ve diğ, 2014). Ancak; bu tip bataryaların sıcaklığa olan hassaslığı hem bataryanın ömrünü hem de çevrim sayısını etkilemektedir. Diğer başlıca problemleri; yüksek kendi kendine boşalma oranı (ayda yaklaşık %3-20), düşük enerji yoğunluğu ( $\approx 30$  Wh/kg), düşük güç yoğunluğu ( $\approx 150$  W/kg), düşük çevrim sayısı (2000-2500 çevrim) ve çevre üzerindeki negatif etkisi sayılabilir (Akinyele ve Rayudu, 2014; Zhang ve diğ, 2018).
- *Lityum-iyon piller:* İlk lityum-iyon piller 1960'larda Bell Laboratuvarlarında geliştirildi ve ilk ticari versiyonu Sony tarafından 1990 yılında üretildi (Chen ve diğ, 2009). Bu tip pillerin katodunda lityum metali veya lityum demir fosfat ( $LiFePO_4$ ) gibi lityum alaşımları kullanılmaktadır. Anodunda ise en yaygın kullanılan materyal grafitir. Şekil 2.11'de gösterildiği üzere; batarya şarj edildiğinde, katottaki lityum atomları iyonlaşır ve elektrolit boyunca dış elektronlarla birleştiği ve karbon tabakaları arasında lityum atomları olarak biriktirildiği karbon anoduna doğru göç eder. Bu işlem boşaltma işlemi sırasında tersine çevrilir.

Lityum-iyon bataryalar, düşük tepki süresi, küçük boyut ve/veya düşük ağırlık gerektiren taşınabilir elektronik cihazlar ve medikal uygulamalar için oldukça idealdirler. Ayrıca; yüksek enerji yoğunluğu (75-200 Wh/kg), yüksek güç yoğunluğu (500-2000 W/kg), yüksek verimlilik ve düşük kendi kendine boşalma oranı ile lityum-iyon bataryalar elektrikli/hibrit araçlarda kullanımı uygundur (Khaligh ve Li, 2010).



**Şekil 2.11** : Lityum-iyon pil çalışma prensibi, Barnes ve Levine (2011)'den uyarlanmıştır.

Lityum-iyon bataryaların önündeki en büyük engeller ise; sıcaklık nedeniyle bataryanın ömrünü kısalması, boşalma derinliğinin (DoD) batarya ömrünü etkilemesi ve yüksek maliyetleri olarak gösterilmektedir (Luo ve diğ, 2015).

- *Nikel-kadmiyum piller:* Nikel-kadmiyum bataryaları yaklaşık 100 yıllık geçmişleriyle kurşun-asit bataryalar gibi teknolojik olarak olgunlaşmışlardır. Bu tip piller; bir adet pozitif nikel hidroksit plakasından, bir adet negatif kadmiyum hidroksit plakasından, bir separatörden ve alkalın elektrolitten oluşurlar.

Güvenilirlikleri, hızlı şarj olmaları, kapasite kayıplarının olmaması ve oldukça düşük bakım gereksinimleri öne çıkan nikel-kadmiyum pillerin, görece yüksek maliyeti, kadmiyumun çevresel etkisi ve düşük çevrim sayıları (2000-2500) ile dezavantaj yaratmaktadır (Akinyele ve Rayudu, 2014; Aneke ve Wang, 2016).

- *Soydum-metal hidrit piller:* Nikel-metal Hidrit (NiMH) bataryalar, hidrojen emici bir alaşımın kadmiyum yerine elektrot olarak kullanılması dışında Nikel-kadmiyum bataryaya benzerler. Orta derecede özgül enerjiye (70–100 Wh/kg) ve nispeten yüksek enerji yoğunluğuna (170–440 Wh/L) sahiptir ve bu özellikleriyle Nikel-kadmiyum bataryalardan önemli ölçüde daha iyidirler (Zhu ve diğ, 2013). Bu bataryaların NiCd pillere göre diğer avantajları ise, azaltılmış bir bellek etkisine sahip olmaları ve daha çevre dostu yapıda olmalarıdır. NiMH piller, lityum-iyon pillerle karşılaştırıldığında ise daha uzun çevrim ömrüne sahiptirler. NiMH bataryalar, taşınabilir elektronik cihazlardan hibrit/elektrikli araçlara kadar birçok alanda kullanılabilirler (Zhu ve diğ, 2013).

- *Sodyum sülfür piller:* Sodyum sülfür bataryalarda; pozitif elektrot olarak erimiş sülfür, negatif elektrot olarak erimiş sodyum ve elektrolit olarak da katı beta alumina seramik kullanılır. Bu elektrolit sadece pozitif sodyum iyonlarının geçişine izin verir. Ticari elektrik şebekelerini desteklemede, rüzgâr santrallerinin entegrasyonunda ve yüksek değerli şebeke servislerinde kullanılmaktadır (Akhil ve diğ, 2013). Görece yüksek enerji yoğunluğu (151-170 kWh/m<sup>3</sup>), %85'ten fazla olan verimliliği, neredeyse sıfıra yakın günlük kendi kendine boşalma oranı, uzun deşarj süresi ve geri dönüşebilir ( $\approx$ %99) malzemelerden yapılması en büyük artılarıdır (Luo ve diğ, 2015; Akhil ve diğ, 2013). Diğer yandan; yüksek yatırım maliyeti, çalışabilir olması için yüksek sıcaklık ihtiyacı (300 °C-350 °C) ve metalik sodyumun suyla karışması durumunda yanıcı olmasından dolayı kullanımı kısıtlıdır.
- *Sodyum-nikel klorür piller:* ZEBRA bataryalar olarak da adlandırılan sodyum nikel klorür bataryalar, 94-120 Wh/kg aralığında ortalama bir enerji yoğunluğuna, yaklaşık 150 W/kg güç yoğunluğuna sahiptirler ve sodyum sülfür bataryaları gibi yüksek sıcaklıkta ( $\approx$ 300 °C) çalışmaktadır (Chen ve diğ, 2009). Şarj aşamasında, NaCl tuzu ve Ni, NiCl<sub>2</sub>'ye ve erimiş Na'ya dönüştürülür. Bu kimyasal reaksiyon, deşarj fazı sırasında tersine çevrilir. Avantajları arasında; iyi darbe gücü kapasitesi, düşük kendi kendine boşalma oranı ve görece yüksek çevrim ömrü sayılabilir.
- *Akışkan piller:* Akışkan piller, harici sıvı elektrolit tanklarında bulunan iki çözünür redoks çiftinde enerji depolar. Bu elektrolitler, tanklardan iyon seçici membranlarla ayrılan iki elektrolit akış bölmesinden oluşan hücre yığına pompalanır. İşlem, elektrolit çözeltilerinin indirgeme-oksidasyon reaksiyonlarına dayanmaktadır. Akışkan pillerin şarj aşamasında, bir elektrolit anotta oksitlenir ve bir başka elektrolit katotta indirgenir ve elektrik enerjisi elektrolit kimyasal enerjisine dönüştürülür. Deşarj fazında ise süreç tersine çevrilir. Akışkan piller redoks akışkan pilleri ve hibrit akışkan piller olarak ikiye ayrılır. Bu tip bataryaların en önemli avantajlarından biri, sisteminin gücünün depolama kapasitesinden bağımsız olmasıdır. Sisteminin gücü, elektrotların büyüklüğü ve istif içindeki hücre sayısı ile belirlenir; depolama kapasitesi ise elektrolitin konsantrasyona ve miktarına bağlıdır (Yang ve diğ, 2011). Ayrıca; elektrolitlerin ayrı tanklarda depolanmasından dolayı, kendi

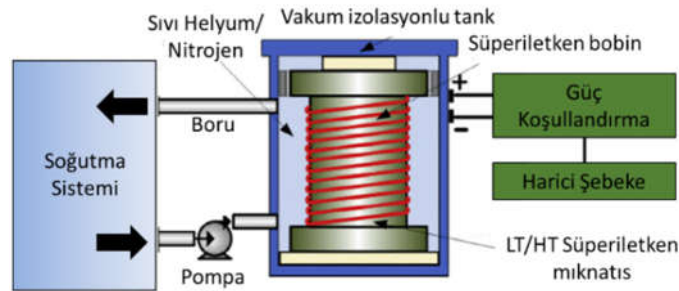
kendine boşalma oranları çok düşüktür. Akışkan bataryaların dezavantajları, düzensiz basınç düşmelerinden kaynaklanan düşük performansı, reaktan kütle transfer sınırlaması, nispeten yüksek üretim maliyetleri ve geleneksel bataryalara kıyasla daha karmaşık sistem gereksinimleri sayılabilir (Nguyen ve Savinell, 2010). Vanadyum redoks, çinko brom ve polisülfür brom gibi akışkan pil teknolojileri kullanılmakta veya enerji depolama sistemleri uygulamaları için potansiyel taşımaktadırlar. En olgunlaşmış akışkan pil teknolojisi vanadyum redoks akışkan pilleridir (VRB) (Divya ve Ostergaard, 2009). VRB'ler 0.001 saniyeden daha hızlı tepki süresi, 10000-16000+ çevrim sayısı, %85 gibi görece yüksek bir verimlilik sunmakla birlikte yüksek işletim maliyeti, düşük elektrolit stabilitesi ve çözünürlüğü yüzünden düşük kalitede enerji yoğunluğuna sahiptirler (Yang ve diğ, 2011; Chen ve diğ, 2009).

- *Yakıt hücreleri:* Yakıt hücreleri, bir yakıtta depolanan kimyasal enerjiden doğrudan elektrik akımı üreten bir elektrokimyasal cihazlardır. Bir hidrojen yakıt hücresi, hidrojen ve oksijen kullanarak elektrik ve su üretebilir, ayrıca geri dönüşümlü bir hidrojen yakıt hücresi de hidrojen ve oksijen üretmek için elektrik ve su kullanabilir. Hidrojen yakıt hücresinin temel elemanları; elektrik enerjisini hidrojene dönüştürmek için bir elektrolizör ünitesi, hidrojen depolama sisteminin kendisi ve bir de hidrojende depolanan kimyasal enerjiyi tekrar elektrik enerjisine çeviren hidrojen enerjisi dönüşüm sistemidir (Chen ve diğ, 2009). Bu elementleri kullanarak, su elektrolitik olarak hidrojen ve oksijene ayrıştırılır. Yakıt ve elektrolit seçimine bağlı olarak, altı ana yakıt hücresi grubu vardır; bunlar: Alkalin Yakıt Pili (AFC), Fosforik Asit Yakıt Pili (PAFC), Katı Oksit Yakıt Pili (SOFC), Erimiş Karbonat Yakıt Pili (MCFC), Proton Değişim Membran Yakıt Pili (PEMFC), Yüksek Sıcaklıklı Proton Değişim Membran Yakıt Pili (HT-PEMFC) ve Direkt Metanol Yakıt Pili (DMFC) (Arshad ve diğ, 2019). Bu tip piller arasındaki temel farklar kullanılan elektrolit, çalışma sıcaklıkları, tasarımları ve kullanım alanlarıdır. Ayrıca, her tipin kendine özgü yakıt gereksinimleri vardır. Hidrojen yakıt hücreleri; yüksek enerji yoğunluğu, küçük-büyük boyutlarda modüler şekilde uygulanabilirlik sunması, 15 yıldan daha fazla kullanım ömrü ve 20000 şarj/deşarj döngüsü kapasitesi ile yük kaydırma uygulamalarında parlak bir geleceği olacağı düşünülmektedir (Kousksou, 2014).

#### 2.2.4. Süper iletken manyetik enerji depolama (SMES)

Süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri, kriyojenik olarak süper iletkenlik kritik sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa soğutulmuş enerjiyi depolamak için manyetik alanı kullanan sistemlerdir. Bu enerji depolama sistemi, doğru akımın, yaklaşık -270 °C gibi çok düşük bir sıcaklıkta çalışan, neredeyse sıfır dirençli (genellikle niobiumtitan (NbTi)) filamentlerden oluşan süper iletken kablolardan yapılmış olan bobine indüklenmesiyle çalışır. Tipik bir SMES sistemi Şekil 2.12’de görüldüğü gibi üç ana komponentten meydana gelir; bir süper iletken bobin, bir güç koşullandırma alt sistemi ve bir soğutma ve vakum alt sistemi. Genel olarak, akım bir bobin içinden geçtiğinde, elektrik enerjisi telin direnci nedeniyle ısı olarak yayılır. Bununla birlikte, eğer bobin cıva veya vanadyum gibi süper iletken bir malzemeden, süper iletkenlik durumunda (normalde çok düşük bir sıcaklıkta) yapılırsa, sıfır direnç oluşur ve elektrik enerjisi neredeyse hiç kayıp olmadan depolanabilir (Chen ve diğ, 2009; Luo ve diğ, 2015). Depolanan enerjinin büyüklüğü, bobinin kendi kendine endüktansı ve içinden geçen akım tarafından belirlenir (Yuan, 2011).

Süper iletken manyetik alan enerji depolama sistemlerinin en büyük avantajları; görece yüksek güç yoğunluğu ( $\approx 2000$  W/kg), milisaniye bazında hızlı tepki süreleri, bir dakikanın altında tamamen şarj olabilmeleri, yüksek çevrim verimlilikleri (%95-%98) ve 30 yıla varan ömürleridir (Akinyele ve Rayudu, 2014; İbrahim ve diğ, 2008).



Şekil 2.12 : SMES sisteminin şematik diyagramı, Luo ve diğ (2015)’ten uyarlanmıştır.

SMES sistemlerinin bu avantajlarına rağmen; yüksek yatırım maliyeti (10000 \$/kWH), yüksek günlük kendi kendine boşalma oranı (%10-15), yarattığı manyetik manyetik alandan dolayı çevreye olan olumsuz etkisi ve bobinin küçük sıcaklık değişikliklerine çok hassas olması gibi dezavantajları bulunmaktadır (Chen ve diğ, 2009; Beaudin ve diğ, 2010).

### **2.2.5. Kimyasal enerji depolama**

Kimyasal enerji depolaması sistemleri; elektrik enerjisinin, enerji üretimi için gerektiğinde depolanıp kullanılacak kimyasal bileşiklerin üretilmesinde kullanıldığı tüm teknolojileri kapsar. Enerji depolama uygulaması için şu anda kabul edilen birkaç kimyasal bileşik vardır. Bunlar: hidrojen, metan, hidrokarbonlar, metanol, bütanol ve etanol. Butanol ve etanol esas olarak biokütlenin fermantasyonu yoluyla üretilir ve bu nedenle elektriksel enerji depolama tekniği olarak kabul edilmez. Bileşikler arasında, hidrojen, elektrikten kimyasal bileşiğe giden en kısa yol olarak kabul edilir (Aneke ve Wang, 2016).

### **2.2.6. Kriyojenik enerji depolama**

Kriyojenik enerji depolamanın diğer bir adı da sıvılaştırılmış gaz depolama sistemleridir. Sürecin ilk aşaması, basınçlı gaz enerji sistemlerinin sıkıştırma aşamasına benzer. Sıkıştırılmış gaz daha sonra sıvılaştırılır ve atmosferik basınca yakın bir basınçta bir tankta depolanır. Enerji üretimi (deşarj) sırasında, sıvı gaz pompalanıp, atık ısı kullanılarak buharlaştırılmadan ve elektrik üretiminden önce doğrudan soğutma ve iklimlendirme sağlamak için kullanılabilir (Aneke ve Wang, 2016).

Bu işlemin bir temel avantajı, sıvı gazın, gaz halindeki havanın işgal ettiği hacminin 1 / 700'ünü kaplamasıdır ve bu, büyük miktarda gazın küçük bir alanda depolanmasıyla sonuçlanmaktadır. Bununla birlikte, göreceli olarak yaklaşık %50 gibi düşük bir verime sahiptir (Sciacovelli ve diğ, 2017).

## **2.3. Depolama Sistemlerinin Karşılaştırılması**

Hiçbir depolama sisteminin; güç sistemi uygulamalarının bütün gereksinimlerini tek başına sağlaması mümkün değildir. Her bir depolama sisteminin kendine has farklı özellikleri vardır. Bu özelliklere uygun olarak, depolama sistemleri bazı uygulamalar için daha uygun olurken bazı uygulamalarda istenilen performansı gösterememektedirler.

Bu özellikleri ana hatlarıyla sekiz başlık altında toplayabiliriz: i) enerji ve güç yoğunluğu, ii) ömür ve çevrim sayısı, iii) depolama kapasitesi vedeşarj süresi, iv) çevrim verimi, v) tepki süresi, vi) kendi kendine boşalma süresi, vii) yatırım ve



operasyon maliyeti, viii) teknolojik olgunluk. Depolama teknolojilerinin bütün bu teknik karakteristik özelliklerinin karşılaştırması Çizelge 2.8’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

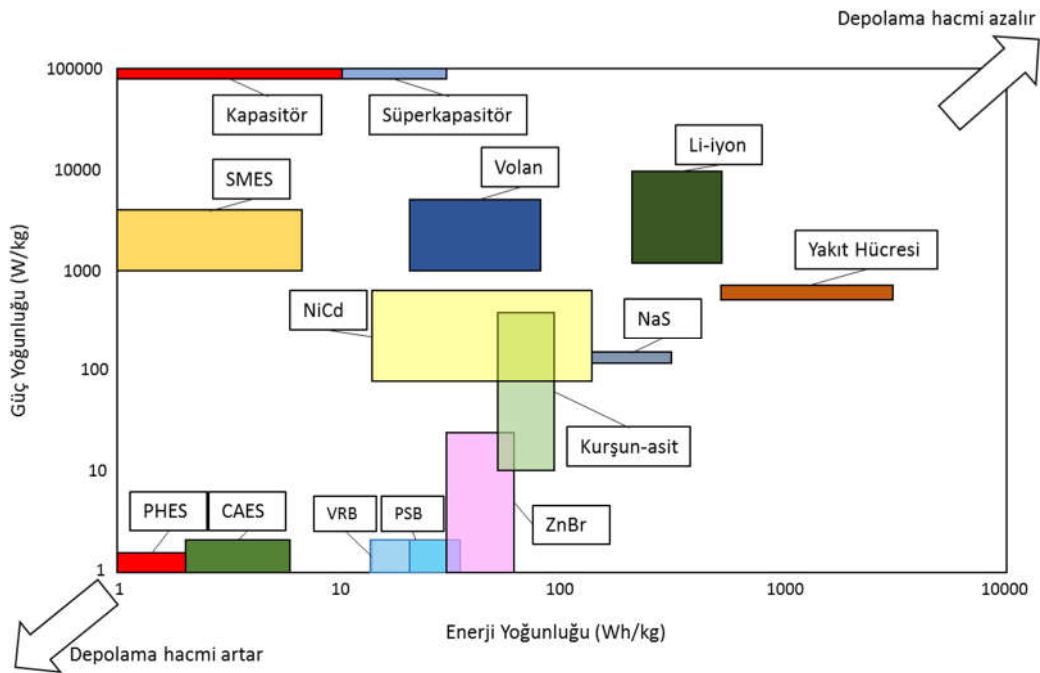
### 2.3.1. Enerji ve güç yoğunluğu

Depolama sisteminin boyutu birçok uygulama için oldukça önemli bir faktör ve kısıttır. Belirli bir enerji miktarı için, güç ve enerji yoğunlukları ne kadar yüksek olursa, gerekli enerji depolama sisteminin hacmi o kadar az olacaktır.

Şekil 2.13’te gösterildiği üzere; hacim kısıtlaması olan uygulamalara daha uygun olan kompakt teknolojiler sağ üst köşede yer alırken, büyük hacimli depolama sistemleri sol alt köşede bulunmaktadır.

Çok yüksek güç yoğunluğuna sahip ES sistemleri genellikle büyük deşarj akımları ve hızlı tepki süresi olan yüksek güç kalitesi gerektiren uygulamalar için uygundur (Aneke ve Wang, 2016).

Çoğu batarya sistemi, volan ve yakıt hücresinin nispeten orta düzeyde enerji yoğunluklarına ve güç yoğunluklarına sahip olduğu görülmektedir. PHS ve CAES'in yoğunluğu daha düşüktür, bu nedenle bunlar çoğunlukla sabit depolama sistemlerinde kullanılır ve şebeke ölçeğindeki uygulamalar için büyük rezervuarlar gerektirir.



**Şekil 2.13 :** Depolama teknolojilerinin enerji yoğunluğunun ve güç yoğunluğunun karşılaştırılması, Luo ve diğ (2015)’ten uyarlanmıştır.

Süper kapasitörler; çok yüksek güç yoğunluklarına, ancak düşük enerji yoğunluklarına sahiptir. Akışkan bataryalarının yoğunluğu, geleneksel bataryaların yoğunluğundan daha düşüktür. Lityum-iyon piller ise, hem yüksek enerji yoğunluğuna hem de yüksek güç yoğunluğuna sahiptir, bu da taşınabilir cihazlarda yaygın kullanımlar için uygun kılar.

### **2.3.2. Ömür ve çevrim sayısı**

Kullanım ömrü ve çevrim süreleri, toplam yatırım maliyetini etkileyen iki faktördür. Kısa kullanım ömrü ve düşük çevrim süreleri bakım ve değiştirme maliyetini artıracaktır. Bütün parametreler aynı olmak koşuluyla, uzun ömürlü enerji depolama teknolojileri genellikle kısa ömürlü olanlara göre yatırım açısından tercih edilir.

PHES, CAES, volan, yerçekimi enerji depolama ve hidrojen enerji depolama sistemleri gibi geleneksel makine mühendisliğine dayanan mekanik enerji depolama teknolojilerinin, yaşam süreleri esasen mekanik bileşenlerin kullanım ömrü tarafından belirlendiği için genellikle uzun ömürlü ve normalde yüksek çevrim sürelerine sahip (yaklaşık 10.000 veya daha fazla) oldukları söylenebilir.

SMES, kapasitörler ve süper kapasitörler gibi elektrik enerjisinde depolanan enerji depolama sistemlerinde; çevrim sayıları normalde 20.000'den yüksektir. Ancak; konvansiyonel bataryaların çevrim kabiliyetlerinin, çalışma süresinde oluşan kimyasal bozulma nedeniyle diğer EESS'ler kadar yüksek olmadığı Çizelge 2.8'de görülebilir.

### **2.3.3. Depolama kapasitesi ve depolama süresi**

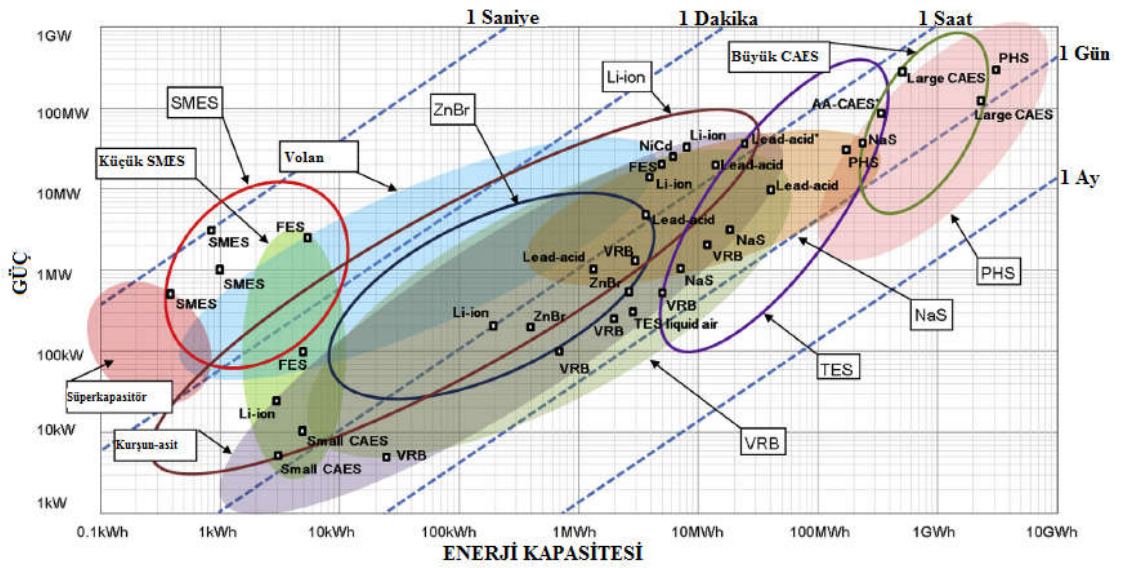
Depolama kapasitesi, enerji depolama aygıtında depolanan toplam enerjidir ve birimi Wh'tır. Ticari ölçekli enerji depolama sistemleri genellikle yüksek depolama kapasitesine sahiptir.

Kendiliğinden boşalma problemi nedeniyle, depolama süresi, belirli bir uygulama için kullanılacak bir enerji depolama teknolojisine karar verirken göz önünde bulundurulması gereken önemli özelliklerden biri olarak kabul edilir. Depolama sistemlerinin nominal deşarj süreleri 3 farklı kategoride sınıflandırılabilir (Luo ve diğ, 2015):

- 1 saatten daha az süreli: Volanlar, süper kapasitörler ve süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri

- 10 saate kadar süreli: Küçük ölçekli sıkıştırılmış havalı enerji depolama sistemleri, kurşun-asit bataryalar, lityum-iyon bataryalar, nikel-kadmiyum bataryalar, çinko-brom akışkan bataryalar
- 10 saatten daha uzun süreli: Pompalı hazneli hidro elektrik depolama sistemleri, büyük ölçekli yer altında sıkıştırılmış havalı enerji depolama sistemleri, vanadyum redoks akışkan bataryalar, likit gazlı enerji depolama sistemleri, yakıt hücreleri ve termal ısı depolama sistemleri

Şekil 2.14’te verildiği üzere, PHES ve CAES, yüksek depolama kapasitesine sahiptir ve bu nedenle şebeke ölçekli enerji depolama uygulamaları için uygundur. LAES ve GPM ve ARES gibi konsept aşamasında olan diğer teknolojilerin geliştirilmesi, ölçeklenebilir olduklarından ve ayrıca olgunlaştırılmış mekanik bileşenlere dayandıklarından şebeke ölçeğindeki uygulamalar için uygun olmaları muhtemeldir. Bu teknolojiler, kendiliğinden deşarj oranlarının düşük olması nedeniyle uzun süreli depolama için de uygundur.



Şekil 2.14 : Enerji depolama sistemlerinin boşalma sürelerinin karşılaştırılması, Luo ve diğ (2015)’ten uyarlanmıştır.

### 2.3.4. Çevrim verimliliği

Çevrim verimliliği, bir şarj/deşarj döngüsü sırasında depolama cihazından çıkan enerjinin, cihaza giren enerjiye oranıdır. Enerji depolama sisteminde, enerjinin depolanması ve boşalması sonucu ortaya çıkan kayıpları açıklar. Enerji kayıplarının bir kısmı, enerji depolama işleminde kullanılan yardımcı cihazlarda meydana gelir.

Deşarj verimliliği, enerji depolama aşamasından, deşarj aşamasına kadar enerji iletme kabiliyetini gösterir ve elde edilen genel çevrim verimliliğini de etkiler.

Süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri, volanlar, süper kapasitörler ve lityum-iyon bataryalar oldukça yüksek verime (yüzde 90 ve daha üzeri) sahiptir. Bunları, pompalı hazneli hidro elektrik depolama sistemleri, sıkıştırılmış havalı enerji depolama sistemleri ve bataryalar yüzde 60-90 verim aralığında takip ederler. Yakıt hücreleri, termal ısı depolama sistemleri ve kriyojenik enerji depolama sistemleri ise yaklaşık yüzde 60 ve daha düşük verimliliği sahiptirler.

### **2.3.5. Tepki süresi**

Enerji sisteminin ihtiyacına bağlı olarak, bazı uygulamalar enerji talebini karşılamak için, depolanan enerjinin çok hızlı bir şekilde serbest bırakılmasını gerektirebilir. Anlık voltaj düşüşü ve titreşim azaltma gibi güç kalitesi problemlerinin çoğu, milisaniye bazında tepki süresi gerektirir (Aneke ve Wang, 2016). Bu durum, bu tarz uygulamalar için düşünölebilecek enerji depolama teknolojilerinin türlerini sınırlamaktadır. Süper kapasitörler, süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri ve volanlar milisaniye bazında çok hızlı tepki süresine sahiptir. Bunları, saniye cinsinden tepki süresine sahip bataryalar ve yakıt hücreleri ve ardından da dakika bazında tepki süresine sahip pompalı hazneli hidro elektrik depolama sistemleri ve sıkıştırılmış havalı enerji depolama sistemleri izler.

### **2.3.6. Kendi kendine boşalma oranı**

Kendiliğinden deşarj oranı, termal depolamadaki ısı transferi kayıpları, basınçlı hava deposundaki hava kaçağı kayıpları, akülerdeki elektrokimyasal kayıplar gibi enerji kayıpları oranıdır. Enerji depolama sisteminin kendi kendine deşarj oranı, uygun depolama süresine karar vermedeki en önemli faktörlerden biridir.

Pompalı hazneli hidro elektrik depolama sistemleri, sıkıştırılmış havalı enerji depolama sistemleri, sodyum-sülfür bataryaları, akışkan bataryalar ve yakıt hücreleri çok az kendi kendine boşalma oranlarına sahiptir, bu nedenle enerjinin uzun vadede (aylara kadar) depolanması teknik olarak mümkündür.

Çoğu geleneksel batarya (NaS bataryaları hariç), %0,03 ile %5 arasında günlük kendi kendine boşalma oranları ile orta vadeli saklama sürelerinde (güne kadar) sahiptir.

Süperiletken manyetik enerji depolama sistemleri, volanlar ve süper kapasitörler çok yüksek kendi kendine boşalma oranlarına sahipler (%10-%100), yani birkaç saat sonra veya daha kısa bir süre sonra depolanan enerjilerini kaybedebilirler. Bu nedenle, yalnızca kısa süreli depolama süreleri için kullanılabilir.

Termal ısı depolama sistemleri ise çeşitli teknolojiler içerir ve bu nedenle orta ve/veya uzun süreli depolama süreleri için uygun olabilir.

### **2.3.7. Yatırım ve operasyon maliyeti**

Enerji depolama teknolojisinin maliyeti, belirli bir enerji depolama teknolojisinin ticari kullanımı için en önemli faktörlerden biridir. Detaylı analiz için; bir enerji depolama teknolojisinin maliyeti hem sermaye hem de işletme maliyetlerini içermelidir. İşletme maliyeti; işletme ve bakım giderlerini, elden çıkarma ve değiştirme maliyetlerini kapsar. Bazı enerji depolama teknolojileri tarafından kullanılan yardımcı bileşenler sistemin toplam sermaye maliyetini daha da arttırabilmektedir. Enerji depolama sisteminin maliyeti, araştırma ve geliştirme alanındaki sürekli çaba ile azalmaya meyillidir ve bazı önemli teknolojik atılımlar maliyetlerde çarpıcı değişikliklere yol açabilirler (Luo ve diğ, 2015).

Maliyetlerin hesaplanmasının çeşitli yolları vardır. Kw saat başına maliyet, kW başına ve çevrim başına kW saat maliyeti hesaplamaları en yaygın kullanılanlarıdır. İçerir. Sık şarj/deşarj uygulaması olan sistemler için çevrim başına maliyet hesabı tercih edilir.

KW saat başına sermaye maliyeti açısından, pompalı hazneli hidro elektrik depolama sistemleri, sıkıştırılmış havalı enerji depolama sistemleri, çinko-hava bataryalar en düşük seviyededirler. Yerçekimi enerjisi depolama modülü gibi kanıtlanmamış ve gelecek vaat eden teknolojilerin, benzer konseptte dayandıklarından, tamamen olgunlaştıklarında pompalı hazneli hidro elektrik depolama sistemleri ile aynı veya biraz daha yüksek kW saat başına sermaye maliyetine sahip olmaları beklenmektedir (Aneke ve Wang, 2016). Halen demonstrasyon aşamasında olan sıvılaştırılmış havalı enerji depolama sistemleri, aynı zamanda düşük sermaye maliyeti için ümit verici bir teknolojidir. Çizelge 2.8'de; CAES'in kW saat başına PHES'ten daha düşük bir sermaye maliyetine sahip olduğunu ancak düşük çevrim verimliliğinden mustarip olduğunu gösterilmektedir. Volanlar, SMES, süper kapasitörler çok yüksek güç yoğunluğuna ve yüksek kW saat başına sermaye maliyetine sahipken, çevrim başına

düşük kW saat sermaye maliyetine sahiptir, bu da kısa süreli yüksek güç çıkışı gerektiren uygulamalar için bu teknolojileri oldukça uygun hale getirir.

### 2.3.8. Teknolojik olgunluk

Enerji depolama sistemlerinin teknolojik olgunlukları; ticarileştirme seviyesi, teknik riski ve ekonomik faydaları ile bağlantılıdır.

Enerji depolama sistemlerinin teknolojik olgunluk seviyesi beş kategoride sınıflandırılabilir (Luo ve diğ, 2015):

- Geliştirme aşaması (1): Güneş yakıtları, Polisülfür Bromin akışkan bataryalar
- Demonstrasyon aşaması (2): Sıvılaştırılmış havalı enerji depolama sistemleri, lityum-iyon bataryalar, vanadyum redoks akışkan bataryalar, çinko-brom bataryalar, süperkapasitörler, süperiletken manyetik enerji depolama sistemleri, yakıt hücreleri ve termal ısı depolama sistemleri
- Erken ticarileşme aşaması (3): Küçük ölçekli sıkıştırılmış havalı enerji depolama sistemleri ve volanlar
- Ticarileşmiş (4): Konvansiyonel sıkıştırılmış havalı enerji depolama sistemleri, sodyum-sülfür bataryalar ve nikel-kadmiyum bataryalar
- Olgun teknoloji (5): Pompalı hazneli hidro elektrik depolama sistemleri ve kurşun-asit bataryalar.

Olgun teknolojiler genellikle tercih edilir ve olgunluk seviyesi arttıkça teknolojinin maliyetini düşürür. Gelişme aşamasındaki teknolojiler ise teknik olarak gelecekteki enerji depolama projeleri için büyük potansiyele sahiptirler.

Çizelge 2.8'de enerji depolama sistemlerinin teknik ve ekonomik karşılaştırılması verilmiştir. Bu çizelge birçok araştırmanın bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Kurulacak sistemin ihtiyaçlarını ve kısıtlarını karşılayacak teknolojik altyapı seçiminde önem arz eden kriterler göz önünde bulundurularak listelenmiştir.

Enerji depolama sistemlerinin birbirlerine karşı üstünlükleri ve zayıf noktaları bu çizelge sayesinde daha iyi ortaya konulmuştur. Teknolojik olgunluk sekmesinde verilen sayılar ise yukarıda belirtilen beş kategoriyi göstermektedir.

**Çizelge 2.8 :** Enerji depolama teknolojilerinin teknik özelliklerinin karşılaştırılması, Aneke ve Wang (2016), Luo ve diğ (2015) ve Akinyele ve Rayudu (2014)'ten uyarlanmıştır.

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	\$/Kwh çevrim		
Volan	10-30	400-1500	0-250 kW	ms-15dk	sn-dk	~15	20000+	250-350	1000-5000	3-25	85-95	3
PHES	0.5-1.5	0.5-1.5	100-500 MW	1-24s +	sa-ay	40-60		600-2000	5-100	0.1-1.4	65-87	5
CAES	30-60	0.5-2	5-300 MW	1-24s +	sa-ay	20-60		400-800	2-50	2-4	50-89	3-4
GPM	1.06	3.13	40-150 MW		sa-ay	30+		1000			75-80	Konsept
FC	800-10000	500+	0-50 MW	sn-24s +	sa-ay	5-15	1000	10000+	15	6k-20k	20-35	1-2
SC	2.5-15	500-5000	0-300 kW	ms-60dk	sn-sa	10-30	50000+	100-300	300-2000	2-20	90-95	2-3
NaS	150-240	150-230	50 Kw - 8 MW	sn-s	sn-sa	10-15	2500	1000-3000	300-500	8-20	80-90	4
NaNiCl	100-120	150-200	0-300 kW	sn-s	sn-sa	10-14	2500+	150-300	100-200	5-10	85-90	3-4
NiCd	15-80	50-1000	0-40 MW	sn-sa	dk-gün	15-20	3000	500-1500	400-2400		60-83	4
Pb-asit	50-80	10-400	0.05-10 MW	sn-sa	dk-gün	5-15	<1800	200-300	50-100		75-85	5
VRB	10-30	<2	30 kW-3 MW	sn-10s	sa-ay	5-10	12000+	600-1500	150-1000	5-80	85-90	2-3
FeCr	10-50	16-33	5-250 kW	sn-12s+	sa-ay				250		70-80	3-4
ZnBr	30-50	<25	50 kW- 2 MW	sn-10s	sa-ay	5-10	2000+	700-2500	150-1000	5-80	70-80	2
Zn-Hava	150-3000	100	0-10 kW	sn-24s+	sa-ay			100-250	10-60		50-55	2
Li-iyon	75-200	500-2000	0-100 kW	dk-s	dk-gün	14-16	<20000	1200-4000	600-2500	15-100	85-90	2
SMES	0.5-5	500-2000	100kW-10 MW	dk-8s	dk-sa	20+	100000+	200-300	1000-10000		95-98	2-3
LAES	97		350 kW-5 MW	1-24s+	sa-ay	20+		900-1900	260-530		50-70	1-2
TES	200-500		0.1-300 MW	1-24s+	dk-gün	10-20		100-400	30-60		30-60	2-3

## 2.4. Enerji Depolama İçeren Mikro Şebekelerde Optimizasyon Çalışmaları

Günümüzde önemi giderek artan dağıtılmış enerji kaynakları ve mikro şebeke sistemleri için yapılan çalışmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmalar üç farklı problem tipi altında toplanmıştır: yatırım, dizayn ve çizelgeleme. Yatırım problemleri kapsamında, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve/veya enerji depolama sistemlerinin kapasite optimizasyonuna değinilmektedir. Dizayn problemleri başlığı altındaki çalışmalarda hem enerji kaynaklarının hem depolama sistemlerinin hem de bunların sisteme entegrasyonu için en optimum dizayn parametrelerinin kararlaştırılması amaçlanmaktadır. Çizelgeleme problemlerinde ise; depolama sistemlerinin ve/veya enerji kaynaklarının hangi zaman diliminde devreye girip çıkacağı; eğer şebekeden alım ve/veya satış imkânı varsa ne zaman satış ne zaman alış yapılması gerektiği kararlaştırılmaktadır.

Literatürde depolama sistemleri ve yenilenebilir enerji kaynaklar entegre edilmiş mikro şebeke optimizasyonu için birçok çalışma yapılmıştır. Bu optimizasyon çalışmalarında farklı metotlar kullanılmıştır, ancak; burada özellikle doğrusal programlama metodu kullanarak yapılmış çalışmalara yer verilmektedir.

Şebekeden bağımsız, konvansiyonel ve fotovoltaiik enerji kaynaklarının kullanıldığı bir sistemde; Torres ve diğ. (2014) çizelgeleme problemi için bir optimizasyon modeli kurgulamışlardır. Kurulan optimizasyon modelinde, sınırlı sayıda değişkenli ve kısıtlı bir Doğrusal Program (DP) kullanmışlardır. Modelde, toplam talebin karşılanması ve kârın maksimize edilmesi için konvansiyonel kaynaklardan, yenilenebilir enerji kaynaklarından ve batarya depolama sistemlerinden üretilen / depolanan enerjinin optimal kombinasyonu veya çizelgelemesi yapılmıştır. Kim ve diğ. (2017) ise buna benzer bir çalışmayı dinamik programlama metodu kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Ekonomik ve güvenilirlik açısından, geleneksel üretim yöntemlerinin yeniden düzenlenmesinde, bir enerji depolama sistemi için en uygun çizelgeleme modeli önermişlerdir. Güvenilirlik kısıtı, enerji depolama sisteminin zaman içinde belirli bir güvenilirlik seviyesini karşılamak için gereken minimum SOC seviyesinden daha yüksek bir şarj durumu seviyesine sahip olması için yeniden formüle edilmiştir. Önerilen yöntemi doğrulamak için yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemi dahil olmak üzere çeşitli üretim birimlerinden veriler kullanılarak dört senaryo üzerinde çalışmışlardır.



Önceki çalışmaların aksine Pousinho ve diğ. (2014) batarya depolama üniteleri yerine ısı depolama sistemleri kullanarak; bir enerji üreticisi için, rüzgâr türbini ve güneş panelleri ile kısa vadeli bir çizelgeleme modeli sunmuşlardır. Kar maksimizasyonu hedeflenen problemin çözümünde karma tamsayılı doğrusal programlama modeli kullanmışlardır ve bununla birlikte İber Yarımadası'nda bulunan güneş ve rüzgâr santrallerinden elde edilen veriler ışığında optimum saatlik planlar oluşturmuşlardır. Isıl depolama ünitesi bulunan sistemde bir diğer çizelgeleme modeli çalışmasında ise Zhao ve diğ. (2015) doğrusal olmayan programlama (DOP) modeli ile Model Tahmin Kontrolü (MPC) tabanlı bir altyapı kurarak, gün öncesi piyasası kapsamında enerji sistemlerinin programlanmasını optimize etmektedirler. Sistemde kullanılan yapı; dağıtılmış güç üretim biriminden, kombine bir soğutma ve güç sisteminden ve güneş panellerinden oluşmaktadır. Şebekeye satış imkânı da bulunan bu sistemin Hong Kong'daki bir binada denemesi yapılmıştır.

Literatürde en sık karşılaşılan çalışmalarda ise sisteme elektrik şebekesinin entegre edilmesiyle elde edilen yapının çizelgeleme modelinin oluşturulması amaçlanmaktadır. Doğrusal programlama metoduna dayanan çizelgeleme modeli çalışmalarından; Hanna ve diğ. (2014) yenilenebilir enerji kaynaklarını ve enerji depolama sistemlerini kullanarak pik enerji talebi seviyelerinin azaltılmasını sağlamak için Temmuz 2012-Kasım 2012 dönemlerini kapsayan enerji boşaltım çizelgeleri oluşturmuşlardır. Bu veriler ışığında da; enerji depolaması kullanılmadan sadece PV ile şebekeden enerji tüketimi ile depolama sistemi kullanılan uygulamada elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elektrik maliyetini en aza indirmeyi amaçlamayan Wu ve diğ. (2015) güç akışının yönetimi, güç dengesi, güneş enerjisi çıkışı ve batarya kapasitesi gibi bir dizi kısıtlamaya tabi olan modelde sistemde bulunan bataryaların ve güneş panellerinin çizelgeleme optimizasyonunu yapmışlardır. Enerji üretim maliyetini en aza indirmek amacıyla yenilenebilir kaynakların varlığında bir mikro şebekede üretim ve depolama tesislerinin zamanlaması sorununu ele alan başka bir çalışma da Kumar ve Saravanan (2019) tarafından yapılmış ve yenilenebilir kaynaklar için doğrusal bir maliyet fonksiyonu ve geleneksel jeneratörler için ikinci dereceden maliyet fonksiyonu göz önüne alınarak formüle edilmiştir. Farklı maliyet fonksiyonlarına sahip bir dizi yenilenebilir ve geleneksel enerji kaynağı grubu ile sayısal bir örnek üzerinde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen algoritmanın, en ucuz kaynakları %100'e kadar kullanabildiğini ve diğer üretim kaynaklarını, üretim

maliyetleri arttıkça, azalan yüzde olarak kullanabileceğini göstermektedir. Sistemde; diğer çalışmalardan farklı olarak yenilenebilir enerji olarak rüzgâr ve güneş, geleneksel kaynak olarak dizel jeneratör ve mikro türbin, şebeke elektriği, yakıt hücresi ve batarya depolama sistemleri gibi birçok ünite kullanmışlardır.

Çizelgeleme modellerinde sık kullanılan bir diğer metod ise bazı değişkenlerin tam sayı, bazı değişkenlerin ise kesirli değişkenler alabildiği karma tamsayılı doğrusal programlamadır. Yenilenebilir enerjinin yerel tüketimini artırmak için Sabillon ve diğ. (2018), enerji depolama sistemleri kullanarak dengelenmemiş konut elektrik dağıtım ağlarında, güneş paneli ünitelerinin ve elektrikli araçların optimum çalışması için dinamik bir planlama yöntemi önermişlerdir. Elektrikli araçların sisteme entegre edildiği başka bir çalışmada, Mortaz ve Valenzuela (2017) termik ünitelerden, yenilenebilir enerji kaynaklarından ve bir park tesisinden oluşan, şebekeye entegre bir mikro şebekede, elektrikli araçların sağladığı enerji ve depolamayı dikkate alarak enerji yönetimi için bir optimizasyon modeli önermişlerdir. Modelin amacı, gelecek 24 saat için üretimi, gün öncesi piyasasını, pil aşınmasını ve gerçek zamanlı dengeleme maliyetlerini içeren toplam işletme maliyetlerini en aza indirmektir. Çalışmanın sonucunda, elektrikli araçlardan sağlanan enerji ve depolamanın toplam operasyon maliyetlerini düşürdüğü görülmüştür.

Amaç fonksiyonu, her güç şebekesinin artık yük serisinin tepe-vadi farkını en aza indirmek olan modellerinde Cheng ve diğ. (2018); birkaç farklı elektrik şebekesine hizmet veren pompalı hazneli hidro elektrik santrallerinin optimal saatlik çizelgelenmesini belirlemek için karma tamsayılı doğrusal programlama tabanlı bir model geliştirmişlerdir. Modeldeki bireysel ünitelerin performansı, hem üretim hem de pompalama modundaki her ünite için head etkisi (su irtifası) dikkate alınmaktadır. İki gerçek vaka çalışmasından elde edilen optimizasyon sonuçları, önerilen modelin hesaplama açısından verimli olduğunu ve her bir elektrik şebekesinin tepe düzenlemede iyi performans gösterdiğini göstermiştir.

Çizelgeme modeline dizayn problemlerinin de eklenmesiyle birlikte optimum enerji planı çıkartılırken aynı zamanda optimum dizayn parametrelerinin de bulunması amaçlanmaktadır. Şebekeye bağlı olmayan bir sistemde maliyetli enerji depolama sistemlerine ihtiyaç duymadan güneş enerjisi kullanımını en üst düzeye çıkarmayı hedefleyen Habib ve diğ. (2017) çalışmalarında, güneş panellerinden enerji üretimi için kavramsal ve gerçek veriler, ada modundaki mikro şebekeye güç girişi

sağlamaktadır. Birim sayısı göz önüne alındığında, her bir birimin optimal yük boyutunu hesaplamak için karma tamsayı doğrusal programlama ve kısıtlı en küçük kareler analitik çözümleri ve hesaplama algoritmaları önermişlerdir. Mevcut güneş enerjisi profiline dayanarak, algoritmalar en uygun statik yük boyutlarını hesaplayarak en uygun açma/kapama zamanlarını seçer ve güneş enerjisi kullanımını maksimuma çıkarır. Algoritmaların etkinliği, San Diego, California ve Thuwal, Suudi Arabistan'dan gelen bir yıllık güneş enerjisi verileri kullanılarak karşılaştırılmıştır.

Önceki çalışmadan farklı olarak sisteme batarya ünitesi entegre eden Talent ve Du (2018) optimum güneş paneli-batarya boyutlandırma ve enerji çizelgelemesi için yeni bir karma tamsayı doğrusal programlama geliştirmişlerdir. Diğer formülasyonlardan ayrılarak, kullanım zamanı (time of use-TOU) ve talep tarifesi yapıları altında optimize edilmektedir. Optimizasyon, en yüksek sistem net bugünkü değerine (NPV) dayanmaktadır. Bir konut ve bir ticari müşteri, bu tarife yapıları altında optimizasyonda vaka çalışmaları olarak incelenmiştir. Optimum güneş paneli-batarya boyutlandırmasının analiz edilen tarife yapılarından etkilenmediği tespit edilmiştir. Her iki tarifiedeki en uygun çözümler, küçük pil sistemleriyle birlikte daha büyük güneş paneli sistemlerinin tercih edilmesini önermektedir.

Farklı türlerde termal enerji depolamaya özel olarak odaklanarak Bölgesel Isıtma (DH) sistemlerinde operasyonel optimizasyon konusunu işleyen Lesko ve diğ. (2018); R programlama ortamında birden fazla karma Tamsayı Doğrusal Programlama probleminin çözülmesine dayanan bir optimizasyon çözümü önermişlerdir ve uygulamışlardır. Optimizasyonda; üç farklı termal enerji depolama sistemine ek olarak CHP enerji santrali bulunmaktadır.

Biokütle kombine ısı ve güç (BCHP) bazlı mikro şebeke sistemlerinin tasarımını ve programlanmasını değerlendirmek için bir ekonomik doğrusal programlama modeli geliştiren Zheng ve diğ. (2018) deterministik kısıtlı optimizasyon ve stokastik optimizasyon yaklaşımlarını, hem elektrik hem de ısı sağlayan biokütle entegre mikro şebekelerdeki belirsizlikleri değerlendirmek için kullanmışlardır. Mikro şebekede ele alınan diğer mevcut teknolojiler, küçük ölçekli rüzgâr türbinleri, güneş panelleri, gaz depolama sistemleri, batarya sistemleri, termal enerji depolama sistemleri ve ısı kazanlarıdır. Ek olarak; Kaliforniya'da kavramsal bir mikro şebeke uygulaması için bir vaka incelemesi yapmışlardır.

Karma tamsayılı doğrusal programlama metodu kullanarak, farklı enerji kaynakları bulunan bir mikro şebeke boyutlandırmasında, doğrusal bir batarya yıpranma ve bozulma modeli tanıtan Cardoso ve diğ. (2018), batarya yıpranmasının kilit sonuçlar üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Optimal güneş paneli ve depolama kapasitelerinin, optimal dağıtılmış enerji kaynaklarının operasyon stratejilerinin yıllık maliyet ve üretim ölçümlerinin bulunduğu bir örnek çalışma sunmuşlardır.

Tu ve diğ. (2019) aynı yöntemi kullanarak güneş panelleri, rüzgâr türbini, dizel jeneratör ve enerji depolama sistemi içeren bir mikro şebeke için genel seviyelendirilmiş elektrik maliyetini en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Modelin çıktıları, güç kaybı durumunda ve yük kaydırma talep yönetimi kontrolü ile her bir sistem bileşeni için hem optimum sistem boyutlandırmasını hem de çizelgelemesini belirlemektir.

Enerji Yönetimi Stratejileri (EYS) uygulama ve araştırma literatürünü gözden geçiren Bukar ve Tan (2019) bir derleme oluşturmuşlardır. Tüm sistem optimizasyon yöntemleri ve YYS, literatürdeki birkaç durum incelenerek analizini yapmışlardır ve bunları karşılaştırmışlardır. Bu sistemde, yakıt hücresinin entegre edildiği bağımsız bir fotovoltaik ve rüzgâr enerjisi kaynağı için sistem optimizasyonunu ve enerji yönetimi stratejilerini (EYS) gözden geçirmişlerdir. Optimizasyonun amacı, uygun maliyetli bir sistem oluşturmak niyetiyle sistem bileşenlerinin kombinasyonunu belirlemektir. YYS, yük talebini ve diğer kısıtlamaları yerine getirirken, sistem bileşenlerinin güç akışını da koordine etmeyi amaçlamaktadır. Genel optimizasyon formülasyonu çerçevesi, sınıflandırma ve çeşitli optimizasyon yöntemleri gözden geçirilerek detaylandırılmıştır.

Enerji depolama içeren mikro şebeke optimizasyon çalışmalarının bir diğer türü de yatırım problemleridir. Çizelgeleme ve yatırım problemlerini aynı çalışmada inceleyen Ho ve diğ. (2016), günlük ve haftalık olmak üzere iki farklı çalışma modu bulunan bir enerji depolama sisteminin operasyon ve maliyet boyutunda analizini ve karşılaştırmasını karma tamsayılı doğrusal programlama metodu ile yapmışlardır. Sistemlerinde dağıtılmış kaynak olarak 3500 kW güneş panelleri ve 200 kW biokütle yedek jeneratörü, depolama sistemi olarak da sodyum-sülfür batarya kullanarak optimum çizelgeleme ve kapasite kullanımını gerçekleştirmişlerdir.

Çizelgeleme modeli yerine dizayn parametrelerini yatırım problemiyle birleştiren Omu ve diğ. (2016), güneş enerjili bir sıcak su sisteminin tasarımını kolaylaştırmak için karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Modelin amacı, çatıya monte edilmiş yassı plakalı güneş enerjili termal kollektörlerinin alanını ve gereken termal enerji depolama hacmini, toplam enerji sisteminin sermayesini ve yıllık işletme maliyetini en aza indirmek için optimize etmektedir. Modelin yinelemeli olarak çözülen iki alt modüle ayrılmıştır. Bir modül güneş enerjisi kollektörlerinin ve depolama tankının optimum boyutlandırmasını belirlerken; diğer modül, kollektör giriş akımı sıcaklığının kollektör verimliliği üzerindeki etkisine dayanarak güneş kollektörlerinin saatlik enerji üretimini optimize etmektedir.

Aynı model türünü kullanan bu tarzdaki diğer bir çalışmada ise Mashayekh ve diğ. (2017) ;farklı enerji kaynağı türlerine sahip bir mikro şebekede optimal teknoloji portföyünü, optimal teknoloji yerleşimini ve ilgili optimal görev dağılımını belirleyen bir optimizasyon modeli sunmaktadırlar. Geliştirilen model, elektrik güç akışı ve ısı akışı denklemlerini içeren çok düğümlü bir modelleme yaklaşımı (birleşik tek düğümlü yaklaşımın aksine) kullanmaktadır. Bu nedenle; elektrik ağının ve ısıtma/soğutmanın sistemlerinin fiziksel ve operasyonel kısıtlarını göz önünde bulundurarak optimum konumlandırma yapabilme yeteneği sunulmaktadır.

Diğer çalışmalardan farklı olarak, Del Pero ve diğ. (2018) binalara uygun enerji depolama sistemlerinin mevcut durumunu göstermekle birlikte, karar alma-tasarlama aşamalarında enerji depolama teknolojilerinin karşılaştırmalarını ve operasyon sırasında teknik çözüm yöntemlerinin kararlarını almayı kolaylaştırmak için Anahtar Performans Göstergeleri (KPI) önermişlerdir. Bunun sonucunda; KPI'lar, IEA-ECS Ek-31 “Energy Storage with Energy Efficient Buildings and Districts” kapsamında 10 farklı vaka üzerinde uygulanmışlardır.

Çizelge 2.9’da yukarıda detaylı açıklamaları verilen yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama ünitesi bulunan mikro şebekeler için yapılan optimizasyon çalışmaları örneklerinin özeti bulunmaktadır. Problem tipi kısmında bulunan Y yatırım, D dizayn, Ç çizelgeleme; depolama ünitesi kısmındaki B batarya, T termal enerji depolama, D diğerleri; enerji kaynağı kısmındaki R rüzgâr, G güneş, Ş şebeke ve D diğerleri için kısıtlamalardır.

**Çizelge 2.9 :** Yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama ünitesi kullanılan mikro şebekelerde optimizasyon çalışmaları.

Yazar	Yöntem	Yıl	Problem Tipi			Depolama Ünitesi			Enerji Kaynağı				
			Y	D	Ç	B	T	D	R	G	Ş	D	
Varkani ve diğ.	Stokastik P., KTDOP, Sinir Ağları	2011			X			X	X				
Abbaspour ve diğ.	KTDOP	2013			X			X	X				
Ferrer-Marti ve diğ.	KTDP	2013	X	X		X				X	X		
Nottrott ve diğ.	DP	2013			X	X					X	X	
Torres ve diğ.	DP	2014			X	X					X		X
Pazouki ve diğ.	KTDP, Stokastik P	2014			X	X	X			X		X	
Pousinho ve diğ.	KTDP	2014			X		X			X	X		
Hanna ve diğ.	DP	2014			X	X					X	X	
Gruber ve Prodanovic	KTDP	2014			X	X					X	X	
Zhao ve diğ.	DOP	2015			X		X				X		
Wu ve diğ.	DP	2015			X	X					X	X	
Tenfen ve Finardi	KTDP	2015			X	X		X	X	X	X	X	
Brahman ve diğ.	KTDP	2015			X		X				X	X	X
Pan ve diğ.	Gürbüz KTDP	2016			X	X				X	X	X	X
Ho ve diğ.	KTDP	2016	X		X	X					X		X
Omu ve diğ.	KTDP	2016	X	X			X				X		
Mashayekh ve diğ.	KTDP	2017	X	X		X					X		X

**Çizelge 2.9 (devam) :** Yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama ünitesi kullanılan mikro şebekelerde optimizasyon çalışmaları.

Yazar	Yöntem	Yıl	Problem Tipi			Depolama Ünitesi			Enerji Kaynağı			
			Y	D	Ç	B	T	D	R	G	Ş	D
Kim ve diğ.	Dinamik P.	2017			X	X			X	X		
Mortaz ve Valenzuela	Stokastik P.	2017			X	X			X	X	X	
Habib ve diğ.	KTDP, En Küçük Kareler	2017		X	X						X	
Ufluoğlu	DP, KTDP	2018			X	X			X	X	X	
Sabillon ve diğ.	KTDP	2018			X	X				X	X	
Talent ve Du	KTDP	2018		X	X	X				X	X	
Lesko ve diğ.	KTDP	2018		X	X		X					X
Cheng ve diğ.	KTDP	2018			X							X
Luo ve diğ.	Gürbüz KTDP	2018			X	X	X			X	X	
Cardoso ve diğ.	KTDP	2018		X		X				X		
Zheng ve diğ.	DP	2018		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Kumar ve Saravanan	DP	2019			X	X		X	X	X	X	
Tu ve diğ.	KTDP	2019		X	X	X			X	X		
Bukar ve Tan	Metod karşılaştırma	2019		X				X	X	X		

## 2.5. Hastane Yük Analizi Çalışmaları

Tezin de konusunu oluşturan hastaneler için elektrik vazgeçilemez bir altyapı gereksinimidir. Bu kapsamda yol gösterici olarak, hastanelerin elektrik ihtiyacını belirleyen, sınıflandıran ve analiz eden literatürde çok sınırlı sayıda çalışma mevcuttur.

Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) ile aydınlatma ekipmanlarının enerji talebini standartlaştırılmış hesaplama yöntemleri ile değerlendirmek son yıllarda konut dışı binaları planlamak ve optimize etmek için kendini kanıtlayan bir ölçü haline gelmiştir. Hastane binaları özelinde, tıbbi ekipmanların neden olduğu elektrik tüketiminin büyüklüğü hakkında bilgi eksiktir. Bu tür elektrikle çalışan cihazların giderek karmaşıklaşan bir ortamda gittikçe artan kullanımını nedeniyle, elektrik modern hastanelerin en büyük enerji maliyet kalemlerinden biri haline gelmiştir.

Hastane komplekslerinin enerji yönetimini optimize etmek için Arcuri ve diğ. (2007) bir prosedür tarif etmişlerdir. Bu prosedür, optimum tasarımdan türetilen saatlik yük diyagramlarından başlayarak bir tri-jenerasyon tesisinin çalışma koşullarının belirlenmesini sağlamaktadır. Karma tamsayılı programlama modelinin uygulanmasından elde edilen sonuçlar, ısı pompalarını kullanan bir tri-jenerasyon tesisinin konfigürasyonunun, enerji yönetimini büyük ölçüde geliştirdiğini, önemli ekonomik, enerji ve çevresel faydalar sağladığını göstermektedir. Diğer yandan Cristiansen ve diğ. (2015); Hamburg Üniversitesi/Almanya'nın modern Üniversite Tıp Merkezi'nde 33.500 saatten fazla yaptığı ölçümleri baz alarak, zamana bağlı planlamayı ve tıbbi ekipmanların enerji taleplerinin haftalık toplamının modelini oluşturmuşlardır. Yapılan yük tahminleri %6'dan daha az bir hata ile elde edilmiştir. Bu çalışmaya benzer bir araştırmada; Chung ve Park (2015) Kore'deki otel, hastane ve ofis olmak üzere üç tür bina için yük modelleri oluşturmak üzere enerji talebi özelliklerini araştırmışlar ve ölçülümelerini yapmışlardır. Bu kapsamda, elektrik ve yakıt tüketimi verileri toplanmış ve elektrik, ısıtma, sıcak su ve soğutma enerjisi başlıkları altında dört tip bina yükü oluşturmak için istatistiksel olarak analiz etmişlerdir. Üç bina tipi için dört yük türünün yıllık, aylık, günlük ve saatlik yapıları elde edilmiştir. Yıllık ortalama, maksimum ve minimum değerler gibi temel istatistiksel değerler verilmiştir. Günlük ve saatlik modelleri birleştirerek, bina yükü modellerini yılın 8760 saatini kapsayan bir zaman serisi olarak oluşturma prosedürünü sunmuşlardır ve üç bina tipinin enerji tüketim özelliklerini daha iyi anlamak için yük modellerinin temel özelliklerinin karşılaştırmasını yapmışlardır.

Bu çalışmalardan farklı olarak Morgenstern ve diğ. (2016) çalışmalarında; değişik hastane departmanlarının elektrik taleplerini yerinde ölçümler yaparak verileri toplamış ve analiz etmişlerdir. Bunun sonucunda, hastane birimlerinin birbirlerinden oldukça farklı elektrik tüketim özelliklerine sahip oldukları doğrulanmıştır. Hasta



odaların, kliniklerin ve bazı diğer departmanların daha az ortalama tüketim yoğunluğuna ve mevcut hastane elektrik kriterlerini yansıttıklarını belirtmişlerdir. Yine aynı bağlamda 20.000 saatten daha fazla ölçüme dayanarak, Christiansen ve diğ. (2016) çalışmalarında yoğun bakım ünitelerinin, muayenelerin, ameliyathanelerin, tedavi odalarının ve büyük ölçekli tıbbi ekipmanların veri analizini yapmışlardır. Kullanılan metodoloji ile alana özgü çalışma saatlerinin belirlenmesi ve değişik hastane departmanlarının zamana bağlı elektrik taleplerinin tahmini gerçekleştirilmiştir. Yoğun bakım üniteleri için hafta içi ve hafta sonu günlerinin farklılaşmasının geçerli olmadığı fark edilirken; ameliyathanelerin, hastanede bulunan düzenli “ofis saatleri” ile oldukça fazla benzerlikler gösterdiği belirtilmiştir.

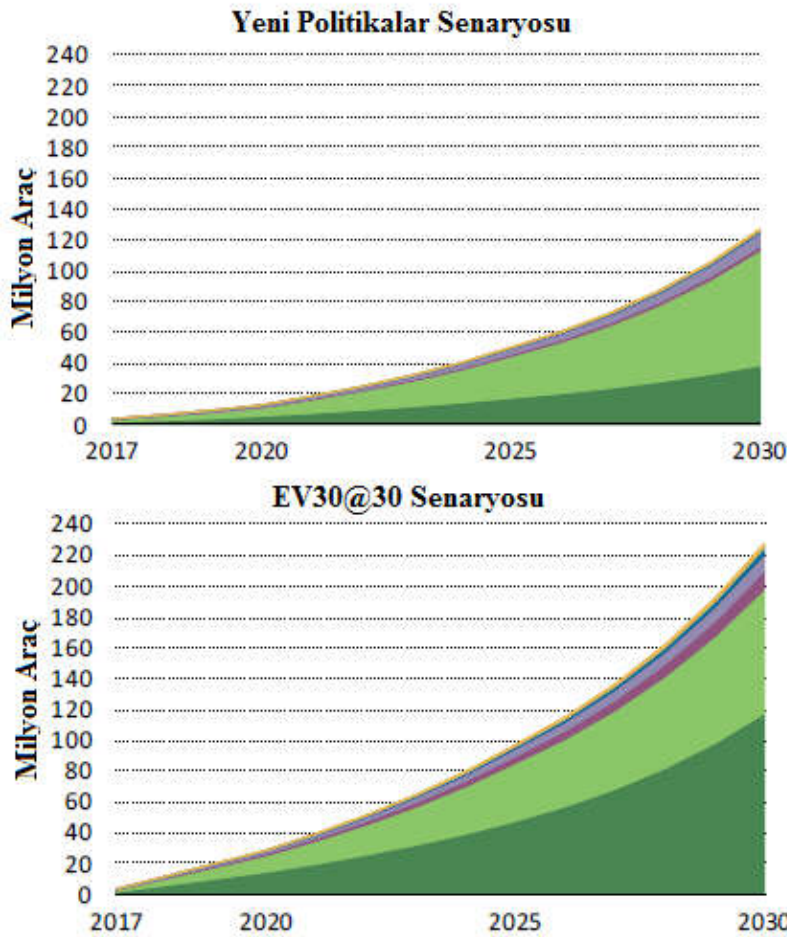
Şebekeye bağlı olmayan hibrit sistemlerin (fotovoltaik – dizel-pil sistemleri) optimizasyonu için bir metodoloji sundukları çalışmada, Dufo-Lopez ve diğ. (2016) güneş radyasyonu ve yük belirsizliklerini göz önüne almak için Monte Carlo simülasyonu ile stokastik bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Sunulan optimizasyon metodolojisini, Kalonge'da (Kongo Demokratik Cumhuriyeti) bulunan şebekeden bağımsız bir hastane için elektrik tedarikinin optimizasyonunda uygulamışlardır. Sonuçlar, optimal tasarımın, enerji maliyetinde %28 ve jeneratörde kullanılan dizel yakıtında ise %54 azalma elde edebileceğini göstermiştir. Benzer bir çalışmada ise Isa ve diğ. (2016) Malezya'daki bir hastane binası için bir kojenerasyon sistemi geliştirmenin uygulanabilirliğini değerlendirmişlerdir. Önerilen kojenerasyon sistemi şebekeye bağlı fotovoltaik (PV), yakıt hücresi ve bataryadan oluşmaktadır. Sistemin tekno-ekonomik analizini yapmak için hibrit optimizasyon modeli (HOMER) simülasyon yazılımı kullanılmıştır. Önerilen sistem daha sonra diğer olası yapılandırmalarla karşılaştırılmıştır. Ekonomik karşılaştırma, toplam net bugünkü maliyete (Total net present cost-TNPC), seviyelendirilmiş enerji maliyetine (Levelized cost of energy-LCOE), yenilenebilir fraksiyona, aşırı enerji üretimine ve sistemin kirletici gaz emisyonuna dayanmaktadır.

## **2.6. Elektrikli Araçlarda Batarya Sistemleri**

Elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar, dizüstü bilgisayarlar ve cep telefonları gibi mobil tüketici elektroniğinde kullanılan bataryalardan oldukça farklıdır. EV'lerde kullanılan bu bataryalar; 100 kW'a kadar yüksek güç ve onlarca kWh yüksek enerji

kapasitesi sağlarken aynı zamanda hacim, ağırlık ve uygun fiyat kısıtlarını da yerine getirmesi beklenmektedir (Young ve diğ, 2013).

EV'lerde kullanılacak batarya seçim kriterlerinde; enerji yoğunluğu, özgül enerji, güç yoğunluğu, fiyat ve dayanıklılık öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, EV'lerde en yaygın kullanılan batarya teknolojileri nikel-metal hidrid ve lityum-iyon pillerdir. Ancak; yüksek özgül enerjisi ve yüksek enerji yoğunlukları sayesinde lityum-iyon bataryaların elektrikli araç piyasasında daha hızlı büyüme göstermektedir (Young ve diğ, 2013). IEA Global EV Outlook 2018 raporunda, yeni politikalar senaryosuna göre elektrikli araç sayısının Şekil 2.15'ten de görüldüğü üzere 2030 yılında 125 milyona, EV30@30 senaryosuna göre ise 220 milyona ulaşması bekleniyor (IEA, 2018a).

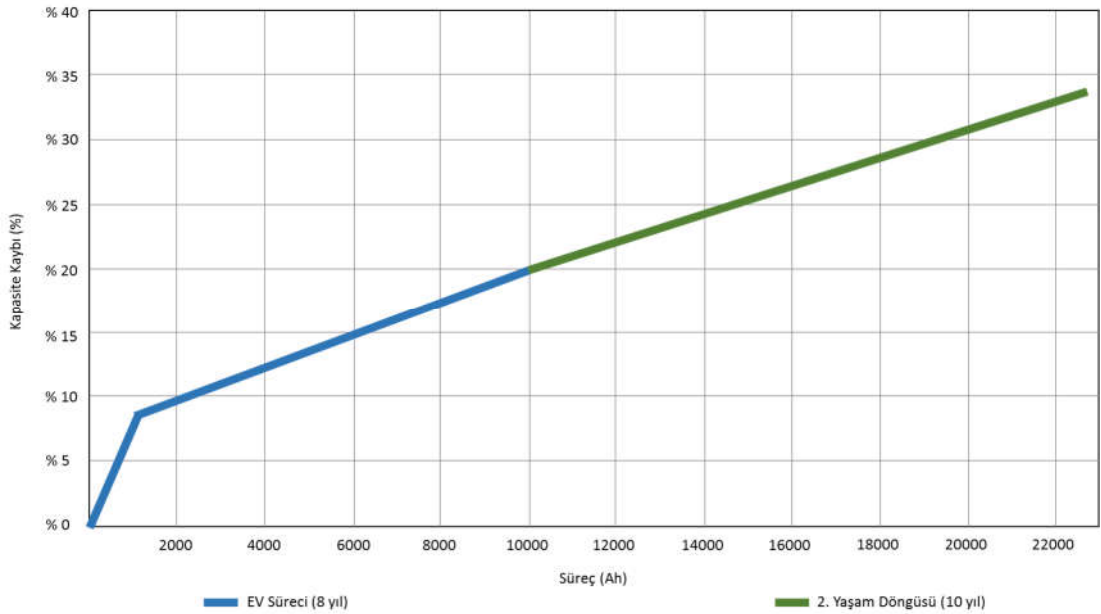


Şekil 2.15 : Küresel EV sayısı senaryoları, IEA (2018b)'den uyarlanmıştır.

Bütün bu gelişmelere rağmen, yürütülen araştırmalarda ve batarya üreticilerinin garantisinde belirttiği üzere elektrikli araçlarda bulunan lityum-iyon bataryalar, Şekil 2.16'da görüldüğü üzere kullanımlarının sekizinci yılında ilk kapasitelerinin yaklaşık

yüzde 20'sini kaybetmekte, ve bu bataryaların araçlarda kullanımı sonlandırılmaktadır (Ahmadi ve diğ, 2014). Kapasitesinin yüzde 80'ini koruyan bu bataryaların tekrar sabit batarya olarak ticari binalarda, hizmet sektöründe ve meskenlerde kullanılması ile bataryaların ikinci yaşam döngüsü (second life cycle) başlamaktadır.

Bataryaların ikinci yaşam döngüsü için kullanılmasının fizibilite çalışması son yıllarda giderek artmaktadır. Toyota ve Yellowstone Milli Parkı yaptıkları birliktelikle Toyota Hybrid araçlarda kullanılmış verimliliği düşmüş bataryaları milli parkta bulunan korucu gözetleme istasyonlarında ve eğitim binalarında kullanmaya başlamışlardır. Buna benzer bir uygulamayı da General Motors, Chevrolet Volt araçlarından çıkan bataryaları yeni kullanıma açtıkları IT binalarına entegre etmişlerdir (Madlener ve Kirmas, 2017).



**Şekil 2.16** : EV bataryalarının kapasite kaybı grafiği, Ahmadi ve diğ (2014)'ten uyarlanmıştır.

Elektrikli araçlardan çıkan verimliliği düşmüş bataryaların farklı şekillerde kullanılarak tekrar ekonomiye kazandırılması önemli bir tasarruf kalemi oluşturmaktadır. İlk döngüsünü tamamlayan bataryaların mikro şebekelerde depolama sistemi olarak kullanılması konusunda literatürde birçok çalışmada ele alınmıştır.

Elektrikli araçlardan çıkan bataryaların tekrar kullanımının, otomobil kullanıcılarına PHEV/EV bataryalarının ilk maliyetine etkisini araştıran Neubauer ve Pesaran (2011), şebekeye bağlı enerji depolama sistemlerinin kullanılmış PHEV/EV batarya piyasasındaki potansiyelini değerlendirmişlerdir. Bu çalışmanın sonucuna göre,

verimliliği düşmüş bataryaların şu andaki mevcut PHEV/EV fiyatlarını etkilemesi ön görülmektedir, ancak; uygun maliyetli enerji depolama ihtiyacıyla yüksek potansiyele sahip oldukları vurgulanmaktadır.

Benzer bir çalışmada Ahmadi ve diğ. (2014) verimliliği düşmüş EV bataryalarının, enerji depolama sistemlerinde tekrardan değerlendirilmesi için fizibilite çalışması yapmışlardır. Daha az sayıda şarj / deşarj döngüsüne dayanarak yapılan önceki çalışmalardan çıkan sonuçlardan, EV bataryasının araçlardaki kullanımında kapasitesinin %20'sini kaybettiği ve daha sonra sabit depolama sisteminde 10 yıl kullanımından sonra ise kapasitesinin %15'ini daha yitirdiği tahmin edilmektedir. Artan şarj / deşarj çevrimiyle enerji verimliliği düştükçe, batarya ömrü boyunca döngü ve kapasite arasındaki ilişkiyi tahmin etmek için kapasite solma modelini uygulamışlardır. Bunlara ek olarak, Ontario elektrik şebekesine entegre bir sabit batarya sisteminin performansının modellenmesini yapmışlardır.

Verimliliği düşmüş EV bataryalarının geri kalan faydalı ömrünü Casals ve diğ. (2019a) çalışmalarında dört farklı sabit uygulamada analizini gerçekleştirmişlerdir; bunlar: hızlı elektrikli araç şarjı, iç tüketim, regülasyon ve iletim erteleme için destek. Bu analizde, pil kapasitesinin kullanımı sırasında kaybını simüle etmek için eşdeğer bir elektrikli pil yıpranma modelinden faydalanmışlardır. MatLAB programı üzerinde çalışan bu model yıllık yıpranma, deşarj hızı, boşalma derinliği, sıcaklık ve voltaj gibi birkaç yıpranma mekanizması içermektedir. Sonuçlar, tekrar kullanılan bataryanın ömrünün açıkça kullanım alanına bağlı olduğunu göstermiştir. Bu süre elektrikli araç hızlı şarj destek uygulamalarında yaklaşık 30 yıl olurken, şebeke regülasyon hizmetlerinde ise yaklaşık 6 yıl olarak hesaplanmıştır. Ek olarak, bu çalışmada İspanya'da elektrik üretiminden kaynaklanan günlük emisyonları analiz etmişlerdir ve şebekeye yönelik enerji depolama uygulamalarının yakın gelecekte çevresel faydalar sağlayamayacağını belirtmişlerdir.

Verimliliği düşmüş EV bataryalarının tepe tıraşlama için kullanılmasının mesken enerji profili üzerindeki etkisini ve maliyetini Heymans ve diğ. (2014) MatLAB programı ile simüle etmişlerdir. Bu simülasyonu, fizibilitede ve maliyet tasarruflarının analiz edilmesinde kullanmışlardır. Pik talep zamanlarında, akıllı şebekeye entegre enerji depolama sistemlerinin bu talebi düşüreceğini göstermişlerdir. Aynı çalışmaya ek olarak, elektrik piyasasında sayıları artan konut depolama sistemlerinin beklenen etkisini araştıran Madlener ve Kirmas (2017); bunun için, Güney Almanya'daki bir

bölgede, güneş paneline sahip ve depolama sistemi entegre edilmiş üç kişilik bir hane halkı için bir simülasyon modeli kullanmışlardır ve bu yatırımların karlı olduğu koşulları üç senaryo üzerinden incelemişlerdir.

Bataryaların binalardaki ikinci yaşam döngüsünün ekonomik olasılığını ve yıpranma performansını analiz eden Casals ve diğ. (2019b), batarya kullanımına bağlı olarak, bağımsız binaları göz önünde bulundurarak veya binaların bir enerji toplayıcısı aracılığıyla ikincil elektrik pazarlarına katılabileceği akıllı şebeke kavramına yönelik birkaç senaryo sunmaktadır. Sonuçlar, kullanım ömrü dört yıl daha uzatılsa bile, bu tip bataryaların evsel amaçlı kullanılmasının en ekonomik seçenek olmayabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, binalardaki normal kullanımına ek olarak ikincil elektrik pazarlarına katılabilirlerse cazip hale gelebileceklerini belirtmişlerdir. Benzer bir araştırmada Cusenza ve diğ. (2019), mevcut bir Net-Zero enerji verimli konut binasının (25.000 kWh/yıl) ihtiyaç duyduğu elektriği sağlayan, verimliliği düşmüş lityum-iyon EV bataryalarını, güneş panellerini (20 kW) ve elektrik şebekesinden oluşan sistemi incelemişlerdir. Çalışmanın amacı, yük döngüsü optimizasyonu ve yaşam döngüsü perspektifindeki çevresel etkiler için optimum batarya boyutunu belirlemektir.

Diğer fizibilite ve kapasite modellerinden farklı olarak, Jiao ve Evens (2016) EV'lerde kullanımı sonlanmış ve verimliliği düşmüş bataryaların, tekrar kullanımını kolaylaştıran farklı EV paydaşları için farklı iş modelleri oluşturmuşlardır. EV endüstrisinde sürdürülebilirlik için; bu bataryaların tekrar kullanımına uygun bir iş modeli oluşturabilmek amacıyla farklı EV sektörlerinden mülakatlara, endüstriyel raporlara ve akademik literatüre dayanarak analiz yapmışlardır.



### 3. KARAR DESTEK SİSTEMİ ÖNERİSİ

#### 3.1. Problemin Tanımı

Enerji güvenliğinde, kalitesinde ve arzında meydana gelen sıkıntılar birçok soruna sebebiyet vermektedir. Benzeri sıkıntıları gidermek için enerji depolama sistemi içeren mikro şebekeler oldukça yararlı görülmekte ve önerilmektedir. Ancak, yenilenebilir enerji kaynakları entegre edilmiş mikro şebekelerde yaşanan belirsizliklerden dolayı enerji planlama çok komplike bir duruma gelmiştir. Bu yüzden planlamada karar vermeyi kolaylaştıracak bir modele ihtiyaç duyulmaktadır. Bu model saatlik enerji yükü, enerji depolama sisteminin durumu ve şebeke kullanımında kadar destek mekanizması olarak çalışabilecektir.

Elektrik kalitesi problemlerinde ve kesintilerinden en çok etkilenen ve zarar gören sektörlerden biri de sağlık sektörüdür. Hastaneler bu problemlerden etkilenmemek için birden fazla elektrik yedekleme ünitesine sahiptirler. Bu sistemler genellikle, şebeke elektriğinin, jeneratörlerin ve UPS sistemlerinin koordineli çalışmasına bağlıdır. Ancak, jeneratörlerin devreye girme süresi yaklaşık sekiz saniyedir (Url-3).

Çizelge 3.1’de en fazla 10 saniye sürecek bir elektrik kesintisinin hastane birimleri üzerindeki kritik etkisi gösterilmiştir. Çizelgedeki “a” sütunu hiç kesinti olmaması talebini; “b” sütunu bölümün yarısının kesintisiz, diğer yarısının maksimum 10 saniye kesinti talebini; “c” sütunu birimin tamamında maksimum 10 saniyelik kesinti talebini ve “d” sütunu ise bölümün yarısında sürekli kesinti, diğer yarısında maksimum 10 saniyelik kesinti talebini yüzde olarak göstermektedir.

Elektrik kesintisine en duyarlı bölümler ameliyathaneler, resüsitasyon birimleri (temel-ileri yaşam destek üniteleri) ve yoğun bakım üniteleri; en az etkilenen bölümler ise idari birimler ve koridorlar olarak gözükmektedir (İmal ve Kale, 2013).

Elektrik arzının sağlık sektörü için ne kadar elzem olduğunu açıkça gösteren birçok olay meydana gelmiştir. Hindistan’daki 1200 yatak kapasiteli Ghandi Hastanesi’nde 2016 yılında yaşanan elektrik kesintisi yüzünden 21 hasta hayatını kaybetmiştir (Url-4).

**Çizelge 3.1 :** Hastane birimlerinin elektrik kesintisi/kesintisizlik yüzdeleri, İmal ve Kale (2013)'ten uyarlanmıştır.

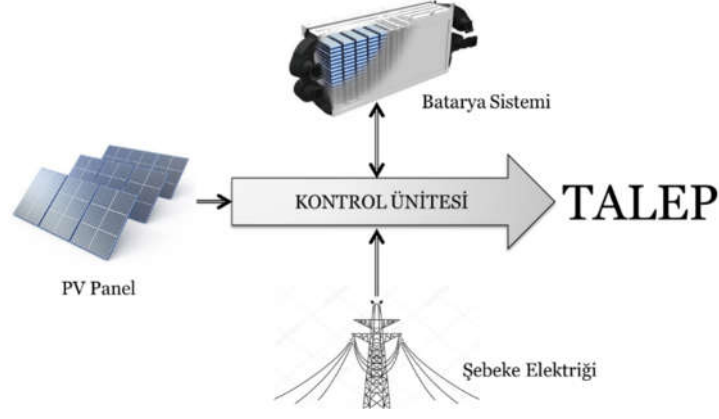
<b>Birim</b>	<b>%a</b>	<b>%b</b>	<b>%c</b>	<b>%d</b>
Ameliyathane	96	1	2	0
Laboratuvar	60	21	18	1
Radyoloji	60	18	18	4
Resüsitasyon	96	1	3	0
Yoğun Bakım	90	5	4	1
Pansuman, İğne	9	33	28	29
Poliklinikler	21	26	23	30
Yatan Hasta	23	31	28	17
Koridorlar, WC	13	22	26	38
İdari Birimler	21	18	25	36

Diğer bir örnekte de, 2017'de Kurnool Hastanesi'nde yaşanan 12 saatlik elektrik kesintisi yüzünden 8'i çocuk olmak üzere 20 hasta hayatlarını kaybetmiştir (Url-5). Kenya'nın Longisa kentinde meydana gelen 7 saatlik elektrik kesintisi sonucunda ise Longisa County Hastanesi'nde 3 hasta hayatını kaybetmiştir (Url-6). Başka bir örnekte ise, Güney Afrika Cumhuriyeti'ndeki Letaba Hastanesi'nde 2015 yılında yaşanan bir elektrik kesintisinde 3 kişinin elektrik kesintisinden yaşamını yitirdiği belirtilmiştir (Url-7). Hastanede elektrik kesintisinin yarattığı olumsuz durumlar ile ilgili daha birçok kayıt mevcuttur. Bu gibi olayların yaşanmaması için hastanelerde, özellikle kritik birimlerin, kesintisiz elektriğe ulaşımı elzemdir.

Hastanelere kurulacak olan yenilenebilir enerji kaynağı ve enerji depolama sistemi entegreli bir mikro şebeke sistemi, iyi planlanırsa kullanıcı için hem kesintisiz hem de düşük elektrik maliyetli bir çözüm sunabilirler. Şekil 3.1'de bu tez kapsamında hastaneye entegre edilmesi planlanan mikro şebekenin yapısı verilmiştir. Sistemde üç adet enerji kaynağı bulunmaktadır: güneş panelleri, elektrik şebekesi ve verimliliği düşmüş EV bataryalı enerji depolama sistemi. Bu kaynaklardan elde edilen enerji-anlık enerji talebini karşılamak veya enerjiyi ileriki bir zamanda kullanmak üzere depolamak için- iki farklı şekilde kullanılabilir.

Hastane özelinde geliştirilen bu modelde, tüm hastanenin ve kritik birimlerin enerji talebi, şebekeden elektrik alış fiyatı, güneş panellerinden enerji üretim miktarı ve depolama sisteminin doluluk oranı verileri kullanılarak saatlik bir plan çıkarılacaktır.





**Şekil 3.1 :** Modelde kullanılan entegre sistemin yapısı.

### 3.2. Yöntem

Şekil 3.1’de verilen entegre sistem yapısının çizelgelemesi için bu çalışmada doğrusal programlama metodu kullanılması ön görülmüştür. Bu kapsamda, doğrusal programlama (DP) deterministik yaklaşımlardan en yaygın kullanılan metodlardan biridir (Ufluoğlu, 2018).

Doğrusal programlama, belirli bir parametre kümesinden veya gereksinimler listesinden en iyi sonucu ya da çözümü belirlemek için kullanılan, doğrusal ilişkiler biçiminde gösterilen matematiksel bir yöntemdir. Para, enerji, insan gücü, makine kaynakları, zaman, alan ve diğer birçok değişken gibi sonlu kaynakları tahsis etmede en iyi çözümü bulmak için bilgisayar modelleme veya simülasyonunda en sık kullanılan yöntemdir. Çoğu durumda, doğrusal programlamanın ihtiyaç duyduğu "en iyi sonuç" maksimum kar veya en düşük maliyettir.

Doğrusal programlamanın temel bileşenleri şunlardır:

- Karar değişkenleri: Belirlenecek miktarlardır.
- Amaç fonksiyonu: Karar değişkenlerine bağlı olarak basitçe optimize edilmesi gereken değeri temsil eder.
- Kısıtlar: Her karar değişkeninin sınırlı miktarda kaynağı nasıl kullanacağını gösterir.
- Veriler: Nesnel işlev ve kısıtlar arasındaki ilişkileri belirler.

Doğrusal programlamada karar değişkenleri birbirleriyle veya kendileriyle çarpım halinde bulunamazlar. Doğrusal programlamada karar değişkenlerinin tamamı sürekli iken tamsayı programlamada (TP) bu değişkenlerin tümü tamsayı olmaktadır.

Doğrusal programlama modelinin genel gösterimi aşağıda verilmiştir. Bu modelde  $n$  adet karar değişkeni ve  $m$  adet de kısıt yer almaktadır. Ayrıca,  $x_j$  karar değişkenlerini,  $a_{ij}$ ,  $b_i$  ve  $c_j$  kesin olarak bilinen sabir parametrelerini göstermektedir.

- Amaç fonksiyonu: 
$$\text{Min(max)} z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (3.1)$$

- Kısıtlar: 
$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad i=1,2,\dots,m \quad (3.2)$$

- Karar değişkenleri: 
$$x_j \geq 0 \quad j=1,2,\dots,n \quad (3.3)$$

DP'lerde 7 varsayım vardır (McCarl ve Spreen, 2013):

1. Amaç fonksiyonu uyumluluğu: Çözülecek problemin tek amaçlı olmasıdır. DP ile sadece bir amaca yönelik kurulan bir modeldeki karar değişkenlerin değerleri bulunur.
2. Karar değişkeni uyumluluğu: karar vericinin belirli seçeneklere sahip olduğu ve karar değişkenlerinin negatif olmayan değerler olduğu anlamına gelir.
3. Kısıt uyumluluğu: Tüm kısıtlamaları aynı anda karşılayan karar değişkenlerinin herhangi bir seçimine izin verilir.
4. Orantısallık: Doğrusal programlamanın altında yatan temel varsayım, kısıt eşitsizliğindeki herhangi bir değişikliğin, amaç fonksiyonunda orantılı değişime sahip olacağıdır.
5. Toplanabilirlik: Herhangi bir karar değişkeninin amaç fonksiyonuna veya kısıtların sol tarafına katkısı diğer karar değişkenlerinin değerinden bağımsızdır. Dolayısıyla toplam katkıyı hesaplamak için karar değişkenlerinin katkıları toplanabilir.
6. Bölünebilirlik: Problem formülasyonu, tüm karar değişkenlerinin kesirli olanlar dahil, negatif olmayan herhangi bir değeri alabileceğini varsayar (yani karar değişkenleri süreklidir).
7. Belirlilik: Kesin varsayım,  $c_j$ ,  $b_i$  ve  $a_{ij}$  parametrelerinin bilinen sabitler olmasını gerektirir. Elde edilen optimum çözüm, tüm parametre değerlerinin mükemmel şekilde bilinmesine dayanır. Tüm dışsal faktörlerin bilindiği ve sabit olduğu varsayıldığı için; bu varsayım, “deterministik” analiz teriminin ortaya çıkmasına neden olur.

### 3.3. Model

Türkiye özelinde veriler, kısıtlar ve varsayımlar yapılarak, Türkiye’de bulunduğu varsayılan hastaneye entegre edilen sistemin çizelgeleme modelinde doğrusal programlama kullanılmıştır. Çizelge 3.2’de gösterilen karar değişkenleri ile enerji akışının bir kaynaktan belirli bir hedefe atanması sağlanmıştır.

Bir “t” zamanında, şebekeden alınan enerjinin ve güneş panelleri sayesinde üretilen enerjinin nereye yönlendirileceği, batarya sisteminin doldurulması veya boşaltılması önceden belirlenmiştir.

**Çizelge 3.2 : Karar değişkenleri ve açıklamaları.**

<b>Karar Değişkeni</b>	<b>Açıklama</b>
$E_t^{GD}$	Şebeke’den talebi karşılamak için alınan enerji
$E_t^{GB}$	Şebeke’den bataryayı doldurmak için alınan enerji
$E_t^{PVD}$	Güneş panelinden üretilen ve talep karşılamak için yönlendirilen enerji
$E_t^{PVB}$	Güneş panelinden üretilen ve batarya şarjı için yönlendirilen enerji
$E_t^{DCH}$	Bataryadan, talebi karşılamak üzere çekilen enerji

Çizelge 3.3’te eşitliklerde ve kısıtlarda yer alan parametreler ve açıklamaları verilmiştir. Bu modelde, hastane uygulamasına özel olarak  $D_t^{crit}$  parametresi tanımlanmıştır. Bu parametrede, hastane bünyesinde, t zamanında olması planlanan ameliyatlara ( $D_t^{sur}$ ), sürekli çalışır durumda olmak zorunda olan yoğun bakım ünitelerinin ( $D_t^{icu}$ ) ve resüsitasyon bölümünün ( $D_t^{res}$ ) t anındaki talebi belirtilmiştir.

En kritik öneme sahip olan bu üç hastane departmanının en acil durumda bile batarya sistemi sayesinde en az bir saat kesintisiz enerji almaları sağlanmıştır. Bu şekilde diğer yedek enerji ünitelerinin devreye girme süresince kritik yüklerin enerjisiz kalması engellenmiştir.

**Çizelge 3.3 : Parametreler ve açıklamaları.**

<b>Parametre</b>	<b>Açıklama</b>
$D_t$	Enerji talebi (t zamanında)
$D_t^{crit}$	Kritik yük miktarı (t zamanında)
$D_t^{icu}$	Acil servis/yoğun bakım ünitesi için enerji talebi (t zamanında)
$D_t^{res}$	Resisütasyon birimi için enerji talebi (t zamanında)
$D_t^{sur}$	Ameliyathaneler için enerji talebi (t zamanında)
$P_t^{pur}$	Şebekeden satın alınan elektrik birim fiyatı (t zamanında)
$r_t$	Güneş ışınması miktarı (t zamanında)
$E_t^{PV}$	Güneş panellerinde üretilen enerji (t zamanında)
$P^{PV}$	Güneş panellerinden enerji üretmenin birim maliyeti
$A^{PV}$	Güneş panellerinin boyutu ( $m^2$ )
$C_{mnt}$	Bataryanın işletme ve bakım birim maliyeti
$C_{capt}$	Batarya maliyeti
$k_{loss}$	Batarya kendi kendine boşalma oranı
$\gamma$	Batarya değer kaybının ne kadarının kontrollü yıpranma maliyeti ile ilişkili olduğu
$\eta_{dis}, \eta_{ch}$	Batarya deşarj ve şarj verimlilik katsayıları
$\eta_{PV}$	PV sisteminin toplam verimliliği
$N$	Bataryanın çevrim sayısı
$B_{cap}$	Batarya kapasitesi
$B_{safety}$	Batarya için izin verilen en düşük enerji seviyesi
$SoC_t$	Bataryadaki anlık enerji miktarı (t zamanında)
$M_t^{PV}$	Güneş panellerinden üretilen enerjinin maliyeti (t zamanında)
$M_t^B$	Toplam batarya maliyeti (t zamanında)
$M_t^{pur}$	Şebekeden satın alınan elektriğin maliyeti (t zamanında)

**Amaç Fonksiyonu:**

Amaç fonksiyonundaki maliyet kalemleri; güneş panellerinden üretim yapma maliyeti, batarya sisteminin yıpranma ve bakım maliyeti ve şebekeden satın alınan enerjinin maliyetlerinden oluşmaktadır. En küçüklenmeye çalışılan amaç fonksiyonu denklem (3.4)'te verilmiştir.

$$\text{Min. } Z = \sum_{t=0}^{8760} \{M_t^{PV} + M_t^B + M_t^{pur}\} \quad (3.4)$$

Ana kısıtlar:

$$\text{Talep kısıtı: } E_t^{PVD} + E_t^{GD} + E_t^{DCH} = D_t, \forall t \quad (3.5)$$

$$\text{Batarya kapasite kısıtı: } SoC_t \leq B_{cap}, \forall t \quad (3.6)$$

$$\text{Batarya boşaltım kısıtı: } E_t^{DCH} \leq [SoC_t - B_{safety}] \cdot \eta_{dis}, \forall t \quad (3.7)$$

$$\text{Min. Batarya doluluk oranı: } SoC_t \geq D_t^{crit}, \forall t \quad (3.8)$$

Eşitlikler:

Enerji depolama sisteminde kullanılan lityum-iyon bataryaların bazı özellikleri modeldeki denklemlere eklenmiştir. Batarya sisteminin t anındaki kapasitesi değişim göstermektedir. Bataryaya giren ve çıkan enerjiye ek olarak, bataryanın kendi kendine boşalma oranı da dikkate alınmalıdır. Denklem (3.9)'de t anında depodaki enerji seviyesini gösteren  $SoC_t$  değişkeni verilmiştir. Denklem (3.10)'da pil boşalma derinliği (DoD-depth of discharge) verilmiştir. Denklem (3.11)'de bu boşalma derinliğine bağlı olarak bataryada meydana gelen yıpranmanın maliyeti, denklem (3.12)'de ise toplam şarj/deşarj döngüsü miktarına bağlı bakım ve işletme maliyeti verilmiştir.

$$SoC_t = [SoC_{t-1} + E_t^{CH} \cdot \eta_{ch} - E_t^{DCH} / \eta_{dis}] (1 - k_{loss}) \quad (3.9)$$

$$DoD_t = E_t^{DCH} / [B_{cap} \cdot \eta_{dis}], \forall t \quad (3.10)$$

$$f_t^{dep} = [DoD_t \cdot \gamma \cdot C_{capt}] / N, \forall t \quad (3.11)$$

$$f_t^{mnt} = [E_t^{CH} \cdot \eta_{ch} + E_t^{DCH} / \eta_{dis}] C_{mnt}, \forall t \quad (3.12)$$

Amaç fonksiyonunda yer alan toplam batarya maliyeti  $M_t^B$ , denklem (3.11)'daki  $f_t^{dep}$  ve denklem (3.12)'deki  $f_t^{mnt}$  maliyet kalemlerinin toplamından oluşmaktadır. Şebekeden satın alınan elektriğin t anındaki maliyetini gösteren  $M_t^{pur}$  değişkeni, denklem (3.14)'te gösterilmiştir. Maliyet kalemleri hesaplamaları aşağıda verilmiştir:

$$M_t^{PV} = E_t^{PV} \cdot P^{PV}, \forall t \quad (3.13)$$

$$M_t^{pur} = E_t^G \cdot P_t^{pur}, \forall t \quad (3.14)$$

$$M_t^B = f_t^{dep} + f_t^{mnt}, \forall t \quad (3.15)$$

$$D_t^{crit} = D_t^{sur} + D_t^{res} + D_t^{icu}, \forall t \quad (3.16)$$

$$E_t^{PV} = E_t^{PVD} + E_t^{PVB}, \forall t \quad (3.17)$$

$$E_t^G = E_t^{GD} + E_t^{GB}, \forall t \quad (3.18)$$

$$E_t^{CH} = E_t^{PVB} + E_t^{GB}, \forall t \quad (3.19)$$

$$E_t^{PV} = A_{PV} \cdot \eta_{PV} \cdot r_t \quad (3.20)$$

Tüm değişkenler  $\geq 0$ ,  $\forall t$

### 3.4. Veriler ve Varsayımlar

Önceki başlıkta verilen modelin uygulanabilmesi için öncelikli olarak örnek bir hastanenin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için 150 yataklı, 7 ameliyathaneli ve 25 yataklı yoğun bakım ünitesi ve 4 resüsitasyon ünitesi olan bir hastane uygulaması seçilmiştir. Ameliyathanelerin boyutlandırılmasında Sağlık Bakanlığı'nın belirlemiş olduğu kısıtlar düşünülerek bir ameliyathanenin boyutu 45m<sup>2</sup>, bir yoğun bakım ünitesinin boyutu 12m<sup>2</sup> ve bir resüsitasyon ünitesinin boyutu 10m<sup>2</sup> olarak kabul edilmiştir (Sağlık Bakanlığı Özel Hastaneler Yönetmeliği, 2002). Yoğun/acil bakım ünitesinin pik enerji talebi ( $D_t^{icu}$ ) 28.9Wh/m<sup>2</sup>, ameliyathanenin pik enerji talebi ( $D_t^{sur}$ ) 17Wh/m<sup>2</sup> ve resüsitasyon ünitesinin pik enerji talebi ( $D_t^{res}$ ) 68.7Wh/m<sup>2</sup> ortalama olarak alınmıştır (Morgenstern ve diğ., 2016).

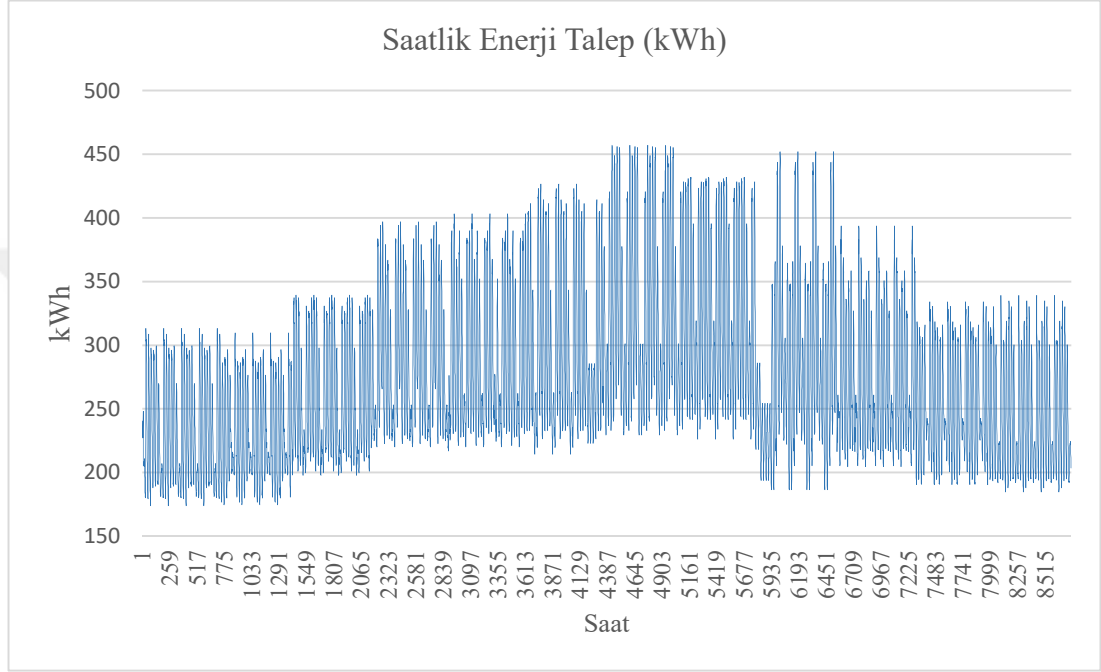
$D_t^{sur}$  kritik yükü hastanenin ofis saatlerine benzer olduğundan dolayı hafta içi ve hafta sonu günlerinde 09.00-12.00 ve 13.00-17.00 saatleri arasında;  $D_t^{res}$  ve  $D_t^{icu}$  kritik yükleri ise her saat elektrik yükü ihtiyacı duymaktadır (Cristiansen ve diğ., 2016). Saatlik  $D_t^{crit}$  hesabı bu bilgiler ışığında hesaplanmıştır.

Hastanenin yatak kapasitesi ile yıllık enerji tüketimi arasındaki ilişkiyi Gonzalez ve diğ. (2018) aşağıdaki denklem (3.21)'de vermiştir.

$$EC = 33,548 \cdot NB - 2633,6 \quad (3.21)$$

Bu denkleme göre seçtiğimiz hastanenin yıllık elektrik tüketimi 2398,6 MWh'tir. Ayrıca Hu ve diğ. (2004)'ün çalışmasına göre hastanenin aylık tüketim katsayıları bulunmuştur. EPIAŞ'ın hastaneler için saatlik çarpan değerleri baz alınarak yıllık tüketim miktarından saatlik tüketim miktarı hesaplanmıştır ve saatlik grafiği Şekil 3.2'de verilmiştir. Şebekeden satın alınan elektrik fiyatına yine EPIAŞ'ın yayınladığı saatlik Piyasa Takas Fiyatı (PTF) verisinden ulaşılmıştır. Ancak şebekeden alınan elektrikte dağıtım bedeli hesaba katılmamıştır.

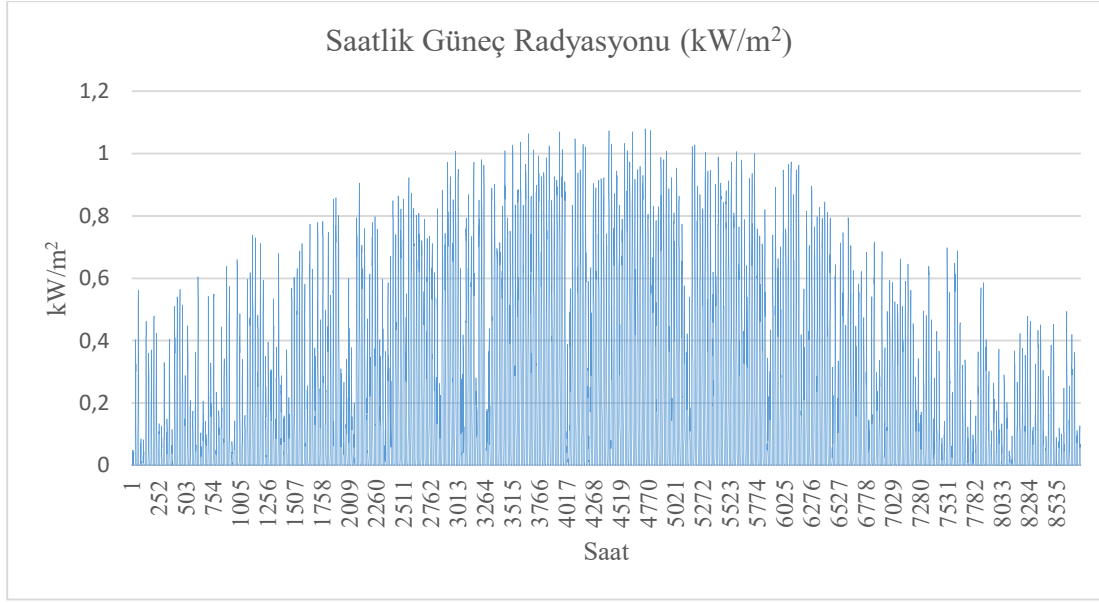
Güneş panellerinden elde edilebilecek enerji miktarını hesaplamak için gereken saatlik ışımaya miktarı ( $r_t$ ) ise NASA'nın küresel ışımaya verisinden elde edilmiştir ve Şekil 3.3'te yıllık dağılımı saatlik bazda gösterilmiştir. Toplam yüze alanı  $275\text{m}^2$  olmak üzere, sabit açılı PV sisteminin verimi (PV verimi, eğim açısı verimi, çevirici verimi ve şarj kontrol cihazı verimi) %12 ve güneş panellerinden elektrik üretme maliyeti  $0.024\text{\$/kWh}$  olarak alınmıştır (Ufluoğlu, 2018).



**Şekil 3.2** : Saatlik enerji talebi grafiği.

Enerji depolama sisteminde toplam kapasitesi  $100\text{ kWh}$  olan EV'lerden alınan verimliliği düşmüş lityum iyon bataryaların kullanımı tercih edilmiştir. Bu bataryaların saatlik kendi kendine deşarj oranı %0.2 ve bakım maliyeti  $0.001\text{\$/kWh}$  alınmıştır. Normal koşullar altında yaşam döngüsü sayısı 4000 ve batarya şarj/deşarj verimliliği ise %95 olarak alınmıştır.

Bataryaların yenileme maliyeti olarak, EV'lerden çıkan bataryaların toplama maliyeti alınmıştır. Yüzde 80 kapasitesini koruyan bataryaların ortalama enerji yoğunluğu  $160\text{W/kg}$  olarak alınmış ve toplam batarya ağırlığı  $625\text{kg}$  hesaplanmıştır. Bu bataryaların toplanması için ise  $25\text{TL/kg}$  kargo taşıma masrafı kabul edilmiştir. Bu kabullere göre batarya maliyeti ( $C_{\text{capt}}$ ) yaklaşık olarak  $15625\text{ TL}$  tutmaktadır. Kullanılmış batarya piyasası oluşuktan sonra bu fiyat piyasa şartlarına göre şekillenecektir.



**Şekil 3.3 :** Saatlik güneş radyasyonu miktarı.

Şebeke elektriği kullanmanın yaratacağı çevresel etkiyi ele almak için Çizelge 3.4'teki veriler kullanılmıştır. Şebekeye güç sağlayan farklı enerji üretim kaynaklarına bağlı olarak sera gazı salınım miktarları gösterilmiştir. Ayrıca Uluslararası Enerji Ajansı 2016 verilerine göre Türkiye'de elektrik üretiminin %33,62'si kömürden, % 32,5'ini doğalgazdan ve %0,7'sini de petrolden sağlamaktadır (IEA, 2018c). Bu veriler ışığında, sistemin sağladığı çevresel fayda  $\text{gCO}_2\text{-eq/kWh}$  birimine göre hesaplanmıştır. Buna göre ortalama doğrudan emisyon miktarı  $448,4872 \text{ gCO}_2\text{-eq/kWh}$  olmaktadır.

**Çizelge 3.4 :** Üretim kaynağına bağlı gaz salınım miktarı, IPCC (2014)'ten uyarlanmıştır.

<b>Kaynak</b>	<b>g CO<sub>2</sub>-eq/kWh</b>
Kömür	961
Doğalgaz	370
Yağ	778

Her senaryo sonucu elde edilen ton CO<sub>2</sub>-eq miktarının parasal değeri iki farklı şekilde ele alınacaktır. İlkinde, kişi başına düşen milli gelir baz alındığında Türkiye ile oldukça yakın gözükken Meksika ele alınacaktır (Türkiye: 10.546,2 \$/kişi başı, Meksika: 8.910,2 \$/kişi başı). Henüz Türkiye'de kurulmamış olan karbon piyasası ve karbon vergilendirmesine dair ücret verisi, Meksika'da uygulanan karbon vergisi göz önünde bulundurularak 3 \$/ton CO<sub>2</sub>-eq olarak alınacaktır. İkincisinde ise Avrupa Birliği



Emisyon Ticaret Sistemi'ne (EU ETS) ait piyasa verisi kullanılacaktır. Bu durumda da 16 \$/ton CO<sub>2</sub>-eq üzerinden tasarruf miktarı hesaplanacaktır (Dünya Bankası, 2018).



\*Hesaplamalar Türk Lirası cinsinden yapılmıştır ve USD/TL kuru olarak 3.021 kullanılmıştır.



## 4. ÇIKTI ANALİZLERİ

Bir önceki ana başlıkta verilen çizelgeme modeli *Excel Solver* programında aynı hastane verisine dayanarak, 5 farklı senaryo altında yılın her saati için (8760 saat) çalıştırılmıştır. Programda kullanılan kod EK-A'da ve programın ekran görüntüleri EK-B'de verilmiştir.

Modele girdi oluşturacak verilerin 2016 yılından seçilmesi ile 23 Aralık 2016 tarihinde gerçekleşen Türkiye genelindeki elektrik kesintisinin ve 1,9 TL/kWh'e kadar çıkan elektrik fiyatının modele etkisinin gözlenmesi amaçlanmıştır. Çalıştırılan 5 senaryoda elektrik kesintisinin ve yükselen fiyatın yarattığı durum grafikler yardımıyla da ortaya konulmuştur.

Aşağıda, modelin çalıştırıldığı senaryolar, açıklamalarıyla ve elde edilen sonuçlarıyla birlikte verilmiştir.

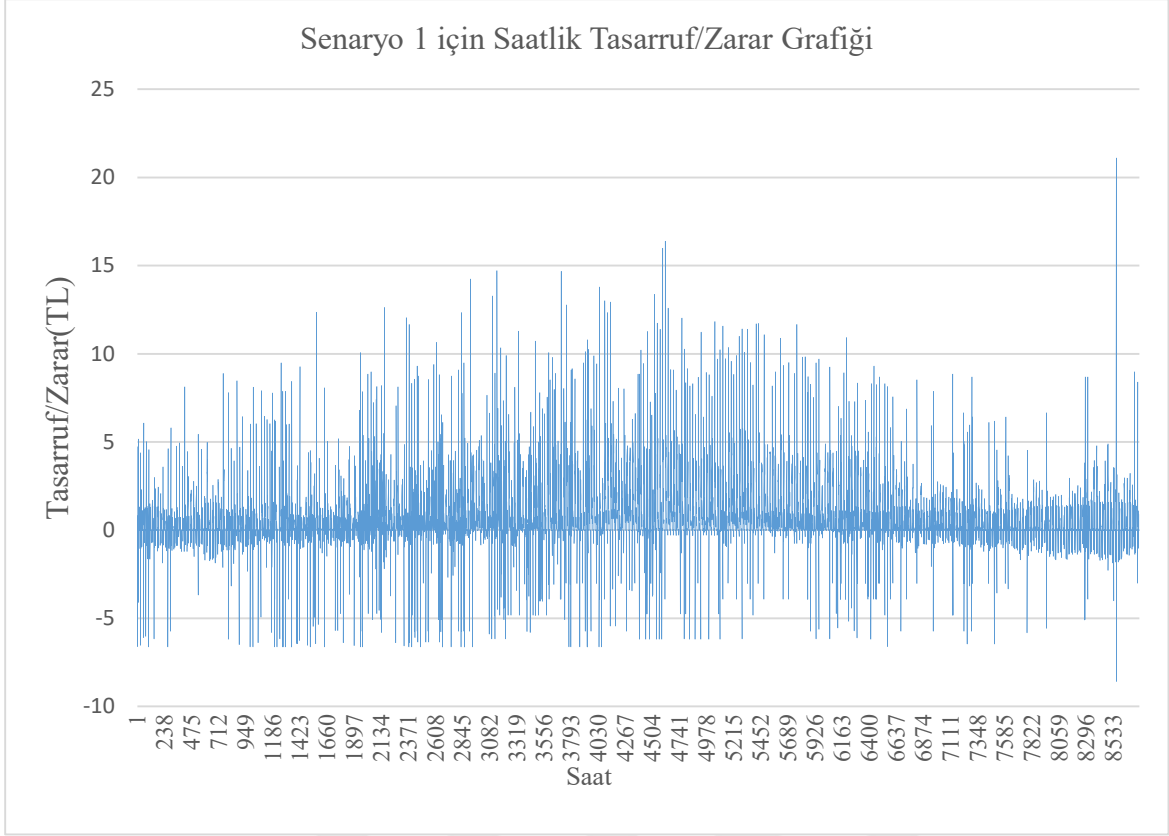
### 4.1. Senaryo 1

Bu senaryoda, hastanede bulunan kritik yüklerden  $D_t^{res}$  ve  $D_t^{icu}$ , nun her saat için aktif,  $D_t^{sur}$  kritik yükünün ise hem hafta içi hem de hafta sonu günlerinin ofis çalışma saatlerinde aktif olduğu göz önüne alınmıştır. Batarya sisteminin doluluk oranının en az bir saat boyunca kritik yüklere enerji sağlaması için kısıt konmuştur. Ayrıca, PTF'nin 0,07 TL/kWh altına düştüğünde batarya sistemini doldurması durumunda sağlayacağı tasarruf durumu ve deşarj sayısı belirlenmiştir.

8760 saat için çalıştırılan çizelgeme modeli sonucunda batarya sistemi 1633 deşarj yaparken toplam 5558.5 TL tasarruf sağlanmıştır. Şekil 4.1'de bu senaryo sonucunda saatlik olarak elde edilen tasarruf/zarar durumunu gösteren grafik verilmiştir.

Ayrıca Şekil 4.1'de 23 Aralık 2016 tarihinde yaşanan elektrik kesintisinde sistemin sağladığı tasarruf miktarı net şekilde gözükmemektedir.

Ayrıca bu senaryoda toplam 43453 kWh daha az şebeke elektriği kullanılmış ve bunun sonucunda 19,5 ton CO<sub>2</sub>-eq doğrudan emisyon azaltılması sağlanmıştır.



**Şekil 4.1** : Senaryo 1 için saatlik tasarruf/zarar grafiği.

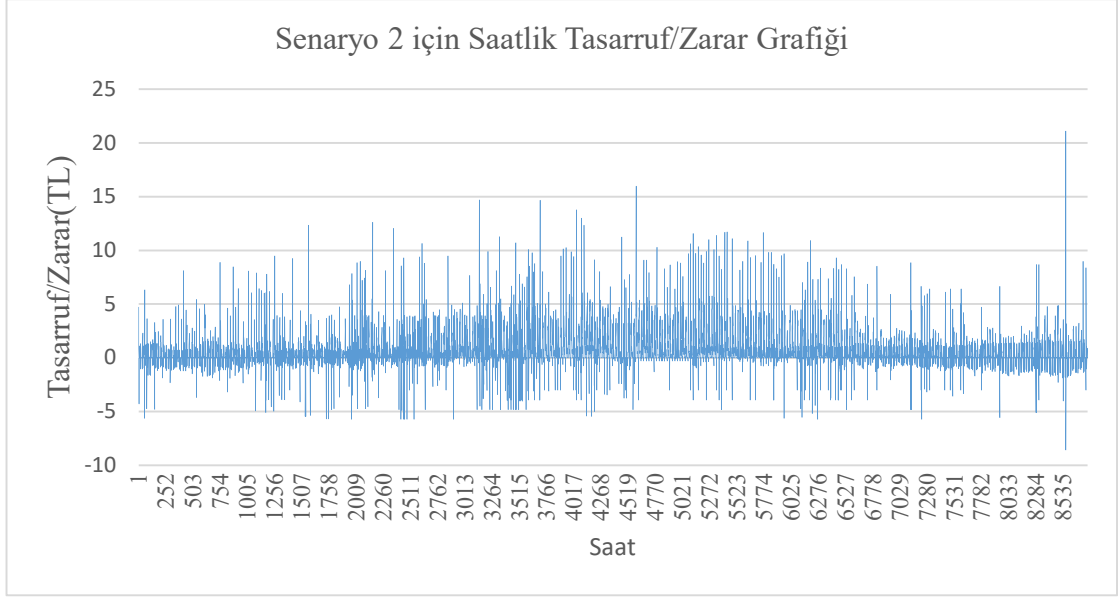
#### 4.2. Senaryo 2

Bu senaryoda kritik yüklerin dağılımı ve batarya doluluk kısıtı aynı kalmak koşuluyla, batarya dolum yapma fiyatı PTF'nin 0,06 TL/kWh altına düşmesi durumunda sistemin sağlayacağı tasarruf ve deşarj sayısı incelenmiştir.

8760 saat için incelenen senaryo sonucunda 5560,1 TL tasarruf ile bir önceki senaryoya neredeyse aynı miktarda kar sağlandığı gözlenmiştir. Ancak bu senaryoda batarya deşarj sayısı 1384'e düşmüştür. Düşük batarya deşarj sayısı sistemdeki bataryaların daha az döngüye girmesini ve böylece daha az yıpranmasını sağlamaktadır.

Şekil 4.2'de bu senaryo sonucunda saatlik olarak elde edilen tasarruf/zarar durumunu gösteren grafik verilmiştir.

Bu senaryonun sonucunda şebeke elektriğinden 43960 kWh daha az enerji çekilmiş ve toplamda 19,7 ton CO<sub>2</sub>-eq doğrudan emisyon azaltılması sağlanmıştır.

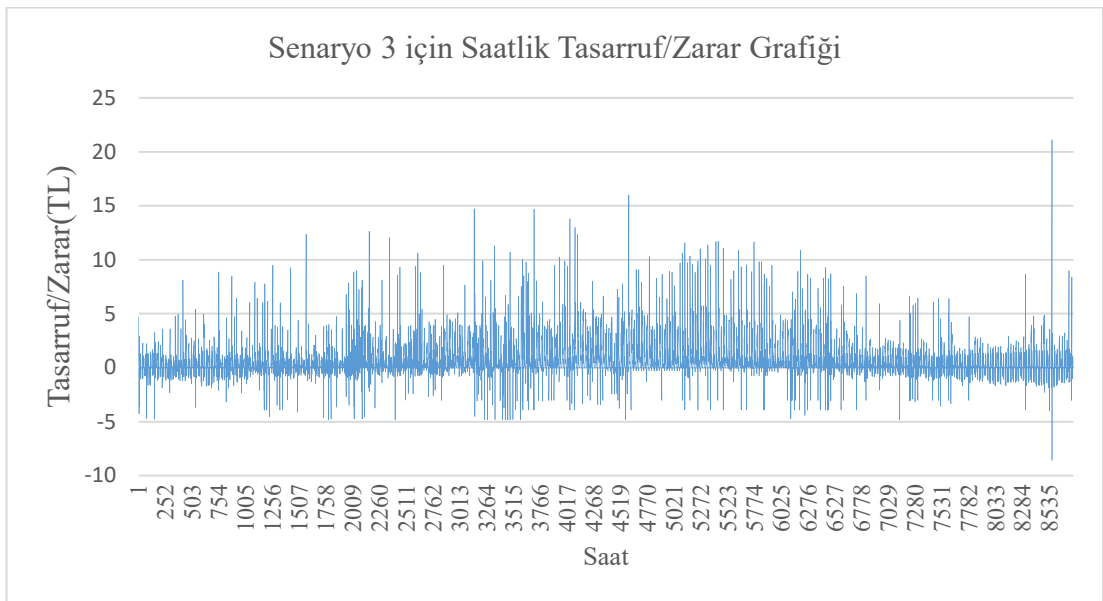


**Şekil 4.2 :** Senaryo 2 için saatlik tasarruf/zarar grafiği.

### 4.3. Senaryo 3

Senaryo 3'teki kritik yük dağılımı ve batarya kısıtı önceki senaryolardaki ile aynıdır. Batarya dolun fiyatı bu senaryoda 0,05 TL/kWh olarak belirlenmiş ve model yine 8760 saat için çalıştırılmıştır. Şekil 4.3'te saatlik elde edilen veriler gösterilmiştir. Çizelgeleme sonucunda 5561,3 TL tasarrufa 1297 deşarj sonucunda ulaşılmıştır.

Ayrıca bu senaryoda toplam 44188 kWh daha az şebeke elektriği kullanılmış ve bunun sonucunda 19,8 ton CO<sub>2</sub>-eq doğrudan emisyon azaltılması sağlanmıştır.

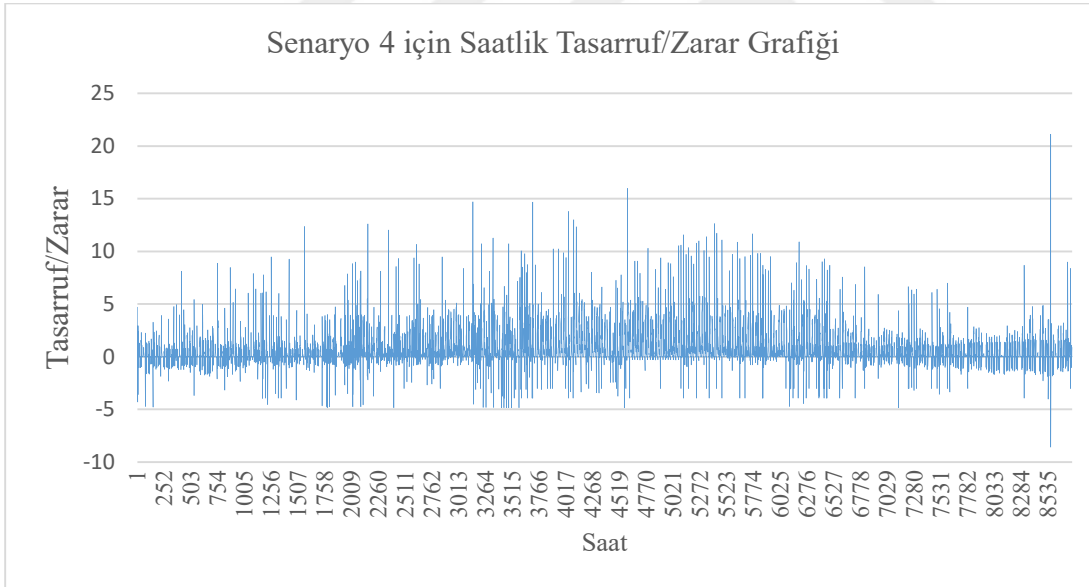


**Şekil 4.3 :** Senaryo 3 için saatlik tasarruf/zarar grafiği.

#### 4.4. Senaryo 4

Bu senaryoda önceki senaryolardan farklı olarak daha gerçekçi bir durum üzerinde durulmuştur. Batarya doluluk kısıtı aynı kalmak koşuluyla, kritik yüklerden  $D_t^{res}$  ve  $D_t^{icu}$ , nun her saat için aktif,  $D_t^{sur}$  kritik yükünün ise sadece hafta içi ve cumartesi günlerinin ofis çalışma saatlerinde aktif olduğu durumdaki bataryaların çizelgelemesi yapılmıştır. Birçok hastanede Pazar günleri ameliyat yapılmadığı ancak acil/yoğun bakım ve rüsitasyon üniterinin 7/24 hizmet verdiği göz önünde bulundurularak model 8760 saat için çalıştırılmıştır. Senaryo 3'te olduğu gibi PTF'nin 0,05 TL/kWh altındaki zamanlarda batarya dolumu yapılması sağlanarak bataryalardan en verimli şekilde yararlanılması sağlanmıştır. Şekil 4.4'te bu senaryo için saatlik tasarruf/zarar durumu grafiği verilmiştir. Bu senaryoda 1194 batarya deşarjı ile toplam 5563,5 TL tasarruf sağlanmıştır.

Bu senaryoya göre 44248 kWh daha az şebeke elektriği kullanılırken 19,9 ton CO<sub>2</sub>-eq doğrudan emisyon azaltılması yapılmıştır.



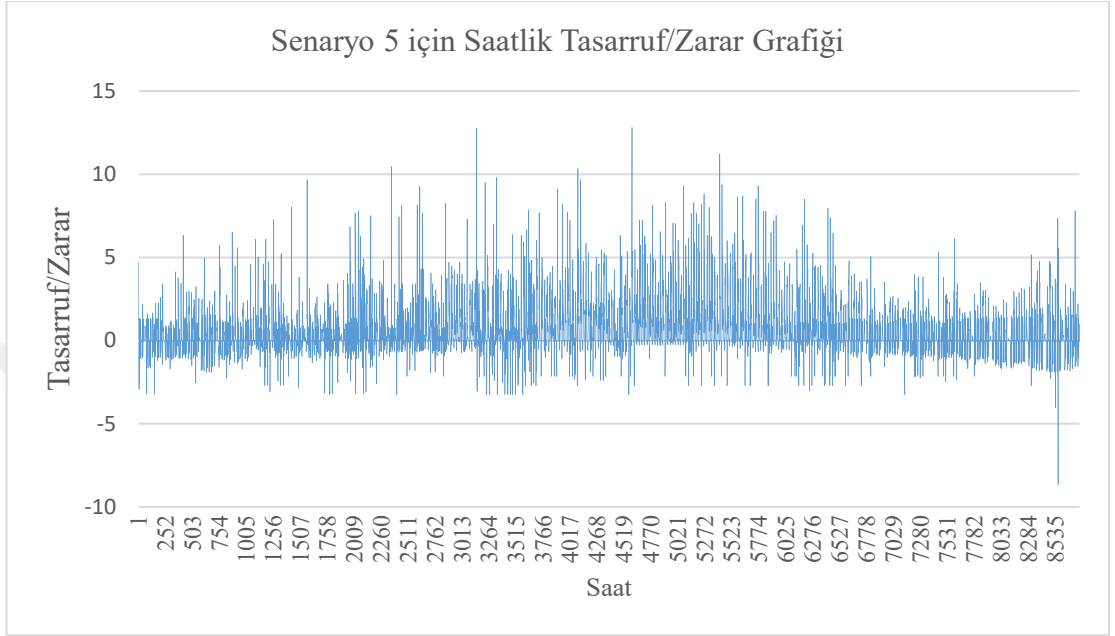
Şekil 4.4 : Senaryo 4 için saatlik tasarruf/zarar grafiği.

#### 4.5. Senaryo 5

Bu senaryoda bir önceki senaryoya ek olarak bataryaların kritik yüklerle en az 2 saat kesintisiz enerji sağladığı durum için çizelgeleme yapılmıştır. Daha katı depolama kısıtı yüzünden bu senaryoda 1489 deşarj sonucunda görece düşük olarak 5178,5 TL

tasarruf edilmiştir. Şekil 4.5'te de bu senaryo sonucu elde edilen saatlik tasarruf ve zarar grafiği verilmiştir.

Şebekeden çekilen enerji miktarı bu senaryoda 44167 kWh daha az olmakla birlikte toplamda 19,8 ton CO<sub>2</sub>-eq doğrudan emisyon kazancı sağlanmıştır.



**Şekil 4.5 :** Senaryo 5 için saatlik tasarruf/zarar grafiği.





## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bu çalışma, hastaneler için hayati önem arz eden elektrik tedarığının enerji depolama sistemleri ile güvence altına alınmasının önemini göstermek için yapılmıştır. Zira insan hayatından daha önemli bir konu yoktur.

Sisteme entegre edilen enerji depolama sisteminin, hastanedeki kritik öneme sahip elektrik yüklerini sürekli beslemesi sağlanmış, böylece insan hayatını riske edecek elektrik kesintilerinin önüne geçilmiştir. Bunun yanı sıra, güneş panellerinin ve batarya sistemlerinin koordinasyonu ile elektrik harcamalarından tasarruf sağlanmıştır.

Önerilen çizelgeleme modeli, 150 yatak kapasiteli bir hastane için çalıştırılmıştır. 5 farklı senaryo altında elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1'de verilmiştir. En yüksek tasarruf hedefinde olan hastanelerin 4. Senaryoda elde edilen modeli, daha fazla elektrik arz güvenliği talep eden hastanelerin ise 5. Senaryodaki modeli kullanmaları akla yatkın olacaktır. Ayrıca, grafiklerden de görüldüğü üzere 23 Aralık 2016 tarihinde yaşanan elektrik kesintisinde ve olağanüstü artan elektrik fiyatlarına karşın, kurulan enerji depolama sistemi sayesinde hastane bu dönemde elektriksiz kalmamıştır.

**Çizelge 4.1 : Senaryo sonuçlarının özeti.**

Senaryo No:	Deşarj Sayısı	Tasarruf Miktarı	Emisyon kazancı (ton CO <sub>2</sub> -eq)	Meksika Karbon Vergisi	EU ETS Piyasası
1	1633	5558,5 TL	19,5	176,72 TL	942,55 TL
2	1384	5560,1 TL	19,7	178,54 TL	952,22 TL
3	1297	5561,3 TL	19,8	179,45 TL	957,05 TL
4	1194	5563,5 TL	19,9	180,35 TL	961,89 TL
5	1489	5178,5 TL	19,8	179,45 TL	957,05 TL

Bunun yanı sıra, bu süreçte yüksek elektrik fiyatlarına karşılık şebekeden temin edilen elektrik en düşük düzeyde tutulup depodaki elektrik kullanılarak oldukça yüksek miktarda tasarruf sağlandığı gözlenmiştir. Bu durum, enerji depolama sisteminin sadece hastaneler için değil birçok kamu kurumunun, hizmet ve endüstri tesisinin de enerji tasarrufu ve güvenliği için ne kadar önem arz ettiğinin oldukça çarpıcı bir göstergesidir.

Bu tezde önerilen sistemin ana yapısını meydana getiren EV'lerden alınan verimliliği düşmüş lityum-iyon bataryaların tekrardan ülkemiz içinde değerlendirilmesi sonucu, ülke ekonomisi önemli bir tasarruf kalemi daha elde etmektedir. İlk yaşam döngüsünü EV'lerde tamamlayan bataryaların, yüzde 80 kapasiteleri kullanabilecek durumda iken geri dönüşüme sokulması ülke ekonomisi için büyük bir kayıp olacaktır. Bataryaların yüksek geri dönüşüm maliyetlerinin yanında yurtdışından temin edilmelerinin de getirdiği yüksek kur maliyeti düşünüldüğünde, bataryaların sabit batarya olarak uzun yıllar boyunca hizmet etmesi ekonomimiz açısından da yararlı olacaktır.

Hastaneye kurulan bu sistem ile elektrik faturasında yıllık olarak yaklaşık yüzde 1,8'lik bir düşüş sağlanmıştır. Gelecekte uygulanması planlanan ve Avrupa Birliği'nde de 4 Aralık 2012 tarihinden itibaren 13 ülkede yürürlükte olan Enerji Verimliliği Yükümlülüğü Sistemi (EVYS) ile ulaşılmak istenen, enerji satışını azaltarak tasarruf sağlamaktır. Nitekim bu sistem ile AB'de enerji dağıtım aşamasında %1.5'luk bir azaltma hedeflenmiştir. İşte bu noktada bu çalışmanın sonucu, eğer EVYS bir gün ülkemizde de uygulanırsa sağlamış olduğu tasarruf oranıyla buna tam da karşılık vermektedir.

İnsan hayatının değeri paha biçilemez. Kurulan bu sistem ile birçok insanın hayatı, hastanelerde meydana gelebilecek elektrik problemlerine karşı korumaya alınırken, hem ekonomik hem de çevresel fayda da yaratılabilmektedir.

## **5.2. Gelecek Çalışma Önerileri**

Gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı hastane bölgeleri için o alana uygun diğer alternatif enerji kaynakları (rüzgar, biogaz vb.) ve şebekeye enerji satışı imkanı da bu sisteme eklenerek, ihtiyaca göre modelde değişikliğe gidilebilir.

Bu çalışmada güneş panellerinin önceden hastanede kurulmuş olduğu varsayımından yola çıkılarak bütün hesaplar yapılmıştır. Buna bağlı olarak, yaşam döngüsü maliyet

analizi çalışmaları ve ilk yatırım maliyeti hesaplarının da dahil edildiği bir çalışmanın yapılması mümkündür.

Diğer bir çalışma önerisi ise kullanılan bataryaların durumuyla ilgilidir. Günümüzde henüz oluşmamış atık pil piyasasının oluşumu tamamlandıktan sonra, gelecekteki araştırmaların boyutu yatırım fizibilitesi yapmaya da olanak verecek şekilde şüphesiz genişleyecektir. Ayrıca, verimliliği düşmüş bataryaların ikinci yaşam döngüsündeki çalışma deneyim arttıkça, kullanım olasılıkları dikkate alınarak stokastik bir model oluşturulabilir.

Bu çalışma kapsamında kullanılan güneş panellerinin açısı sabit alınmıştır ve bütün hesaplamalar buna bağlı olarak yapılmıştır. Güneş panellerinin açılarının ay bazında optimum düzeylerinin belirlenmesiyle birlikte güneşten elde edilen enerji miktarı daha yüksek seviyelere çıkartılabilir. Farklı açı ve farklı güneş paneli tipleri senaryolarının da bu sisteme eklenmesiyle en verimli durumlar incelenebilir.

Bunlara ek olarak, güneş ışınım dağılımları, ana şebekeden çekilen enerjini dağılımı, batarya şarj/deşarj bağılımı dikkate alınarak doğrusal olmayan (DOP) modeller üzerinde çalışabilir.

İleride ülkemizde karbon vergilendirme sistemlerin ve karbon piyasalarının kurulması ile daha gerçekçi ve güncel tasarruf miktarları hesaplanabilmesi mümkün olacaktır. Karbon piyasalarının ve vergilerinin entegre edildiği bir model tasarlanması ile bu çalışma geliştirilmeye oldukça açıktır.



## KAYNAKLAR

**ABB Inc.** (2007). *Energy Efficiency in the Power Grid*. Norwalk, Connecticut.

**Abbaspour, M., Satkin, M., Ivatloo, B. M., Lotfi, F. H. ve Noorollahi, Y.** (2013). Optimal operation scheduling of wind power integrated with compressed air energy storage (CAES). *Renewable Energy*, 51, pp. 53–59.

**Abbott, S.** (2018). *Renewables for Everyone: Moving Beyond the Fortune 500*. Erişim tarihi:12 Şubat, 2019, <https://rmi.org/renewables-for-everyone-moving-beyond-the-fortune-500/>.

**Agrafiotis, C., Roeb, M., Schmäcker, M. ve Sattler, C.** (2014). Exploitation of thermochemical cycles based on solid oxide redox systems for thermochemical storage of solar heat. Part 1: Testing of cobalt oxide-based powders. *Solar Energy*, 102, pp. 189-211.

**Ahmadi, L., Fowler, M., Young, S. B., Fraser, R. A., Gaffney, B. ve Walker, S. B.** (2014). Energy efficiency of Li-ion battery packs re-used in stationary power applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 8, pp. 9-17.

**Akhil, A. A., Huff, G., Currier, A. B., Kaun, B. C., Rastler, D. M., Chen, S. B., ... Gauntlett, W. D.** (2013). *DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA*. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.

**Akinyele, D. O. ve Rayudu, R. K.** (2014). Review of energy storage technologies for sustainable power networks. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 8, pp. 74-91.

**Alva, G., Lin, Y. ve Fang, G.** (2018). An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, 144, pp. 341-378.

- Aneke, M. ve Wang, M.** (2015). Process analysis of pressurized oxy-coal power cycle for carbon capture application integrated with liquid air power generation and binary cycle engines. *Applied Energy*, 154, pp. 556-566.
- 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.
- Arcuri, P., Florio, G. ve Fragiaco, P.** (2007). A mixed integer programming model for optimal design of trigeneration in a hospital complex. *Energy*, 32, pp. 1430-1447.
- Arshad, A., Ali, H. M., Habib, A., Bashir, M. A., Jabbal, M. ve Yan, Y.** (2019). Energy and exergy analysis of fuel cells: A review. *Thermal Science and Engineering Progress*, 9, pp. 308-321.
- Asmus, P. ve Stimmel, C.** (2012). Utility Distribution Microgrids. Reseach Report. Boulder, CO: Pike Research.
- Azzuni, A. ve Breyer, C.** (2018). Energy security and energy storage technologies. *Energy Procedia*, 155, pp. 237-258.
- Backes, M., Idehen, I., Yardley, T. ve Panumpabi., P.** (2016). Off-grid Microgrid Development for Village of Katumbi in Tanzania. *North American Power Symposium (NAPS)*. Denver,CO, ABD.
- Barker, P., Johnson B. ve Maitra, A.** (2001). Investigation of the Technical and Economic Feasibility of Micro-Grid-Based Power Systems. Palo Alto, CA.: ERPI.
- Barnes, F. S. ve Levine, J. G.** (2011). *Large Energy Storage Systems Handbook*. New York, NY: CRCPress, Taylor&Francis Group.
- Barton, J. P. ve Infield, D. G.** (2004) Energy storage and its use with intermittent renewable energy. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(2), pp. 441-448.
- Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberglabe, A. ve Rosehart, W.** (2010). Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review. *Energy for Sustainable Development*, 14(4), pp. 302-314.

- BP** (2018). Statistical Review of Global Energy, Modern renewable energy consumption(ourworldindata.org/renewables)
- Brahman, F., Honarmand, M. ve Jadid, S.** (2015). Optimal electrical and thermal energy management of a residential energy hub, integrating demand response and energy storage system. *Energy and Buildings*, 90, pp. 65–75.
- Bukar, A. L. ve Tan, C. W.** (2019). A review on stand-alone photovoltaic-wind energy system with fuel cell: System optimization and energy management strategy. *Journal of Cleaner Production*, 221, pp. 73-88.
- Cabeza, L. F., Martorell, I., Miró, L., Fernández, A. I. ve Barreneche, C.** (2015). 1 - Introduction to thermal energy storage (TES) systems. L. F. Cabeza (Eds.), *Advances in Thermal Energy Storage Systems* (pp. 1-28). Erişim\_adresi: <https://www.sciencedirect.com/book/9781782420880/advances-in-thermal-energy-storage-systems#book-info>.
- Chauhan, A. ve Saini, R. P.** (2014). A review on integrated renewable energy system based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, pp. 99–120.
- Campbell, R. J.** (2012). Weather-Related Power Outages and Electric System Resiliency. Washington: Congressional Research Service.
- Cardenas, B. ve Leon, N.** (2013). High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, pp. 724-737.
- Cardoso, G., Brouhard, T., DeForest, N., Wang, D., Heleno, M. ve Kotzur, L.** (2018). Battery aging in multi-energy microgrid design using mixed integer linear Programming. *Applied Energy*, 231, p. 1059-1069.
- Casals, L. C., Garcia, B. A. ve Canal, C.** (2019a). Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis. *Journal of Environmental Management*, 232, pp. 354-363.

- Casals, L. C., Barbero, M. ve Corchero, C.** (2019b). Reused second life batteries for aggregated demand response services. *Journal of Cleaner Production*, 212, pp. 99-108.
- 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.
- Cheng, C., Su, C., Wang, P., Shen, J., Lu, J. ve Wu, X.** (2018). An MILP-based model for short-term peak shaving operation of pumped-storage hydropower plants serving multiple power grids. *Energy*, 163, pp. 722-733.
- Chung, M. ve Park, H.** (2015). Comparison of building energy demand for hotels, hospitals, and offices in Korea. *Energy*, 92, pp. 383-393.
- Cristiansen, 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.
- Cristiansen, 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.
- Cusenza, M. A., Guarino, F., Longo, S., Mistretta, M. ve Cellura, M.** (2019). Reuse of electric vehicle batteries in buildings: An integrated load match analysis and life cycle assessment approach. *Energy & Buildings*, 186, pp. 339-354.
- Del Pero, C., Aste, N., Paksoy, H., Haghghat, 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 Villafafila-Robles, R.** (2012). A review of energy storage technologies for wind power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), pp. 2154-2171.



- Divya, K. C. ve Ostergaard, J.** (2009). Battery energy storage technology for power systems—An overview. *Electric Power Systems Research*, 79(4), pp. 511-520.
- Driesen, J. ve Katiraei, F.** (2008). Design for distributed energy resources. *IEEE Power and Energy Magazine*, 6(3), pp. 30-40.
- Dufo-Lopez, R., Perez-Cebollada, E., Bernal-Agustin, J. L. ve Martinez-Ruiz, I.** (2016). Optimisation of energy supply at off-grid healthcare facilities using Monte Carlo simulation. *Energy Conversion and Management*, 113, pp. 321-330.
- Dünya Bankası (The World Bank)** (2016). Access to electricity (% of population). <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS>
- Dünya Bankası (The World Bank)** (2018). State and Trends of Carbon Pricing 2018.
- Fernandez, D., Pitie, F., Caceres, G. ve Baeyens, J.** (2012). Thermal energy storage: “How previous findings determine current research priorities”. *Energy*, 39(1), pp. 246-257.
- Fernandez, A. I., Martinez, M., Segarra, M., Martorell, I. ve Cabeza, L. F.** (2010). Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(10), pp. 1723-1729.
- Ferrer-Martí, L., Domenech, B., Garcia-Villoria, A. ve Pastor, R.** (2013). A MILP model to design hybrid wind-photovoltaic isolated rural electrification projects in developing countries. *European Journal of Operational Research*, 226(2), pp. 293–300.
- Gonzalez, A. G., Garcia-Sanz-Calcedo, J. ve Salgado, D. R.** (2018). Evaluation of Energy Consumption in German Hospitals: Benchmarking in the Public Sector. *Energies*, 11(9), pp. 1-14.
- Grirate, H., Zari, N., Elamrani, I., Couturier, R., Elmchaouri, R., Belcadi, S. ve Tochon P.** (2014). Characterization of Several Moroccan Rocks Used as Filler Material for Thermal Energy Storage in CSP Power Plants. *Energy Procedia*, 49, pp. 810-819.

- Gruber, J. K. ve Prodanovic, M.** (2014). Two-stage optimization for building energy management. *Energy Procedia*, 62, pp. 346–354.
- GTM Research** (2016). US Microgrid Tracker Q3.
- Gulagi, A., Bogdanov, D. ve Breyer, C.** (2017). A cost optimized fully sustainable power system for southeast asia and the pacific rim. *Energies*, 10(5), 583.
- Gupta, A. ve Bais, A. S.** (2017). Microgrid Market Growth Potential - Industry Size Outlook Report 2024 (Rapor No. GMI1187). Global Market Insights. <https://www.gminsights.com/industry-analysis/microgrid-market>
- Güney, M. Ş. ve Tepe, Y.** (2017). Classification and assessment of energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, pp. 1187-1197.
- Habib, A. H., Disfani, V. R., Kleissl, J. ve de Callafon, R. A.** (2017). Optimal switchable load sizing and scheduling for standalone renewable energy systems. *Solar Energy*, 144, pp. 707-720.
- Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A. ve Efthimiou, V.** (2009). Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, pp. 1513-1522.
- Hanna, R., Kleissl, J., Nottrott, A. ve Ferry, M.** (2014). Energy dispatch schedule optimization for demand charge reduction using a photovoltaic-battery storage system with solar forecasting. *Solar Energy*, 103, pp. 269–287.
- Hasan, N. S., Hassan, M. Y., Majid, M. S. ve Rahman, H. A.** (2013). Review of storage schemes for wind energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, pp. 237-247.
- Hernandez, J. C., Ruiz-Rodriguez, F. J. ve Jurado, F.** (2013). Technical impact of photovoltaic-distributed generation on radial distribution systems: Stochastic simulations for a feeder in Spain. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 50, pp. 25-32.

- Heymans, C., Walker, S. B., Young, S. B. ve Fowler, M.** (2014). Economic analysis of second use electric vehicle batteries for residential energy storage and load-levelling. *Energy Policy*, 71, pp. 22–30.
- Hirsch, A., Parag, Y. ve Guerrero, J.** (2018). Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, pp. 402-411.
- Ho, W. S., Macchietto, S., Lim, J. S., Hashim, H., Muis, Z.A. 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.
- Hu, S. C., Chen, J. D. ve Chuach, Y. K.** (2004). Energy Cost And Consumption In A Large Acute Hospital. *International Journal on Architectural Science*, 5(1), pp. 11-19.
- IEA (International Energy Agency)** (2017). Energy Access Outlook 2017. <https://www.iea.org/energyaccess/database/>
- IEA (International Energy Agency)** (2018a). Global EV Outlook 2018. Erişim\_ adresi: [http://centrodeinnovacion.uc.cl/assets/uploads/2018/12/global\\_ev\\_outlook\\_2018.pdf](http://centrodeinnovacion.uc.cl/assets/uploads/2018/12/global_ev_outlook_2018.pdf).
- IEA (International Energy Agency)** (2018b). Mobility Model. Erişim adresi: <https://www.iea.org/topics/transport/mobilitymodelpartnership/> .
- IEA (International Energy Agency)** (2018c). World Energy Balances 2018.
- 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.
- 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.

- İbrahim, H., Ilınca, A. ve Perron, J.** (2008). Energy storage systems— Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5), pp. 1221-1250.
- 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.
- Jiao, N. ve Evans, S.** (2016). Business models for sustainability: the case of second-life electric vehicle Batteries. *Procedia CIRP*, 40, pp. 250-255.
- JSSR- Javed Siddique Strategic Research** (2016). Microgrids. Industry Report. New York.
- Kenward, A. ve Raja, U.** (2014). Blackout: Extreme Weather, Climate Change and Power Outages. Princeton: Climate Central.
- Khaligh, A. ve Li, Z.** (2010). Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(6), pp. 2806 – 2814.
- Kim, W., Shin, J., Kim, S. ve Kim, J.** (2017). Operation scheduling for an energy storage system considering reliability and aging. *Energy*, 141, pp. 389-397.
- Koç, İ. M., Erhan, K., Aktaş, A., Özdemir, E. ve Özdemir, Ş.** (2015). Akıllı şebeke standartlarında enerji depolama uygulamalarının incelenmesi. *Konferans: 6. Enerji Verimliliği, Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi, Sakarya, Türkiye*. Haziran 2015.
- Kondziella, H. ve Bruckner, T.** (2016). Flexibility requirements of renewable energy based electricity systems – A review of research results and methodologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 10–22.
- Koohi-Kamali, S., Tyagi, V. V., Rahim, N. A., Panwar, N. L. ve Mokhlis, H.** (2013). Emergence of energy storage technologies as the solution for

reliable operation of smart power systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, pp. 135-165.

**Koshizuka, N., Ishikawa, F., Nasu, H., Murakami, M., ..... Tomita, M.** (2003). Progress of superconducting bearing technologies for flywheel energy storage systems. *Physica C: Superconductivity*, 386, pp. 444-450.

**Kousksou, T., Bruel, P., Jamil, A., El Rhafiki, T. ve Zeraouli, Y.** (2014). Energy storage: Applications and challenges. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 120, pp. 59-80.

**Kumar, A., Khan, M. Z. U. ve Hussain, D. M. A.** (2018). Microgrids Technology: A Review Paper. *Gyancity Journal of Electronics and Computer Science*, 3(1), pp. 11-20.

**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 Plante and His Invention of the Lead-Acid Battery - The genesis of the first practical rechargeable battery. *Journal of Power Sources*, 195, pp. 4424-4434.

**Laing, D., Bahl, C., Bauer, T., Lehmann, D. ve Steinmann, W.** (2011). Thermal energy storage for direct steam generation. *Solar Energy*, 85(4), pp. 627-633.

**Lesko, M., Bujalski, W. ve Futyma, K.** (2018). Operational optimization in district heating systems with the use of thermal energy storage. *Energy*, 165, pp. 902-915.

**Li, G.** (2016). Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, pp. 897-923.

**Linden, D. ve Reddy, T. B.** (2001). *Handbook Of Batteries*. New York, NY: McGraw-Hill.

- Little, M., Thomson, M. ve Infield, D.** (2007). Electrical integration of renewable energy into stand-alone power supplies incorporating hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(10-11), pp. 1582-1588.
- Liu, E. ve Bebic, J.** (2008). Power system planning: emerging practices suitable for evaluating the impact of high-penetration photovoltaics. New York: National Renewable Energy Laboratory.
- Liu, W., Li, N., Jiang, Z., Chen, Z., Wang, S., Han, J., Zhang, X. ve Liu, C.** (2018). Smart Micro-grid System with Wind/PV/Battery. *Energy Procedia*, 152, pp. 1212-1217.
- Lopes, J. A. P., Madureira, A. G. ve Moreira, C. C. L. M.** (2013). A view of microgrids. *WIREs Energy Environ*, 2(1), pp. 86–103.
- 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.
- Luo, Z., Gu, W., Wu, Z., Wang, Z. ve Tang, Y.** (2018). A robust optimization method for energy management of CCHP microgrid. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 6(1), pp. 132-144.
- Madlener, R. ve Kirmas, A.** (2017). Economic viability of second use electric vehicle batteries for energy storage in residential applications. *The 8th International Conference on Applied Energy – ICAE2016. Energy Procedia*, 105, pp. 3806 – 3815.
- Mahlia, T. M. I., Saktisahdan, T. J., Jannifar, A., Hasan, M. H. ve Matseelar, H. S. C.** (2014). A review of available methods and development on energy storage; technology update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, pp. 532-545.
- 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.

- McCarl, B. A. ve Spreen, T. H.** (2013). *Applied Mathematical Programming Using Algebraic Systems*. Erişim adresi:  
<http://agecon2.tamu.edu/people/faculty/mccarlbruce/mccspr/thebook.pdf>
- Minkel, J. R.** (2008, 13 Ağustos). The 2003 Northeast Blackout--Five Years Later. *Scientific American*. Erişim adresi:  
<https://www.scientificamerican.com/article/2003-blackout-five-years-later/>
- Moradi, M.H.ve Eskandari, M.** (2014). A hybrid method for simultaneous optimization of DG capacity and operational strategy in microgrids considering uncertainty in electricity price forecasting. *Renewable Energy*, 68, pp. 697-714.
- 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.
- Mortaz, E. ve Valenzuela, J.** (2017). Microgrid energy scheduling using storage from electric vehicles. *Electric Power Systems Research*, 143, pp. 554-562.
- Myles, P., Miller, J., Steven, K. ve Grabowski, T.** (2011). *430.01.03 Electric Power System Asset Optimization*. Morgantown, WV: National Energy Technology Laboratory.
- Naish, C., McCubbin, I., Edberg, O. ve Harfoot, M.** (2007). Outlook of energy storage technologies. Brüksel: Avrupa Parlementosu, Policy Department Economic and Scientific Policy.
- Navigant Research** (2014). Microgrid Deployment Tracker 4Q2014.
- Navigant Research** (2016). Microgrid Deployment Tracker 4Q2016.
- Navigant Research** (2017). Microgrid Deployment Tracker 2Q2017.

- Neubauer, J. ve Pesaran, A.** (2011). The ability of battery second use strategies to impact plug-in electric vehicle prices and serve utility energy storage applications. *Journal of Power Sources*, 196, pp. 10351– 10358.
- Newman, D.** (2015). Right-Sizing the Grid. *Mechanical Engineering*, 137(01), pp. 34-39.
- Nguyen, T. ve Savinell, R.F.** (2010). Flow Batteries. *The Electrochemical Society Interface*, 19(3), pp. 54-56.
- Nikolaidis, P. ve Poullikkas, A.** (2017). A comparative review of electrical energy storage systems for better sustainability. *Journal of Power Technologies*, 97(3), pp. 220-245.
- Nottrott, A, Kleissl, J. ve Washom, B.** (2013). Energy dispatch schedule optimization and cost benefit analysis for grid-connected, photovoltaic-battery storage systems. *Renewable Energy*, 55, pp. 230– 240.
- Omu, A., Hsieh, S. ve Orehounig, K.** (2016). Mixed integer linear programming for the design of solar thermal energy systems with short-term storage. *Applied Energy*, 180, pp. 313-326.
- Pan, X., Niu, X., Yang, X., Charnollet, N. ve Zheng, D.** (2016). Robust scheduling for microgrid energy management optimization. China International Conference on Electricity Distribution, CIGRE. pp.10-13.
- Pardo, P., Deydier, A., Anxionnaz-Minvielle, Z., Rouge, S., Cabassud, M. ve Cognet, P.** (2014). A review on high temperature thermochemical heat energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, pp. 591–610.
- Pazouki, S., Haghifam, M. R. ve Moser, A.** (2014). Uncertainty modeling in optimal operation of energy hub in presence of wind, storage and demand response. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 61, pp. 335–345.
- Pousinho, H. M. I., Silva, H., Mendes, V. M. F., Pereira, M. ve Cabrita, C. P.** (2014). Self-scheduling for energy and spinning reserve of wind/CSP plants by a MILP approach. *Energy*, 78, pp. 524–534.



- Rammelberg, H. U., Osterland, T., Priehs, B., Opel, O. ve Ruck, W. K. L.** (2016). Thermochemical heat storage materials – Performance of mixed salt hydrates. *Solar Energy*, 136, pp. 571-589.
- 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.
- Sabillon, C., Franco, J. F., Rider, M. J. ve Romero, R.** (2018). Joint optimal operation of photovoltaic units and electric vehicles in residential networks with storage systems: A dynamic scheduling method. *Electrical Power and Energy Systems*, 103, pp. 136-145.
- Sağlık Bakanlığı Özel Hastaneler Yönetmeliği. (2002).** T. C. Resmi Gazete, 24708, 27 Mart 2002.
- Samantara, A. K. ve Ratha, S.** (2018). Components of Supercapacitor. In: *Materials Development for Active/Passive Components of a Supercapacitor*. Singapur: Springer.
- Sciacovelli, A., Vecchi, A. ve Ding, Y.** (2017). Liquid air energy storage (LAES) with packed bed cold thermal storage – From component to system level performance through dynamic modelling. *Applied Energy*, 190, pp. 84-98.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R. ve Buddhi, D.** (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), pp. 318-345.
- Skea, J. ve Nishioka, S.** (2008). Policies and practices for a low-carbon society. Modelling long-term scenarios for low carbon societies. In: Strachan N, Foxon T, Fujino TJ, editors. *Climate Policy*, vol. 8, pp. 5–16.
- Suberu, M. Y., Mustafa, M. W. ve Bashir, N.** (2014). Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, pp. 499-514.

- 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, pp. 30–35.
- Talent, O. ve Du, H.** (2018). Optimal sizing and energy scheduling of photovoltaic-battery systems under different tariff structures. *Renewable Energy*, 129, pp. 513-526.
- 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.
- Torres, D., Crichigno, J., Padilla, G. ve Rivera, R.** (2014). Scheduling coupled photovoltaic, battery and conventional energy sources to maximize profit using linear programming. *Renewable Energy*, 72, pp. 284–290.
- 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.
- Ufluoğlu, E. E.** (2018). *Ana sisteme bağlı bir mikro şebeke için gün içi elektrik piyasasına dayalı çizelgeleme* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- U.S. Energy Information Administration** (2015). Annual Energy Outlook with projections to 2040. U.S. Energy Information Administration Washington DC
- Van de Ven, J. D. ve Li, P. Y.** (2009). Liquid piston gas compression. *Applied Energy*, 86(10), pp. 2183-2191.
- Varkani, A. K., Daraeepour, A. ve Monsef, H.** (2011). A new self-scheduling strategy for integrated operation of wind and pumped-storage power plants in power markets. *Applied Energy*, 88(12), pp. 5002–5012.
- Wang, W. ve Lu, Z.** (2013). Cyber security in the Smart Grid: Survey and challenges. *Computer Networks*, 57, pp. 1344–1371.
- Weinstock, I.B.** (2002). Recent advances in the US Department of Energy’s energy storage technology research and development programs for hybrid

electric and electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 110(2), pp. 471-474.

**Weitzel T. ve Glock H. C.** (2018). Energy management for stationary electric energy storage systems: A systematic literature review. *European Journal of Operational Research*, 264(2), pp. 582-606.

**Williams, N. J., Jaramillo, P., Taneja, J. ve Ustun, T. S.** (2015). Enabling private sector investment in microgrid-based rural electrification in developing countries: a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 52, pp. 1268–1281.

**Willis, H. L. ve Schrieber, R. R.** (2017). *Aging Power Delivery Infrastructures* (2nd ed.). Boca Raton, FL.: CRC Press/Taylor & Francis.

**Wu, Z., Tazvinga, H. ve Xia, X.** (2015). Demand side management of photovoltaic battery hybrid system. *Applied Energy*, 148, pp. 294–304.

**Yang, Z., Zhang, J., Kintner-Mayer, M. C. W., Lu, X., Choi, D., Lemmon, J. P. ve Liu, J.** (2011). Electrochemical Energy Storage for Green Grid. *Chemical Reviews*, 111(5), pp. 3577-3613.

**Young, K., Wang, C., Wang, L. Y. ve Strunz, K.** (2013). Electric Vehicle Battery Technologies. In R. Garcia-Valle ve J.A.P. Lopes (Eds.), *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*. New York, NY: Springer Science+Business Media.

**Yuan, W.** (2011). *Second-generation high-temperature superconducting coils and their applications for energy storage*. Londra: Springer-Verlag London.

**Zakeri, B. ve Syri, S.** (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 569-596.

**Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza, L. F. ve Mehling, H.** (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), pp. 251-283.

**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.

**Zhao, Y., Lu, Y., Yan, C. ve Wang, S.** (2015). MPC-based optimal scheduling of grid connected low energy buildings with thermal energy storages. *Energy and Buildings*, 86, pp. 415–426.

**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, W. H., Zhu, Y., Davis, Z. ve Tatarchuk, B. J.** (2013). Energy efficiency and capacity retention of Ni–MH batteries for storage applications. *Applied Energy*, 106, pp. 307-313.

**Url-1**<<https://www.lazard.com/media/450337/lazard-levelized-cost-of-energy-version-110.pdf>>, Erişim tarihi: 21.04.2019

**Url-2**< <http://www.gravitypower.net>>, Erişim tarihi: 21.02.2019.

**Url-3**<<http://makinatek.com.tr/uncategorized/168-aksa-jenerator-jeneratorlerin-devreye-girme-suresini-8-saniyeye-indirdi/>>, Erişim tarihi: 16.04.2019.

**Url-4**<[https://timesofindia.indiatimes.com/india/21-die-in-Hyderabad-govt-hospital-staff-blame-power-cut/articleshow/53359874.cms\\_](https://timesofindia.indiatimes.com/india/21-die-in-Hyderabad-govt-hospital-staff-blame-power-cut/articleshow/53359874.cms_)>, Erişim tarihi: 13.03.2019

**Url-5**<<http://www.newindianexpress.com/states/andhra-pradesh/2017/jun/23/20-die-during-12-hr-power-cut-at-kurnool-hospital-in-andhra-pradesh-1619975--1.html>>, Erişim tarihi: 13.03.2019

**Url-6**<<https://www.standardmedia.co.ke/article/2001282254/three-die-after-power-outage-at-hospital>>, Erişim tarihi: 13.03.2019

**Url-7**<<https://www.iol.co.za/news/south-africa/limpopo/patient-died-because-of-outage-1920295>>, Erişim tarihi: 13.03.2019

## **EKLER**

**Ek A.** Geliştirilen model için EXCEL SOLVER VBA kodları

**Ek B.** Modelin Excel Solver programındaki ekran görüntüleri





**EK A:** Geliştirilen model için EXCEL SOLVER VBA kodları.

Sub Hesapla()

' Değişken hücrelerin tanımlanması

Dim cell1 As String

Dim cell2 As String

Dim cell3 As String

Dim cell4 As String

Dim cell5 As String

Dim cell6 As String

Dim cell7 As String

Dim cell8 As String

Dim cell9 As String

Dim cell10 As String

Dim cell11 As String

Dim cell12 As String

Dim cell13 As String

Dim bos As String

Dim bos1 As String

Dim aaa As Integer

' Tekrar sayısı:

For i = 1 To 8760

  bos = Trim(Str(i))

'Sütunların tanımlanması:

cell7 = "I" + bos 'Şebeke fiyatı sütunu

cell8 = "A" + bos 'Talep sütunu

cell9 = "M" + bos 'Boşaltım miktarı sütunu

cell10 = "B" + bos 'Güneş ışınması miktarı sütunu

cell11 = "F" + bos 'Kritik yük miktarı sütunu

cell12 = "K" + bos 'SoC sütunu

cell13 = "Y" + bos 'Dolum kriteri sütunu

' Amaç Fonksiyonu:

Range("AC6").Value = Range(cell7).Value

Range("AD6").Value = Range(cell7).Value + 0.003

' Talep Kısıtı:

Range("AF7").Value = Range(cell8).Value

' Batarya Boşaltım Kısıtı:

Range("AF8").Value = Range(cell9).Value

' PV Enerji Üretim Kısıtı:

Range("AF9").Value = Range(cell10).Value \* 275 \* 0.12

' Kritik Yük Kısıtı:

Range("AF10").Value = Range(cell11).Value - Range(cell12).Value \* 0.998

' PTF Batarya Dolum Şartı:

Range("AF11").Value = Range(cell13).Value \* 100 - Range(cell12).Value \*  
Range(cell13).Value

Range("AB11").Value = Range(cell13).Value \* 0.9481

Range("AD11").Value = Range(cell13).Value \* 0.9481

Range("AE11").Value = Range(cell13).Value \* 1.050526



' Solver Kısıtların Eşitliklerin ve Eşitsizliklerinin Tanımlanması:

SolverReset

'Non-negativite kısıtı:

SolverAdd cellRef:=Range("\$AA\$12:\$AE\$12"), relation:=3, formulaText:=0

'Batarya kısıtı:

SolverAdd cellRef:=Range("\$AH\$10"), relation:=3, formulaText:="\$AF\$10"

'Batarya fiyat dolumu kriteri:

SolverAdd cellRef:=Range("\$AH\$11"), relation:=2, formulaText:="\$AF\$11"

'Talep kısıtı:

SolverAdd cellRef:=Range("\$AH\$7"), relation:=2, formulaText:="\$AF\$7"

'Deşarj kısıtı:

SolverAdd cellRef:=Range("\$AH\$8"), relation:=1, formulaText:="\$AF\$8"

'PV kısıtı:

SolverAdd cellRef:=Range("\$AH\$9"), relation:=1, formulaText:="\$AF\$9"

SolverOk                      SetCell:=Range("\$AH\$6"),                      MaxMinVal:=2,

ByChange:=Range("\$AA\$12:\$AE\$12")

SolverSolve True

cell1 = "Q" + bos

cell2 = "R" + bos

cell3 = "S" + bos

cell4 = "T" + bos

cell5 = "U" + bos

cell6 = "V" + bos

' Her saat için elde edilen verilerin kaydedilmesi:

Range(cell1).Value = Range("AA12").Value

```
Range(cell2).Value = Range("AB12").Value
```

```
Range(cell3).Value = Range("AC12").Value
```

```
Range(cell4).Value = Range("AD12").Value
```

```
Range(cell5).Value = Range("AE12").Value
```

```
Range(cell6).Value = Range("AH6").Value
```

```
' Her saat sonunda değişkenlerin sıfırlanması
```

```
Range("AA12").Value = 0
```

```
Range("AB12").Value = 0
```

```
Range("AC12").Value = 0
```

```
Range("AD12").Value = 0
```

```
Range("AE12").Value = 0
```

```
Next
```

```
End Sub
```

**Ek B.**

	A	B	C	D	E	F	H	I	J	K	L	M
1												
2												
3												
4	Talep	PV	Krtik Yükleler				Fiyat		Hesaplamalar			
5	D(t)	r (W/m2)	Dicu	Dres	Dsur	Dcrit	PTF	Ppur (TL/kwh)	Ech	Scot	npv*Apv*r(t)	(Soct-bsaf)*ndis
6	240,511926	0	8,8	2,7	0	11,5	89,42	0,08942	0	100	0	71,1075
7	235,9961834	0	8,8	2,7	0	11,5	89,64	0,08964	0	25,0997	0	14,344715
8	235,4263356	0	8,8	2,7	0	11,5	69,63	0,06963	0,024263	11,5	0	1,424996131
9	227,131693	0	8,8	2,7	0	11,5	44,04	0,04404	91,76564	11,5	0	1,425
10	227,4157561	0	8,8	2,7	0	11,5	17,62	0,01762	0	96,983	0	82,63385043
11	228,7121168	0	8,8	2,7	0	11,5	27,63	0,02763	0	93,77203	0	79,58343229
12	234,6240726	0	8,8	2,7	0	11,5	56,88	0,05688	0	87,35652	0	73,48869594
13	248,0989932	0,002	8,8	2,7	0	11,5	36,29	0,03629	91,76568	11,49998	0,088	1,424978387
14	235,6346486	0,02	8,8	2,7	7,8	19,3	62,8	0,0628	0	96,98305	0,88	82,63389361
15	205,7288293	0,048	8,8	2,7	7,8	19,3	118,08	0,11808	0,040738	19,29998	2,112	8,834977871
16	207,8670498	0,005	8,8	2,7	7,8	19,3	90,81	0,09081	0,040713	19,3	0,22	8,835
17	208,06159	0,003	8,8	2,7	7,8	19,3	107,36	0,10736	0,040713	19,3	0,132	8,835
18	208,3783634	0,048	8,8	2,7	7,8	19,3	116,89	0,11689	0,040713	19,3	2,112	8,835
19	208,7106311	0,04	8,8	2,7	7,8	19,3	119,96	0,11996	0,040713	19,3	1,76	8,835
20	205,7615396	0,012	8,8	2,7	0	11,5	125,05	0,12505	0	19,3	0,528	8,835
21	205,7649828	0,004	8,8	2,7	7,8	19,3	125,09	0,12509	8,251242	11,5	0,176	1,424997784
22	204,957555	0,004	8,8	2,7	7,8	19,3	199,99	0,19999	0,040713	19,3	0,176	8,835
23	204,7389125	0	8,8	2,7	7,8	19,3	210	0,21	0,040713	19,3	0	8,835
24	204,5202699	0	8,8	2,7	7,8	19,3	196,13	0,19613	0,040713	19,3	0	8,835
25	207,7103847	0	8,8	2,7	0	11,5	199,99	0,19999	0	19,3	0	8,835

**Şekil B.1** : Modelin Excel Solver programındaki ekran görüntüleri

	Q	R	S	T	U	V	X
1							
2							
3							
4	Sonuçlar					OPTİMUM DEĞER	Tasarruf/ Zarar
5	Epvd	Epvb	Egd	Egb	Edch		
6	0	0	169,4	0	71,108	16,78361627	4,72296
7	0	0	223,1	0	12,898	20,29518682	0,859511
8	0	0	235,43	0,0243	0	16,394498	-0,00176
9	0	0	225,71	91,766	1,425	14,28955332	-4,28667
10	0	0	224,54	0	2,8719	4,022516413	-0,01545
11	0	0	222,78	0	5,9284	6,291867174	0,027449
12	0	0	162,58	0	72,042	10,90464026	2,440777
13	0	0	246,67	91,766	1,425	12,59004826	-3,58654
14	0	0	161,87	0	73,762	11,86212147	2,935734
15	2,0713	0,0407	203,66	0	0	24,20007171	0,092388
16	0,1793	0,0407	207,69	0	0	18,87608788	0,000319
17	0,0913	0,0407	207,97	0	0	22,33731787	0,000174
18	2,0713	0,0407	206,31	0	0	24,2674203	0,089927
19	1,7193	0,0407	206,99	0	0	24,95752378	0,079404
20	0,528	0	197,85	0	7,3881	24,94851366	0,781967
21	0	0,176	205,76	8,0752	0	26,78669942	-1,04756
22	0,1353	0,0407	204,82	0	0	40,97519951	0,014262
23	0	0	204,74	0,0407	0	43,00384348	-0,00867
24	0	0	204,52	0,0407	0	40,12066772	-0,00811
25	0	0	200,32	0	7,3881	40,23237852	1,307621
26	0	0	211	0,0243	0	36,41055662	-0,00426
27	0	0	197,77	0,0243	0	24,73818795	-0,00311
28	0	0	196,28	0,0243	0	22,37844767	-0,00284

**Şekil B.2** : Modelin Excel Solver programındaki ekran görüntüleri

	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH
1									
2									
3									
4									
5		Epvd	Epvb	Egd	Egb	Edch			
6	OF	0,072	0,075	0,21001	0,21301	0,023		47,66989	
7	Const. 1	1	0	1	0	1	226,9062	226,9062	
8	Const. 2	0	0	0	0	1	8,79833	0	
9	Const. 3	1	1	0	0	0	0	0	
10	Const. 4	0	0,9481	0	0,9481	-1,05053	0,077123	0,077123	
11	Kriter	0	0	0	0	0	0	0	
12	Sonuçlar	0	0	226,9062	0,081345	0			
13									
14									
15									
16									
17									
18									

Şekil B.3 : Modelin Excel Solver programındaki ekran görüntüleri

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Denizhan Güven

**Doğum Tarihi ve Yeri** : 19.10.1989 Kadıköy

**E-posta** : guvende@itu.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU:

**Lisans** : 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşa ve Deniz Bilimleri  
Fakültesi, Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Bölümü