

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**AKILLI EVLERDE PV BAĞLANTILI KÜÇÜK DEPOLAMA
ÜNİTESİNİN UZUN DÖNEM KISITLARINA GÖRE
ÇALIŞMASININ OPTİMİZASYONU**

**Hazırlayan
Kürşat TANRIÖVEN**

**Danışman
Prof. Dr. Ferhat DALDABAN**

Doktora Tezi

**Ağustos 2021
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**AKILLI EVLERDE PV BAĞLANTILI KÜÇÜK DEPOLAMA
ÜNİTESİNİN UZUN DÖNEM KISITLARINA GÖRE
ÇALIŞMASININ OPTİMİZASYONU
(Doktora Tezi)**

**Hazırlayan
Kürşat TANRIÖVEN**

**Danışman
Prof. Dr. Ferhat DALDABAN**

**Ağustos 2021
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı : Kürşat TANRIÖVEN

İmza :

YÖNERGEYE UYGUNLUK

“Akıllı Evlerde PV Bağlantılı Küçük Depolama Ünitesinin Uzun Dönem Kısıtlarına Göre Çalışmasının Optimizasyonu” adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Kürşat TANRIÖVEN

Danışman

Prof. Dr. Ferhat DALDABAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla bana daima yol gösteren, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ferhat DALDABAN’a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bu meşakkatli süreçte bana sabır göstererek her zaman yanımda olup bana destek olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



Kürşat TANRIÖVEN
Kayseri, Ağustos 2021

AKILLI EVLERDE PV BAĞLANTILI KÜÇÜK DEPOLAMA ÜNİTESİNİN UZUN DÖNEM KISITLARINA GÖRE ÇALIŞMASININ OPTİMİZASYONU

Kürşat TANRIÖVEN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi, Ağustos 2021

Danışman: Prof. Dr. Ferhat DALDABAN

ÖZET

Elektrik enerjisi üretiminde azalan karbon bazlı fosil kaynakların alternatifi olarak görülen yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim, tüm dünyada artmaktadır. Özellikle fotovoltaiik santrallere; azalan kurulum maliyetleri, kurulum kolaylığı, işletme giderinin olmaması gibi nedenlerden dolayı yönelim fazladır. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının düzensiz enerji üretimi ve değişen/gelişen piyasa ve şebeke yapısında depolama ünitelerinin kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Gelişen piyasa yapısında tüketiciler değişerek üretüketici haline gelmektedirler. Artık fiyatın uygun olduğu zamanlarda ellerindeki enerjiyi satmakta, fiyatın uygun olmadığı zamanlarda şebekeden kullanılmaktadırlar. Ancak fiyatın her iyi olduğu zamanda batarya grubunun deşarj edilmesi kimyasal depolama ünitelerinden olan lityum-iyon bataryaların sürekli şarj-deşarj döngüsüne girip yaşam sürelerinin azalmasına neden olmaktadır. Düşük derin deşarj, batarya ömrünü uzatırken yüksek derin deşarj batarya ömrünü azaltmaktadır. Bu çalışmada bataryanın kurulum ve işletim maliyetinin değişen elektrik şebeke piyasa yapısı içerisinde ömür optimizasyon problemi ele alınmıştır.

Depolama ünitelerinin kısa vadeli karar süreci için uzun vadeli tahmin stratejisi geliştirilmiştir. Üç aşamalı karar destek sürecinde; ilk aşamada depolama ünitesinin ve fotovoltaiik santralin kısıtları belirlenmiş, ikinci aşamada kısa dönem çalışma stratejisinde olasılıksal yaklaşım ile fotovoltaiik santralin, günlük, mevsimsel elektrik üretimi ve piyasa fiyatının değişken yapısı tahminlemesi üzerine Monte Carlo Metodu ile senaryolar geliştirilmiştir. Geliştirilen çok fazla sayıda senaryolardan, senaryo indirgeme metodu kullanılarak daha az senaryo yapısı ile karar verme süreci elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Depolama ünitesi, batarya ömrü, akıllı ev.

OPTIMIZATION OF LONG TERM CONSTRAINTS OF PV CONNECTED SMALL STORAGE UNIT IN SMART HOMES

Kürşat TANRIÖVEN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

PhD Thesis, August 2021

Supervisor: Prof. Dr. Ferhat DALDABAN

ABSTRACT

The tendency towards renewable energy sources, which is seen as an alternative to the decreasing carbon-based fossil resources in electricity production, is increasing all over the world. Especially for photovoltaic power plants; The tendency is high due to reasons such as decreasing installation costs, ease of installation and no operating expenses. However, the irregular energy production of renewable energy sources and the use of storage units in the changing/developing market and network structure have made it mandatory. In the developing market structure, consumers change and become producers. Now they sell the energy they have when the price is appropriate and use it from the grid when the price is not suitable. However, discharging the battery group whenever the price is good causes the lithium-ion batteries, which are one of the chemical storage units, to enter into a continuous charge-discharge cycle and reduce their lifetimes. Low deep of discharge increases battery life while high deep of discharge decreases battery life. In this study, the life optimization problem of the battery's installation and operating costs within the changing electricity grid market structure is discussed.

A long-term prediction strategy has been developed for the short-term decision process of storage units. In the three-stage decision support process; In the first stage, the constraints of the storage unit and the photovoltaic plant were determined. In the second stage, scenarios were developed using the Monte Carlo Method on the estimation of the variable structure of the daily, seasonal electricity generation and market price of the photovoltaic power plant with the probabilistic approach in the short-term strategy. Decision making process with less scenario structure was obtained by using the scenario reduction method from the many scenarios developed.

Keywords: Storage unit, battery life, smart grid.

İÇİNDEKİLER

AKILLI EVLERDE PV BAĞLANTILI KÜÇÜK DEPOLAMA ÜNİTESİNİN UZUN DÖNEM KISITLARINA GÖRE ÇALIŞMASININ OPTİMİZASYONU

	Sayfa
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	ii
KABUL VE ONAY	iii
ÖNSÖZ	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	x
TABLolar	xii
ŞEKİLLER.....	xiii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

ELEKTRİK PİYASASI VE ŞEBEKESİNİN GELİŞİMİ/DEĞİŞİMİ

1.1. Literatür Taraması	4
1.2. Elektrik Şebekesi ve Piyasasının Kuruluşu	10
1.3. Elektrik Piyasasının Devletleştirilmesi	10
1.4. Elektrik Piyasasında Tekel Yapının Oluşması.....	11
1.5. Elektrik Piyasasını Düzenleme Çalışmaları	13

2. BÖLÜM

DAĞITIK ÜRETİM SANTRALLERİ

2.1. Dağıtık Üretim Santrallerinin Avantajları.....	20
2.2. Dağıtık Üretim Santrallerinin Dezavantajları	25
2.3. Akıllı Şebeke ve Microgrid Yapısı.....	28

3. BÖLÜM

ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

3.1. Depolama Sistemlerinin Avantajları.....	30
3.2. Depolama Sistemlerinin Ekonomik Yönden Avantajları.....	31
3.3. Enerji Depolama Sistemleri	32
3.3.1. Kinetik Enerji Volan	33
3.3.2. Pompaj Hidroelektrik Santraller	34
3.3.3. Basınçlı Hava Enerji Depolama Sistemi.....	34
3.3.4. Hidrojen Yakıt Hücresi.....	35
3.3.5. Kapasitör ve Süperkapasitörler	36
3.4. Bataryalar	38
3.4.1. Kurşun Asit Bataryalar	40
3.4.2. Nikel Bazlı Bataryalar.....	40
3.4.3. Sodyum-Sülfür Bataryalar	41
3.4.4. Lityum İyon Bataryalar	42
3.5. Li-İon Batarya Ömür Göstergeleri	47
3.6. Bataryaların Durumunu Gösteren Parametreler SoC, DoD, SoH.....	48
3.6.1. Derin Deşarj (DoD).....	48
3.6.2. Sağlık Durumu (SoH).....	49
3.6.3. C Oranı	50

4. BÖLÜM

SİSTEM MİMARİSİ VE MONTE CARLO SİMÜLASYON METODU

4.1. Monte Carlo Metodu	55
4.2. Veri ve Senaryo	61
4.3. Uzun Süreli Operasyon Değerlendirmesi	65
4.4. Kısa Dönem Operasyon için Karar Verme	68

5. BÖLÜM

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

5.1. Sonuç ve Değerlendirme.....	75
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ.....	88

KISALTMALAR VE SİMGELER

<u>Sembol/Kısaltma</u>	<u>Anlamı</u>
t	Dizin Kümesi
IT	Zaman Kümesi
ω	Senaryo Endeksi
β	Fiyat esnekliği
ψ	Fiyat dengesi
Buy	Piyasadan satın almak için üst simge
min	Alt limitler için indis
max	Üst limitler için indis
PV	Fotovoltaik
SD	Depolama ünitesi için indis
DÜ	Depolama Ünitesi
+, -	Şarj/Deşarj durumu indisi
a, b, c	DÜ'nin ikinci dereceden bozunumu
DCSD	DÜ'nin maliyet bozunum fonksiyonu
E	Enerji kapasitesi
MOT	DÜ'nin maksimum işletim ömrü
P	Aktif güç
SoC	Depolama ünitesinin şarj durumu
T	Cihazın tam çalışması için gereken süre
η	Depolama birimi için dönüşüm verimliliği katsayısı
λ	Kilowatt fiyatı
α	Binary karar değişkeni
β	Fiyat esnekliği
ψ	Fiyat dengesi
EPİAŞ	Elektrik Piyasası Anonim Şirketi
EPDK	Elektrik Piyasası Düzenleme Kurumu

Li-ion	Lityum - iyon
DÜS	Dağıtık Üretim Santrali
EİEİ	Elektrik İşleri Etüt İdaresi
YİD	Yap, işlet, devret
YD	Yap, devret
NEM	Avustralya Ulusal Elektrik Piyasası
UNEP	Birleşmiş Milletler Çevre Programı
DC	Doğru akım
AC	Alternatif Akım
CAISO	Kaliforniya Bağımsız Sistem Operatörü
SCADA	Merkezi Denetleme Kontrol ve Veri Toplama
AMR	Otomatik Sayaç Okuma
MOMA:	Model Şehir Mannheim
PHS	Pompaj Hidro Santral
BHEDS	Basınçlı hava enerji depolama sistemi
UPS	Kesintisiz güç kaynağı
SES	Sabit enerji depolama sistemi
CC-CV	Sabit akım – Sabit gerilim
SoC	Şarj durumu
DoD	Derin deşarj
SoH	Sağlık durumu
SDP	Stokastik dinamik programlama
PSO	Parçacık sürü optimizasyonu
TOU	Zamana bağlı kullanım
PDF	Olasılık yoğunluk fonksiyonu
MCM	Monte Carlo Metodu

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Li-ion anod yaşlanmanın nedenleri, etkileri ve etkiledikleri	9
Tablo 2.1. Merkezi üretim- dağıtık üretimin karşılaştırması	19
Tablo 2.2. Akıllı Şebeke – Geleneksel Şebeke Karşılaştırması	29
Tablo 3.1. Enerji Depolama sistemlerinin karşılaştırılması	45
Tablo 3.2. 1Ah (1000 mAh) bataryaları şarj ederken ve boşaltırken C oranı ve servis süreleri	50
Tablo 3.4. Li-ion bataryaların yaşlanma nedenleri ve etkileri	51

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Swanson Yasasına göre PV panel fiyatlarının azalım trendi	24
Şekil 2.2. DÜS'lerin sayı ve kapasite artışına bağlı olarak oluşan "Ördek Etkisi Fenomeni	26
Şekil 3.1. Elektrik depolama sistemlerinin kullanım alanları	32
Şekil 3.2. Elektrik depolama sistemlerinin zamana bağlı kullanım alanları	33
Şekil 3.3. Volan yapısı	33
Şekil 3.4. Basınçlı hava enerji depolama sistemi	35
Şekil 3.5. Hidrojen yakıt hücresinin genel prensibi	36
Şekil 3.6. Süperkapasitör enerji depolama uygulaması	37
Şekil 3.7. Bataryanın genel yapısı.....	39
Şekil 3.8. Li-ion hücrelerin reaksiyonu.....	43
Şekil 3.9. Enerji depolama ünitelerinin güç cevap zamanı gösterimi	46
Şekil 3.10. Li-ion bataryanın çevrim sayısına bağlı DoD eğrisi	49
Şekil 4.1. PV bağlantılı bataryalı depolama sistemlerine entegre akıllı ev yapısı	53
Şekil 4.2. Önerilen sistemin akış şeması	54
Şekil 4.3. Durum tabanlı modelleme.....	55
Şekil 4.4. Monte Carlo Metodu akış şeması	58
Şekil 4.5. Normal ve ayrık dağılım	59
Şekil 4.6. Monte Carlo Metodu ile π sayısının hesaplama yaklaşımı	61
Şekil 4.7. Bu çalışmada dikkate alınan PDF'ler: a) Talep tahmini, elektrik fiyatı, PV üretimi için sürekli normal dağılım fonksiyonu; b) Mevsimsel profil için ayrık düzgün dağılım fonksiyonu; c) Günlük yük profili için ayrık düzgün dağılım fonksiyonu	63
Şekil 4.8. Senaryo indirgeme yapısı.....	64
Şekil 4.9. Senaryo üretim ve azaltım işlemi.....	65
Şekil 4.10. Mevsimsel günlük yük değişimi	69
Şekil 4.11. Günlük piyasa takas fiyatının değişimi.....	70
Şekil 4.12. DÜ'nin şarj-deşarj durumunun piyasa takas fiyatına göre değişimi.....	70
Şekil 4.13. DÜ'nin fiyat sapmasına bağlı değişimi.....	71
Şekil 4.14. Değişik günlük elektrik fiyatları ve DÜ yıllık tepe yüke göre %5 sapması durumunda kur	

Şekil 4.15. Değişik günlük elektrik fiyatları ve DÜ yıllık tepe yüke göre %25-30 sapması durumunda

Şekil 4.16. Depolama ünitesinin demanda göre kısa süreli çalışma durumu73

Şekil 4.17. Depolama ünitesinin fiyata göre kısa süreli çalışma durumu.....74



GİRİŞ

Modern yaşantımızda kullanılan cihazların içerisinde yer alan kablolar, canlı vücudunun içindeki damarlara benzetilirse, kablolardan akan elektrik akımı da kan akışına benzetilebilir. Doğada yalın haliyle yıllardır gözlemlenen elektrik enerjisi, üzerinde yapılan çalışmalarla gerilim değeri, akım sınırı, frekans ve güç sınırı üzerinde standartlar geliştirilerek piyasa yapısı içerisinde alınıp/satılan bir meta haline gelmiştir. Elektrik enerjisinin yoğun olarak fosil kaynaklara dayalı üretimi, beraberinde çevre problemlerini de oluşturmaya başlamıştır. Doğayı kirletmeyen kaynaklardan, enerji üretimi konusunda fosil yakıtların alternatifi görülen nükleer enerji santrallerinde yaşanan; Chernobly, Fukishima ve Three Mile Island kazaları meydana gelen ve gelebilecek güvenlik problemlerinin tehlikeli boyutunu göstermiştir. Nükleer enerjide kullanılan radyoaktif maddelerin, uzun süren tükenme ömür süresi nedeni ile depolama ve saklama problemleri de ortaya çıkmıştır. Almanya'nın liderliğinde başlayan yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimi, gelişen teknolojiye bağılı olarak akıllı şebeke yapısıyla desteklenmesi temiz, güvenli ve güvenilir kaynakların kullanımının önünü açmıştır.

Yenilenebilir kaynaklardan elektrik enerjisinin üretimi, kesintili ve düzensiz olması nedeniyle depolama sistemlerine entegre edilerek kullanımları, enerjiye ihtiyaç duyulması durumunda, anında arza sunulmasına imkan vermektedir. Elektrik enerjisinin kimyasal yollarla depolanması, yıllardır bilinen bir uygulama olup birçok çeşidi bulunmaktadır. Bunlardan en bilinenleri kurşun-asit ve son yıllarda geliştirilen ve yaygın olarak kullanılmaya başlanan Li-ion bataryalardır.

EPDK tarafından yayımlanan “Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliğı” ile ölkemizde elektrik sektörü paydaşlarından tüketiciler özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimi konusunda teşvik edilmiştir. Dünya uygulamalarında yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimine verilen teşvikler

bazı bölgelerde Ördek Etkisi Fenomeni'nin oluşmasına neden olup artık bu bölgelerde belirli saatlerde elektrik üretimi değil, elektrik tüketiminin teşvik edilmesi gündeme gelmektedir. Elektriğin ticari bir meta olarak alınıp satılması, elektrik borsasının oluşmasını sağlamıştır. Ülkemizde de EPIAŞ tarafından işletilen piyasa yapısında şu an için lisanslı tedarikçiler ve üreticiler işlem yapabilirken, bazı enerji piyasalarında tüm paydaşların işlem yapabileceği bir yapı kurulmaktadır. Diğer elektrik piyasası yapılarında arz ve talebin dengelenmesi mekanizmasında, tüketiciler artık sadece tüketim tarafında talep taraflı katılım olarak değil üretici olarak da katılım sağlamaktadır, kısaca tüketiciler üretüketici (prosumer) olarak adlandırılmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminde meydana gelen düzensizlik ve Ördek Etkisi Fenomeni'nin giderilmesi amacıyla, birçok avantajından dolayı tercih edilen depolama ünitelerinde Li-ion bataryaların kullanımı, en uygun çözüm olarak görülmektedir. Ancak Li-ion bataryaların özellikle derin deşarj oranına bakıldığında, 1000-10000 çevrim oranına sahip oldukları görülmekte olup Li-ion bataryaların şarj – deşarj durumlarının ömür süresi üzerine etkilerini belirlemektedir.

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üreten PV üretim birimine entegreli Li-ion bataryanın ömür optimizasyonu ele alınmıştır. Piyasa fiyatının durumuna bağlı olarak son tüketicilerin enerji alış/verişi yapabildiği mekanizmalar birçok piyasa yapısında yer almaktadır. Piyasa fiyatlarına göre yapılan alım/satım işlemleri ay sonunda fatura tutarında önemli bir azalmayı sağlamaktadır. Ancak depolama ünitelerinin her şarj/deşarj işlemi depolama ünitesinin ömründe azalmaya yol açmaktadır. Li-ion bataryaların kurulum maliyeti yüksek olmasına rağmen, işletme maliyetleri oldukça düşüktür. PV üretim sistemine entegre olan depolama ünitesi yapısının uzun süre işletmede kalması ve değişken olan piyasa fiyatlarının tahminlenmesi ile en ekonomik kârın optimizasyonu araştırılacaktır.

Tezin birinci bölümünde, Li-ion bataryaların ömür optimizasyonu üzerine yapılan literatür taraması ele alınmış. Sonrasında elektrik şebekesinin ve paralelinde elektrik piyasasının tarihsel gelişimi ele alınmıştır. Elektrik piyasasının dikey bütünleşik yapıya dönüşümü ardından tekel yapılarının dünyada başlayan de-regülasyon çalışmalarıyla yatay bütünleşik yapıya geçiş aşamaları anlatılmış. Buna paralel olarak düşük güçlü santraller, enterkonneksiyon sayesinde daha büyük santrallere evrilmiş ancak artan

evre problemleri nedeniyle yeniden micro grid yapısına dönüşüm aşamaları anlatılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde; dağıtık üretim ve akıllı şebeke yapısı ele alınmıştır. Dağıtık üretim santrallerinin, geleneksel üretim yapan şebekelere göre avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir. Şebeke entegrasyonunun akıllı şebeke ile kontrolü dağıtık üretimin daha da yaygınlaşacağı belirtilmiştir. PV ünitelerin bir microgrid gibi davranışı akıllı şebekelerde temel eleman olarak yer almalarını zorunlu hale getirmektedir.

Tezin üçüncü bölümünde; elektrik enerjisi depolama sistemleri, detaylı olarak enerji depolama ünitelerinin şebeke yapısı içerisinde kullanım alanları, ekonomiklik, kapasite ve cevap verme süreleri yönünden incelenmiştir. Fotovoltaik sistemler gibi kimyasal depolama olarak bataryaların yaygın olarak kullanımı, temin edilmelerinin kolay olması, basit yapıları, bakımsız olmaları gibi nedenlerden daha çok kabul gördüğü görülmüştür. Son yıllarda fiyat/performans açısından Li-ion bataryaların daha fazla tercih edildiği ve gelecekte daha yaygın kullanılacağı görülerek bu çalışmada Li-ion bataryalar ele alınmıştır.

Tezin dördüncü bölümünde; yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin ve gün içi dengeleme güç piyasasından oluşan üretim ve tüketim yönündeki fiyatların rastgeleliği dikkate alınarak olasılıksal (stokastik) çözüm yöntemi önerilmiş olup buna bağlı olarak PV bağlantılı Li-ion bataryaların kar/ömür optimizasyonu konusunda yeni metod önerilmiştir. Önerilen metoda göre elde edilen simülasyon çalışmasında Monte Carlo Simülasyon metodu uygulaması ve elde edilen sonuçlar verilmiştir. Tezden elde edilen sonuçlar “Journal of Modern Power Systems and Clean Energy” dergisinde “A Price-Elastic Approach for Optimal Scheduling of Small-Scale Storage Devices in Smart Houses with Short-term and Long-term Constraints” başlığı altında yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.

Tezin beşinci bölümünde elde edilen sonuçlar ve öneriler yer almaktadır.

1. BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI VE ELEKTRİK PİYASASI VE ŞEBEKESİNİN GELİŞİMİ/DEĞİŞİMİ

1.1. Literatür Taraması

Batarya ömür optimizasyonu konusunda gerçekleştirilen geçmiş çalışmalar üç kategoriye ayrılabilir:

Kategori 1: Kimyasal tip akülerde ilişkili DoD için önceden tanımlanmış bir değeri dikkate alan çalışmalar. Hesaplamayı basitleştirmesine rağmen, önemli miktarda batarya kapasitesi kullanılmamış durumdadır.

Kategori 2: Batarya DoD'sinde aşınma maliyetinin bağımlılığını dikkate alan çalışmalar. Bu tür modellerin doğruluğuna rağmen, bunları bir optimizasyon sürecine yerleştirmek, ilişkili maliyet fonksiyonu karmaşıklığı ve doğrusal olmama durumları nedeniyle bir zorluktur.

Kategori 3: DÜ'nin gelecekteki çalışma koşullarına ilişkin belirsizlikleri dikkate alan çalışmalar. Bu tür çalışmalar, belirsizlikler altında DÜ'lerin optimum programlanması için gösterge sağlar; ancak, temelde DÜ'ler için basit ama pratik zamanlama yöntemi vardır.

Bataryaların ömür optimizasyonu için yapılan bir çok çalışmada DoD değeri % 80 olarak sabit alınmıştır [1]. Bataryanın DoD değerine ömür aşınması maliyetinin bağımlılığını dikkate alan başka araştırmalarda bulunmaktadır. Yalnızca zaman aralıklarını gözardı etmek için yaşam süresi azalmasını dikkate alan ve diğer koşullar (çevre

şekli) için sabit ömür varsayan basit bir model öngörülmüştür [2]. Bununla birlikte, optimum işletim stratejisini belirlemek için, ayrıntılı batarya bozulma modellerini hesaba katmak esastır [3]. Yaşlanma ve yıpranma maliyeti, bataryanın bozulması fenomenini tanımlamak için tasarlanmış kavramlardır [4]. Fiziksel süreçleri yakalayan elektrokimyasal modeller, aşınma maliyetini hesaplamak için en doğru modellerdir; ancak, elektrokimyasal modellerin optimizasyon sürecine dahil edilmesi, yüksek düzeyde doğrusal olmama ve çeşitli parametrelere bağımlılık nedeniyle oldukça zordur [5]. Aküdeki bozulmayı enerji depolama işlemine yönelik bir model öngörücü kontrole dayalı yaklaşıma dahil etmek için açık bir maliyet fonksiyonu önerilmiştir [6]. Maliyet fonksiyonu, deşarj derinliği, şarj oranı ve şarj durumu açısından bozulmayı tanımlayan ikinci dereceden terimler içerir. Peukert Yasası, döngü ömrü ve DoD nedeniyle bozulmayı modellemek için [7] 'da kullanılmıştır. Birkaç sayısal modeli tek bir çok faktörlü batarya bozulma tahmin aracına dahil etmek için yeni bir çerçeve önerilmiştir [8]. Bu model aşırı sıcaklıkları, yüksek şarj ve deşarj oranlarını yakalar ve Li-ion akülerdeki bozulmayı hızlandırmak için yüksek ve düşük şarj durumlarına geçiş yapar. Bu tür modellerin doğruluğuna rağmen, bunları bir optimizasyon sürecine yerleştirmek, ilişkili maliyet fonksiyonunun karmaşıklığı ve doğrusal olmama durumları nedeniyle bir zorluktur.

DÜ'nin gelecekteki çalışma koşullarına ilişkin belirsizlikler nedeniyle, DÜ senaryo temelli yaklaşımların uzun vadeli çalışmasını değerlendirmek için kullanılmalıdır. Bu bağlamda, literatürde, DÜ'nin geri dönen değerini en üst düzeye çıkarmak için operasyonel stratejileri ele alan birkaç çalışma yapılmıştır. Stratejiler genellikle gelecekteki talebe ve faydalı fiyat tahminlerine bağlıdır [9], [10]. DÜ'lerin işleyişini optimize etmek için stokastik dinamik programlama (SDP) tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir [11]. Yenilenebilir kaynakların belirsizliklere maruz kalan optimum üretim ve depolama çizelgeleme problemi için sezgisel bir yöntem önerilmiştir [12]. Bu tür çalışmalarda, belirsizlikler altında DÜ'lerin optimum programlanması için bir gösterge sağlasa da, DÜ'ler için basit ama pratik zamanlama yöntemi hala tartışılmaktadır. Buna ek olarak, DÜ operasyonunun uzun vadeli ve kısa vadeli operasyon kısıtlamaları, hem kısa vadeli hem de uzun vadeli bakış açılarından optimum operasyon modeline ulaşmak için iyi koordine edilmelidir.

Li-ion bataryaların takvim ömrü hesaplaması için yapılan 16 değişik senaryonun uygulandığı deneylerde sıcaklığın ve kullanım zamanının aküde performans azalmasını hızlandırdığı görülmüştür [13]. PV bağlantılı akülü sistemlerin karlılık açısından ekonomik getirisinin belirlenmesinde batarya ömrünün, kullanıldığı bölgedeki tarife yapısı göz önüne alınarak araştırılmıştır [14]. Uygulama Avusturalya ve Almanya bölgelerinde lityum demir fosfat bataryanın daha önceden belirlenmiş deneysel ömür verileri kullanılarak yapılmıştır.

Yaptıkları çalışmada, akıllı bir ev bağlamında bir rüzgar üretim-batarya sisteminin optimum boyutunu belirlemek için stokastik bir yöntem önerilmiştir. Çözüm yaklaşımı üç aşamalıdır: İlk aşamada, bir hanehalkı çeşitli yük, üretim ve elektrik depolama türlerini ve şebeke ile ticaret gücünü etkin bir şekilde yönetebilen kural tabanlı bir elektrik yönetim sistemi kullanılmış. Bu sistemin zamanla değişen girdileri rüzgar hızı, üç yük kategorisi ve elektrik oranları olarak belirlenmiş. İkinci aşamada, planlama amacıyla, stokastik değişkenlerin günün her saati için bireysel beklenen olasılık dağılımları ile temsil edildiği bir optimizasyon problemi formüle edilmiş. Üçüncü aşamada önerilen hibrit Monte Carlo -PSO yaklaşımı kullanılarak, rüzgar jeneratörü ve bataryanın optimum boyutları elde edilmiş, böylece evin toplam elektrik maliyeti en aza indirilmiştir [15].

PV bağlantılı bataryalardan Li-demir fosfat bataryanın en uygun fotovoltaiik dizayn ve arada çevirici sistem olmadan şarj edilmesi için en verimli PV hücre sayısı araştırılmıştır [16]. PV bağlantılı batarya depolama sistemlerinin sabit akım – sabit gerilim şarj –deşarj prosedürleri bağlı bulundukları hatların teknik kayıplarını azaltacak yönde optimizasyonu sağlayacak genetik algoritma tabanlı matematiksel model önerilmiştir [17].

Fotovoltaiik panel ve enerji depolama sistemi ile donatılmış bir akıllı evde sadece bataryanın güneş enerjisine bağlı şarj-deşarj döngüsünün ayarlanmasının yanı sıra evde bulunan klimanın karışık tam sayı lineer programlama ile yönetim algoritması sunulmuştur [18]. Tarife yapısına bağlı olarak elde edilen gücü şebekeye geri göndermek için akıllı şebeke kabiliyetini kullanan gerçek zamanlı fiyat tabanlı bir planlama mekanizması tanıtılmıştır.

Doğrusal olmayan batarya özelliklerini, stokastik konut enerji talebini ve TOU elektrik fiyatlandırmasını göz önünde bulundurarak akıllı şebekedeki akıllı evlerin optimum enerji depolama yönetimi problemi araştırılmıştır [19]. Araştırmada akıllı konutun kullanımının rastlantısal değişimini tanımlayan Homojen Olmayan Gizli Markov Model ve bataryanın doğrusal olmayan özelliklerini dikkate alan optimum depolama yönetimi önerilmiştir.

Li-ion akünü ömür hesaplamasında detaylı kimyasal ve elektrokimyasal etkiler analiz edilmiştir [20]. Li-ion bataryanın ömrünü belirlemede oluşturulan modeli doğrulamak amacıyla 0°C-55°C arasında 0-100 DoD derinliğinde 300 gün süren çalışma gerçekleştirilmiştir. Model de %1,4 kapasite hatası, % 15 batarya iç direnç hatası elde edilse de 7 yıllık ömür konusunda gerçeğe yakın sonuç vermektedir. DoD değerinin %54 seviyesinde kalması durumunda Li-ion bataryanın ömrü 10 yıl olarak belirlenmiştir [21].

PV bağlantılı akülü depolama sisteminde pahalı olan bataryanın ekonomik boyutlamasını sağlayacak net enerji sayacı verileri üzerinde kümeleme analizi yapmak için sezonsal verilerin korelasyonu uygulanmıştır [22]. Li-ion bataryanın şarj durumu tahmin modellemesinde açık devre gerilimi de parametrelendirilmiştir. Geleneksel açık devre gerilim parametrelendirilmesinde %10 hata yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmada Kalman Filtresi ile ölçeklendirme yöntemi önerilmiş olup sonuçlar 25 °C ila 50 °C arasında değişen 16 farklı sıcaklıkta dokuz farklı batarya hücresinden toplanan veriler üzerinde hatanın %1 seviyesine düştüğü gösterilmiştir [23].

Li-ion bataryalar içinde yer alan hücrelerin aşırı şarj veya deşarj durumlarında meydana gelen aşırı güç aşımalarının hücre bozumuna, hatta patlamalara yol açmasını engellemek amacıyla güvenli çalışma alanı belirlenmiştir [24]. Güvenli çalışma alanı belirlenirken hücre gerilim, hücre akımı, SoC, hücre gücünü içeren Thevenin modeli geliştirilmiştir. Modelde omik direncin polarizasyon parametresinin hassasiyetini iyileştirmek için optimum zaman sabiti hesaplamasında Genetik Algoritma kullanılmıştır. Sonuçlar hem deneysel hem de simülasyon ortamında test edilmiş olup %2 simülasyon hassasiyeti içerisinde kaldığı görülmüştür [24].

Bu çalışmada 140 W gücünde PV sisteme entegre kurşun asit ve Li-ion bataryaların enerji maliyetleri, fayda maliyet oranları ve basit net bugünkü değerleri hesaplanmıştır [100]. Hesaplamalar neticesinde kurşun asit bataryaların kurulum maliyeti düşük olsa da Li-ion bataryaların yüksek enerji yoğunluğu, düşük bakım ve kullanım ömürleri yönünden daha üstün olduğu görülmüştür [25].

Bataryaların ömür tahminlemesi için geçmişte uygulanan elektromekanik ve kimyasal testler analiz edilerek test prosedürü geliştirilmiştir [26]. Bataryaların yıpranması Tablo 1.1’de detaylı olarak gösterilmiştir.

Bu çalışmada önemsiz olmayan voltaj / akım döngüsü testlerinden temel bir elektrokimya tabanlı batarya modelinin model parametrelerinin tanımlanmasına ve ardından çevriminin izlenmesine dayanan bir yaşlanma tanı aracı için çerçeveyi sunmaktadır. Ayrıca batarya bozunumunun aşağıdakileri içeren ancak sınırlandırılmayan faktörlerle hızlandırdığı tespit edilmiştir. Bunlar: döngü sıklığı, şarj durumunda büyük değişiklik (SoC), hem şarj hem de deşarj sırasında büyük akım büyüklükleri, yüksek sıcaklıklar ve yüksek voltaja maruz kalmadır [27].

Bu referans çalışmada micro şebekelerde yer alan batarya depolama sistemleri için geçmişte kullanılan ve DoD, SoC, amper saat, güç gibi tek faktörleri içeren yarı deneysel modeller yerine elektrokimyasal olarak tüm bileşenleri içeren yeni bir model önerilmiştir. 5 farklı model PSO ile analiz edildiğinde yeni önerilen modelin %0,15 saptığı görülmüştür [28].

Tablo 1.1. Li-ion bataryaların yaşlanma nedenleri ve etkileri

Yaşlandırma işlemi (Stres faktörü)	Pozitif sistemin korozyonu	Zor/geri dönülemez sülfatlaşma	Dökülme (Malzeme kaybı)	Su kaybı / kuruma	Aktif madde azalması (Yüzey azalması)	Elektrolit tabakalaşma
Düşük durumda uzun süreli şarj	Düşük asit konsantrasyonu ve düşük potansiyeller sayesinde dolaylı.	Güçlü bir pozitif korelasyon: Düşük SOC'de daha uzun süre hızlanır zor / geri döndürülemez sülfatlaşma	Doğrudan etkisi yoktur	Hayır	Hayır	Endirekt etki. Daha uzun süre daha yüksek sülfasyona yol açar ve böylece tabakalaşmayı etkiler.
Ah işlem hacmi	Etki yoktur	Doğrudan etkisi yoktur	Mekanik zorlama etkisi vardır.	Doğrudan etkisi yoktur	Aktif malzeme yüzeyinin kaybı, daha büyük kristaller.	Güçlü bir pozitif korelasyon: daha yüksek Ah çıkışı, daha yüksek tabakalaşmaya yol açar.
Şarj faktörü	Güçlü bir dolaylı etki, çünkü yüksek bir şarj faktörü ve aşırı bir şarj, yüksek bir şarj voltajı (elektrotun yüksek polarizasyonu) ile ilişkilidir.	Negatif korelasyon, sülfatlaşma riskini azaltan yüksek şarj faktörlü rejimler yoluyla etki	Gazlanma yoluyla güçlü etki	Güçlü etki	Doğrudan etkisi yok	Güçlü bir pozitif korelasyon: daha yüksek şarj faktörü, daha düşük tabakalaşmaya yol açar
Ful şarj arasında zaman	Güçlü negatif korelasyon: daha kısa süre korozyonu artırır	Güçlü pozitif korelasyon: Sık sık tam şarj, sert / geri dönüşü olmayan sülfasyonu azaltır	Negatif korelasyon, zamanın azalmasıyla artar.	Negatif korelasyon	Doğrudan etkisi yok	Güçlü bir pozitif korelasyon: daha yüksek Ah çıkışı, daha yüksek tabakalaşmaya yol açar
Sıcaklık	Güçlü etki, pozitif korelasyon	Yüksek sıcaklık, bataryanın tam olarak şarj edilmesine yardımcı olur (daha fazla sülfat şarj edilebilir). Öte yandan, yüksek sıcaklık, düşük SOC'de daha sert sülfata yol açar.	Doğrudan etki yoktur	Sıcaklığın artışı ile artar	Düşük etkili yüksek sıcaklık, negatif elektrot genişleticileri bozar	Doğrudan etki yoktur

1.2. Elektrik Şebekesi ve Piyasasının Kuruluşu

İnsanlığın elektrik ile etkileşimi, varoluşundan günümüze kadar devam etmektedir. İnsanlık, elektrik enerjisini tabiatta yıldırım, şimşek, statik elektrik gibi yalın halinde görüp açıklayamadığı bu ısıltılı yıkıcı güce, Zeus'un mızrağı gibi tanrısal yakıştırmalarda bulunmuştur [29]. Çağlar boyunca gizemini koruyan elektrik enerjisi; Benjamin Franklin, Charles Angustin de Coulomb, Allesandro Volta, Hans Christian Oersted, Andre Marie Ampere, Michael Faraday ve bu alanda birçok bilim adamının yaptığı çalışmalarla anlaşılması sağlanmış olup Thomas Alva Edison ve Nicola Tesla'nın yaptığı çalışmalarla da günlük yaşantımızda birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır [30]. Modern anlamda Edison tarafından 1882 yılında, New York, Pearl Sokağında ilk üretim ve dağıtım tesisin kurulması ile elektrik enerjisi artık ticari bir meta haline dönüşmüştür [31]. Elektrik enerjisi saklanamayan bir enerji türü olduğundan üretildiği andan itibaren saniyenin onda biri kadar bir zamanda tüketilmektedir [60]. Bu işlemin gerçekleşmesi esnasında, üretim ve tüketimin eş zamanlı olması ve bu işlem esnasında gerilim, frekans, faz sırası gibi parametrelerin dengesinin gözetilmesi gerekmektedir [61]. Ülkemizde ilk elektrik üretimi ve kullanımı, Tarsus ilçesinde su değirmenine bağlı olarak hidroelektrik potansiyel yoluyla elektrik üretimi 2 kW'lık bir generatör ile 1902 yılında başlamıştır [62].

Elektrik enerjisi kullanımı, ilk zamanlarda daha çok aydınlatma alanında olmuş, elektriğin kullanımı zenginliğin ve gücün göstergesi olarak görülmüştür. Elektrik enerjisi küçük bölgesel santrallerde değişik kaynaklardan (kömür, petrol, su) üretilerek değişik fiyatlandırmalar ile kullanıcıların hizmetine sunulmuştur.

1.3. Elektrik Piyasasının Devletleştirilmesi

Dünya genelinde kamunun elektrik piyasalarını düzenleme çalışmaları 1920-1930'lu yıllarda başlamıştır. Bu yıllarda, hükümetler tarafından elektrik enerjisinin kullanımı lüks tüketimden ziyade günlük yaşamın vazgeçilmez bir parçası olarak görülmüştür. Bunun sonucu olarak devletler tarafından mülkiyeti ve finansmanı kamuya ait büyük güçlü hidro elektrik santraller yapılmaya başlanmıştır ve elektrik kullanımının kırsal hayatı kapsayacak şekilde şebeke genişletme elektrifikasyon planları ele alınmıştır [63].

Elektriğin kamuya mâl edilmesinin diğer unsurları, “kısa dönem yeterli yedek kapasitenin bulundurulması (arz güvenilirliği), uzun dönemde de gerekli ve yeterli yatırımların yapılmasıdır (kaynak yeterliliği)” olmasıdır [60].

Elektrik piyasası yapısı ilk kuruluşundan günümüze kadar değişik birçok aşamadan geçmiştir. Sektörde ilk yatırımlar özel sektör eliyle oluşmuş, talebin artışına ve elektrik enerjisinin yaygın kullanımına bağlı olarak öncelikle mahali idareler olan belediyelerce bu hizmet başlatılmış, daha sonra gelişen teknolojiye bağlı olarak yüksek güçlü ekonomik santrallerin yapılmasıyla ada şeklindeki bölgesel şebekeler enterkonnekte ağına dahil edilerek ulusal şebeke yapıları kurulmuştur. Elektrik enerjisinin yaygın olarak kullanılmaya başlanmasıyla birim maliyetinde düşüş de yaşanmaya başlanmıştır [64]. Maliyetler hakkında genel bir fikir vermek gerekirse; İngiltere’de üretimin elektrik enerjisi fiyatındaki maliyet payı % 65 iken, iletim % 20, dağıtım % 10 ve arz ise % 5’ tir [63]. Elektrik enerjisinin özellikle sanayii ve haberleşme alanında kullanıma başlanması stratejik bir ürün haline gelmesine ve özel sektör eliyle yürütülemeyecek büyük boyutlu projeler nedeniyle elektrik piyasa ve şebeke yapısının merkezi hükümetler tarafından yürütülmesi zorunlu hale gelmiştir [63]. Ülkemizde de özel sektör eli ile başlatılan elektrifikasyon hizmetleri; belediyelere elektrik üretim ve dağıtım tesisi kurma ve işletme yetkisini veren “Belediyeler Kanunu” ile 1933 yılında başlamıştır. Ülke genelinde merkezi planlama ve hizmetlerde gerekli teknik ve yasak düzenlemeleri yapmak için “Elektrik İşleri Etüt İdaresi” (EİEİ) 1935 yılında kurulmuştur. II nci Dünya Savaşı yıllarında ülkemizde elektrik işi ile iştigal eden yabancı sermayeli ve imtiyazlı yabancı ortaklıklı şirketler devletleştirilmiş ancak 1926 yılında kurulan ilk yerli özel sermayeli “Kayseri ve Civarı Elektrik Türk A.Ş.” devletleştirilmeyerek imtiyazına devam etmiştir [37]. Kayseri ve Civarı Elektrik Türk A.Ş.’ni diğer özel sektör ve belediye katılımcıları takip etmiştir.

1.4. Elektrik Piyasasında Tekel Yapının Oluşması

II. Dünya Savaşı sonrasında Avrupa’da başlayan akım ile devletler, elektrik enerjisi sektörünün “doğal bir tekel yapısı” olduğu kabulüyle tüm üreticilerin ulusal düzeyde veya bölgesel olarak bir tek yapı altında birleştirilmesi yönünde çalışmalara başlamışlardır. Tekelci yapının, piyasaya zarar vermemesi ve kamu yararının

gözetilmesi açısından mülkiyetinin ve işletilmesinin kamuya ait olması gerektiği öngörülmüştür. Avrupa’da, 1946 yılında ilk olarak Fransa’da (Electricite De France) EDF’in kurulması ile başlayan kamu tekeli süreci; İtalya’da ENEL’in kurulması ile 1962 yılında tamamlanmıştır. Avrupa’da ülkeler elektrik sektörünün doğal tekel olduğu öngörüsüyle, çıkardıkları kanunlarla elektrik sektörünü denetim altına almış ve genel rekabet piyasa koşullarından uzak tutmuştur [37]. Ülkemizde de: dağınık halde bulunan bölgesel üretim ve dağıtımın Avrupada olduğu gibi bir tek yapının altında toplanarak “elektriğin üretimi, iletimi, dağıtımı ve ticaret faaliyetlerinin” bir bütün olarak kamu otoritesinin kontrolüne alınması amacıyla (1963-1967) yıllarını kapsayan “İkinci Beş Yıllık Kalkınma Planı” çerçevesinde karar alınmıştır. Bu plan kapsamında Türkiye Elektrik Kurumu (TEK) 15.07.1970 tarih ve 1312 sayılı kanunla kurulmuştur [38]. Yani elektrik sektöründe dikey bütünleşik yapı (tekel), ülkemizde de kurulmuştur.

Dünya genelinde bölgesel elektrik üretim ve dağıtım hizmetinin özel sektör eliyle yapılmaya başlaması, zaman içerisinde devletlerin bu hizmeti kamu hakkı gibi görüp, yapılan düzenlemeler ve kamu yatırımlarıyla tekel dikey bütünleşik yapıya dönüşmesini sağlamıştır. Elektrik enerjisinin sanayii ve günlük yaşantıda stratejik bir ürün olması ve üretim, iletim, dağıtım, tedarik hizmetleri faaliyetlerinin maliyetinin yüksek olmasından dolayı hükümetlerin elektrik pazarını tarihsel süreçte doğrudan kontrol ettikleri bir pazar haline getirmiştir [39].

20-25 yıl öncesine kadar elektrik hizmeti, dikey olarak bütünleşik kamusal veya özel tekeller tarafından sunulmuştur. Yani, elektrik üretimi, iletimi, dağıtımı ve nihai tüketicilere perakende sunumu bir tek şirketin çatısı altında yerine getirilmiştir. Bu dikey bütünleşik tekelci yapıda, elektrik arz ve talebinin, her an birbirine eşit olması ve bu arada iletim kısıtlarına da uyulması zorunluluğundan kaynaklanan koordinasyon sorunları birer mühendislik problemi olarak çözülmüştür. Sistem operatörü, talebin devinimine ve iletim kısıtlarına göre en ucuz santrallerden en pahalısına kadar üretim birimlerini devreye almakta, ani talep dalgalanmalarına merkezi bir biçimde karşılık verilmiştir. Sistemin ne kadar yedek kapasiteye ihtiyacı olduğu hesaplanmıştır, bu kapasiteyi bulundurmamak ise sadece bir finansman sorununa indirgenmiştir. Sonuç olarak dikey bütünleşik yapı, bir komuta sistemi olarak yönetilebilmiştir [61].

Ancak dikey yapılanmada çapraz sübvansiyonlar yaşanmasından dolayı rekabetçi bir piyasa oluşmamıştır. Dikey ayrıştırma aynı pazarda faaliyet gösteren teşebbüslerin ayrımcılık yapmasını ve/veya çapraz sübvansiyonu engellemesi açısından önemlidir [40].

Doğal tekel piyasalarının regülasyona tabi tutulmasının en önemli gerekçesi, toplumsal refahı olumsuz etkilemesi yönündedir. Doğal tekel ortaya çıktığı sektörlerde üretilen mal ve hizmetlerin kolay ikame edilemeyen ve temel ihtiyaç niteliği taşıyan mal ve hizmetler (elektrik, gaz, telekomünikasyon vb.) olması nedeniyle talep esnekliklerinin düşük oluşu, tekelin yüksek fiyat uygulamasına neden olmuştur [38].

1.5. Elektrik Piyasasını Düzenleme Çalışmaları

Gelişmiş ülkelerde elektrik piyasası reformu, piyasanın ekonomik ve finansal performansını arttırmayı amaçlamıştır. Gelişmekte olan ülkelerde ise, elektrik reformuna götüren etkenler; elektrik sektöründe maliyetlerin yüksek olması, arz güvenliğinin tehlikede olması, kamu kesiminin artan enerji talebini karşılayacak yatırımları gerçekleştirmede sorunlar yaşaması, reform sürecini başlatmış bazı ülkelerin başarı sağlamış olmaları, reform sonrası maliyet ve fiyatları düşürücü etkilerin varlığı olmuştur [38].

1980’lerde Şili’de “Chicago Boys” olarak adlandırılan iktisatçıların etkisi ile başlayan ve ardından İngiltere, Galler, Norveç, Arjantin, Avustralya, İspanya ve ABD’nin Çeşitli eyaletlerinde elektrik endüstrisinde piyasa odaklı yaklaşımlara geçiş yaşanmıştır [38, 39].

Her ülke değişik şekillerde özelleştirme sürecini uygun görmüştür. Bu süreçler;

- Yeniden yapılanma: piyasanın “serbestleştirilmesi” değil, piyasa katılımcılarının (düzenleyiciler ve kurumlar dâhil) rollerini yeniden düzenlemek,
- Serbestleşme: Rekabetçi (alt) pazarlar elde etmek amacıyla yeniden yapılanmanın eş anlamlısı,
- Kurumsallaşma: Devlete ait kurumların özel kurumlar gibi davranmasını sağlamak,
- Özelleştirme: Devlete ait varlıkları özel paydaşlara satmak,

- Deregölasyon: Sektöre özgü düzenlemenin kaldırılması veya azaltılması, ancak rekabetçi pazarlar için bazı yanlış düzenlemelerin giderilmesi için bazı düzenlemelere halen ihtiyaç vardır [41].

Türkiye elektrik piyasasında dikey bütünleşik yapıda meydana gelen ilk değişiklik, 3 Eylül 1982 tarih ve 2705 sayılı Kanun ile gerçekleşmiştir. Bu kanun ile Türkiye’de elektrik santrali kurma yetkisine sahip olan “Türkiye Elektrik Kurumu” ve “Devlet Su İşleri”nin dışında özel sektörün elektrik santrali kurmasına ve ürettiği elektriği “Türkiye Elektrik Kurumu”na satmasına olanak sağlanmışır [38].

Ülkemizde elektrik talebinin anlık karşılanamaması beraberinde; YİD, YD gibi özel sektör üreticilerinin piyasaya al yada alma öde koşullu, doğalgazın yakıt olarak kullanıldığı santrallerin kurulmasına neden olmuştur. Bu santraller tarafından üretilen elektriğin birim bedeline döviz bazında alım garantisi getirilmiş, enerji için harcanan kaynak bütçede her yıl büyük oranlar tutmaya başlamıştır. Artan maliyetler, dikey bütünleşik yapıda diğer hizmet kalemlerinin aksamasına neden olmuş, artık özel sektörün piyasaya katılımı kaçınılmaz hale gelmiştir. Dünya genelinde başlayan elektrik sektöründeki yapısal reform, Avrupa Birliği Uyum Programı kapsamında 20 Şubat 2001’de Türkiye Büyük Millet Meclisi’nde kabul edilen 4628 sayılı “Elektrik Piyasası Kanunu” (EPK) ile Türkiye’de elektrik sektörünün örgütlenme ve faaliyet biçiminin radikal bir biçimde değiştirilmesi hedeflenmiştir [61]. EPK, elektrik piyasalarında rekabetin gelişmesi için önemli uluslararası düzeyde kabul edilen üç önemli yenilik getirmiştir. Bunlardan birincisi dikey ayrıştırma olup buna göre; üretim, iletim ve dağıtım varlıkları birbirlerinden ayrıştırılmışır. Dağıtım ve üretim varlıkları ayrışmadan sonra özelleştirilecek, iletim ise devlet mülkiyetinde kalmaya devam edecektir. İkinci yenilik, gerek talep, gerek arz tarafında serbestleşme öngörölmüştür. Arz tarafında, piyasada öngörölen çeşitli faaliyetlere katılmak isteyenler, belirli şartları yerine getirmeleri koşulu ile EPDK’dan lisans alabilmiştir. Talep tarafında ise, tüketimi belli bir sınırın üstünde olan tüketiciler tedarikçilerini serbestçe seçebilme hakkına kavuşmuştur. Üçüncü yenilik, sisteme bağlanmak isteyen katılımcıların erişim haklarının sağlanması ve düzenlemeye tabi tutulmuş olmalarıdır [61].

Elektrik piyasalarında başlayan yapısal reformun yanında dünya genelinde başlayan çevreci aktiviteler yenilenebilir enerjiye yönelmeyi hızlandırmıştır. Dünyada artan elektrik üretimi ve beraberinde çevre problemlerini de getirmiştir. Enerji, küresel CO₂ emisyonlarının yüzde 80'inin fazlasından sorumludur. Özellikle üretim safhasına baktığımızda, dünya üretimi %38 artarken CO₂ emisyonunun %15 arttığı görülmektedir [42]. Küresel emisyonun yıllık artışı yaklaşık olarak 40 Giga ton'dur. Bilimsel çalışmalar dünyanın kritik iklim değişikliği aşamasına gelmeden kaldırabileceği emisyon miktarının azami 800 G ton olduğuna işaret etmektedirler [43].

Almanya tarafından 1992 yılında başlatılan, yenilenebilir enerji teşvikinin gösterdiği başarı ve dünyada artan çevreci hareketler beraberinde yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi hızlandırmıştır [44]. Elektrik enerjisine halen dünya nüfusunun %15'nin (1,1 Milyar insan) erişimi halen bulunmamaktadır [43]. Gelirlerde artış ve çoğu gelişmekte olan ekonominin ağırlıklı kentsel alanlarında olması, beklenen 1,7 milyarlık ek nüfusun, küresel enerji talebini 2040 yılına kadar %25'ten fazla arttıracığı öngörülmektedir [45]. Elektriğin özellikle güneş enerjisinden üretilmesi, panel ve invertör üretiminde azalan maliyetler, yenilenebilir kaynaklara yönelmeyi cazip hale getirmiştir. Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretim maliyetleri, dünya genelinde sürekli düşüş trendindedir. Güneş enerjisinden elektrik üretim maliyetleri son on yılda 0,371 \$/kWh seviyelerinden 0,085 \$/kWh'a ve rüzgar enerjisi maliyetleri 0,085 \$/kWh'dan 0,056 \$/kWh seviyelerine gerilemiştir [46].

Dünya genelinde ulusal iletim şebekelerinde yaşanan elektrik kesintileri, beraberinde milyonlarca insanın saatlerce olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır. Teknoloji boyutuna baktığımızda akıllı sistemler ve şebeke yapıları, aklımıza ilk gelenlerdir. Akıllı şebekeler (Smart Grid) ile elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtım aşamalarının tümü izlenmekte, kontrol edilmekte ve verimlilik açısından optimize edilmektedir. Gelişen teknolojiyle beraber, yenilenebilir enerji kaynaklarının yoğun olarak sisteme dâhil edildiği, sadece büyük enerji üreticileri değil, küçük boyutlu, hatta bireysel kullanıcıların da sistemin içerisinde yer aldığı, çok değişkenli/yönlü bir sistem kurgulanmaktadır [47]. Enerjiye olan bağımlılık arttıkça bir saniyelik enerji kesintisinin bile tahammül edilemeyeceği; sağlık, savunma sanayii gibi sektörlerde kendi kendilerine yeter microgrid yapılarının arayışına gidilmiştir [48]. Microgrid; müşteriye

özel ihtiyaçlarını karşılamak üzere tasarlanabilir; yerel güvenilirliği artırmak, besleyici kayıplarını azaltmak, yerel gerilimleri desteklemek, kullanım atık ısısı, voltaj düzeltmesi yoluyla daha fazla verimlilik sağlar veya birkaçını kesintisiz güç kaynağı işlevleri sağlar [49]. Microgrid yapıları gelişen yenilenebilir enerji kaynakları, depolama sistemleri, akıllı şebeke yapısı ve endüstri 4.0 kavramı ile hayata geçmeye başlamıştır. Elektrik kesintisi ve kalitesinde değişim olmaması, gereken uygulamalar için şebeke bağımsız çözümlerde özellikle güneş ve rüzgârdan elde edilen düzensiz elektrik enerjinin depolanarak, ihtiyaç halinde kullanılacak enerji depolama sistemleri üzerine çalışmalar başlamıştır.

Elektrik sektörünün yönetilmesinde, depolama sistemlerinin önemi artmıştır. Elektrik üretilebilecek kaynakların depolanması, elektrik depolanması anlamına gelmeyeceği göz önünde bulundurulmalıdır. Barajda su tutmak, doğal gaz depolamak veya kömür stoklamak elektrik depolamak değil enerji depolamaktır. Sonuçta, ihtiyaç duyulduğunda bu kaynaklar da yine üretim yolunu takip ederek elektrik enerjisine dönüşmek zorundadır. Örneğin, bir barajda 1000 MWh elektrik üretilebilecek su tutulmuşsa ve hidroelektrik santralin kurulu gücü 20 MW ise bir saat içinde bu 1000 MWh'lik enerji, elektrik enerjisine dönüştürülemez; bu santralden saatte alınabilecek elektrik 20 MWh ile sınırlıdır [60].

Elektrik enerjisinin depolanmasında kimyasal yöntemlerden biri olan bataryaların kullanılması yıllardır bilinmektedir. Günlük yaşantımızda çoğunlukla taşınabilir cihazlarda yer alan bataryalar hergün şebekeden şarj edilmektedir. Yenilenebilir kaynakların teşvik edilmesiyle şebekeye bağlı microgrid yapıları ortaya çıkmaktadır. Bu yapılar elektrik piyasasında; piyasa takas fiyatının düşük olduğu zamanlarda şebekeden enerji depolamak, fiyatın yüksek olduğu zamanlarda piyasaya geri satmak PV üretime bağlı olarak gerektiğinde bataryalarda depolamak veya bataryadan şebekeye satmak konusunda karar verici olmalıdır. Gelecekte microgrid yapıların yaygınlaşarak elektrik piyasası içerisinde üretüketici olarak gün öncesi piyasa, gün içi piyasası ve dengeleme güç piyasası içerisinde yer almaları beklenmektedir. Yan hizmetler, elektrik üretimi, iletimi, sistem kontrolü ve dağıtım sistemi ekipmanı ve insanlar tarafından kapasite oluşturma, enerji temini ve güç dağıtımı gibi temel hizmetleri desteklemek için gerçekleştirilen işlevlerdir. Yan hizmetlerin maliyetleri önemli olabilir, örneğin ABD'de

yan hizmetlerin toplam maliyeti yılda yaklaşık 12 milyar ABD dolarıdır. Avustralya Ulusal Elektrik Piyasası (NEM) için, yan hizmetlerin toplam maliyeti 130 milyon AUS veya toplam güç piyasası toplamının yaklaşık %5'i dir. Birçok dağıtılmış üretim yaklaşımı, tıpkı “geleneksel” üreticiler gibi ek bir gelir (ikinci gelir akışı) elde etmek için yan hizmet pazarına katılmayı amaçlamaktadır. Bununla birlikte, depolama üniteleri genellikle güvenilirlik ve kalitenin “doğru” seviyesini koruyabildiği gibi, aynı zamanda maliyet rekabeti olarak da görülmektedir [78]. Depolama ünitelerinin varlığı, dağıtık üretim santrallerinin yaygınlaşması ile daha da önem kazanmıştır.



2. BÖLÜM

DAĞITIK ÜRETİM SANTRALLERİ

Bir elektrik şebekesinden beklenen kaynak güvenliği ve ekonomik olmasıdır [51]. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin artan enerji talebi beraberinde iklim değişimlerine yol açan sera gazlarının artması, çevreyi koruma ve enerji verimliliğine olan ilginin artmasına neden olmuştur. Bu durum iki temel stratejiyi ön plana çıkarmıştır;

- Enerjide fosil kaynaklara olan bağımlılığı azaltmak için endüstri ve evsel kullanımlarda enerji verimliliğini sağlamak.
- Büyük ölçekli enerji santralleri yerine, elektrik tüketiminin olduğu noktalara yakın ve özellikle yenilenebilir kaynaklara dayalı dağıtık üretim santrallerinin kurulmasıdır [80].

Dünya genelinde enerji tüketimi değerlendirildiğinde; elektrik enerjisinin %33'lük kısmının üretimi, yenilenebilir olmayan kaynaklardan karşılanmaktadır [53]. Uluslararası enerji görünüm araştırmasına göre dünyanın enerji talebi 2030 yılına kadar %44 ve buna bağlı olarak %77 oranında enerji üretimi artacaktır. Bu üretimin %80'lik kısmının fosil kaynaklardan olacağı öngörülmektedir [54]. Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi üzerine yapılan araştırmada; Danimarka enerji sistemine eklenen kombine ısı çevrim tabanlı dağıtık üretim teknolojili sistemler, bir yılda sera gazını %30, CO₂ emisyonu %41 azalttığı görülmüştür [55]. Birleşmiş Milletler sponsorluğunda yapılan çalışmada gelecek yüzyılda dünya ısısının 5,8 °C artacağı öngörülmektedir. Aynı çalışmada 5 MW'lık PV enerji santralinin tesis edilmesi durumunda 335.455 Ton sera gazının önleneyeği hesaplanmıştır [54].

Dağıtık üretim santrallerinin şebekeye entegrasyon konsepti 1999 yılında ortaya çıkmıştır [84]. Avrupa Birliğinin 1990 yılı seviyesine göre %20 sera gazlarının azaltılması, %20

enerjinin yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi ve %20 enerji verimliliğinin sağlanmasını hedefleyen 20/20/20 programı uygulamaya konulmuştur [57].

Dağıtık üretim; “doğrudan dağıtım şebekesine veya elektrik sayacının tüketim tarafına bağlı bir güç kaynağıdır [58]” ve DÜ dağıtım şebekesi içine doğrudan yerleştirilmiş veya enerji tüketim noktalarının yakınında bulunan daha küçük kapasitelerde (geleneksel merkezi elektrik santrallerine kıyasla) güç generatörlerin den oluşan merkezi olmayan üretim tesisleridir [58]. Merkezi enerji üretim sisteminin yerine seçenek olarak genellikle yenilenebilir (güneş, rüzgar, hidroelektrik, jeotermal, biyokütle) ve yenilenemeyen kaynaklardan oluşan küçük ölçekli teknolojileri içerir [58]. Merkezi ve dağıtık üretim karşılaştırması Tablo 2.1. de gösterilmiştir.

Tablo 2. 1. Merkezi üretim- dağıtık üretimin karşılaştırması

Karşılaştırılan Yönler	Merkezi Üretim	Dağıtık Üretim
Üretim kapasitesi	Ekonomik boyutta 100MW-1000GW arasında	300 MW’dan küçük. Büyük 50MW-300 MW Orta 5MW-50MW Küçük 5kW – 5 MW Mikro 1kW-5kW
Teknoloji türü	Hidroelektrik, termik, nükleer	Yenilenmez: Dizel, gaz motorlu mikro türbin ve yanma türbini. Yenilenebilir: Güneş fotovoltaik, güneş termal, rüzgar, düşük düşülü hidroelektrik, biyokütle ve biogaz üretimi, jeotermal ve gelgit enerjisi.
Kurulum	Yükten uzakta, öncelikle fosil kaynağa ve su rezervuarlarına yakın.	Yüke yakın ve tüketicinin sistemine entegre.
Güç sistemine bağlantısı	Yüksek gerilim şebekesine bağlı.	On-grid DÜ; tüketici sistemine veya AG/OG dağıtım sistemine bağlı. Off-grid DÜ; Dağıtım sisteminden ayrı, tüketici sistemine veya micro grid sisteme bağlı.

2.1. Dağıtık Üretim Santrallerinin Avantajları

Dağıtık üretim tesislerinin avantajları şu şekilde sıralanabilir;

Enerji verimliliği: Dağıtık elektrik üretimi, geleneksel sistemdeki kayıplara (transformatörlerdeki bakır kayıpları, hat ve kablolarda meydana gelen enerji kayıpları) neden olmaz. Özellikle uzun iletim hatlarındaki kayıplar, puant güç talebinde oluşan daha yüksek kayıplar ve üretim sırasında atık olarak ortaya çıkan ısı enerjisi, dağıtık elektrik üretiminde yoktur [60].

Yakıt çeşitliliği: Sadece fosil yakıt kaynaklarına ve uranyum gibi yakıtlara bağımlı olan merkezi üretim sistemine göre dağıtık elektrik üretim sistemleri çok daha çeşitli enerji kaynağı ile işletilebilirler. Bunların arasında yine doğalgaz gibi fosil yakıtlarına ilave olarak güneş, rüzgâr, tarımsal atıklar, evsel organik atıklar, jeotermal kaynaklar sıralanabilir [60].

Tüketicilerin risklere karşı korunması: Serbest elektrik piyasalarında meydana gelen fiyat değişimleri ve spekülasyonlara karşı, kendi elektrik ihtiyaçları için dağıtık elektrik üretimi kullanan tüketiciler, bunu kullandıkları ölçüde bu risklere karşı korunurlar [60].

Esneklik: Dağıtık üretim sistemleri küçük ve kurulumları son derece hızlı oldukları için, serbest piyasalarda ortaya çıkan fiyat artışlarından kolaylıkla faydalanabilirler. Yerleşim yerlerinde yoğunluğun artması veya puant tüketimin artış göstermesi sonucu ortaya çıkacak marjinal elektrik ihtiyacı artışının karşılanması, ölçeklenebilir dağıtık üretim sistemleri ile kolay ve ucuz bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca planlama ve inşaları 5 ile 10 sene arasında yer alan merkezi güç santrallerindeki ilave risk maliyetleri de dağıtık üretim sistemlerinde yoktur [60].

Karbon salınımlarının azaltılması: Dağıtık elektrik üretiminde, birim enerji başına ortaya çıkan karbon salımı, doğalgaza dayalı kojenerasyonda geleneksel sistemlere göre daha az (yeni kömür bazlı termik santrallere göre % 40 daha az), fotovoltaik enerji gibi yenilenebilir enerjilerden yapılan üretimde sıfırdır [60]. Bu avantajlı durum mesken ağırlıklı bölgelerde DÜS kullanımını daha da kolaylaştırmaktadır [61].

Yöresel kalkınma: Çoğu dağıtık elektrik sistemi, yakın civarda mevcut bulunan yakıt kaynaklarını kullanır (örneğin biyo-kütle, belediye atıkları). İlavenen dağıtık üretim santrallerinin kurulumunun yapıldığı bölgelerde yeni iş olanakları oluşturur (örneğin binalarda fotovoltaiik panel montajı), daha sürdürülebilir bir kalkınma sağlanır [62].

Sinerjiler: Dağıtık elektrik üretim sistemleri birçok alanda sinerji yaratırlar. Güneş enerji sistemlerinin binalarda kullanılması sonucunda geleneksel yapı kaplama malzemelerinin yerine fotovoltaiik paneller geçmektedir. Organik atıklardan elektrik üretimi sonucunda ortaya çıkan işlenmiş atık çok değerli bir tarımsal gübredir. Kojenerasyon ile ortaya çıkan ısı enerjisi, bina ısıtılmasında, CO₂ ise seralarda kullanılabilir [62].

İlave şebeke yatırımlarına gerek duyulmaması: Hem gelişmiş ülkeler, hem de gelişmekte olan ülkelerde iletim ve dağıtım şebekeleri elektrik talebine karşı yetersiz kalmakta ve yüksek maliyetli yeni yatırımların yapılması gerekmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı, dağıtık elektrik üretimi sayesinde iletim şebekelerinde gerekli olmaktan çıkacak yatırımın miktarını 130 milyar dolar olarak tahmin etmektedir. Dağıtık elektrik üretim sistemleri ile bu yeni yatırımlara gerek kalmamaktadır [62]. Yerinde yapılan üretim, iletim ve dağıtım maliyetlerini %30 azaltmaktadır [63].

Arz sürekliliği: Merkezi sistemlerde dağıtım şebekesinde oluşan arızalar, büyük miktarda tüketicinin enerjisiz kalmasına yol açarlar. Dağıtık elektrik üretiminin olduğu şebekelerde ise, oluşan arızalar daha az sayıda tüketicii etkiler. Ayrıca akıllı şebeke yönetimi sayesinde, sistem arızasında bile diğer şebekelerden elektrik enerjisini yönlendirilerek tüketiciiye ihtiyacı olduğu elektrik enerjisi sağlanması mümkündür [62].

Arz güvenliği: Merkezi dağıtım ve iletim sistemlerinin arızalanma olasılıkları, üretim sistemlerine göre 10 ila 30 kat daha fazladır. Tüketiciler tarafından ihtiyaç duyulan güvenlik ve güç kalitesini yakalamak, merkezi dağıtım ve iletim sistemlerinde çok yüksek maliyetli yatırımlar gerektirir. Buna karşılık, dağıtık elektrik üretiminde istenen her güvenlik düzeyinin yakalanması için düşük marjinal maliyetli çözümler mevcuttur

(en güzel örnek, ABD'de sivil havacılık navigasyon istasyonlarında şebeke yerine fotovoltaik sistemlerin arz güvenliği için tercih edilmesi olarak gösterilebilir) [62].

Sistem genelinde arz ve talebin daha dengeli buluşması: Çok sayıda talep noktasına karşılık az sayıda arz noktasının olduğu merkezi sistemlere karşılık, dağıtık elektrik üretiminde çok sayıda arz noktası vardır. Bu, talep çeşitliliğinin daha uygun bir şekilde karşılanmasını ve merkezi sistemlere göre daha düşük kapasitede kurulu güce izin verir. Yine akıllı şebeke yönetimi sayesinde, talep noktalarının ihtiyaç duyulduğunda arz noktaları olarak vazife görmeleri mümkündür [62].

DÜS'ler enerjinin güvenli halidir: Nükleer santrallerin reaktör erime problemi, radyasyon veya kömür santrallerinin çevreye yaydığı partikül kirlenme tehdidi ve sera gazları oluşabilir, ancak bu durum dağıtık üretim santrallerinde olmayacağından daha güvenlidir [62].

Enerji bolluğu: Bir günde dünyamıza düşen enerjiyi depolama imkanı olsa dünyanın bir yıllık enerjisi karşılanabilir. Rüzgâr ve gelgit enerjisi ve dünyanın iç mekanizması sürekli ve bol miktarda enerji sağlamaktadır [62].

Siber saldırılardan korunma: Ulusal şebeke işletmecileri bilgisayar korsanlarının saldırılarına açıkken, DÜS'nin tüketici tesisine doğrudan bağlantılı veya mikrogrid şebekelerde kullanması durumunda birden fazla işletmeci ve işletim sistemi olup siber saldırı riski azalmaktadır [62].

Kapasite desteği: DÜS'ler sayesinde tüketiciler yakın noktalardan enerji temin ettiklerinden iletim sisteminde kullanılan iletkenlerde kapasite artışı olacaktır [61].

Acil durum kapasite desteği: Acil bir durumda, enterkonnekte şebeke ağının bir kısmında kesinti yaşandığında, tüketim yerinde DÜS kullanılması ağın yükünün bir kısmını azaltabilir. Bu nedenle, DÜS'leri kullanmak elektrik kesintilerini azaltabilir [61]. Ayrıca elektrik güvenliği ulusal güvenliğin önemli bir bileşenidir. Büyük güç şebekeleri savaşın, terörizmin veya olağan üstü doğa olaylarından kaynaklı çökmelere

karşı savunmasızdır, ulusal güvenliği ciddi şekilde tehlikeye atılmaması için DÜS'lerin kullanımı önem arz etmektedir [64].

Elektromagnetik girişimin azalması: İletim sisteminde kapasitenin azalmasına bağlı olarak elektromagnetik girişimin etkisi de azalmaktadır [64].

Kırsal ve uzak bölgelerde elektrifikasyon: Enerji nakil hatlarının tesisinin mümkün olmadığı arazi şartlarında veya ekonomik yatırım imkanı olmayan bölgelerde yer alan tüketicilere, enerji temin etmek için lokal DÜS'ler kullanılabilir [64]. UNEP raporuna göre 1,7 Milyar insanın elektrik enerjisine halen erişiminin bulunmadığı düşünülürse önemli miktarda yatırımın ötelenmesi sağlanacaktır [54].

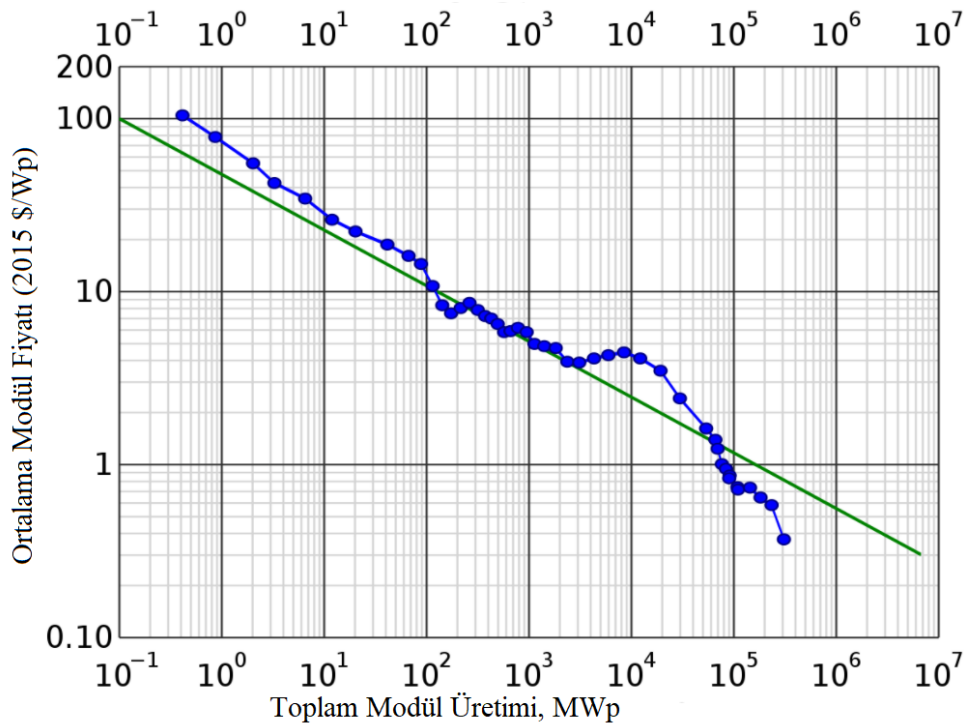
Oturan sistemin toparlanması: Büyük şebeke arızalardan dolayı şebekenin çökmesi durumunda, santrallerin harici güce ihtiyaç kalmadan yeniden üretime geçmesi gerekmektedir. DÜS'ler oturan sistemin toparlanması durumunda santrallere gerekli enerjiyi sağlayarak sistemin daha çabuk ayağa kalkmasını sağlayan yedek sistemler olarak kullanılabilir [64].

Uluslara enerji bağımsızlığını sağlama: Bölgesinde doğal kaynakları olmayan (kömür, petrol, doğalgaz, akarsu) ülkeler enerjilerini dışarıdan ihraç etmekte ve sürekli olarak dışa bağımlı kalmaktadırlar. Uluslar doğal kaynaklarının olmadığı durumlarda, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı dağıtık üretim santralleri ile enerji bağımlılıklarını azaltabilmektedirler [62].

Harmonik ve dönüştürme kayıplarını azaltma : DÜS'lerden özellikle PV ve hidrojen enerjisi üretim gerilim çıkışları DC olup sonrasında invertör yardımı ile AC'ye dönüştürülmektedir. Evlerde artık DC gerilime ihtiyaç duyan bilgisayar, cep telefonu, led televizyonlar gibi yükler AC'den DC'ye yeniden dönüştürmeye ihtiyaç duymaktadır. Tüketicilerde oluşturulacak DC baralar sayesinde DC-AC, AC-DC dönüşümlerinde meydana gelecek harmonik bozulma ve dönüşüm kayıpları engellenebilecektir [61].

DÜS ekonomik iş gücü: DÜS bileşenlerinin üretimi, projelendirilmesi, Ar-Ge faaliyetleri, kurulum, işletim ve bakımları yeni iş sahaları açmaktadır. 2016 yılında ABD’de yaklaşık 800.000 yeni istihdam sağlanmıştır. Benzer durum diğer ülkelerde de olup dünya genelinde yeni iş sahası ve imkanları açılmıştır [62].

DÜS’ler teknolojidir: Petrol, doğalgaz tüketilecekleri zaman kullanılan ve enerji üretim teknikleri çok değişmeyen alınıp, satılabilen hammadDEDİR. Ancak özellikle yenilenebilir enerji teknolojileri farklı olup daha verimli güneş paneli, rüzgar türbini, hidrojen enerjisi membran üretimi, atıklardan gazlaştırma işlemleri için sürekli araştırma yapıp teknolojilerinin geliştirilmesi sağlanmaktadır. Gelişen teknolojiye bağlı olarak DÜS’lerin verimleri artarken maliyetleri azalmaktadır [62]. Swanson Yasasına göre miktar olarak PV panel üretimi bir önceki toplam oranın iki katına çıktığı zaman %20 oranında maliyetin azalacağını öngörmektedir. Kristal silikon PV hücre fiyatı 1977 yılında 76,67\$ iken, 2014 yılında 0,36\$ seviyesine düşmüştür. Swanson Yasası öngörüsüne göre düşüş devam edecektir [65]. Swanson Yasası Şekil 2.1. de gösterilmektedir [65].



Şekil 2. 1. Swanson Yasasına göre PV panel fiyatlarının azalım trendi

Elde edilmeleri kolaydır: Geleneksel enerji üretim santrallerinde yer alan bileşenlere (türbin, kazan, generatör vb) erişim, kurulum yapılacak tesislerin yapılması uzun zaman almakta ve en küçük tüketicinin kendisine ait böyle bir üretim biriminin olması neredeyse imkânsız haldedir. Ancak DÜS'lerden özellikle PV kurulumu için gerekli olan bileşenlere (panel, invertör, kablo) erişim son derece kolay olup uygun olan arazi ve çatılara ilave tesis kurmadan kurulup, işletilmeleri son derece kolaydır [62].

Arazi kullanımı: DÜS'lerden PV üretim tesisleri arazi ve bina üzerlerine kurulmaktadır. Ayrıca bina yüzeylerine giydirme yapılması durumunda kurulum alanı daha da gelişmektedir. Ülkemiz için 50 GW üretim yapacak PV santrallerinin kurulumu için gerekli arazi alan 850 km² olup bu alan Kayseri ilinin % 5 lik kısmını kapsamaktadır. PV santral kurulumlarının tarım dışı arazilerde yapılması durumunda bu alanlarda ekonomiye kazandırılmaktadır. Kurulumların çatılara olması durumunda arazi kullanım oranı daha da düşecektir [55].

DÜS kabul edilebilir tüketici fiyatı sağlayabilir: Bazı elektrik piyasa özelleştirme yapılarında tüm tüketicilerin piyasa işlemlerine katılması beklenmektedir. DÜS'e sahip olan tüketici miktarı attıkça sistem marjinal fiyatında düşüş sağlayacak perakende fiyatlarının da düşmesi sağlanacaktır [66]. DÜS'ler, şebekeye güç sağlayarak toptan güç fiyatını düşürebilir ve bu da gerekli talebin azalmasına neden olabilir [67].

Şebeke elemanlarının ömür sürelerinde artış: DÜS'ler yakıt tasarrufu ve şebeke elemanlarının daha az yüklenmesini sağladıklarından dolayı transformatör gibi yüklenme ile yaşanan teçhizatın daha uzun ömürlü olmasını sağlarlar [67].

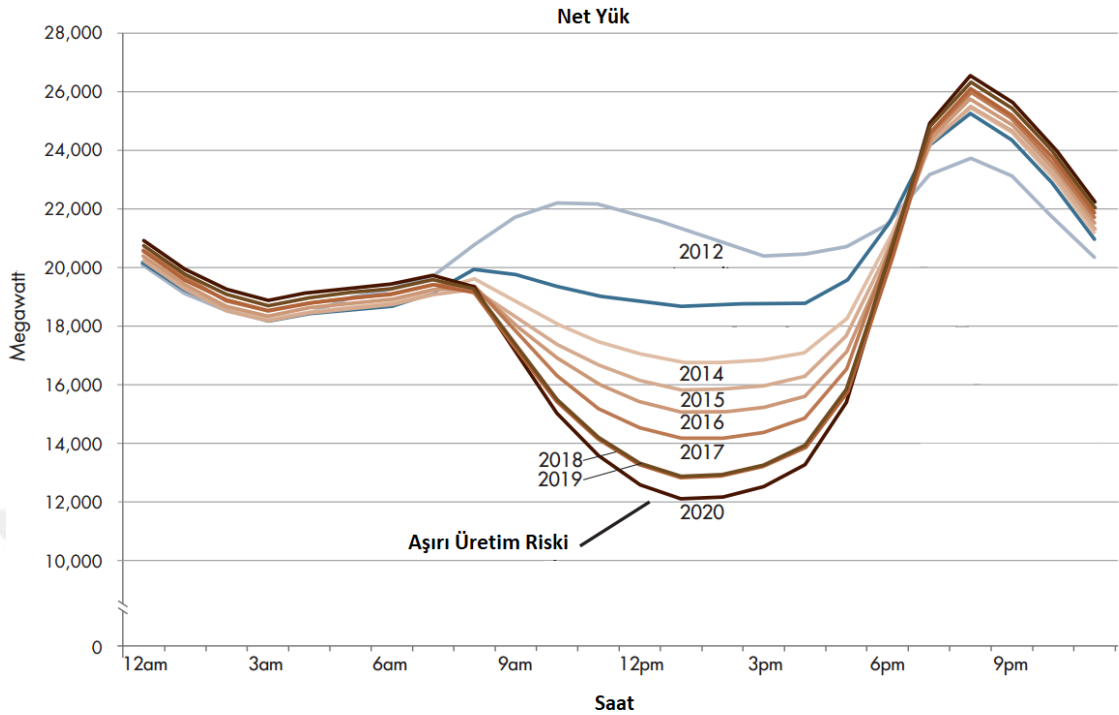
Şebeke kısıtlarının azalması: DÜS'ler sayesinde azalan yük akışından dolayı şebeke kısıtlarında azalma ve gerilim düşümü olan yerlerde şebekeye katkıda bulunurlar [67].

2.2. Dağıtık Üretim Santrallerinin Dezavantajları

DÜS'ler sağladıkları avantajlarının yanında şebeke üzerinde dezavantajlara da yol açmaktadır.

Ördek Eğrisi Etkisi Fenomeni: Amerika Birleşik Devletleri Kaliforniya eyaletinde 2013 yılı bahar aylarında Kaliforniya Bağımsız Sistem İşletmecisi (California Independent System Operator CAISO), PV üretimin yüksek olduğu zamanlarda tüketimin düşük olmasına bağlı olarak ve sonrasında tüketimi karşılamak için kısa sürede geleneksel santrallerle üretim yapma ihtiyacını gösteren “Ördek Eğrisi Fenomeni’ni” tanımlamıştır [68].

CAISO tarafından açıklanan durumda; bahar aylarında havaların soğuk gitmesine bağlı olarak tüketim azalmış, ancak PV ve rüzgar üretiminde artış yaşanmıştır. Saat 15:00 - 18:00 arasında meydana gelen tüketimi karşılamak için anlık olarak 13 GW’lık güç artışına ihtiyaç olduğu görülmüştür. PV üretiminde artış meydana gelse de belirtilen saatler arasındaki üretimi karşılayamayacağı için geleneksel yük santrallerinin anlık devreye girmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum bölgedeki santrallerde yük dağılım problemi ve emre amade sıcak yedeğe ait ilave maliyet oluşturduğu görülmüştür [68]. Bu etkiyi azaltmak için gündüz saatlerinde PV + rüzgar üretiminin kısıtlanması yenilenebilir enerjinin desteklenme sürecine sekte vuracaktır. Bu olumsuzluğun giderilmesinin yolları;



Şekil 2. 2. DÜS’lerin sayı ve kapasite artışına bağlı olarak oluşan “Ördek Etkisi Fenomeni”

Yük yönetim sistemi uygulayıp puant saatlerdeki kaydırılabilir yükleri gündüz saatine aktarmak. Örneğin: elektrikli araçların şarj zamanlarını gündüz saatlerine kaydırmak, Almanya da olduğu gibi gündüz saatlerinde çamaşır makinalarının çalışmasını teşvik eden (washing from sun, güneşten çamaşır yıkama) programları hayata geçirmektir. Diğer bir yol ise, enerji depolama sistemlerini teşvik ederek, gerekli görülen zamanlarda depolanan enerjinin yeniden sisteme aktarılmasını sağlayacak fiyatlandırma mekanizmasını sağlamaktır.

Sistem gerilimi üzerine olan etkisi: Normal şartlarda gerilim düşümü yaşanan şebekelerde DÜS’lerin bağlanması durumunda gerilim yükselmesi problemi görülmektedir. Gerilim yükselmesinin miktarı eklenen DÜS’lerin yerine ve miktarına bağlı olarak değişmektedir [62].

Koruma üzerindeki etkisi: DÜS’ler nedeniyle radyal olan şebeke yapısı ağ şebekeye dönüştüğünden arıza akımının boyutu, süresi değişir. Arıza akımı yükten kaynağa doğru

aktığı için artık yönlü koruma prensibinin kullanılması gerekmektedir. Eklenen her DÜS ile şebekenin koruma prensibi daha karmaşık ve zor hale gelmektedir [62].

Şebeke kararlılığı üzerine etkisi: DÜS’lerde kullanılan çok sayıda güç elektroniği cihazı, kondansatör ve reaktörler geleneksel güç sisteminin şebeke yapısını değiştirerek güç akışını etkileyecektir. Bu durum güç şebekesinin gerilim ve frekansında değişikliğe neden olup, senkronizasyon problemlerine yol açarak şebekede kesintiler oluşmasına neden olabilir [62].

Diğer enerji türlerine göre maliyet etkin değildir: Yenilenebilir olmayan kaynaklara göre yenilenebilir kaynaklardan enerji üretiminin amortisman süreleri karşılaştırıldığında pahalı olduğu görülmektedir. Kömürden enerji üretiminde ömür maliyeti 9,5 cent/kWh olurken offshore rüzgar türbininin maliyeti 15,8 kWh olmaktadır. Bu nedenle halen ülkeler tarafından yenilenebilir enerjinin rekabetçi olabilmesi için piyasa yapısı içerisinde sübvansede edilmektedir. [62].

Sabit bir enerji kaynağı değildir: Yenilenebilir kaynakların enerji üretimi iklime ve belirli zamanlara bağlıdır. Güneş enerjisi gece üretim yapamamakta, hava durumuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Rüzgar enerjisi için gerekli olan rüzgar miktarı fazla/az olduğu zamanlarda üretim yapamamaktadır [62].

Depolama maliyetlerinin fazla olması: Düzensiz olan yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisini, düzenli hale getirmek ve günün değişik zamanlarında elde edilen enerjiyi daha sonra kullanabilmek için, depolama ünitelerine ihtiyaç vardır. Depolama ünitelerinin kWh başına toplam depolama maliyeti 9 dolar cent olsa da bataryalar için 10.000 – 25.000 dolar kurulum maliyetleri olmaktadır. Bataryalar tam kapasitelerinde kullanılırsa (aşırı deşarj) çok çabuk ömürleri tükenmektedir [62].

2.3. Akıllı Şebeke ve Microgrid Yapısı

DÜS’lerin dezavantajlarını gidermek için akıllı şebeke altyapısı önem arz etmektedir. Genişleyen elektrik şebekelerini kontrol edebilmek, üretim optimizasyonu sağlamak,

tüketicilerin uzaktan kontrolünü sağlamak üzere yapılan çalışmalar sonucunda SCADA, AMR, bilgi ve iletişim tekniklerinde gelişmeler akıllı şebeke altyapısını oluşturmuştur.

Akıllı şebeke üzerine birçok tanım geliştirilmiştir. Bu tanımlardan; “Akıllı şebeke, farklı belirsizlikler altında öngörü ile kendi kendini iyileştirebilen, uyarlanabilir, esnek ve sürdürülebilir, dijital, iki yönlü güç akışına sahip güç sistemidir. Kötü niyetli saldırılara karşı siber güvenlik altında olan bileşenlerin, aygıtların ve sistemlerin şimdiki ve gelecekteki standartlarıyla birlikte çalışabilirlik için donatılmıştır” [69]. Avrupa Teknoloji Platformu tarafında akıllı şebekenin tanımı: Sürdürülebilir, ekonomik ve güvenli elektrik tedarikini verimli bir şekilde sağlamak için kendisine bağlı tüm kullanıcıların - jeneratörler, tüketiciler ve her ikisini birden yapanların - eylemlerini akıllıca entegre edebilen bir elektrik ağıdır [70].

Akıllı şebekeler konusunda Almanya Baden eyaleti tarafından 5 ayrı bölgede akıllı şebeke çalışması başlatılmış olup bunlardan biri de Model City of Mannheim (MOMA) projesidir. Proje öncesinde 2006 yılında günlük yük profilini değiştirme adına çamaşır makinelerinin gündüz güneş enerjisinin üretiminin depolanmadığı saatlerde çalıştırılması için “Güneş ile Yıka” uygulaması getirilerek, gündüz saatlerinde enerji tüketimi özendirilmiştir. 2009 -2013 yılları MOMA uygulamasında 1000 adet eve akıllı elektrik sayacı takılmış, 580 meskende de fotovoltaik üretim tesisi kurularak elektrik üretiminin fiyatının uygun olduğu saatlerde alış-satış işlemleri gerçekleştirilerek microgrid uygulaması başlatılmıştır [71]. Benzer bir uygulama ile İllinois Üniversitesi tarafından da, kendi kendine yetebilen microgrid uygulaması gerçekleştirilmiştir. Burada amaç sistem çökmeleri durumunda kendi kendine yetebilen sistem kurulması üzerinedir [72]. Ancak yenilenebilir rüzgâr ve güneş gibi enerji kaynakları oldukça değişkendir ve tahmin edilmesi zordur. 12 saat önceden rüzgâr enerjisi için mevcut tahmin teknikleri ortalama mutlak hataları %20 mertebesinde normalleştirmiştir [73]. Artan puant talebin karşılanması için ya yeni puant santraller kurulacak yada gündüz yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektrik enerjisi depolanarak puant saatlerde sisteme geri verilecektir. Akıllı şebekenin geleneksel şebeke ile karşılaştırılması Tablo 2.2. de gösterilmiştir.

Tablo 2. 2. Akıllı Şebeke – Geleneksel Şebeke Karşılaştırması

Karakteristik	Geleneksel Şebeke	Akıllı Şebeke
Tüketiciler tarafından sisteme aktif katılımın sağlanabilmesi	Tüketicilerin enerji sistemine katılımları yok	Tüketiciler bilgilendirilmiş, sisteme müdahil ve aktif.
Üretim ve depolama seçeneklerinin değerlendirilebilmesi	Merkezi üretim ağırlıklı bir ortam, dağıtık üretim kaynaklarının yer bulabilmesi için çok fazla engel mevcut.	Yenilenebilir enerji baskın, neredeyse tak-çıkart dağıtık enerji kaynakları
Yeni ürün, servis ve piyasaların oluşturulması	Sınırlı toptan satış piyasası, iyi entegre olamamış sistemler, tüketiciler için sınırlı fırsatlar	Olgunlaşmış ve entegre olmuş toptan satış piyasası, tüketiciler için yeni elektrik piyasası
Ekonomik faaliyetlerin desteklenmesi için teknik kalitenin sağlanması	Arıza/kesinti odaklı, güç kalitesi sorunlarına yavaş müdahale	Güç kalitesi/tedarik sürekliliği birinci öncelikli, sorunların hızlı çözümü, fiyat/kalite seçeneklerinde çeşitlilik.
Varlıkların optimize edilmesi ve operasyonların verimliliği	Varlık yönetimi ve iş süreçlerinde sınırlı entegrasyon	Şebeke verilerinin edinilmesi ile ilgili büyük veri analitiği altyapıları, bileşenlerde ömür ve kapasite açısından maksimum yararlanma.
Kendi kendine iyileştirme	Odaklanma arızadan sonra varlıkların korunmasında ve hasarın yayılmasına engel olmakta	Otomatik olarak problemlerin tespit edilmesi ve giderilmesi, tüketicilerin en az etkilenmesinde
Saldırı ve doğal afetlere karşı şebekenin esnek işletimi	Terör saldırılarına veya doğal afetlere karşı zayıf, savunmasız	Saldırı ve doğal afetlere karşı esnek ve hızlı toparlanma yetenekleri

3. BÖLÜM

ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Teknolojinin yoğun kullanıldığı toplumlarda yaşanan büyük boyutlu ve uzun süreli elektrik kesintileri milyonlarca insanı yaşam standardı, iş gücü yönünden etkilemektedir. Günümüze kadar meydana gelen en önemli elektrik kesintileri; 2012 yılı Hindistan (620 Milyon kişi etkilenmiştir) ve 2013 yılında Filipinlerde (en uzun süreli kesinti yaşanmıştır) olarak gösterilebilir [74]. Ülkemizde de; 17 Ağustos 1999 da İzmit depremi sonrası ve 31 Mart 2015 de ülke düzeyinde yaşanan genel elektrik kesintileri akıllarda kalıcı en geniş çaplı etkiye sahip elektrik kesintileridir [75]. Elektrik şebekelerinden beklenen; tüketicinin talebini karşılayan yeterli, temiz, güvenli, güvenilir, talebe erişilebilir fiyatlarda üretim sağlamasıdır [76]. Sistem kapasitesinin yeterli düzeyde olması için, puant gücü karşılamak üzere sürekli santral yatırımı beraberinde, şebekenin genişleme yatırımlarına yol açmakta ve bu durum elektrik tarifelerinde birim maliyetlerin artmasına neden olmaktadır. Enerji depolama uygulamaları ilave santral yatırımlarının önüne geçerek tüketiciye daha düşük maliyetli elektrik enerjisi sunmak için önemlidir. En genel anlamda “elektrik depolama”, elektrik enerjisini depolayan ve en çok ihtiyaç duyulduğunda talep üzerine serbest bırakan teknolojileri ifade eder. Depolama işlemi genellikle elektriğin diğer enerji formlarına ve tekrar geri elektrik enerjisi formuna dönüştürülmesini içerir [77].

3.1. Depolama Sistemlerinin Avantajları

Depolama sistemlerinin avantajlarına bakılırsa:

- Fiyat avantajı sağlamak için günlük elektrik enerji eğrisinin tepe tıraşlama, yük düzgünleştirme için tüketimin zaman içerisinde kaydırılmasının sağlanmasıdır. Örneğin; rüzgar enerjisi ve akıllı şebeke entegrasyonu yolu ile elektrikli araçların bu tür yük yönetiminde kullanımı gösterilebilir [78].

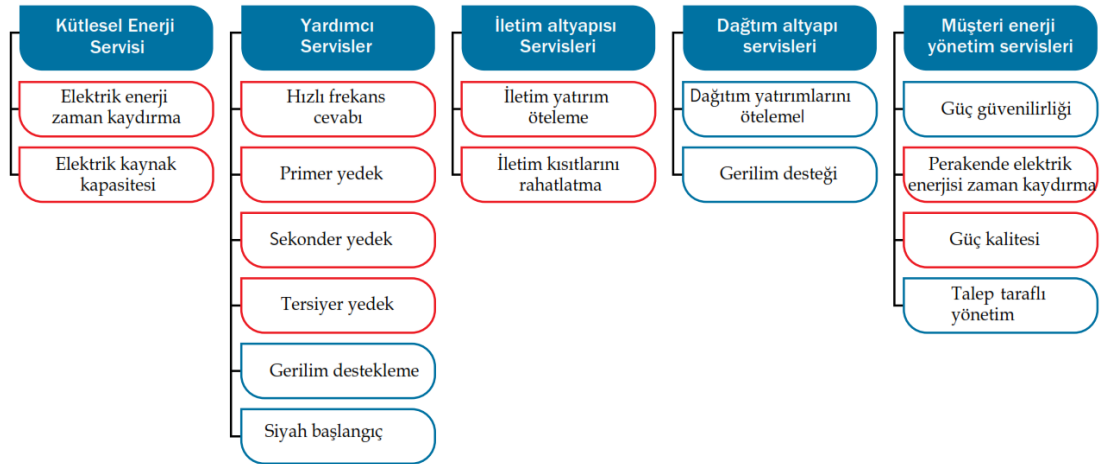
- Depolama sistemi yenilenebilir enerji kaynaklarının şebeke entegrasyonunda önemli bir role sahiptir [79].
- Şebekede dağıtık üretimden kaynak sağlanmasının teşvik edilmesi ve yenilenebilir enerjinin daha verimli kullanımının katkısı enerji depolama sistemleri ile garanti edilmektedir [78].
- Birçok temel yük santrali yükün bir parçası olarak veya değişken çıkışı sağlamak için işletilmek üzere tasarlanmamıştır. Bu santrallerin optimum çalışma noktalarına getirilmesini sağlamada, yedek jeneratörlerini devreye almak yerine enerji depolama sistemlerini kullanmak daha çekici bir çözüm olarak görülmektedir. Bunlara ek olarak enerji depolama sistemleri üstün bir kısmi yük verimliliğine sahiptir [80].
- Verimli depolama piyasa düzenleme uygulamalarında tam şarj ve deşarj özelliği ile kapasitenin iki katına çıkması için kullanılabilir.
- Depolama santrallerin black-start ve hızlı rampa desteğini sıfırdan tam yüke, tam yükten sıfıra inmede dakikalar yerine saniyeler içerisinde verebilir [80].
- Depolama iletim kısıtlarını aşmada pratik bir yol sağlar [81].
- Depolama, şebeke servis güvenliğini artırmak için kullanılabilir.
- Dağıtım sistemi içerisinde taşınabilir depolama sistemleri için her zaman ideal bir nokta vardır. Şebekenin değişen ihtiyaçlarına bağlı olarak belirli yıllarda depolama tesislerinin yerleri değiştirilebilir [81].
- Enerji depolama sistemleri, iletim ve dağıtım şebekelerinde ilave genişleme yatırımlarının ötelenmesinde yardımcı olabilir.
- Depolama sistemleri, sahadaki transformatör merkezleri için yedek güç kaynağı olarak kullanılabilir.

Enerji depolama sistemlerinin kullanım alanları Şekil 3.1. de belirtilmiştir.

3.2. Depolama Sistemlerinin Ekonomik Yönden Avantajları

- Enerji depolama tüketicilerde maliyeti azaltır [78].
- Genel olarak puant dışında kullanılan elektrik birim maliyeti puant zamanda kullanılan elektrikten daha ucuzdur. Bu durum tedarikçiye fiyat avantajı sağlar [78].
- Elektrik piyasa fiyatlarının, fosil kaynaklı yakıtların fiyat değişkenliği ve etkisinden kurtarmada önemli bir rol oynamaktadır [78].

- Depolama kullanımı, generatörler için gereksiz ek maliyet yüklerinden kaçınarak puant üretim ihtiyacından kaçınılmasını sağlar [78].

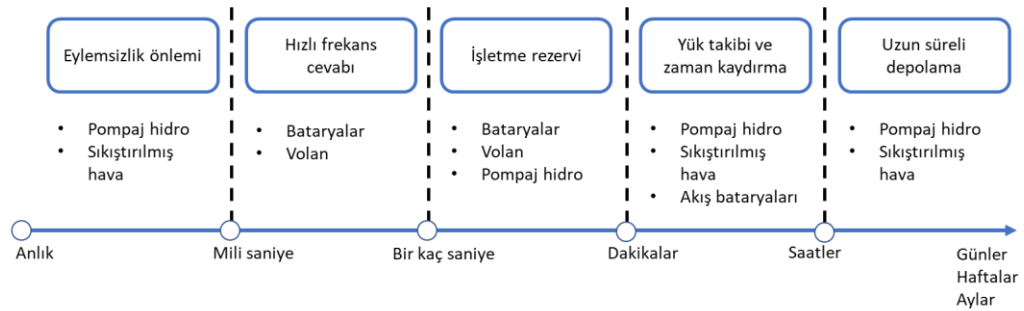


Şekil 3. 1. Elektrik depolama sistemlerinin kullanım alanları [77]

Depolama sistemlerinin zaman ve güce bağlı değişimleri incelendiğinde; mili saniye sürelerde generatörlerin ani devre dışı kalmaları nedeni ile frekans değişimlerine pompaj hidroelektrik depolama ünitelerinin devreye alınması ile karşılık verilebilir ve termal güç üretim ünitelerine olan bağımlılık azalabilir. Saniyeler seviyesinde meydana gelen frekans değişimlerinde (volan ve bataryalar) depolama üniteleri frekans cevabı için devreye alınır. Saniye – dakika arasında işletme yedeği uygulamalarında depolama üniteleri olarak batarya, volan ve pompaj hidroelektrik santrallerin kullanımı uygundur. Dakika-saatlik sürelerde yük kaydırma ve yük seviyelendirme uygulamalarında sıkıştırılmış hava, pompaj hidroelektrik ve bataryaların kullanımı uygundur. Zamana bağlı olarak DÜ santrallerinin kullanım alanları Şekil 3.2 de belirtilmiştir [77].

3.3. Enerji Depolama Sistemlerinin Türleri:

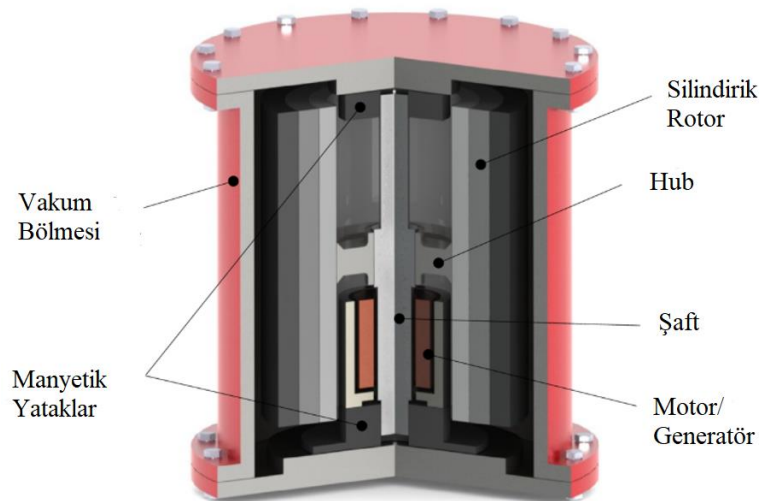
Enerji depolama sistemleri incelendiğinde; enerjinin kinetik enerji (volan), basınçlı hava, hidrojen (yakıt hücresi), süper kapasitör, potansiyel enerji olarak depolama (pompalı hidroelektrik), termal enerji, kimyasal enerji (bataryalar, akış bataryaları) ile depolamanın çeşitleri olduğu görülmektedir [82].



Şekil 3. 2. Elektrik depolama sistemlerinin zamana bağlı kullanım alanları

3.3.1. Kinetik Enerji Volan

Volanlar binlerce yıldır enerji depolamak için kullanılmıştır. Enerji dönen bir kütlenin açısal momentumunda depolanır. Şarj sırasında, volan bir motor tarafından döndürülür; deşarj sırasında, aynı motor volanın dönme enerjisinden elektrik üreten bir jeneratör görevi görür. Volan sisteminin toplam enerjisi, rotorun boyutuna ve hızına bağlıdır ve güç derecesi motor-jeneratöre bağlıdır [83]. Tüm yapı hava sürtünmesini engellemek için vakumlu bir yapıya yerleştirilir. Şekil 3.3. de volan yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Volan yapısı

Makine motor olarak çalışırken enerji volana aktarılır. Volanların dezavantajları nispeten zayıf enerji yoğunluğu ve büyük kayıplardır. Ayrıca, toplam volan sistemleri

için kendi kendine deşarj oranları, saatte depolanan kapasitenin yaklaşık % 20'sidir. 200 tonluk bir volanın sürtünme kayıplarının yaklaşık 200 kW olduğu tahmin edilmektedir. Bu hipotez ve % 85 anlık verimlilik kullanıldığında, toplam verimlilik 5 saat sonra % 78'e ve bir gün sonra % 45'e düşecektir. Bu tür bir cihazlarda uzun süreli depolama bu nedenle öngörülemez [82]. Kısa süreli yeterli güç üretilmediğinde güç sağlamak ve fazla üretimi depolamak için kullanılabilirler.

3.3.2. Pompaj Hidroelektrik Santraller

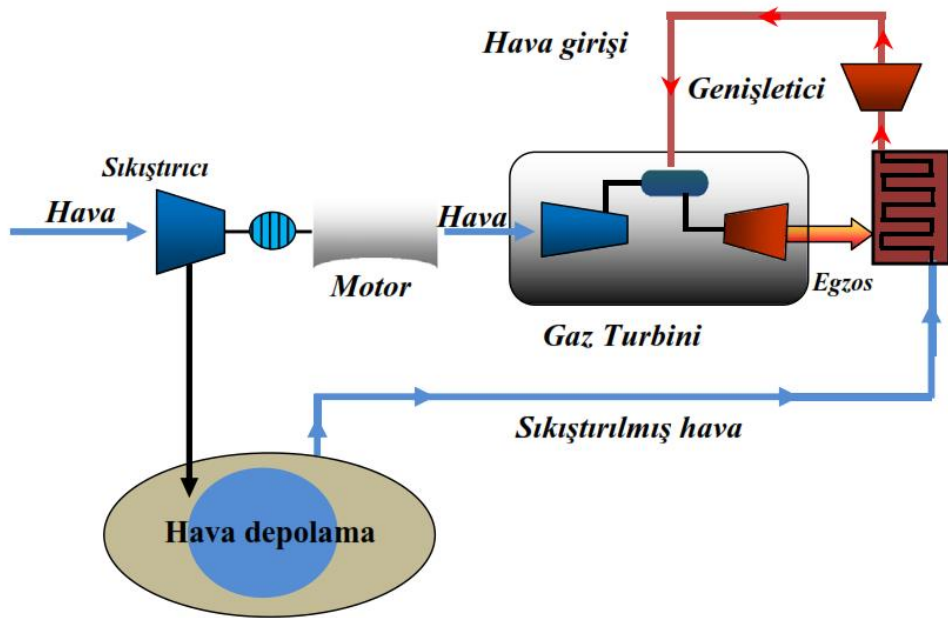
Biri alt diğeri üst hazne olmak üzere en az iki hazneden oluşan, sistemde arz-talep dengesinin sağlanması amacıyla elektrik talebinin düşük olduğu zaman diliminde suyun üst hazneye pompalanarak hidrolik potansiyel enerji olarak biriktirildiği, elektrik talebinin yüksek olduğu zaman diliminde yük yönetimine destek olan, iletim sisteminin yönetilmesinde ihtiyaç duyulan yan hizmetlere katkı vermek üzere önceliklendirilmiş tesislerdir. Bu teknoloji günümüzde yüksek-güç gerektiren uygulamalarda (100 MW - 10 GW) kullanılmaktadır [82]. Genel olarak, PHS'nin ömrü yaklaşık 30-50 yıldır, yaklaşık verimliliği % 65-75 ve güç, sermaye maliyetleri 500-1500 Euro / kW ve 10-20 Euro / kWh'dir [84].

3.3.3. Basınçlı Hava Enerji Depolama Sistemi

Bu tip bir sistemde, enerji yoğun olmayan / düşük maliyetli elektrik enerjisiyle çalışan bir kompresör kullanılarak, bir hava deposundaki havanın sıkıştırılmasıyla depolanır. Türbin / jeneratörün biri şarj olmak üzere diğeri deşarj olmak üzere iki yönde çalışabilmesi için özel bir kavrama gereklidir. Genel olarak üç rezervuar tipi dikkate alınmaktadır: doğal olarak oluşan akiferler (doğal gaz depolama için kullanılanlar gibi), çözelti tuz mağaraları ve kaya oluşumlarında mekanik olarak oluşturulmuş rezervuarlar [84].

BHEDS sistemi beş ana bileşenden oluşur: (1) Kompresör veya türbin trenlerine alternatif kavrama sağlamak için kavrama kullanan bir motor / jeneratör. (2) Sıkıştırma ekonomisini sağlamak ve basınçlı havanın nem içeriğini azaltmak için ara soğutucu ve sonrası soğutucularla iki veya daha fazla kademeli bir hava kompresörü. (3) Hem

yüksek hem de düşük basınçlı türbinleri içeren bir türbin dizisi. (4) Sıkıştırılmış havanın depolanması için, nispeten sert ve geçirimsiz kaya oluşumları, tuz oluşumlarının çözeltisi veya kuru madenciligi ile oluşturulan tuz mağaraları ve su ile yapılan gözenekli ortam rezervuarları kazılarak oluşturulan yeraltı kaya mağaraları olabilen bir boşluk / kap ve rulman akiferleri veya bitmiş gaz veya yağ alanları, ör. kumtaşı ve çatlamış kireç. (5) Yakıt depolama ve ısı eşanjör üniteleri gibi ekipman kontrolleri ve yardımcıları [83].

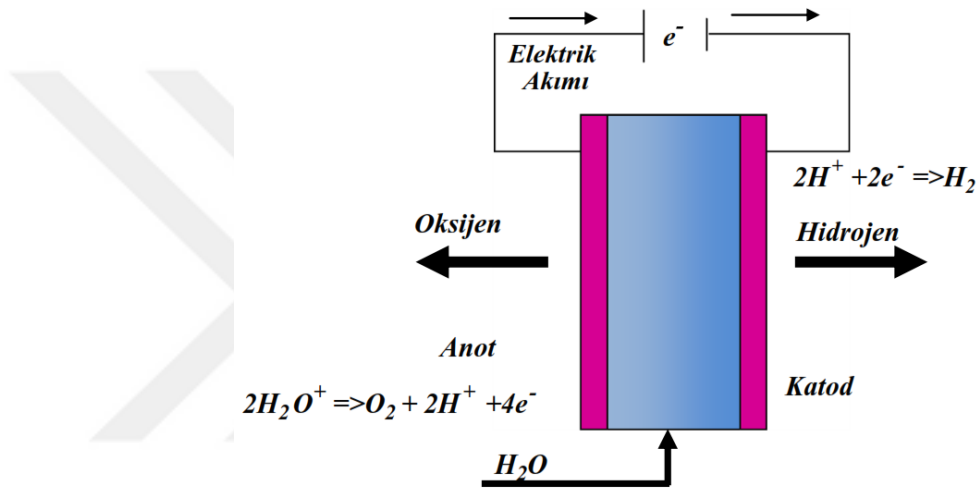


Şekil 3. 4 Basınçlı hava enerji depolama sistemi

Dünya genelinde, BHEDS kullanımı yaygın değildir ve şimdiye kadar sadece biri Almanya'da (290 MW) ve diğeri ABD'de (110 MW) olmak üzere iki tesis inşa edilmiştir. Bu tür bir sistemin enerji yoğunluğu 12 kWh/m^3 , tahmini verimlilik % 70 civarındadır ve ömür süresi yaklaşık 40 yıldır. BHEDS için sermaye maliyetleri, tipik olarak yeraltı depolama koşullarına bağlı olarak kW başına 400 \$ ile 800 \$ arasında değişmektedir [84].

3.3.4. Hidrojen Yakıt Hücresi

Hidrojen; temiz, verimli ve en hafif yakıtlardan biridir, ancak doğal olarak bulunmaz ve birincil enerji kaynaklarından üretilmesi gerekmektedir. Elektrik gibi üretilip taşınmaktadır ancak elektrikten farklı yönü depolanabilmesidir. Hidrojen yakıt hücresinin temel elemanları; elektrik enerjisi girişini hidrojene dönüştürmek için bir elektrolizör ünitesi, kendi hidrojen depolama sistemi ve hidrojendeki depolanmış kimyasal enerjiyi tekrar elektrik enerjisine dönüştürmek için bir hidrojen enerji dönüşümünü içerir.



Şekil 3.5. Hidrojen yakıt hücresinin genel prensibi

Hidrojen yakıt hücreleri, yüksek enerji yoğunluğu, küçük ve büyük ölçekli uygulanabilirlik ve basit modüler halinde imalatı olmak üzere birçok avantaja sahiptir. Kullanım ömürleri ve çevrim ömürleri açısından 15 yıldan fazla ve 20.000 şarj ve deşarj döngüsünde olduğu tahmin edilmektedir. Olumsuz tarafı ise şu an için pahalı olmasıdır (6-20 \$ / kWh) ve çok düşük çevrim verimine sahiptir (% 20-50). Bu nedenle, bir hidrojen yakıt hücresinin maliyetinin düşürülmesi büyük boyutlu Ar-Ge çalışmalarını gerektirmektedir [83].

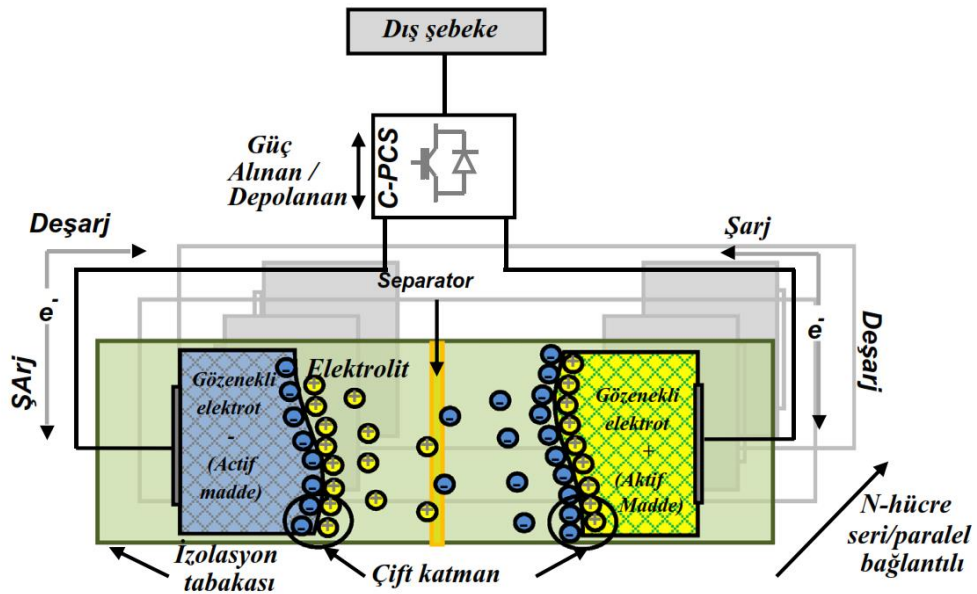
3.3.5. Kapasitör ve Süperkapasitörler

Kapasitörlerde, plakalara bir gerilim farkı uygulandığında dielektrik olarak bilinen bir yalıtım malzemesi ile ayrılmış iki plaka metal veya iletken arasında elektrik yükü olarak enerji depolanır. Bir plakaya doğru akım kaynağından gerilim uygulandığında, diğer

plakaya karşı işaretin yükü indükleyecektir. Kapasitansı belirleyen faktörler; plakaların boyutu, plakaların ayrılması ve dielektrik için kullanılan malzeme türüdür. Kapasitörlerde depolanan enerji, kapasiteleri ve elektrokimyasal hücrenin terminalleri arasındaki gerilimin karesi ile doğru orantılıdır, kapasite ise elektrotlar arasındaki mesafeyle orantılıdır [82].

$$E = \frac{C V^2}{2} \quad (3.1)$$

Kapasitörler birçok şebeke güç kontrol uygulamasında zaten kullanılmaktadır. Küçük enerji depolama ve kısa deşarj için kapasitörlerin avantajları, uzun çevrim ömrü ve anında şarj olma özelliğidir. Büyük bir kapasite gerekiyorsa, dielektrik alanı çok büyük olmalıdır. Bu durum, büyük kapasitörlerin kullanımını ekonomik olmamakta ve çoğu zaman maliyetli olmaktadır [84].



Şekil 3. 6. Süperkapasitör enerji depolama uygulaması

Kapasitörler, geleneksel bataryalardan önemli ölçüde daha hızlı şarj edilebilir ve on binlerce kez yüksek verimlilik döngüsüne sahiptir. Geleneksel kapasitörler, yaz aylarında günlük puant yükler için küçük kapasiteler (kW) ile 1 saatten daha az bir süre

enerji sağlamak için geliştirilmiştir. Geleneksel kapasitörlerdeki temel sorun, düşük enerji yoğunluğudur [83].

Süperkapasitörler, güç depolamadan ziyade enerji depolamaya ayrılmış bileşenlerdir. Depolamanın elektrostatik olarak meydana geldiği element hücreleri şeklindedirler. Teorik olarak 10 kW/kg civarında, 500.000 ila 1 milyon yük / deşarj döngüsünü destekleyen önemli kütle gücüne sahiptirler. Süper kapasitörlerin prensibi, bir iyonik çözelti (elektrolit) ve bir elektronik iletken (elektrot) arasındaki arayüzde elektrik yüklerinin birikmesi yoluyla çift elektrokimyasal bir katmanın oluşturulmasına dayanır. Bataryaların aksine, oksidoredüksiyon reaksiyonu yoktur. Bir alüminyum film üzerinde aktif kömür birikintisi, geniş bir yüzey ve böylece yüksek bir özgül kapasite elde etmek için kullanılır. Elektrotlar sulu veya organik bir elektrolite daldırılır. Elektrik yükleri elektrot-elektrolit arayüzünde depolanır. Tepki süresi birkaç saniyedir. Maksimum 2,7-2,85 V gerilim seviyesine sahip çeşitli elemanlar, pratikte işletilebilir gerilim değerlerini ve kapasitelerini elde etmek için seri ve birbirine paralel olarak yerleştirilir. Süper kapasitörlerin uygulama alanlarından biri; elektrikli araçlarda frenleme esnasında meydana gelen enerjiyi ısı şeklinde harcama yerine depolayabilmesidir [85].

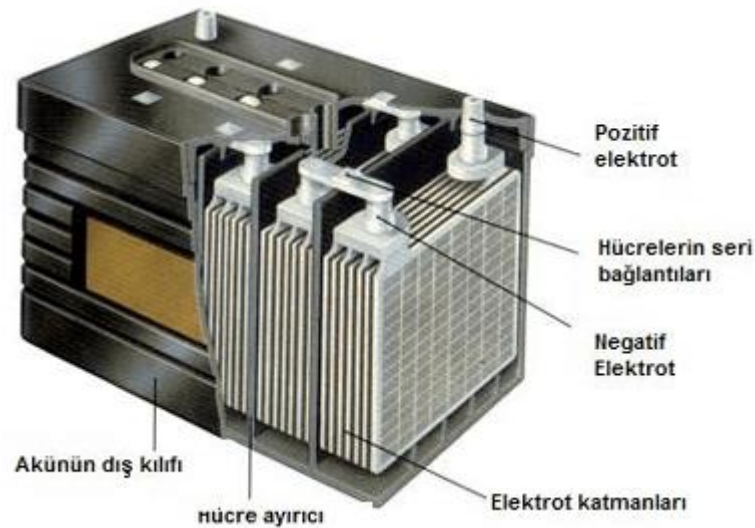
3.4. Bataryalar

Batarya, elektrokimyasal oksidasyon-redüksiyon (redoks) reaksiyonu yoluyla aktif maddelerinde bulunan kimyasal enerjiyi, doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren bir cihazdır. Şarj edilebilir bir sistemde batarya, işlemin ters çevrilmesi ile deşarj edilir. Bu tip reaksiyon, elektronların bir elektrik devresi vasıtasıyla bir malzemeden diğerine aktarılmasını içerir [86]. Bir batarya, gerekli gerilim ve kapasiteyi sağlamak için seri ve / veya paralel bağlanan birkaç elektrokimyasal hücreden oluşur [87]. Bir akünün sağlayabildiği enerji miktarı birim ağırlık başına güç ($W \cdot h \cdot kg^{-1}$) veya hacim başına güç ($W \cdot h \cdot l^{-1}$) bir batarya hücre gerilimi (V) ve kapasitenin (Ah kg^{-1}) bir fonksiyonudur [87]. Bataryaların dış kasaları çelik, polimerik malzemeler veya mukavvadan oluşur. Elektrotlar ve elektrolitler, bataryaların farklı uygulamalarının bir fonksiyonu olarak değişir. Bataryaların potansiyel olarak tehlikeli bileşenleri civa, kurşun, bakır, çinko, kadmiyum, mangan, nikel ve lityumdur [84]. Bataryanın genel yapısı Şekil 3.7.'de gösterilmiştir.

Elektrokimyasal hücreler ve bataryalar, elektriksel olarak şarj olma kapasitelerine bağlı olarak birincil (şarj edilemez) veya ikincil (şarj edilebilir) olarak tanımlanır [86].

Birincil hücreler veya bataryalar : Birincil batarya, taşınabilir elektronik ve elektrikli cihazlar, aydınlatma, fotoğraf ekipmanları, oyuncaklar, bellek yedekleme ve diğer birçok uygulama için kullanışlı, genellikle ucuz, hafif bir paket güç kaynağıdır. Birincil bataryaların genel avantajları iyi raf ömrü, düşük ila orta deşarj oranlarında yüksek enerji yoğunluğu, az, bakım ve kullanım kolaylığıdır.

İkincil veya şarj edilebilir hücreler veya bataryalar: Bu bataryalar, deşarjdan sonra, deşarj akımının ters yönünde akım geçirerek, orijinal durumlarına kadar elektrikle şarj edilebilir. Bunlar elektrik enerjisi için depolama cihazlarıdır ve "depolama bataryaları" veya "akümülatörler" olarak da bilinir. İkincil bataryaların uygulamaları iki ana kategoriye ayrılır:



Şekil 3. 7 Bataryanın genel yapısı [88]

1-İkincil bataryaların enerji depolama cihazı olarak kullanıldığı, genellikle birincil enerji kaynağına elektriksel olarak bağlanan ve şarj edilen ve enerjisini talep üzerine yüke ileten uygulamalar. Örnek olarak otomotiv ve uçak sistemleri, acil durum arıza ve

bekleme (UPS) güç kaynakları, hibrid elektrikli araçlar ve elektrikli şebeke yükü seviyelendirmesi için sabit enerji depolama (SES) sistemleri verilebilir.

2- İkincil bataryaların birincil batarya olarak kullanıldığı veya boşaltıldığı, ancak kullanımdan sonra atılmak yerine yeniden şarj edildiği uygulamalardır. İkincil bataryalar, örneğin taşınabilir tüketici elektroniği, elektrikli el aletleri, elektrikli araçlar, vb. gibi maliyet tasarrufu için (değiştirilmek yerine yeniden şarj edilebilecekleri) uygulamalarda kullanılır [86].

3.4.1. Kurşun Asit Bataryalar

1859 yılında icat edilen kurşun asit bataryalar en eski, en bilindik ve en çok kullanılan şarj edilebilir elektrokimyasal cihazlardır. Bir kurşun asit batarya (yükli durumda) kurşun metal ve kurşun oksidin elektrotlarından yaklaşık % 37 (5.99 Molar) sülfürik asit içerir. Boşaltılmış durumda her iki elektrot da kurşun sülfata dönüşür ve elektrolit çözünmüş sülfürik asidini kaybeder ve öncelikle su olur [83]. Hücre gerilimi $E^0=2.04$ V dur.



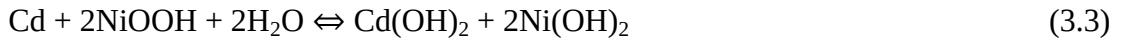
Kurşun-asit bataryalar kurşundioksit (katot elektrotunu oluşturan), kurşun (anot elektrodunu oluşturan) ve elektrolit görevi gören sülfürik asidi içeren kimyasal reaksiyonlara dayanır. İki ana tür kurşun asitli batarya vardır: en yaygın olan sulu bataryalar ve kapsamlı araştırma ve geliştirmeye tabi olan sübat ayarlı kuru bataryalardır. Kurşun asitli bataryanın maliyeti düşük (300-600 \$ / kWh), yüksek güvenilirlik ve verimliliğe (% 70-90) sahiptir. Düşük ve yüksek ortam sıcaklıklarında bataryanın nispeten düşük performansına ve nispeten kısa ömür süresine ek olarak, kurşun-asit bataryanın ana dezavantajları periyodik su bakımı ve düşük özgül enerji ve gücüdür [84].

Kurşun-asit bataryalar güç kalitesi, UPS ve bazı yedek rezerv uygulamaları için popüler bir depolama seçeneğidir. Bununla birlikte, enerji yönetimi uygulaması, kısa çevrim ömrü (500-1000 döngü) ve doğal yüksek kurşun yoğunluğu, düşük enerji yoğunluğu

(30–50 Wh / kg) nedeniyle çok sınırlıdır. Kurşun asit bataryaları da düşük bir sıcaklık performansına sahiptir ve bu nedenle bir termal yönetim sistemine ihtiyaç duyarlar [83].

3.4.2. Nikel Bazlı Bataryalar

Nikel esaslı bataryalar temel olarak nikel-kadmiyum (NiCd), nikel-metalhidrit (NiMH) ve nikel-çinko (NiZn) bataryalardır. Her üç tip de pozitif elektrot ve sırasıyla nikel hidroksit ve bir miktar lityum hidroksit içeren sulu bir potasyum hidroksit çözeltisi olan elektrolit için aynı malzemeyi kullanır. Negatif elektroda gelince, NiCd tipi kadmiyum hidroksit, NiMH ametal alaşım ve NiZn çinkohidroksit kullanır. Nikel-kadmiyum bataryalar daha yüksek enerji yoğunluğuna, daha uzun kullanım ömrüne (3500 çevrim) [84] ve daha düşük bakım gereksinimlerine sahip oldukları için kurşun-asit akülerle rekabet ederler. Nikel-kadmiyum bataryaların kurşun-asit akülere göre sayılan avantajlarına rağmen, nikel-kadmiyum batarya, esas olarak kurşun-asidin 10 katından fazla maliyetli olması nedeniyle önemli bir ticari başarı elde edememiştir [84]. Bunun üzerine, nikel-kadmiyum bataryalar, insanlarda sağlık riskine neden olabilecek ağır metaller içermekte ve şiddetli kendi kendine deşarjdan dolayı problemlidir [84].



Kurşun asitli akülerle karşılaştırıldığında, daha düşük hücre gerilimine ($E^0 = 1.29 \text{ V}$) ancak daha yüksek enerji yoğunluğu ve daha uzun çevrim ömrüne sahiptirler. Bununla birlikte, diğer bataryalar; şarjı, gerilim düşüşümü (bellek etkisi), yüksek maliyeti (1000 \$ / kWh) ve çevresel endişeleri sınırlayan (kadmiyum toksik ağır metaldir) önemli negatif sıcaklık katsayıları nedenleriyle tüm pazarlarda NiCd bataryaların yerini almaktadır [83, 89].

3.4.3. Sodyum-Sülfür Bataryalar

NaS bataryalar, yük dengeleme, tepe talebi azaltma ve yedek rezerv için kullanılırlar. Yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşan düzensiz yük eğrisi çıkışlarını da düzgentleştiririrde kullanımları önerilmektedir.

Bu akülerde, genellikle β -alümina (β - Al_2O_3) olmak üzere Na + iletken seramiklerle ayrılan erimiş bir kükürt katodu ve erimiş sodyum anottan oluşur. Deşarj sırasında sodyum oksitlenir ve kükürt, katot bölmesinde sodyum polisülfidler Na_2S_x ($x = 3-5$) oluşturmak için indirgenir, reaksiyon aşağıda belirtilmiştir. ($E^0 = 2.07 - 1.78 \text{ V}$)



Batarya çalışma sıcaklığında ($300-350 \text{ C}^\circ$) tüm elektroaktif malzemeler sıvı haldedir. Sülfür içindeki sodyum polisülfürlerin düşük iletkenliğini telafi etmek için akım toplayıcı olarak karbon keçesi kullanılır, böylece batarya maliyeti artar. Sodyum, katot (merkezi sodyum geometrisi) ile çevrelenmiş birincil katı elektrolitten yapılmış boru şeklinde bir kap içinde saklanır. NAS batarya sıfır kendi kendine deşarj ve yüksek elektrik verimliliğine sahiptir. Yüksek çalışma sıcaklıkları nedeniyle, ısı kayıpları bekleme veya yüzer şarj sırasında (batarya şarj edildiğinde veya boşaldığında omik ısıtma genellikle ısı kayıplarını telafi eder) yeterince önemli olabilir. Erimiş sodyum ve kükürt arasındaki reaksiyonun oldukça ekzotermik olduğu, dolayısıyla yangın tehlikesinin arttığı ve başarısız hücrelerin etrafını saptamak ve şönt etmek için elektronikler olmadığında, arızalı hücrenin tüm dizeyi kapatması nedeniyle kükürt ve sodyum sülfürler izolatörlerdir [89].

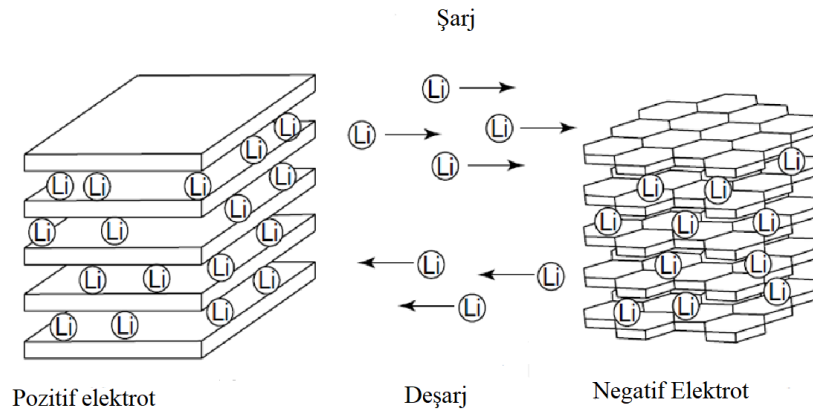
3.4.4. Lityum İyon Bataryalar

İlk olarak 1960'larda önerilen lityum iyon bataryalar Bell Laboratuvarında, lityum metale (lityum batarya) bir alternatif sağlamak için uygulanabilir bir grafit anot geliştirdiğinde ortaya çıkmıştır [83]. 1991 yılında Sony bu görüşü geliştirerek ilk ticari Li-ion batarya üretmiştir. LiCoO_2 'in katot, karbonun anot olarak kullanıldığı bu hücrelerde 3,6 V üstünde potansiyel elde edilmiş, uzun çevrimler boyunca kararlılık gösteren lityum iyon bataryaların üretilmesi başarılmıştır [90]. Lityum teknolojili batarya iki ana türden oluşur: lityum-iyon ve lityum-polimer hücreler. Lityum iyon hücrelerin yüksek enerji ve güç yoğunluğu, taşınabilir elektronik cihazlardan uydu uygulamalarına kadar çok çeşitli uygulamalar için onları cazip kılar. Enerji depolamaya yönelik artan talep, bu tür güç kaynağının performansını artırmak için daha fazla araştırma yapılmasını gerektirmektedir [84].

Lityum-iyon bataryalar, denklem 3.5'de gösterildiği gibi, organik bir elektrolitteki pozitif (lityum metal oksitler) ve negatif (genellikle grafitik karbon) malzemelerde lityumun araya ilavesini kullanır [89]. Hücrelerden elde edilen gerilim $E^0 = 3.3\text{--}4.2\text{ V}$ civarındadır.



Hücrede bu reaksiyonların oluşması için elektrot malzemelerinin elektrik iletkenliği sağlanmalıdır. Bu amaçla, elektrot malzemeleri yüksek iletken metal folyolar üzerine lamine edilir veya folyo üzerine biriktirilir. Folyoların üzerindeki elektrotlar arasında gerçekleşmesi muhtemel kısa devreyi önlemek için mikro gözenekli seperatörler ve iletkenliği sağlamak için sıvı/jel/ katı elektrolitler kullanılarak hücre içerisinde lityum iyonlarının yer değiştirmesi sağlanır [89].



Şekil 3. 8 Li-ion hücrelerin reaksiyonu [89]

Tekrar şarj edilebilir Li-ion akülerde verim, kapasite ile belirlenir. Hücrede aktif olan malzeme miktarı ile belirlenen kapasite, tam olarak şarj edilmiş bir aküden belirli deşarj koşulları altında elde edilen toplam amper saat (Ah) olarak tanımlanır. Aktif bir gram eş değer malzeme 96500 C yük veya 26,8Ah teorik kapasiteye sahiptir. Ticari anlamlılığa sahip bir lityum bataryanın yalnızca güvenli ve uzun ömürlü olması değil yüksek kapasitelerde hizmet vermesi de beklenmektedir [90].

Li-ion bataryaların diğer gelişmiş akülere kıyasla ana avantajları şunlardır:

- a) Yüksek enerji yoğunluğu (300-400 kWh /m³, 130 kWh / ton),
- b) Yüksek verimlilik (% 100'e yakın),
- c) Uzun çevrim ömrü (% 80 deşarj derinliğinde 3.000 çevrim).

En önemli dezavantajı, özel paketleme ve dahili aşırı şarj koruma devreleri nedeniyle yüksek maliyetlidir (600 \$ / kWh'in üzerinde) [91].

Depolama sistemlerinin verim, maliyet ve diğer teknik ve ticari yönden karşılaştırmaları Tablo 3.1. de verilmiştir. Ayrıca depolama sistemlerinin elektrik güç sistemlerinde uygulama alanları Şekil 3.9. de verilmiştir.

Ticari bakımdan kolay elde edilebilir olması, hafıza etkisinin olmaması, yenilenebilir kaynakların olumsuz etkilerinin giderilmesi ve depolama ünitelerinin avantajlarını kullanmada Li-ion bataryaları ön plana çıkarmaktadır. Ancak lityum-iyon bataryaların kurulum enerji maliyetleri yüksektir.

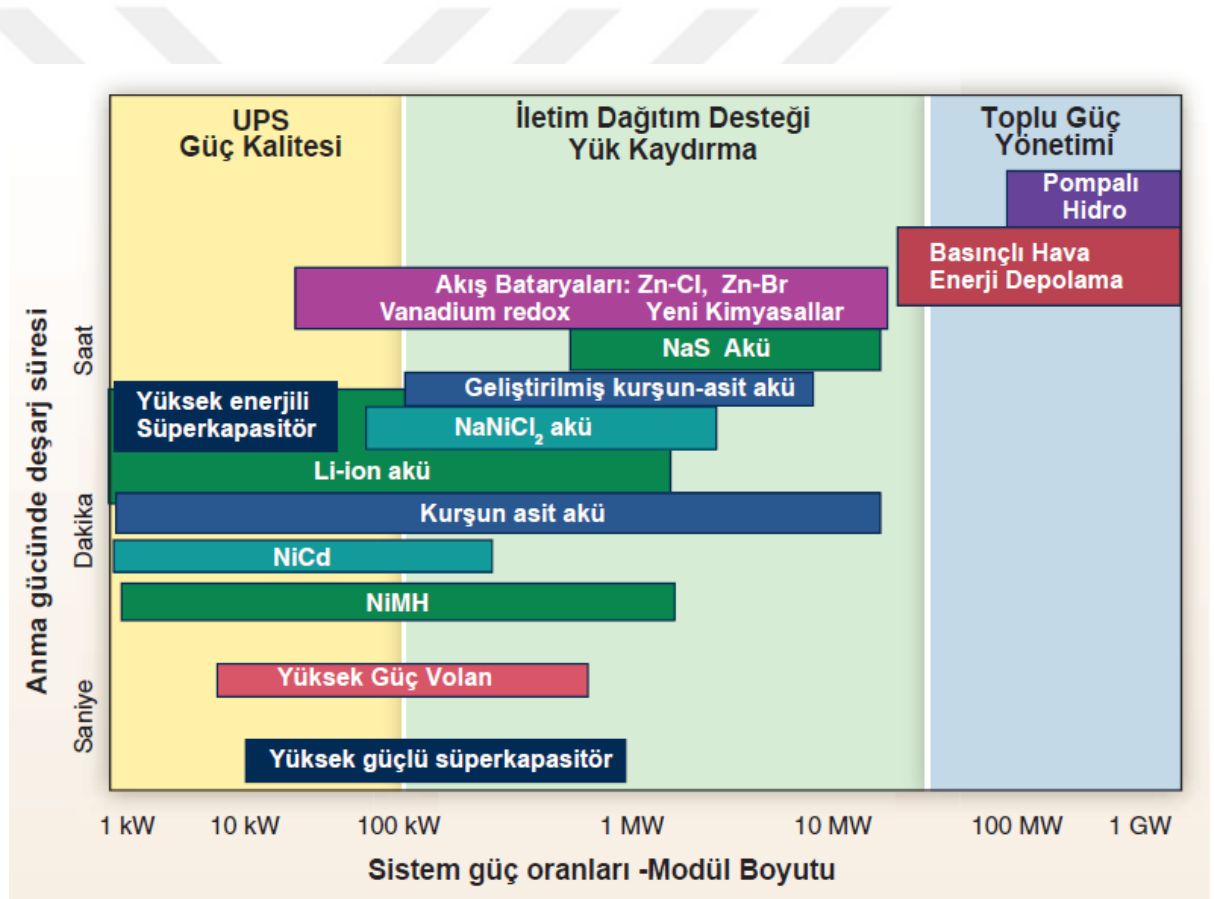
Li-ion bataryaların genel özelliklerine bakıldığında [92].

- 1) Yüksek çalışma gerilimi. Li-ion bataryanın çalışma gerilimi, Ni-MH ve nikel-kadmiyum bataryanın 3 katıdır ve 3,6 V'a ulaşmıştır.
- 2) Yüksek özgül enerji. Li-ion bataryanın özgül enerjisi nikel-kadmiyum bataryanın enerjisinden 4 kat, Ni-MH bataryanın enerjisinden 2 kat daha fazladır, yaklaşık 200 Wh / kg.
- 3) Uzun çevrim ömrü. Li-ion bataryanın çevrim ömrü 2000'den fazla olmuştur ve düşük deşarj derinliği altında on binlerce çevrime ulaşmaktadır.
- 4) Düşük deşarj oranı. Li-ion bataryanın kendi kendine deşarj oranı sadece % 6-8'dir, bu da nikel-kadmiyum aküden (% 25-30) ve Ni-MH aküden (% 15-20) çok daha düşüktür.
- 5) Hafızasız Li-ion batarya, performansı düşürmeden isteğe bağlı olarak her zaman şarj edilebilir ve deşarj edilebilir.
- 6) Çevre dostu. Li-ion aküde zararlı bir madde yoktur ve çevreyi kirletici olmayan bir aküdür.
- 7) Esnek hacim. Li-ion bataryalar, elektrikli araçlarda batarya sistemlerinin yerleşim gereksinimlerini karşılamak kolaydır.

Tablo 3. 1. Enerji Depolama sistemlerinin karşılaştırılması

	Verimlilik %	Kapasite MW	Enerji Yoğunluğ u (Wh/kg)	Kurulum Güç Maliyeti (\$/kW)	Kurulum Enerji Maliyeti (\$/kWh)	Cevap Süresi	Ömür Yıl	Çevrim Ömrü	Derin Deşarj %
Pompaj Hidroelektrik	75-85	100-5000	0,5-0,15	600-2000	5-100	Hızlı (ms)	40-60	50.000	80
Sıkıştırılmış Hava	50-89	100-5000	0,5-1,5	400-2000	2-100	Hızlı	20-60	50.000	80
Volan	93-95	0,25	10-30	350	5000	Çok hızlı (<ms)	15	200.000	90
Kurşun –Asit Batarya	70-90	0-40	30-50	300	400	Hızlı	5-15	1500	60
Nikel Kadmiyum Batarya	60-65	0-40	50-75	500-1500	800-1500	Hızlı	10-20	3500	80
Sodyum Sülfür Batarya	80-90	0,05-8	150-240	1000- 3000	300-500	Hızlı	10-15	2500	90
Lityum İyon Batarya	85-90	0,1	75-200	300	350-1000	Hızlı	5-15	2000- 10000	90
Yakıt Hücresi	20-50	0-50	800- 10.000	500-1500	10-20	İyi (<1 saat)	5-5	20.000	99
Kapasitör	60-65	0,05	0,05-5	400	1000	Çok hızlı	5	1000	80
Süperkapasitör	90-95	0,3	2,5-15	300	2000	Çok hızlı	20	1220	80

Li-ion bataryalar, benzer batarya teknolojilerine göre yüksek enerji yoğunluğu, esnek ve hafif tasarım ve daha uzun ömür sunma yönünden tercih edilen sistemlerdir [87]. Li-ion bataryalar taşınabilir elektronikler için en popüler batarya türlerinden biridir, en iyi enerji-ağırlık oranına sahiptir, hafıza etkisi yoktur ve kullanılmadığında yavaş şarj kaybı vardır. Li-ion bataryalar, yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle savunma, otomotiv ve havacılık uygulamaları için popülerlik kazanmaktadır [93]. Depolama teknolojisinin türüne bağlı olarak, işletme maliyetinin kurşun-asit batarya için en yüksek ve Li-ion batarya için en düşük olduğu bulunmuştur [94]. Öte yandan, elde edilen maksimum tasarruf miktarının, kullanılan



Şekil 3. 9. Enerji depolama ünitelerinin güç cevap zamanı gösterimi.

depolama teknolojisinin türüne bakılmaksızın, % 3,8'i geçmediği açıkça görülebilir (bu, Li-ion batarya durumuna karşılık gelir) [95]. Li-ion akülerini 2010 yılında 1183 \$/kWh olan maliyeti 2019 yılında 156 \$/kWh'e düşmüştür [96]. Li-ion bataryalar potansiyel

olarak iki temel özelliğe sahiptirler: daha uzun çevrim ömrü ve daha düşük kullanım ömrü maliyeti. Ömürleri düşünüldüğünde, döngü başına maliyet, Li-ion bataryalar için kurşun asitli akülere kıyasla daha düşüktür [94].

Geleneksel Li-ion bataryaların şarjı iki adımda gerçekleşir, batarya voltajı önceden tanımlanmış üst voltaj sınırına ulaşana kadar sabit bir akımda şarj edilir, ardından akım önceden belirlenen küçük bir değere ulaşınca kadar sabit bir gerilim ile şarj edilir. Bu yöntemle genellikle Sabit Akım-Sabit Voltaj (CC-CV) şarj yöntemi denir [97].

3.5. Li-ion Batarya Ömür Göstergeleri

Bataryalar kimyasal yoldan elektrik enerjisini depolamaktadırlar. 5 Ah'lık bir bataryanın şarj edildikten sonra ihtiyaç halinde sabit olarak 1 saat süresince 5A veya 5 saat süresince 1A akım vermesi beklenmektedir. Ancak bataryaların içerisinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar, ısının ve çevre etkisinden dolayı ve kullanımına bağlı olarak anod ve katot maddelerinde meydana gelen aşınmaya bağlı olarak istenilen performansı gösterememektedir. Enerji depolamada en önemli bileşen olan bataryaların ömür süresinin belirlenmesi önem kazanmaktadır.

Bataryanın yaşlanması iki kısma ayrılabilir: takvim yaşlanması ve döngü ömrü [77]. Her terim, bataryanın farklı kullanımlarından kaynaklanan değişiklikleri tanımlar. Bu nedenle, takvim yaşlanması doğal olaylarla ve batarya depolamanın sonuçlarına karşılık gelir. Aksine, döngü yaşlanması, döngüler (şarj veya deşarj) olarak adlandırılan batarya kullanım sürelerinin etkisiyle ilişkilidir [98]. Bataryanın yaşlanması, artan hücre empedansı, güç azalması ve kapasite azalması çoklu ve karmaşık mekanizmalardan kaynaklanır. Malzeme parametrelerinin yanı sıra saklama ve döngü koşulları batarya ömrü ve performansı üzerinde de etkilidir. Hücre kimyasına bağlı olarak, hem yüksek hem de düşük şarj durumu performansı düşürebilir ve batarya ömrünü kısaltabilir. Yüksek sıcaklıklarda bozulma hızlanır, ancak özellikle şarj sırasında düşük sıcaklıklar da olumsuz bir etkiye sahip olabilir. Malzeme parametreleri arasında, yüzey kimyası hem anot hem de katot malzemeleri için önemli bir rol oynar. Katotta, yığın halindeki malzemedeki faz geçişleri ve yapısal değişiklikler yaşlanmayı güçlü bir şekilde

etkilerken, yığın halindeki anot malzemesindeki değişikliklerin önemsiz olduğu düşünülmektedir [99].

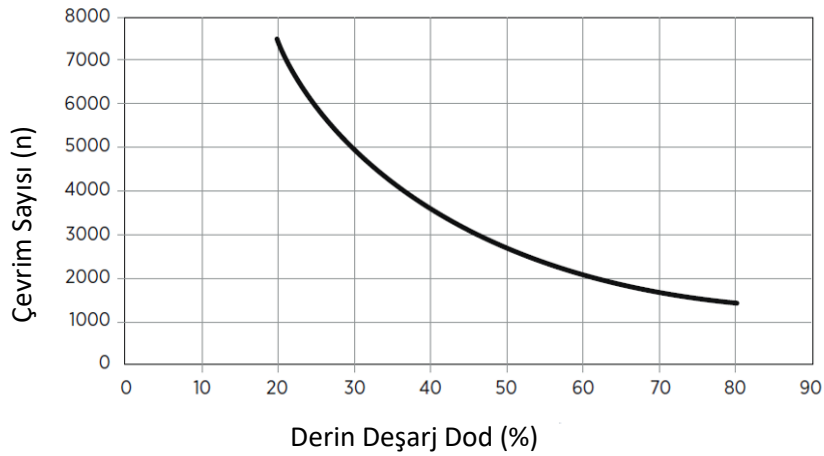
Bir bataryanın döngü ömrü, bataryanın önemli bir performans kaybetmeden önce tamamlayabileceği şarj ve deşarj döngülerinin sayısıdır, belirli bir derin deşarj ve sıcaklıkta belirtilir. Gerekli performans, uygulamaya ve kurulumun göreceli boyutuna bağlıdır. Bununla birlikte, orijinal kapasitesinin tam dolu bir bataryanın, döngü ömrünün sonunda % 60-80 kapasitede olacağı düşünülebilir.

Takvim ömrü, önemli performans kapasitesini kaybetmeden önce bataryanın çalışabileceği yıl sayısıdır. Birincil parametreler sıcaklık ve zamandır [100]. Özellikle bataryanın yaşlanması, zamanın fonksiyonu olarak sıcaklığa ve şarj durumuna (SoC) bağlıdır. Önceki faktörlere ek olarak, döngü yaşlanması aynı zamanda akım hızına, şarj / deşarj kesme voltajlarına bağlıdır. Her durumda, belirli yaşlanma mekanizmasına göre batarya kapasitesini azaltabilir (kapasite azalır) ve / veya iç direncini artırabilir (güç azalır) [101].

3.6. Bataryaların Durumunu Gösteren Parametreler SoC, DoD, SoH

3.6.1. Derin Deşarj (DoD)

Bu, kullanılan batarya kapasitesinin miktarını ifade eder. Bataryanın tam enerji kapasitesinin yüzdesi olarak ifade edilir. Bir batarya ne kadar derin deşarj olursa, beklenen kullanım ömrü o kadar kısa olur. Bu durum, kurşun asit ve lityum iyonu da dahil olmak üzere hücre bozulmasına bağlı birçok hücre bazlı batarya için geçerlidir. Örneğin, bir batarya tam enerji kapasitesinin %10'unu boşaltırsa, tam kapasitenin %90'ı kullanılmaz, bu durum %10 DoD'ye karşılık gelir ve batarya, derin deşarjda çevrilen aküden daha fazla şarj döngüsünü tamamlayabilecektir. Derin deşarj döngü genellikle %80 veya daha fazla DoD olarak tanımlanır. Her batarya türü ve kimyası farklı şekilde etkilenir. Sıcaklık gibi diğer koşullar da DoD rol oynar. Şekil 3.10 DoD'nin (x eksen) döngü ömrü (y eksen) üzerindeki etkisini gösterilmektedir [100].



Şekil 3. 10. Li-ion bataryaların çevrim sayısına bağlı DoD eğrisi

3.6.2. Sağlık Durumu (SoH)

SOH, bir bataryanın sağlık durumunun ve yeni aküye aküye kıyasla belirli bir performans sunma kabiliyetinin bir ölçüsü olarak tanımlanır [101].

$$\text{SoH}(t) = \frac{t \text{ anındaki nominal kapasite}}{\text{Başlangıç kapasitesi}} (\%) \quad (3.6)$$

$$\text{SoH} = \frac{C}{C_{in}} \quad (3.7)$$

C, bataryanın boşalma sırasında sağlayabileceği şarj miktarıdır ve C_{in} , bataryanın ilk kullanımda verdiği şarj miktarıdır [102].

Batarya yönetim sistemleri şarj durumu ve bataryanın sağlık durumunu göz önüne alır. (SoC), mevcut döngü göz önüne alındığında, yeniden şarj etmeden önce bir aküde kalan şarj yüzdesi olarak ölçülür.

Li-ion bataryalar tipik olarak kurşun asit hücrelerden çok daha yüksek şarj ve deşarj güç oranına sahiptir, bu da yüksek üretilen güç darbelerini emmelerine veya ani güç taleplerini karşılamalarına izin verir. Li-ion hücreleri kısmi SoC'de tam şarjdan daha az

bozunma, nispeten yüksek DoD'de iyi performansa sahiptir ve bozunmayı önlemek için tam şarj gerektirmez, bu durumda şebeke dışı sistemlerde bulunan seyrek tam şarjların stresinin olabileceği anlamına gelir [103].

3.6.3. C Oranı

Bir bataryanın şarj ve deşarj hızları, C oranına göre belirlenir. Bir bataryanın kapasitesi genellikle 1C olarak derecelendirilir, yani 1Ah değerine sahip tam şarjlı bir batarya bir saat boyunca 1A sağlamalıdır. 0.5 C'de deşarj olan aynı aküye iki saat için 500mA sağlamalıdır ve 2C'de 30 dakika için 2A verir. Hızlı deşarjlardaki kayıplar deşarj süresini azaltır ve bu kayıplar şarj sürelerini de etkiler [104].

1C'lik bir C oranı, bir saatlik deşarj olarak da bilinir; 0.5 C veya $C / 2$, iki saatlik bir deşarj ve 0.2 C veya $C / 5$, 5 saatlik bir deşarjdır. Bazı yüksek performanslı bataryalar, orta derecede stresle 1 C'nin üzerinde şarj edilebilir ve boşaltılabilir. Tablo 3.2. çeşitli C hızlarındaki tipik zamanları göstermektedir.

Tablo 3. 2. 1Ah (1000 mAh) bataryaları şarj ve deşarj ederken C oranı ve servis süreleri

C-oranı	Zaman
5C	12 dakika
2C	30 dakika
1C	1 saat
0,5C veya $C/2$	2 saat
0,1C veya $C/10$	10 saat
0,05C veya $C/20$	20 saat

PV bağlantılı şebeke entegrasyonlu bataryaların sürekli şarj deşarj döngüsünde olması beraberinde sistemin kalbi olan bu bataryaların hızla ömrünün bitmesine neden olacaktır.

Li-ion bataryaların bozunumları ve neden oldukları durumlar geniş bir şekilde araştırılıp nedenleri Tablo 3.3 de belirtilmiştir [99].

Tablo 3.3. Li-ion anod yaşlanmanın nedenleri, etkileri ve etkiledikleri

Etki	Sebepe olduğu	Yol açan etki
Lithium empedans yükselmesinin azalması	Kapasite ve güç azaltımı	Yüksek ısı Yüksek SoC (Düşük potansiyel)
Aktif maddelerin azalması, lityumun azalması	Kapasite azalımı	Aşırı şarj
Empedans yükselmesi	Güç düşümü	Yüksek sıcaklık, yüksek SoC
Empedans yükselmesi potansiyel artışı	Güç düşümü	Yüksek döngü oranı, yüksek SoC
Aktif maddelerin kaybolması	Kapasite düşümü	Yüksek çevrim oranı, yüksek DoD.
Lityumun azalması, mekanik stabilitenin azalması	Kapasite düşüşü	Yüksek SoC, Yüksek ısı

4. BÖLÜM

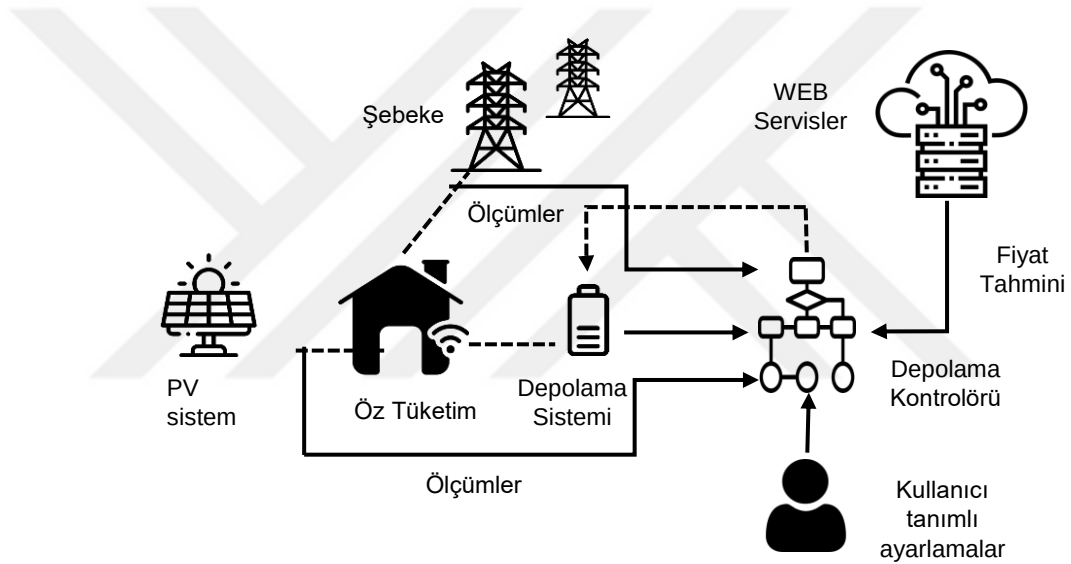
SİSTEM MİMARİSİ VE MONTE CARLO SİMÜLASYON METODU

Teknolojik gelişmelere bağlı olarak daha akıllı, otonom sistemler günlük yaşantımızda da yer almaya başlamıştır. Artan çevre bilinci, gelişen teknolojiye bağlı olarak daha verimli ve ekonomik yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi, enerji arz güvenliği gibi etkenler neticesinde özellikle fotovoltaik bağlantılı akıllı ev teknolojilerinin gelişmesinde artış yaşanmaktadır. Değişen ve gelişen elektrik piyasası yapısına bağlı olarak artık evler tüketici değil üretüketici (prosumer) haline gelmiştir. Elektrik enerjisinin ilk yıllarında değişik kaynaklardan elektrik enerjisi üreten dağınık yapı zaman içerisinde merkezi güç santrallerine dönüşse de, günümüzde elektrik şebeke yapısı, merkezi santrallerin varlığı yanında yeniden tek merkezden kontrol edilebilen dağıtık üretim yapısına dönüşmesi yönünde evrilmiştir.

Şekil 4.1. de gösterilen PV bağlantılı akıllı evler sadece kendi enerjilerini üretmekte kalmayıp gerektiğinde bağlı olduğu şebekeye katkıda bulunmaktadır. Kurulan sistemin etkinliği gün içi piyasasında değişen değerlere bağlı olarak değiştiğinden piyasa takas fiyatının uygun olduğu zamanlarda PV'den gelen enerjiyi depolayan Li-ion bataryalar deşarj olmakta, fiyatın uygun olmadığı zamanlarda şarj olmaktadır. Sistemde yer alan Li-ion bataryanın sürekli şarj/deşarj döngüsü batarya ömrünü azaltmakta ve sistemin birim başına enerji maliyetinin artmasına neden olarak ekonomik olmaktan çıkmasına neden olmaktadır.

PV bağlantılı batarya sistemleri statik yapıda olup PV hücreler uygun bakım yapıldığında yıllarca hizmet vermektedir. Her ne kadar akülerde statik yapılar olsa da şarj/deşarj döngüsü içerisinde içyapısında meydana gelen kimyasal reaksiyonlardan dolayı ömrü azalmaktadır.

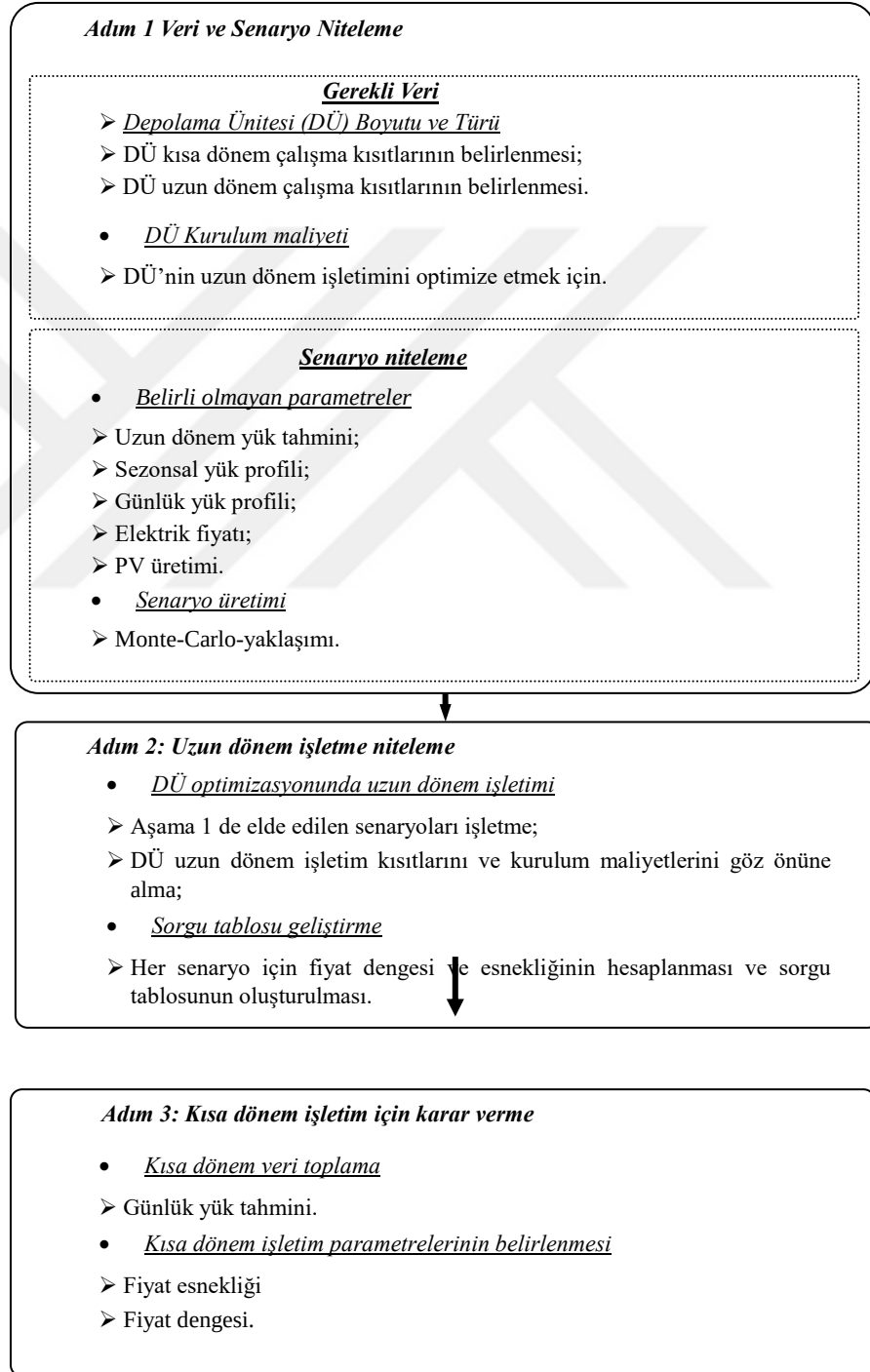
Bu çalışmada, DÜ için, web servisleri aracılığıyla fiyat için veri alan ve DÜ çalışmasını kontrol eden bir kontrolör öngörülmektedir. Kısa vadeli işletim perspektifinden bakıldığında, yük özellikleri, elektrik fiyatı ve PV üretimi sürekli olarak değişmektedir, bu nedenle DÜ denetleyicisi DÜ şarj/deşarj durumlarını, minimum maliyetli işletimi elde etmek için bu duruma uygun sürekli değiştirmesi gerekir. Uzun vadeli bakış açısıyla olaya bakıldığında, böyle bir şarj/deşarj işletim modeli DÜ'nin ömrünü kısaltabilir. Önerilen yöntem, DÜ operasyonu için en uygun operasyon programını (kısa vadeli bakış açısını) sağlarken, DÜ çalışma ömrü için makul ömür (uzun vadeli bakış açısını) sağlar.



Şekil 4. 1. PV bağlantılı akülü depolama sistemlerine entegre akıllı ev yapısı

Bu çalışma, akıllı evlerde küçük ölçekli DÜ'lerin en iyi şekilde çalışması için üç aşamalı fiyat-esnek yaklaşımla DÜ'lerin kısa vadeli ve uzun vadeli kısıtlamalarını incelenmektedir. Yapılan çalışmada, ilk aşamada veri ve senaryo karakterizasyonu ile uğraşan, DÜ'nin kısa vadeli ve uzun vadeli çalışma kısıtlamalarını belirlemek için gerekli verilerin elde edildiği kimyasal tip batarya depolama sistemleri ele alınmaktadır. Burada, uzun vadeli talep tahmini, günlük yük profili, elektrik fiyatı ve PV üretimi gibi belirsiz parametreleri temsil etmek için uygun sayıda senaryo üretilir. İkinci aşama, uzun vadeli operasyon kısıtlamalarına ve DÜ'nin yatırım maliyetine tabi olarak öngörülen senaryoları kullanarak DÜ'nin uzun vadeli çalışmasını optimize eder. Bu aşamanın çıktıları, üçüncü aşama için girdi olarak kullanılan fiyat esnekliği ve fiyat dengeleme katsayıları olarak adlandırılan iki göstergedir. Üçüncü aşama, DÜ'nin kısa

vadeli operasyonu hakkında karar vermekten sorumludur. Burada, günlük elektrik fiyatı, günlük yük ve günlük PV üretimi için kısa vadeli tahminle birlikte ikinci aşamanın çıktıları elde edilir. Elde edilen verilere dayanarak, optimum operasyon için uygun fiyat esnekliği ve fiyat farkı belirlenir. Önerilen metoda ait akış şeması Şekil 4.2.'de belirtilmiştir.



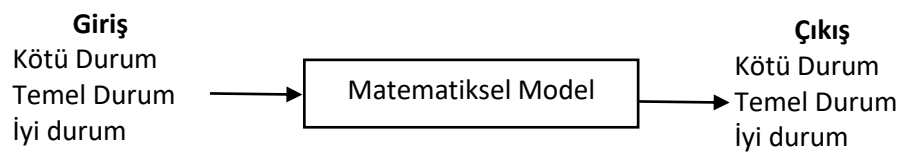
Şekil 4. 2. Önerilen sistemin akış şeması

Gerçek dünyadaki karar verme problemlerinde bilinmeyen veriler bol miktarda bulunur. Bu bilgi eksikliği, mühendislik, ekonomi, finans vb. Farklı bilgi alanlarına ait problemlerde yaygındır. Enerji sistemi çalışmaları, kısa vadeli (ör. gerçek zamanlı, saatlik, günlük ve haftalık işletme kararları) uzun vadeli (ör. planlama veya politika oluşturma) çok çeşitli konuları içerir. Karar verme süreci, genellikle belirsizliklere tabi olan girdi parametreleriyle beslenir [105].

4.1. Monte Carlo Metodu

Gerçek dünya problemlerinin çözümünde oluşturulan modele bağlı olarak, giriş değişkenlerine bağlı olarak modelin çözümlenmesi ile sonuç elde edilir. Ancak giriş değişkeninin birçok parametreye bağlı olduğu durumlarda model cevabının tüm olası sonuçlarını görmek mümkün değildir. Örneğin bir PV santralin üretim sınırları; hava sıcaklığı, coğrafi konum, santralin yönlendirme açısı, panellerin eğim açısı, güneşin mevsim ve saatlik duruma göre konumu, havanın açık-kapalı olması, panellerin temizlik faktörüne bağlıdır.

Modeller için giriş parametreleri çeşitli dış faktörlere bağlıdır. Bu faktörler nedeniyle, gerçekçi modeller, girdi parametrelerinin sistematik varyasyonundan kaynaklanan riske tabidir. Bu değişkenleri dikkate almayan deterministlik bir model, bu girdi parametrelerinin değerleri en olası değerleri olduğundan, genellikle temel durum olarak adlandırılır. Etkili bir model, çeşitli girdi parametreleriyle ilişkili riskleri dikkate almalıdır. Çoğu durumda, deneyciler girdi değişkenlerinin değerleri için temel durumu, olası en iyi senaryoyu ve olası en kötü senaryoyu içerebilen bir modelin çeşitli versiyonlarını geliştirir Şekil 4.3. [106]. Analitik metotlar aynı sistem için her zaman aynı sonucu verirken, Monte Carlo metodu üretilen rastgele sayılara bağlı olarak birbirine yaklaşık sonuç verir [107].



Şekil 4.3. Durum-Tabanlı Modelleme

Bu yaklaşımın çeşitli dezavantajları vardır. İlk olarak, her girdi değişkeni için en iyi ve en kötü durum senaryolarını değerlendirmek zor olabilir. İkincisi, tüm girdi değişkenleri aynı anda en iyi veya en kötü seviyelerinde olmayabilir. Karar vermek de zor olma eğilimindedir, çünkü artık birden fazla senaryo düşünülmektedir. Ayrıca, deneyi yapan kişinin dikkate alınması gereken durum sayısı arttıkça model sürüm oluşturma ve veri depolama zorlaşır. Araştırmacı, genellikle durum analizi olarak adlandırılan giriş parametrelerinin çeşitli geçici değerlerini çalıştırmak için cazip olabilir, ancak her bir giriş parametresinin olası tüm değerlerini gözden geçirmek pratik değildir. Monte Carlo metodu, bir araştırmacının her bir riskli girdi değişkeniyle ilişkili tüm risk aralığını metodik olarak araştırmasına yardımcı olabilir [106].

Monte Carlo Simülasyon yöntemi, doğasında belirsizlik faktörünün bulunduğu durumlar karşısında bir dizi değerleri olasılık dağılımı kullanarak bu faktörlerin yerine olası sonuçları modeller içinde inşa ederek risk analizi yapmamızı sağlayan bir tekniktir. Metodun bir probleme uygulanması problemin rassal sayıları kullanarak simüle edilip hesaplanmak istenen parametrenin bu simülasyon sonuçlarına bakılarak yaklaşık olarak hesaplanması fikrine dayanmaktadır [108].

Monte Carlo Metodu'na yapılan ilk referans, Fransız biyolog (1707-1788) Comte de Buon'un (1733) ünlü iğne deneyidir [109]. Sonrasında Ulam ve Von Neumann'ın, bir nükleer patlamadaki nötronların istatistiksel davranışını daha iyi anlamak için Manhattan Projesi'nde bulunan ilk bilgisayarları çok sayıda nötronun rastgele davranışını MCM ile simüle etmek için kullanmışlardır [110].

Monte Carlo Metodu, yüzlerce deney yapmadan veya binlerce örnek oluşturmadan performansı tahmin etmeye izin verir. Sınırlı kaynakların olduğu modern dünyada bu güçlü bir argümandır. Dört basit adımdan oluşur [110]:

1. Analiz edilmek istenilen faaliyet veya sürecin matematiksel bir modelini belirlenir.
2. Modeldeki her faktör için parametreleri tanımlanır.
3. Bu parametrelere göre rastgele veriler oluşturulur.
4. Sürecin çıktısı simüle ve analiz edilir.

Monte Carlo simülasyonu, deterministik veya “tek noktalı tahmin” analize göre bir dizi avantaj sağlar.

- Olasılıklı Sonuçlar. Sonuçlar yalnızca neler olabileceğini değil, her sonucun ne kadar olası olduğunu da gösterir.
- Grafik Sonuçlar. Farklı sonuçların ve gerçekleşme olasılıklarının grafiklerini oluşturmak kolaydır. Bu, bulguları diğer paydaşlara iletmek için önemlidir.
- Duyarlılık analizi. Sonuç üzerinde hangi değişkenlerin en büyük etkiye sahip olduğunu görmek kolaydır.
- Girdilerin Korelasyonu. Değişkenler arasındaki karşılıklı bağımlı ilişkileri modellemek ve bazı faktörlerin değişiminin diğerlerini nasıl etkilediğini göstermek mümkündür.

Monte Carlo yönteminin geliştirilmesinde rol alan bilim adamlarından John Von Neumann hesaplamalarda kullanılan rastgele sayı üreteçlerini Monte Carlo yönteminin “kalp atışı” veya “ruhu” şeklinde tanımlamıştır [111]. Rastgele sayı üreteçleri gerçek ve sözde rastgele sayı üreteçleri olarak 2 ayrı grup oluşturmaktadır. Gerçek rastgele sayı üreteçlerinden bazıları insan faktörüne bağlı olması nedeniyle dezavantaj oluşturmaktadır. Bu gruptaki rastgele sayı üreteçlerine zar atmak ya da madeni paranın havaya atılmasıyla yazı veya tura gelmesi örnek verilebilmektedir. Son derece hassas hava sıcaklık ölçümlerin yapıldığı bir termometredeki ölçüm değerlerinin ondalık skalasındaki son bir kaç hanedeki sayılar ise, insan faktörünün bulunmadığı gerçek sayı üreteçlerine örnek olarak verilebilmektedir. Günümüzde Monte Carlo hesaplamalarında kullanılan rastgele sayılar, kullanıcı tarafından “rastgele sayı çekirdeği” olarak adlandırılan ilk sayının belirlenip istenilen fonksiyonda tekrarlı bir şekilde kullanılması sonucunda bir seri halinde üretilmektedir. Bu seri halindeki rastgele sayılar birbirinden bağımsız haldedir. Bu sayılar belli bir düzende; yani fonksiyona bağlı olup, doğal bir şekilde üretilmediğinden bu sayı üreteçlerine sözde rastgele sayı üreteçleri adı verilmektedir [111].

Monte Carlo Simülasyon yönteminde örneğin iki rassal değişkene (X_1, X_2) bağlı olan Y değişkeninin bu değişkenlerle olan ilişkisi f fonksiyonuyla tanımlandığını varsayalım. Bu durumda [111];

$$Y=f(X_1,X_2) \quad (4.1)$$

Eğer X_1 ve X_2 değişkenlerinin dağılımı belliyse (örneğin: Normal Dağılım gösteriyorsa) ve aynı zamanda dağılım özellikleri de biliniyorsa (μ_x : Ortalama ve σ_x : Standart sapma) X değerleri için defalarca rastgele sayılar üretilmesi sonucunda bu sonuçlara karşılık gelebilecek Y değerleri f fonksiyonu yardımıyla hesaplanabilmektedir. Bu hesaplamalar doğrultusunda da Y ile ilgili olarak istatistikî bilgilere ulaşabilmemiz mümkün olabilmektedir. Ne kadar fazla örnekleme yapılırsa sistem hakkında o kadar iyi sonuç elde edilebilir. [111]

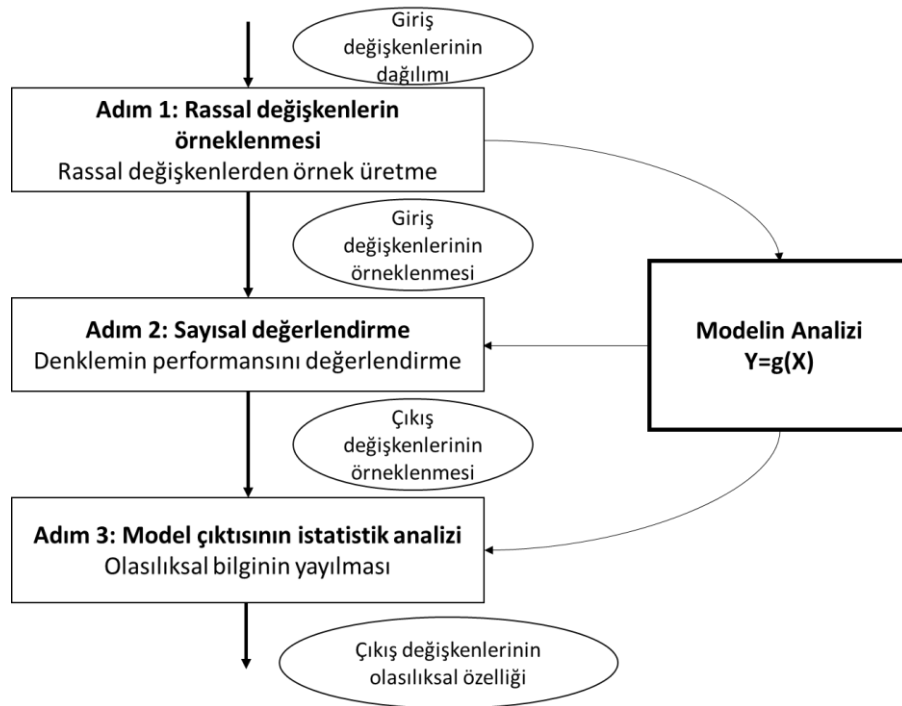
Monte Carlo simülasyonunun ana hatları Şekil 4.4.'de gösterilmektedir [112].

Simülasyon sürecinde üç adım gereklidir:

Adım 1 – rastgele girdi değişkenleri X üzerinde örnekleme,

Adım 2 –model çıktısı Y 'nin değerlendirilmesi ve

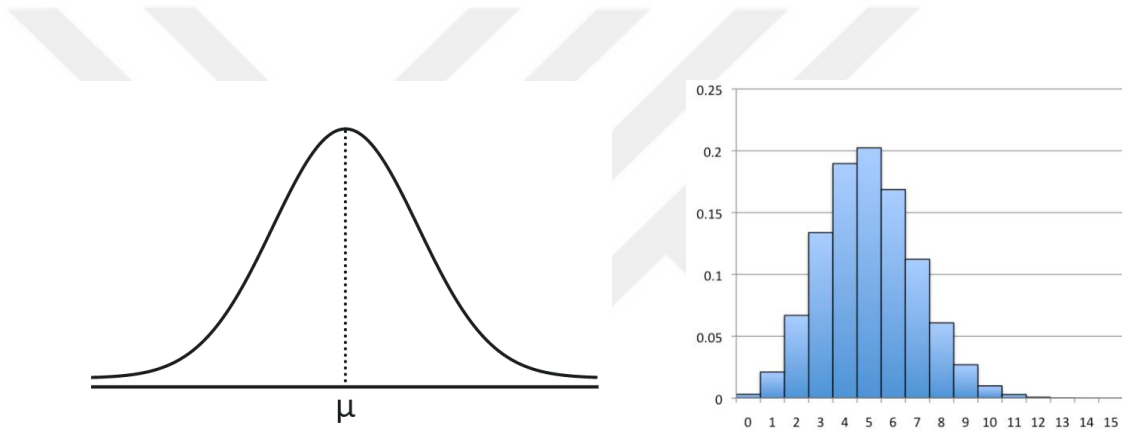
Adım 3 – model çıktısı üzerinde istatistiksel analiz.



Şekil 4.4. Monte Carlo Metodu akış şeması

Monte Carlo Metodunda kullanılan rassal sayıların bilinen olasılık dağılım fonksiyonlarına göre üretilmesi önemlidir. En yaygın olasılık dağılım fonksiyonları [113]:

Normal veya "çan eğrisi". Kullanıcı, ortalama veya beklenen değeri ve ortalama hakkındaki değişimi tanımlamak için bir standart sapmayı basitçe tanımlar. Ortalamaya yakın ortadaki değerlerin ortaya çıkma olasılığı daha yüksektir. Simetriktir ve insanların boyları gibi birçok doğal fenomeni tanımlar. Normal dağılımlarla tanımlanan değişkenlere örnek olarak enflasyon oranları ve enerji fiyatları dahildir [113].



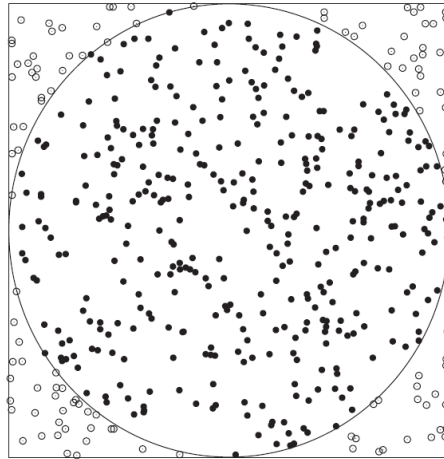
Şekil 4.5. Normal ve ayrık dağılım [113]

Ayrık dağılımda kullanıcı, meydana gelebilecek belirli değerleri ve her birinin olasılığını tanımlar. Örnek olarak bir davanın sonuçları verilebilir: %20 olumlu karar olasılığı, %30 olumsuz karar değişikliği, %40 uzlaşma olasılığı ve %10 yanlış yargılanma olasılığı. Monte Carlo simülasyonu sırasında, değerler giriş olasılık dağılımlarından rastgele örneklenir. Her örnek kümesine yineleme adı verilir ve bu örnekten elde edilen sonuç kaydedilir. Monte Carlo simülasyonu bunu yüzlerce veya binlerce kez yapar ve sonuç olası sonuçların bir olasılık dağılımıdır. Bu şekilde Monte Carlo simülasyonu, neler olabileceğine dair çok daha kapsamlı bir görünüm sağlar. Sadece ne olabileceğini değil, ne kadar olası olduğunu da söyler [113].

Monte Carlo yöntemleri, olağan istatistik problemini tersine çevirir: deterministik bir şekilde rastgele miktarları tahmin etmek yerine, deterministik miktarların tahminlerini sağlamak için rastgele miktarlar kullanılır. Örneğin, basit bir Monte Carlo deneyi, uzayın bir kare bölgesi üzerine rastgele düzenli olarak düşen yağmuru (yani, herhangi bir yağmur damlasının konumu, düzgün dağılmış bir rastgele değişkenin gerçekleştirilmesi olarak yorumlanabilir) ve bu karenin içine çizilmiş bir daireyi ele alır. Herhangi bir resmi olasılık teorisine başvurmadan, kare içindeki herhangi bir bölgeye düşen düzgün bir yağmur damlasının olasılığının, o bölgenin alanıyla orantılı ve konumundan bağımsız olması gerektiği sezgiseldir. Sonuç olarak, bir yağmur damlasının yazılı daire içinde olma olasılığı, p , alanları cinsinden ifade edilebilir. Karenin kenarları $2r$ ise, dairenin yarıçapı r olmalıdır ve [113]

$$p = \frac{\pi r^2}{(2r)^2} = \frac{\pi}{4} \quad (4.2)$$

Kendi içinde, bu özellikle ilginç görünmeyebilir. Bununla birlikte, π bu olasılığın bir fonksiyonu olarak ifade edildiğinde, tahmin edicileri π 'ye yaklaşmak için kullanılabilir. Analitik olarak ilerlemek mümkün değildir: olasılığı elde etmek π bilgisini gerektirir. Sezgisel olarak, daire içinde bulunan yağmur damlalarının oranını sayarak bu olasılığı tahmin etmek mümkündür: n tane yağmur damlası gözleniyorsa ve bunlardan m tanesi daire içinde bulunuyorsa, o zaman $p = m/n$ kullanılarak p tahmin edilebilir. Şekil 1, 500 yağmur damlasının bir kare üzerine düzgün bir şekilde dağıldığı bir bilgisayar simülasyonunu göstermektedir bu durumda, $p = 383/500$ ve p ve π arasındaki ilişki aracılığıyla tanımlayarak, $\pi = 383/125 = 3,06$ hesaplanmıştır. Şekil 4.6.'da rastgele hesaplama durumu gösterilmiştir. Kullanılan hesaplama çabası göz önüne alındığında, π 'nin zayıf bir tahmini, ancak yine de bir tahmindir. Aslında m , bir binom (n, p) rasgele değişkeninin gerçekleşmesidir. Rasgele üretilen sayı miktarı arttıkça π değeri, gerçek değer olan 3,14 değerine ulaşacaktır [113].



Şeıl 4.6. Monte Carlo Metodu ile π sayısını hesaplama yaklaşımı

4.2. Veri ve Senaryo

Elektrik enerjisinin üretiminde kullanılan PV panellerin ürettikleri enerji miktarı güneş ışığının panellere geliş açısına ve miktarına bağlı olarak değişir. Aynı zamanda elektrik fiyatları son kullanıcılarda sabit olarak görülseler de tedarikçilerde ve enerji borsasında sürekli değişkenlik arz etmektedir. Belirsizliğin olduğu durumlar deterministik olmayıp olasılığa (stokastik) bağlı çözümler üreterek tahmin yapması üzerine birçok kuram geliştirilmiştir.

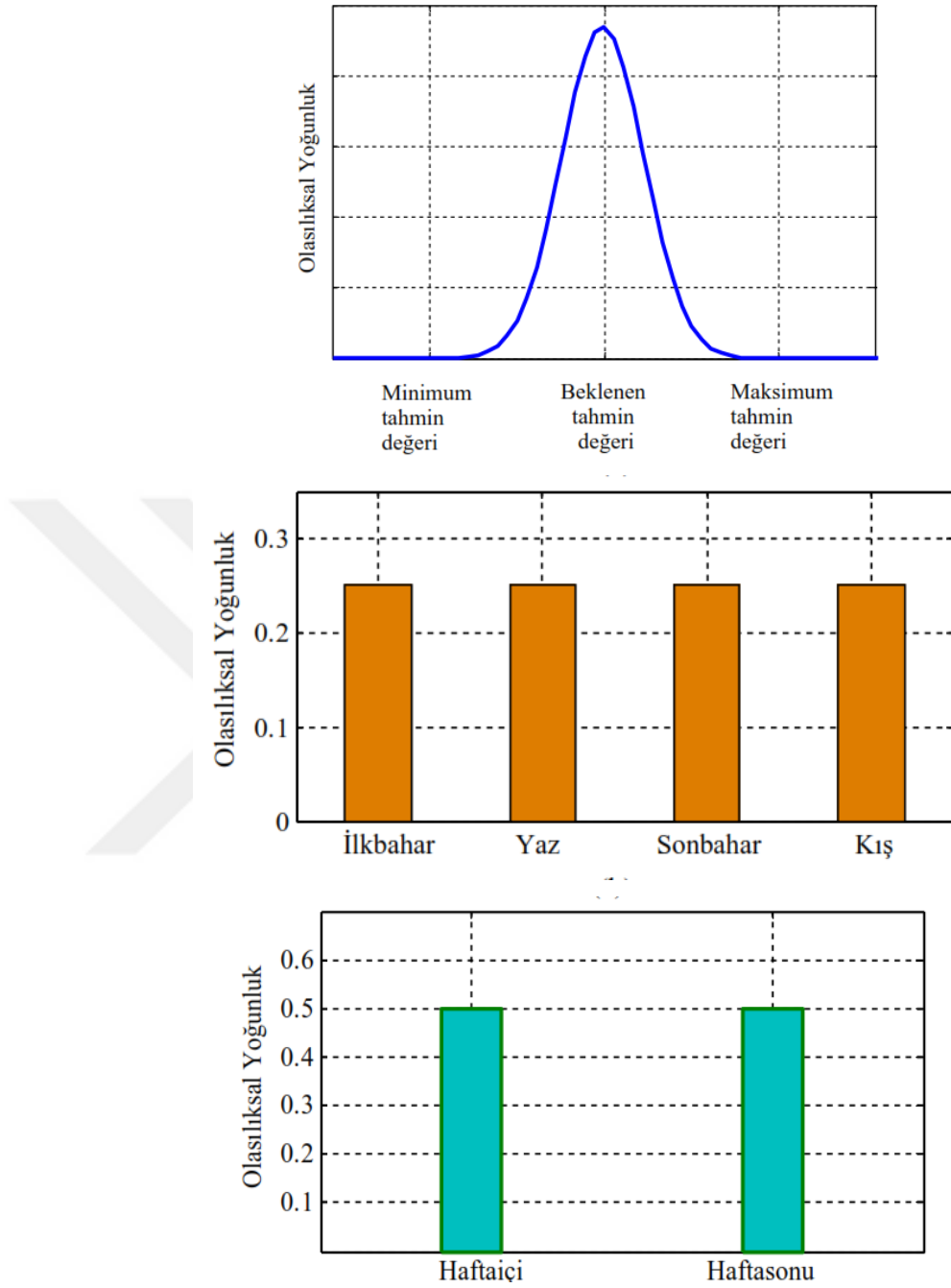
Olasılıkçı yaklaşım: Stokastik programlamadaki ilk çalışmalardan biri 1955'te Dantzig tarafından yapılmıştır [114]. Modelin girdi parametrelerinin, bilinen olasılık yoğunluk fonksiyonuna (probability density function PDF) sahip rastgele değişkenler olduğu varsayılmaktadır. Olabilirlikli yaklaşım: bulanık aritmetik 1965 yılında Lotfi A. Zadeh tarafından tanıtılmıştır [115]. Modelin girdi parametreleri, girdi parametrelerinin üyelik işlevi (Membership function MF) kullanılarak açıklanır. Tüm girdi verisi kümeleri için bir anlamda en iyi olan tek bir çözüme ulaşmak için, her girdi veri setiyle ilişkili bireysel çözümleri tam olarak ağırlıklandırarak (oluşma olasılıkları ile) bir stokastik optimizasyon problemi formüle edilebilir.

Bu aşamada, önerilen yaklaşımı yönlendirmek için gerekli veriler elde edilmiştir. Gerekli veriler iki gruba ayrılır: 1) DÜ ile ilgili veriler ve 2) akıllı ev optimizasyon verileri. DÜ

ile ilgili veriler; DÜ'nin izin verilen çalışma aralığını, DÜ'nin enerji kapasitesini, DÜ'nin izin verilen şarj durumunu (SoC), DÜ'nin dönüştürme verimliliğini, DÜ'nin ömür maliyet fonksiyonunu içerir. Akıllı ev işletim verileri için gerekli veriler; uzun dönem talep tahmini, mevsimsel yük profili (ilkbahar, yaz, sonbahar, kış) elektrik fiyatı, PV üretim miktarıdır. Akıllı ev işletim verileri elde edildikten sonra, belirsizliklerin makul şekilde gerçekleştirilmesini temsil eden bir dizi senaryo üretilir. Bunu yapmak için uygun olasılık dağılım fonksiyonu (PDF) belirsiz parametrelere; talep tahmini, mevsimsel yük profili, günlük yük profili, elektrik fiyatı, PV üretimi için ayrılmıştır. Talep tahmini, elektrik fiyatı, PV üretimi, normal dağılım fonksiyonu kullanılır. Bununla birlikte mevsimsel ve günlük yük profilleri için düzgün dağılım fonksiyonu öngörülmüştür. Bu çalışmada ele alınan PDF'ler Şekil 4.7.'de gösterilmiştir.

İstatistiksel örnekleme yapmak için bilgisayar kullanma fikri, elektronik hesaplamaların başlangıcına kadar uzanmaktadır. Stanislaw Ulam ve John Von Neumann, nötron zincir reaksiyonlarının davranışını incelemek amacıyla bu yaklaşıma öncülük etmişlerdir. Nicholas Metropolis, Ulam'ın şans oyunlarına olan düşkünlüğüne atıfta bulunarak bu metodoloji için Monte Carlo adını önermiştir [116].

Olasılıkçı metodlardan biri olan Monte Carlo Simülasyon yöntemi, doğasında belirsizlik faktörünün bulunduğu durumlar karşısında bir dizi değerleri olasılık dağılımı kullanarak bu faktörlerin yerine olası sonuçları modeller içinde inşa ederek risk analizi yapmamızı sağlayan bir tekniktir. Metodun bir probleme uygulanması problemin rassal sayıları kullanarak simüle edilip hesaplanmak istenen parametrenin bu simülasyon sonuçlarına bakılarak yaklaşık olarak hesaplanması fikrine dayanmaktadır. Daha sonra farklı olasılık fonksiyonları rastgele sayılar kümesi kullanılarak model içinde farklı sonuçları hesaplamaktadır. Monte Carlo Simülasyonu model için belirlenen aralık sayısına bağlı olarak binlerce hatta on binlerce veriyi kapsayabilmektedir. Bu veriler ışığı altında olası sonuçların dağılım değerleri üretilmesine olanak sağlamaktadır [117].



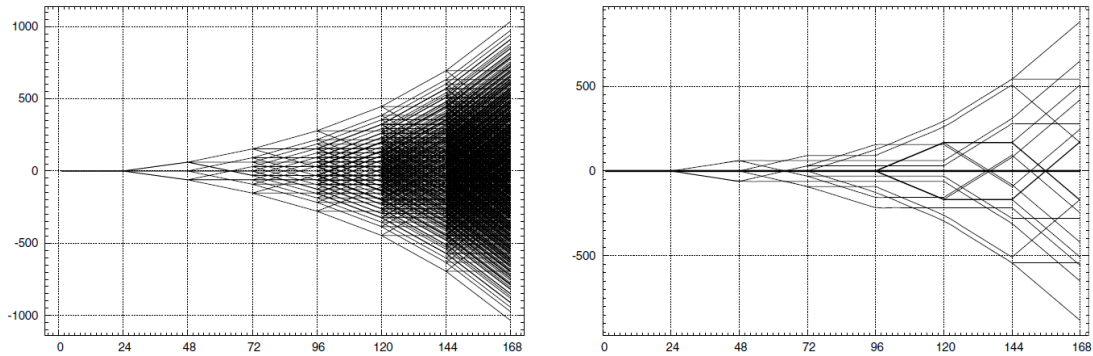
Şekil 4. 7. Bu çalışmada dikkate alınan PDF'ler: a) Talep tahmini, elektrik fiyatı, PV üretimi için sürekli normal dağılım fonksiyonu; b) Mevsimsel profil için ayrık düzgün dağılım fonksiyonu; c) Günlük yük profili için ayrık düzgün dağılım fonksiyonu

MCM, karmaşık amaç işlevlerinin optimizasyonu için güçlü bir araçtır. Birçok uygulamada, bu işlevler belirleyicidir ve rasgelelik, amaç işlevinin alanını daha verimli bir şekilde araştırmak için yapay olarak tanıtılmıştır. Monte Carlo algoritmaları basit, esnek ve ölçeklenebilir olma eğilimindedir. Fiziksel sistemlere uygulandığında, Monte

Carlo teknikleri karmaşık modelleri bir dizi temel olay ve etkileşime indirgeyerek, bir bilgisayarda verimli bir şekilde uygulanabilen bir dizi kural aracılığıyla model davranışını kodlama olasılığını açabilir [118]. Bir olasılık mesafesi, aynı stokastik süreci temsil eden iki farklı senaryo kümesinin yakınlığını ölçmemize izin verir [119].

İki aşamalı stokastik doğrusal programlama problemlerinde, bir olasılık mesafesi ile ölçülürse, büyük bir senaryo setini orijinal senaryoya yakın olan daha basit bir senaryoya düşürmek mümkündür. Problem verisindeki hafif koşullar altında, daha basit problemin (indirgenmiş senaryo setini içeren) optimal değerinin, orijinal problemin çözümünün değerine yakın olduğu gösterilebilir (orijinal senaryo setini dikkate alan) senaryo setleri böyle bir olasılık mesafesi açısından yeterince yakınsar. Şekil 4.8.'de örnek durum gösterilmektedir.

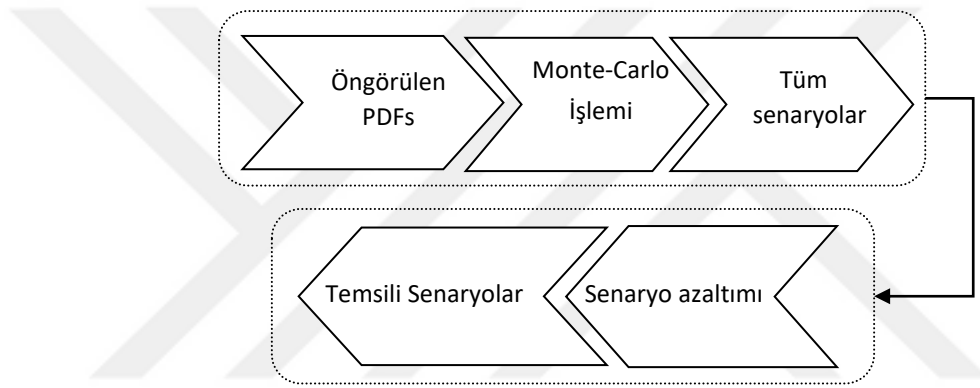
Bu yöntemler, rastgele oluşturulmuş büyük bir senaryo kümesinden başlar. Bu orijinal küme, belirli bir olasılık ölçüsüne göre nihai dağıtım işlevi orijinaline yeterince yakın olan yeni bir önceden belirlenmiş küme eleman sayısına indirgenmiştir [119].



Şekil 4. 8. Senaryo indirgeme yapısı

Pratikte birçok optimizasyon problemi oldukça fazla senaryo içermektedir, ancak oluşturulan programda zaman kısıtlaması meydana geldiğinden genelde model yaklaşımını içeren daha az sayıda senaryo işlenir. Bu çalışmada Matlab tabanlı senaryo indirgeme uygulamasında olasılıksal mesafe algoritması kullanılarak oluşturulacak senaryo sayısı azaltılmıştır. [119].

Şekil 4.7.'te öngörülen PDF'ler senaryo oluşturma için kullanılır. Tüm olası gerçekleştirmeleri karşılamak için, sorunun izlenebilirliğini olumsuz yönde etkileyen çok sayıda senaryo oluşturulmalıdır. Burada, ilk olarak Monte-Carlo işlemi kullanılarak oluşturulan 1.000.000 senaryo gibi birçok senaryo oluşturulmuştur. Daha sonra, senaryo sayısı makul bir sayıya indirgenmiştir, örneğin olasılık mesafe algoritması kullanılarak 20 temsili senaryo elde edilmiştir [119]. Senaryo oluşturma ve azaltma adımları, Şekil 4.9.'te gösterilmektedir.



Şekil 4. 9. Senaryo üretim ve azaltım işlemi

4.3. Uzun Süreli Operasyon Değerlendirmesi

Bu aşamada, DÜ'nin uzun dönem operasyonu değerlendirilir ve her senaryo için, ömrü boyunca DÜ'nin optimum operasyon stratejisi hesaplanır. Burada amaç, minimum güç dengesi ve izin verilen elementlerin çalışma aralığı ile ilgili teknik kısıtlamaları yerine getirirken asgari maliyeti elde etmektir. Problem şu şekilde formüle edilebilir:

$$\text{Min. OF}_{\omega} = \sum_{t \in I_t} \lambda_{t\omega}^{\text{Buy}} \cdot P_{t\omega}^{\text{Buy}} + \sum_{t \in I_t} \text{DCSD} \left(P_{t\omega}^{\text{SD-}} \right) \quad \forall \omega \in I_{\Omega} \quad (4.3)$$

$$P_{t\omega}^{\text{Gen}} - P_{t\omega}^{\text{Load}} = 0 \quad \forall t \in I_T, \forall \omega \in I_{\Omega} \quad (4.4)$$

$$P_{t\omega}^{\text{Gen}} = P_{t\omega}^{\text{Buy}} + P_{t\omega}^{\text{PV}} + P_{t\omega}^{\text{SD-}} \quad \forall t \in I_T, \forall \omega \in I_{\Omega} \quad (4.5)$$

$$P_{t\omega}^{Load} = P_{t\omega}^L + P_{t\omega}^{SD+} \quad \forall t \in I_T, \forall \omega \in I_\Omega \quad (4.6)$$

$$P_{t\omega}^L + P_{t\omega}^{SD+} - P_{t\omega}^{PV} - P_{t\omega}^{SD-} \geq 0 \quad \forall t \in I_T, \forall \omega \in I_\Omega \quad (4.7)$$

$$P_{t\omega}^{PV,Min} \leq P_{t\omega}^{PV} \leq P_{t\omega}^{PV,Max} \quad (4.8)$$

$$DCSD(P_{t\omega}^{SD-}) = a (P_{t\omega}^{SD-} + P_{t\omega}^{SD+})^2 + b(P_{t\omega}^{SD-} + P_{t\omega}^{SD+}) + c \quad \forall t \in I_T, \forall \omega \in I_\Omega \quad (4.9)$$

$$\sum_{t \in I_T} \alpha_{t\omega}^{SD} \leq MOT^{SD} \quad (4.10)$$

$$0 \leq P_{t\omega}^{SD+} \leq \alpha_{t\omega}^{SD} P^{SD+,Max} \quad (4.11)$$

$$0 \leq P_{t\omega}^{SD-} \leq \eta^{SD} (1 - \alpha_t^{SD}) P^{SD-,Max} \quad (4.12)$$

$$SoC_{t\omega}^{SD} = SoC_{(t-1)\omega}^{SD} + \frac{\eta^{SD} \Delta t}{E_{SD,Max}} (P_{(t-1)\omega}^{SD} - (\eta^{SD})^{-2} P_{(t-1)\omega}^{SD-}) \quad (4.13)$$

$$SoC^{SD,Min} \leq SoC_{t\omega}^{SD} \leq SoC^{SD,Max} \quad (4.14)$$

Denklem (4.3), her optimizasyon aşamasında optimize edilecek amaç fonksiyonunu göstermektedir. (4.3) 'deki ilk terim, giriş şebekeden enerji satın alınmasının maliyetidir. (4.3) 'deki ikinci terim, yani DCSD, SD'nin bozulma maliyeti işlevidir. Denklem (4.4), yükü, üretim ile nötralize eden düğüm güç dengesi ile ilgilenir. Bu çalışmadaki yük ve üretim elemanları (4.5) ve (4.6) ile gösterilmiştir. (4.7) 'de, akıllı evin şebeke üzerinden şebeke bakış açısından net bir yük olarak görülmesi garanti edilmektedir. Güneş sistemi ile ilgili izin verilen çalışma aralığı (4.8) ile modellenmiştir. Amaç fonksiyonunda kullanılan bozulma maliyeti fonksiyonu (4.9) ile hesaplanmaktadır. (4.10) 'de, DÜ'nin ömür boyu kısıtlaması modellenmiştir; bu durum, DÜ'nin toplam şarj/deşarjının (çalışması) önceden tanımlanmış bir değerle sınırlı kalmasını zorunlu kılar. (4.10) 'de kullanılan binary $\alpha_{t\omega}^{SD}$ değişken (4.11) ve (4.12) ile hesaplanır. (4.11) ve (4.12) 'de, $\alpha_{t\omega}^{SD}$, şarj/deşarj olaylarını kontrol eder ve aynı anda hem şarj hem dedeşarj seçeneklerinin etkinleştirilmesini önler. Her zaman periyodunda depolanma durumu (SoC) (4.13) ve (4.14) ile hesaplanır, SoC üzerindeki sınırlamaları modeller.

Tasarlanan optimizasyon modelinin ana parametreleri, elektrik fiyatı ve DÜ'nin derecelendirilmiş parametreleridir. Elektrik fiyatı için, Şekil 4.3'te gösterilen olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılarak makul senaryolar üretilmiştir.

Optimizasyon modeli geliştirildikten sonra, (4.3), (4.4) - (4.14) 'ye tabi olarak çözülür. Bu modelin çözümü, yani DÜ'nin taahhüt durumu ve DÜ'nin şarj/deşarj miktarıdır. Önerilen yöntemde, önerilen optimizasyon modelinin sonucunu, fiyat ofseti ve fiyat esnekliği parametreleri dahil edilerek gerçekleştirilen DÜ operasyonuna karar vermek için basit endekslere dönüştürmeye çalışıldı. Bu bağlamda, uzun vadeli DÜ operasyon optimizasyonunun çözümü, günlük fiyat ile DÜ taahhüt durumu arasında doğrusal bir ilişki kurmak için kullanılır. Tanımlanmış doğrusal modelde, ulaşılan çizginin x-kesişi ve eğimi sırasıyla fiyat dengesi ve fiyat esnekliği olarak adlandırılır.

Yukarıdaki ifade matematiksel olarak ifade edilirse:

$$\lambda = P \times C \quad (4.15)$$

Burada,

$$\lambda = [\lambda_{1\omega}^{\text{Buy}} \ \lambda_{2\omega}^{\text{Buy}} \ \dots \ \lambda_{24\omega}^{\text{Buy}}]^T \quad \forall \omega \in I_{\Omega} \quad (4.16)$$

$$P = \begin{bmatrix} P_{1\omega}^{SD} & P_{2\omega}^{SD} & \dots & P_{24\omega}^{SD} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T \quad \forall \omega \in I_{\Omega} \quad (4.17)$$

$$P_{t\omega}^{SD} = P_{t\omega}^{SD+} + P_{t\omega}^{SD-} \quad \forall \omega \in I_T, \forall \omega \in I_{\Omega} \quad (4.18)$$

$$C = \begin{bmatrix} \beta_{\omega} \\ \Psi_{\omega} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

(4.19) 'de β_{ω} ve Ψ_{ω} sırasıyla fiyat esnekliği ve fiyat dengelemesidir. Denklemler (4.15) - (4.19), fiyat esnekliğini ve fiyat dengesini hesaplamak için önerilen doğrusal modeli temsil eder. Burada (4.16) her senaryo için bilinen saatlik elektrik fiyatının vektörüdür.

(4.17), (4.4) - (4.14) 'ye tabi olan (4.3)' in çözülmesi ile elde edilen DÜ şarj ve deşarj matrisidir. (4.19), şarj / deşarj durumu ile tutarı elektrik fiyatına bağlayan katsayıların vektörüdür. Burada, (4.16) saatlik elektrik fiyatı vektörü, (4.17) DÜ şarj ve deşarj matrisidir ve (4.19) katsayılar vektörüdür. Senaryo için, saatlik elektrik fiyatı vektörü giriş verilerinden bilinir. Öte yandan, DÜ şarj ve deşarj elemanları (4.4) - (4.14) 'ye tabi olan çözümden (4.3) bilinmektedir. Bilinmeyen parametreler, maksimum olabilirlik yaklaşımını belirlemek için en küçük kareler hata yaklaşımının uygulandığı katsayıların vektörüdür:

$$\begin{bmatrix} \beta_{\omega} \\ \Psi_{\omega} \end{bmatrix} = [P^T P]^{-1} P^T \lambda \quad (4.20)$$

Başka bir deyişle, β_{ω} ve Ψ_{ω} , fiyat esnekliği ve fiyat farkı olarak, şarj / deşarj durumu ile elektrik fiyatı miktarı arasında doğrusal bir bağlantı kurar. Pratik açıdan, önerilen fiyat ofset parametresi ((4.20) 'de hesaplanan Ψ_{ω}), ücretlendirme ve deşarj bölgelerini ayırt eder. Belirlenen fiyat farkından daha düşük fiyatlar için DÜ şarj etmeye başlar ve fiyat farkından yüksek olan fiyatlar için DÜ generatör görevi görür ve deşarj olur. Şarj ve deşarj miktarı, fiyat esnekliği parametresi, yani (4.20) 'deki β_{ω} parametresi ile belirlenir.

Senaryo ω için fiyat esnekliği ve fiyat farkı hesaplandıktan sonra, kısa vadeli operasyon kararları için kullanılan, (4.21) ile temsil edilen siparişle bir arama tablosu geliştirilir. Bir tablo geliştirmenin ana nedeni, önerilen yöntemin hanehalkı düzeyindeki küçük ölçekli DÜ'lerde uygulanmasını kolaylaştırmaktır.

$$LT_{\omega} = [\sigma_{\omega} \ \mu_{\omega} \ \beta_{\omega} \ \Psi_{\omega}] \quad (4.21)$$

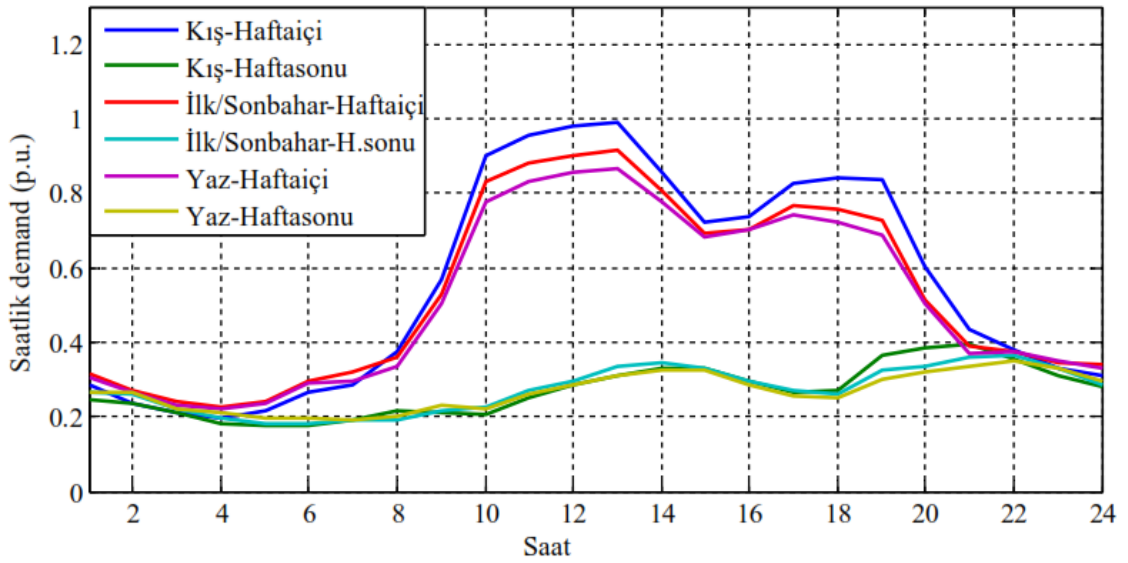
Burada LT_{ω} ω senaryosunda sorgu tablosuna karşılık gelen ögedir ve σ_{ω} ve μ_{ω} incelenen gün elektrik fiyatının standart sapması ve ortalamasıdır.

4.4. Kısa Dönem Operasyon için Karar Verme

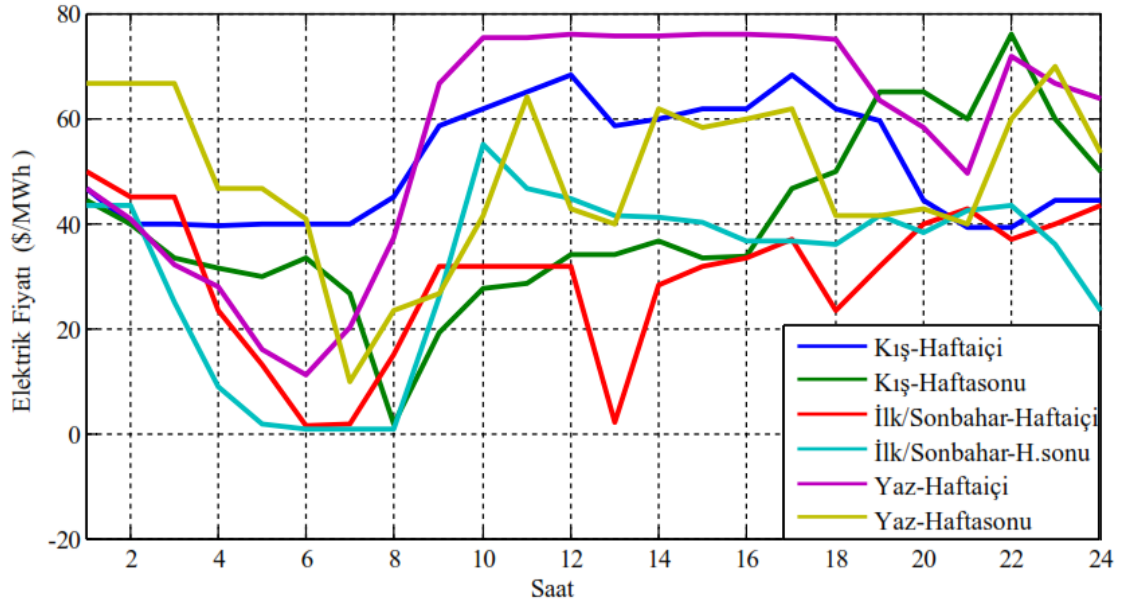
Bu aşamada, kısa dönem operasyon için karar alma gerçekleştirilir. Bunu yapmak için, gün öncesi aşamasında fiyat tahmini elde edilir. Daha sonra, elektrik fiyatının standart

sapması ve ortalaması hesaplanır ve ilgili fiyat esnekliği ve fiyat dengesi, (4.19) tarafından sunulan sorgu tablosundan uyarlanır.

Önerilen yaklaşımın performansını sayısal çalışmalar aracılığıyla incelemektedir. Bu açıdan ilk olarak, genel altı günlük yük (mevsimler: kış, yaz ve ilkbahar / sonbahar, günler: hafta içi, hafta sonu) ve saatlik çözünürlükte elektrik fiyatı profilleri sırasıyla Şekil 4.10. ve Şekil 4.11.'de gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Dağıtım şirketlerinin bölgelerinde tipik günlük yük eğrileri, hafta içi ve hafta sonları için erişime açıktır. Burada kullandığımız yük eğrisi ve veriler Elektrik Piyasası Düzenleme Kurumlarından (EPDK) alınmıştır [120], [121]. Buna ek olarak, fiyat profillerinin 4 adımda günlük ortalama fiyatın 40-55 \$ / MWh aralığını temsil ettiği ve günlük fiyat standart sapmasının 2,5-12,5 \$ / MWh aralığını 2018 yılı reel gün öncesi piyasa fiyatları için beş aşamalı günlük fiyat standart sapma ile temsil ettiği varsayılmıştır [122].

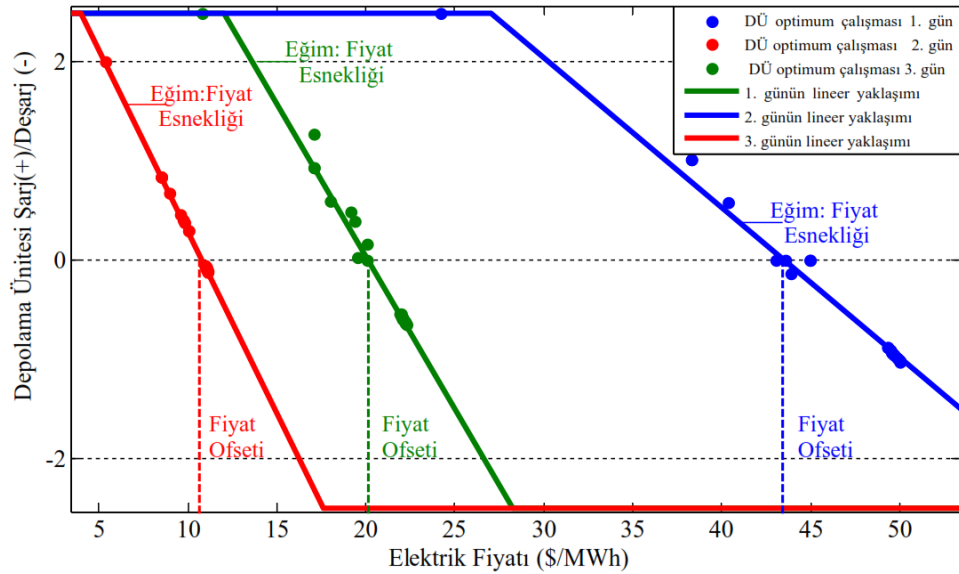


Şekil 4. 10. Mevsimsel günlük yük değişimi



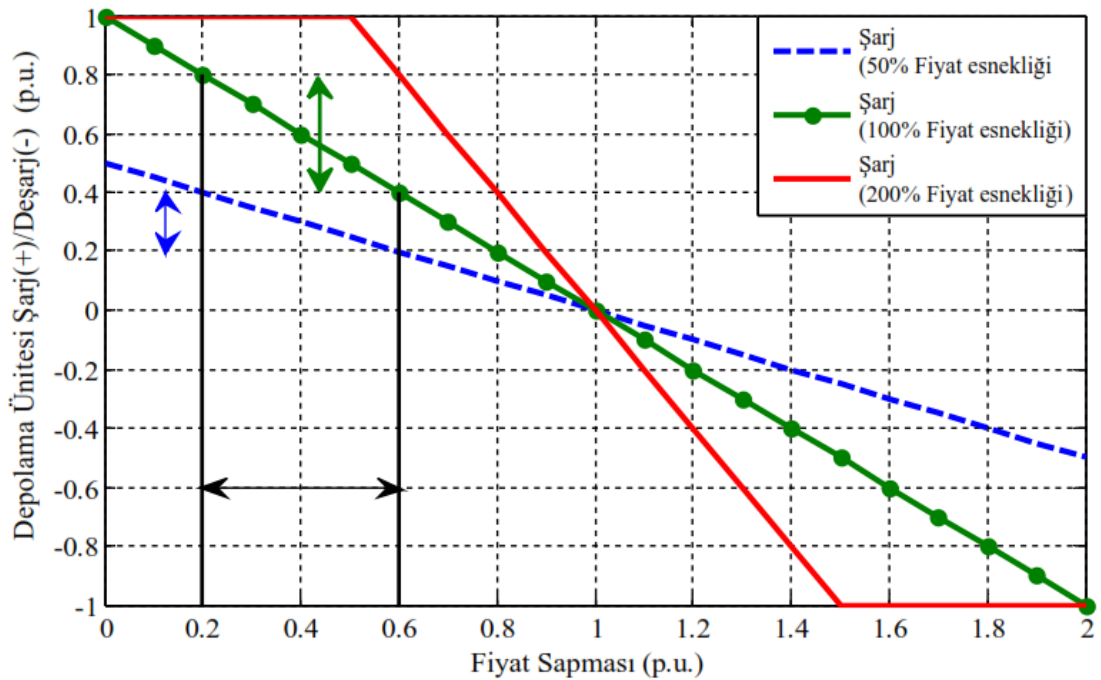
Şekil 4. 11. Günlük piyasa takas fiyatının değişimi

Sayısal çalışmalarda, bir hanehalkı yıllık pik talebi 20 kW, PV kurulumu 8 kW ve 2.5 kW ile 10 kWh Lityum İyon batarya bazlı DÜ kurulumu dikkate alınarak modellenmiştir. Uzun vadeli kısıtlamaları temsil etmek için hesaplama ufku 10 yıl olarak tanımlanmıştır. DÜ kuruluş maliyeti 100/200/400/600/800 \$/kWh olarak değiştirildi. Uzun vadeli değerlendirme için simülasyon çalışmalarının sonucu üç örnek gün için Şekil 4.12'de gösterilmektedir.



Şekil 4. 12. DÜ'nin şarj-deşarj durumunun piyasa takas fiyatına göre değişimi

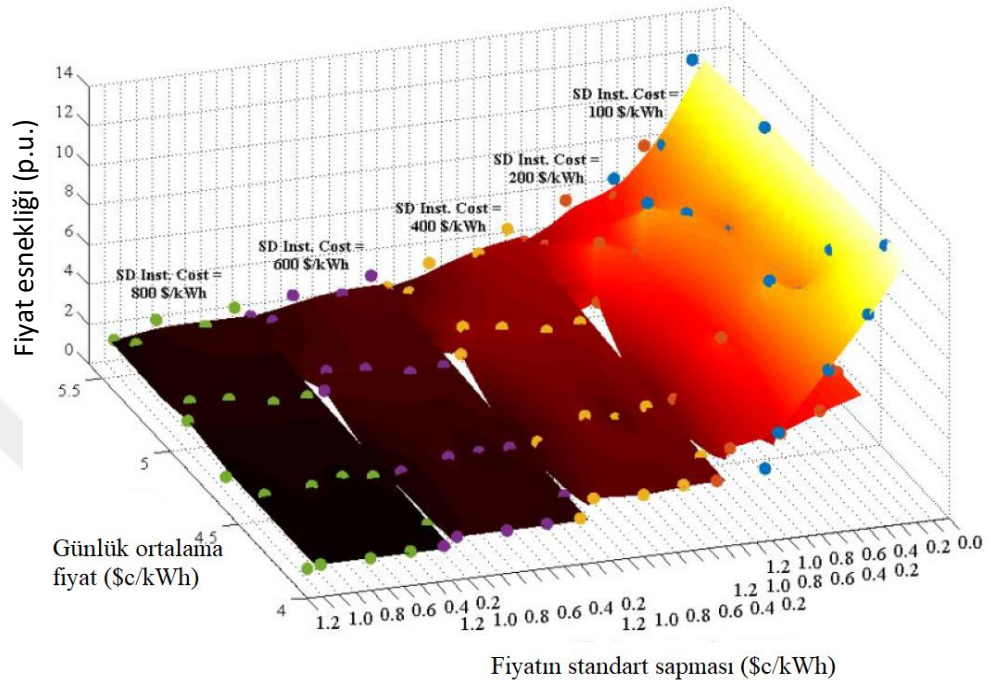
Şekil 4.12'den görülebileceği gibi, her gün için DÜ'nin optimal programlaması, (4.15) - (4.19) 'de önerilen doğrusal yaklaşımın etkinliğini ima eden fiyat değişikliklerine karşı doğrusal bir model izler. Burada, fiyat ofset göstergesi, DÜ denetleyicinin şarj modundan deşarj moduna veya tam tersi şekilde geçtiği sınırı gösterir. Bu nedenle, fiyat ofseti, DÜ'yi şarj etmeye veya deşarj etmeye karar verdiği DÜ denetleyici için eşik değeri olarak düşünülebilir. Mod tanımlamasının ardından, fiyat esnekliği ile ücret/deşarj miktarı belirlenir. Şekil 4.12.'den görülebileceği gibi, fiyat esnekliği önerilen doğrusal yaklaşımın eğimidir. Daha fazla ayrıntı sunmak için, Şekil 4.12.'deki simüle edilmiş durumların sonucu, fiyattaki birim sapmaya karşı Şekil 4.13.'de gösterilmektedir.



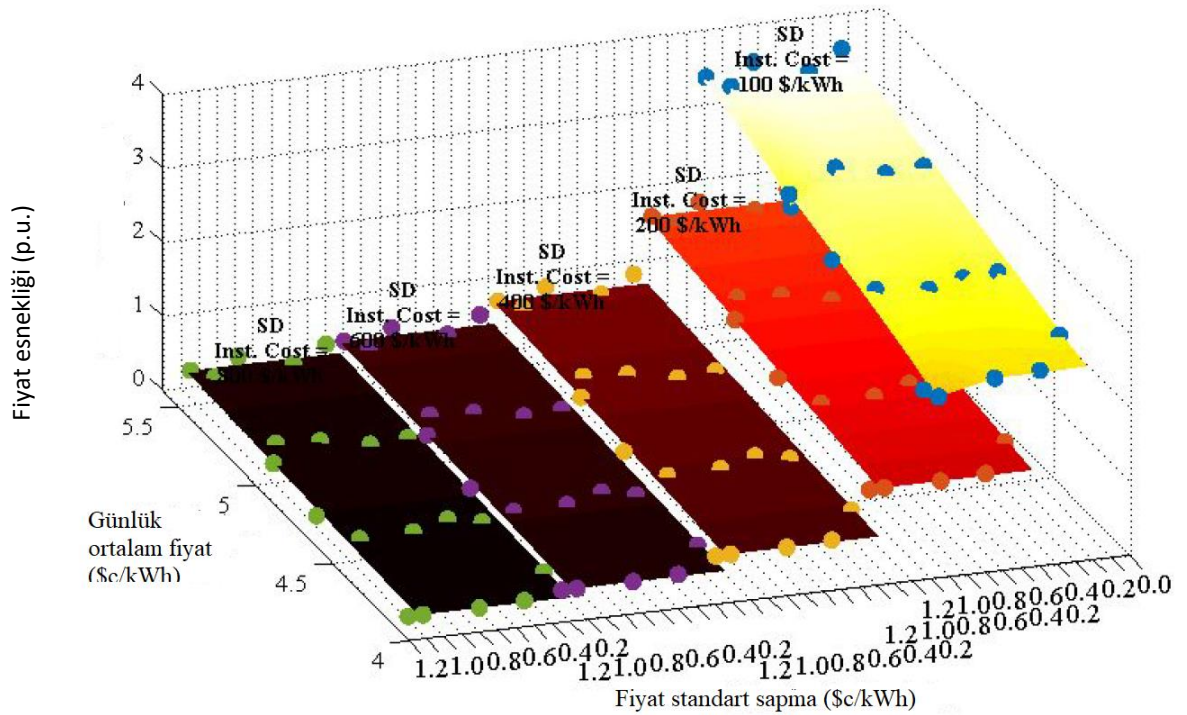
Şekil 4.13. DÜ'nin fiyat sapmasına bağlı değişimi

Görülebileceği gibi, elektrik fiyatındaki 0.4'lik artış, yani Şekil 4.13'deki siyah çift ok, % 50 fiyat esnekliği kullanılırsa, DÜ'nin (mavi çift ok) şarjında 0.2 p.u. azalma ile sonuçlanır. Bununla birlikte, % 100 fiyat esnekliği sayesinde, elektrik fiyatındaki 0,2 'lik artış, DÜ şarjında 0,4 p.u. azalmaya katkıda bulunur (yeşil çift ok). Bu gözlemlere dayanarak, fiyat esnekliğini değiştirdikçe, DÜ'nin izin verilen miktar yükü şarj/deşarjının değiştiği sonucuna varılabilir. Günlük elektrik fiyatı, DÜ kurulum

maliyeti ve fiyat esnekliği arasındaki ilişkiyi bulmak için kapsamlı simülasyon çalışmaları yapılmıştır.



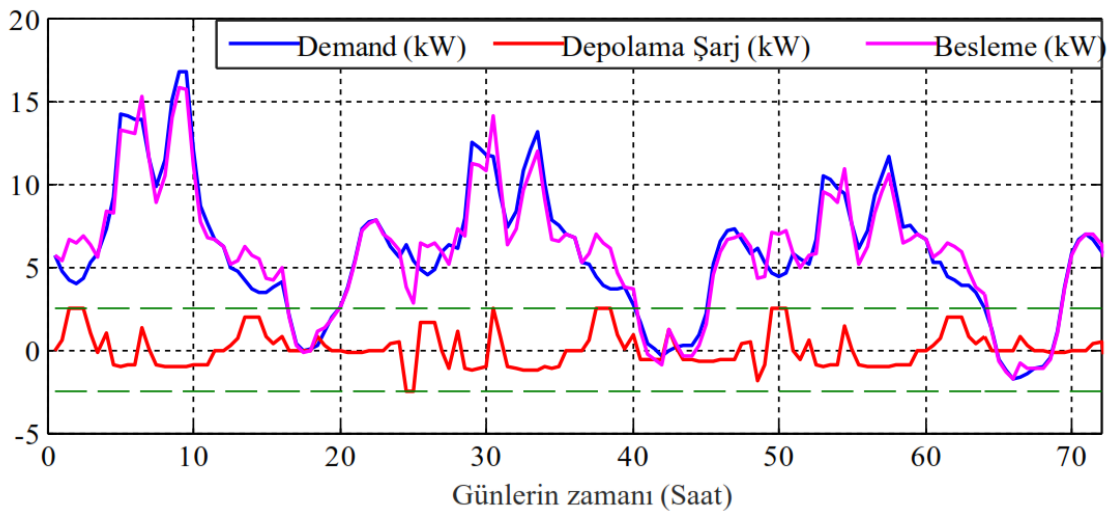
Şekil 4. 14. Değişik günlük elektrik fiyatları ve DÜ yıllık tepe yüke göre %5 sapması durumunda kurulum maliyeti için yapılan simülasyon



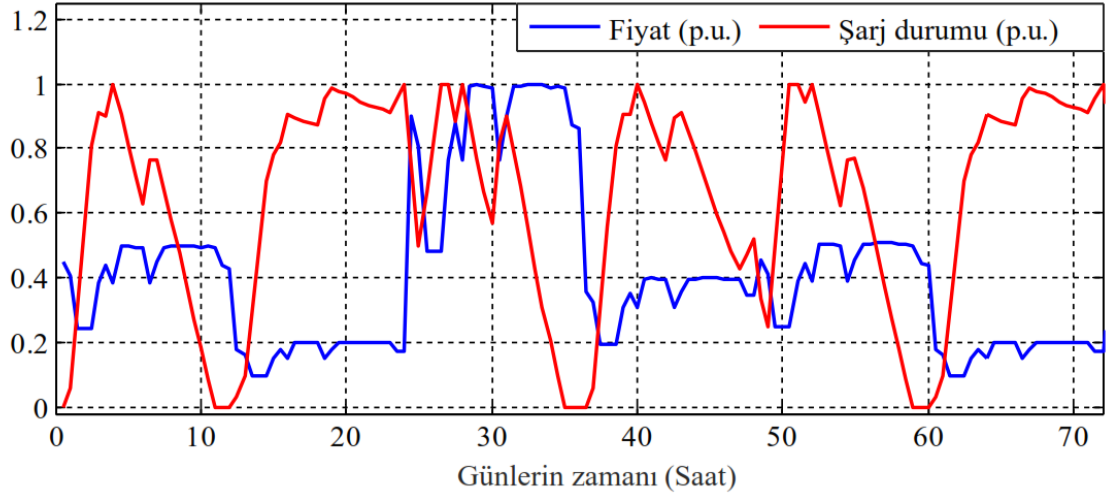
Şekil 4. 15. Değişik günlük elektrik fiyatları ve DÜ yıllık tepe yüke göre %25-30 sapması durumunda kurulum maliyeti için yapılan simülasyon

Şekil 4.14. standart yük sapmasının % 5 (yıllık tepeye göre) olduğu bir hafta sonu günü için optimum fiyat esnekliğini göstermektedir. Şekil 4.15. yük gün boyunca neredeyse sabitse, fiyat sapmalarının fiyat esnekliği seçimini etkilemediğini gösterir. Bununla birlikte, kurulum maliyetinin fiyat esnekliği seçimi üzerinde güçlü bir etkisi vardır. Kurulum maliyeti arttıkça, optimum fiyat esnekliği azalır, bu da DÜ'nin fiyat sapmalarına karşı duyarlılığını azaltır. Aksine bir durum olarak, Şekil 4.15'de, yükün standart sapması % 25-30 mertebesinde. Burada, optimum planlama, daha yüksek fiyat esnekliği değerleri ile çok daha duyarlı özellikleri gösterir. Ayrıca, DÜ kurulum maliyeti düştükçe fiyat esnekliği ikinci dereceden artma eğilimindedir. Bu, pratik olarak kurulum maliyetleri düştükçe DÜ'lerin cihazdan elde edilen faydayı artırmak için daha agresif bir şekilde kullanılabileceğini ima eder; yaşam süresiyle ilişkili maliyetler ise nispeten azalacaktır.

Önerilen yöntem ve fiyat dengesi ve fiyat esnekliği sayesinde DÜ'nin kısa sürede optimum çalışması sağlanabilir. Şekil 4.16. ve 4.17. birbirini takip eden üç gün içinde DÜ'nin çalışmasını göstermektedir. Görülebileceği gibi, DÜ'nin şarj / deşarj modeli, elektrik fiyatı ve yükün günlük özellikleri değiştikçe her gün farklıdır.



Şekil 4. 16. Depolama ünitesinin demanda göre kısa süreli çalışma durumu



Şekil 4. 17. Depolama ünitesinin fiyata göre kısa süreli çalışma durumu

5.BÖLÜM

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

5.1. Sonuç ve Değerlendirme

Almanya'nın fosil yakıtlardan ve nükleer enerjiden enerji üretimi karşısında başlatmış olduğu yeşil devrim dünya genelinde hızla yayılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklardan enerji üretimi getirdiği birçok avantajın yanında bir çok dezavantajda getirmektedir. Bu dezavantajlardan en önemlileri; yenilenebilir kaynaklardan enerji üretiminin düzensiz olması ve California da yaşanan Ördek Etkisi Fenomenidir. Yenilenebilir kaynakların oluşturduğu bu olumsuzlukların giderilmesi ve etkin bir şekilde yönetilebilmeleri için enerji depolama üniteleri ile birlikte kullanılmaları kaçınılmazdır. Değişen ve gelişen enerji piyasası yapısı içerisinde her paydaşın katılımını sağlayan akıllı şebeke yapısı içerisinde depolama sistemlerinin etkin yönetimi sayesinde üretüketiciler kar getirisinin yanı sıra PV-batarya depolama varlıklarının en optimum şekilde ve sürede kullanımını beklemektedirler.

Bu çalışma, üç aşamalı fiyat-elastik yaklaşımıyla kısa ve uzun dönem kısıtlamaları göz önünde bulundurarak en uygun DÜ planlamasını ele almıştır. Çalışmanın ana motivasyonu, DÜ yaşam süresi ve kurulum maliyeti ile ilgili uzun dönem kısıtlamaları göz önünde bulundurarak bir DÜ'nin elektrik maliyetini en aza indirecek şekilde nasıl planlanabileceği sorusuna cevap vermektir. Burada, DÜ'nin uzun dönem çalışması optimize edilerek hesaplanan iki gösterge, yani fiyat dengesi ve fiyat esnekliği sunulmaktadır. Bunun için, uzun dönem optimizasyon sonuçlarını fiyat dengelemesine ve fiyat esnekliğine dönüştüren doğrusal bir yaklaşım önerilmektedir. Burada, fiyat dengesi, DÜ'yi şarj etmeye veya deşarj etmeye karar verdiği DÜ denetleyici için eşik değeri olarak kabul edilir. Şarj / deşarj miktarı fiyat esnekliği ile belirlenir. Simülasyon çalışmalarına dayanarak şu sonuçlara varılabilir:

- 1) DÜ'nin her gün boyunca optimal planlaması, önerilen doğrusal yaklaşımın etkinliğini ima eden fiyat değişikliklerine karşı doğrusal bir model izler,
- 2) Fiyat esnekliğini değiştirdikçe izin verilen miktar ücreti DÜ'nin deşarjı değişir,
- 3) Yük gün boyunca neredeyse sabitse, fiyat sapmaları fiyat esnekliğinin seçimini etkilemez,
- 4) Kurulum maliyeti arttıkça, optimum fiyat esnekliği azalır, bu da DÜ'nin fiyat sapmalarına yanıt vermesini azaltır,
- 5) Fiyat esnekliği, DÜ kurulum maliyeti düştükçe ikinci dereceden şekilde artma eğilimindedir, bu da kurulum maliyetleri düştükçe DÜ'lerin cihazdan fayda sağlamak için daha agresif bir şekilde kullanılabileceğini öngörülmektedir.

Değişen ve gelişen teknolojiye bağlı olarak Li-ion bataryaların akıllı ev ve akıllı şebeke yapısı içerisinde uygulamaları yaygın olarak artacaktır. Gelişen yapıya bağlı olarak sanal yük santralleri ile üretüketicilerin tek merkezden yönetildiği mikroşebeke yapıları sayesinde teknik kayıplar azalarak kendi kendine yetebilen şebeke yapılarının ortaya çıkacağı öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

1. Akhil A.A., Huff G., Currier A.B., Kaun B.C., 2015. DOE/EPRI Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA. SANDIA National Laboratories, New Mexico, 347 pp.
2. Yan L., Baek M.K., Park J. B., Park Y.G., Roh J. H., 2017. An optimal energy storage operation scheduling algorithm for a smart home considering life cost of energy storage system. **Journal of Electrical Engineering and Technology** 12(4): 1369-1375.
3. Abdulla K., Hoog J.D., Muenzel V., Suits F., Steer K., Wirth A., Halgamuge S., 2018. Optimal Operation of Energy Storage Systems Considering Forecasts and Battery Degradation. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 9 (3): 2086-2096.
4. Zhou C., Qian K., Allan M., Zhou W., 2011. Modeling of the cost of EV battery wear due to V2G application in power systems. **IEEE Transactions On Energy Conversion**, 26 (4) : 1041-1050.
5. Ramadass P., Haran B., Gomadam P.M., White R., Popov N. B., 2004. Development of first principles capacity fade model for li-ion cells. **Journal of The Electrochemical Society**, 151(2): 196-203.
6. Koller M., Borsche T., Ulbig A., Andersson G., 2013. Defining a Degradation Cost Function for Optimal Control of a Battery Energy Storage System. 1-6 , 2013 *IEEE Grenoble Power Tech Conference*.
7. Tran D., Khambadkone A. M., 2013. Energy management for lifetime extension of energy storage system in micro-grid applications. **IEEE Transactions on Smart Grid** 4(3):1289-1296
8. Muenzel V., Hoog J., Brazil M., Vishwanath A., Kalyanaraman S., 2015. A Multi-Factor Battery Cycle Life Prediction Methodology for Optimal Battery Management. Pp. 57-66 . *Proceedings of the 2015 ACM Sixth International Conference on Future Energy Systems*.
9. Uno M., Kukita A. 2015. Cycle life evaluation based on accelerated aging testing for lithium-ion capacitors as alternative to rechargeable batteries. **IEEE Transactions on Industrial Electronics** 63 (3) : 1607-1617.

10. Zhang L., Mu Z., Sun C., 2018. Remaining useful life prediction for lithium-ion batteries based on exponential model and particle filter. **IEEE Access**, **6**:17729-17740
11. Zhu D., Hug G., 2014. Decomposed stochastic model predictive control for optimal dispatch of storage and generation. **IEEE transactions on smart grid**, **5** (4): 2044-2053.
12. Gast N., Tomozei D. C., Boudec J. Y., 2014. Optimal generation and storage scheduling in the presence of renewable forecast uncertainties. **IEEE transactions on smart grid**, **5** (3) : 1328-1339.
13. Bloom I., Colea B.W., Sohna J., Jonesa A., Polzina G., Battagliaa S., Henriksena L., 2001. An accelerated calendar and cycle life study of Li-ion cells. **Journal of Power Sources** **101** (2) : 238-247.
14. Förstl M., Azuatalam D., Chapman A., Verbič ., Jossen A., Hesse H., 2019. Assessment of residential battery storage systems and operation strategies considering battery aging. **International Journal of Energy Research** : 1-14.
15. Kahrobaee S., Asgarpour S., Qiao W., 2013. Optimum sizing of distributed generation and storage capacity in smart households. **IEEE transactions on smart grid**, **4** (4) : 1791-1801.
16. Gibson L.T., Kelly A.N., 2010. Solar photovoltaic charging of lithium-ion batteries. **Elsevier Journal of Power Sources** **195**: 3928-3932.
17. Teng J.H., Luan S. W., Lee D. J., Huang Y. Q., 2012. Optimal charging/discharging scheduling of battery storage systems for distribution systems interconnected with sizeable pv generation systems. **IEEE Transactions on Power Systems** **28** (2): 1425-1433.
18. Arora M., Chanana S., 2014. Residential demand response from PV panel and energy storage device. 1-6 pp. *IEEE 6th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, Kurukshetra.
19. Zhuang P., Liang H., 2015. Energy storage management in smart homes based on resident activity of daily life recognition. 641-646 pp. *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Miami.
20. Kanevskii L. S., Dubasova V. S., 2005. Degradation of lithium-ion batteries and how to fight it: a review. **Russian Journal of Electrochemistry** **41** (1): 1-16.

21. Smith K., Saxon A., Keyser M., Lundstrom B., Cao Z., Roc A., 2017. Life Prediction Model for Grid-Connected Li-ion Battery Energy Storage System. 4062-4068 pp. *2017 American Control Conference*. Seattle.
22. Tang R., Yildiz B., Leonga P.H.W., Vassalloe A., Dored J., 2019. Residential battery sizing model using net meter energy data clustering. **Elsevier Applied Energy** **251**: 113324.
23. Ahmed A.S., Raihan A.S., Balasingam B., 2020. A scaling approach for improved state of charge representation in rechargeable batteries. **Elsevier Applied Energy** **251** : 114880.
24. Sun F., Xiong R., He H., Li W., Aussems E., Model-based dynamic multi-parameter method for peak power estimation of lithium-ion batteries. **Elsevier Applied Energy** **96** : 378-386.
25. Ketjoy N., 2014. Comparison the economic analysis of the battery between lithium-ion and lead-acid in PV stand-alone application. **Elsevier Energy Procedia** 56 : 352 – 358.
26. Wenzla H., Baring-Gouldb I., Kaiserc R., Liawd B.Y., 2005., Life prediction of batteries for selecting the technically most suitable and cost effective battery. **Elsevier Journal of Power Sources** **144** :373–384.
27. Uddin, K., Perera, S., Widanage, W.D., Somerville, L., Marco, J. 2016. Characterising lithium-ion battery degradation through the identification and tracking of electrochemical battery model parameters. **Batteries**, **2** (3): 1-17.
28. Wang S., Guo D., Han X., Lu L., 2020. Impact of battery degradation models on energy management of a grid-connected DC microgrid. **Elsevier Energy** **207** (118228): 1-16.
29. Kalenderli, Ö., 2014. Yıldırım boşalması ve yıldırımdan korunma Web sayfası: https://web.itu.edu.tr/kalenderli/Yildirimdan_Korunma_Kalenderli.pdf, (Erişim Tarihi: Eylül 2020).
30. Math/Science Nucleus, 2019. Applied science – physics 4 A Web sayfası: https://msnucleus.org/membership/html/k-6/as/physics/4/asp4_3a.html, (Erişim Tarihi: Eylül 2020.)
31. Gönen,T., 2014, Electric Power Distribution Engineering, Third Edition. CRC Press, New York, 1049 pp.

32. Kaya, F., 2017. Elektrik Tedarikçilerinin Optimum Alış Stratejilerinin Belirlenmesi İçin Bir Optimizasyon Modeli, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 79 s.
33. Atiyas, İ., Elektrik Sektöründe Serbestleşme ve Düzenleyici Reform. TESEV Yayınları, İstanbul, 116 s.
34. TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, 2012, Elektrik Özelleştirme Raporu, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, Ankara, 48 s.
35. Gürbüz, A., 2006. Elektrik Sektöründe Özelleştirme ve Türkiye’de Serbest Tüketici Uygulaması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 156 s.
36. Institute for Energy Research, History of electricity, https://www.instituteforenergyresearch.org/history-electricity/?_cf_chl_captcha_tk, (Erişim Tarihi: Ağustos 2020.)
37. EPDK, 2003. Elektrik Piyasası Uygulama El Kitabı, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Ankara, 53 s.
38. Çetintaş, H., Bicil, İ.M., 2015. Elektrik piyasalarında yeniden yapılanma ve Türkiye elektrik piyasasında yapısal dönüşüm. **Optimum Ekonomi ve Yönetim Bilimleri Dergisi**, 2 (2) : 1-15.
39. Türkiye Enerji Piyasasının Geleceği Çalışma Grubu, 2018. Türkiye Enerji Piyasaları Araştırma Raporu, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 55 s.
40. Tatlı, B., 2018. Türkiye elektrik pazarında güncel gelişmeler ve Avrupa Birliği komisyonunun cez kararı . **İnönü Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi**, 9 (1) : 77-104.
41. Weigt, H., 2009. A Review of Liberalization and Modeling of Electricity Markets, Munich Personal RePEc Archive, Dresden, 43 pp.
42. EMO, 2015. Enerji Politikaları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Elektrik Mühendisleri Odası, İstanbul, 190 s.
43. MMO, 2018. Türkiye’nin Enerji Görünümü, Makine Mühendisleri Odası, Ankara, 319 s.
44. Palz W., 2014, Solar Power for the World, CRC Press, New York, 795 pp.
45. KPMG, 2019. Sektörel Bakış-Enerji, KPMG-Türkiye, 34 s.
46. IRENA, 2018. Renewable Power Generation Costs In 2018, International Renewable Energy Agency, 88 pp.

47. Biçen, Y., 2016. Türkiye elektrik enerjisi piyasası gelişim süreci: gün öncesi ve dengeleme güç piyasası özellikleri. **Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi**, 6 (2): 432-438.
48. Shahidehpour M., Clair J.F., 2012. A Functional microgrid for enhancing reliability, sustainability, and energy efficiency. **Elsevier The Electricity Journal**, 25 (8): 21-28
49. Lasseter R.H., 2002. MicroGrids, pp. 305-308. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings*, New York, IEEE, 1527 p.
50. Ackermann T., Andersson G., Soder L., 2000. Electricity market regulations and their impact on distributed generation, pp. 608-613. *DRPT2000. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, April 4-7, 2000. London, 688 p.
51. Jenkins N., Ekanayake J.B., Strbac G., 2010. Distributed Generation, The Institution of Engineering and Technology, Herts, 293 pp.
52. Banos R., Manzano A. F., Montoya G., Gil C., Alcayde A., Gomez J. 2011. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review, **Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews**, (15): 1753 – 1766.
53. Wang Y., Ronilaya F., Chen X., Roskilly A.P., 2013. Modelling and simulation of a distributed power generation system with energy storage to meet dynamic household electricity demand. **Elsevier Applied Thermal Engineering** (50): 523 -535.
54. Rehman S., Bader M.A., Al Moallem S.A., 2007. Cost of solar energy generated using PV panels. **Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews**, (11): 1843 – 1857.
55. Akorede M.F., Hizam H., Pouresmaeil E., 2010. Distributed energy resources and benefits to the environment, **Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews**, (14): 724 – 734.
56. Kakran S., Chanana S., 2018. Smart operations of smart grids integrated with distributed generation: A review. **Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews**, (81): 524 – 535.
57. Tol R.S.J., 2012. A cost–benefit analysis of the EU 20/20/2020 package, **Elsevier Energy Policy**, (49): 288-295.

58. Ackermann T., Andersson G., Soder L., 2001. Distributed generation: a definition. **Elsevier Electric Power Systems Research (57):** 195–204.
59. Alanne K., Saari A., 2006. Distributed energy generation and sustainable development, **Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews,10(6):** 539-558.
60. yenienerji.com., 2011. Dağıtık elektrik üretimi ve faydaları. <https://www.yenienerji.com/dagitik-elektrik-uretimi-ve-faydalari> (Erişim tarihi: Ağustos 2020.)
61. Agah S.M.M., Gharehpetian G.B., 2017. Distributed Generation Systems Design, Operation and Grid Integration, Elsevier, Cambridge, 575 pp.
62. Gaille B., 2018. Advantages and disadvantages of renewable energy. <https://brandongaille.com/23-advantages-disadvantages-renewable-energy/>. (Erişim tarihi: Ağustos 2020).
63. International Energy Agency, 2002, Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets, OECD/IEA, Paris, 124 pp.
64. Kuang H., Shengqing L., Zhengqiu W., 2011. Discussion on advantages and disadvantages of distributed generation connected to the grid, pp. 170-173. *IEEE International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE)*, Yichang , IEEE, 7052 p.
65. Wikipedia, 2020. Swanson's law, https://en.wikipedia.org/wiki/Swanson%27s_law#:~:text=Swanson's%20law%20is%20the%20observation,Corporation%2C%20a%20solar%20panel%20manufacturer. (Erişim tarihi: Ağustos 2020).
66. Coles R.L., 2001. Distributed generation can provide an appropriate customer price response to help fix wholesale price volatility, pp. 141-143. *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Columbus , IEEE, 1545 p.
67. Khatam W.E., Salama M.M.A., Distributed generation Technologies, definitions and benefits. **Elsevier Electric Power System Research 71**, 119-128 .
68. Denholm P., O'Connell M., Brinkman G., Jorgenson J., 2015. Overgeneration From Solar Energy in CaliforniaÇ A Field Guide to the Duck Chart. National Renewable Energy Laboratory, 46 pp.
69. Dileep G., 2020. A survey on smart grid technologies and applications, Elsevier Renewable Energy, 146: 2589-2625.

70. Scott J., 2009., The European Technology Platform for Electricity Networks of the Future, Springer, Berlin, 259 pp.
71. Khattabi M., Drenkard S., Dietschmann H., 2009. Advanced Architectures and Control Concepts for More Microgrids, European Commission, 36 pp.
72. Shahidehpour M., Khodayar M., Barati M., 2012. Campus microgrid: high reliability for active distribution systems, pp. 1-2. *IEEE General Meeting Power& Energy Society*, IEEE, San Diego, 3152 pp.
73. Gast N., Tomozei D.C., Le Boudec J.Y., 2014. Optimal Generation and Storage Scheduling in the Presence of Renewable Forecast Uncertainties, *IEEE Transactions On Smart Grid*, 5 (3) : 1328 – 1339.
74. Wikipedia, List of major power outages. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_major_power_outages, Ağustos 2020.
75. Toledo O. M., Filho D.O., Diniz A.S.A.C., 2010. Distributed photovoltaic generation and energy storage systems: A review, **Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 14: 506-511.
76. ENTSOE, 2015, Türkiye 31 Mart 2015 Sistem Çökmesi Raporu, TEİAŞ, Ankara, 79 s.
77. IRENA, 2020. Electricity Storage Valuation Framework: Assessing System Value And Ensuring Project Viability. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 112 pp.
78. Medina P., Bizuayehu A. W., Catalão J. P. S., Rodrigues E. M. G., Contreras J., 2014. Electrical Energy Storage Systems: Technologies' State-of-the-Art, Techno-Economic Benefits and Applications Analysis. 2295-2304. *47th Hawaii International Conference on System Science*. Waikoloa,
79. Alamri, B.R., Alamri A.R., 2009. Technical review of energy storage technologies when integrated with intermittent renewable energy, pp. 1-5. Sustainable Power Generation and Supply, *IEEE SUPERGEN '09. International Conference*. Nanjing, China.
80. Eyer, J., G. Corey, 2010. Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide”, Sandia National Laboratories, New Mexico, 232 pp.

81. Geurin, S.O., Barnes A.K., Balda J.C., 2012. Smart grid applications of selected energy storage technologies, 1-8. *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES. 2012*. Washington DC.
82. İbrahim H., Ilincaa A., Perron J., 2008. Energy storage systems—Characteristics and comparisons. **Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews** 12 : 1221–1250.
83. Haisheng C., Thang N. C., Wei Y., Chunqing T., Yongliang L., Yulong D., 2009. Progress in electrical energy storage system: A critical review. **Elsevier Progress in Natural Science** 19: 291 – 312.
84. Kousksou T., Bruel P., Jamil A., ElRhafiki T., Zeraouli Y. 2014. Energy storage: Applications and challenges. **Solar Energy Materials & Solar Cells** 120 (A) : 59-80.
85. Simon p., Gogotsi Y., Dunn B., 2014. Where do batteries end and supercapacitors begin?. **Science** 343 : 1210 -1211.
86. Linden D., Reddy T.B., 2002. Handbook Of Batteries, McGraw-Hill Book, New York, 1454 pp.
87. Tarascon J.M., Armand M., 2010. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. **Nature** 414: 359-367.
88. elektrik akımının kimyasal etkileri <https://elektrikmen.com/kursun-asit-aku/> (Erişim tarihi: Ocak 2021.)
89. Soloveichik G.L. 2011. Battery technologies for large-scale stationary energy storage. **Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering**, 2 : 503 -527.
90. Polat, B. D., Keleş, Ö. 2012. Lityum İyon Pil Teknolojisi. **TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi**, 162: 42-48.
91. Dunn B., Kamath H., Tarascon J.M., 2011. Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices. **Science** 334 : 928 -935.
92. Xiong R., 2020. Battery Management Algorithm for Electric Vehicles. Springer, Pekin, 310.
93. Chen S. X., Gooi H.B., Wang M. Q., 2012. Sizing of energy storage for microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 3 (1) : 142-151.
94. Diouf B., Pode R., 2015. Potential of lithium-ion batteries in renewable energy. **Elsevier Renewable Energy** 76 : 375-380.

95. Bizuayehu A. W., Fitiwi D. Z., Catalão J. P. S., 2016. Advantages of Optimal Storage Location and Size on the Economic Dispatch in Distribution Systems. Pp 1-5, *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, Boston.
96. statista, Lithium-ion battery pack costs worldwide between 2011 and 2020, <https://www.statista.com/statistics/883118/global-lithium-ion-battery-pack-costs/> (Erişim tarihi: Ağustos 2020.)
97. Luan S.W., Teng J.H., Lee D.J., Sung C. L., 2011., Charging/discharging monitoring and simulation platform for Li-ion batteries., pp. 868-872. *IEEE Region 10 Conference*, Bali.
98. Barré A., Deguilhem B., Grolleau S., Gérard M., Suard F., Riu D., 2013. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. **Elsevier Journal of Power Sources** 241 : 680-689.
99. Vetter J., Novák P., Wagner C., Moller C., Winter M.B. Wohlfahrt-Mehrens M., Vogler C., Hammouch A., 2005. Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. **Elsevier Journal of Power Sources** 147 : 269 -281.
100. Grothoff M.J., 2015. Battery Storage For Renewables: Market Status And Technology Outlook. International Renewable Energy Agency. 60 pp.
101. Xing Y., Tsui K.-L., 2012., A Case study on battery life prediction using particle filtering, 1-6. *Proceedings of the IEEE 2012 Prognostics and System Health Management Conference, Pekin*.
102. Barcellonaa S., Piegari L., 2020. Effect of current on cycle aging of lithium ion batteries. **Journal of Energy Storage** 29 : 1-7.
103. Krieger E.M., Cannarella J., Arnold C.B., 2013. A comparison of lead-acid and lithium-based battery behavior and capacity fade in off-grid renewable charging applications. **Elsevier Energy** 60: 492-500.
104. Battery University. BU-402: What Is C-rate? https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/what_is_the_c_rate (Erişim Tarihi: Ağustos 2020.)
105. Soroudi A., Amraeeb T., 2013. Decision making under uncertainty in energy systems: state of the art. **Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews** 28 : 376-384.

106. Raychaudhuri S., 2008. Introduction to Monte Carlo Simulation, pp. 91-100, *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, New Jersey, IEEE, 625 p.
107. Çavuş T. F., Yanıkoğlu E., Yılmaz A. S., 2002, Seri Sistemlerin Monte Carlo Yöntemi ile Güvenilirlik Analizi, ss. 20-24, ELECO'02, Bursa, Elektrik Mühendisleri Odası
108. Hançerlioğulları A., Monte Carlo simülasyon metodu ve MNCP kod sistemi, *Kastamonu Eğitim Dergisi.*, 14 (2) :545-566
109. Reiter D., 2007., The Monte Carlo Method, an Introduction, Elsevier Lecture Notes in Physics, 739:63-68
110. Monte Carlo Simülasyonu Nedir? Problem Çözümlerinde Nasıl Kullanılır ? <https://www.matematiksel.org/problem-cozumlerinde-monte-carlo-algoritmasinin-yeri/> (Erişim Tarihi :Ağustos 2020.)
111. Şişman G., 2015., Monte Carlo Simülasyonu İle Radyasyondan Koruyucu Malzemelerde Kullanılan Bizmut, Kurşun Ve Alternatif Kompozit Malzemelerin Atenüasyon Etkilerinin Değerlendirilmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 77 s.
112. Monte Carlo Simulation, https://www.palisade.com/risk/monte_carlo_simulation.asp, Kasım 2020
113. Johansen A. M., 2010., Monte Carlo Methods., Elsevier International Encyclopedia of Education : 2412 pp
114. Dantzig G.B., 2010 Linear Programming Under Uncertainty.pp 1-11. In: (eds) Stochastic Programming. International Series in Operations Research & Management Science, vol 150. Springer, (Infanger G.) ,New York, NY.
115. Zadeh L., 1965 Fuzzy sets, **Information and control** 8 (3) : 338–353.
116. Metropolis N.. 1987.The beginning of the Monte Carlo method. **Los Alamos Science**, 15:125–130,
117. Hançerlioğulları A., 2006. Monte Carlo simülasyon metodu ve MNCP kod sistemi. **Kastamonu Eğitim Dergisi**. 14 (2): 545-556.
118. Kroese D.P., Brereton T., Taimre T., 2014. Why the Monte Carlo method is so important today. **WIREs Computational Statistics**. 6 : 386-391.
119. Conejo A.J., Carrión M., Morales J.M., 2010. Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets, Springer. New York, 557 pp.

120. EPIAŞ Şeffaflık platformu. Gerçek zamanlı tüketim. <https://seffaflik.epias.com.tr/transparency/> Erişim Tarihi . Haziran 2020
121. Saygın D., Tör O. B., Teimourzadeh S., Koç Mehmet, Hildermeier J., Kolokathis C., 2019. Türkiye Ulaştırma Sektörünün Dönüşümü: Elektrikli Araçların Türkiye Dağıtım Şebekesine Etkileri Raporu. SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi. 108 s.
122. Tör O. B., Cebeci M. E., Koç M., Teimourzadeh S., Atli D., Oprea S. V., 2020. Peak shaving and technical loss minimization in distribution grids: a time-of-use-based pricing approach for distribution service tariffs, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 28 (3) :1386-1404 pp.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Kürşat TANRIÖVEN
Uyruğu: Türkiye (T.C.)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	İTÜ Fen Bilimler Enstitüsü, Elektrik Müh.	1997
Lisans	YTÜ Elk.-Elkt. Fak. Elektrik Müh	1993
Lise	Kayseri Lisesi	1989

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
1999- Halen	Kayseri ve Civarı Elk. T.A.Ş.	Ar-Ge Şefi
1995–1999	Pamukkale Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce,

YAYINLAR

1. Tanrıöven K., Daldaban F., Cebeci E., Tör O., Teimourzadeh S. “A Price-Elastic Approach for Optimal Scheduling of Small-Scale Storage Devicesin Smart Houses with Short-term and Long-term Constraints” Journal Of Modern Power System and Clean Energy. Digital magazine. DOI:10.35833/MPCE.2020.000094 (2021)
2. Yalman Y., Bayındır Ç., Terciyanlı A., Tanrıöven K., “Elektrik Dağıtım Sisteminde Gerilim Çukuru Yönü Tespiti ve Arıza Tipi Sınıflandırması” CIGRE Türkiye, Güç Sistemleri Konferansı, ss: 125-130 (2018)
3. Özçelik B. Tör O., Cebeci E., Tanrıöven K., Bara A., Oprea S., “Implementation of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) for Condition Assessment of Power and Distribution Transformers” 2 nd South East European Regional CIGRE Confrance, Kyiv 2018. Paper number 93. (2018)

4. Tanrioven K., Karaerik B., Akbulut F., “Elektrik Dağıtım Şirketlerinde Master Plan”, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi ve Fuarı, ss: 21-21, (2007)
5. Tanrioven K., Akbulut F., Karaerik B., “Kent İçi Aydınlatma Tesislerinde Çift Kablo Kullanılarak Yapılacak Enerji Tasarrufunun Değerlendirilmesi”, 13. Uluslararası Enerji, Kojenerasyon ve Çevre Teknolojileri Konferansı, ss:229-234, (2007)
6. Tanrioven K., Emiroğlu C., “Elektrik Dağıtım Şirketlerinde CBS Uygulamaları”, Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, ss:293-296, (2008)
7. Tanrioven K., Yazarbaş S., “Enerji Kablolarında Kısmi Deşarj Ölçümü ve Önemi”, 4. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, ss: 116-119, (2011)
8. Tanrioven K., Yazarbaş S., Cengiz H., “Geleceğin Dağıtım Şebekesi Smart Grid”, Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, ss: 52-55, (2011)
9. Tanrioven K., “UV Kamera İle Og Hatlarda Bakım Planlaması” III. Elektrik Tesisat Kongresi (2013)
10. Tanrioven K., Daldaban F., Çelik A.U., “Elektrik Dağıtım Sisteminde Enerji Hatları Üzerinden Haberleşmede Geniş Bant Haberleşme” V. Elektrik Tesisat Kongresi (2017)
11. Tanrioven K., “İç Tesisat Kontrolünün Önemi ve Ülkemizdeki Durumu” VI. Elektrik Tesisat Kongresi (2019)