

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİSİNİ ÜRETEN TÜKETİCİLER
ARASINDA ENERJİ TİCARETİNİN
KOOPERATİF TEMELLİ OLARAK
MODELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Zeynep TANIŞ

DOKTORA TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Makinaları ve Güç Elektronikliği Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ali DURUSU

Haziran, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENERJİSİNİ ÜRETEN TÜKETİCİLER ARASINDA ENERJİ
TİCARETİNİN KOOPERATİF TEMELLİ OLARAK
MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU**

Zeynep TANIŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 11.06.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Ali DURUSU
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Ali DURUSU, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ramazan AYAZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Asiye KAYMAZ ÖZCANLI, Üye
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Kadir Doğanşahin, Üye
Turgut Özal Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ali DURUSU sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Enerjisini Üreten Tüketiciler Arasında Enerji Ticaretinin Kooperatif Temelli Olarak Modellenmesi ve Optimizasyonu” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Zeynep TANIŞ



Çok Değerli Aileme...

TEŞEKKÜR

Bu doktora tezinin hazırlanması sürecinde, akademik gelişimime sunduğu kıymetli katkılar, rehberliği ve teşvik edici yaklaşımıyla beni daima destekleyen tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali DURUSU'ya en derin şükranlarımı sunarım. Kendisi, yol gösterici fikirleri ve bilimsel vizyonu ile bu çalışmanın şekillenmesine büyük katkı sağlamış, akademik hayatımda ilham verici bir rol üstlenmiştir.

Ayrıca, bilgi ve tecrübeleriyle gelişimime katkı sunan, akademik bakış açımı genişleten ve değerli destekleriyle bu süreci daha anlamlı kılan Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Anabilim Dalı hocalarına en içten teşekkürlerimi sunarım. Onların özverili tutumu ve teşvik edici yaklaşımları, bu çalışmanın başarıyla tamamlanmasında önemli bir rol oynamıştır.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan, varlıklarıyla bana güç veren, sevgileri ve destekleriyle bu zorlu süreci benim için daha anlamlı hale getiren aileme minnettarım. Özellikle sevgili eşim Muhammet Akife, gösterdiği sabır, anlayış ve sonsuz desteği için gönülden teşekkür ederim. Ayrıca, masum gülümsemesi ve sevgisiyle bana ilham veren kıymetli kızım Fatıma Zehra'ya en derin sevgilerimi sunuyorum. Bu tez, onların fedakârlıkları ve destekleri sayesinde hayat bulmuş olup, en çok da onlara adanmıştır.

Zeynep TANIŞ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
2 LİTERATÜR TARAMASI	4
2.1 Küresel Eğilimler	17
2.2 Vaka Çalışmaları.....	18
2.3 Problem Tanımı	21
2.4 Motivasyon ve Amaç	23
2.5 Araştırma Katkıları	25
2.6 Tezin Yapısı	26
3 P2P ENERJİ TİCARETİ VE BLOCKCHAIN TEKNOLOJİLERİNE YÖNELİK ARKA PLAN	27
3.1 Talep Tepkisi ve Tahmin	27
3.2 Sanal Depolama	30
3.3 P2P Enerji Ticareti.....	34
3.4 Blockchain	35
3.4.1 Dağıtık Protokol.....	36
4 ÖNERİLEN YÖNTEM	42
4.1 Kayıt.....	42
4.2 Elektrik, Isı ve Gazı İçeren Çoklu Enerji.....	48
4.2.1 Elektrik Üretimi ve Depolama	48
4.2.2 Isı Üretimi ve Depolanması	49
4.2.3 Gaz Üretimi ve Depolanması.....	50
4.3 Elektrik ve Isı Depolama Maliyeti.....	50
4.3.1 Depolama Sanallaştırma Modeli	53

4.3.2 BESS Operasyonları için Maliyet ve Enerji Yönetimi	55
4.4 Elektrik, Isı ve Gaz Ticareti İçeren Çoklu Enerji	60
4.4.1 Lyapunov Tabanlı Çevrimiçi Enerji Kontrolü ve Optimizasyon Modeli	62
4.4.2 Gerçek Zamanlı Enerji Yönetiminde Bütünleşik Karar Koordinasyonu	71
4.5 Blockchain Tabanlı Ödeme Metodolojisi	84
4.5.1 Tek Bir Pozitif İş Birlikçi Birim	85
4.5.2 Birden Fazla Pozitif İş Birlikçi Birim	87
4.6 Q-Learning Tabanlı Enerji Ticaret Yaklaşımı	90
5 DENEME SONUÇLARI	93
5.1 Simülasyon Çalışması	93
5.2 Simülasyon Verilerinin Oluşturulması	93
5.3 Karşılaştırmalı Analiz	94
5.3.1 Zaman ve Isıtma Gücü İlişkisi	94
5.3.2 Zaman ve Elektrik Talebi İlişkisi	98
5.3.3 Zaman ve Depolama Fiyatı İlişkisi	102
5.3.4 Prosümer Sayısı ve Enerji Depolama İlişkisi	105
5.3.5 Enerji Ticareti ve Enerji İlişkisi	109
5.3.6 Kullanıcı Sayısı ve Toplam Maliyet İlişkisi	114
6 SONUÇ	119
KAYNAKÇA	121
A AKILLI ENERJİ YÖNETİM SÜRECİNE AİT KARAR YAPISI	128
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	131

SİMGE LİSTESİ

PK_{pse}	Açık Anahtar
ρ	Adım Boyutunu Belirleyen Hiperparametre
w	Ağırlık Faktörü
ID_j'	Anonim Kimlik
E_{OM}	Aylık Enerji İşletme Maliyeti
Pr^{buy}	Bataryaya Enerji Alımı Sırasında Ödenen Fiyat
Pr^{sell}	Bataryadan Enerji Satışı Sırasında Uygulanan Fiyatı
E^{bat}	Batarya Enerji Seviyesi
E^b	Batarya Güç Dönüşüm Oranı
P^{bat}	Bataryanın Gücü
E_{max}^{bat}	Bataryanın Maksimum Enerji Seviyesi
E_{min}^{bat}	Bataryanın Minimum Enerji Seviyesi
P_{max}^{bat}	Bataryanın Maksimum Güç Kapasitesi
P_{min}^{bat}	Bataryanın Minimum Güç Kapasitesi
L_{bat}	Batarya Ömrü
DoD	Deşarj Derinliği
C_{cap}	Depolama Kapasitesi Maliyeti
d_{ij}	Düğüm j 'nin Düğüm i 'den Aldığı Enerji Talebi
F_{ij}	Düğüm i 'den Düğüm j 'ye Aktarılan Enerji Miktarı
λ_i	Düğüm i 'deki Üretimin Marjinal Maliyeti

P_i	Düğüm i 'de Üretilen Toplam Enerji Miktarı
E^{con}	Enerji Depolama Kapasitesi
θ_i	Enerji Durumunun Alt Sınırını Koruma Amacıyla Kullanılan Dalgalanma Parametresi
V_i	Enerji Maliyetini Minimize Etme ile Kuyruk Gecikmesini Minimize Etme Arasındaki Dengeyi Kontrol Eden Parametre
P_{pub}	Genel Anahtar
$D_i(t)$	Gerçek Yük Talebi
P_{OM}	Güç Dönüşüm Ekipmanları için Aylık İşletme Maliyeti
$H()$	Hash Fonksiyonu
y_i	Her Prosümer İçin Ticaretle İlgili Enerji Dengesini Sağlayan Değişken
$Q_i(t)$	Hizmet Kalitesi Kuyruğu
Q	İçsel Olarak Üretilen Isı Miktarı
m	İletilen Mesaj
n	İskonto Oranı
$Sig()$	İmzalama Fonksiyonu
D_j	Kısmi Özel Anahtar
$L_i(t)$	Lyapunov Fonksiyonu
C_{md}	Maksimum Talep Ücreti
$\underline{D_i(t)}$	Minimum Yük Talebi
SK_{pse}	Özel Anahtar
ϵ_i	Prosümer i için Ayrılma Oranı (Talep Azalması)
g_i^s	Prosümer i 'nin t Anında Depoladığı Enerji Miktarı
g_i^{dis}	Prosümer i 'nin t Anında Deşarj Ettiği Enerji Miktarı
$S_i(t)$	Prosümer i 'nin t Anındaki Enerji Durumu

g_i^{ch}	Prosümer i 'nin t Anında Şarj Ettiği Enerji Miktarı
x_i	Prosümer i 'nin Depolamak İsteddiği Enerji Miktarı
η_i^s	Prosümer i 'nin Depolama Verimlilik Faktörü
η_i^{dis}	Prosümer i 'nin Deşarj Verimlilik Faktörü
c_i	Prosümer i 'nin Enerji Depolama Maliyeti
e_i	Prosümer i 'nin Net Enerji Fazlası veya Talebi
η_i^{ch}	Prosümer i 'nin Şarj Verimlilik Faktörü
z_i	Prosümer i 'nin Ticaret İçin Ayırdığı Enerji Miktarı
d_i	Prosümer i 'nin Ticaret İçin Harcadığı Maliyet
p_i	Prosümer i 'nin Ticaret Yaptığı Enerji Fiyatı
$E_i(t)$	Sanal Enerji Kuyruğu
B_i	Sistemin Kararlılık Sınırını Belirleyen Sabit Bir Değer
λ^{grid}	Şebeke Enerji Fiyatı
λ^{buy}	Şebekeden Satın Alınan Enerji Fiyatı
λ^{sell}	Şebekeye Satılan Enerji Fiyatı
$E()$	Şifreleme Fonksiyonu
P_{grid}	Şebeke ile Değiş Tokuş Edilen Güç
α	Termal Yayınım Katsayısı
C_{total}	Toplam Maliyet
d	Yıl Sayısı
$\bar{D}_i(t)$	Zaman t Anındaki Maksimum Yük Talebi
T	Zaman t Anındaki Sıcaklık Dağılımı
t	Zaman Değişkeni

KISALTMA LİSTESİ

ADMM	Çarpanların Alternatif Yön Yöntemi
BESS	Batarya Enerji Depolama Sistemi
CCHP	Birleşik Soğutma, Isıtma ve Güç Sistemi
CHP	Kombine Isı ve Güç Sistemi
DED	Dağıtık Enerji Depolama
DEDS	Dağıtık Enerji Depolama Sistemi
DEK	Dağıtık Enerji Kaynağı
DES	Dağıtık Enerji Sistemi
DLT	Dağıtık Defter Teknolojisi
EP	Enerji Aracı
F-ADMM	Hızlı Çarpanların Alternatif Yön Yöntemi
FFNN	İleri Beslemeli Sinir Ağı
IoT	Nesnelerin İnterneti
KGC	Anahtar Üretim Merkezi
LP	Doğrusal Programlama
MILP	Karmaşık Tam Sayılı Doğrusal Programlama
NLP	Doğrusal Olmayan Programlama
NLPMO	Doğrusal Olmayan Programlar Çok Amaçlı Model
NPV	Net Bugünkü Değer
P2P	Eşler Arası
PoS	Proof of Stake
PoW	Proof of Work
PVF	Bugünkü Değer Faktör
QoS	Hizmet Kalitesi
RC	Kayıt Merkezi
RL	Pekiştirmeli Öğrenme
TC	Kimlik Bilgisi Merkezi
YEK	Yenilenebilir Enerji Kaynağı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1	P2P enerji ticaret şeması	34
Şekil 3.2	Merkezi ve merkezi olmayan protokoller	37
Şekil 3.3	Blockchain protokol katmanı	39
Şekil 4.1	Kullanıcı kayıt süreci	45
Şekil 4.2	Elektrik, ısı ve gaz içeren çok enerjili sistem	49
Şekil 5.1	Zaman ve ısıtma gücü ilişkisi	98
Şekil 5.2	Zaman ve elektrik talepleri	101
Şekil 5.3	Zaman ve depolama fiyatı ilişkisi	105
Şekil 5.4	Prosümer sayısı ve enerji depolama ilişkisi	109
Şekil 5.5	Enerji ticareti ve enerji ilişkisi	114
Şekil 5.6	Kullanıcı sayısı ve toplam hesaplanan maliyet/ms	118

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Literatür taramasının özeti	14
Tablo 3.1	Sanal ve fiziksel bataryaların avantajları ve dezavantajları	32
Tablo 5.1	Sistem özellikleri	93
Tablo 5.2	Zaman ve ısıtma gücü arasındaki ilişkinin gösterimi	95
Tablo 5.3	Zaman ve elektrik talebi arasındaki ilişkinin gösterimi	99
Tablo 5.4	Zaman ve depolama fiyatı arasındaki ilişkinin gösterimi	102
Tablo 5.5	Prosümer sayısı ile enerji depolama arasındaki ilişkinin gösterimi..	106
Tablo 5.6	Enerji ticareti ile enerji arasındaki ilişkinin gösterimi.....	110
Tablo 5.7	Kullanıcı sayısı ile toplam hesaplanan maliyet/ms arasındaki ilişkinin gösterimi	115

Enerjisini Üreten Tüketiciler Arasında Enerji Ticaretinin Kooperatif Temelli Olarak Modellenmesi ve Optimizasyonu

Zeynep TANIŞ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali DURUSU

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşması ve enerji yönetiminde verimliliğin artırılmasına yönelik ihtiyaç, Dağıtık Enerji Depolama Sistemlerinin çoklu enerji sistemlerine entegrasyonunu önemli bir araştırma alanı haline getirmiştir. Bu çalışma, enerji depolama sistemlerini eşler arası enerji pazarları üzerinden çoklu enerji sistemleriyle entegre ederek enerji kaynaklarının daha etkili bir şekilde yönetilmesini ele almaktadır. Önerilen sistem, modern algoritmalarla desteklenen yenilikçi bir P2P pazar yapısı sunmakta ve enerji tüketicisi ile üreticisi olan kullanıcıların birbirleriyle doğrudan enerji ticareti yapmasına olanak tanımaktadır. Sistemin temel bileşenleri arasında, kullanıcı gizliliğini sağlamak için geliştirilen konsorsiyum blokzincirine dayalı kayıt mekanizması, elektrik, ısı ve gaz gibi çoklu enerji türlerinin entegrasyonunu mümkün kılan bir yönetim altyapısı ve enerji depolama maliyetlerini düşürmek amacıyla tasarlanan bir depolama sanallaştırma modeli bulunmaktadır. Bunun yanında, doğrusal olmayan çok amaçlı programlama ile batarya enerji depolamasının optimize edilmesi ve ticaret sürecinde iş birliği yapan tarafların

enerji katkılarına dayalı müzakereler gerçekleştirmesi için belirsizlik altındaki Nash pazarlığı modeli uygulanmıştır. Ticari işlemlerin güvenliğini artırmak amacıyla, şeffaf ve değiştirilemez işlem kayıtları sağlayan blokzincir tabanlı bir ödeme sistemi geliştirilmiştir. Modelin etkinliği, geleneksel eşler arası enerji ticaret modeli ve yaygın Q-learning algoritmasıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve önerilen yapının üstün performans sergilediği gösterilmiştir. Tüm bu süreçler, Network Simulator Matlab-R2023b yazılımı kullanılarak uygulanmış ve modelin performansı, enerji depolama maliyetlerinin minimize edilmesi, ticaret süreçlerindeki kaynak dağılımının optimize edilmesi ve çoklu enerji sistemlerinin bütünsel verimliliğinin artırılması gibi kritik teknik metrikler doğrultusunda detaylı bir şekilde değerlendirilmiş, elde edilen sonuçlar modelin teknik olarak üstün ve uygulanabilir bir çözüm olduğunu açıkça göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Çoklu enerji bağlantısı, dağıtık enerji depolama sistemleri, depolama sanallaştırma modeli, eşler arası enerji, pazar tabanlı konsorsiyum blokzinciri

Cooperative Basis Modeling and Optimization of Energy Trade Between Prosumers

Zeynep TANIŞ

Department of Electrical Engineering
Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ali DURUSU

In recent years, the increasing penetration of renewable energy sources and the need to enhance efficiency in energy management have made the integration of Distributed Energy Storage Systems into multi-energy systems a significant area of research. This study addresses the integration of energy storage systems with multi-energy systems through peer-to-peer energy markets, aiming to achieve more effective management of energy resources. The proposed system introduces an innovative peer-to-peer market structure supported by modern algorithms, enabling prosumers (both energy consumers and producers) to engage in direct energy trading. Key components of the system include a consortium blockchain-based registration mechanism designed to ensure user privacy, a management infrastructure facilitating the integration of multiple energy types such as electricity, heat, and gas, and a storage virtualization model aimed at reducing energy storage costs. Additionally, the optimization of battery energy storage is achieved through nonlinear multiobjective programming, while the Nash bargaining model under uncertainty is applied to facilitate negotiations based on energy contributions in collaborative trading scenarios. To ensure secure transactions, a blockchain-based payment system has been developed, providing transparent and immutable

transaction records. The effectiveness of the model was evaluated by comparing it against the conventional P2P energy trading model and the widely used Q-learning algorithm, demonstrating its superior performance. All processes were implemented using the Network Simulator Matlab-R2023b software, and the model's performance was rigorously assessed based on critical technical metrics such as minimizing energy storage costs, optimizing resource allocation in trading processes, and enhancing the overall efficiency of multi-energy systems, establishing the model as a technically superior and viable solution.

Keywords: Multienergy coupling, distributed energy storage systems, storage virtualization model, peer-to-peer energy, market-based consortium blockchain



YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING

1 GİRİŞ

Son yıllarda enerji depolama teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişmeler ile birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması, dağıtık enerji yönetim sistemlerinin uygulanabilirliğini ve sistem düzeyindeki etkisini önemli ölçüde artırmıştır. Bu gelişmelerin bir sonucu olarak, Eşler Arası (Peer-to-Peer, P2P) enerji ticareti ağları önemli bir paradigma değişimi sunarak hem tüketici hem de üretici konumunda olan kullanıcıların —prosümer— elektrik, ısı ve gaz gibi farklı enerji türlerinde doğrudan ticaret yapabilmelerine olanak sağlamaktadır [1–3]. Bu yeni nesil ticaret yapıları, yalnızca ekonomik avantajlar sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda enerji sistemlerinin esnekliğini artırmakta ve kaynakların daha etkin kullanılmasına olanak tanımaktadır. Kooperatif temelli bu ticaret biçimleri, kaynak paylaşımının optimize edilmesini ve sistem performansının sürdürülebilir biçimde yönetilmesini mümkün kılmakta; böylece enerji üreticileri, tüketiciler ve prosumerler arasında daha yüksek düzeyde bir iş birliği ortamı teşvik edilmektedir [4–6].

Dağıtık Enerji Depolama Sistemleri (DEDS), P2P enerji ticaretinin temel yapı taşlarından biri olarak, enerji sistemlerinin hem esnekliğini hem de dayanıklılığını artıran önemli bir teknolojik bileşen konumundadır. DEDS; bataryalar, termal depolama üniteleri ve hidrojen bazlı depolama sistemleri gibi çeşitli enerji depolama teknolojilerini kapsamakta olup, sistemin hem arz-talep dengesizliklerine karşı dirençli olmasını sağlamakta hem de üretim ve tüketim arasındaki zamansal farklılıkları dengelemektedir. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim profillerindeki dalgalanmalar dikkate alındığında, bu tür depolama sistemlerinin şebeke kararlılığını sürdürmek açısından stratejik bir rol oynadığı görülmektedir [7–9].

DEDS sistemlerinin aktif bir biçimde yönetilmesi, yalnızca enerji fazlalıklarının depolanmasını değil, aynı zamanda bu kaynakların ihtiyaç anında yeniden şebekeye kazandırılmasını mümkün kılar. Bu bağlamda, DED varlıklarının proaktif kontrolü, sistem esnekliğini artırmakta; şebeke dengeleme, frekans regülasyonu ve gerilim desteği gibi yardımcı hizmetlerin sağlanmasına da katkı sunmaktadır. Öte yandan, P2P enerji ticaretinde, farklı enerji taşıyıcılarının (elektrik, ısı, gaz) entegre biçimde yönetilebildiği gün öncesi çoklu enerji pazar yapıları öne çıkmaktadır. Bu sistemler, prosumer'lerin yalnızca elektrik değil, aynı zamanda gaz ve termal enerji gibi farklı formlardaki enerjiyi de doğrudan birbirleriyle ticaret yapmasına olanak tanımaktadır [10].

Ancak, bu tür merkeziyetsiz enerji ticaret yapılarının uygulanabilirliğinde birtakım teknik sınırlamalar da mevcuttur. Özellikle fiziksel enerji ağlarının (örneğin, iletim ve dağıtım şebekeleri) kapasite kısıtları ve topolojik yapıları dikkate alınmaksızın yürütülecek ticaret uygulamaları, sistem üzerinde aşırı yüklenmelere neden olarak şebeke güvenilirliğini tehdit edebilir. Bu nedenle, P2P ticaretinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için fiziksel enerji altyapılarının teknik kapasiteleri, ağ tıkanıklıkları ve enerji kayıpları gibi kritik sistem parametrelerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir [11–12].

Özellikle yenilenebilir enerji üretiminin yoğun olduğu aktif dağıtım şebekelerinde, DEDS sistemlerinin sunduğu dinamik destek mekanizmaları, enerji sistemlerinin kararlı biçimde çalışmasını sağlamakta; otonom agregatörler ve esnek enerji kaynakları ile birlikte değerlendirildiğinde, hem yerel üretim-tüketim dengesini hem de şebeke performansını artırmaktadır. Bu sistemler, optimal güç akışı analizleri ve üretim-taahhüt programları ile birlikte optimize edilerek P2P ticaret yapılarının teknik altyapısına entegre edilebilmektedir [13–14]. DED sistemlerinin sunduğu bir diğer önemli katkı ise, frekans ve gerilim düzenlemesi gibi yardımcı hizmetlerin dağıtık biçimde sunulabilmesidir. Bu hizmetler sayesinde enerji akışları daha verimli yönetilmekte, şebekenin dinamik yanıt kabiliyeti artırılmakta ve böylece prosumerler arasında daha hızlı, güvenli ve esnek bir ticaret ortamı tesis edilmektedir [15–17].

Aynı zamanda, çoklu enerji taşıyıcılarının (elektrik, ısı, gaz) entegrasyonu, yalnızca sistem verimliliğini artırmakla kalmamakta, aynı zamanda enerji arz güvenliğini ve sürdürülebilirliğini güçlendiren stratejik faydalar sunmaktadır. Üretilen fazla

enerjinin yalnızca elektrik olarak değil, aynı zamanda ısıya ya da gaz hâline dönüştürülerek depolanması, enerji israfını önlemekte ve enerji kaynaklarının daha çevreci biçimde kullanılmasına olanak tanımaktadır [18–20]. Bu durum özellikle yüksek yoğunluklu yerleşim alanları, sanayi bölgeleri ve enerjiye yüksek talep gösteren şehir altyapıları için kritik önem taşımaktadır.

Bu doktora tezinde, yukarıda açıklanan bağlamda, prosumerler arasında doğrudan enerji ticaretini mümkün kılan, merkeziyetsiz, çok enerjili ve esnek bir P2P pazar yapısı önerilmektedir. Geliştirilen model, batarya, ısı ve gaz gibi farklı depolama teknolojilerinin sanallaştırılmış bir altyapı altında entegrasyonunu sağlamayı; aynı zamanda güvenli veri iletimi, işlem doğruluğu ve kullanıcı gizliliği açısından yüksek güvenli bir sistem altyapısı sunmayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda önerilen sistem, gelişmiş algoritmalarla desteklenen sanal depolama modelleri, dögümsel fiyatlandırma yapıları ve blokzincir tabanlı ödeme çözümleri ile çok amaçlı doğrusal olmayan optimizasyon çerçevesinde çalışmaktadır. Modelin teknik uygulanabilirliği, simülasyon tabanlı analizlerle değerlendirilmiş; enerji depolama maliyetlerinin minimize edilmesi, ticaret süreçlerinin verimliliğinin artırılması ve sistem esnekliğinin güçlendirilmesi gibi kritik metrikler açısından önemli performans kazanımları sağladığı ortaya konulmuştur.

2 LİTERATÜR TARAMASI

Bu literatür taraması, dağıtık enerji sistemleri (DES) ve eşler arası (P2P) piyasa yapıları bağlamında çoklu enerji taşıyıcılarının entegrasyonuna ilişkin öne çıkan araştırma boşluklarını belirlemektedir. Genel olarak literatürde, küçük ölçekli elektrik ve ısı üreticilerinin artan katılımı ile birlikte, farklı enerji taşıyıcıları arasındaki etkileşimlerin giderek daha karmaşık bir hal aldığı vurgulanmaktadır. Özellikle elektrik, ısı ve doğalgaz gibi farklı enerji türleri arasındaki ilişkilerin eşgüdümlü biçimde planlanması ve yönetilmesi ihtiyacı, yeni nesil yerel enerji piyasalarının daha işlevsel hale gelmesini zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda yapılan araştırmalarda, çoklu enerji taşıyıcısı içeren sistemlerde etkin kaynak planlaması ve ticaret stratejilerinin geliştirilmesine yönelik çeşitli yöntemler sunulmuştur. Örneğin, doğrusal optimizasyona dayanan bir model aracılığıyla elektrik, ısı ve doğalgaz için ayrı ayrı planlamalar yapılabilmekte ve bu sayede gün öncesi temelli P2P enerji ticareti stratejileri uygulanabilmektedir [21]. Ancak söz konusu model, yalnızca sabit ve öngörülebilir durumlara odaklanmakta; gerçek zamanlı değişkenlikler, kullanıcı davranışlarındaki belirsizlikler ve enerji merkezleri arasındaki koordinasyon gibi dinamik etkenleri dikkate almamaktadır. Bu durum, sistemin operasyonel esnekliğini ve genel kararlılığını olumsuz etkilemektedir.

Bu sınırlamaların aşılması amacıyla geliştirilen yeni modellemeler, çoklu enerji türlerinin eşzamanlı şekilde yönetilebildiği ve enerji toplulukları düzeyinde fayda analizi yapılabildiği sistemler sunmaktadır. Bu doğrultuda, bazı çalışmalarda memnuniyet esasına dayalı kâr paylaşım mekanizmaları önerilmiş; elektrik, ısı ve doğalgaz tüketiminin merkezi olarak koordine edildiği bu yapılarda, her prosümerin elde ettiği ekonomik faydaya göre memnuniyet düzeyleri hesaplanarak ödül dağılımı gerçekleştirilmiştir [22]. Böylece, bireysel kararların toplam topluluk

refahına etkisi analiz edilebilmiştir. Ancak bu modellerin çoğu, piyasa dışı riskleri, teknik arızaları ve değişken fiyat yapılarını yalnızca sınırlı ölçüde ele almakta; bu nedenle güvenilirlik, sürdürülebilirlik ve teknik performans gibi konular ikincil düzeyde kalmaktadır.

P2P enerji platformlarında operasyonel dengenin daha bütüncül biçimde sağlanabilmesi için, elektrik ve doğalgaz sistemlerinin entegre olarak değerlendirildiği yaklaşımların geliştirilmesi yönünde çalışmalar artmaktadır. Bu çerçevede önerilen modellerden birinde, çoklu enerji paylaşımını destekleyen bir yapı sunulmuş ve Raiffa-Kalai-Smorodinsky pazarlık çözümüne dayalı çok taraflı müzakereler aracılığıyla ticaret fiyatlarının adil şekilde belirlenmesi sağlanmıştır [23]. Bu sistem, enerji merkezlerinin hem üretici hem de tüketici rollerini üstlenebilmelerine olanak tanımakta ve böylece ticaret planlamasında önemli bir esneklik sunmaktadır. Ancak her merkez çifti için ayrı pazarlık yapılmasını gerektirmesi, hesaplama yükünü artırmakta ve büyük ölçekli sistemlerde uygulama zorluklarına neden olmaktadır.

Bu hesaplama yükünü azaltmak ve daha esnek bir yapı kurmak amacıyla, adaptif ve dayanıklı stokastik optimizasyon tekniklerine dayalı modeller önerilmektedir. Bu çalışmalardan birinde, enerji toplayıcıları ile dağıtım ağları arasındaki koordinasyonun güçlendirildiği bir yapı geliştirilmiş; ayrıca termal, gaz ve batarya depolama sistemleri entegre edilerek merkeziyetsiz bir model oluşturulmuştur [24]. Model, üretim ve tüketimdeki belirsizlikleri göz önünde bulundurarak gerçek zamanlı olarak uyum sağlama yeteneğine sahiptir. Bu yönüyle, geleneksel merkezi toplayıcı sistemlerine kıyasla daha yüksek düzeyde esneklik ve verimlilik sağlamakta; doğrudan prosümerler arası enerji alışverişini desteklemektedir. Ancak modelin saha uygulamalarındaki kararlılığı ve sürdürülebilirliği henüz yeterli ölçüde değerlendirilmemiştir.

Çoklu enerji taşıyıcılarının entegrasyonu kadar, sistemde yer alan dağıtık enerji kaynaklarının (DEK) yapısal farklılıklarının da dikkate alınması gerekmektedir. DEK'lerin heterojen yapısı, enerji ticaret süreçlerinin bütüncül biçimde optimize edilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu ihtiyaca yanıt olarak geliştirilen bazı modellerde, farklı türdeki DEK'ler için birleştirilmiş işletim yaklaşımları önerilmiştir. Bu çerçevede yapılan bir çalışmada, DEK parametrelerinin tahmini için SL (süpervizyonlu öğrenme) destekli birleştirme yöntemi kullanılmıştır [25].

Tahmin edilen birleşik parametreler doğrultusunda merkeziyetsiz bir P2P ticaret mekanizması önerilmiş ve toplayıcılar arasında gizliliği koruyan bir veri paylaşım yapısı oluşturulmuştur. Karar verme süreçlerinin verimliliğini artırmak adına, toplayıcılar arasındaki yinelemeli hesaplama süreci hızlı çarpanların alternatif yön yöntemi (F-ADMM) algoritması ile optimize edilmiştir. Bu yaklaşım, iletişim yükünü azaltmakta ve hesaplama süresini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Ancak model her ne kadar genel davranışları başarılı şekilde öngörebilse de, kaynak tahsisi süreçlerinde sapmalar oluşabilmekte; bu da karar kalitesinde hata payı doğurabilmektedir. Bu nedenle, birleştirilmiş modelleme ile birlikte kaynakların aynı anda en uygun şekilde tahsisini yapabilen bütünleşik yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Bununla birlikte, bu sistemlerde gerçekleşen enerji alışverişlerinin sadece ekonomik değil, aynı zamanda adil, işbirlikçi ve uzun vadeli sürdürülebilirlik ilkelerine dayalı olarak kurgulanması gerekmektedir. Bu bağlamda, P2P enerji paylaşımı mekanizmalarında adil ödül dağılımı ve kooperatif yaklaşımları içeren modellemeler literatürde ön plana çıkmaktadır. Özellikle işbirlikçi oyun teorisine dayanan çalışmalar, enerji merkezleri arasında karşılıklı güvene dayalı bir yapı kurmayı amaçlamakta; bu sayede büyük koalisyonların daha istikrarlı bir biçimde çalışmasını mümkün kılmaktadır. Ayrıca bu modeller, doğalgaz ve karbon emisyon hakları gibi yeni piyasa unsurlarını da sistem içerisine entegre edebilmektedir [26]. Ancak, bu tür yapıların operasyonel karmaşıklığı, merkezi olmayan sistem mimarileriyle entegrasyonunu zorlaştırmakta; özellikle gerçek zamanlı veri yönetimi ve dağıtık kontrol ihtiyaçları söz konusu olduğunda sınırlı bir esneklik sunmaktadır. Bu durum, uygulama aşamasında karşılaşılabilecek esneklik kaybı, güvenlik zaafiyetleri ve tepki süresindeki yavaşlık gibi performans kriterlerinde belirsizliklere neden olmaktadır.

Enerji depolama paylaşımı ve çoklu enerji sistemlerinin kooperatif esaslara dayalı yönetimi, son dönemde dağıtık enerji sistemlerinin hem esnekliğini hem de ekonomik verimliliğini artırmaya yönelik önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu kapsamda geliştirilen bazı modeller, enerji paylaşımını yalnızca üretim ve tüketim ilişkisi ile sınırlı tutmayıp, depolama altyapılarının ortak kullanımını da içerecek şekilde genişletmektedir. Örneğin, prosümerler ile enerji depolama hizmeti sunan sağlayıcılar arasında bir aracı unsurun görev aldığı

işbirlikçi bir yapı önerilmiştir. Bu yapı sayesinde, birden fazla enerji sağlayıcısının sahip olduğu depolama tesislerinin prosümerler arasında etkin biçimde paylaşılması ve böylece toplam sistem maliyetlerinin azaltılması hedeflenmiştir [27].

Söz konusu modelde, enerji depolama işletimi, taşınabilir yüklerin planlanması ve kamu hizmetleriyle yürütülen enerji ticareti süreçleri birlikte değerlendirilmiştir. Çözüm sürecinde ise, geleneksel olarak kullanılan çarpanların alternatif yön yöntemi (ADMM) algoritmasına kıyasla daha hızlı yakınsama sağlayan F-ADMM algoritması tercih edilmiştir. Ayrıca, ekonomik kazanımların sistem katılımcıları arasında adil bir şekilde dağıtılabilmesi amacıyla “kâr gerçekleştirme oranı dağıtım çerçevesi” adlı özgün bir mekanizma geliştirilmiştir. Ancak tüm bu avantajlarına karşın, enerji depolama paylaşımı sürecinde karşılaşılan darboğazlar ve veri gizliliğine yönelik yapısal zorluklar, önerilen sistemin gerçek dünya uygulamalarına aktarılmasını zorlaştırmakta ve bu alanı gelecekteki çalışmalar için açık bir problem sahası haline getirmektedir.

Kooperatif temelli enerji yönetimi yaklaşımlarında, oyun teorisine dayalı pazarlık modellerinin kullanımı literatürde giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre çalışan çoklu enerji sistemlerinde—örneğin rüzgar ve güneş destekli kombine ısı-güç-soğutma (CCHP) sistemlerinin koordineli işletiminde—sosyal refahı maksimize etmeye yönelik Nash Pazarlık temelli optimizasyon çerçeveleri öne çıkmaktadır [28]. Bu modellerde, enerji akışlarının planlanması ve ticaret ödemelerinin belirlenmesi birbirinden bağımsız alt problemler olarak ele alınmakta; çözüm süreçleri ise karma-tamsayılı doğrusal programlama (MILP) tekniklerinin dağıtık çözümüne olanak tanıyan ADMM algoritması aracılığıyla yürütülmektedir. Ancak bu yapıların operasyonel düzeyde tam bütünlük sağlayabilmesi için sistem kayıpları, dağıtık üretimdeki belirsizlikler ve kullanıcıların anlık ısıtma-soğutma ihtiyaçları gibi kritik değişkenlerin daha kapsamlı biçimde modellenmesi gerekmektedir. Bu unsurların göz ardı edilmesi, sistemin gerçek saha koşullarındaki başarımını sınırlayan önemli bir eksiklik olarak değerlendirilmektedir.

Benzer bir biçimde, çok ajanlı enerji sistemlerine yönelik yapılan çalışmalarda da, farklı enerji taşıyıcılarının—örneğin rüzgar, hidrojen ve ısı—entegrasyonuna odaklanan ve Nash pazarlık teorisine dayalı kooperatif işletim stratejileri öneren modeller dikkat çekmektedir [29]. Bu yaklaşımlar, tüm taşıyıcı sistemlerin toplam

sosyal refahını artırmayı hedeflemekte ve karar vericiler için esnek bir çözüm çerçevesi sunmaktadır. Ancak bu modellerin teknik ve ekonomik belirsizlik koşulları altında nasıl bir performans sergilediğine dair literatürde yeterli sayıda kapsamlı analiz bulunmamaktadır. Özellikle belirsizliklerin sistem davranışına olan etkilerinin ayrıntılı biçimde modellenmemiş olması, önerilen yapıların güvenilirlik açısından sınırlı değerlendirilmesine neden olmaktadır.

Belirsizlik koşullarında karar verme süreçlerini desteklemek amacıyla geliştirilen sağlam optimizasyona dayalı yaklaşımlar, son yıllarda literatürde artan bir ilgi görmektedir. Bu kapsamda geliştirilen bir çalışmada, merkeziyetsiz sistemlerin belirsizlik altında istikrarlı bir şekilde çalışabilmesini sağlamak amacıyla, ADMM tabanlı tamamen dağıtık bir çözüm yöntemi önerilmiştir [30]. Söz konusu yaklaşım, karar destek süreçlerinde geçerlilik, optimalite ve beklenen değer gibi ölçütler arasında denge kurarak sistemin farklı belirsizlik senaryolarında da kararlı biçimde çalışmasını amaçlamaktadır. Ancak sağlam programlamaya dayalı bu sistemlerin temel zorluklarından biri olan yüksek hesaplama yükü, özellikle geniş ölçekli enerji sistemlerinin gerçek zamanlı uygulamalarında önemli bir sınırlayıcı unsur olarak öne çıkmaktadır.

P2P enerji paylaşım mekanizmalarında belirsizliklerin sistematik şekilde yönetilmesine yönelik olarak, literatürde önerilen bir diğer yapı ise kapsamlı bir risk yönetim çerçevesidir. Bu yapıda, prosümerlerin karşı karşıya kalabileceği potansiyel riskler tanımlanmış ve sistematik biçimde sınıflandırılmış; her bir risk türü için spesifik azaltıcı stratejiler geliştirilmiştir [31]. Tanımlanan on temel risk, üç ana kategori altında toplanmış ve bu sınıflama doğrultusunda, mikroşebeke planlaması ve P2P enerji ticareti süreçlerine bu risk unsurlarının doğrudan entegre edilmesi sağlanmıştır. Çalışma, özellikle belirsizlik yönetiminin sistem tasarımı ile bütünleştirilmesi açısından literatüre önemli bir katkı sunmaktadır. Bununla birlikte, sistemin dinamik tepkilerinin söz konusu riskler karşısındaki davranışlarını sayısal olarak analiz etmemesi, modelin geçerlilik sınırlarını daraltan bir diğer eksiklik olarak değerlendirilmektedir.

Belirsizliklerin yönetiminin yanı sıra, karbon emisyonu kısıtları ve piyasa risklerinin birlikte dikkate alındığı senaryolarda, çoklu enerji taşıyıcılarını içeren mikroşebekelere yönelik olarak riskten kaçınan stokastik planlama yaklaşımları geliştirilmektedir. Bu çerçevede sunulan bir modelde, asimetric Nash pazarlık

yaklaşımı temel alınarak emisyon sınırları ve sistem katılımcılarının risk duyarlılıkları, enerji ticaret süreçlerine doğrudan entegre edilmiştir [32]. Modelde, dağıtık enerji kaynaklarının (DEK) sistemde etkin şekilde kullanılmasıyla birlikte esneklik artırılırken; aynı zamanda gerçek zamanlı fiyat dalgalanmaları, talep değişkenliği ve ağ kısıtları gibi operasyonel unsurlar da dikkate alınmıştır. Bu yönüyle çalışma, teorik düzeydeki pazarlık modelleri ile pratik sistem kısıtlarını bir araya getiren özgün ve çok boyutlu bir çözüm yaklaşımı sunmaktadır.

P2P enerji piyasalarının sürdürülebilirliği yalnızca belirsizliklerin yönetilmesi ile sınırlı değildir; aynı zamanda sistem güvenliği ve katılımcı gizliliğinin korunması da kritik öneme sahiptir. Bu gereksinimi karşılamak amacıyla, blokzincir teknolojisi ile oyun teorisini birleştiren güvenli P2P enerji toplulukları oluşturulmasına yönelik modeller geliştirilmiştir. Bu kapsamda önerilen bir çalışmada, Shapley değeri temelli bir katılım paylaşım mekanizması, blokzincir altyapısında çalışan kredi konsensüs kanıtı (proof of credit consensus) algoritması ile desteklenmiş ve böylece güvenli, şeffaf ve teşvik edici bir ticaret ortamı kurulmuştur [33]. Katılımcıların akıllı sözleşmelere uyumunu teşvik etmek üzere geliştirilen iki aşamalı hiyerarşik ödül sistemi ile yüklerin zirve saatlerden kaydırılması ve sistem esnekliğinin artırılması hedeflenmiştir. Modelin performansı çevresel, ekonomik, teknik ve piyasa ölçütleri üzerinden detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Ancak, hesaplama süreleri ve şebeke düzenlemelerine dair varsayımlar, modelin gerçek dünya uygulamalarına entegrasyonu açısından hâlen test edilmesi gereken konular arasında yer almaktadır.

Blokzincir tabanlı sistemlerin yalnızca adil paylaşımı değil, aynı zamanda ağ yönetiminde verimlilik ve esneklik sağlaması da beklenmektedir. Bu hedef doğrultusunda geliştirilen hibrit bir sistemde, ileri beslemeli sinir ağı (FFNN) ve pekiştirmeli öğrenme (reinforcement learning, RL) algoritmaları birleştirilerek, P2P enerji ticareti esnasında ağ keşfi süreçlerinin optimize edilmesi amaçlanmıştır [34]. Üç katmanlı mimariye sahip bu sistem; işlem gecikmeleri, güvenlik düzeyi ve ticaret hacmi gibi performans göstergelerine göre test edilmiştir. Ancak modelin yalnızca simülasyon ortamında değerlendirilmiş olması, gerçek zamanlı uygulamalarda ortaya çıkabilecek zorlukların henüz ele alınmadığını göstermektedir.

P2P enerji sistemlerinin başarılı biçimde işleyebilmesi için yalnızca ağ performansı değil; aynı zamanda güvenlik, gizlilik ve piyasa esnekliği gibi çok boyutlu gereksinimlerin de karşılanması gerekmektedir. Bu doğrultuda geliştirilen bir diğer çalışmada, Ethereum tabanlı bir esneklik piyasası içerisinde güvenli çok taraflı hesaplama yöntemi kullanılmış; böylece enerji piyasası emirleri gruplar hâlinde kodlanmış ve işlem miktarları gizlenmiştir [35]. Bu yaklaşım, anonimliği korurken aynı zamanda akıllı sözleşmeler aracılığıyla gerçekleştirilen teklif eşleştirme ve mutabakat işlemlerinde hem işlem hacmini azaltmakta hem de gaz tüketimini düşürmektedir. Ancak modelin yalnızca elektrik piyasasıyla sınırlı olması ve gaz ya da ısı gibi diğer enerji taşıyıcıları için ölçeklenebilirliğe dair bir değerlendirme sunmaması, genişletilme potansiyelinin hâlen açık olduğunu göstermektedir.

Güvenli ticaret yapılarının sağlanmasında sadece sistem düzeyinde şeffaflık değil, katılımcıların bireysel güvenilirlik düzeylerinin ölçülmesi de önemli bir gerekliliktir. Bu çerçevede geliştirilen bir modelde, prosümerlerin ödeme geçmişleri ve ticaret alışkanlıkları temel alınarak bir karşılıklı itibar indeksi tanımlanmıştır [36]. Ticaret güvenliğini artırmak amacıyla klasik ADMM algoritması yerine F-ADMM algoritması kullanılmış ve bu sayede işlem yakınsama süresi azaltılarak verimlilik artırılmıştır. Ancak sistemin şebeke kayıplarını göz ardı etmesi, enerji fiyatlamasında sapmalara neden olabileceği için saha uygulamaları açısından potansiyel bir kısıt oluşturmaktadır.

Enerji sistemlerinin dijitalleşmesi ile birlikte yalnızca enerji değil, bu sistemlerle ilişkili veri varlıklarının güvenli yönetimi de kritik hâle gelmiştir. Bu kapsamda geliştirilen merkeziyetsiz dijital veri pazarı modelleri, özellikle nesnelerin interneti (IoT) temelli verilerin güvenli biçimde saklanması ve ticaretinin yapılmasına odaklanmaktadır. [37] numaralı çalışmada önerilen sistemde, VerneMQ ve Hyperledger Fabric tabanlı bir platform aracılığıyla katılımcı güven skorları hesaplanmakta ve veri gizliliği korunarak iletim ve depolama işlemleri gerçekleştirilmektedir. Sistem, işlem yükü, ölçeklenebilirlik ve güvenlik boyutlarında detaylı şekilde analiz edilmiş olsa da, farklı türde IoT verileriyle entegrasyon kapasitesi ve geniş kapsamlı kullanım senaryoları henüz tam anlamıyla değerlendirilmemiştir.

Blokzincir tabanlı P2P enerji ticareti uygulamalarında, kullanıcılar arası doğrudan enerji alışverişini mümkün kılan merkeziyetsiz yapılar üzerine de çalışmalar

yapılmaktadır. Örneğin, [38] numaralı çalışmada, Ethereum ağı üzerinde açık artırma temelli bir akıllı sözleşme modeli geliştirilmiş; bu yapı sayesinde prosümerler arasında güvenli ve otomatik elektrik ticareti gerçekleştirilmiştir. Modelde geleneksel fiyat belirleme yöntemleri yerine merkeziyetsiz finans (DeFi) ve merkeziyetsiz borsa (DEX) sistemleri kullanılarak, piyasa fiyatlarının arz-talep dengesine göre otomatik oluşması sağlanmıştır. Ek olarak, doğrusal programlama sonuçlarının makine öğrenmesi algoritmaları ile öğrenilmesi yoluyla, karar süreçlerinin hızlandırılması hedeflenmiştir. Ancak bu yapı yalnızca elektrik piyasasına odaklanmakta; çoklu enerji taşıyıcılarının entegrasyonu, sanal depolama altyapısı ve kullanıcı gizliliği gibi diğer kritik boyutları kapsamamaktadır. Ayrıca sistem, yalnızca test ağı üzerinde simülasyonlarla sınanmış olup, düzenleyici çerçeveler, kullanıcı davranışları ve şebeke esnekliği gibi saha gerçekleri sınırlı düzeyde değerlendirilmiştir. Dolayısıyla model, merkeziyetsiz ticaret için sağlam bir altyapı sunmakla birlikte, operasyonel karmaşıklık ve sürdürülebilirlik açısından geliştirilmeye açık bir yapıda kalmaktadır.

Son olarak, P2P enerji ticaretinde sürdürülebilirliğin sağlanmasında, kimlik doğrulama ve yetkilendirme süreçlerinin güvenli bir şekilde tasarlanması da hayati bir unsurdur. Bu doğrultuda [39] numaralı çalışmada, karşılıklı kimlik doğrulama ve güvenli fikir birliği mekanizmalarının kullanıldığı bir yapı önerilmiştir. Sistem, kullanıcıların işlemlerini güvenli biçimde gerçekleştirmesini sağlarken, dinamik fiyatlandırma mekanizmasıyla da prosumörlerin enerji üretim ve ticaret motivasyonları artırılmıştır. Böylece arz-talep dengesi korunurken, piyasa istikrarı da desteklenmiştir. Ancak bu yaklaşımın farklı enerji türlerine, kullanıcı profillerine ve ağ yapısına ne ölçüde uyum sağlayabileceği, hâlâ detaylı saha testleri gerektiren bir araştırma alanı olarak durmaktadır.

Enerji paylaşımına yönelik literatürde, finansal getirilerin katılımcılar arasında adil bir şekilde dağıtılmasını hedefleyen modeller de önemli bir yer tutmaktadır. Bu bağlamda geliştirilen yapılar, bireylerin birleşik prosümer çerçevesi içinde iş birliği temelli hareket etmelerini sağlayarak karar verme süreçlerini ve hisse devrine dayalı yönetim modellerini kapsamaktadır [40]. Bu modeller, arz-tepki ve talep-tepki dinamiklerine dayalı olarak prosümerlerin üretim ve tüketim stratejilerini optimize etmelerine olanak tanımakta; böylece ticaret kararlarının bireysel düzeyde şekillenmesini mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte, enerji akışlarının belirli

dağıtım hatlarında yoğunlaşması durumunda düşük gerilimli şebeke altyapılarında teknik kısıtların ortaya çıkabileceği belirtilmiş; bu nedenle yalnızca ekonomik optimizasyon değil, aynı zamanda fiziksel sistem sınırlamalarının da dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Fiziksel sistem kısıtlarının gözetildiği ve işlem güvenliğinin sağlandığı bir diğer yaklaşım ise, gerçek zamanlı P2P enerji ticaretinin operatör müdahalesine gerek duyulmadan gerçekleştirilmesini mümkün kılan, topluluk enerji depolama sistemlerini içeren yapılardır. Bu kapsamda geliştirilen iki aşamalı bir modelde, öncelikle prosümerlerin arz ve talep teklifleri doğrultusunda adil fiyatlandırma mekanizması uygulanmakta; eşleşemeyen işlemler için ise ortak depolama altyapısı devreye alınmaktadır [41]. Depolama sisteminin şarj-deşarj kararları, pekiştirmeli öğrenme algoritmaları ile dinamik biçimde yönetilmekte ve bu sayede sistemin genel esnekliği ve piyasa dengesi artırılmaktadır. Ancak söz konusu modelin yalnızca simülasyon ortamında test edilmiş olması, gerçek dünya uygulamaları açısından geçerliliği sınırlandıran önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir.

Fiziksel altyapı kısıtlarını ele alan diğer çalışmalar arasında, ısı ağlarına yönelik geliştirilen ağ farkındalıklı piyasa modelleri öne çıkmaktadır. [42] numaralı çalışmada, kuadratik programlama temelli bir optimizasyon yapısı önerilmiş; bu yapı ile düğümsel marjinal fiyatların hesaplanması ve ağ kayıplarının yönetilmesi hedeflenmiştir. Modelde sıcaklık değişkenlerinin sabitlenmesi ve pompalama gücünün ihmal edilmesiyle konveks yapı elde edilerek hesaplama süreçleri basitleştirilmiştir. Bu yaklaşım, yerel ısı prosümerlerinin değişken akışlı bölgesel ısıtma sistemlerine entegrasyonunu kolaylaştırmakta ve sistem işletme maliyetlerini azaltmaktadır. Bununla birlikte, modelin daha çeşitli senaryolarla test edilmesi ve ağ kayıplarının farklı parametrelerle daha esnek biçimde modellenmesi, uygulama geçerliliğini artıracak önemli adımlar olarak değerlendirilmektedir.

Karar alma süreçlerinde giderek artan belirsizlikler ve sistem karmaşıklığı, literatürde yapay zekâ temelli yaklaşımların önemini artırmaktadır. Bu doğrultuda, pekiştirmeli öğrenme algoritmalarından Q-learning özellikle dinamik ve belirsiz çevresel koşullar altında prosümer davranışlarını modellemek için güçlü bir araç olarak görülmektedir [43]. Geliştirilen sistemde, enerji aracısı (EP) olarak tanımlanan birim yalnızca ticareti düzenlemekle kalmayıp, aynı zamanda ortak batarya kapasitesini planlamakta ve fiyatlama stratejilerini çevresel koşullara göre

dinamik biçimde belirlemektedir. Böylece, enerji paylaşımı ve tüketim kararları optimize edilmekte; prosümerlerin piyasa koşullarına uyumlu davranışlar geliştirmesi mümkün olmaktadır. Ancak modelin büyük ölçekli ve heterojen ağ yapılarında nasıl bir performans sergileyeceği henüz tam olarak test edilmemiştir; bu durum, algoritmanın ölçeklenebilirlik ve sürdürülebilirlik açısından daha ileri düzey stratejilerle desteklenmesi gerektiğini göstermektedir.

P2P enerji ticaretinin güvenlik, gizlilik ve işlem verimliliği açısından sürdürülebilir şekilde yürütülebilmesi, yalnızca ağ yapısının dağıtık mimarilerle desteklenmesiyle değil, aynı zamanda hesaplama yükünü dengeleyecek yapısal çözümlerle mümkün olmaktadır. Bu çerçevede geliştirilen yaklaşımlardan biri, ikili blokzincir mimarisine dayalı bir sistemdir. Söz konusu yapıda, ana ve ikincil blokzincir katmanlarından oluşan bir sistem geliştirilmiş; işlem doğrulama ve fiyat belirleme gibi hesaplama açısından yoğun görevler ikincil zincire aktarılmış, ana zincir ise yalnızca veri depolama ve kimlik doğrulama görevlerini üstlenmiştir [44]. Bu modelin temel bileşeni olan İyileştirilmiş İyimser Rollup (IOR) mekanizması, işlem sonuçlarının güvenli ve hızlı biçimde doğrulanmasına olanak tanımakta; geleneksel yöntemlere kıyasla işlem süresini ve gaz tüketimini ciddi ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, katılımcıların güvenilirliğine göre atanabilen yetkilendirilmiş doğrulayıcılar sayesinde işlemler anlık olarak denetlenmekte ve kötü niyetli davranışlara karşı cezai token yakma ve itibar puanına dayalı katılım kontrolleri gibi önlemler uygulanmaktadır. Simülasyon sonuçları, bu sistemin geleneksel blokzincir yapısına kıyasla daha yüksek işlem kapasitesi sunduğunu ve saniyede 1000'e yakın işlem gerçekleştirebildiğini göstermektedir. Ancak sistemin yalnızca elektrik enerjisi odaklı olması, çoklu enerji taşıyıcılarının entegrasyonuna uygunluğunu sınırlamakta; ayrıca kullanıcı davranışları ve şebeke esnekliği gibi saha uygulama dinamiklerinin etkisi hâlen detaylı biçimde analiz edilmemiştir.

Sonuç olarak, bu literatür taraması; DES, P2P enerji paylaşım mekanizmaları ve blokzincir tabanlı enerji yönetimi sistemleri alanında gerçekleştirilen mevcut çalışmaları bütüncül biçimde incelemektedir. Çalışmalar, enerji paylaşımı ve yönetimine yönelik çeşitli teknik, ekonomik ve algoritmik yaklaşımlar sunmakta; ancak özellikle enerji depolama paylaşımı, belirsizlik yönetimi, oyun teorisine dayalı kooperatif karar yapıları ve blokzincir destekli güvenli ticaret sistemleri gibi başlıklarda hâlen açık araştırma boşlukları barındırmaktadır. Bu boşluklar,

sürdürülebilir, güvenli ve esnek enerji ticaret yapılarının kurulmasına yönelik olarak yenilikçi çözümler geliştirilmesi için önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu literatür incelemesi, çalışmanın özgün katkılarının anlaşılması ve önerilen sistem mimarisinin bilimsel temellerinin oluşturulması açısından sağlam bir çerçeve sağlamaktadır.

Aşağıda yer alan Tablo 2.1, literatür taramasında incelenen çalışmaların özetini sunmaktadır.

Tablo 2.1 Literatür taramasının özeti

Referanslar	Konu	Kullanılan model veya algoritma	Sınırlamalar
21	Çoklu enerji taşıyıcılarının ayrı planlanması	Doğrusal optimizasyon temelli P2P modeli	Gerçek zamanlı değişkenlik ve kullanıcı belirsizliklerini dikkate almamak
22	Memnuniyet temelli çoklu enerji topluluğunda kâr paylaşımı	Merkezi koordinasyon ve memnuniyet dağılımı	Piyasa dışı riskleri sınırlı ele almak, teknik boyutları ikincil plana atmak
23	Gaz ve elektrik sistemlerini içeren çok taraflı müzakere temelli P2P ticaret	Raiffa-Kalai-Smorodinsky çözümüne dayalı adil fiyat belirleme	Birebir pazarlıkların hesaplama yükü ve ölçeklenebilirlik sorunu
24	Merkeziyetsiz, çok taşıyıcılı enerji sistemlerinin koordinasyonu	Stokastik optimizasyon + ADMM + batarya/ısı/gaz entegrasyonu	Saha uygulamalarındaki kararlılığın ölçülmemesi

Tablo 2.1 Literatür taramasının özeti (devamı)

25	Heterojen DEK'ler için merkeziyetsiz ticaret yapısı	SL destekli parametre tahmini + F-ADMM	Tahmin sapmaları nedeniyle karar kalitesinde düşüş, kaynak tahsisi hataları
26	Kooperatif çoklu enerji merkezlerinin optimizasyonu	Oyun teorisi temelli ödül paylaşımı	Gerçek uygulama kısıtlarını göz ardı etme
27	Enerji depolama paylaşım sistemi	İşbirlikçi yapı + ADMM + F-ADMM	Veri gizliliği ve sistem darboğazlarına yönelik sınırlı çözüm
28	Rüzgar, güneş, CHP ile çalışan sistemlerin optimizasyonu	Nash pazarlık + MILP + ADMM	Sistem kayıplarını ve anlık ihtiyaçları yeterince modele dahil etmeme
29	Rüzgar-hidrojen-ısı entegrasyonlu çok ajanlı sistem	Nash pazarlık temelli kooperatif model	Belirsizlikler altındaki performans etkisi yetersiz analiz edilmiş
30	Belirsizlik altında sağlam dağıtık P2P çözüm modeli	ADMM tabanlı merkeziyetsiz sağlam optimizasyon	Yüksek hesaplama maliyeti, ölçekleme sınırlamaları
31	P2P sistemlerde risk sınıflandırması ve yönetimi	Risk sınıflandırma çerçevesi	Dinamik sistem tepkilerini sayısal değerlendirmeme
32	Karbon emisyonu ve risk duyarlılığına göre P2P ticaret	Asimetrik Nash pazarlık modeli	Gelişmiş kısıt entegrasyonuna rağmen saha geçerliliği belirsiz

Tablo 2.1 Literatür taramasının özeti (devamı)

33	Blockchain destekli güvenli P2P topluluğu	Shapley değeri + kredi bazlı konsensüs	Hesaplama süresi ve regülasyon varsayımları değerlendirilmemiş
34	Ağ keşfi süreçlerinin makine öğrenmesi ile yönetimi	FFNN + Reinforcement Learning	Sistem sadece simülasyonla test edilmiş, gerçek uygulama eksik
35	P2P piyasasında güvenli çok taraflı işlem	Ethereum + çok taraflı hesaplama	Gaz ve ısı gibi taşıyıcıların kapsam dışı bırakılması
36	Prosumör güven endeksine dayalı ticaret	Karşılıklı itibar analizi + F-ADMM	Şebeke kayıplarının fiyatlamaya etkisinin göz ardı edilmesi
37	IoT veri güvenliği ve P2P sistem entegrasyonu	VerneMQ + Hyperledger Fabric	Farklı veri türleriyle entegrasyon yeterince test edilmemiş
38	Merkeziyetsiz finans (DeFi) temelli P2P ticaret	Ethereum + açık artırma + ML destekli fiyatlama	Çoklu enerji taşıyıcılarını ve gizliliği kapsamaması
39	Kimlik doğrulama temelli güvenli ticaret modeli	Kimlik doğrulama + dinamik fiyatlama	Farklı kullanıcı profillerine ve enerji türlerine uyum sınırlı
40	P2P ticaretinde adil erişim	Hisse devrine dayalı paylaşım	Düşük gerilimli şebeke problemleri
41	Topluluk depolama destekli gerçek zamanlı ticaret	2-aşamalı model + pekiştirmeli öğrenme	Gerçek dünya verileriyle test edilmemiş

Tablo 2.1 Literatür taramasının özeti (devamı)

42	Isı ağları için ağ farkındalıklı piyasa modeli	Konveksleştirilmiş kuadratik programlama	Sınırlı senaryo kapsamı ve parametre esnekliği
43	Q-learning ile prosümer davranış modelleme	Enerji aracı + ortak batarya planlaması	Büyük ölçekli sistemlerde test edilmemiş
44	İkili blokzincir tabanlı işlem yükü azaltımı	Ana + yan zincir + IOR mekanizması	Yalnızca elektrik sistemine uygulanabilirlik, saha testlerinin eksikliği

2.1 Küresel Eğilimler

Dünyada P2P enerji ticareti konsepti araştırılmakta olsa da, uygulama hızı bölgelere göre farklılık göstermektedir. Asya’da, özellikle Hindistan ve Bangladeş gibi ülkelerde, şebekeye erişim sorunlarının yaşandığı bölgelerde P2P enerji ticaretine yönelik artan bir ilgi bulunmaktadır. Bu ülkeler, kırsal ve uzak bölgelerde elektriğe erişimi sağlamak için bol güneş enerjisi potansiyelinden yararlanmayı hedeflemektedir. Bangladeş’te blockchain destekli ME SOLshare gibi girişimler, haneler arasında enerji ticaretini mümkün kılarak topluluk genelinde enerji erişiminin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır [45].

Afrika’da ise teknik, düzenleyici ve politik gereklilikler nedeniyle P2P enerji ticaretinin uygulanması nispeten yavaş ilerlemiştir. Ancak, pazar geliştikçe ve finansman sağlandıkça, P2P enerji ticaretinin Afrika ülkelerinde başarıya ulaşma potansiyeli bulunmaktadır [46]. P2P enerji piyasasının uygulanması, kullanıcılar arasında enerji alışverişlerini kolaylaştıran çevrimiçi bir platformun oluşturulmasını gerektirir. SolTrade, P2P enerji ticareti için geliştirilen bir prototip web uygulamasına örnektir. Bu platform aracılığıyla gerçekleştirilen simüle edilmiş işlemler, piyasa işlemlerinin enerji şebekesi üzerindeki fiziksel etkileri hakkında önemli bilgiler sağlayabilmektedir [47].

Avrupa’da enerji dönüşümü hızla ilerlemekte olup, P2P enerji ticareti giderek ivme kazanmaktadır. Portekiz’de gerçekleştirilen bir çalışma, yerel elektrik sistemlerinde P2P ölçeklenebilirliğinin potansiyel faydalarını vurgulamaktadır. Analizlere göre, topluluk maliyet tasarrufları, merkezi olmayan kaynak senaryosunda, merkezi senaryoya kıyasla her zaman daha yüksek olup, P2P ticaretinin olmadığı durumda %11, olduğu durumda ise %31 oranına ulaşmaktadır [48]. Almanya, Fransa, Hollanda, İspanya ve Birleşik Krallık gibi ülkeler, hanehalkı düzeyinde yenilenebilir enerji üretimini teşvik etmekte ve enerji ticareti ile yönetimini kolaylaştırmak için enerji sektörünün dijitalleşmesi konusunda önemli adımlar atmaktadır.

Amerika’da ise P2P enerji ticareti henüz başlangıç aşamasında olmasına rağmen umut verici bir potansiyele sahiptir. Düzenleyici ortam, bu yeni paradigma için kademeli olarak gelişmektedir. Örneğin, New York’taki “Brooklyn Microgrid” girişimi, kullanıcıların elektrik kaynaklarını karbon ayak izine göre seçmelerine ve otomatik enerji ticaretini gerçek zamanlı olarak gerçekleştirmelerine olanak tanımaktadır [49].

P2P enerji ticaretine katılmak için tüketicilerin akıllı sayaçlara ve diğer dijital teknolojilere erişimi olması gerekmektedir. Bu teknolojiler, tüketicilerin enerji kullanımını izlemelerine ve ticaret yapmalarına yardımcı olmaktadır. Bu ağların büyümesi, P2P enerji ticaretinin genişlemesinde kilit bir faktördür. Küresel elektrik ticareti pazarının 2021-2025 döneminde %6’lık bir Bileşik Yıllık Büyüme Oranı ile büyüme potansiyeline sahip olduğu ve bu dönemde pazar değerinde 96,84 milyar ABD doları artış sağlayacağı tahmin edilmektedir [50].

2.2 Vaka Çalışmaları

- AGL Energy

Avustralyalı elektrik perakendecisi AGL Energy, blockchain teknolojisinin P2P enerji ticaretinde nasıl kullanılabileceğini araştırmak için Avustralya Yenilenebilir Enerji Ajansı’nın desteğiyle bir pilot proje yürütmektedir. Bu proje, çatı güneş panelleriyle üretilen fazla enerjinin şebekeye geri satılması için yeni bir yöntem sunarak, enerji fazlası olan hanelere odaklanmaktadır. Melbourne’de gerçekleştirilen masaüstü denemesi, blockchain teknolojisinin P2P enerji ticaretini destekleme potansiyelini ortaya koymaktadır. Ancak çalışmanın sonuçları, dağıtık

deFTER teknolojilerinin (DLT), bireysel işlemleri kaydetmek için gereken yüksek veri işleme kapasitesi nedeniyle (2017 yılı itibarıyla) büyük ölçekli sistemler için henüz yeterince uygun olmadığını göstermektedir [51].

- Lumio Solar

İspanya merkezli bir enerji perakendecisi olan Lumio Solar, enerji alım ve satım süreçlerini otomatikleştirmeyi amaçlayan bir P2P platformu geliştirmektedir. Bu platform, enerji fazlasına sahip kullanıcıların, İspanya sınırları içinde olmak kaydıyla herhangi bir coğrafi kısıtlama olmaksızın enerji ticareti yapmalarına olanak tanıyan bir pazar yeri oluşturmayı hedeflemektedir. Lumio Solar, kullanıcılar için bir fiyat önerisi sunsa da, bireysel tercihlere bağlı olarak kullanıcılar kendi fiyatlarını belirleme özgürlüğüne sahiptir [52].

- Sonnen

Küresel ölçekte akıllı enerji çözümleri sağlayan Sonnen, enerji depolama sistemleri ve sanal enerji santrali modeli üzerine kurulu bir P2P enerji pazarı geliştirmiştir. Sonnen'in sistem kullanıcıları, gündüz saatlerinde ürettikleri fazla güneş enerjisini depolayarak, bu enerjiyi SonnenCommunity platformu üzerinden ticaret amacıyla kullanabilmektedir. Katılımcılar, fiyatlandırma ve ticaret tercihlerini kendileri belirleyerek, tüketim alışkanlıklarına bağlı olarak daha yüksek kazanç sağlayabilir ya da daha uygun maliyetli enerji temin edebilir.

SonnenCommunity, geleneksel enerji hizmeti piyasalarından bağımsız olarak faaliyet gösterse de elektrik şebekesi ile bağlantılıdır. Güneş paneli veya bataryası olmayan kullanıcılar için platform, enerji ticaretine katılım karşılığında aylık bir ücret talep etmektedir. Ayrıca, Sonnen'in sunduğu enerji depolama çözümleri, Tesla'nın Powerwall sistemi ile rekabet edecek şekilde fiyatlandırılarak maliyet avantajı sağlamaktadır [53].

- Vandebron

Amsterdam merkezli bir yeşil enerji şirketi olan Vandebron, bireylere ve işletmelere elektrik ve doğal gaz tedarik etmekte olup, enerji üretimi gerçekleştirmemektedir. Şirket, enerjiyi ağırlıklı olarak rüzgar, güneş ve biyokütle kaynaklarından üretim yapan bağımsız tedarikçilerden temin etmektedir. 2013 yılında kurulan Vandebron, 2019 itibarıyla 180.000'den fazla haneye enerji

sağlayarak Hollanda'nın yenilenebilir enerji sektöründe önemli bir konuma ulaşmıştır.

Vandebron'un iş modeli, hanelerin yenilenebilir enerjiyi doğrudan üreticilerden satın almasına olanak tanıyan bir pazar yeri oluşturmaya dayanmaktadır. Bu strateji, şirketin Hollanda'nın %100 yenilenebilir enerjiye geçişine katkıda bulunma misyonuyla örtüşmektedir. Şirket, Alman enerji devi E.ON'un yenilenebilir enerji birimi Innogy'nin bir yan kuruluşu olan Essent tarafından satın alınmıştır. Bu satın alma, Essent'in yenilenebilir enerji portföyünü genişletirken, sürdürülebilir enerjiye geçişi daha geniş bir kullanıcı kitlesi için cazip hale getirmeyi amaçlamaktadır [54].

- Piclo

Birleşik Krallık merkezli bir P2P enerji ticareti platformu olan Piclo, yenilenebilir enerji üreticileri ile tüketiciler arasındaki eşleştirmeyi optimize etmek amacıyla sayaç verilerini kullanmaktadır. Platform, işletmelere enerji tedarik edebilecekleri yenilenebilir enerji üreticilerini ve bu üreticilerin konumlarını açık bir şekilde sunarak daha bilinçli karar almalarına yardımcı olmaktadır. Ayrıca, enerji esnekliğini artırmak için Dağıtım Sistemi Operatörü'nün esneklik hizmetleri, yani 'flex' işlemleri ile entegre çalışmaktadır.

Piclo'nun temel amacı, yenilenebilir enerji kullanımını daha verimli hale getirerek düşük karbonlu bir enerji sistemine geçişi hızlandırmaktır. Platformun etkinliği, Hollanda'daki Essent enerji şirketi tarafından test edilmiş ve Birleşik Krallık'ta yürütülen bir pilot projede başarılı sonuçlar elde edilmiştir [55].

- Power Ledger

Avustralya merkezli teknoloji şirketi Power Ledger, P2P enerji ticareti alanında öncü bir rol üstlenmektedir. Blockchain teknolojisi (Solana) aracılığıyla bireylerin ve işletmelerin fazla yenilenebilir enerjiyi doğrudan komşularına satmalarına imkân tanımaktadır. Power Ledger platformu, enerji üreticilerine fazla enerjilerini kime ve hangi fiyatla satmak istediklerini belirleme özgürlüğü sunarak merkeziyetsiz ve daha adil bir enerji piyasası oluşturmaktadır.

Platform, xGrid, MODE Flex ve Local Energy Market gibi çeşitli özellikler içermektedir. xGrid, elektrik perakendecilerinin müşterilerine güneş enerjisini şebeke üzerinden ticaret yapma olanağı sağlarken, MODE Flex, enerji esnekliği ve

sanal enerji santrali hizmetleri sunarak alıcı ve satıcıları doğrudan buluşturmaktadır. Bu özellikler, yenilenebilir enerji kullanımını daha etkin hale getirerek enerji piyasasının daha esnek ve verimli işlemlerini desteklemektedir [56].

2.3 Problem Tanımı

Yenilenebilir enerji kaynaklarının hızlı bir şekilde yaygınlaşması, geleneksel enerji sistemlerinin temel varsayımlarını geçersiz kılmakta; enerji arz-talep dengesinde öngörülemeyen dalgalanmalara ve dağıtım ağlarında kontrol karmaşıklıklarının artmasına yol açmaktadır. Özellikle elektrik, ısı ve gaz gibi farklı enerji taşıyıcılarının aynı mikroşebeke yapısı içinde entegre biçimde değerlendirilmesi, çok boyutlu bir enerji yönetimi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır [21], [22]. Bu durum, sistem düzeyinde sürdürülebilirlik, esneklik ve ekonomik verimlilik hedeflerinin aynı anda sağlanmasını zorlaştırmaktadır.

Geleneksel merkezi yapıların yetersiz kaldığı bu bağlamda, merkeziyetsiz, eşler arası (P2P) enerji ticareti modelleri, hem enerji üreticisi hem de tüketicisi rolünü üstlenen prosümerlerin aktif katılımını esas alan alternatif çözümler sunmaktadır. Ancak mevcut P2P modeller, çoğunlukla tekil enerji türlerine odaklanmakta ve çoklu enerji taşıyıcılarının eşzamanlı yönetimi konusunda yetersiz kalmaktadır [23], [28]. Ayrıca, dinamik kullanıcı davranışlarının sistem performansına etkisi, depolama paylaşımı, işlem güvenliği ve gizlilik gibi çok boyutlu gereksinimler literatürde hâlen tam anlamıyla karşılık bulamamıştır [24], [27], [31], [36].

Özellikle dağıtık enerji sistemlerinde, fiziksel enerji akışları kadar dijital altyapı tasarımı da büyük önem arz etmektedir. Mevcut sistemler genellikle şu eksikliklerle sınırlıdır:

- Enerji depolama sistemleri, çoğu zaman sadece bireysel prosümer seviyesinde değerlendirilmektedir. Depolama altyapısının topluluk temelli hibrit kullanımını mümkün kılan; yani öncelikle sanal depolama kaynaklarını kullanan, ihtiyaç hâlinde fiziksel bataryaları da devreye alan esnek yapılar henüz yaygınlaşmamıştır. Bu yapı, fiziksel batarya ihtiyacını azaltarak maliyetleri düşürme potansiyeli taşımaktadır [27], [31].
- Fiyatlandırma mekanizmaları, gerçekçi ağ kayıplarını ve düğümsel marjinal fiyatları göz ardı etmekte; bu da ticaretin adil ve etkin yürütülmesini engellemektedir [42].

- Blokzincir tabanlı çözümler, güvenli veri iletimi ve işlem bütünlüğü sunmakta başarılı olsa da, gizlilik koruması çoğu zaman sınırlıdır. Sistemlerin özellikle kullanıcı kimliği ve işlem içeriklerine yönelik veri güvenliği konusunda özel önlemler gerektirdiği açıktır [33], [35], [39].
- Kullanıcı güveni ve katılım motivasyonu, sistemlerin yalnızca teknik değil sosyal olarak da kabul edilebilirliğini etkileyen unsurlardır. Bu konulara sistem tasarımı içerisinde nadiren yer verilmektedir [26], [40].

Bu bağlamda, literatürde önerilen düşümsel fiyatlandırma, veri gizliliği, risk analizi, oyun teorisi, sağlam optimizasyon ve blokzincir mimarileri gibi yaklaşımlar çoğunlukla tekil bileşenlere odaklıdır; entegrasyon problemi, yani tüm bu unsurların birlikte çalışabileceği bir yapının eksikliği, halen önemli bir araştırma boşluğudur [25], [30], [34], [43].

Bu tez çalışması, yukarıda belirtilen eksiklikleri bütüncül biçimde ele alan, yenilikçi bir sistem yaklaşımı önermektedir.

Önerilen yapı:

- Sanal depolama öncelikli hibrit depolama stratejisi ile enerji paylaşımında esneklik sağlamak, fiziksel batarya ihtiyacını azaltmakta ve maliyetleri düşürmektedir [27], [31].
- Düşümsel marjinal fiyatlandırma mekanizması, ağ kayıplarını gözeterek her prosümer için adil ve şeffaf bir piyasa yapısı sunmaktadır [42].
- Çok amaçlı doğrusal olmayan optimizasyon modeli, kullanıcı davranışlarını, ticaret stratejilerini ve depolama kararlarını gerçek zamanlı ve çok boyutlu bir yapı içerisinde optimize etmektedir [24], [30].
- Konsorsiyum blockchain altyapısı, yalnızca merkeziyetsiz işlem güvenliği sağlamakla kalmaz; aynı zamanda kullanıcı gizliliğini koruyan özel protokollerle desteklenmektedir. Sistem işlem hızı, gaz maliyeti ya da ağ yükü gibi metrikleri kapsamamaktadır [36], [39].
- Sistem mimarisi, yalnızca teknik verimliliğe değil, aynı zamanda kullanıcı güveni, şeffaflık, adil kâr paylaşımı ve kooperatif motivasyon gibi sosyal-ekonomik parametrelere de entegre çözümler sunmaktadır [26], [28], [40].

Bu çalışmanın özgün katkısı, çok enerjili, güvenli ve esnek bir P2P enerji ticaret sistemini yalnızca teknik değil; ekonomik, operasyonel ve sosyal yönleriyle birlikte ele alan bütünlük bir çözüm mimarisi sunmasıdır. Bu yapı, mevcut merkeziyetsiz sistemlerde karşılaşılan sürdürülebilirlik, güvenlik ve verimlilik sorunlarına karşı

ölçeklenebilir ve saha uyumlu bir model önererek, literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır.

2.4 Motivasyon ve Amaç

Yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) entegrasyonu ve enerji sistemlerinin merkezsizleştirilmesi, küresel enerji yapısında büyük bir dönüşüm yaratmaktadır. Ancak, önceki araştırmalar, bu dönüşümü destekleyecek sistemlerin karşılaştığı önemli zorluklarla yüzleşmiştir. Bu zorluklar, sabit düğüm sıcaklıkları, verimsiz ödeme sistemleri, yüksek enerji depolama maliyetleri, hatalı DEK toplama modelleri ve gizlilikle ilgili çözülmemiş sorunlar gibi bir dizi sorunu kapsamaktadır. Bu temel zorluklar şu şekilde özetlenebilir:

- **Sabit Düğüm Sıcaklıkları:** Sabit düğüm sıcaklıkları, enerji üretim ve dağıtım sistemlerinde her bir düğüm için sıcaklıkların sabit kabul edilmesi anlamına gelmektedir. Ancak, bu yaklaşım düğüm sıcaklıklarındaki dinamik değişiklikleri ve çevresel etmenlerin etkilerini göz ardı etmektedir. Oysa, enerji sistemlerinde düğüm sıcaklıklarındaki değişiklikler, hem elektrik hem de ısı enerjisi için önemli bir rol oynamaktadır. Mevcut yöntemler, sabit düğüm sıcaklıklarının enerji üretimi ve fiyatlandırma üzerindeki etkilerini doğru bir şekilde ele alamamıştır. Yanlış seçimler, önemli doğruluk kayıplarına ve enerji sisteminde verimsizliklere yol açmıştır.
- **Ödeme Mekanizmaları:** Önceki sistemlerde, kullanıcılar arasında enerji ticaretini sağlayan ödeme mekanizmaları verimsiz ve güvenilirmez olmuştur. Bu da ticaretin etkinliğini ve güvenliğini olumsuz etkilemiştir.
- **Yüksek Enerji Depolama Maliyetleri:** Önceki araştırmalar, enerji depolamanın maliyetini ya göz ardı etmiş ya da maliyetleri çok yüksek göstermiştir. Bu durum, depolama maliyetlerini düşürmek için daha etkili optimizasyon stratejilerine duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır.
- **DEK Hataları:** DEK'lerin doğru bir şekilde toplanması, heterojen yapılarından kaynaklanan zorluklarla karşı karşıya kalmıştır. Enerji üretiminin çeşitliliği ve doğrusal olmayan etkileşimler gibi faktörler, önceki yöntemlerin bu kaynakları doğru bir şekilde modellemelerini engellemiştir. Sonuç olarak, bu hatalar enerji tahminlerinde ve optimizasyon süreçlerinde

doğruluk kayıplarına yol açmış, sistemin genel verimliliğini ve güvenilirliğini olumsuz etkilemiştir.

- Gizlilik Koruması: Blockchain tabanlı sistemler, kullanıcıların verilerini güvence altına alacak etkili gizlilik koruma mekanizmalarından yoksun olmuştur. Bu da kullanıcıların veri güvenliği konusunda endişelere yol açmıştır.

Bu zorlukları aşmak için bu araştırma, enerji ticaretinde merkezi olmayan bir sistemi önermektedir. Bu sistem, prosümerlerin enerji ticaretini doğrudan yapabilmesini sağlayacak gelişmiş algoritmalar kullanarak hem piyasa esnekliğini hem de operasyonel verimliliği artırmayı hedeflemektedir. Bu sistemin temel amacı, blockchain teknolojisiyle desteklenen bir P2P ağı içinde elektrik, ısı ve gaz gibi çoklu enerji ticaretini kolaylaştırmaktır.

Araştırmanın özel hedefleri şunlardır:

- Sabit düğüm sıcaklıklarının seçim süreçlerini geliştirerek, enerji üretim ve dağıtımındaki doğruluğu artırmak.
- Kullanıcılar arasında adil ve güvenilir ödeme mekanizmaları tasarlayarak, platformun verimliliğini ve güvenilirliğini sağlamak.
- Enerji depolama maliyetlerini azaltacak uygun maliyetli çözümler geliştirmek, böylece verimlilikten ödün vermeden bu maliyetler üzerinde iyileştirme sağlamak.
- Heterojen DEK'lerin özelliklerini doğru bir şekilde modellemek için gelişmiş toplama modelleri oluşturmak, böylece tahmin ve optimizasyon doğruluğunu artırmak.
- Kullanıcı verilerini korumak için blockchain tabanlı güçlü gizlilik koruma mekanizmaları geliştirmek, böylece güvenli ve şeffaf enerji ticareti yapılmasını sağlamak.

Bu araştırma, merkezi olmayan enerji sistemlerindeki mevcut boşlukları doldurmak için yenilikçi çözümler sunmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, gelişen enerji piyasasında sürdürülebilirliği, verimliliği ve güvenliği artırmaya yönelik kapsamlı bir çerçeve sağlayacaktır.

2.5 Araştırma Katkıları

Bu tez çalışması, yenilenebilir dağıtılmış enerji sistemlerinde elektrik, ısı ve gaz gibi farklı enerji taşıyıcılarının bir arada yönetilebildiği, güvenli, adil ve esnek bir P2P enerji ticaret altyapısı geliştirmektedir. Sistem; kullanıcı davranışlarını, depolama stratejilerini, fiyatlandırma dinamiklerini ve gizlilik gereksinimlerini eş zamanlı olarak dikkate alan çok boyutlu bir model önerisi sunmaktadır. Literatürde parça parça ele alınmış olan bu konular, bu tez kapsamında ilk kez bütüncül bir çerçevede birleştirilmiştir. Araştırmanın özgün katkıları aşağıda özetlenmiştir:

- Çoklu Enerji Taşıyıcısı İçeren Merkeziyetsiz P2P Ticaret Modeli:

Elektrik, ısı ve doğalgaz gibi enerji taşıyıcılarının eşzamanlı yönetilebildiği bir çoklu enerji sistemi geliştirilmiştir. Model, enerji paylaşımını merkeziyetsiz bir yapı içinde gerçekleştirmek için blockchain tabanlı işlem güvenliği ve gizlilik koruması altyapısı kullanmaktadır. Ticaret kararlarının sosyal adalet temelinde verilmesi amacıyla, Nash pazarlık çözümlemesi ile kooperatif katılım desteklenmiş, ayrıca kullanıcılar için şeffaf ve teşvik edici bir ticaret yapısı oluşturulmuştur.

- Sanal Depolama Yaklaşımı ile Hibrit Enerji Depolama Optimizasyonu:

Tez kapsamında, batarya altyapısının daha verimli kullanılması için sanal depolama öncelikli hibrit bir sistem önerilmiştir. Bu yapıda sistem, öncelikle topluluk düzeyinde sanal olarak paylaşılan depolama kapasitesini kullanmakta; bu kapasite yetersiz kaldığında fiziksel bataryaları dinamik biçimde devreye almaktadır. Bu hibrit strateji, batarya döngü sayısını ve kapasite aşımını minimize ederek batarya ömrünü artırmakta ve yatırım maliyetlerini düşürmektedir. Depolama ve ticaret kararları, çok amaçlı doğrusal olmayan programlama (NLP) ile optimize edilmiştir.

- Adil Maliyet Dağılımı için Akış İzleme Temelli Düşümsel Fiyatlandırma:

Enerji kayıplarının ve iletim yönlerinin düğüm bazında izlenebilmesi amacıyla akış izleme yöntemi entegre edilmiştir. Bu yöntem, enerji akış yollarına bağlı olarak tüketici ve üretici maliyetlerini gerçekçi ve lokasyon-temelli biçimde dağıtmakta; böylece sistemin adalet ve ekonomik verimlilik kriterlerini eş zamanlı sağlamaktadır.

- Merkeziyetsiz Optimizasyon için ADMM Tabanlı Dağıtık Çözüm Altyapısı:

Modelin dağıtık bir yapıda çalışabilmesini sağlamak amacıyla, ADMM algoritması tabanlı merkeziyetsiz optimizasyon yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu yapı, her bir

prosümerin kendi kararlarını yerel olarak almasına olanak tanırken, sistem genelinde küresel bir denge sağlar. ADMM yapısı sayesinde iletişim yükü azaltılmış, hesaplama süreci hızlandırılmış ve gizliliği koruyan dağıtık karar verme mekanizmaları desteklenmiştir.

Bu katkılar bir araya geldiğinde, sistem yalnızca teknik anlamda yenilik getirmekle kalmayıp, enerji ticaretinin sosyal kabulünü artıran, sürdürülebilir ve uygulanabilir bir çözüm mimarisi sunmaktadır. Literatürdeki sınırlı senaryo-temelli çalışmalardan farklı olarak bu tez, çok enerjili, kooperatif temelli, veri güvenliğine duyarlı ve ölçeklenebilir bir P2P enerji ticaret platformu tasarlayarak bütüncül bir yaklaşım ortaya koymaktadır.

2.6 Tezin Yapısı

Bu tez, önerilen çok enerjili, dağıtık ve güvenli P2P enerji ticaret sisteminin kavramsal temellerini, yöntemsel çerçevesini, deneysel analizini ve sonuçlarını sistematik bir yapı içerisinde sunmaktadır. Tez, altı ana bölümden oluşmaktadır:

- Bölüm 3: Bu bölümde, çalışmanın temelini oluşturan kavramsal altyapı sunulmakta ve literatürdeki ilgili modeller, teknik yaklaşımlar ve araştırma boşlukları doğrultusunda önerilen sistemin teorik çerçevesi tanımlanmaktadır.
- Bölüm 4: Önerilen modelin metodolojik detayları bu bölümde ele alınmaktadır. Sistem mimarisi, geliştirilen algoritmalar, matematiksel formülasyonlar, karar değişkenleri, kısıt kümeleri ve çok amaçlı optimizasyon yapısı adım adım açıklanmakta; ayrıca süreç akışı sözde kod (pseudocode) ile desteklenmektedir.
- Bölüm 5: Bu bölümde, geliştirilen yaklaşımın performansı sayısal simülasyonlarla değerlendirilmekte; önerilen sistem, mevcut yöntemlerle karşılaştırılarak güvenlik, maliyet, işlem yükü ve enerji verimliliği gibi metrikler üzerinden analiz edilmektedir.
- Bölüm 6: Bu son bölümde, araştırmanın genel sonuçları, çalışmanın teknik çıktıları ışığında özetlenmekte ve tez boyunca elde edilen bulgular bütüncül bir perspektifle değerlendirilmektedir.

Bu yapı sayesinde, önerilen sistemin hem teorik dayanakları hem de uygulama potansiyeli bütüncül bir perspektifle ortaya konmaktadır.

3

P2P ENERJİ TİCARETİ VE BLOCKHAİN TEKNOLOJİLERİNE YÖNELİK ARKA PLAN

Bu bölümde, tezin anlaşılmasını desteklemek amacıyla temel kavramlar ve ilgili teorik çerçeve ele alınmaktadır. Talep tepkisi, tahminleme, ördek eğrisi, sanal depolama, blokzincir ve P2P enerji ticareti gibi konular detaylı olarak incelenmektedir. Bu kavramlar, paylaşımlı sanal depolama sisteminin oluşturulmasındaki işlevleri ve katkılarıyla birlikte değerlendirilmekte ve her biri kendi bağlamında açıklanmaktadır.

3.1 Talep Tepkisi ve Tahmin

Elektrik şebekesi yönetimi ve yenilenebilir enerji entegrasyonu bağlamında talep yanıtı, tahminleme ve ördek eğrisi önemli unsurlar arasında yer almaktadır. Talep yanıtı, elektrik fiyatlarının zamana bağlı değişimlerine tepki olarak veya şebeke istikrarının sağlanmasını teşvik etmek amacıyla son kullanıcıların enerji tüketim alışkanlıklarını değiştirmesini ifade etmektedir. Tahminleme, gelecekteki eğilimlerin ve koşulların öngörülmesi amacıyla gerçekleştirilen analitik bir süreç olup, enerji üretimi ve tüketiminin dengeli ve etkin yönetilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Ördek eğrisi ise, güneş enerjisi üretiminin artan penetrasyonu sonucunda ortaya çıkan ve enerji arzının talebe uyum sağlama zorluklarını grafiksel olarak gösteren bir kavramdır. Eğri, karakteristik şekli nedeniyle bu isimle anılmakta olup, fosil yakıtlarla karşılanan enerji talebinin gün içerisindeki değişimini yansıtmaktadır. Eğrinin “gövdesi”, güneş enerjisi üretiminin en yüksek seviyeye ulaştığı gündüz saatlerinde fosil yakıt bazlı enerji talebinde meydana gelen azalmayı ifade etmekte ve bu durum enerji fiyatlarının düşmesine yol açmaktadır [57].

Enerji sektöründe kayda değer bir dönüşüm yaşanmakta olup, bireysel tüketiciler, sanayi tesisleri ve işletmeler giderek daha fazla kendi enerji üretim sistemlerine bağımlı hale gelmektedir. Özellikle yüksek güneş radyasyonu dönemlerinde bu sistemler tarafından üretilen fazla enerji, elektrik şebekesine geri beslenmekte, ancak güneş radyasyonunun azaldığı saatlerde, özellikle öğleden sonra ve akşam saatlerinde, geleneksel fosil yakıt kaynaklarına olan bağımlılık yeniden artmaktadır. Avrupa'nın güneş enerjisinde küresel bir lider olma yönündeki çabaları, bu ördek eğrisi olgusunun daha belirgin hale gelmesine neden olmaktadır.

Bu durum, yenilenebilir enerji üretiminin gece saatlerinde azalması ve talebin artmasıyla ördek eğrisinin giderek daha dik ve uzun bir "boyun" oluşturduğu 'kanyon eğrisi' kavramıyla açıklanmaktadır. Böyle bir yapı, enerji fazlasının kısıtlanmasını, depolanmasını veya daha sonraki kullanımlar için dönüştürülmesini zorunlu kılmaktadır [58]. Bu sorunun hafifletilmesine yönelik en etkili yaklaşımlardan biri, enerji depolama teknolojilerinin etkin bir şekilde kullanılmasıdır. Özellikle kendi ürettiği enerjiyi tüketen kullanıcılar, yani "tüketiciler," gündüz saatlerinde üretilen fazla enerjiyi akıllı bataryalarda depolayarak tüketimde esneklik sağlayabilmekte ve böylece sistem verimliliğini artırabilmektedir. Depolanan enerji, akşam saatlerinde artan talebi karşılamak amacıyla kullanılabilen, bu sayede ördek eğrisinin etkisi azaltılarak daha dengeli ve sürdürülebilir bir enerji yönetimine geçiş mümkün hale gelmektedir.

Gelecekte, tüketiciler talep tarafı çözümleri, enerji depolama ve kaynaklarının birleştirilmesi yoluyla esneklik hizmetleri sunacaklardır. Akıllı depolama bataryaları, arz ve talep arasında daha iyi bir denge sağlanmasına yardımcı olacak, kendi kendine tüketim sistemlerinin değerini en üst düzeye çıkaracak ve ördek eğrisinin etkisini en aza indirecektir. Bu modelin gelişimi, enerji depolama teknolojisindeki ilerlemeleri gerektirmekte olup, yük kaydırma, ev içi depolama, şebeke depolama, sektör entegrasyonu ve sanal enerji santralleri gibi talep tarafı esnekliği uygulamalarının önemine işaret etmektedir [59].

Talep yanıtı ve yük kaydırma teknikleri, ördek eğrisinin yarattığı zorlukların ele alınmasına yardımcı olmaktadır. Tüketicilerin enerji kullanımını yenilenebilir enerji üretiminin yüksek olduğu zamanlara kaydırmalarını teşvik ederek, bu yöntemler eğrinin düzleşmesini ve boyun kısmının dikliğinin azalmasını sağlar. Bu durum yalnızca şebeke istikrarını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda fazla

yenilenebilir enerjinin kısıtlanması veya depolanması ihtiyacını da en aza indirerek sistemin genel verimliliğini artırır.

Talep gelecekte, tüketicilerin talep tarafı çözümleri, enerji depolama sistemleri ve farklı enerji kaynaklarının bütünleşik bir şekilde yönetilmesi yoluyla esneklik hizmetleri sunmaları beklenmektedir. Akıllı depolama bataryaları, arz ve talep dengesinin daha etkin bir şekilde sağlanmasına katkıda bulunarak, bireysel enerji tüketim sistemlerinin değerini en üst düzeye çıkarmakta ve ördek eğrisinin etkisini en aza indirmektedir. Bu modelin gelişimi, enerji depolama teknolojilerinde ilerlemeleri gerektirmekte olup, yük kaydırma, ev içi depolama, şebeke ölçeğinde enerji depolama, sektör entegrasyonu ve sanal enerji santralleri gibi talep tarafı esnekliği uygulamalarının önemini ortaya koymaktadır [59].

Ördek eğrisinin yarattığı zorlukların yönetilmesinde, talep yanıtı mekanizmaları ve yük kaydırma teknikleri önemli bir rol oynamaktadır. Bu yaklaşımlar, tüketicilerin enerji kullanım alışkanlıklarını yenilenebilir enerji üretiminin en yüksek olduğu zaman dilimlerine kaydırmalarını teşvik ederek, enerji talep eğrisinin daha dengeli hale gelmesini sağlamaktadır. Böylece, özellikle gün batımına yakın saatlerde ortaya çıkan ani talep artışının ve fosil yakıt bazlı enerjiye duyulan ihtiyacın azaltılması mümkün olmaktadır. Söz konusu yöntemler, yalnızca şebeke istikrarının korunmasına katkıda bulunmakla kalmayıp, aynı zamanda yenilenebilir enerji fazlasının kısıtlanması veya depolanması gerekliliğini en aza indirerek sistemin genel verimliliğini artırmaktadır.

Talep yanıtı programları, tüketicilere enerji tüketimlerini gerçek zamanlı arz koşullarına uyumlu hale getirme imkânı sunarak, yenilenebilir enerji üretiminin düşük olduğu veya hiç olmadığı saatlerde şebeke üzerindeki yükü azaltmaktadır. Bu sayede, elektrik şebekesinde ani dalgalanmalar önlenmekte ve fosil yakıt bazlı yedek enerji üretimine duyulan ihtiyaç asgariye indirilmektedir. Yük kaydırma stratejileri ise, tüketicilerin enerji tüketimlerini yoğun talep dönemlerinden düşük yoğunluklu saatlere kaydırmasını sağlayarak şebeke üzerindeki ani yüklenmeleri hafifletmektedir [60].

Enerji tüketiminin yenilenebilir enerji üretiminin en yüksek olduğu zaman dilimleriyle uyumlu hale getirilmesi, mevcut temiz enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlamakta ve fosil yakıt bazlı üretime olan bağımlılığı

azaltmaktadır. Bu durum, yenilenebilir enerji kaynaklarının sistemde daha etkin bir şekilde değerlendirilebilmesine olanak tanıyarak, uzun vadede daha sürdürülebilir bir enerji modeline geçişi hızlandırmaktadır.

Sonuç olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması, arz ve talep dengesinin sağlanmasını daha karmaşık hale getirirse de bu zorluklar yenilikçi stratejiler ve ileri teknolojiler ile yönetilebilir. Akıllı şebeke altyapıları, yenilenebilir enerji kaynaklarının sistem üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılmasını ve verimli bir şekilde entegre edilmesini sağlamak adına önemli fırsatlar sunmaktadır. Temel çıkarım, bu dönüşüm sürecinde gerekli kaynakların mevcut olduğu ve esasen bu kaynakların daha etkin kullanılması gerektiğidir.

Bu bağlamda, tez çalışmasında, blockchain teknolojisi ile desteklenen paylaşımlı bir sanal batarya sisteminin, şebekeye entegre edilen yenilenebilir enerji kaynaklarının artışıyla ortaya çıkan zorlukları nasıl etkili bir şekilde yönetebileceği ele alınmaktadır. Söz konusu sistemin, enerji yönetim süreçlerini daha verimli hale getirerek, sürdürülebilir bir enerji modeline nasıl katkı sağlayabileceği incelenmektedir.

3.2 Sanal Depolama

Sanal depolama, fiziksel bir bataryanın bulunmadığı ve güneş enerjisi üretiminin fazla olduğu durumlarda şebekeye geri gönderilen enerjinin kaydının tutulduğu bir sistemdir. Bu sistemde, kullanıcılar akıllı sayaçları aracılığıyla şebekeye fazla enerji gönderdiğinde, enerji tedarikçisi bu akışları çevrimiçi verilerle izler ve kendi sistemlerinde kaydeder. Ancak, gönderilen enerji şebekedeki diğer tüketiciler tarafından anında kullanıldığından, depolanan enerji aslında fiziksel olarak saklanmaz. Depolanan enerjinin somut kaydı, yalnızca faturada yer alan verilerle yapılır [61].

Genellikle, fazla enerjinin şebekeye gönderilerek "depolanması" ve enerji dengesinin sanal depolama üzerinden takip edilmesi herhangi bir maliyete neden olmaz. Ancak, bu "depolanmış" elektriği kullanmak istendiğinde, sadece elektrik piyasası fiyatı dışında tüm dağıtım ücretleri tahsil edilir. Dağıtım ücretleri, toplam elektrik maliyetinin haneler için yaklaşık %67'sini, işletmeler için ise %58'ini

oluşturur. Bu nedenle, depolanan elektrik, haneler için %33, işletmeler için %42 indirimli bir fiyatla kullanılabilir [62].

Gündüz saatlerinde, örneğin güneş enerjisi ile enerji üretiminin fazla olduğu durumlarda, bu enerji şebekeye aktarılır ve diğer tüketiciler tarafından kullanılır, böylece enerji israfı önlenir. Finansal açıdan, bu işlem genellikle net ölçüm (net metering) adı verilen bir yöntemle yapılır. Bu yöntemde, enerji üreticisi şebekeye katkıda bulunduğu fazla enerji için, kullanımı azaldığında kredilerle tazmin edilir. Ancak, bu politikalar yargı alanına ve enerji şirketleriyle yapılan anlaşmalara bağlı olarak değişebilir.

Elektrik şirketlerinin bu süreçten birçok faydası vardır:

- **Tepe Yük Düşürme:** Elektrik talebinin yüksek olduğu dönemlerde, elektrik şirketleri genellikle daha pahalı enerji üretim tesislerini devreye almak veya pahalı enerji satın almak zorunda kalır. Sanal depolama, bu yüksek talep dönemlerini dengeleyerek şirketlere maliyet tasarrufu sağlar.
- **Şebeke Kararlılığı:** Sanal depolama, arz ve talebi dengeleyerek şebekenin frekans kararlılığını korur. Bu, elektrik kesintileri ve şebeke sorunlarının riskini azaltır.
- **Daha Az Altyapı Yatırımı:** Elektrik şirketleri, tüketicilerin evlerinde ve işletmelerinde zaten bulunan güneş panelleri gibi kaynakları kullanarak yeni altyapı yatırımlarına ihtiyaç duymazlar.
- **Çevresel Uyumluluk:** Birçok bölgede yenilenebilir enerji kullanımıyla ilgili düzenlemeler vardır. Sanal depolama sistemleri, elektrik şirketlerinin bu düzenlemelere uymasını sağlar, böylece kendi yenilenebilir enerji altyapılarını kurmak zorunda kalmazlar.
- **Müşteri Katılımı ve Sadakati:** Tüketicilere enerji fazlasını şebekeye geri satma imkânı sunan programlar, elektrik şirketlerinin müşteri katılımını ve bağlılığını artırır.

Tablo 3.1 Sanal ve fiziksel bataryaların avantajları ve dezavantajları

Sanal Depolama	Fiziksel Depolama
Fiziksel batarya bulunmaz.	Fiziksel bir batarya gereklidir.
Hizmete, izin gerekmeden anında erişim sağlanır.	İzin süreçlerinin ve bileşen teslimatının hızına bağlı olarak kurulum gerçekleştirilir.
Yatırım maliyeti yoktur.	Yüksek başlangıç maliyetleri gerektirir.
Sistem bağlantı ücreti bulunmaz.	Maksimum depolama tüketimine bağlı olarak sistem bağlantı ücretleri vardır.
Geri dönüşüm gerektirmez.	Kullanım ömrünün sonunda geri dönüşüm ücreti gereklidir.
Servis ve bakım ihtiyacı olmayan sorunsuz bir çözümdür.	Sistem arızası riski ile birlikte düzenli servis ve bakım gerektirir.
Enerji tedarik şirketine bağlı olarak sınırsızdır.	Yaklaşık 25 yıl ile sınırlı bir ömre sahiptir.
Çevresel bir etkisi yoktur çünkü sanaldır.	Çevresel etkileri vardır.
Alan gerektirmez.	Kurulum için alan gereklidir.
Depolanan elektrik tüketildiğinde dağıtım ücretleri uygulanır.	Depolanan elektrik tüketildiğinde dağıtım ücretleri alınmaz.
Sanal olarak depolanan elektrik tüketildiğinde ulusal enerji karışımı kullanılır, saf yeşil elektrik değil.	Depolanan yeşil enerjinin %100'ü aynı yerde tüketilir.

Tablo 3.1 Sanal ve fiziksel bataryaların avantajları ve dezavantajları (devamı)

Elektrik kesintisi durumunda koruma sağlamaz.	Elektrik kesintisi durumunda yedek güç kaynağı olarak hizmet edebilir.
Teşvik alma imkanı yoktur.	Teşviklere başvurma imkanı vardır.
Yardımcı hizmetler sunma imkanı yoktur.	Sertifikasız yardımcı hizmetler sunabilir.
Ayrılan kapasiteyi ve reaktif gücü azaltma imkanı yoktur.	Ayrılan kapasiteyi ve reaktif gücü azaltabilir.
Güç şebekesi üzerinde yük oluşturabilir.	Güç şebekesini stabilize eder, fosil kaynakların yerine geçer ve emisyonları azaltır.
Ek bir finansal getiri sağlamaz.	Fotovoltaik sistem ile birlikte kullanıldığında hızlı geri dönüş süresi (2,5 yıl) ve sonrasında net kar sağlar.

Sanal depolama hem kullanıcılar hem de elektrik şirketleri için önemli avantajlar sunmakta ve fotovoltaik sistem sahipleri arasında giderek daha fazla tercih edilmektedir. Enerji üreten kullanıcılar, fazla enerji üreterek ekonomik kazanç elde etme imkânı bulurken, elektrik şirketleri bu fazla enerjiyi kullanarak arz ve talep dengesini daha etkin bir şekilde yönetebilir, işletme maliyetlerini azaltabilir ve çevresel düzenlemelere uyarak sürdürülebilir enerji hedeflerine katkı sağlayabilir [61].

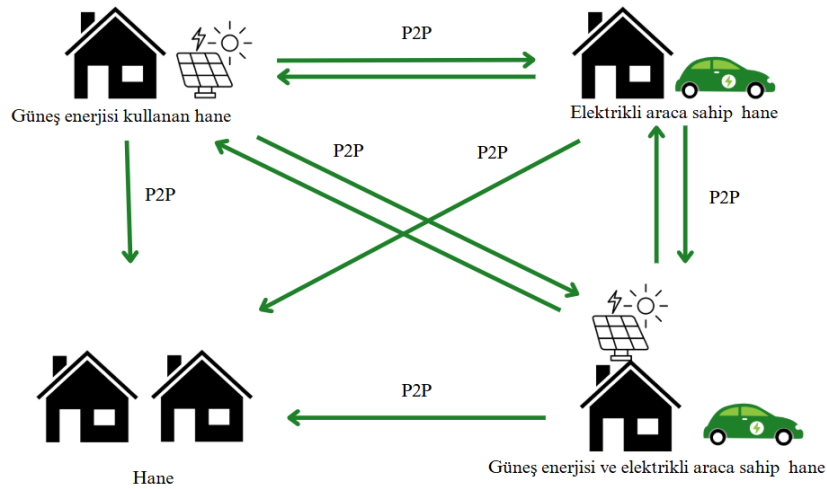
Bu hizmetin ekonomik avantajları, genellikle elektrik tedarikçilerine ek kazanç sağlar. Mevcut yüksek elektrik fiyatları, tedarikçilerin önceden düşük maliyetle satın aldıkları elektriği uygun fiyatlarla sunmalarına olanak tanır. Yeni müşteriler çekmek için enerji şirketleri, müşterilerin kazançlarını artırmaya yönelik yenilikçi çözümler geliştirmektedir. Örneğin, Lumio Solar, fazla enerjiyi OMIE'nin ortalama saatlik fiyatının %90'ı üzerinden değerlendirerek müşterilerine fayda sağlamakta ve P2P enerji pazarı geliştirmektedir [52].

3.3 P2P Enerji Ticareti

P2P enerji ticareti, enerji alım satımını merkezi bir aracıya gerek duymadan bireyler ve işletmeler arasında gerçekleştiren bir sistemdir. Bu sistemin uygulanabilirliği, güneş panelleri ve rüzgar türbinleri gibi dağıtık enerji kaynaklarının artan kullanımı ile mümkün hale gelmiştir; bu sayede tüketiciler hem enerji üretebilir hem de tüketecekleri enerjiyi sağlayabilir.

P2P enerji ticareti, işlemlerin güvenli ve şeffaf bir şekilde yapılabilmesi için blockchain teknolojisini kullanabilir. Blockchain, özellikle verilerin değiştirilemez ve şeffaf bir şekilde kaydedilmesini sağlayarak güvenlik ve gizlilik sunar. Ancak, P2P enerji ticareti yalnızca blockchain teknolojisiyle sınırlı değildir; bu teknoloji, aynı zamanda işlem güvenliği ve taraflar arasındaki gizliliğin korunması gibi ek faydalar sağlar.

Bu sistem, yenilenebilir enerjiye erişimin artırılması, tüketicilerin enerji kaynaklarını daha verimli kullanmaları, yenilenebilir enerji üretiminin ve esnekliğinin artırılması gibi birçok fayda sağlar. Ayrıca, P2P enerji ticareti, tüketicilere doğrudan elektrik ticareti yapma olanağı sunarak, enerji sektöründe büyük bir dönüşüm yaratmaktadır. DLT ve IoT teknolojilerindeki ilerlemeler, merkezi olmayan P2P enerji pazarlarının hızla gelişmesini sağlamış ve bu pazarlara katılan tüketicilerin enerji piyasasına aktif bir şekilde dahil olmalarını mümkün kılmıştır. Bu pazarlardaki talep tepki stratejilerinin entegrasyonu ise, şebeke kararlılığını artırma, yenilenebilir enerji kullanımını yaygınlaştırma ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma gibi önemli avantajlar sağlamaktadır.



Şekil 3.1 P2P enerji ticaret şeması

Talep odaklı P2P enerji pazarlarında, tüketiciler elektrik fiyatlarındaki dalgalanmalara ve şebeke koşullarına bağlı olarak tüketimlerini optimize ederek enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Ancak, bu sistemlerin etkin bir şekilde işlemesi için bazı zorlukların aşılması gerekmektedir. Bunlar arasında piyasa katılımcıları arasındaki iletişim ve koordinasyonun sağlanması, sağlam fiyatlandırma mekanizmalarının geliştirilmesi ve P2P enerji işlemlerine uygun düzenleyici çerçevelerin oluşturulması yer almaktadır.

P2P enerji değişimi çeşitli avantajlar sunmasına rağmen, yaygın olarak benimsenmesini engelleyen bazı faktörler bulunmaktadır. Düzenleyici belirsizlikler, teknik zorluklar ve güvenilir bir ticaret platformuna duyulan ihtiyaç, bu sistemlerin gelişimini doğrudan etkilemektedir. P2P enerji pazarlarının güvenli ve verimli bir şekilde işlemesi büyük ölçüde kullanılan teknoloji altyapısına bağlıdır. Bu bağlamda, özellikle öne çıkan bir teknoloji olan blockchain, yalnızca güvenli ve şeffaf işlemler sağlamamakta, aynı zamanda piyasa katılımcıları arasındaki koordinasyon ve iletişimi kolaylaştıran bir altyapı sunmaktadır. Takip eden bölümde, blockchain teknolojisinin P2P enerji ticaretinin uygulanabilirliğini artırmadaki ve sistemin verimliliğini optimize etmedeki rolü ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

3.4 Blockchain

Bu tez, enerji piyasasında faaliyet gösteren paydaşlar için blockchain tabanlı merkeziyetsiz bir pazar yeri geliştirmeyi amaçlamaktadır. Blockchain teknolojisi, bu pazar yerinin güvenli ve şeffaf bir şekilde işlemesini sağlayarak, geleneksel enerji ticaretine alternatif bir yaklaşım sunmaktadır. Takip eden bölümde, blockchain'in bu sistemde nasıl bir araç olarak kullanılacağı ve merkeziyetsiz enerji pazar yeri modelinin inşasında hangi işlevleri üstleneceği ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Blockchain, DLT kapsamında, merkeziyetsiz bir dijital kayıt sistemi oluşturmaktadır. Bu sistemde, işlem verileri, ağdaki katılımcılar arasında eşzamanlı olarak güncellenen ve güvence altına alınan bloklar halinde paylaşılmaktadır. Geleneksel merkezi veri tabanlarından farklı olarak, blockchain teknolojisi, verilerin herhangi bir merkezi otoriteye bağlı olmaksızın güvenli ve değiştirilemez bir şekilde saklanmasına olanak tanımaktadır. Bu yapının sunduğu güvenlik,

şeffaflık ve veri bütünlüğü gibi avantajlar, özellikle enerji ticareti gibi çok sayıda aktörün yer aldığı sektörlerde önemli bir potansiyel taşımaktadır. Blockchain teknolojisi, her bir işlem kaydının tüm katılımcılar tarafından doğrulanabilir ve denetlenebilir olmasını sağlayarak güvenilirliği artırmaktadır.

Ayrıca, blockchain'in merkeziyetsiz yapısı, enerji ticaretinde geleneksel araçlara duyulan ihtiyacı ortadan kaldırarak işlemlerin daha hızlı, düşük maliyetli ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Son yıllarda blockchain teknolojisi, farklı kullanım senaryolarına yönelik çeşitli uygulamalar geliştirilerek giderek daha fazla ilgi görmektedir [63]. Bu tez kapsamında, blockchain'in sunduğu bu potansiyel detaylı bir şekilde incelenecek ve enerji piyasasındaki üreticiler, tüketiciler ve şebeke operatörleri gibi paydaşların merkeziyetsiz ticaret modelinde nasıl konumlanabileceği analiz edilecektir.

3.4.1 Dağıtık Protokol

Geleneksel veritabanı sistemleri ile blockchain tabanlı çözümler arasındaki temel fark, sistemlerin merkeziyet derecesinden kaynaklanmaktadır. Geleneksel veritabanı sistemlerinde tüm işlemler merkezi bir sunucu veya donanım üzerinden yönetilirken, blockchain sistemlerinde merkezi bir otorite bulunmaz. Bunun yerine, tüm veriler ve işlem süreçleri ağdaki düğümler (nodes) arasında dağıtık bir şekilde depolanır ve işlenir. Bu düğümler, bireysel piyasa katılımcılarını temsil edebilir ve evler, ticari işletmeler, sanayi tesisleri veya enerji agregatörleri gibi farklı aktörlerden oluşabilir [63].

Blockchain, merkezi olmayan bir defter yapısını benimseyerek verilerin tek bir otoriteye bağlı olmaksızın güvenli, değiştirilemez ve şeffaf bir şekilde işlenmesini sağlar. Her işlem, kriptografik olarak imzalanarak bir blok içine eklenir ve zincirin geri kalanıyla bütünleşir. Bu yapı, yetkisiz değişiklikleri önleyerek veri bütünlüğünü garanti altına alır.

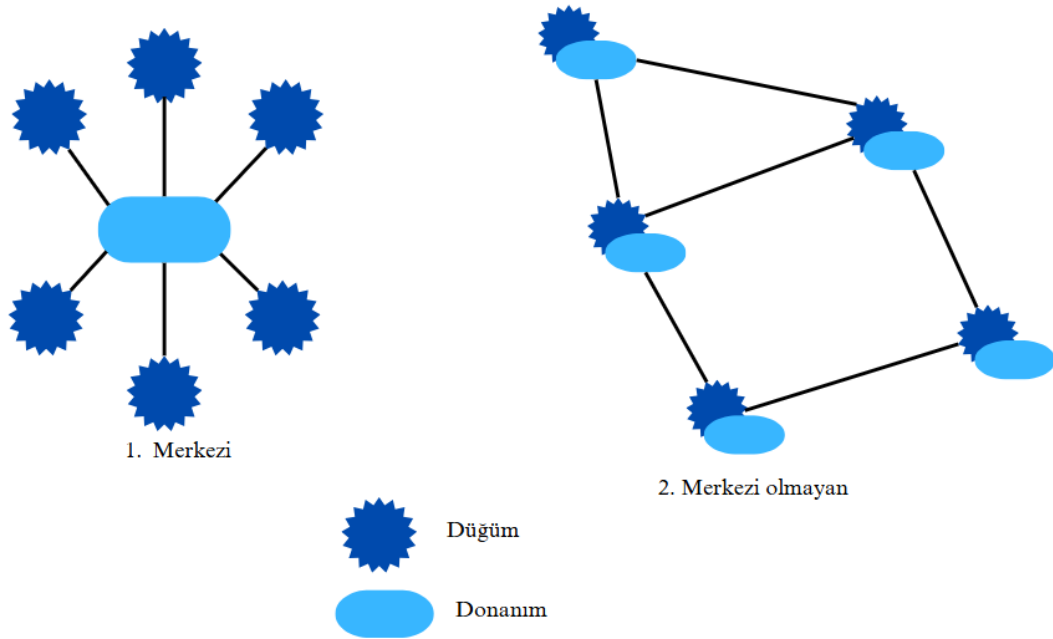
Blockchain teknolojisi, iki temel katmandan oluşur:

- **Protokol Katmanı:** Bu katman, blockchain ağındaki işlemlerin nasıl gerçekleştirileceğini belirleyen temel kuralları içerir. Konsensüs mekanizmaları (örneğin, Proof of Work, Proof of Stake), veri doğrulama süreçleri, blok oluşturma algoritmaları ve ağ güvenliği bu katmanda

şekillenir. Protokol katmanı, aynı zamanda işlemlerin doğruluğunu sağlayan kriptografik imza algoritmalarını ve akıllı sözleşmelerin yürütülmesine yönelik kuralları barındırır.

- Uygulama Katmanı: Blockchain üzerinde çalışan üst seviye uygulamaları barındıran bu katman, ticaret mekanizmaları, akıllı sözleşmeler, veri analitiği ve kullanıcı arayüzleri gibi işlevleri içerir. Enerji piyasalarında bu katman, enerji ticaret platformları, tüketici bazlı talep yönetimi sistemleri ve P2P enerji değişim mekanizmaları gibi uygulamaların geliştirilmesine olanak tanır. Akıllı sözleşmeler aracılığıyla, enerji alım-satım işlemleri otomatikleştirilerek güvenilir, hızlı ve düşük maliyetli ticaret süreçleri sağlanır.

Bu yapı, blockchain'in dağıtık mimarisini daha işlevsel hale getirerek, enerji piyasalarında merkezi olmayan sistemlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji üreticileri ve tüketicileri için güvenli, ölçeklenebilir ve şeffaf bir ticaret ortamı sunmaktadır.



Şekil 3.2 Merkezi ve merkezi olmayan protokoller

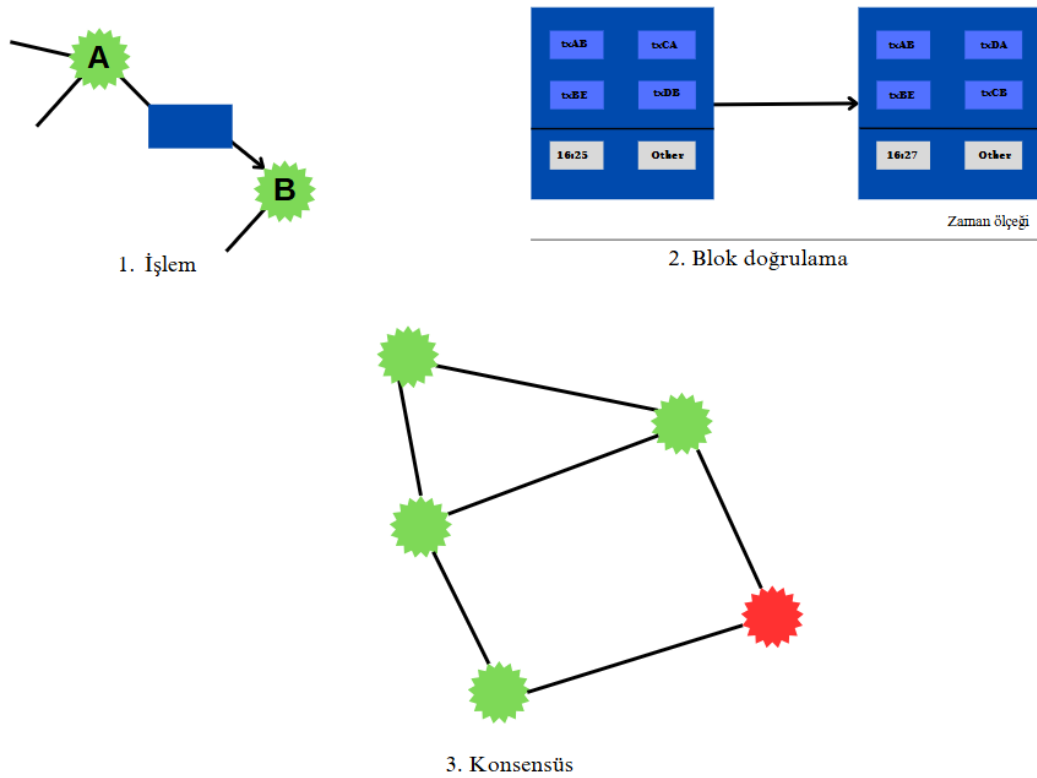
3.4.1.1 Protokol Katmanı:

Blockchain teknolojisinin temel bileşenlerinden biri olan protokol katmanı, ağ içerisindeki bilgi akışını düzenleyen ve güvenli bir işlem altyapısı sağlayan bir

iletişim protokolü olarak işlev görmektedir. Bu katman, blockchain üzerindeki işlem süreçlerini yöneten kuralları ve mekanizmaları içermekte olup, işlemlerin gerçekleştirilmesi, blokların doğrulanması ve ağ düğümleri arasında konsensüs sağlanması gibi kritik fonksiyonlardan sorumludur. Protokol katmanının işleyişi aşaşıda ayrıntılı olarak açıklanmaktadır:

- **İşlem Süreci:** Blockchain ağına iletilen işlemler, belirli bir süre boyunca ağdaki düğümler tarafından toplanarak bir "blok" içerisinde gruplanır. Örneğin, bir düğüm (Düğüm A), başka bir düğüme (Düğüm B) bir işlem göndermek istediğinde, bu işlem geçici olarak işlenmemiş işlemler havuzuna (mempool) eklenir. Madenciler veya doğrulamacı düğümler, belirlenen süre boyunca bu havuzda biriken işlemleri alarak blok oluşturur ve Blockchain ağına dahil edilmesi için doğrulama sürecine tabi tutar.
- **Blok Doğrulama:** Bir bloğun Blockchain'e dahil edilebilmesi için ağ üzerindeki diğer düğümler tarafından doğrulanması gerekmektedir. Doğrulama süreci, işlemlerin geçerliliğini kontrol ederek blok içeriğinin değiştirilmesini önleyen güvenlik mekanizmalarına dayanır. Her yeni blok, önceki bloğun kriptografik zet fonksiyonu (hash) ile ilişkilendirilerek zincire eklenir ve her bloğa bir zaman damgası atanır. Bu yapı, blokların sıralı ve değiştirilemez bir şekilde zincirlenmesini sağlayarak sistemin bütünlüğünü ve güvenliğini garanti eder. Bir blok bir kez doğrulandıktan ve Blockchain'e dahil edildikten sonra, içerdiği verilerin değiştirilmesi pratik olarak imknsız hale gelmektedir.
- **Doğrulama için Konsensüs:** Blockchain ağındaki düğümlerin, Blockchain'in mevcut durumu üzerinde mutabakata varmasını sağlayan konsensüs mekanizmaları, ağın merkeziyetsiz yapısını koruyarak işlemlerin doğruluğunu garanti eder. Bir işlemin Blockchain'e eklenebilmesi için düğümler arasında belirli bir algoritma doğrultusunda fikir birliğine ulaşılması gerekmektedir. Kullanılan konsensüs mekanizmaları, ağın güvenlik seviyesi, işlem hızı ve ölçeklenebilirliği açısından belirleyici bir faktördür. En yaygın konsensüs mekanizmaları arasında Proof-of-Work (PoW) ve Proof-of-Stake (PoS) bulunmaktadır.

- Proof-of-Work (PoW): Bitcoin ve Litecoin gibi Blockchain ağlarında kullanılan bu mekanizma, düğümlerin (madencilerin) belirli bir matematiksel problemi çözerek işlem doğrulaması yapmasını gerektirir. Yüksek hesaplama gücü gerektiren PoW mekanizması, enerji tüketimi açısından maliyetli olmakla birlikte ağın güvenliğini artırmaktadır.
- Proof-of-Stake (PoS): Ethereum gibi bazı Blockchain ağlarında kullanılan PoS mekanizması, madencilik yerine, kullanıcıların sahip oldukları token miktarına bağlı olarak doğrulama sürecine katılmasını sağlar. Daha düşük enerji tüketimi ve daha hızlı işlem süreleri sunan PoS, ölçeklenebilirlik açısından avantajlar sağlamakla birlikte farklı güvenlik dinamiklerine sahiptir.



Şekil 3.3 Blockchain protokol katmanı

Şekil 3.3'te gösterildiği üzere, protokol katmanı Blockchain ağının temel yapı taşlarından biri olup, sistemin güvenli ve etkin bir şekilde çalışmasını sağlayan kritik bir bileşen olarak işlev görmektedir. Bu katman, diğer uygulamaların ve işlevlerin inşa edilebileceği bir temel sunarak, Blockchain tabanlı sistemlerin güvenilirliğini ve bütünlüğünü artırmaktadır.

Özellikle yüksek frekansta işlem gerçekleştirilmesini gerektiren sistemler için, Blockchain'in işlem doğrulama kapasitesi büyük önem taşımaktadır. Bazı uygulamalar, saniyede çok sayıda işlemi işleme kapasitesine sahip olmalıdır [64]. Bu bağlamda, ağın işlem doğrulama sürecindeki darboğazları aşması gerekmektedir. İşlem doğrulama sürecinin yavaş olması, sistemin ölçeklenebilirliğini ve verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Hızlı ve etkili bir doğrulama mekanizması, saniyede çok sayıda işlemi işleyebilen bir Blockchain ağı oluşturulmasını mümkün kılmaktadır.

Özellikle P2P enerji ticareti gibi dinamik piyasalarda, işlemlerin gerçek zamanlı ve güvenilir bir şekilde yürütülmesi gerekmektedir. Bu tür bir piyasada, düğümler arasında sürekli veri akışı sağlanmalı ve her yeni işlem, ağın güvenliğini tehlikeye atmadan hızla doğrulanarak Blockchain'e entegre edilmelidir. Blockchain'in teknik kapasitesinin artırılması, merkeziyetsiz enerji ticaretine yönelik çözümlerin benimsenmesini hızlandıracak ve bu sistemlerin yaygın kullanımını teşvik edecektir.

3.4.1.2 Uygulama Katmanı:

Şimdiye kadar, düğümlerin blockchain üzerinde işlemleri nasıl gönderdiği süreci ele alındı. Ancak, blockchain ortamının sunduğu işlevsellik daha ayrıntılı bir şekilde incelenmemiştir. Bu işlevsellik, blockchain ağının uygulama katmanından kaynaklanmaktadır. Uygulama katmanı, genellikle akıllı sözleşmeler olarak bilinen ve blockchain üzerinde çalışan programlar için bir arayüz sağlar. Akıllı sözleşmeler, belirli kurallar ve koşullar doğrultusunda otonom olarak işleyen programlar olup, blockchain'in sunduğu güvenli ve merkeziyetsiz yapıyı kullanarak işlemleri otomatikleştirir.

Uygulama katmanı, blockchain ağının temel protokol katmanı üzerinde çalışan uygulamaları destekler. Bu katman, merkeziyetsiz uygulamalar (DApp'ler) ve akıllı sözleşmeler gibi blockchain tabanlı çözümler için işlevsellik sağlar. Akıllı sözleşmeler, belirli koşullar yerine getirildiğinde otomatik olarak tetiklenen ve blockchain üzerinde kaydedilen dijital sözleşmelerdir. Bu sözleşmeler, blockchain'in temel ilkelerine (merkeziyetsizlik, şeffaflık, değiştirilemezlik) dayalı olarak güvenli ve şeffaf bir şekilde yürütülür.

Teknik açıdan, uygulama katmanı, blockchain ağının veritabanı işlevini destekleyen bileşenlere erişim sağlar. Örneğin, Ethereum gibi platformlarda, uygulama katmanı, Ethereum Sanal Makine aracılığıyla akıllı sözleşmelerin yürütülmesini kontrol eder. Ethereum Sanal Makine, Ethereum ağı üzerinde çalışan tüm akıllı sözleşmelerin ve DApp'lerin çalıştığı sanal bir ortam sağlar. Bu sanal ortam, blockchain ağındaki akıllı sözleşmelerin kodlarının doğru şekilde yürütülmesini ve ağ üzerindeki tüm hesaplamaların tutarlı olmasını garantiler.

Uygulama katmanı ayrıca blockchain üzerinde işlemlerin doğruluğunu ve geçerliliğini denetlemek için çeşitli kriptografik algoritmalar kullanır. Bu algoritmalar, özellikle eliptik eğri kriptografisi (ECC) ve SHA-256 gibi hash fonksiyonları, işlemlerin güvenliğini ve verilerin bütünlüğünü sağlamak için kullanılır. Akıllı sözleşmelerin güvenliği, bu algoritmalar aracılığıyla sağlanır, çünkü her bir işlem, ağda yapılan diğer işlemlerle birlikte şifrelenir ve blockchain üzerinde kaydedilir, böylece her işlem birbirine bağlanır ve değiştirilemez hale gelir.

Bir internet örneği üzerinden açıklanacak olursa, internet protokolü, internet altyapısını sağlarken, web sayfaları bu altyapı üzerinde çalışan uygulama işlevini görür. Benzer şekilde, blockchain ağında blockchain protokolü altyapıyı oluşturur, akıllı sözleşmeler ise uygulama işlevini üstlenir. Bu bağlamda, blockchain protokolü, veri doğrulama ve ağ güvenliğini sağlarken, uygulama katmanı, kullanıcıların blockchain üzerinde işlemler gerçekleştirmelerini ve merkeziyetsiz uygulamaları kullanmalarını sağlayan bir platform olarak işlev görür.

Blockchain ağının güvenliği, protokol katmanında sağlanırken, uygulama katmanı, kullanıcıların bu güvenli ortamda işlem yapmalarını mümkün kılacak şekilde tasarlanır. Uygulama katmanı, akıllı sözleşmelerin ve DApp'lerin işleyişi için kritik olan tüm hesaplama süreçlerini yönetir, bu da blockchain ağının etkileşimli ve otonom bir şekilde çalışmasını sağlar.

4

ÖNERİLEN YÖNTEM

Yapılan araştırma, elektrik sistemlerinin artan karmaşıklığını ele almak amacıyla, P2P pazar yapısı içinde DED yoluyla çoklu enerji entegrasyonuna odaklanan benzersiz bir strateji önermektedir. Çalışma; elektrik, ısı ve gaz depolama ile ilgili teknolojileri bir araya getirerek, prosümer arasında enerji dağıtımının güvenilirliğini ve verimliliğini artıracak uygulanabilir bir model oluşturmayı hedeflemektedir. Önerilen çalışmanın amacı, enerji yönetim tekniklerini geliştirmek ve merkeziyetsiz pazar yerlerinde enerjinin sürdürülebilir kullanımına yönelik yeni yaklaşımlar araştırmaktır. Bu kapsamda, çalışma aşağıdaki temel adımları içermektedir:

- Kayıt işlemi
- Elektrik, ısı ve gazı içeren çoklu enerji entegrasyonu
- Elektrik ve ısı depolama maliyeti
- Elektrik, ısı ve gaz ticaretini içeren çoklu enerji entegrasyonu
- Blockchain tabanlı ödeme yöntemleri

4.1 Kayıt

Konsorsiyum blockchain sistemleri, özellikle belirli bir yetkilendirme mekanizmasına dayalı enerji ticareti gibi uygulamalar için güvenli ve ölçeklenebilir bir altyapı sunmaktadır. Bu tür sistemlerde, yalnızca yetkilendirilmiş kullanıcılar işlem yapabilir ve blockchain ağına katılım sağlayabilir. Bu güvenlik önlemleri, kimlik doğrulama ve kriptografik anahtar mekanizmaları ile sağlanmaktadır. Kullanıcıların sisteme kayıt olması ve kimlik doğrulama süreçlerinden geçmesi, blockchain üzerindeki işlemlerin güvenilir olmasını sağlamak için kritik bir

adımdır. Kayıt süreci, kullanıcıların benzersiz kimlik bilgilerini doğrulamak, kriptografik anahtarlarını oluşturmak ve blockchain ağı ile güvenli bir şekilde iletişim kurmalarını sağlamak için tasarlanmıştır. Bu süreçte, kullanıcıların kimlik bilgilerini doğrulayan Kimlik Bilgisi Merkezi (TC), Anahtar Üretim Merkezi (KGC) ve Kayıt Merkezi (RC) gibi temel bileşenler görev almaktadır. Kullanıcılar sisteme dahil olabilmek için öncelikle kimlik doğrulama sürecinden geçmelidir. Kayıt merkezi tarafından doğrulanan kimlik bilgileri, rastgele bir sayı üretilerek güven merkezi aracılığıyla açık anahtar ve özel anahtar oluşturma sürecine dahil edilir. Açık anahtar kullanıcıya iletilirken, özel anahtar sistem tarafından güvenli bir şekilde saklanır. Bu güvenlik önlemleri, yetkisiz erişimleri önlemek ve kullanıcı kimlik bilgilerinin korunmasını sağlamak amacıyla tasarlanmıştır.

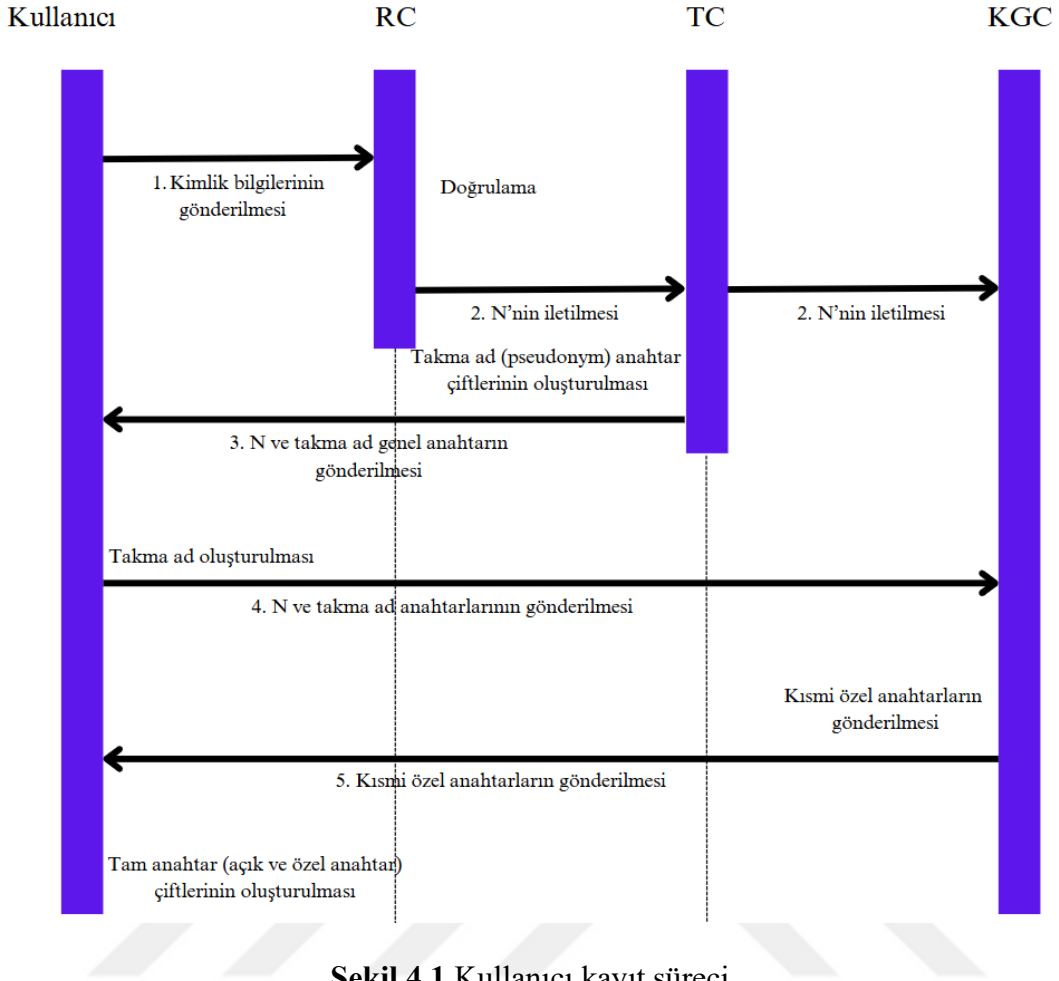
Kriptografik anahtarlar, blockchain ağındaki işlemlerin güvenliğini sağlamak için kullanılan temel bileşenlerdir. Açık anahtar-özel anahtar çifti, asimetrik şifreleme yöntemine dayanarak çalışmaktadır. Açık anahtar, herkesin erişimine açık olup işlemleri doğrulamak için kullanılırken, özel anahtar yalnızca sahibinde bulunmalı ve işlemleri imzalamak için kullanılmalıdır. Açık anahtarın en önemli işlevlerinden biri, bir kullanıcının oluşturduğu dijital imzaların doğrulanmasını sağlamaktır. Bir kullanıcı bir işlem gerçekleştirdiğinde, işlemi özel anahtarı ile imzalar ve bu imza, açık anahtar aracılığıyla doğrulanabilir. Böylece işlemin gerçekten o kullanıcı tarafından gerçekleştirildiği kanıtlanmış olur. Kullanıcı, açık anahtarı aldıktan sonra kendisine ait anonim bir kimlik oluşturmak için ek rastgele değerler seçer ve kimliğini blockchain ağı içinde gizli tutacak şekilde anonimleştirme sürecinden geçirir. Anonim kimlik, kullanıcının gerçek kimliğiyle doğrudan bağlantılı olmadan işlemler gerçekleştirmesine olanak tanır. Kullanıcı, anonim kimliğini ve ilgili diğer verileri anahtar üretim merkezine ilettiğinde, kendisine özel bir kriptografik yapı oluşturulur. Bu yapı, kullanıcının enerji ticareti işlemlerinde kullanılacak son anahtar çiftini belirler. Bu sayede blockchain üzerinde gerçekleştirilen işlemler yalnızca yetkilendirilmiş kullanıcılar tarafından doğrulanabilir ve yetkisiz erişimler kriptografik önlemlerle engellenir. İşlemler değiştirilemez bir şekilde blockchain defterine kaydedildiğinden, herhangi bir manipülasyon girişimi önlenmiş olur.

Özel anahtarın en kritik işlevlerinden biri, yalnızca yetkilendirilmiş kullanıcıların belirli işlemleri gerçekleştirmesini sağlamaktır. Örneğin, bir kullanıcı enerji ticareti yapmak istediğinde, özel anahtarı ile işlem imzalayarak bu işlemi ağ üzerindeki

diğer yetkilendirilmiş düğümlere gönderir. Ağdaki düğümler, kullanıcının açık anahtarını kullanarak işlemin geçerliliğini kontrol eder. Eğer dijital imza doğrulanırsa, işlem blockchain ağına eklenir ve geri alınamaz bir şekilde kaydedilir. Bu süreç, blockchain sistemlerinin temel güvenlik mekanizmasını oluşturur ve işlemlerin değiştirilemez olmasını garanti eder. Bu güvenlik yapıları, enerji ticareti gibi güvenilirlik gerektiren alanlarda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Dijital imzalar kullanılarak yapılan işlemler hızlı ve güvenli bir şekilde doğrulanabilir, böylece ticaret süreçleri hızlandırılır ve işlem maliyetleri azaltılır.

Blockchain tabanlı bir enerji ticaret sisteminde, kimlik doğrulama ve yetkilendirme süreçlerinin güvenilir olması, piyasa katılımcıları arasındaki güvenin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Anonim kimlik kullanımı sayesinde, kullanıcıların gerçek kimlikleri korunarak mahremiyet sağlanırken, aynı zamanda yalnızca yetkilendirilmiş kişilerin blockchain ağına erişmesine izin verilir. Rastgele değerler ve hash fonksiyonları gibi ek güvenlik önlemleri, sistemin kriptografik bütünlüğünü artırır ve kötü niyetli aktörlerin sisteme sızmasını engeller. Bu özellikler, mutabakat için önceden seçilmiş düğümlerle bir araya gelerek, konsorsiyum blockchain'lerini küçük ölçekli enerji ticareti için son derece uygun hale getirmektedir. Sistem, daha hızlı işlemler, daha düşük maliyetler ve güvenli, tahrif edilemez veri depolama sunar. Genel sistem mimarisi, her katılımcının enerji ticareti ekosistemine güvenli bir şekilde entegre edilmesini sağlarken, gizlilik ve verimliliği de korumaktadır.

Sürecin ayrıntıları Şekil 4.1'de gösterilmekte olup, bu bileşenler arasındaki bilgi akışı enerji ticaret ekosistemine güvenli ve güvenilir bir katılım sağlamak amacıyla vurgulanmıştır.



Şekil 4.1 Kullanıcı kayıt süreci

Konsorsiyum blockchain üzerinden enerji ticaretine katılmak için kullanıcıların öncelikle TC, KGC ve RC gibi temel bileşenler aracılığıyla kimlik bilgilerini kaydetmeleri gerekmektedir. Bu çok aşamalı kayıt süreci, kullanıcıların doğru bir şekilde kimlik doğrulamasının yapılmasını ve kimliklerinin blockchain ağına güvenli bir şekilde bağlanmasını sağlar.

$$- User \rightarrow RC: \{ID_j\}$$

Kullanıcı, kimlik bilgisi olarak tanımlanan ID_j 'yi RC'ye gönderir. Bu kimlik, kullanıcıyı sistem içinde benzersiz bir şekilde tanımlar. RC, ID_j 'yi aldıktan sonra kimliği doğrular ve rastgele bir sayı olan $N \in Z_p^*$ oluşturur. Burada, Z_p^* , asal bir sayı olan p 'ye göre çarpımsal grup modülünü temsil eder ve N 'nin rastgeleliğini ve güvenliğini garanti eder. Bu değer, sonraki kriptografik işlemlerin temelini oluşturur.

$$- RC \rightarrow TC \rightarrow KGC: \{N\}$$

RC, oluşturulan N değerini TC'ye iletir. TC, $T \in Z_p^*$ kümesinden başka bir rastgele sayı seçer ve $H_0(T)$ şeklinde bir hash fonksiyonu uygular. Daha sonra, $g^{H_0(T) \cdot N}$ değerini hesaplar. Burada g , Z_p^* grubunun bir üreticisidir ve bu işlem, sistemin kriptografik bütünlüğünü güçlendirir. açık ve özel anahtar çiftini (4.1)'de tanımlandığı şekilde oluşturur:

$$\begin{cases} PK_{pse} = g^{H_0(ID_j)} \cdot g^{H_0(H_0(T) \cdot N) \bmod p} \\ SK_{pse} = H_0(ID_j) + H_0(g^{H_0(T) \cdot N}) \end{cases} \quad (4.1)$$

Açık anahtar PK_{pse} kullanıcıya iletilirken, özel anahtar SK_{pse} TC tarafından güvenli bir şekilde saklanır.

$$- RC \rightarrow User: \{N, PK_{pse}\}$$

PK_{pse} ve N değerlerini aldıktan sonra kullanıcı, $r \in [1, p-1]$ aralığında bir rastgele sayı seçer ve anonim kimliğini (4.2)'de verilen işlemlerle oluşturur:

$$\begin{cases} u_j = g^r \bmod p \\ u'_j = ID_j \cdot PK_{pse}^r \bmod p \end{cases} \quad (4.2)$$

Bu hesaplamalar, kullanıcının anonim kimliğini $ID'_j = (u_j, u'_j)$ olarak oluşturur ve sistemle olan etkileşimlerinde gizliliği sağlar.

$$- User \rightarrow KGC: \{N, ID'_j\}$$

Kullanıcı, ID'_j ve N değerlerini KGC'ye iletir. KGC, $b_j \in Z_q^*$ olacak şekilde bir rastgele değer seçer ve kısmi özel anahtarı (4.3)'teki işlemlerle üretir:

$$\begin{aligned} B_j &= b_j P \\ d_j &= (b_j + h_{1,j}) \bmod q \end{aligned} \quad (4.3)$$

Burada $h_{1,j} = H_1(ID'_j, B_j, P_{pub})$, bir hash fonksiyonu kullanılarak türetilir. P , eliptik eğri sisteminde jeneratör noktayı, P_{pub} ise genel anahtarı temsil etmektedir. Kullanıcının kısmi özel anahtarı ise $D_j = (d_j, B_j)$ olarak tanımlanır.

$$- KGC \rightarrow User: \{D_j\}$$

KGC, D_j değerini kullanıcıya gönderir. Kullanıcı, $d_j P = B_j + h_{1,j} P_{pub}$ eşitliğini doğrular. Doğrulama başarılı olursa, kullanıcı $x_j \in Z_q^*$ özel rastgele değerini seçer ve nihai anahtar çiftlerini (4.4) ve (4.5)'te tanımlandığı gibi oluşturur:

$$X_j = x_j P$$

$$Q_j = (B_j + X_j) \quad (4.4)$$

Son anahtar çiftleri şu şekilde tanımlanır:

$$\begin{aligned} PK_j &= (Q_j, B_j) \\ SK_j &= (d_j, x_j) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Eğer doğrulama başarısız olursa, kullanıcı KGC'den yeni bir D_j talep eder ve işlemi yeniden başlatır.

Yukarıda belirtilen işlemi başarıyla tamamladıktan sonra kullanıcılar, konsorsiyum blockchain'in güvenli ve verimli çerçevesi içinde ticaret yapmaya başlayabilirler. Sistem, mutabakat için önceden seçilmiş düğümlerden yararlanarak daha hızlı işlem süreleri, azaltılmış maliyetler ve güvenli, tahrif edilemez veri depolama sağlar. Bu özellikler, konsorsiyum blockchain'lerini küçük ölçekli enerji ticareti için özellikle uygun hale getirir ve merkeziyetsiz enerji piyasaları için pratik ve ölçeklenebilir bir çözüm sunar.

Bu yapılandırılmış kayıt süreci, konsorsiyum blockchain'inde güvenli ve kimlik doğrulaması yapılmış katılımı sağlamak için ayrıntılı kriptografik işlemleri güçlü gizlilik önlemleriyle birleştirmektedir. Kullanıcı kimlik doğrulaması ve şifreleme için genel anahtarlar (PK_{pse}, PK_j), işlemleri imzalama ve yetkilendirme için ise özel anahtarlar (SK_{pse}, SK_j) kullanılarak, yalnızca doğrulanmış katılımcıların blockchain üzerinde işlem yapabilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca, rastgele değerler (N, r, b_j) ve hash fonksiyonlarının kullanımı, sistemin kriptografik bütünlüğünü artırarak, kurcalama veya yetkisiz erişim girişimlerine karşı koruma sağlamaktadır. Anonim kimlik (ID_j') kullanımı, blockchain etkileşimleri sırasında kullanıcı gizliliğini koruyarak merkeziyetsiz enerji piyasasında güvenin sürdürülmesi için kritik bir rol oynamaktadır.

Bu özellikler, mutabakat için önceden seçilmiş düğümlerle bir araya gelerek, konsorsiyum blockchain'lerini küçük ölçekli enerji ticareti için son derece uygun hale getirmektedir. Sistem, daha hızlı işlemler, daha düşük maliyetler ve güvenli, tahrif edilemez veri depolama sunar. Genel sistem mimarisi, her katılımcının enerji ticareti ekosistemine güvenli bir şekilde entegre edilmesini sağlarken, gizlilik ve verimliliği de korumaktadır.

4.2 Elektrik, Isı ve Gazı İçeren Çoklu Enerji

Çoklu enerji ticareti, enerjinin P2P ağında nasıl üretildiğini ve depolandığını içermekte ve göstermektedir.

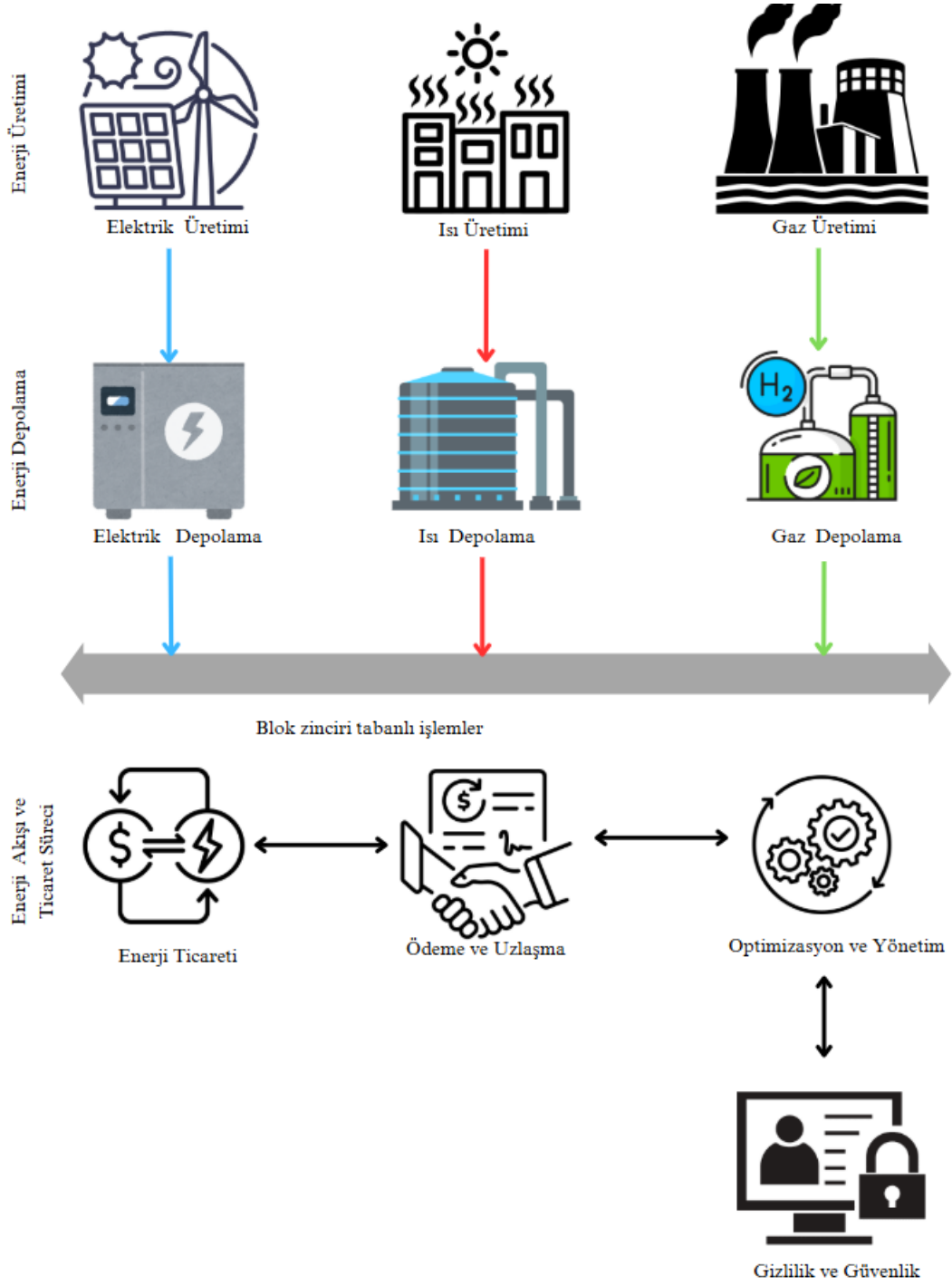
4.2.1 Elektrik Üretimi ve Depolama

Rüzgar türbinleri ve güneş enerjisinden elektrik üretimi, rüzgar hızındaki ve güneş ışığı yoğunluğundaki dalgalanmalar nedeniyle doğal olarak değişkendir. Rüzgar türbinleri, atmosferik kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Rüzgar estiğinde, türbin kanatları bir rotor etrafında döner. Ana şaft üzerine sabitlenmiş bir rotor aracılığıyla bir jeneratör döndürülerek elektrik üretilir. Rüzgar enerjisi, tamamen rüzgar kaynağına ve hızına bağlı olduğundan değişken bir enerji kaynağıdır.

Güneş panelleri, diğer adıyla güneş enerjisi panelleri, doğrudan güneş ışığını elektriğe dönüştürür. Bu paneller, silikon gibi yarı iletken malzemelerden üretilmiş çok sayıda güneş hücresinden oluşur. Bu hücreler güneş ışınlarını alır, elektronları uyarır ve elektrik akımı oluşturur. Güneş enerjisi, hava durumu ve günün saatine bağlı olarak değişen güneş ışığına bağımlıdır.

Rüzgar ve güneş enerjisinin kesintili yapısını dengelemek için enerji depolama sistemleri gereklidir. Yaygın olarak kullanılan depolama teknikleri şunlardır:

- Piller, üretimin en yüksek olduğu dönemlerde üretilen fazla enerjiyi depolar ve üretimin düştüğü zamanlarda bu enerjiyi serbest bırakır. Lityum-iyon piller, üstün verimlilikleri ve yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle sıklıkla tercih edilir.
- Bu sistemler, büyük ölçekli pil bankaları, pompalı hidro depolama ve daha sonra kullanılmak üzere büyük miktarda enerji depolayan diğer teknolojileri içerir.



Şekil 4.2 Elektrik, ısı ve gaz içeren çok enerjili sistem

4.2.2 Isı Üretimi ve Depolanması

Isı ticareti için bir ısı ağı kurulmuş ve depolama için bir ısı pompası ve CHP modeli entegre edilmiştir. Genellikle merkezi ısıtma sistemi olarak bilinen bir ısı ağı, merkezi bir kaynaktan konut ve ticari binalara ısı dağıtır. Bu merkezi yaklaşım,

bireysel ısıtma sistemlerine kıyasla verimliliği artırır ve emisyonları azaltır. Entegre ısı pompaları ve CHP ile bir model, Şekil 4.2'de gösterildiği gibi elektrik, ısı ve gaz içeren çok enerjili bir yapıyı sergiler. Isı pompaları, bir kaynaktan (örneğin, toprak, hava veya su gibi) bir hedefe (bir bina) ısı transfer eder. Ayrıca ters yönde çalışarak soğutma sağlayabilirler. Isı pompaları, ısıyı elektrik kullanarak taşımadıkları, ancak yakma yoluyla üretmedikleri için son derece verimlidirler. CHP sistemleri, aynı enerji kaynağından hem elektrik hem de kullanılabilir ısı üretir. Bu birleşik üretim tekniği, güç üretimi sırasında atılacak ısıyı yakalar ve kullanır, bu da genel verimliliği önemli ölçüde artırır. Termal Enerji Depolama sistemleri genellikle fazla ısıyı su veya diğer ısıyı tutan malzemelerle dolu yalıtımlı tanklarda depolar. Faz Değişim Malzemeleri, faz geçişleri (örneğin, katıdan sıvıya) sırasında termal enerjiyi emip salarak etkili ısı depolama çözümleri sunar.

4.2.3 Gaz Üretimi ve Depolanması

P2P gaz ağı, kullanıcılar arasında merkeziyetsiz gaz ticaretine olanak tanır, böylece gaz tedarik sisteminin esnekliğini ve dayanıklılığını artırır. Bu ağ, doğalgaz ve biyogaz, hidrojen gibi yenilenebilir gazların ticaretini kolaylaştırır. Doğalgaz, tanklarda veya yer altı mağaralarında yüksek basınçta saklanır. Bu yaklaşım, genellikle kısa vadeli depolama için kullanılır. Gaz, depolama ve taşımayı kolaylaştırmak için -162°C 'de sıvı hale getirilir ve bu, hacmini azaltır. LNG depolama tesisleri, hem kısa vadeli hem de uzun vadeli depolama ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılır. Büyük miktarda gaz, tükenmiş petrol ve gaz yataklarında, akiferlerde ve tuz mağaralarında tutulur. Bu tesisler, zirve talep sezonları boyunca sürekli bir tedarik sağlamak için mevsimsel depolama sunar. Bir P2P enerji ticaret sistemi içinde, kullanıcılar doğrudan elektrik, ısı ve gaz takas yapabilir, bu da geleneksel kamu hizmeti sağlayıcılarına olan ihtiyacı ortadan kaldırır.

4.3 Elektrik ve Isı Depolama Maliyeti

Gelişen enerji sistemleri, yalnızca üretim ve tüketim tarafında değil; aynı zamanda enerji depolama tarafında da dinamik, esnek ve maliyet etkin çözümler gerektirmektedir. Dağıtık enerji altyapılarında, enerji arz-talep dengesinin korunabilmesi, şebeke esnekliğinin artırılması ve tüketici odaklı enerji yönetiminin sağlanabilmesi için etkili bir depolama mekanizması kritik bir öneme sahiptir. Bu

kapsamda, bu tezde önerilen sistemde, hem sanal hem de fiziksel depolamayı bütünlüştürme biçiminde yöneten hibrit bir yapı geliştirilmiştir.

Bu yapının merkezinde, doğrusal olmayan programlamaya dayalı çok amaçlı optimizasyon modeli (NLPMO) yer almaktadır. NLPMO, depolama sisteminin hem ekonomik maliyetlerini minimize etmeyi, hem de batarya ömrünü maksimize etmeyi hedeflemektedir. Model, sistemdeki şarj-deşarj stratejilerini, batarya kullanım zamanlamasını, kaynak tahsisini ve enerji fiyat dalgalanmalarını dikkate alarak en uygun kararları üretir.

Geleneksel doğrusal programlama (NLP) yöntemleri, sabit ve öngörülebilir ilişkilere dayalıdır; ancak, enerji sistemlerinde, özellikle de batarya enerji depolama sistemlerinde (BESS), bu varsayımlar çoğu zaman geçerliliğini yitirir. Batarya ömrü,deşarj derinliği (DoD), kullanım döngüsü sayısı ve çalışma sıcaklığı gibi faktörler arasında doğrusal olmayan ilişkiler mevcuttur. Ayrıca, enerji fiyatları zamana, bölgeye ve piyasaya göre değişkenlik gösterdiğinden, optimizasyon modeli bu karmaşık etkileşimleri doğru şekilde temsil edebilmelidir. Bu nedenle, NLP tabanlı model tercih edilmiştir.

Bu yaklaşım, aynı zamanda çok amaçlı yapıdadır. Çünkü batarya yönetiminde iki temel hedef genellikle birbiriyle çelişmektedir:

- Daha sık şarj-deşarj işlemi kısa vadede maliyeti düşürebilir, ancak batarya ömrünü kısaltır.
- Bataryayı daha az kullanmak ömrünü uzatır, ancak şebekeden enerji alımını artırabilir.

İşte bu nedenle, NLPMO modeli, maliyet minimizasyonu ile batarya sağlığının korunması arasındaki dengeyi kurmak üzere tasarlanmıştır.

NLPMO modelinin uygulandığı sistemde, sanal depolama modeli, fiziksel batarya sistemlerini destekleyen, kaynakları dinamik şekilde koordine eden bir yönetim katmanı olarak çalışır. Bu sanallaştırma, fiziksel bataryaları merkeze almadan önce, enerji ihtiyaçlarını sistem genelindeki prosümlerlerin sanal depolama kapasiteleri üzerinden karşılamaya odaklanır. Ancak bu kapasite yetersiz kaldığında, fiziksel bataryalar devreye girer. Bu yapı sayesinde:

- Fiziksel bataryalara olan bağımlılık azaltılır,

- Toplam sistem verimliliği artar,
- Batarya döngü sayısı düşürülerek ömür uzatılır,
- Şarj-deşarj optimizasyonu yapılır ve aşırıdeşarjlar önlenir.

Bu bağlamda NLPMO, aşağıdaki temel karar sorularını yanıtlar:

- Hangi depolama birimi ne zaman kullanılmalıdır?
- Enerji transferleri nasıl yönetilmelidir?
- Hangi bataryalar hangi zaman dilimlerinde şarj/deşarj edilmelidir?
- Talep eğrileri ve fiyat dalgalanmaları dikkate alındığında, en uygun enerji dağıtım stratejisi nedir?

Bu sistemde NLPMO ve sanal depolama modeli birlikte çalışır. Süreç şu adımlarla işler:

- Enerji talebi, fiyatlar ve batarya durumu analiz edilir.
- NLPMO modeli, her an için en uygun maliyet ve ömür dengesini sağlayacak çözümü üretir.
- Sanal depolama yönetimi, modelden gelen kararlara göre enerji akışlarını yönlendirir.
- Fiziksel bataryalar yalnızca ihtiyaç duyulan miktarda ve optimal koşullarda devreye alınır.
- Optimizasyon süreci sürekli güncellenerek gerçek zamanlı esneklik sağlanır.

Bu bütünleşik yapı:

- Enerji sistemlerinde yüksek verimlilik, esneklik ve operasyonel sürdürülebilirlik sağlar.
- Fiziksel altyapı yatırım ihtiyacını azaltır.
- Mevcut batarya kapasitesinin ömrünü ve kullanım verimliliğini artırır.
- Enerji arz-talep dengesini, hem teknik hem ekonomik kriterlerle optimize eder.

Ayrıca bu yapı, ilerleyen bölümlerde detaylandırılacak şekilde, elektrik, ısı ve gaz gibi birden fazla enerji taşıyıcısına eş zamanlı entegre edilebilecek esneklikte yapılandırılmıştır.

4.3.1 Depolama Sanallaştırma Modeli

Sanal depolama modeli, fiziksel enerji depolama altyapısından bağımsız olarak çalışan, dijital olarak izlenen ve yönetilen bir enerji hakkı sistemidir. Bu model, fiziksel batarya sistemlerine yatırım yapmaksızın enerji depolama hizmeti sunmakta ve prosümelerin sisteme katkılarını dijital kayıtlarla izleyerek geri kullanım hakkı tanımaktadır.

Modelin temelinde, enerjiyi fiziksel bir bataryaya yüklemek yerine, doğrudan şebekeye aktarmak ve bu aktarımı zaman damgalı enerji kredisi olarak kaydetmek yer alır. Örneğin, bir prosümer saat 14:00'te 5 kWh fazla enerji üretilip şebekeye gönderdiğinde, bu miktar sistem tarafından "sanal olarak depolanmış" sayılır. Saat 21:00'de prosümerin aynı miktarda enerjiye ihtiyacı olduğunda, bu sanal hak doğrultusunda enerji geri çekilir. Bu süreçte enerjinin fiziksel kaynağı başka bir üretici veya sistem birimi olabilir; burada önemli olan, enerji hakkının dijital olarak tanınmış ve geçerli olmasıdır.

Sanal depolama sistemi bu yönüyle, bireysel batarya sahipliği gerektirmeksizin, enerji paylaşımı ve depolama fonksiyonlarını merkezi olmayan ama bütünleşik biçimde yürütülmesine olanak tanır. Enerji, fiziksel bir bataryada tutulmasa da, sanal hak sistemi üzerinden adil ve izlenebilir biçimde saklanmış sayılır. Bu, özellikle mikroşebekeler, topluluk enerji sistemleri ve esnek şebeke operasyonları için ölçeklenebilir, yatırım maliyeti düşük ve sürdürülebilir bir çözümdür.

Ancak bu yapı, yalnızca prosümer odaklı değil, aynı zamanda şebeke operatörü açısından da teknik, ekonomik ve operasyonel kısıtlar çerçevesinde işlerlik kazanabilir. Bu nedenle sistem, yalnızca hak tabanlı değil, aynı zamanda şebeke uygunluk kontrollerine bağlı olarak çalışan bütünleşik bir mimaride kurgulanmıştır.

Matematiksel modelleme ve şebeke entegrasyonu:

- $E_i^{ver}(t)$: prosümer 'nin anında şebekeye verdiği enerji (kWh)
- $E_i^{çek}(t)$: prosümer 'nin anında geri çekmek istediği enerji (kWh)

- $R_i(t)$: prosümer 'nin anındaki toplam sanal enerji hakkı (kWh)
- $\lambda(t)$: anındaki şebeke enerji fiyatı
- ϵ : fiyat eşik katsayısı (arbitraj koruması)
- $C_{max}^{şebeke}(t)$: şebekenin anındaki maksimum taşıma kapasitesi
- $E_{fiziksel}(t)$: fiziksel bataryalardan desteklenebilecek ek enerji (kWh)
- $E_i^{talep}(t)$: prosümer 'nin anındaki anlık enerji talebi (kWh)
- $H_i(t)$: prosümer 'nin geçmiş katkı puanı, daha önce sisteme sağladığı enerji miktarı ve sistem kullanım davranışına göre hesaplanır.

Prosümere ait enerji hakkı, üretim ve tüketim farkına göre güncellenir (4.6). Bu hak, (4.6)'da gösterildiği üzere,

$$R_i(t) = \sum_{\tau=0}^t E_i^{ver}(\tau) - \sum_{\tau=0}^t E_i^{çek}(\tau) \quad (4.6)$$

şeklinde tanımlanır. Her prosümerin geri çekebileceği enerji, sahip olduğu hakla sınırlıdır ve bu kısıt (4.7)'deki gibi ifade edilir:

$$E_i^{çek}(t) \leq R_i(t) \quad (4.7)$$

Ayrıca, geri çekim ancak fiyat arbitrajı yaratmayacak şekilde, daha önceki aktarım fiyatına göre eşik değeri aşmaması durumunda mümkündür. Bu koşul (4.8)'de belirtilmiştir:

$$\lambda(t) \leq \lambda(t_{ver}) + \epsilon \quad (4.8)$$

Toplam sanal havuzdaki enerji, tüm prosümer haklarının toplamı olarak tanımlanır ve bu durum (4.9)'da verilmiştir:

$$E_{san}(t) = \sum_{i=1}^N R_i(t) \quad (4.9)$$

Şebeke taşıma kapasitesinin aşılması adına, toplam geri çekim talepleri (4.10)'daki gibi sınırlandırılır:

$$\sum_{i=1}^N E_i^{çek}(t) \leq C_{max}^{şebeke}(t) \quad (4.10)$$

Benzer şekilde, sistemin toplam enerji dengesine göre çekim yapılması sağlanır. Yani, çekilmek istenen toplam enerji, o anda mevcut katkılar ve fiziksel depolardan desteklenen enerji miktarını aşamaz. Bu durum (4.11)'de gösterilmiştir:

$$\sum_{i=1}^N E_i^{cek}(t) \leq \sum_{j=1}^M E_j^{ver}(t) + E_{fiziksel}(t) \quad (4.11)$$

Geri çekim talepleri arasında önceliklendirme, her prosümerin hakkı, talebi, geçmiş katkısı ve anlık fiyat parametreleri dikkate alınarak belirlenir. Bu ilişki, (4.12)'deki öncelik fonksiyonu ile ifade edilir:

$$Priority_i = f\left(\frac{R_i(t)}{E_i^{talep}(t)}, \lambda(t), H_i(t)\right) \quad (4.12)$$

Bu fonksiyon, prosümerlerin geri çekim taleplerinin sıralanmasında kullanılır. Daha fazla katkı yapmış, daha acil enerji ihtiyacı olan ve daha düşük fiyatlı zaman diliminde işlem yapan prosümerlere öncelik verilir.

Gerçek zamanlı erişim fonksiyonu:

$$izin_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{eğer tüm kısıtlar sağlanıyorsa} \\ 0, & \text{aksi takdirde çekim ertelenir} \end{cases}$$

Bu yapı, sanal enerji haklarının sadece dijital kayıtlara değil, aynı zamanda şebeke kapasitesi, piyasa fiyatlaması ve dengeleme ihtiyaçları gibi fiziksel ve ekonomik sınırlara dayalı olarak kontrol edilmesini sağlar. Böylece sistem:

- Teknik açıdan güvenli (taşıma kapasitesine duyarlı),
- Ekonomik açıdan sürdürülebilir,
- Operasyonel olarak uygulanabilir (gerçek zamanlı izleme ve karar destekli),
- Adil ve izlenebilir hale gelir.

Bu yönüyle sanal depolama, yalnızca teorik bir konsept olmaktan çıkıp, uygulanabilir, denetlenebilir ve optimize edilebilir bir enerji yönetim bileşeni olarak bu tezin merkezinde yer almaktadır.

4.3.2 BESS Operasyonları için Maliyet ve Enerji Yönetimi

NLP tabanlı çok amaçlı optimizasyon modeli, BESS operasyonlarını en verimli hale getirmeyi ve maliyetleri azaltmayı hedefleyen bir yaklaşımdır. Bu modelin temel amacı, toplam enerji maliyetlerini minimize ederken bataryanın kullanım ömrünü maksimize etmek olarak belirlenmiştir. Bu tür bir optimizasyon yöntemi, enerji yönetim sistemleriyle bütünleştirilerek enerji depolama süreçlerinin daha etkin hale getirilmesini sağlar ve böylece BESS'in daha sürdürülebilir ve ekonomik bir çözüm sunmasına yardımcı olur.

BESS'in finansal analizinde, sistemin gelirleri ve giderleri göz önünde bulundurulmaktadır. Bu giderler, sermaye yatırım maliyetleri ve işletme & bakım maliyetleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Batarya sisteminin ana bileşenleri arasında güç dönüşüm ekipmanlarının maliyetleri (\$/kW) ve enerji depolama kapasitesinin maliyetleri C_{cap} (\$/kWh) bulunmaktadır. Buna ek olarak, enerji fiyatları, yani şebekeden alınan veya satılan enerjinin fiyatı ($\lambda^{grid}(t)$), t anındaki kWh başına maliyet olarak belirlenirken, maksimum talep ücretleri (C_{md}) de topluluk şebeke maliyetlerinin bir parçası olarak ele alınmaktadır.

Optimizasyonun temelinde belirli karar değişkenleri yer almaktadır. Bunlar, batarya güç dönüşüm oranı E^b , batarya enerji depolama kapasitesi E^{con} ve bataryanın zaman bazlı şarj/deşarj programı $P^{bat}(t)$ olarak tanımlanmaktadır. Bu değişkenlerin yönetilmesi, BESS'in performansını iyileştirmek için kritik öneme sahiptir.

- Şebekeden alınan veya satılan enerjiye bağlı olarak belirlenen enerji maliyeti, $\lambda^{grid}(t)$ ile ifade edilmektedir ve (4.13)'te tanımlandığı üzere:

$$\lambda^{grid}(t) = \begin{cases} \lambda^{buy}(t), & p^{grid}(t) \geq 0 \\ \lambda^{sell}(t), & p^{grid}(t) < 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

Burada, $\lambda^{buy}(t)$ şebekeden satın alınan enerjinin birim fiyatını, $\lambda^{sell}(t)$ ise şebekeye satılan enerjinin fiyatını temsil etmektedir.

- Bataryanın şarj vedeşarjı için iç fiyatlandırma, (4.14)'teki gibi tanımlanmıştır:

$$Pr_b(t) = \begin{cases} Pr^{sell}(t), & p^{bat}(t) \geq 0 \\ Pr^{buy}(t), & p^{bat}(t) < 0 \end{cases} \quad (4.14)$$

Burada, $Pr^{sell}(t)$ bataryadan enerji satışı sırasında uygulanan fiyatı, $Pr^{buy}(t)$ ise bataryaya enerji alımı sırasında ödenen fiyatı göstermektedir.

- Bataryanın gücü, işletme sınırları içinde kalacak şekilde sınırlandırılmıştır. Bu koşul (4.15)'te belirtilmiştir:

$$p_{min}^{bat} \leq p^{bat}(t) \leq p_{max}^{bat} \quad (4.15)$$

Bu denklem, bataryanın minimum ve maksimum güç kapasitesi arasında çalışmasını sağlamaktadır.

- Bataryanın enerji seviyeleri, belirlenen güvenli sınırlar içinde kalmalıdır. Bu sınırlandırma, (4.16)'da ifade edilmiştir:

$$E_{min}^{bat} \leq E^{bat}(t) \leq E_{max}^{bat} \quad (4.16)$$

Bu kısıtlama, bataryanın aşırı şarj veya aşırı deşarj olmasını önlemek için getirilmiştir.

- İşletme süresinin sonunda sistemin enerji dengesinin korunması gerektiği (4.17)'de gösterilmiştir:

$$E^{bat}(T) = E^{bat}(0) \quad (4.17)$$

Bu denklem, başlangıç ve bitiş enerji seviyelerinin eşit olması gerektiğini ifade etmektedir. Böylece sistemin sürdürülebilirliği sağlanmaktadır.

- Finansal uygulanabilirliğin sağlanabilmesi için Net Bugünkü Değerin (NPV) pozitif olması gerekmektedir. Bu şart, (4.18)'de verilmiştir:

$$BESS_{NPV} > 0 \quad (4.18)$$

Bu koşul, yatırımın kârlı olması için gereklidir. Eğer NPV değeri negatif olursa, yatırım ekonomik açıdan mantıklı olmayacaktır.

Optimizasyon hedefi, işletme kısıtlarına uyulurken toplam maliyet C_{total} 'i minimize etmektir. Bu kapsamda amaç fonksiyonu, (4.19)'da gösterildiği üzere şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\min f = \min\{ \sum_t [\lambda_{grid}(t)P_{grid}(t) + P_{OM} + E_{OM}] + C_{cap} + C_{md} \} \quad (4.19)$$

Burada,

- $\lambda_{grid}(t)$, t zamanındaki şebeke enerji fiyatını ifade etmektedir.
- $P_{grid}(t)$, şebeke ile değiş tokuş edilen gücü temsil etmektedir.
- P_{OM} , güç dönüşüm ekipmanları için aylık işletme maliyetlerini göstermektedir.
- E_{OM} , aylık enerji işletme maliyetlerini ifade etmektedir.
- C_{cap} , sermaye yatırım maliyetini temsil etmektedir.
- C_{md} , maksimum talep ücretlerini kapsamaktadır.

Amaç fonksiyonunun temel amacı, bataryanın şarj/deşarj programını, boyutunu ve enerji kapasitesini optimize ederek toplam maliyetleri minimize etmektir. Bu süreçte, enerji satın alma maliyetleri azaltılırken enerji satışından elde edilen

gelirlerin maksimize edilmesi ve işletme maliyetlerinin düşük tutulması hedeflenmektedir.

Batarya ömrü L_{bat} , deşarj derinliği (DoD), şarj/deşarj döngüleri ve çalışma sıcaklığı gibi faktörlerden etkilenmektedir. Bataryanın uzun ömürlü olmasını sağlamak için optimizasyon modeline, (4.20)'de gösterildiği üzere bir ömür fonksiyonu dahil edilmiştir: bir ömür fonksiyonu dahil edilmiştir:

$$\max L_{bat} = f(DoD, P_{bat}(t)) \quad (4.20)$$

Bu fonksiyon, bataryanın güvenli işletme sınırları içinde kalmasını sağlayarak aşırı bozulmayı önlemekte ve bataryanın ömrünü uzatmayı hedeflemektedir.

Maliyet minimizasyonu ve batarya ömrü maksimizasyonu arasındaki dengeyi sağlamak için, (4.21)'de tanımlandığı gibi ağırlıklı çok amaçlı bir fonksiyon kullanılmaktadır:

$$\min F = C_{total} - wE_{bat} \quad (4.21)$$

Burada w , maliyetleri minimize etmek ile batarya ömrünü maksimize etmek arasındaki önceliği belirleyen ağırlık faktörünü temsil etmektedir.

Doğru maliyet tahminleri için, gelecekteki enerji fiyat dalgalanmaları, paranın zaman değeri dikkate alınarak bugünkü değer faktörü (PVF) ile ayarlanır. t zamanında şarj veya deşarj için enerji fiyatı $P_{r_b}(t)$, (4.22)'deki gibi tanımlanır:

$$Pr_i(t) = f(p_i^{net}(t)) = \begin{cases} Pr^{sell}(t), p_i^{net}(t) < 0 \\ Pr^{buy}(t), p_i^{net}(t) \geq 0 \end{cases} \quad (4.22)$$

PVF, gelecekteki enerji artışlarını hesaba katmak üzere (4.23)'te tanımlandığı şekilde kullanılır:

$$PVF = \frac{(1+n')^d - 1}{n'(1+n')^d} \quad (4.23)$$

Burada d yıl sayısını, n ise karşılaştırılabilir iskonto oranını ifade eder. n' oranı ise, (4.24)'teki gibi hesaplanır:

$$n' = \frac{n-e}{1+e} \quad (4.24)$$

Depolama Sanallaştırma Modeli ve NLPMO Optimizasyonu: İşleyiş Süreci

Sanal depolama altyapısının ve NLPMO birlikte çalıştığı bu yapı, sistemin enerji verilerini yorumlayarak gerçek zamanlı kararlar almasını ve en uygun depolama

stratejilerini belirlemesini sağlamaktadır. Süreç beş temel aşamadan oluşmaktadır: sistem başlatma, veri hazırlığı, enerji dengesinin hesaplanması, depolama tercihlerinin belirlenmesi ve optimizasyon çözümünün uygulanması.

İlk aşamada, sistem çalışmaya başlamadan önce gerekli tüm parametreler ve veri kümeleri sisteme tanıtılır. Bu veriler; elektrik, gaz ve ısıya ait üretim ve tüketim profilleri, prosümer bazlı talep eğilimleri, batarya verimlilik oranları, mevcut kapasite bilgileri ve zaman serisi şebeke fiyatlarından oluşmaktadır.

Veri yükleme işleminin ardından, her zaman adımı için net enerji dengesi hesaplanır. Güneş ve rüzgâr üretimi ile sistemin toplam tüketimi karşılaştırılarak elektrik, gaz ve ısı bazında ayrı ayrı enerji fazlası veya açığı tespit edilir. Bu noktada enerji fazlası varsa sistem bu enerjiyi depolamayı hedefler; enerji açığı varsa eksik enerji karşılanmalıdır.

Bu işlemi takiben, geleneksel yaklaşımda olduğu gibi sabit bir kurala göre önce sanal sonra fiziksel depolama seçilmez. Bunun yerine, sanal ya da fiziksel depolamanın kullanılıp kullanılmayacağına, sistemin o andaki durumu ve tüm girdiler ışığında optimizasyon modeli karar verir. Her bir zaman diliminde, NLPMO modeli; fiyat sinyalleri, batarya ömrü üzerindeki etkiler, kullanılabilirlik oranları ve geçmiş kullanım davranışlarını göz önünde bulundurarak hangi kaynağın kullanılmasının daha uygun olduğunu belirler. Bu yönüyle, sistemin karar mantığı önceden tanımlanmış bir kural değil, durumsal optimizasyon temellidir.

Örneğin enerji fazlası olduğunda, model bu enerjiyi sanal havuza mı yoksa fiziksel bataryaya mı yönlendireceğine karar verir. Benzer şekilde, enerji açığı söz konusu olduğunda, sistem mevcut sanal hakları mı kullanmalı yoksa doğrudan fiziksel bataryayı mı devreye almalı sorusunu da model kendi belirler. Bu yaklaşım sayesinde, her koşulda teknik ve ekonomik açıdan en verimli seçenek tercih edilmiş olur.

Süreç içinde, depolama maliyetleri üç enerji türü için ayrı ayrı hesaplanır ve toplam sistem maliyetine katkıları değerlendirilir. Aynı zamanda sistemdeki en yüksek enerji açığı analiz edilerek minimum gerekli fiziksel batarya kapasitesi tahmin edilir.

Tüm bu veriler, NLPMO algoritmasına aktarılır. Modelin hedef fonksiyonu, bir yandan toplam maliyeti azaltmayı amaçlarken, diğer yandan batarya ömrünü

korumayı ve sistemin sürdürülebilirliğini artırmayı hedefler. Enerji fiyatları, şebeke etkileşimi, yatırım maliyetleri ve bakım giderleri gibi parametrelerin tamamı bu çok amaçlı karar sürecine dâhil edilir. Modelin çözümü, kısıtlar altında en uygun sonuca ulaşan *fmincon* algoritması ile gerçekleştirilir.

Modelin kısıtları arasında; batarya kapasitesi aşımı, enerji dengesizliği, güvenli şarj-deşarj oranları ve sistem kararlılığı gibi teknik faktörler yer almaktadır. Ayrıca fiziksel batarya kullanımı da batarya ömrünü olumsuz etkileyebileceği için, bu etkiler de modelde hesaplanarak dikkate alınır.

Optimizasyon sonucunda; her bir zaman dilimi için hangi enerji türünün, hangi depolama yolu ile yönetileceği; önerilen batarya kapasitesi ve sayısı; toplam sistem maliyeti ve prosümer bazında depolama stratejileri gibi detaylı çıktılar elde edilir.

Modelin Genellenebilirliği ve Genişletilebilirliği

Her ne kadar çalışmada ısı ve gaz depolama sistemlerine ait fiziksel kısıtlar (örneğin kapasite, şarj/deşarj limitleri, sıcaklık ve basınçla ilgili dinamikler) doğrudan matematiksel olarak modellenmemiş olsa da, önerilen kontrol ve optimizasyon altyapısı bu tür sistemlerin yönetimine de uyarlanabilir niteliktedir. Özellikle Nash Pazarlama ve ADMM temelli yapılar, çoklu enerji taşıyıcılarının bulunduğu ortamlarda kaynak paylaşımı ve koordinasyon açısından güçlü bir çözüm sunmaktadır. Bu yöntemlerin temel avantajı, fiziksel olarak ayrık sistemleri merkezi olmayan bir yapıda yönetmeye olanak tanımasıdır.

Mevcut model, elektrik sistemleri üzerinde detaylı biçimde test edilmiş ve doğrulanmıştır; ancak aynı yapı, ilerleyen çalışmalarda termal ve gaz sistemlerine ait fiziksel parametrelerin ve dinamiklerin eklenmesiyle doğrudan genişletilebilir. Bu bağlamda hem kontrol algoritmaları hem de karar mekanizmaları, daha karmaşık sistem dinamiklerini kapsayacak şekilde yeniden yapılandırılabilir. Dolayısıyla, söz konusu bileşenlere ait operasyonel kısıtlar bu çalışmada açık biçimde yer almasa da kullanılan optimizasyon yaklaşımı bu sistemlerin kontrolünü üstlenmeye teknik olarak uygundur.

4.4 Elektrik, Isı ve Gaz Ticareti İçeren Çoklu Enerji

Bu çalışmanın temel katkılarından biri de merkezi olmayan bir enerji paylaşım sisteminde anlık kararların prosümer bazlı bağımsız mekanizmalarla alındığı, ancak

bu kararların sistem genelinde koordineli şekilde uygulanmasını sağlayan hibrit bir kontrol yapısını sunmasıdır. Sistem, gerçek zamanlı enerji üretimi, tüketimi ve fiyat verilerini temel alarak çalışan bir Lyapunov tabanlı çevrimiçi karar algoritması ile başlar. Bu algoritma, her bir prosümerin lokal verilerine dayanarak enerji fazlası veya açığı durumunda hangi aksiyonun (P2P ticaret, sanal depolama, fiziksel batarya veya şebeke) daha uygun olacağına karar verir.

Ancak bireysel kararlar sistem genelinde enerji dengesini garanti etmez. Bu nedenle Lyapunov karar mekanizması, ADMM tabanlı dağıtık optimizasyon modeliyle bütünleştirilmiştir. ADMM, her bir tarafın lokal kararlarını sistemin genel enerji dengesine uyumlu hale getirmek için Lagrange çarpanları ve ceza terimleri kullanarak koordinasyon sağlar. Bu sayede her prosümer, kendi faydasını maksimize ederken sistemsal istikrar da korunmuş olur.

Ek olarak, sistemde sadece elektrik değil, aynı zamanda zamana bağlı sıcaklık farklarına dayalı olarak modellenen bir ısı iletim altyapısı da yer almaktadır. Her bir enerji aktarımında, ısı iletim kayıpları Fourier denklemleri ile hesaplanmakta, bu veriler hem Lyapunov hem de ADMM modellerine entegre edilmektedir.

Enerji fiyatlandırması ve maliyet tahsisi açısından ise akış izleme yöntemi kullanılmakta; üretici ve tüketici taraflar arasında Nash pazarlığı yöntemi ile adil, verimli ve merkeziyetsiz bir fiyat belirleme süreci yürütülmektedir. Bu yöntem sayesinde hem yerel optimizasyon sağlanmakta hem de her katılımcının ekonomik çıkarı korunmaktadır.

Bu yapıda tüm kararlar şu sıralamaya göre yürütülür:

- Veri Toplama ve Kuyruk Güncellemeleri: Her prosümer anlık üretim, tüketim, depolama durumu, enerji kuyrukları ($E_i(t)$, $Q_i(t)$) ve fiyat bilgilerini toplar.
- Lyapunov Tabanlı Yerel Karar: Her prosümer, $\Delta L_i(t) + V_i E\{C_i(t)\}$ hedefini minimize ederek hangi kaynaktan enerji kullanacağına karar verir.
- ADMM ile Global Uzlaştırma: Tüm tarafların teklifleri ADMM çözücüsüne girer, Lagrange çarpanları güncellenir ve sistem dengesine uyum sağlanır.

- Enerji Alım/Satım Gerçekleşir: Uygun bulunan kaynaklardan enerji aktarımı yapılır.
- Akış Takibi ve Maliyet Dağıtımı: Gerçekleşen akışlar izlenir, maliyetler Nash pazarlığı ile taraflar arasında dağıtılır.

Bu yapının en önemli avantajı, bireysel karar alma ve sistem koordinasyonunun dengeli ve şeffaf bir şekilde birleştirilmesidir. Her bir alt bölümde bu yapının bileşenleri (Lyapunov karar modeli, ADMM uzlaştırması, sıcaklık tabanlı iletim modeli, akış izleme ve Nash pazarlığı) ayrı ayrı detaylandırılacaktır.

4.4.1 Lyapunov Tabanlı Çevrimiçi Enerji Kontrolü ve Optimizasyon Modeli

Bu bölümde, önerilen sistemin temel karar altyapısını oluşturan Lyapunov tabanlı çevrimiçi enerji kontrol algoritması ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Söz konusu algoritma, enerji üretimi ve tüketimindeki anlık dalgalanmalara karşı dinamik ve kararlı bir dengeleme sağlamayı amaçlamakta; enerji depolama ve ticaret kararlarını, her bir prosümerin kendi yerel verileri üzerinden bağımsız bir biçimde optimize etmesine imkân tanımaktadır.

Önerilen sistemde, çevrimiçi enerji kontrolü ve ticaret algoritmasının kullanılması, prosümerlerin ek hesaplama yükü oluşturmada ölçeklenebilir enerji ticaret sistemine giriş veya çıkış yapmasını sağlamaktadır. Bu sistem, her prosümerin kendi DEK'ini bağımsız bir şekilde yönetmesine ve her zaman dilimi için enerji tekliflerini dinamik olarak belirlemesine olanak tanır. Ancak, enerji arzı ve talebi zaman içinde değişkenlik gösterdiğinden, sistemin esnek ve gerçek zamanlı bir karar verme mekanizmasına sahip olması gerekmektedir.

Çevrimiçi enerji kontrolü, sistemin değişken koşullara hızlı bir şekilde adapte olmasını sağlarken, aynı zamanda prosümerlerin ticaret sürecine kesintisiz olarak katılımını mümkün kılmaktadır. Ancak, enerji ticaretinde verimliliği artırmak ve sistem dengesini sağlamak için yalnızca çevrimiçi kontrol mekanizmaları yeterli olmamakta, optimizasyon süreçlerinin de belirli prensiplere dayanarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu noktada Lyapunov optimizasyon teorisi, sistemde enerji arz ve talep dengesini sağlamak ve batarya, ısı ve gaz depolamanın en uygun şekilde yönetilmesi için etkili bir yöntem sunmaktadır.

Lyapunov tabanlı optimizasyon modeli, zaman içinde değişkenlik gösteren enerji üretimi, tüketimi ve depolama süreçlerini dengelemek için gerçek zamanlı bir kuyruk yönetim mekanizması sunmaktadır. Burada kullanılan kuyruk teorisi, enerji arzı ve talebinin zaman içindeki değişimini modellemek için kullanılır ve sistemdeki kaynakların (enerji üretimi ve depolama gibi) nasıl yönetileceğini belirler. Bu yaklaşım, her bir zaman dilimi için ileriye dönük bir kuyruk kullanarak, şarj ve deşarj işlemlerinin zaman içindeki etkilerini dikkate alarak yönetilmesini sağlar. Böylece, klasik doğrusal programlama yöntemlerinin başa çıkmakta zorlandığı zaman bağımlılığı problemleri, Lyapunov optimizasyonu aracılığıyla aşılmaktadır.

Enerji üretimi ve tüketimi arasındaki dengeyi sağlamak için, her prosümerin enerji arz ve tüketim durumu sanal kuyruk yapılarıyla izlenir. Bu sanal kuyruklar, enerji akışının zaman içindeki değişimini dikkate alarak güncellenir ve böylece sistemde enerji ticaretinin sürekliliği sağlanır. Bu süreç, enerji dengesinin korunmasına ve sistemin kararlılığının sürdürülebilir olmasına yardımcı olur. Aynı zamanda, hizmet kalitesi kuyruğu (QoS) kullanılarak her prosümerin enerji tüketim ihtiyaçları, zaman içinde dinamik olarak izlenir.

Bu çerçevede oluşturulan P1 doğrusal programlama problemi, sistemin enerji akışını belirleyen temel model olarak tanımlanır. P1'in ana kısıtı, enerji depolama, şarj ve deşarj süreçlerinin zaman içerisinde dengede tutulması gerekliliğini belirtir. Bu gereklilik, zaman ortalaması alındığında, enerji giriş ve çıkışlarının uzun vadede dengelenmesini sağlayan koşul olarak ifade edilir ve (4.25)'te gösterildiği üzere:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{T-1} E \{ \eta_i^{ch} g_i^{ch}(t) + \eta_i^s g_i^s(t) - \eta_i^{dis} g_i^{dis}(t) \} = 0 \quad (4.25)$$

Burada amaç, uzun vadede sistemin enerji giriş ve çıkışlarının dengeye ulaşmasını sağlayarak operasyonel kararlılığı güvence altına almaktır.

Burada:

- η_i^{ch} : Prosümer i 'nin şarj verimlilik faktörü
- g_i^{ch} : Prosümer i 'nin t anında şarj ettiği enerji miktarı
- η_i^s : Prosümer i 'nin depolama verimlilik faktörü
- g_i^s : Prosümer i 'nin t anında depoladığı enerji miktarı

- η_i^{dis} : Prosümer i 'nin deşarj verimlilik faktörü
- g_i^{dis} : Prosümer i 'nin t anında deşarj ettiği enerji miktarı

Zaman bağımlılığı nedeniyle P1 optimizasyon problemi doğrudan çözülebilir yapıda değildir. Bu durum, enerji akışlarının zamana yayılması ve klasik doğrusal programlamanın anlık kararlara odaklanmasıyla ilgilidir. Bu sorunu aşmak amacıyla, Lyapunov optimizasyon yaklaşımı devreye alınmıştır. Bu yaklaşım, sistemin her bir zaman diliminde kararlı şekilde çalışmasını sağlamak için zaman ortalamalı kısıtları, kararlı kuyruklara dayalı eşdeğer kısıtlarla değiştirmektedir.

Bu dönüşümle birlikte sistemin karar mekanizmasında üç temel değişken tanımlanmıştır:

- $E_i(t)$: Sanal enerji kuyruğu, batarya veya diğer depolama kaynaklarında biriken enerjiyi temsil eder.
- $Q_i(t)$: QoS kuyruğu, prosümerlerin yük taleplerinin karşılanma durumunu gösterir.
- $L_i(t)$: Lyapunov fonksiyonu, sistemin kararlılığını ölçmek için kullanılır.

Sistemin kararlılık seviyesini belirleyen Lyapunov fonksiyonu (4.26)'da olduğu gibi ifade edilir:

$$L_i(t) = \frac{1}{2} [E_i(t)^2 + Q_i(t)^2] \quad (4.26)$$

Bu fonksiyon, enerji dengesizliği ve hizmet kalitesi sapmalarını birlikte değerlendirerek, optimizasyon sürecinde hangi parametrelerin baskın olduğu hakkında sistematik bilgi sağlar.

Bu yapı sayesinde P1 probleminin zaman bağımlılığı Lyapunov optimizasyonu ile ortadan kaldırılmakta ve sistem, her bir zaman diliminde bağımsız kararlar alabilecek şekilde yeniden yapılandırılmaktadır.

Bu dönüşüm sonucunda, başlangıçta zaman ortalamalı kısıtlara dayalı olarak tanımlanan P1 problemi, Lyapunov optimizasyon çerçevesinde (4.27)'de gösterildiği gibi yeniden yapılandırılarak aşağıdaki biçimde P2 problemine dönüştürülmüştür:

$$\min_{Y_i(t)} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E\{C_i(t)\} \quad (4.27)$$

Bu optimizasyon modeli, aşağıdaki üç temel hedefi aynı anda gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır:

- Enerji üretimi, tüketimi ve depolama süreçlerinin zaman içindeki dengesini sağlamak,
- Toplam enerji maliyetlerini uzun vadede minimize etmek,
- Sistem kararlılığını sürdürülebilir kılmak.

Burada $C_i(t)$, prosümer i 'nin t anındaki toplam enerji maliyetini temsil etmektedir.

Sonuç olarak, Lyapunov tabanlı kuyruk teorisi, P1 probleminin doğrudan çözümünü zorlaştıran zaman bağımlılığını ortadan kaldırarak, sistemin gerçek zamanlı ve esnek biçimde yönetilebilmesine olanak tanıyan güçlü bir çözüm çerçevesi sunmaktadır. Bu sayede her bir prosümer, kendi yerel verilerine dayalı olarak bağımsız kararlar alabilmekte; sistem ise merkezi koordinasyon ihtiyacı olmaksızın ölçeklenebilir şekilde çalışabilmektedir.

P2 probleminin uygulanabilirliği için sistemde tanımlanan kuyruk değişkenlerinden ilki, sanal enerji kuyruğu $E_i(t)$ 'dir. Bu değişken, prosümer i 'nin batarya ya da diğer depolama kaynaklarında sahip olduğu enerji miktarını temsil eder ve sistemin enerji depolama-tüketim dengesini modellemek için kullanılır. Kuyruk değeri (4.28)'de gösterildiği gibi tanımlanır:

$$E_i(t) = S_i(t) - \theta_i \quad (4.28)$$

Burada:

- $S_i(t)$: Prosümerin t anındaki toplam enerji durumunu ifade eder,
- θ_i : Sistemin kararlılığını koruyabilmesi amacıyla tanımlanan alt limit (güvenlik eşiği) parametresidir.

Bu yapı, enerji arz-talep farklarını izleyen dinamik bir kontrol değişkeni oluşturur. Sanal enerji kuyruğunun zaman içindeki güncellenmesi ise (4.29)'da gösterildiği gibi aşağıdaki şekilde modellenmiştir:

$$E_i(t) = E_i(t-1) + (\eta_i^{ch} g_i^{ch}(t) + \eta_i^s g_i^s(t) - \eta_i^{dis} g_i^{dis}(t)) \quad (4.29)$$

Burada:

- $g_i^{ch}(t)$: Prosümerin t anında bataryaya şarj ettiği enerji miktarıdır,

- $g_i^s(t)$: sistemin diğer depolama kaynaklarına aktardığı enerji miktarıdır,
- $g_i^{dis}(t)$: prosümerin depolamadan çekerek tüketime yönlendirdiği enerji miktarıdır,
- $\eta_i^{ch}, \eta_i^s, \eta_i^{dis}$: ilgili enerji transferlerinin verimlilik katsayılarıdır.

Bu denklem, sistemdeki enerji akışlarının zaman serisi boyunca nasıl değiştiğini izlemeye olanak tanır. Böylece, sistemin anlık enerji durumu temel alınarak, depolama stratejilerinin güncellenmesi mümkün olur. Bu da Lyapunov optimizasyon modelinin, yalnızca teorik değil aynı zamanda uygulamalı olarak sistemin kararlılığını desteklemesini sağlar.

Sistemde yalnızca enerji üretimi ve depolaması değil, aynı zamanda prosümerlerin yük taleplerinin karşılanma düzeyi de izlenmektedir. Bu amaçla tanımlanan ikinci temel değişken Hizmet Kalitesi Kuyruğu $Q_i(t)$, prosümer i 'nin enerji talebinin ne ölçüde karşılandığını temsil eder. Bu kuyruk, sistemin hem hizmet gecikmelerine hem de talep karşılamadaki dengesizliklere karşı ne kadar dayanıklı olduğunu belirler. Hizmet Kalitesi Kuyruğu, (4.30)'da belirtildiği üzere,

$$Q_i(t-1) = \max\{Q_i(t) - \epsilon_i, 0\} + \frac{\bar{D}_i(t) - D_i(t)}{\bar{D}_i(t) - \underline{D}_i(t)} \quad (4.30)$$

Şeklinde tanımlanır.

Burada:

- ϵ_i : Prosümer i 'ye ait toleranslı talep azalması (kuyruktan boşaltım oranı),
- $\bar{D}_i(t)$: Prosümerin t anındaki maksimum yük talebi,
- $D_i(t)$: Gerçek talep değeri,
- $\underline{D}_i(t)$: Minimum talep değeri.

Bu modelin amacı, talep karşılanamadığında veya ertelendiğinde oluşan birikimin kuyrukta yansıtılması ve sistemin hizmet kalitesi performansının izlenebilir hale getirilmesidir. Denklemdeki ilk terim, mevcut kuyruğun toleransla azaltılmasını; ikinci terim ise o an karşılanamayan yük talebinin normalize edilerek kuyruk uzunluğuna eklenmesini ifade eder.

Bu yapı sayesinde, sistemin yalnızca enerji dengelemesi değil, aynı zamanda talep karşılanma başarımı (QoS) da dinamik olarak izlenebilmekte; ani yük artışları veya

talep belirsizlikleri gibi durumlara karşı sistem tepkisi daha kararlı ve izlenebilir hale getirilmektedir.

Bir enerji ticaret sisteminin uzun vadede kararlı çalışabilmesi için yalnızca kuyrukların tanımlanması değil, bu kuyrukların zaman içerisinde belirli sınırlar içinde kalması da gereklidir. Özellikle hizmet kalitesi kuyruğu $Q_i(t)$ 'nin kararlılığı, sistemin sürdürülebilirliğini doğrudan etkileyen bir faktördür.

Bu bağlamda sistemin kararlılık şartı (4.31)'de gösterildiği üzere,

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E\{Q_i(t)\} \leq \epsilon_i \quad (4.31)$$

şeklinde ifade edilir. Bu koşul, prosümer i 'nin hizmet kuyruğundaki ortalama birikimin, tolerans seviyesi olan ϵ_i 'yi aşmaması gerektiğini belirtir. Başka bir deyişle, sistem uzun vadede biriken talepleri zamanında karşılamalı; ertelenen yük taleplerinden doğan hizmet sapmaları belirli bir sınırın altında tutulmalıdır.

QoS kuyruğunun bu şekilde kararlı kalması, sistem için aşağıdaki avantajları sağlar:

- Aşırı yüklenme riskini azaltır, böylece enerji ticareti daha stabil ve güvenli bir biçimde yürütülür,
- Talep dalgalanmalarına hızlı tepki verilmesini mümkün kılar,
- Prosümer katılımı açısından esneklik sağlar; kullanıcılar sisteme istedikleri anda girip çıkabilir, bu da ölçeklenebilirliği artırır.

Sonuç olarak, sanal enerji kuyruğu $E_i(t)$ ile QoS kuyruğu $Q_i(t)$, birlikte çalışarak sistemin hem arz-talep dengesini hem de hizmet sürekliliğini dengelemesini sağlar. Bu kuyruklar, Lyapunov optimizasyon modeli kapsamında dinamik olarak yönetildiği için sistemin hem gerçek zamanlı çalışabilirliği hem de uzun vadeli kararlılığı güvence altına alınmaktadır.

Her bir zaman adımında sistemin kararlılık düzeyinin nasıl değiştiğini analiz edebilmek için, koşullu tek zaman dilimlik Lyapunov sürüklenmesi tanımlanır. Bu metrik, sistemin mevcut durumu bilindiğinde bir sonraki zaman adımında Lyapunov fonksiyonundaki beklenen değişimi ifade eder ve (4.32)'de aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$\Delta L_i(t) \triangleq E\{L_i(t+1) - L_i(t) | F_i(t)\} \quad (4.32)$$

Burada:

- $F_i(t)$: Prosümer i 'nin t anındaki enerji üretimi, talebi, batarya seviyesi ve diğer karar değişkenlerini kapsayan sistem bilgisini temsil eder.
- $\Delta L_i(t)$: Sistemin kararlılığına ilişkin beklenen değişimdir.

Lyapunov sürüklenmesi tek başına sistem kararlılığını izlemeye odaklanırken, maliyet etkinliği de en az onun kadar kritik bir optimizasyon kriteridir. Bu nedenle, kararlılık ile ekonomik performans birlikte ele alınarak (4.33)'te gösterildiği gibi toplam hedef fonksiyon formüle edilir:

$$\Delta L_i(t) + V_i E\{C_i(t)\} \quad (4.33)$$

Bu fonksiyon iki temel amaca hizmet eder:

- Lyapunov sürüklenmesi aracılığıyla kuyruk uzunluklarının kontrol edilmesi ve sistemin zaman içinde dengeli kalması,
- Beklenen enerji maliyeti $C_i(t)$ 'nin minimize edilmesi yoluyla ekonomik verimliliğin sağlanması.

Buradaki V_i katsayısı, sistemin denge ile maliyet optimizasyonu arasında nasıl bir önceliklendirme yapacağını belirler:

- V_i büyükse, maliyet düşürme önceliklidir. Bu durumda sistem, enerji maliyetlerini düşürmek adına daha yüksek kuyruklara ve gecikmelere razı olabilir.
- V_i küçükse, sistem kararlılığı önceliklidir. Böylece daha düşük kuyruk uzunlukları sağlarken, maliyetlerde nispeten daha az kazanç hedeflenebilir.

Söz konusu çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı, yalnızca anlık kararlar açısından değil, uzun vadeli sistem kararlılığı ve verimliliği açısından da avantaj sunar. Uzun dönemli ortalama maliyetin minimize edilmesi, (4.34)'te ifade edildiği üzere,

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E[C_i(t)] \quad (4.34)$$

şeklinde tanımlanır. Bu çerçevede Lyapunov tabanlı karar mekanizması, sistemin gerçek zamanlı enerji yönetimini sağlarken, uzun vadede sistem kararlılığı ve ekonomik performansı birlikte optimize eder.

Sonuç olarak, bu bütünsel kontrol yaklaşımı sayesinde:

- Prosümerlerin ticaret kararları hem kararlılık hem de maliyet açısından dengelenir,
- Sanal enerji kuyruğu ve QoS kuyruğu gibi değişkenler üzerinden yapılan izleme, sistemin anlık durumuna duyarlı karar alınmasını sağlar,
- Gerçek zamanlı enerji ticareti; dinamik, adil ve sürdürülebilir biçimde yürütülür.

Bu yapı, önerilen sistemin ölçeklenebilirliğini, dayanıklılığını ve operasyonel etkinliğini artırarak, Lyapunov tabanlı çevrimiçi kontrol modelini P2P enerji sistemleri için güçlü bir temel haline getirir.

Lyapunov optimizasyonunun temel amacı, yalnızca anlık kararları yönlendirmek değil, aynı zamanda sistemin uzun vadeli kararlılığını ve ekonomik sürdürülebilirliğini garanti altına almaktır. Bu hedef doğrultusunda, Lyapunov sürüklenmesi ile maliyet fonksiyonunun toplamı minimize edilmeye çalışılır. Bu sürecin teorik çerçevesi, (4.35)'te verilen eşitsizlik üzerinden tanımlanır:

$$\Delta L_i(t) + V_i E[C_i(t)] \leq B_i + E_i(t) E \left[\eta_i^{ch} \left(g_i^{ch}(t) + g_i^s(t) - \eta_i^{dis} g_i^{dis}(t) \right) \right] + Q_i(t) E \left[\frac{\overline{D_i(t)} - D_i(t)}{\overline{D_i(t)} - \underline{D_i(t)}} - \epsilon_i \right] + V_i E[C_i(t)] \quad (4.35)$$

Bu denkleme göre:

- B_i : Sistemin kararlılık sınırını belirleyen sabit bir değer

Eşitsizlik, hem enerji akışlarında istikrarı sağlamak hem de enerji maliyetlerini kontrol etmek için sistemin nasıl tepki vermesi gerektiğini belirler. Bu çerçevede, her bir zaman dilimi t için her prosümerin kontrol kararı $Y_i(t)$, (4.36)'da gösterildiği gibi aşağıdaki doğrusal programlama formülasyonu ile elde edilir:

$$\min_{Y_i(t)} E \left[E_i(t) \left(\eta_i^{ch} g_i^{ch}(t) + \eta_i^{ch} g_i^s(t) - \eta_i^{dis} g_i^{dis}(t) \right) + Q_i(t) \frac{\overline{D_i(t)} - D_i(t)}{\overline{D_i(t)} - \underline{D_i(t)}} + V_i \{C_i(t)\} \right] \quad (4.36)$$

Bu optimizasyon problemi, prosümerin enerji ticareti fiyatını, depolama kararlarını ve tüketim miktarını en uygun biçimde belirlemesini sağlar. Ancak pratikte, sistemde ortaya çıkabilecek aşırı satış eğilimini dengelemek için ilave bir kontrol mekanizması gereklidir.

Bu doğrultuda, prosümerin yalnızca ticarete uygun olan enerji miktarı ile işlem yapmasına izin verilir. Aksi takdirde, prosümer ucuz fiyatla enerji sattıktan sonra, kendi yük ihtiyacını karşılamak adına daha pahalı şekilde şebekeden enerji satın almak zorunda kalabilir. Bu riski ortadan kaldırmak üzere, (4.37)'de tanımlandığı gibi aşağıdaki güvenlik eşitsizliği uygulanır:

$$EG_i(t) = \sum_{\tau=1}^{t-1} \eta_i^{ch} [g_i^{ch}(\tau) + g_i^s(\tau)] - \eta_i^{dis} g_i^{dis-D}(\tau) \geq \emptyset_i \quad (4.37)$$

Burada:

- $EG_i(t)$: Prosümere ait ticarete uygun toplam enerji rezervidir.
- $\emptyset_i$: Minimum güvenli rezerv eşiğidir.
- $g_i^{dis-D}(\tau)$: Yük ihtiyacını karşılamak üzere ayrılmış deşarj miktarıdır.

Bu eşitsizlik, yalnızca yeterli enerji rezervine sahip prosümerlerin ticaret gerçekleştirmesine izin vererek sistemin dengesizleşmesini önler. Aksi hâlde, zaman dilimi t içinde $g_i^{es} - E(t) = 0$ olacak ve prosümer ticaret işlemi gerçekleştiremeyecektir.

Sonuç olarak, Lyapunov optimizasyonu temelli bu yaklaşım, yalnızca enerji dengesini ve maliyet etkinliğini sağlamakla kalmaz; aynı zamanda sistemin istikrarını gerçek zamanlı olarak gözetten bir karar mekanizması sunar. Denklemlerle tanımlanan sanal enerji kuyruğu ve hizmet kalitesi kuyruğu gibi yapılar, prosümerlerin kararlarının sadece bireysel değil, aynı zamanda sistem bütününe etkisini de dikkate alacak şekilde yönlendirilmesini mümkün kılmaktadır.

(4.35) numaralı eşitsizlik ile tanımlanan üst sınır optimizasyonu, sistemdeki kararlılık koşullarının ihlal edilmeden maliyetlerin minimize edilmesini güvence altına alırken; (4.36) ile verilen doğrusal programlama modeli, her zaman diliminde prosümerlerin üretim, tüketim ve ticaret kararlarını en uygun şekilde belirlemelerine olanak tanımaktadır. Aşırı ticaret gibi potansiyel riskler ise (4.37) numaralı denge kısıtıyla önlenmekte, bu da sistemin hem ekonomik sürdürülebilirliğini hem de operasyonel güvenilirliğini artırmaktadır.

Bu bütüncül yapı sayesinde önerilen sistem, değişken enerji koşullarına karşı dayanıklı, adil ve bireysel kararları küresel sistemle uyumlu hale getiren bir kontrol mimarisi sunmaktadır. Lyapunov tabanlı çevrimiçi kontrol mekanizması, enerji ticaretinde sürdürülebilirliğin, kararlılığın ve maliyet etkinliğinin aynı anda

sağlanabileceğini ortaya koyarak bu tez kapsamında sunulan optimizasyon çerçevesinin temel yapı taşlarından biri olmuştur.

4.4.2 Gerçek Zamanlı Enerji Yönetiminde Bütünleşik Karar Koordinasyonu

Yenilenebilir ve çok taşıyıcılı enerji sistemlerinin yönetimi, yalnızca bireysel prosümer kararlarının değil, aynı zamanda bu kararların sistem düzeyinde koordineli biçimde uygulanmasının da optimizasyonunu gerektirir. Bu çerçevede geliştirilen bütünleşik yapı, dört temel katmandan oluşmaktadır ve her biri, enerji ticareti ile fiziksel sistem dinamiklerinin eşzamanlı yönetimini hedeflemektedir.

Enerji sistemlerinde üretim ve tüketim yalnızca elektrikle sınırlı kalmayıp, ısı ve gaz gibi farklı enerji türlerini de içermektedir. Bu nedenle, sistemin tamamında düğüm bazlı sıcaklık dağılımı, dinamik fiyat oluşumu, marjinal maliyetler ve gerçek enerji akışları dikkate alınarak, çok boyutlu bir karar mekanizması kurulmuştur. Söz konusu yapı, merkeziyetsiz karar almayı sağlayan dağıtık algoritmalarla çalışmakta, yerel düzeyde alınan kararların sistem geneli ile tutarlı hale getirilmesini sağlamaktadır.

Bu bölümde sunulan mimari hem bireysel hem de sistemsel hedefleri aynı anda gözeten ve gerçek zamanlı işleyişe uygun olan aşağıdaki dört karar bileşenini içermektedir:

- Dağıtık Karar Koordinasyonu (ADMM): Her bir prosümerin aldığı lokal kararlar, Alternating Direction Method of Multipliers (ADMM) tabanlı dağıtık optimizasyon mekanizmasıyla sistem düzeyinde uzlaştırılmakta ve enerji arz-talep dengesi korunmaktadır. Bu yöntem, her katılımcının yalnızca kendi maliyetini değil, sistemin enerji dengesine olan katkısını da göz önüne almasını sağlar.
- Zamana Bağlı Isı Transfer Modeli: ADMM ile belirlenen enerji akışları, fiziksel düzlemde ısı transferiyle ilişkilendirilerek sistemin termal dengesine uygun hale getirilmektedir. Isıl kayıplar ve sıcaklık değişimleri sistem kararlarını etkileyebilecek biçimde modele entegre edilir. Bu model, Fourier yasasına dayalı zaman çözünürlüklü bir yapıda ele alınır.

- **Enerji Akış İzleme ve Döğümsel Maliyet Dağılımı:** Üretici-tüketici ilişkileri bağlamında enerji akış yolları izlenerek, her tüketiciye düşen maliyet adil ve şeffaf biçimde hesaplanır. Bu yöntem, klasik döğümsel fiyatlandırmanın ötesinde, anlık enerji akışına dayalı dinamik bir tahsis mekanizması sunar ve enerji üretiminin hangi kaynaktan hangi tüketiciye aktarıldığını izleyerek maliyetleri doğru konumlandırır.
- **Döğümsel Fiyatlandırma ve Nash Pazarlığı:** Enerji ticaretinde kullanılacak marjinal fiyatlar ve ticaret kararları, üretici ve tüketici faydalarının dengelendiğı Nash pazarlık modeli ile belirlenir. Bu yapı sayesinde ticaret yalnızca teknik değil, aynı zamanda ekonomik anlamda da dengeli bir yapıya kavuşur.

Bu dört yapı bir araya geldiğinde, önerilen sistem yalnızca bireysel çıkarları değil, sistemin genel kararlılığını, esnekliğini ve maliyet etkinliğini birlikte optimize edebilen, bütünleşik bir karar destek altyapısı sunmaktadır. Bir sonraki alt başlıkta, ilk olarak ADMM tabanlı karar uzlaştırma mekanizması detaylandırılacaktır.

4.4.2.1 Dağıtık Karar Koordinasyonu: ADMM Tabanlı Optimizasyon

Lyapunov optimizasyonu, her prosümerin kendi üretim, tüketim ve depolama koşullarına göre bireysel düzeyde karar almasını mümkün kılar. Ancak bu kararların sistem bütününde sürdürülebilirlik ve denge sağlayabilmesi için prosümerler arası etkileşimlerin senkronize edilmesi gerekir. İşte bu noktada, ADMM tabanlı dağıtık optimizasyon algoritması devreye girmektedir.

ADMM, bireysel kararların sistem genelinde uzlaştırılması amacıyla kullanılan merkeziyetsiz bir yaklaşımdır. Bu yapı, büyük ölçekli enerji sistemlerinde karşılaşılan karmaşık optimizasyon problemlerini daha küçük alt problemlere bölerek çözmeyi sağlar. Her bir prosümer, kendi lokal verileri doğrultusunda karar alırken; sistem, Lagrange çarpanları ve ceza terimleri aracılığıyla bu kararları koordineli hâle getirir.

ADMM'nin temel avantajları şunlardır:

- Prosumere bireysel esneklik tanırken, sistem genelinde küresel enerji dengesini garanti eder.

- Hesaplama yükünü dağıtarak ölçeklenebilirliği artırır.
- Fiyatlandırma, enerji paylaşımı ve ticaret kararlarının koordinasyonunu sağlar.

Bu bağlamda modelde üç temel karar değişkeni tanımlanır:

- x_i (Enerji Depolama Kararı): Prosümer i 'nin depolamak istediği enerji miktarını temsil eder. Batarya, ısı depolama veya diğer enerji saklama yöntemleri için kullanılabilir.
- z_i (Enerji Akış Kararı): Prosümer i 'nin ticaret için ayırdığı enerji miktarını ifade eder. Elektrik, gaz veya ısı ticareti şeklinde olabilir.
- y_i (Lagrange Çarpanı): Prosümer i 'ye ait Lagrange çarpanıdır ve sistem kısıtlarını (enerji dengesizliği, fiyatlama koşulları vb.) modele entegre eder.

Bu değişkenler kullanılarak prosümerlerin enerji ticareti ve tüketimi optimize edilmektedir. Amaç fonksiyonu, her bir prosümer için hem enerji depolama maliyetini hem de enerji akış maliyetini minimize etmeyi hedeflemekte olup, (4.38)'de gösterildiği şekilde ifade edilir:

$$\min_{x_i, z_i} \sum_{i=1}^N (c_i x_i + d_i z_i) \quad (4.38)$$

Burada:

- c_i : Prosümer i 'nin enerji depolama maliyeti,
- d_i : Prosümer i 'nin ticaret için harcadığı maliyet veya elde ettiği ödüldür.

Bu fonksiyon, prosümerlerin en düşük maliyetle optimal depolama ve ticaret kararlarını vermesine olanak tanımaktadır. Ancak, sistemde bazı fiziksel ve piyasa kısıtlamaları bulunmaktadır.

➤ Enerji Dengesi Kısıtı

Her prosümer, ürettiği, tükettiği ve ticaret için ayırdığı enerji miktarını dengelemek zorundadır. Bu denge, (4.39)'da gösterildiği gibi,

$$x_i - z_i = e_i \quad (4.39)$$

eşitliğiyle sağlanır. Burada e_i , prosümer i 'nin net enerji fazlasını (pozitif) veya talebini (negatif) ifade etmektedir. Bu kısıt, sistemde üretilen ve tüketilen toplam enerjinin her zaman dengede olmasını sağlar.

➤ Depolama Kapasite Kısıtı

Her prosümer, enerji depolama kapasitesinin belirlenen limitler içinde kalmasını sağlamalıdır. Bu durum, (4.40)'ta belirtildiği üzere,

$$0 \leq x_i \leq x_{max,i} \quad (4.40)$$

eşitsizliği ile ifade edilir. Bu kısıt, prosümerlerin batarya veya ısı depolama kapasitelerini aşmadan enerji saklamasını garanti eder.

➤ İletim Kısıtlamaları

Prosümerler, ticaret yaparken iletim hatlarının fiziksel sınırlarına uymalıdır. Bu sınır, (4.41)'de verildiği gibi,

$$0 \leq z_i \leq z_{max,i} \quad (4.41)$$

eşitsizliği ile tanımlanır. Bu kısıt, enerji iletim ağındaki yükü dengeleyerek aşırı yüklenmeleri ve kayıpları önler.

➤ Piyasa Fiyatı Kısıtı

Enerji ticaretinde prosümerlerin fiyatlandırma koşullarına uygun hareket etmesi gerekmektedir. Bu durum, (4.42)'de gösterildiği üzere,

$$p_i \leq p_{max,i} \quad (4.42)$$

eşitsizliği ile sınırlandırılmıştır. Burada p_i , prosümer i 'nin ticaret yaptığı enerji fiyatını ifade etmektedir. Bu kısıt, piyasa kurallarına uygun ticaretin yapılmasını sağlar ve fiyat manipülasyonlarını engeller.

Tanımlanan bu amaç fonksiyonu ve ilişkili kısıtlar, prosümerlerin bireysel düzeyde optimal kararlar alabilmesini sağlarken; sistem genelinde enerji dengesini, depolama kapasitelerini, iletim limitlerini ve piyasa fiyat yapılarını da göz önünde bulunduran kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır. Ancak, bu yapıdaki her bir prosümer, yalnızca kendi yerel verisine dayanarak karar alırken, sistemin küresel koşullarına doğrudan hâkim değildir. Bu nedenle, bireysel kararların sistemsel uyumunu sağlamak amacıyla, ADMM algoritması üç aşamalı iteratif bir süreçle çalışır: ilk aşamada her prosümer kendi kararlarını lokal olarak optimize eder; ikinci aşamada sistem, enerji dengesi ihlallerini değerlendirerek Lagrange çarpanlarını günceller; üçüncü ve son aşamada ise, ceza terimleri yardımıyla sistemin arz-talep uyumu güçlendirilir. Aşağıda, bu üç adım detaylı biçimde açıklanacaktır.

Adım 1: Yerel Optimizasyon (Prosümerler)

ADMM çerçevesinde ilk adım, her bir prosümerin kendi lokal enerji verilerine dayanarak bireysel kararlarını vermesini sağlayan yerel optimizasyon sürecidir. Bu aşamada, her prosümer i , sahip olduğu üretim, tüketim ve enerji durumu bilgileri doğrultusunda hem depolama miktarını hem de ticaret kararını optimize eder. Ancak bu kararlar, sadece bireysel maliyet minimizasyonuna göre değil; aynı zamanda sistemsel enerji dengeleme kısıtlarına uyumlu olacak şekilde modellenir.

Bu kapsamda, prosümer i 'nin yerel optimizasyon problemi, (4.43)'te tanımlandığı üzere,

$$\min_{x_i, z_i} (c_i x_i + d_i z_i + y_i^T (x_i - z_i - e_i)) \quad (4.43)$$

şeklinde formüle edilir. Burada:

- x_i : Prosümer i 'nin depolamaya ayırdığı enerji miktarıdır.
- z_i : Prosümer i 'nin ticaret amacıyla sisteme sunduğu enerji miktarıdır.
- c_i : Depolama birim maliyeti,
- d_i : Ticaret işlemleri için birim maliyet (veya gelir),
- e_i : Prosümerin net enerji durumu (üretim – tüketim),
- y_i : Lagrange çarpanı (dual değişken), sistemin küresel enerji denge kısıtı ile ilgili olarak ADMM tarafından her yinelemede güncellenen ve bireysel kararları sistemsel koşullara bağlayan bir geri bildirim mekanizmasıdır.

Bu amaç fonksiyonu üç bileşeni içerir:

- $c_i x_i$: Enerji depolama maliyetini temsil eder ve sistemin fiziksel altyapısına bağlıdır.
- $d_i z_i$: Ticaretten kaynaklanan gelir/gider akışlarını yansıtır.
- $y_i^T (x_i - z_i - e_i)$: Prosümerin aldığı kararların sistemin enerji dengesi ile ne kadar uyumlu olduğunu ölçen ve ceza/mükâfat etkisi yaratan Lagrange terimidir.

Bu yapı sayesinde:

- Her prosümer kendi kararlarını bağımsız olarak alabilir,

- Aynı zamanda sistem bütünlüğü ile uyumlu kalacak şekilde yönlendirilir.

Bu çözüm adımı, ADMM'nin dağıtık yapısını yansıtır. Her prosümer, kendi alt problemini merkezi bir koordinatöre ihtiyaç duymadan çözebilir. Ancak bu kararlar, ilerleyen adımlarda küresel uyum adına senkronize edilecektir.

Adım 2: Küresel Koordinasyon (Enerji Akışı)

ADMM algoritmasının ikinci aşamasında, bireysel olarak belirlenen yerel kararların sistem düzeyinde enerji dengesi ile uyumlu hale getirilmesi hedeflenmektedir. Bu süreç, her bir prosümerin depolama ve ticaret kararlarının koordineli biçimde güncellenmesini ve küresel enerji dengesizliğinin giderilmesini sağlar.

Bu amaçla, her prosümere ait Lagrange çarpanı y_i , (4.44)'te gösterildiği üzere iteratif olarak aşağıdaki biçimde güncellenir:

$$y_i^{(k+1)} = y_i^{(k)} + \rho(x_i^{(k)} - z_i^{(k)} - e_i) \quad (4.44)$$

Burada:

- $y_i^{(k)}$: k . iterasyonda prosümer i 'nin enerji dengeleme çarpanı,
- $x_i^{(k)}$: Prosümerin o adımda aldığı enerji depolama kararı,
- $z_i^{(k)}$: Prosümere ait ticaret akış kararı,
- e_i : Prosümerin enerji fazlası ya da açığını ifade eden net enerji miktarı,
- ρ : ADMM güncelleme adımının büyüklüğünü belirleyen ceza parametresidir.

Bu güncelleme mekanizması, her bir prosümerin kendi kararlarının sistemdeki toplam enerji dengesiyle olan tutarsızlık düzeyini azaltacak şekilde ayarlanmasını sağlar. Böylece, herhangi bir merkezi kontrol mekanizmasına ihtiyaç duyulmaksızın, yerel kararlar küresel denge koşullarına entegre edilir.

Bu adımda, Lyapunov optimizasyonunun sağladığı bireysel kararlılık prensibi, ADMM yapısının iteratif güncellemeleri sayesinde sistem düzeyinde sürdürülebilir bir yapıya dönüştürülmektedir. Bu sayede hem bireysel hem de küresel düzeyde enerji yönetimi dengeli ve adil biçimde gerçekleştirilmiş olur.

Adım 3: Küresel güncellemeler – Sistem Yakınsaması ve Piyasa Dengelemesi

ADMM algoritmasının son adımı, bireysel kararlar ve güncellenmiş Lagrange çarpanları doğrultusunda sistemin genel dengeye ulaşmasını sağlamak amacıyla gerçekleştirilir. Bu aşamada amaç, bireysel optimizasyonlardan elde edilen kararları küresel piyasa yapısıyla uzlaştırmak ve enerji ticaretinin şeffaf, adil ve ekonomik olarak dengeli biçimde yürütülmesini temin etmektir.

Bu kapsamda, sistem şu şekilde işler:

- Yerel karar üretimi: Her prosümer, önceki adımlarda belirlenen kişisel hedef fonksiyonları çerçevesinde kendi enerji depolama (x_i) ve ticaret (z_i) stratejisini belirler.
- Lagrange çarpanı güncellemesi: Her bir prosümere ait enerji dengeleme çarpanı (y_i), yerel kararlarla sistem dengesizliği arasındaki farkı telafi edecek şekilde güncellenir.
- Küresel yakınsama kontrolü: Bu iteratif süreç, belirli bir tolerans seviyesinde yakınsama sağlanana dek tekrarlanır. Bu aşamada, toplam enerji arzı ve talebi arasında kalan farkın minimize edilmesi hedeflenir.
- Piyasa sinyallerinin güncellenmesi: Güncellenmiş Lagrange çarpanları, sistemin marjinal maliyet ve ticaret fiyatlarına dönüşerek, bir sonraki karar adımı prosümerlerin seçimlerini yönlendirir.

Bu döngü aşağıdaki genel yapıda özetlenebilir:

- Her prosümer:

$$\min_{x_i, z_i} (c_i x_i + d_i z_i + y_i^T (x_i - z_i - e_i))$$

- Güncelleme:

$$y_i^{(k+1)} = y_i^{(k)} + \rho (x_i^{(k)} - z_i^{(k)} - e_i)$$

- Yakınsama kontrolü:

$$\|Ax^k - b\| \leq \epsilon$$

Bu yapı sayesinde, bireysel düzeyde alınan kararlar sistemin küresel enerji dengesi, piyasa fiyatları ve iletim kısıtlarıyla bütünleşir. Sonuç olarak:

- Ticaret fiyatları arz-talep dengesine göre belirlenir,
- Kaynaklar optimal biçimde yönlendirilir,

- Prosümere ait stratejiler sistemle uyumlu hale gelir.

Bu noktada ADMM algoritması tamamlanmış olur ve enerji ticareti sistemi, bireysel esneklik ile küresel uyumu aynı anda sağlayan dağıtık bir dengeye kavuşur.

4.4.2.2 Zamana Bağlı Isı Transfer Modeli ve Termal Dengeleme

ADMM tabanlı merkeziyetsiz optimizasyon süreci, enerji ticareti ve depolama kararlarının sistem genelinde adil ve dengeli biçimde gerçekleştirilmesini sağlar. Ancak özellikle ısı enerjisinin transferi söz konusu olduğunda, yalnızca matematiksel karar değişkenlerine dayanmak yeterli değildir. Isı transferi, fiziksel olarak yönlendirilmesi zor ve kayıplara açık bir enerji biçimi olduğundan, sistemdeki kararlar fiziksel dinamiklerle de tutarlı olmalıdır.

Bu bağlamda geliştirilen Zamana Bağlı Isı Transfer Modeli, prosümler arasındaki enerji alışverişinde termodinamik davranışların ve ısı kayıplarının etkisini dikkate alarak sistem kararlarının daha gerçekçi ve verimli bir şekilde yönlendirilmesini amaçlamaktadır. Özellikle soğuk iklimli bölgeler, uzun mesafeli iletim hatları ve düşük yalıtım kapasiteli sistemlerde bu yaklaşım kritik bir gereklilik hâline gelmektedir.

Modelleme süreci, Fourier'ın ısı iletim yasası temel alınarak yapılandırılmıştır. İki düğüm arasında gerçekleşen ısı akısı q , (4.45)'te gösterildiği gibi ifade edilir:

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (4.45)$$

Burada:

- q : İki düğüm arasındaki ısı akısı (W),
- k : Malzeme türüne bağlı ısı iletkenlik katsayısı (W/m·K),
- A : Isı iletiminin gerçekleştiği alan (m²),
- $\frac{dT}{dx}$: Sıcaklık gradyeni (K/m), yani iki düğüm arasındaki sıcaklık farkının mesafeye oranı.

Zamana bağlı yapı gereği, her bir zaman adımında sıcaklık değeri (4.46)'da gösterildiği üzere:

$$T(t) = T_0 + \Delta T(t) \quad (4.46)$$

şeklinde güncellenmektedir. Bu sayede model, sistemin dinamik karakterini gerçek zamanlı olarak yansıtabilmektedir.

İki düğüm arası mesafe d ve anlık sıcaklık farkı dikkate alındığında, belirli bir zaman adımındaki ısı akışı (4.47)'deki:

$$q(t) = \frac{k.A.(T_1(t)-T_2(t))}{d} \quad (4.47)$$

denklemine göre hesaplanır.

İletim sırasında oluşan kayıplar ise ortam koşulları ve yalıtım kalitesi gibi parametreleri temsil eden α katsayısı ile modellenir. Bu kayıp, (4.48)'de gösterildiği gibi,

$$L(t) = \alpha.q(t) \quad (4.48)$$

şeklinde. Bu doğrultuda, gerçek alıcıya ulaşan net ısı miktarı (4.49)'da belirtildiği üzere,

$$q_{net}(t) = q(t) - L(t) \quad (4.49)$$

olarak elde edilmekte ve her düğümün talep ettiği ısı miktarı ile karşılaştırılarak arz-talep dengelemesi (4.50)'deki denklemle gerçekleştirilmektedir:

$$\Delta D(t) = D_{talep}(t) - q_{net}(t) \quad (4.50)$$

Bu fiziksel yapı, sadece sistemin performansını izlemekle kalmaz, aynı zamanda Lyapunov optimizasyonunda sanal kuyruk güncellemelerine ve ADMM algoritmasındaki yerel alt problemlere doğrudan entegre edilir. Örneğin:

- Her düğümdeki sıcaklık verileri, Lyapunov fonksiyonunun türevinde enerji dengesizliği olarak kullanılır.
- Isı akışı, ADMM kısıtlarında coupling constraint olarak yer alır; bu sayede ısı dağıtımı ile enerji alışverişi arasındaki bağ kurulur.

Ek olarak, sistemdeki tüm enerji hatları ve depolama birimleri çevrim içi olarak izlenir. Bu veriler hem depolama kararlarını hem de fiyatlandırma stratejilerini belirlemede referans olarak kullanılır.

Sonuç olarak bu model:

- Isı kayıplarını dikkate alan termal gerçeklik temelli bir kontrol yapısı sağlar,

- ADMM ve Lyapunov karar mekanizmalarını fiziksel dünya ile entegre eder,
- Elektrik, gaz ve ısı bileşenlerinin birlikte değerlendirildiği bütüncül bir enerji yönetimi çerçevesi sunar.

Gelecekte, modelde tanımlanan termal dinamiklerin saha verileriyle doğrulanması ve benzetim ortamında test edilmesiyle, modelin fiziksel güvenilirliği daha da güçlendirilmesi planlanmaktadır.

4.4.2.3 Enerji Akış İzleme ve Düşümsel Maliyet Dağıtımı

ADMM tabanlı dağıtık karar mekanizması ve zamana bağlı ısı transfer modeli ile sistemde hem kararlar bireysel düzeyde alınabilmekte hem de fiziksel enerji dağılımı gerçek zamanlı şekilde izlenebilmektedir. Ancak bu enerji akışlarının kimden kime, hangi oranda ve hangi maliyetle aktarıldığı sorusu hâlâ önemini korumaktadır. Bu noktada devreye giren Akış İzleme Yöntemi, düğümler arasındaki enerji aktarımının mali yükünü doğru ve adil bir şekilde tahsis etmek amacıyla geliştirilmiştir.

Bu yöntem, prosümerler ile tüketiciler arasında gerçekleşen fiziksel enerji transferlerinin matematiksel olarak izlenmesini ve her tüketicinin aldığı enerjiye karşılık gelen maliyeti doğru biçimde hesaplamayı mümkün kılar. Sistem genelinde adil bir maliyet paylaşım mekanizması sunan bu yöntem, klasik sabit tarifeli düşümsel fiyatlandırma sistemlerinden daha hassas ve şeffaf sonuçlar üretir.

Modelin temelinde, üretici düğümlerden tüketici düğümlere aktarılan enerji miktarının, o düğümün talebiyle orantılı şekilde nasıl dağıtıldığını belirleyen formül (4.51)'de gösterildiği üzere,

$$F_{ij} = P_i \frac{d_{ij}}{\sum_j d_{ij}} \quad (4.51)$$

şeklindedir. Burada:

- F_{ij} : Düğüm i 'den düğüm j 'ye aktarılan enerji miktarıdır.
- P_i : Düğüm i 'de üretilen toplam enerji miktarını temsil eder.
- d_{ij} : Düğüm j 'nin düğüm i 'den aldığı enerji talebidir.
- $\sum_j d_{ij}$: Düğüm i 'den enerji alan tüm düğümlerin toplam talebidir.

Bu formül ile her tüketici, aldığı enerji oranına göre üreticilerden enerji tahsis edilmiş gibi değerlendirilir. Böylece maliyet dağılımı da enerji akış oranları dikkate alınarak yapılır.

Her bir tüketici düğüm j için toplam enerji maliyeti (4.52)'de gösterildiği şekilde hesaplanır:

$$C_j = \sum_i F_{ij} \lambda_i \quad (4.52)$$

Burada:

- C_j : Düğüm j 'nin toplam enerji maliyetini ifade eder.
- λ_i : Düğüm i 'deki üretimin marjinal maliyetidir.

Bu yapı ile elde edilen maliyet paylaşımı, yalnızca gerçek tüketim bazlı değil, aynı zamanda üreticilerin marjinal maliyetlerine duyarlı olacak şekilde şekillenir. Bu sayede sistem şeffaflaşır ve fiyatlandırma mekanizması piyasa koşullarına daha duyarlı hale gelir.

Bu yöntem ayrıca, ADMM tabanlı optimizasyon sürecine de entegre edilmiştir. ADMM algoritması prosümerlerin kararlarını küresel dengeye göre koordine ederken, akış izleme modeli de bu kararların sonucunda oluşan enerji transferlerini maliyetlendirme aşamasında devreye girer. Böylece optimizasyon çıktıları doğrudan ekonomik sonuçlara dönüştürülür.

Ayrıca, bu modelin zamana bağlı ısı transfer süreciyle de entegrasyonu mümkündür. Düğümler arası sıcaklık farkları ile birlikte kullanılan akış verileri, yalnızca elektrik değil, aynı zamanda ısı enerjisinin de kayıplar dâhil edilerek maliyetlendirilmesini sağlar. Bu, çok taşıyıcılı enerji sistemlerinde entegre planlama açısından büyük bir avantaj sunar.

Sonuç olarak, akış izleme yöntemi, enerji yönetiminde yalnızca fiziksel denge değil, aynı zamanda adil ekonomik dağılım sağlamak için geliştirilen etkili bir tekniktir. Sistem içerisinde hangi enerji kimin kaynağından gelmişse, o oranda maliyet paylaşımı yapılmasını garanti altına alır. Bu yöntem, Lyapunov ve ADMM gibi kontrol algoritmalarıyla bütünleşik çalışarak sistemin hem teknik hem ekonomik boyutlarını optimize eder. Aynı zamanda, düğümsel kararların adil maliyet dağılımı ile desteklenmesini sağlayarak merkeziyetsiz yapının sürdürülebilirliğini güçlendirir.

4.4.2.4 Enerji Akış İzleme ve Döğümsel Maliyet Dağılımının Nash Pazarlığı ile Entegrasyonu

Enerji sistemlerinde üretici ve tüketici prosümerler arasında gerçekleşen enerji alışverişlerinin sadece teknik olarak değil, aynı zamanda ekonomik açıdan da adil ve optimize şekilde gerçekleşmesi beklenir. ADMM tabanlı dağıtık karar mekanizması ve zamana bağılı ısı transfer modeli sayesinde, sistemde yalnızca bireysel düzeyde karar alma süreçleri değil, aynı zamanda fiziksel enerji dağılımının gerçek zamanlı izlenmesi ve ekonomik olarak maliyetlendirilmesi de mümkün hâle gelmiştir. Ancak bu sistemin sağlıklı ve adil biçimde sürdürülebilir olabilmesi için yalnızca enerji akışlarının izlenmesi yeterli değildir; bu akışların karşılığında oluşan maliyetlerin de sistem oyuncularları arasında adil ve stratejik bir biçimde paylaşılması gerekmektedir. Bu bağlamda, Nash Pazarlığı tabanlı fiyatlandırma yaklaşımı devreye girerek enerji ticaretinde üretici ve tüketici faydalarının eş zamanlı olarak maksimize edilmesini sağlamaktadır.

Bu bağlamda kullanılan Nash pazarlık modeli, tarafların bireysel faydalarını maksimize etmeye çalışırken, sistemdeki toplam sosyal refahın da artırılmasını hedefleyen kooperatif olmayan bir oyun teorisi yaklaşımıdır. Modelde, her bir üretici prosümer ve her bir tüketici prosümer olmak üzere iki taraflı bir enerji alışverişi süreci tanımlanır. Burada:

- $F_{ij}(t)$: Zaman t 'de üretici i 'den tüketici j 'ye aktarılan enerji miktarı (kWh),
- $P_i(t)$: Üretici i 'nin zaman t 'deki üretim kapasitesi (kWh),
- $D_j(t)$: Tüketici j 'nin zaman t 'deki enerji talebi (kWh),
- $\lambda_i(t)$: Üretici i 'nin marjinal enerji fiyatı (₺/kWh).

Enerji akışlarının geçerliliği için aşağıdaki sistem kısıtları uygulanır:

$$\sum_{i=1}^m F_{ij}(t) = D_j(t), \forall j \quad (\text{Talep Karşılama Kısıtı})$$

$$\sum_{j=1}^n F_{ij}(t) \leq P_i(t), \forall i \quad (\text{Üretim Kapasite Sınırı})$$

$$\lambda_i \geq 0, \forall i \quad (\text{Pozitif Fiyat Koşulu})$$

Tüm bu koşulları sağlayan denge fiyatı, aşağıdaki çok taraflı Nash maksimizasyon problemi olarak ifade edilir ve (4.53)'te gösterildiği üzere,

$$\lambda^* = \arg \max \prod_{i=1}^m (U_i - R_i) \times \prod_{j=1}^n (V_j - C_j) \quad (4.53)$$

şeklinde elde edilir. Burada:

- m : Prosümer sayısı,
- n : Tüketici sayısı,
- $U_i = \lambda_i(t) \cdot \sum_{j=1}^n F_{ij}(t)$: Üretici i 'nin elde ettiği toplam gelir,
- R_i : Üretici i 'nin minimum kabul edilebilir maliyeti (Rezervasyon değeri),
- $C_j = \lambda_j(t) \cdot \sum_{i=1}^m F_{ij}(t)$: Tüketici j 'nin toplam enerji maliyeti,
- B_j : Tüketici j 'nin enerjiye atfettiği toplam değer,
- $V_j = B_j - C_j$: Tüketici j 'nin net faydası,

Çözümün geçerliliği için (4.54) ve (4.55)'te yer alan rasyonel koşullar sağlanmalıdır:

$$U_i - R_i \geq 0, \quad \forall i \quad (4.54)$$

$$V_j - C_j \geq 0, \quad \forall j \quad (4.55)$$

Bu yapı sayesinde, sistemdeki her üretici ve tüketici, kendi maliyet ve fayda dengesi doğrultusunda optimum bir fiyatta buluşur. Nash yaklaşımı, klasik tek taraflı fiyatlama modellerine göre çok taraflı fayda dengesi kurduğu için özellikle P2P enerji ticaretinde adil bir piyasa yapısının oluşturulmasına katkı sunmaktadır. Nash çözümünün ADMM algoritmasıyla elde edilen enerji akışlarıyla entegre edilmesi sayesinde, karar değişkenleriyle fiziksel enerji aktarımı arasında tam bir eşleşme sağlanır; bu da hem teknik hem ekonomik sürdürülebilirliği garanti eder.

4.5 Blockchain Tabanlı Ödeme Metodolojisi

Elektrik, gaz ve ısı gibi çoklu enerji kaynaklarının ticaretine dayalı önerilen sistemde, enerji paylaşımı yalnızca üretim, tüketim ve fiyatlandırma kararlarının verilmesiyle sınırlı değildir. Gerçekleşen bu enerji alışverişlerinin sonunda ödeme süreçlerinin de aynı derecede güvenli, şeffaf ve sürdürülebilir şekilde yürütülmesi gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda, blokzincir tabanlı ödeme yapısı sisteme entegre edilmiştir. Merkeziyetsiz işlem altyapısı, önceden tanımlı kurallara dayalı otomatik yürütülen işlem mantığı sayesinde, ödeme ve ödüllendirme süreçlerinin kontrolsüz ortamlarda dahi güvenli ve izlenebilir biçimde gerçekleşmesini sağlar.

Blokzincir tabanlı sistemde, enerji alışverişleri sonrası oluşan ekonomik ilişkiler zincir üzerinde kriptografik olarak kaydedilir ve tüm taraflarca doğrulanabilir hâle gelir. Her bir enerji iletim görevi, sistemdeki bir gönderici prosümer tarafından ilan edilir ve başarılı iletimi sağlayacak iş birlikçi düğümlere, bu görev karşılığında teşvik edici ödüller verilmesi planlanır. Sistemdeki ara düğümler katkı düzeylerine göre değerlendirilir. Enerji veya bilgi akışının başarıyla hedef noktaya ulaşmasını sağlayan pozitif iş birlikçi düğümler, sistem tarafından ödüllendirilirken; sürece dahil olup başarılı teslimat gerçekleştiremeyen negatif iş birlikçi düğümler ödül almamaktadır. Bu ayırım, yalnızca teknik başarıya değil, sistem güvenliği ve motivasyon yapısına da katkı sunmaktadır.

İşleyiş süreci, gönderici prosümerin bir iletim görevini blokzincir ağı üzerinde ilan etmesi ve bunun için güvenlik teminatı yatırması ile başlar. Bu görev, rastlantısal ağ yolları üzerinden bir veya birden fazla iş birlikçi düğüm tarafından gerçekleştirilir. Hedef prosümer enerji iletimini doğruladığında, katkı sağlayan düğümler sistem tarafından otomatik olarak ödüllendirilir. Sürecin başlangıcında tek bir ara düğüm varsayımı ile modellenen yapı, daha sonra birden fazla düğümün eş zamanlı katkı sağladığı senaryoları da kapsayacak biçimde genişletilmiştir. Bu sayede, ağ esnekliği ve veri/enerji taşıma güvenliği artırılmış; merkezi otoriteye ihtiyaç duyulmadan işlem güvenliği sağlanmıştır.

Blokzincir tabanlı bu mekanizma, önerilen yapının diğer bileşenleriyle birlikte bütüncül olarak çalışmaktadır. Lyapunov optimizasyonu sistemin anlık enerji kararlılığını ve bireysel kararların maliyetini dengelemek için kullanılırken; ADMM algoritması dağıtık karar yapılarının sistem genelinde koordine edilmesini

sağlar. Bu yapıların üzerine inşa edilen zamana bağlı ısı iletim modeli, sistemin fiziksel düzlemde doğruluğunu teminat altına alırken; Nash temelli fiyatlandırma yaklaşımı üretici ve tüketici faydaları arasında stratejik ve adil bir ekonomik denge kurmaktadır. Blokzincir yapısı ise bu teknik ve ekonomik kararların somut ve güvenli bir ödeme sürecine dönüşmesini garanti etmektedir. Böylece yalnızca enerji üretim ve paylaşımı değil, aynı zamanda ödeme ve teşvik süreçleri de merkeziyetsiz, şeffaf ve denetlenebilir bir çerçeveye oturtulmuştur.

Sonuç olarak blokzincir tabanlı bu ödeme sistemi, P2P temelli enerji ticareti uygulamalarında yalnızca teknik değil, ekonomik güvenilirlik ve sosyal kabulleniş açısından da sistemi güçlendiren tamamlayıcı bir unsur olarak konumlanmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, önerilen modelin sürdürülebilirliği teknik, ekonomik ve dijital güvenlik boyutlarında eş zamanlı olarak temin edilmektedir.

4.5.1 Tek Bir Pozitif İş Birlikçi Birim

Bir mesaj m 'nin gönderici A 'dan alıcı E 'ye gönderildiği varsayalım. Gönderici A ile alıcı E arasında yalnızca bir tane yineleyici düğüm B bulunmaktadır. Düğüm i için genel/özel anahtar çifti PK_i, SK_i ile gösterilsin, burada PK_i genel anahtar ve SK_i özel anahtar olup, $E()$ şifreleme fonksiyonunu, $H()$ hash fonksiyonunu ve $Sig()$ imzalama fonksiyonunu temsil eder. Ödeme süreci aşağıdaki gibi tanımlanır:

4.5.1.1 İletim Görevinin Yayınlanması

Düğüm A , şifrelenmiş değeri yayınlar. Bu değer, (4.56)'da gösterildiği üzere,

$$h_1 = E_{PK_A}(R_1) \quad (4.56)$$

şeklindedir. Burada R_1 , gönderici A tarafından üretilen rastgele bir sayıdır (nonce). Rastgele sayı R_1 , her iletimin benzersiz olmasını sağlar ve tekrar saldırılarını engeller. R_1 'in A 'nın genel anahtarıyla şifrelenmesiyle, bu adım yalnızca hedef alıcı (veya yetkilendirilmiş bir ara bağlayıcı) tarafından R_1 'in gerçek değerine daha sonra erişilebileceğini garanti eder.

Düğüm A , başka bir rastgele sayı olan R_2 'nin hash'ini de yayınlar. Bu değer, (4.57)'deki gibi,

$$h_2 = H(R_2) \quad (4.57)$$

şeklindedir. R_2 gizli tutulur. Hash fonksiyonu $H()$, R_2 'nin bütünlüğünü sağlar; R_2 'ye yapılacak herhangi bir müdahale, farklı bir hash değeri oluşturur ve bu değişiklik tespit edilebilir hale gelir. Bu adım, R_2 'nin gizli kalmasını ancak ilgili taraflar tarafından doğrulanabilir olmasını garanti eder.

Düğüm A , ardından $Deposit_A$ adı verilen bir işlemle fonları yatırır ve bu, eğer düğüm B veriyi alıcı E 'ye başarıyla iletirse, düğüm B 'ye ödeme yapılacağını garanti eder.

4.5.1.2 Veri İletimi

Düğüm A , mesaj m 'yi ve şifrelenmiş rastgele sayı R_2 'yi düğüm B 'ye iletir. Bu işlem, (4.58)'de gösterildiği üzere,

$$m || E_{PK_E}(R_2) || \sigma || Sig_{SK_A}(R_1) \quad (4.58)$$

şeklinde gerçekleşir. Burada:

- m , iletilen mesajdır,
- $E_{PK_E}(R_2)$, R_2 'nin alıcı E 'nin genel anahtarıyla şifrelenmesidir ve yalnızca E 'nin bunu çözebileceğini garanti eder,
- σ , mesajın ve R_2 'nin hash'i üzerindeki dijital imzadır ve iletilen verinin bütünlüğünü doğrular,
- $Sig_{SK_A}(R_1)$, gönderici A 'nın R_1 üzerindeki imzasıdır ve mesajın doğruluğunu onaylar.

Bu şifreleme ve imzalama sürecinin amacı, hem mesajın hem de rastgele sayıların iletim sırasında müdahale edilmediğini garanti etmek ve verilerin gönderici A 'dan geldiğini ve alıcı E 'ye yönlendirildiğini kanıtlamaktır.

Düğüm A ayrıca, $Payment_{B \rightarrow E}$ işlemini blockchain ağına doğrulama için yayınlar. Bu adım, işlemin blockchain üzerinde kaydedilmesini ve doğrulanmasını sağlar, bu da verilerin başarılı bir şekilde iletilmesi için yineleyici düğüm B 'ye ödeme yapılacağı anlaşmasını onaylar.

Alıcı E mesajı aldıktan sonra, düğüm B , $Payment_{A \rightarrow B}$ işlemini oluşturur ve blockchain ağına yayınlar. Bu, düğüm B 'nin mesajı E 'ye başarıyla ilettiğini onaylar. Mesajı aldıktan sonra, alıcı E , σ imzasının geçerliliğini kontrol eder ve düğüm B 'nin

genel anahtarını kullanarak imzalı bir onay geri gönderir. Bu onay, (4.59)'da gösterildiği üzere,

$$E_{PK_E}(Sig_{SK_E}(ACK_E)) \quad (4.59)$$

şeklindedir. Burada ACK_E , verinin başarılı bir şekilde alındığını onaylayan onay mesajıdır. Bu onay, gizliliği ve doğruluğu sağlamak amacıyla B 'nin genel anahtarıyla şifrelenir. Blockchain, $Payment_{A \rightarrow B}$ ve $Payment_{B \rightarrow E}$ işlemlerinin, madenciler tarafından onaylanana kadar gerçekleştirilmemesini sağlar, böylece dolandırıcılık veya erken ödemeler engellenmiş olur.

4.5.1.3 Ödemelerin Alınması

Madencilerin ödülleri alabilmesi için B ve E , aşağıdaki bilgileri madencilere sağlar. Bu bilgiler, (4.60)'ta gösterildiği üzere,

$$E_{PK_B}(ACK_E), E_{PK_B}(R_1), \{R_2, E_{PK_E}(ACK_E)\} \quad (4.60)$$

şeklindedir. Madenciler, ardından aşağıdaki koşulları doğrulayarak işlemleri onaylar:

- $H(R_2) = h_2$, rastgele sayı R_2 'nin doğru bir şekilde iletildiğini ve yayınlanan hash değeriyle eşleştiğini garanti eder. Bu doğrulama, R_2 'nin bütünlüğünü açığa çıkarmadan onaylar.
- $E_{PK_B}(h_1) = E_{PK_A}(E_{PK_B}(R_1))$, düğüm B 'nin R_1 'i doğru şekilde alıp ilettiğini garanti eder. Bu, R_1 'in gönderici A ile ara düğüm B arasındaki güvenli iletimini doğrular.
- $E_{PK_B}(E_{PK_E}(ACK_E)) = E_{PK_E}(E_{PK_B}(ACK_E))$, onay mesajının doğruluğunu ve bütünlüğünü onaylar, alıcı E 'nin veriyi başarıyla aldığını garanti eder.

Koşulların tamamı yerine getirilmişse, madenciler $Payment_{A \rightarrow B}$ ve $Payment_{B \rightarrow E}$ işlemlerini işleme alır.

4.5.2 Birden Fazla Pozitif İş Birlikçi Birim

Pozitif işbirlikçi düğümler B, C ve D 'nin, gönderici A 'ya mesaj m 'yi alıcı E 'ye iletmesinde yardımcı olduğu varsayılınsın. Ödeme süreci aşağıda daha ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

4.5.2.1 İletim Görevinin Yayınlanması

Gönderici A , alıcı E 'ye bir iletim görevi bildirir, bu görev $A \rightarrow E: m$ olarak belirtilir, ve gizli tutulması gereken iki rastgele değer, R_1 ve R_2 üretir. Bu rastgele sayılar, şifreleme ve kimlik doğrulama süreçlerinde önemli roller üstlenir. R_1 'in amacı, A 'nın talebi için bir imza sağlamaktır, böylece veri bütünlüğü korunur ve müdahale engellenir. Benzer şekilde, R_2 , E tarafından alınan verinin doğruluğunu doğrulamak ve yetkisiz herhangi bir değişikliğin yapılmadığını temin etmek için kullanılır.

Sonraki adımda, A , mesajın alıcı E 'ye başarıyla iletilmesi durumunda, veri iletiminde olumlu katkı sağlayan işbirlikçi düğümler (B , C ve D) için teşviklerin ödüllendirileceğini garanti eden bir depozit oluşturur. Eğer mesaj başarıyla iletilmezse, A depozitosunu geri alacaktır.

4.5.2.2 Veri İletimi

A 'dan E 'ye veri iletim süreci şu şekilde açıklanmıştır.

$m || E_{PK_E}(R_2) || \sigma_{Sig_{SK_A}}(R_1)$ mesajını göndererek $Payment_{A \rightarrow B}$ işlemini oluşturur. Mesaj, R_2 rastgele sayısının şifrelenmiş halini ve A 'nın SK_A anahtarıyla imzalanmış R_1 rastgele sayısının imzasını içerir; böylece veri bütünlüğü ve kimlik doğrulama sağlanır. Daha sonra B , C ve D , A 'ya bu mesajı alıcı E 'ye iletme konusunda yardımcı olur ve sırasıyla $Payment_{B \rightarrow C}$, $Payment_{C \rightarrow D}$ ve $Payment_{D \rightarrow E}$ işlemlerini oluşturur. Şifrelenmiş ve imzalanmış bir teyit mesajı, sırasıyla B , C ve D 'ye geri gönderilir. Şu noktaya dikkat edilmesi önemlidir: Aşağıdaki işlemler, fonların transfer edilmeyeceğini, yalnızca madenciler tarafından doğrulandıktan sonra transfer edileceğini taahhüt eder: $Payment_{A \rightarrow B}$, $Payment_{B \rightarrow C}$, $Payment_{C \rightarrow D}$, and $Payment_{D \rightarrow E}$.

4.5.2.3 Ödemelerin Alınması

Alıcı E veriyi başarıyla aldıktan sonra, madencilere, verinin iletimine olumlu katkılarından dolayı her bir iş birliği yapan düğümün katılım kanıtı sağlanmalıdır. Her düğüm doğrulama için aşağıdaki verileri sunar:

- Düğüm B şu verileri sağlar:

$$\{E_{PK_B}(R_1), E_{PK_B}(ACK_C), PK_A, PK_C\}$$

- Düğüm C şu verileri sağlar:

$$\{E_{PK_C}(ACK_C), E_{PK_C}(ACK_D), PK_D\}$$

- Düğüm D şu verileri sağlar:

$$\{E_{PK_D}(ACK_D), E_{PK_D}(ACK_E), PK_E\}$$

- Düğüm E şu verileri sağlar:

$$\{R_2, E_{PK_E}(ACK_E)\}$$

İşlemlerin geçerli kabul edilebilmesi için aşağıdaki koşulların sağlanması gerekmektedir:

- E tarafından R_2 'nin doğrulanması: $H(R_2) = h_2$

E tarafından sağlanan R_2 rastgele sayısı, h_2 hash değeriyle eşleşmeli ve böylece mesajın bütünlüğü ve doğruluğu sağlanmalıdır.

- A 'dan E 'ye rota keşfi:

A 'dan E 'ye olan işlem zinciri izlenerek, mesajın rotası doğrulanabilir hale getirilmelidir.

- B tarafından R_1 'in doğrulanması: $E_{PK_B}(h_1) = E_{PK_A}(E_{PK_B}(R_1))$

Düğüm B , bu denklemi kullanarak A tarafından sağlanan R_1 rastgele sayısının doğruluğunu ve düzgün bir şekilde iletildiğini doğrular.

- İmzalı onayların doğrulanması:

- Düğüm B için C 'den gelen imzalı onay şu şekilde doğrulanır:

$$E_{PK_B}(E_{PK_C}(ACK_C)) = E_{PK_C}(E_{PK_B}(ACK_C))$$

- Düğüm C için D 'den gelen imzalı onay şu şekilde doğrulanır:

$$E_{PK_C}(E_{PK_D}(ACK_D)) = E_{PK_D}(E_{PK_C}(ACK_D))$$

- Düğüm D için E 'den gelen imzalı onay şu şekilde doğrulanır:

$$E_{PK_D}(E_{PK_E}(ACK_E)) = E_{PK_E}(E_{PK_D}(ACK_E))$$

Bu doğrulamalar, imzalı onayların gerçekliğini ve her bir iş birliği yapan düğüm tarafından verinin başarılı bir şekilde iletildiğini garanti eder.

4.6 Q-learning Tabanlı Enerji Ticareti Yaklaşımı

Bu tezde kullanılan Q-learning algoritması, dinamik fiyatlandırma problemine çözüm getirmek amacıyla uygulanmıştır. Yöntem, takviyeli öğrenme algoritmalarından biri olan model-bağımsız Q-learning üzerine kuruludur. Algoritma, merkeziyetsiz kooperatif temelli enerji paylaşımı yapılan bir sistemde, enerji fiyatlarını öğrenerek zamanla en uygun ticaret stratejisini geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Karar verici ajan (kooperatif yönetimi), çevre ile etkileşim kurarak her zaman adımında bir eylem (alış-satış fiyatları: λ_b, λ_s) uygular, sistemin tepkisini (ödül) gözlemler ve bu bilgiyle öğrenme tablosunu günceller. Bu süreç, zaman içinde sistemin en fazla faydayı sağlayacak fiyat stratejisini öğrenmesini mümkün kılar.

Sistem, ayrık ve sonlu durumlara sahip bir Markov Karar Süreci (MDP) olarak modellenmiştir. Her durumda (örneğin topluluk net yük durumu, batarya SoC, günün saat dilimi), kooperatif belirli bir fiyat çiftini seçerek ödül fonksiyonuna göre değerlendirme alır. Bu ödül, kooperatifin elde ettiği toplam ekonomik kazancı ve enerji dengesini yansıtır.

Uygulanan Q-learning süreci; durum, eylem, ödül üçlüsü çerçevesinde, aşağıdaki güncelleme kuralına göre işlemektedir:

Durum Uzayı (State Space-S): Her t zaman adımında sistem durumu s_t , (4.61)'de gösterildiği gibi aşağıdaki bileşenlerle tanımlanır:

$$s_t = E_{bat}(t), D(t), \lambda^{grid}(t) \quad (4.61)$$

Burada:

- $E_{bat}(t)$: Prosumerin batarya enerji seviyesi,
- $D(t)$: O andaki enerji talebi,
- $\lambda^{grid}(t)$: Şebeke enerji fiyatı.

Eylem Uzayı (Action Space-A): Her zaman adımında alınabilecek eylem a_t , aşağıdakilerden birini kapsar:

- Şebekeden veya diğer prosumerlerden elektrik satın almak,
- Fazla enerjiyi satmak,

- Enerjiyi bataryada depolamak.

Tüm eylemler, hesaplama kolaylığı sağlamak adına ayrık hale getirilmiştir.

Ödül Fonksiyonu (Reward Function-R): Her zaman adımındaki ödül r_t , sistem kararlılığı ile ekonomik kazanç arasında bir denge kurar ve (4.62)'de gösterildiği üzere,

$$r_t = \lambda^{sell}(t).P^{sell}(t) - \lambda^{buy}(t).P^{buy}(t) - C(E_{bat}(t)) - \beta.gridviolation(t) \quad (4.62)$$

şeklinde hesaplanır. Burada:

- $\lambda^{sell}(t), \lambda^{buy}(t)$: Satış ve alış fiyatları,
- $P^{sell}(t), P^{buy}(t)$: Satılan ve alınan enerji miktarları,
- $C_{bat}(E_{bat}(t))$: Batarya kullanım maliyeti,
- β : Şebeke ihlali için ceza katsayısı.

Q-Değeri Güncelleme Kuralı: Q-learning algoritması, Q-değerlerini (4.63)'te gösterildiği gibi güncelleme kuralıyla iteratif olarak günceller:

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha \left[r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t) \right] \quad (4.63)$$

Burada:

- α : Öğrenme oranı (learning rate),
- γ : İskonto faktörü (discount factor),
- r_{t+1} : Bir sonraki zaman adımındaki ödül.

Keşif ve Sömürü Dengesi (Exploration vs. Exploitation): Bu çalışmada ϵ -greedy stratejisi benimsenmiştir. Her zaman adımında eylem, (4.64)'te gösterildiği gibi,

$$a_t = \begin{cases} rastgele eylem & \text{olasılık } \epsilon, \\ \arg \max_a Q(s_t, a), & \text{olasılık } 1 - \epsilon. \end{cases} \quad (4.64)$$

şeklinde seçilir. ϵ , zamanla azaltılarak keşiften sömürüye geçiş sağlanmaktadır.

Uygulama ve Değerlendirme: Q-learning algoritması, her bir prosümer için yukarıda tanımlanan yapı doğrultusunda uygulanmış ve önerilen model ile

karşılaştırılarak performansı analiz edilmiştir. Simülasyon ortamında aynı zaman dilimi, kullanıcı sayısı ve piyasa koşulları altında yapılan karşılaştırmalar, önerilen modelin yalnızca enerji dengelemesi açısından değil, işlem verimliliği ve maliyet açısından da Q-learning algoritmasına kıyasla daha yüksek performans sergilediğini ortaya koymuştur.



5

DENEME SONUÇLARI

Bu bölüm, önerilen çalışma planının performans değerlendirmesini ve deneysel analizini sunmaktadır. Bölüm, bir simülasyon çalışması ve karşılaştırmalı analiz olmak üzere iki alt bölüme ayrılmıştır.

5.1 Simülasyon Çalışması

Önerilen çalışma tekniği, Matlab R2023b ağ simülatörü kullanılarak simüle edilmiştir. Bu simülatör, verimli bir ağ topolojisi sağlamakta ve önerilen tekniğin uygulanması için gerekli tüm fonksiyonları içermektedir. Çalışmada kullanılan sistemin teknik özellikleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Sistem özellikleri

Yazılım Özellikleri	İşletim sistemi	Windows-10 (64-bit)
	Ağ simülatörü	Matlab-R2023b
Donanım Özellikleri	RAM	4GB
	Hard Disk	500GB

5.2 Simülasyon Verilerinin Oluşturulması

Bu çalışmada kullanılan ısıtma gücü ve elektrik talebi profilleri, enerji sistemlerinin zamana bağlı dinamiklerini yansıtabilmek amacıyla sentetik veri setleri üzerinden oluşturulmuştur. Bu sentetik veriler, enerji talep eğrilerinde sıkça rastlanan periyodik değişimlerin karakterize edilmesi amacıyla sinüzoidal fonksiyonlar temel alınarak yapılandırılmıştır. Söz konusu modeller, sabah ve akşam saatlerinde

görülen talep zirveleri ile öğle saatlerinde ortaya çıkan üretim fazlası gibi tipik yük davranışlarını temsil etmektedir.

Bu yaklaşım, sistemin zaman içindeki değişkenliğine karşı geliştirilen kontrol algoritmalarının performansını kıyaslamak için uygun bir test ortamı sunmakta ve farklı senaryoların analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Literatürde de sıkça başvurulan bu yöntem, özellikle yüksek zaman çözünürlüğü gerektiren simülasyon çalışmaları için, kontrol mekanizmalarının duyarlılığını test edebilmek adına tercih edilmektedir.

Ancak bu modelleme, doğrudan bir saha ölçüm verisine dayanmak yerine, enerji sistemlerinin davranışlarını simüle etmek amacıyla oluşturulmuş temsil edici bir model niteliğindedir. Bu bağlamda, kullanılan sinüzoidal profiller gerçek veriye birebir karşılık gelmemekle birlikte, sistem performans analizlerinde karşılaştırılabilir ve kontrol edilebilir bir analiz çerçevesi sağlamaktadır.

Gelecek çalışmalarda, bu yaklaşımın metodolojik tutarlılığını daha da güçlendirmek amacıyla, TEİAŞ, Avrupa Enerji Ajansı veya benzeri kurumlar tarafından yayımlanan gerçek zamanlı yük profilleri ile modelin çapraz doğrulaması yapılacaktır; sinüzoidal temelli analizlerle elde edilen performans çıktıları gerçek veriler ışığında değerlendirilerek modelin sahaya uyarlanabilirliği test edilecektir.

5.3 Karşılaştırmalı Analiz

Bu alt bölüm, önerilen tekniği performansını değerlendirmek amacıyla P2P piyasa modeli [65], P2P çoklu enerji pazar yöntemi [66] ve enerji ticareti [67] gibi çeşitli mevcut yaklaşımlarla karşılaştırmaktadır. Doğrulama süreci, zaman (saat), ısıtma gücü (kW), elektrik talebi (MWh), depolama maliyeti (CNY), enerji depolama (kWh), enerji ticaret hacmi, toplam enerji (kWh) ve milisaniye (ms) başına hesaplanan toplam maliyet gibi performans metriklerinin değerlendirilmesini içermektedir.

5.3.1 Zaman ve Isıtma Gücü İlişkisi

Denklem (5.1), gün içerisindeki saatleri temsil eden zaman (t) ile ısıtma amaçlı tüketilen enerjiye karşılık gelen ısıtma gücü (kW) arasındaki ilişkiyi

modellemektedir. Isıtma talebi sabah ve akşam saatlerinde zirve yaparken, güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları öğle saatlerinde maksimum seviyesine ulaşmaktadır. Denklem şu şekilde ifade edilmektedir:

$$P_{net}(t) = \left(A \sin \left(\frac{2\pi}{24} (t - t_0) \right) + B \right) - \left(C \sin \left(\frac{2\pi}{24} (t - t_1) \right) \max \left(0, \cos \left(\frac{2\pi}{24} (t - t_2) \right) \right) \right) \quad (5.1)$$

Tablo 5.2 Zaman ve ısıtma gücü arasındaki ilişkinin gösterimi

Zaman(h)	Isıtma gücü (kW)		
	P2P piyasa modeli	Q-learning algoritması	Önerilen model
4	7	8	10
8	20	24	25
12	6	7	6
16	16	18	20
20	19	20	21
24	8	10	12

A , B ve C parametreleri, gün boyunca ısıtma talebindeki değişimlerin büyüklüğünü karakterize etmektedir. A , dalgalanmaların genliğini temsil ederken, B sabah ve akşam zirve dönemlerindeki temel talebi ifade etmekte ve C günlük enerji tüketim düzenlerini modellemektedir. Zaman kaymaları olan t_0 , t_1 ve t_2 sırasıyla sabah talebinin başlangıcını, akşam zirve talebini ve gece düşük talep dönemini temsil etmektedir. $\max \left(0, \cos \left(\frac{2\pi}{24} (t - t_2) \right) \right)$ ifadesi, yalnızca pozitif ısıtma talebinin dikkate alınmasını sağlayarak negatif enerji tüketimi olasılığını ortadan kaldırır. Bu model, enerji talebinin döngüsel doğasını yakalayıp sistemlerin ısıtma ihtiyaçlarındaki dalgalanmalara esnek ve verimli bir şekilde yanıt vermesini mümkün kılmaktadır.

Bu çalışmada, ısıtma gücü talebini modelleyen Denklem (5.1) içinde yer alan A , B ve C parametreleri, literatürde benzer enerji sistemleri için yaygın olarak kullanılan

sezgisel değerler ile belirlenmiş olup, sabah ve akşam saatlerinde gözlemlenen yüklenme eğilimlerini yansıtmağ üzere tasarlanmıştır.

Parametrelerin değerleri, sentetik verilerle oluşturulan yk profiline uygunluk sağlayacak şekilde normalize edilmiş ve modelin temel davranışlarını bozmadan, gerçek dünya koşullarını temsil edebilecek seviyelerde seçilmiştir. Ayrıca, model davranışının bu parametrelere karşı duyarlılığı, farklı A, B ve C değerleri için yapılan senaryo analizleri ile test edilmiştir. Bu analizlerde, genlik ve zaman kaymalarındaki $\pm 20\%$ 'lik değişimlerin sistemin genel eğilimlerini bozmadığı, ancak tepki büyüklüğünde lineer ölçekli sapmalara yol atığı gözlemlenmiştir.

Bu durum, modelin belirli bir sağlamlık aralığı içerisinde esnek çalışabildiğini ve karar mekanizmalarının parametre hassasiyetine karşı aşırı duyarlı olmadığını göstermektedir. Dolayısıyla, kullanılan parametreler hem mevcut teorik altyapıya hem de sezgisel piyasa koşullarına uygun olarak belirlenmiş olup, modelin kararlılığını ve uygulanabilirliğini tehlikeye atmamaktadır.

Önerilen sistemde, prosümerlerin enerji üretimi veya yük talebine ilişkin istatistiksel verilere ihtiyaç duyulmamaktadır. Bunun yerine, her prosümer için belirlenen kontrol vektörleri, o prosümerin enerji arz ve tüketim durumuna bağlı olarak her zaman diliminde dinamik olarak güncellenmektedir. Bu sayede, hem esnek hem de ölçeklenebilir bir yapı oluşturulmakta, enerji ticaret süreçleri en verimli şekilde optimize edilmektedir.

Önerilen model, P2P piyasa modeli ve Q-learning algoritması ile karşılaştırıldığında, enerji dağıtımında daha dengeli ve verimli bir performans sergilemektedir. Özellikle 08:00 ve 20:00 saatlerinde, talep zirvelerine uyum sağlayarak aşırı yüklenmeleri önlemekte ve enerji arz-talep dengesini optimize etmektedir. Bu avantaj, modelin ısıtma gücünü zamana bağlı olarak esnek bir şekilde ayarlayabilmesi ve mevcut enerji kaynaklarını daha verimli kullanabilmesi sayesinde sağlanmaktadır. Geleneksel P2P piyasa modeli, enerji paylaşımını kullanıcılar arasında doğrudan sağlayarak dağıtımı optimize etmeye çalışırken, Q-learning algoritması geçmiş verilerden öğrenerek en uygun dağıtım stratejisini belirlemeye çalışmaktadır. Ancak bu yaklaşımlar, ani talep artışlarına karşı yeterince esnek yanıt verememekte ve bazı durumlarda enerji dengesizliklerine yol açabilmektedir.

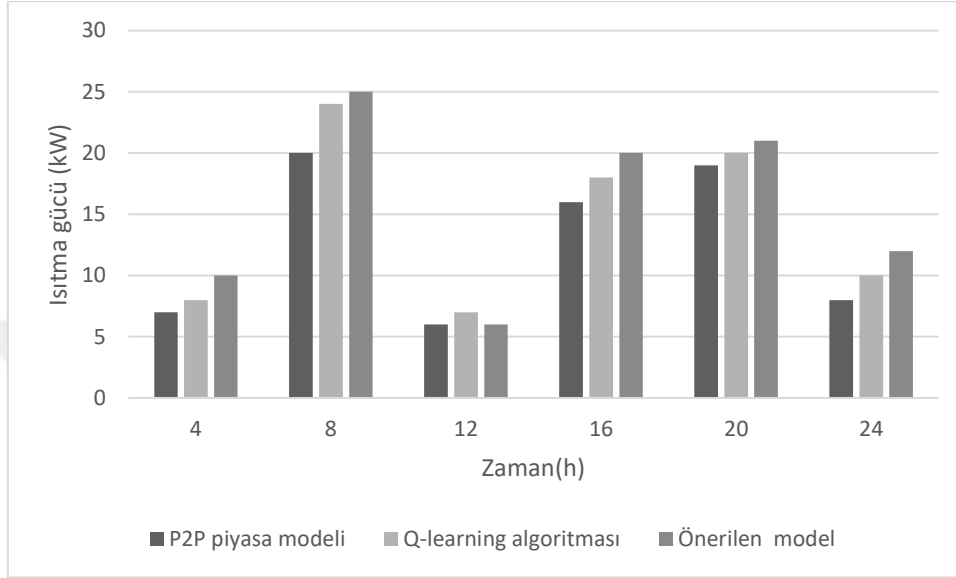
Önerilen model ise zaman değişkenine bağlı olarak ısıtma gücünü daha etkin bir şekilde tahsis ederek talep dalgalanmalarını dengeli bir şekilde yönetmektedir. Isıtma talebinin sabah ve akşam saatlerinde zirve yapması, özellikle merkezi enerji sistemlerinde yük dengesizliğine ve aşırı enerji tüketimine neden olabilmektedir. Önerilen model, bu saatlerde tüketim ihtiyaçlarını anlık olarak izleyerek ısıtma gücünü kontrollü bir şekilde artırmakta ve gereksiz enerji tüketimini en aza indirmektedir. Bu süreç, aşırı yüklenmenin önüne geçerek sistem bileşenlerinin daha dengeli çalışmasını sağlamakta ve aşırı enerji çekişi nedeniyle oluşabilecek kayıpları engellemektedir.

Enerji kayıplarının azalmasını sağlayan temel mekanizmalardan biri, önerilen modelin enerji üretimi ve tüketimi arasındaki senkronizasyonu artırmasıdır. Geleneksel yöntemlerde, talep dalgalanmaları anlık olarak karşılanmaya çalışıldığında, üretim fazlası veya yetersizliği nedeniyle iletim ve dağıtım hatlarında enerji kayıpları oluşabilmektedir. Önerilen model, anlık izleme tekniği ile tüketimi sürekli takip ederek ısıtma gücünü optimize etmekte, böylece enerji şebekesindeki aşırı yüklenmeleri ve dengesizlikleri azaltmaktadır. Özellikle, yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim profili göz önünde bulundurularak tüketim stratejileri geliştirildiğinde, yenilenebilir enerjinin doğrudan tüketilme oranı artmakta ve şebekeye geri beslenen enerji miktarı minimize edilmektedir. Bu durum, enerji depolama ihtiyacını azaltarak sistemin genel verimliliğini artırmaktadır.

Bunun yanı sıra, önerilen modelin enerji dağıtımındaki eşitsizlikleri azaltma yeteneği, tüketiciler arasında daha adil bir ısıtma gücü paylaşımı sağlamasıyla açıklanabilir. P2P piyasa modelinde, enerji paylaşımı bireyler arasında serbest piyasa koşullarına bağlı olarak gerçekleşmekte olup, bazı kullanıcılar yüksek talep saatlerinde yeterli enerjiye erişmekte zorlanabilmektedir. Q-learning tabanlı modelde ise, algoritma belirli bir optimizasyon hedefi doğrultusunda kararlar aldığı için, bazı kullanıcıların talebi yeterince karşılanamayabilmektedir. Önerilen model, talep eğilimlerini anlık olarak takip ederek kullanıcıların ihtiyaçlarını daha dengeli bir şekilde karşılamakta ve her tüketicinin enerjiye erişimini iyileştirmektedir.

Sonuç olarak, önerilen model, ısıtma gücünü zamana bağlı olarak optimize ederek aşırı yüklenmeleri önlemekte, enerji kayıplarını azaltmakta ve enerji dağıtımındaki eşitsizlikleri en aza indirmektedir. Yenilenebilir enerji üretimi ile tüketimi

arasındaki uyumu artırarak gereksiz enerji tüketimini önlemekte ve şebekeye olan yükü minimize etmektedir. Bu özellikleri sayesinde, P2P enerji ticaretinin gerçek zamanlı uygulamalarında daha güvenilir ve etkin bir çözüm sunarak mevcut yöntemlerin ötesine geçmekte ve enerji yönetimi alanında yeni bir perspektif ortaya koymaktadır.



Şekil 5.1 Zaman ve ısıtma gücü ilişkisi

5.3.2 Zaman ve Elektrik Talebi İlişkisi

Denklem (5.2), gün içerisindeki saatleri temsil eden Zaman (saat) ile belirli bir zamanda gereken güç miktarını ifade eden Enerji Talebi (MWh) arasındaki ilişkiyi modellemektedir. Genellikle, elektrik talebi gün boyunca dalgalanmakta olup, tüketim alışkanlıkları nedeniyle sabah ve akşam saatlerinde zirve yapmaktadır. Denklem şu şekilde ifade edilmektedir:

$$D(t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{24}(t - t_0)\right) + B \quad (5.2)$$

Tablo 5.3 Zaman ve elektrik talebi arasındaki ilişkinin gösterimi

Zaman(h)	Elektrik talebi (MWh)		
	P2P piyasa modeli	Q-learning algoritması	Önerilen model
4	5	4	3
8	8.2	9	9.9
12	3.9	4	4.2
16	6.6	7	7.5
20	7.9	8	8.5
24	1	2	2.5

Bu denklemde, $D(t)$, t anındaki enerji talebini (MWh cinsinden) temsil eder; t , gün içindeki saatleri ifade eder. A , enerji talebindeki dalgalanmaların büyüklüğünü belirleyen genliktir; t_0 , talebin zirve yaptığı zamanı (örneğin, sabah veya akşam saatlerini) temsil eden zaman kaymasıdır; ve B , enerji talebinin temel seviyesidir. Bu denklem, elektrik talebinin gün boyunca periyodik olarak değiştiğini, sabah ve akşam saatlerinde daha yüksek taleplerin olduğunu göstermektedir ve enerji kullanımındaki dalgalanmaları anlamaya yardımcı olarak enerji dağıtımını optimize etmek için kullanılır.

Grafik, önerilen modelin elektrik talebini yönetme konusunda P2P piyasa modeli ve Q-learning algoritmasına kıyasla daha üstün bir performans sergilediğini göstermektedir. Özellikle talebin yoğun olduğu 08:00 ve 20:00 saatlerinde, önerilen model enerji dağıtımını daha dengeli bir şekilde düzenleyerek, sistem üzerindeki yükü minimize etmekte ve aşırı talep nedeniyle oluşabilecek dengesizlikleri önlemektedir. Geleneksel P2P piyasa modelinde, arz ve talep doğrudan kullanıcılar arasında şekillendiğinden, ani talep artışları sırasında bazı kullanıcıların enerjiye erişimi kısıtlanabilmektedir. Benzer şekilde, Q-learning algoritması geçmiş verilerden öğrenerek optimizasyon sağlasa da, değişken talep koşullarına gerçek zamanlı olarak hızlı tepki verme kapasitesi sınırlı kalmaktadır. Önerilen model ise, prosümlerin enerji üretimi veya yük talebine ilişkin istatistiksel verilere ihtiyaç

duymamakta; bunun yerine, enerji arz ve tüketim durumuna bağılı olarak anlık takip yaparak dinamik kontrol vektörleriyle güncelleme gerçekleştirmektedir.

Özellikle 16:00 ile 20:00 arasındaki talep dalgalanmalarına hızlı bir şekilde uyum sağlama yeteneğı, önerilen modelin esnekliğini ve adaptif kontrol mekanizmalarını ortaya koymaktadır. Bu saatler, iş çıkış saatlerine denk geldiğinden evlerdeki elektrik talebi hızla artmakta, aynı zamanda ticari ve endüstriyel faaliyetlerin sona ermesiyle birlikte üretim kaynaklı enerji tüketimi azalmaktadır. Böyle bir durumda, şebekede dengesizlik oluşmaması için enerji dağıtım sisteminin dinamik bir şekilde tepki vermesi gerekmektedir. Önerilen model, enerji arz-talep dengesini sürekli izleyerek anlık değişimlere hızlı tepki vermekte ve bu doğrultuda sistemin kararlılığını artırmaktadır.

Enerji kayıplarını azaltma mekanizması açısından bakıldığında, önerilen modelin avantajı iki temel noktada öne çıkmaktadır:

➤ Şebeke içi kayıpların azaltılması

Elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtım sırasında hatlarda meydana gelen kayıplar, talebin ani dalgalanmalarına bağılı olarak artış göstermektedir. Yüksek talep saatlerinde enerji akışı belirli noktalarda yoğunlaşarak, hatlarda gerilim düşümlerine ve ısı kayıplarına neden olabilmektedir. Önerilen model, enerji talebini anlık olarak dengeleyerek aşırı yüklenmelerin önüne geçmekte, böylece enerji hatlarında oluşan kayıpları minimize etmektedir.

➤ Yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli entegrasyonu

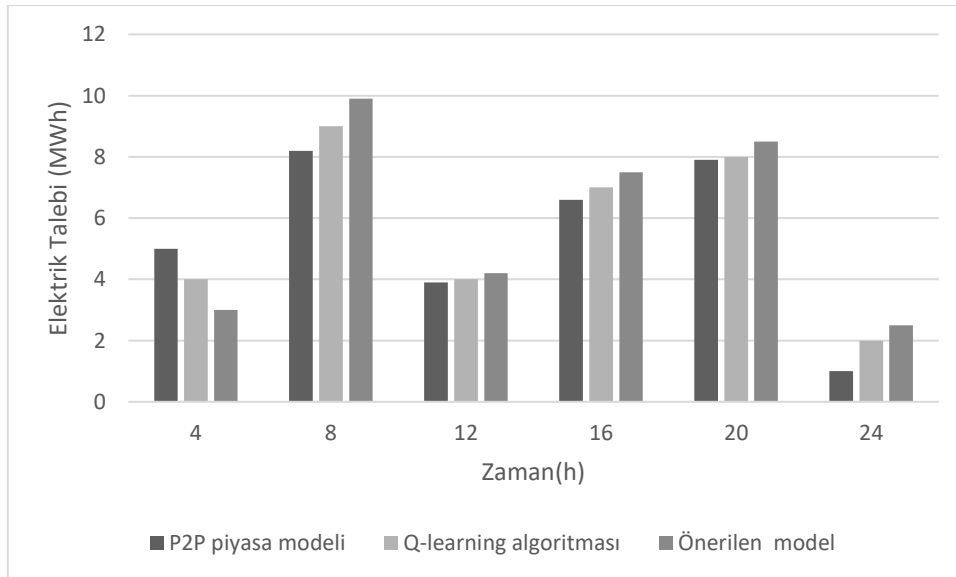
Gün içerisinde güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynakların üretim seviyeleri değişkenlik göstermektedir. Öğle saatlerinde maksimum seviyeye ulaşan üretim, akşam saatlerine doğru azalma eğilimindedir. Eğer bu üretim fazlası verimli bir şekilde tüketilemezse, enerji depolanmak zorunda kalmakta ya da şebekeye geri beslenerek kayıplara neden olmaktadır. Önerilen model, enerji talebini ve arzını daha iyi eşleştirerek, yenilenebilir kaynakların maksimum verimlilikle kullanılmasını sağlamak ve depolama ya da gereksiz geri besleme kaynaklı kayıpları azaltmaktadır.

Ayrıca, düşük talep saatlerinde (04:00 ve 24:00), önerilen modelin verimliliğı koruyarak gereksiz enerji tüketimini engellemesi de sistem performansına önemli bir katkı sağlamaktadır. Geleneksel sistemlerde, düşük talep saatlerinde enerji

üretimi sürekli olarak sabit bir seviyede tutulduğunda, kullanılmayan enerji boşa gitmekte veya maliyetli depolama çözümleri gerektirmektedir. Önerilen model, düşük talep dönemlerinde enerji üretimi ve tüketimini anlık verilerle dinamik olarak dengeleyerek, enerji israfını önlemekte ve böylece genel sistem verimliliğini artırmaktadır.

Son olarak, önerilen modelin kullanıcı memnuniyeti ve sürdürülebilirlik açısından sağladığı faydalar göz önüne alındığında, sistemin yalnızca teknik açıdan değil, aynı zamanda ekonomik ve çevresel boyutlarıyla da avantaj sağladığı görülmektedir. Talep dalgalanmalarına gerçek zamanlı yanıt verebilme yeteneği, tüketicilerin enerji ihtiyaçlarının daha istikrarlı bir şekilde karşılanmasını sağlamakta, böylece hem kesintisiz enerji arzı güvence altına alınmakta hem de fiyat dalgalanmalarının önüne geçilmektedir. Aynı zamanda, enerji kullanımındaki optimizasyon sayesinde karbon emisyonları azaltılmakta ve yenilenebilir kaynakların daha etkin bir şekilde değerlendirilmesi sağlanmaktadır.

Tüm bu özellikler, önerilen modeli yalnızca mevcut sistemlerden daha etkili bir alternatif haline getirmekle kalmamakta, aynı zamanda P2P enerji ticaretinin gerçek zamanlı ve büyük ölçekli uygulamalarında güvenilir ve sürdürülebilir bir çözüm olarak öne çıkarmaktadır.



Şekil 5.2 Zaman ve elektrik talebi ilişkisi

5.3.3 Zaman ve Depolama Fiyatı İlişkisi

Denklem (5.3), zaman ile depolama fiyatı arasındaki ilişkiyi modellemektedir. Burada Zaman (h), günü saat bazında temsil etmekte olup (0'dan 23'e kadar, 24 saatlik bir döngüyü kapsar), Depolama Fiyatı (CNY) ise birim başına enerji depolama maliyetini ifade etmektedir. Denklem, arz ve talep dinamiklerinden kaynaklanan günlük depolama maliyeti dalgalanmalarını dikkate almaktadır.

$$P(t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{24}(t - t_0)\right) + B \quad (5.3)$$

Burada A , fiyat dalgalanmalarının genliğini, t_0 , depolama fiyatının zirve yaptığı zamanı, ve B , ortalama temel fiyatı temsil etmektedir. Bu formülasyon, periyodik dalgalanmaları etkili bir şekilde yakalamakta ve enerji sistemlerinde maliyet yönetim stratejilerinin optimize edilmesine yönelik bilgiler sağlamaktadır.

Tablo 5.4 Zaman ile depolama fiyatı arasındaki ilişkinin gösterimi

Zaman(h)	Depolama fiyatı (CNY)		
	P2P piyasa modeli	Q-learning algoritması	Önerilen model
4	6.3	6.46	7.5
8	11	11.29	12.5
12	14.83	14.83	15
16	11.29	12	12.5
20	6.46	7	7.5
24	5.17	5.10	5

Önerilen model, enerji depolama kapasitesini ve depolama fiyatlarını optimize etme açısından P2P piyasa modeli ve Q-learning algoritmasına kıyasla daha üstün bir performans sergilemektedir. Enerji depolama sistemlerinde kapasitenin artırılması genellikle depolama maliyetlerinde bir yükselişe neden olmaktadır. Bunun sebebi, enerji depolama birimlerinin belirli bir kapasiteye kadar ekonomik olarak ölçeklenebilir olması, ancak belirli bir eşğin ötesinde artan yatırım maliyetleri ve

işletme giderleri nedeniyle fiyatların artış eğilimi göstermesidir. Ancak önerilen model, yalnızca depolama kapasitesini optimize etmekle kalmayıp, aynı zamanda depolama fiyatlarını da daha etkin bir şekilde yöneterek sistemin maliyet verimliliğini ve sürdürülebilirliğini desteklemektedir.

Özellikle düşük talep saatlerinde, yani enerji üretiminin tüketimi aştığı dönemlerde, depolama sistemlerinin etkin kullanımı büyük önem taşımaktadır. Saat 04:00 itibarıyla, P2P piyasa modelinde depolama fiyatı 6.3 CNY, Q-learning algoritmasında 6.46 CNY ve önerilen modelde 7.5 CNY olarak hesaplanmaktadır. Önerilen modelin fiyatı görece daha yüksek olsa da, bu durum enerji depolamanın daha yüksek kapasiteyle gerçekleştirilmesiyle açıklanabilir. Yani, model daha fazla enerji depolayarak ilerleyen saatlerde şebekeye olan bağımlılığı azaltmakta ve böylece gün içerisindeki enerji yönetimini daha verimli bir hale getirmektedir. Geleneksel P2P modeli ve Q-learning algoritması, düşük fiyatlarla enerji depolamakta ancak toplam depolama kapasitesini daha sınırlı tutmaktadır.

Gün ilerledikçe ve enerji talebi arttıkça, özellikle yüksek talep saatlerinde (örneğin 08:00 ve 20:00) depolama sistemlerinden enerji çekilmesi gerekmektedir. Bu noktada önerilen modelin sağladığı avantajlardan biri, önceki düşük talep saatlerinde daha fazla enerji depolanmış olmasıdır. Bu sayede, enerji piyasasındaki dalgalanmalardan bağımsız olarak, sistemin yüksek talep saatlerinde istikrarlı bir arz sunmasını mümkün kılmaktadır. Geleneksel sistemlerde depolama yetersiz kaldığında, talep artışına bağlı olarak şebekeden daha fazla enerji çekilmekte ve bu da fiyat artışlarına yol açmaktadır. Ancak önerilen model, bu tür fiyat dalgalanmalarını dengeleyerek tüketicilerin maliyetlerini minimize etmektedir.

Depolama fiyatları zaman içinde dalgalanma gösterirken, önerilen model bu dalgalanmaları daha iyi yöneterek sistemin ekonomik sürdürülebilirliğini artırmaktadır. Özellikle düşük talep dönemlerinde (örneğin 20:00'de), tüm modellerde depolama fiyatlarının düştüğü gözlemlenmektedir. Ancak, önerilen modelde fiyat diğer iki modele kıyasla hafifçe daha yüksek kalmaktadır. Bunun temel sebebi, modelin enerji depolamayı yalnızca maliyet odaklı bir süreç olarak görmemesi, aynı zamanda enerji arz-talep dengesini optimize edecek şekilde yönetmesidir.

Bu mekanizma dinamik fiyatlandırma yaklaşımıyla desteklenmektedir. Geleneksel P2P modellerinde fiyatlar doğrudan piyasa koşullarına bağlı olarak belirlenirken, önerilen modelde depolama fiyatlandırması sistemin gelecekteki enerji ihtiyacını ve piyasa eğilimlerini göz önünde bulundurarak optimize edilmektedir. Bu, depolama fiyatlarının ani düşüş veya yükseliş göstermesinin önüne geçerek, sistemin uzun vadeli istikrarını artırmaktadır.

Önerilen model, enerji kayıplarını azaltma konusunda da önemli bir avantaja sahiptir. Enerji depolama sistemleri doğru yönetilmediğinde, özellikle şebeke yükü dengesiz dağıldığında ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen fazla enerji verimli bir şekilde depolanamadığında kayıplar meydana gelmektedir. Örneğin, güneş enerjisi üretimi öğle saatlerinde maksimum seviyeye ulaşırken, talep bu saatlerde genellikle daha düşük olduğundan üretilen fazla enerji depolanamazsa şebekeye geri beslenmekte veya kullanılmadan kaybolmaktadır.

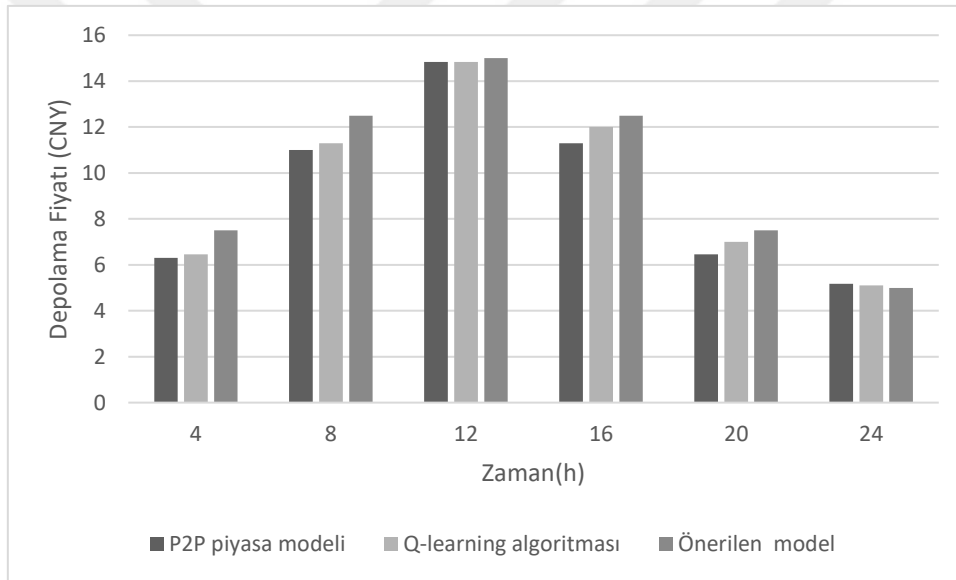
Önerilen model, yenilenebilir enerji üretimini depolama sistemleriyle entegre ederek bu kayıpları azaltmaktadır. Özellikle günün düşük talep saatlerinde daha fazla enerji depolamak, yüksek talep saatlerinde depolanan enerjiyi kullanarak şebekeye olan bağımlılığı azaltmakta ve böylece gereksiz enerji transferlerinden kaynaklanan kayıpları en aza indirmektedir. Geleneksel sistemlerde, özellikle P2P piyasa modelinde, enerji fazlası doğrudan şebekeye geri beslenmekte ve iletim kayıplarına yol açmaktadır. Ancak önerilen model, depolama kapasitelerini stratejik olarak kullanarak bu tür kayıpları minimize etmektedir.

Önerilen modelin önemli bir özelliği de ölçeklenebilirliği ve farklı büyüklükteki enerji sistemlerine uyarlanabilirliğidir. Geleneksel sistemlerde, depolama kapasitesinin artırılması belirli bir maliyet artışıyla birlikte gelir ve bu artış çoğu zaman sistemin uzun vadeli maliyet etkinliğini düşürür. Ancak önerilen model, dinamik fiyatlandırma ve depolama kapasitesinin optimizasyonu sayesinde büyük ölçekli enerji sistemlerinde bile maliyet kontrolünü sürdürebilmektedir.

Ayrıca, büyük prosümer grupları için uygun bir yapı sunarak enerji paylaşım mekanizmalarını daha etkin bir hale getirmektedir. Geleneksel P2P piyasa modelinde, bireysel enerji üreticileri genellikle kendi tüketim ihtiyaçlarını karşılamak üzerine odaklanmaktadır. Ancak önerilen model, enerji toplulukları

arasında daha akıllı bir paylaşım mekanizması oluşturarak hem bireysel hem de topluluk bazlı enerji yönetimini optimize etmektedir.

Önerilen model, enerji depolama kapasitesini optimize ederek ve aynı zamanda fiyatları etkili bir şekilde yöneterek maliyet optimizasyonu sağlamaktadır. Dinamik fiyatlandırma yaklaşımı sayesinde depolama fiyatlarının dalgalanmaları minimize edilmekte, yüksek talep saatlerinde kesintisiz enerji arzı sağlanmakta ve düşük talep saatlerinde gereksiz enerji kayıpları önlenmektedir. Depolama stratejileri, yenilenebilir enerji üretimi ile entegre edilerek enerji israfı azaltılmakta ve sistemin genel verimliliği artırılmaktadır. Bu model, özellikle büyük ölçekli enerji yönetim sistemlerinde ve P2P enerji ticaretinde, gerçek zamanlı uygulamalar için ölçeklenebilir ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır.



Şekil 5.3 Zaman ve depolama fiyatı ilişkisi

5.3.4 Prosümer Sayısı ve Enerji Depolaması İlişkisi

Bir enerji sistemindeki prosümer sayısı, genellikle kilowat-saat (kWh) cinsinden ölçülen toplam enerji depolama kapasitesini etkiler. Prosümer sayısı arttıkça, toplam enerji depolama kapasitesi de artmakta ve net bir ölçekleme ilişkisi ortaya koymaktadır. Bu ilişki, (5.4) numaralı denklemde olduğu gibi sayısal olarak ifade edilebilir:

$$E = NE_{per\ prosumer} \quad (5.4)$$

Burada E , toplam enerji depolama kapasitesini, N , prosümer sayısını ve $E_{per\ prosumer}$ ise prosümer başına enerji depolama kapasitesini temsil etmektedir.

Tablo 5.5 Prosümer sayısı ile enerji depolama arasındaki ilişkinin gösterimi

Prosümer sayısı	Enerji depolama (kWh)		
	P2P piyasa modeli	Q-learning algoritması	Önerilen model
5	794	945	1146
10	1376	1629	1875
15	2327	2585	2746
20	2986	3176	3376
25	3768	4086	4387

Şekil 5.4'te gösterildiği gibi, prosümer sayısındaki artışla birlikte enerji depolama kapasitesi tüm modellerde artış göstermektedir. Ancak önerilen model, P2P piyasa modeli ve Q-learning algoritması ile karşılaştırıldığında daha yüksek enerji depolama seviyelerine ulaşarak 25 prosümer için yaklaşık 4387 kWh seviyesine çıkmaktadır. Bu fark, önerilen modelin enerji yönetiminde anlık izleme ve dinamik karar verme mekanizmaları ile daha gelişmiş bir optimizasyon stratejisi sunmasından kaynaklanmaktadır. Model, hem bireysel hem de topluluk düzeyinde enerji arz-talep dengesini gerçek zamanlı olarak takip etmekte ve depolama kaynaklarını en verimli şekilde yöneterek kayıpları minimize etmektedir.

Enerji depolama kapasitesinin prosümer sayısı ile artış göstermesi, doğrudan talep ve arzın genişleyen bir ağ içinde daha dengeli bir şekilde yönetilmesine bağlıdır. Prosümer sayısı arttıkça, sistem içinde paylaşılan yenilenebilir enerji üretimi de artmakta, bu durum enerji depolama ihtiyacını doğurmaktadır. Ancak bu noktada önerilen modelin avantajı, enerji akışını anlık olarak takip ederek depolama süreçlerini en verimli şekilde yönetmektir.

Önerilen modelin üstünlüğü, özellikle aşağıdaki mekanizmalar sayesinde sağlanmaktadır:

➤ Talep ve Arz Uyumı:

- Geleneksel P2P piyasa modeli ve Q-learning algoritması, prosümerler arasında enerji paylaşımını belirli kurallar çerçevesinde gerçekleştirmektedir. Ancak bu sistemlerde, depoya alınan ve kullanılan enerji miktarları doğrudan piyasa koşullarına bağımlı olup, değişken talep ve arz durumlarına anında uyum sağlayamamaktadır.
- Önerilen model ise, enerji arz ve tüketim durumunu sürekli izleyerek, talep değişimlerine anlık olarak uyum sağlamak ve enerji fazlalarının gereksiz kayıplara uğramasını engelleyerek enerji depolamayı önceliklendirmektedir.

➤ Depolama Kaynaklarının Akıllı Tahsisi:

- Prosümer sayısı arttığında, geleneksel P2P piyasa modelinde bireysel enerji üreticilerinin şebekeye geri besleme oranı yükselmekte ve bu durum şebeke dengesizliklerine ve enerji kayıplarına neden olmaktadır.
- Önerilen model, enerjiyi merkezi depolama birimleri yerine dağıtılmış enerji depolama sistemlerine yönlendirerek hem bireysel hem de sistem genelinde daha dengeli bir depolama stratejisi oluşturmaktadır.
- Böylece, enerji en düşük kayıpla mümkün olan en verimli şekilde kullanıma sunulmaktadır.

➤ Dinamik Depolama Yönetimi:

- Geleneksel P2P enerji modellerinde depolama kapasiteleri sabit stratejilere dayalı olarak belirlenmekte, bu durum talep dalgalanmalarına yeterince hızlı uyum sağlanamamasına neden olmaktadır.
- Önerilen model ise prosümer sayısı arttıkça sistemin dinamik talep değişikliklerine anında yanıt verebilmesine olanak tanımaktadır.
- Yüksek talep saatlerinde önceden depolanan enerjiyi kullanarak şebekeye aşırı yük binmesini önlemekte ve böylece sistemdeki gerilim dalgalanmalarını en aza indirmektedir.

Enerji kayıpları, çoğunlukla şebeke içi iletim ve dağıtım aşamalarında meydana gelmektedir. Özellikle yüksek üretim saatlerinde fazla enerji doğrudan şebekeye

gönderildiğinde, uzun mesafelere iletilen elektrik enerjisi kayıplara uğrayarak sistemin genel verimliliğini düşürmektedir.

Önerilen model, enerji kayıplarını iki temel mekanizma ile azaltmaktadır:

➤ Yerinde Tüketim ve Depolama:

- Önerilen model, prosümer sayısı arttıkça enerjinin üretildiği noktalara en yakın konumlarda depolanmasını sağlayarak gereksiz iletim kayıplarını engellemektedir.
- Örneğin, 10 prosümer içeren bir sistemde, geleneksel modeller şebekeye fazla enerji gönderirken, önerilen model fazla enerjiyi doğrudan yerel depolama birimlerinde saklayarak toplam sistem verimliliğini artırmaktadır.

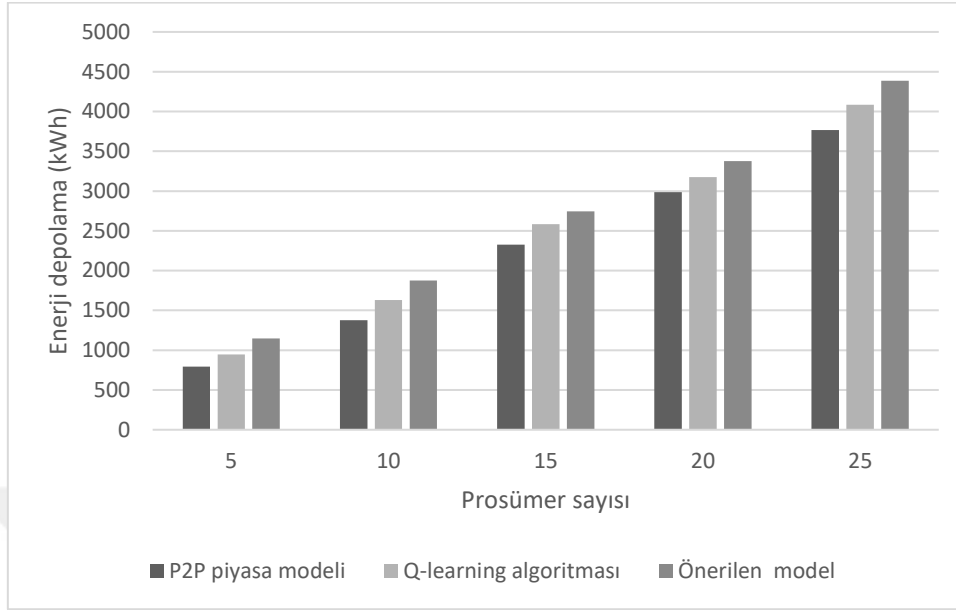
➤ Aşırı Yüklenmeyi Önleyerek Şebeke Kararlılığını Artırma:

- Özellikle 20-25 prosümer seviyelerinde, geleneksel modellerde aşırı yüklenme riskleri artmakta ve bu durum enerji kesintileri ile yüksek iletim kayıplarına neden olmaktadır.
- Önerilen model, yük yönetimi algoritması ve esnek depolama politikaları ile şebekeye aşırı yük binmesini engelleyerek enerjinin en verimli şekilde kullanılmasını sağlamaktadır.

Önerilen model, yalnızca küçük ölçekli enerji paylaşım ağlarında değil, büyük ölçekli prosümer topluluklarında da sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Geleneksel P2P piyasa modeli ve Q-learning algoritması, prosümer sayısı arttıkça işlem maliyetlerini ve yönetim karmaşıklığını artırmakta, ancak önerilen model ölçeklenebilir yapısı sayesinde düşük işlem maliyetleriyle yüksek verimlilik sunmaktadır. Ayrıca, enerji depolama kapasitesi artırıldığında maliyetlerin artması beklenirken, önerilen model akıllı depolama yönetimi sayesinde gereksiz depolama yatırımlarını önleyerek hem yüksek depolama kapasitesini hem de maliyet etkinliğini korumaktadır.

Önerilen model, prosümer sayısı arttıkça enerji depolamayı önceliklendiren ve dinamik talep değişimlerine uyum sağlayan bir yapı sunmaktadır. Geleneksel P2P piyasa modeline kıyasla, daha yüksek depolama kapasitesine ulaşırken kayıpları en aza indirmekte ve maliyetleri optimize etmektedir. Ayrıca, büyük ölçekli prosümer

gruplarında esneklik ve sürdürülebilirlik sağlayarak enerji paylaşım sistemlerinde daha güvenilir ve ölçeklenebilir bir çözüm oluşturmaktadır.



Şekil 5.4 Prosümer sayısı ve enerji depolama ilişkisi

Depolama kapasitesinin artırılmasının, sadece ekonomik bir yatırım kararı olmaktan öte, sistemin sürdürülebilirliği ve işlevselliği açısından yapısal bir gereklilik olduğu düşüncesiyle hareket edilmiştir. Özellikle dağıtık enerji yapılarında prosümer sayısındaki artış, üretim-tüketim dengesizliğini artırmakta; bu da ani enerji fazlaları ya da arz açıklarına neden olmaktadır. Böyle bir ortamda, yeterli depolama altyapısının bulunmaması, yalnızca enerji kayıplarına değil, aynı zamanda piyasa istikrarsızlıklarına da neden olabilmektedir. Her ne kadar bu çalışmanın kapsamında doğrudan bir ekonomik maliyet-fayda analizi gerçekleştirilmemiş olsa da, önerilen modelin performansı çoklu kriterli değerlendirme yaklaşımıyla test edilmiş ve sonuçlar, artan depolama kapasitesinin sistemdeki enerji paylaşımı, ticaret dengesi ve esneklik açısından pozitif etkilerini açıkça ortaya koymuştur. Bu yönüyle önerilen sistem yapısı, ilerleyen çalışmalarda hem maliyet etkinliği hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından genişletilmeye ve analiz edilmeye uygun bir altyapı sunmaktadır.

5.3.5 Enerji Ticareti ve Enerji İlişkisi

Bir pazar veya sistemde enerjinin dağıtımını ve kullanımı, doğrudan enerji ticareti ile etkilenir. Enerji ticareti, kilowat-saat (kWh) cinsinden ifade edilen enerji

birimlerinin alım ve satımını içerir. Bu faaliyet, arz ve talebin mevcut dinamiklerine bağlı olarak şebeke istikrarını ve verimliliğini artırmak amacıyla enerjinin dağıtımını optimize etmektedir.

Belirli bir zaman diliminde ticareti yapılan enerji ile toplam enerji tüketimi arasındaki ilişki, (5.5) numaralı temel bir denklem ile ifade edilebilir:

$$E_{traded} = \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt \quad (5.5)$$

Burada, E_{traded} , kWh cinsinden toplam ticareti yapılan enerjiyi temsil ederken, $\int_{t_1}^{t_2} P(t)dt$ terimi, t_1 ile t_2 zaman aralığındaki toplam enerji tüketimini veya dağıtımını ifade etmektedir. Bu bağlamda, $P(t)$, herhangi bir t anındaki gücü göstermektedir. Denklem, bu süre zarfında ticareti yapılan enerji ile toplam tüketilen veya dağıtılan enerji arasındaki dengeyi ortaya koymaktadır.

Tablo 5.6 Enerji ticareti ile enerji arasındaki ilişkinin gösterimi

Enerji ticareti	Enerji (kWh)		
	P2P piyasa modeli	Q-learning algoritması	Önerilen model
20	11	14	17
40	20	25	28
60	31	34	37
80	42	46	50
100	56	61	65
120	71	76	80

Şekil 5.5'te gösterildiği gibi, enerji ticareti arttıkça aktarılan toplam enerji miktarı da artmaktadır. Ancak farklı modeller arasındaki farklar, enerji yönetim stratejilerinin verimlilik üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Önerilen model, tüm ticaret seviyelerinde P2P piyasa modeli ve Q-learning algoritmasına kıyasla daha yüksek enerji transferi sağlayarak, özellikle 80 ila 120 birim ticaret

hacminde belirgin bir üstünlük sergilemektedir. Bu sonuç, modelin talep ve arz yönetimini optimize etme, enerji ticaretini etkinleştirme ve enerji kayıplarını en aza indirme yeteneğinden kaynaklanmaktadır.

Enerji ticareti, prosümerler arasındaki enerji alışverişini ifade eder. Ticaret hacmi arttıkça, sistemin daha fazla enerji transferi gerçekleştirme kapasitesi önem kazanmaktadır. Ancak bu süreçte şebeke dengesi, depolama kapasitesi, arz-talep uyumu ve enerji kayıplarının yönetimi kritik faktörlerdir.

➤ Geleneksel P2P Piyasa Modelinin Yetersizliği

- P2P piyasa modeli, enerji ticaretini doğrudan arz ve talep eğilimlerine bağlı olarak yönetmektedir. Ancak bu yaklaşım, ani talep değişikliklerine veya şebekedeki dalgalanmalara karşı yeterince esnek bir yanıt verememektedir.
- Özellikle ticaret hacmi 80 birimi aştığında, sistem verimlilik kaybı yaşamakta ve iletim kısıtları nedeniyle aktarılan toplam enerji sınırlı kalmaktadır.

➤ Q-Learning Algoritmasının Sınırlı Verimliliği

- Q-learning algoritması, enerji ticaretinde öğrenmeye dayalı bir optimizasyon sunarak geleneksel P2P modeline kıyasla daha iyi performans sergilese de, dinamik piyasa koşullarında yeterli adaptasyonu sağlayamamaktadır.
- Bu model, önceki ticaret verilerini kullanarak ticaret stratejilerini iyileştirse de, ani arz-talep dengesizliklerinde esneklik gösterememektedir.

➤ Önerilen Modelin Üstünlüğü ve Enerji Transferini Optimize Etmesi

- Önerilen model, enerji ticareti sürecini anlık verilerle optimize ederek ticaretin her aşamasında daha verimli bir enerji transferi sağlamaktadır. Özellikle yüksek ticaret hacimlerinde bile kayıpları minimize ederek ölçeklenebilir ve güvenilir bir çözüm sunmaktadır.
- 80 birimlik ticaret seviyesinde önerilen model, 50 kWh enerji aktarımı yaparken, P2P modeli 42 kWh ve Q-learning algoritması 46 kWh aktarmaktadır. 120 birim ticaret seviyesinde önerilen model 80 kWh enerji aktarımı sağlarken, P2P modeli 71 kWh ve Q-learning algoritması 76 kWh enerji aktarımı yapmaktadır. Bu fark, önerilen modelin dinamik ticaret

yönetimi ve anlık enerji akış optimizasyonu ile ticaret kapasitesini daha verimli kullanmasından kaynaklanmaktadır.

Enerji transferi sırasında kayıplar, iletim hatları, dönüştürme süreçleri ve depolama verimliliği gibi teknik faktörlerden kaynaklanmaktadır. Önerilen model, bu kayıpları aşağıdaki üç temel stratejiyle minimize etmektedir:

➤ Dağıtılmış Ticaret ve Yerinde Kullanım

- Önerilen model, enerji ticaretini mümkün olduğunca coğrafi olarak yakın prosümlerler arasında gerçekleştirerek uzun mesafeli iletim ihtiyacını azaltmaktadır.
- Geleneksel modellerde enerji, merkezi bir noktadan dağıtılırken önerilen modelde ticaret, doğrudan komşu veya yakın bölgedeki kullanıcılar arasında önceliklendirilmekte, böylece iletim kayıpları en aza indirilmektedir.

➤ Dinamik Depolama Yönetimi ve Fazla Enerji Kullanımı

- Enerji ticareti arttıkça, sistemde fazla üretim ve talep dalgalanmaları oluşabilir. Geleneksel modellerde bu fazla enerji şebekeye geri verilirken, önerilen model fazla enerjiyi yerel depolama sistemlerine yönlendirerek kayıpları minimize etmektedir.
- Örneğin, 100 birim ticaret seviyesinde P2P modeli 61 kWh transfer ederken, önerilen model 65 kWh transfer etmektedir. Bu fark, fazla üretilen enerjinin daha verimli şekilde değerlendirilmesiyle sağlanmaktadır.

➤ Gerçek Zamanlı Ticaret Optimizasyonu

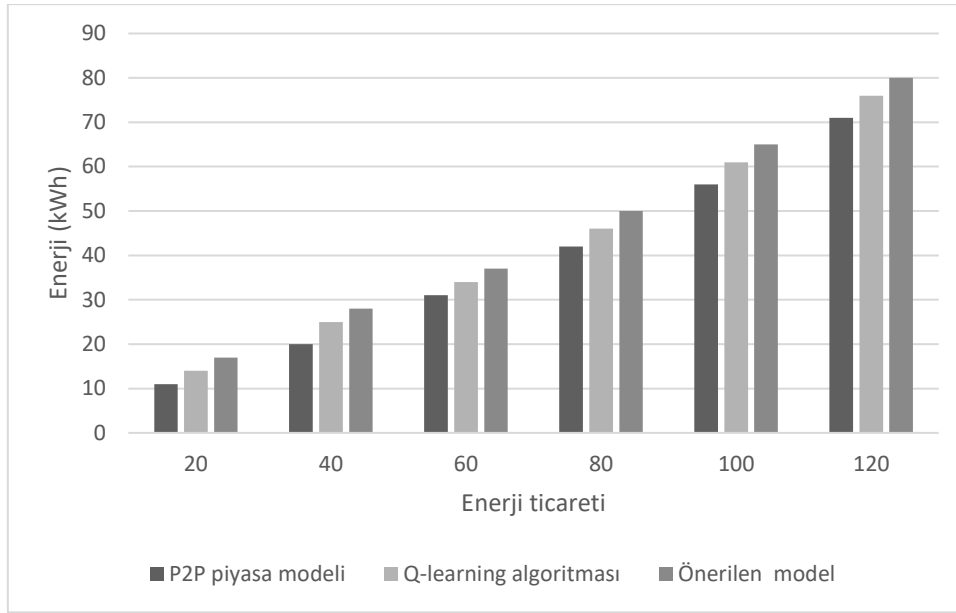
- Geleneksel ticaret sistemleri, belirli zaman dilimlerinde sabit ticaret kurallarıyla işlem yaparken, önerilen model anlık fiyatlandırma ve dinamik kontrol mekanizmaları ile ticaret sürecini optimize etmektedir.
- Böylece, aşırı yüklenme veya düşük talep saatlerinde kayıplar en aza indirilerek toplam enerji transferi maksimize edilmektedir.

Önerilen modelin enerji ticaretinde sağladığı iyileştirmeler, yalnızca teknik verimlilikle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda enerji piyasalarında sürdürülebilirlik ve ekonomik avantajlar da sağlamaktadır:

- Ticaret Etkinliği ve Piyasa Dengesi
 - Model, talep ve arzı optimize ederek ticaret sürecini dengeli hale getirmekte, aşırı fiyat dalgalanmalarını önleyerek daha stabil bir piyasa ortamı oluşturmaktadır.
- Ölçeklenebilirlik ve Büyüyen Piyasalara Uyum
 - Ticaret hacmi 120 birime ulaştığında bile önerilen model, enerji transferinde yüksek performans sunarak büyük ölçekli enerji paylaşım sistemlerine kolayca entegre edilebileceğini göstermektedir.
- Enerji Ticareti Yoluyla Karbon Emisyonlarının Azaltılması
 - Fazla yenilenebilir enerjinin daha verimli dağıtılması sayesinde önerilen model, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmakta ve karbon emisyonlarını düşürerek çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktadır.

Önerilen model, enerji ticaretinde arz ve talebi gerçek zamanlı olarak optimize ederek, geleneksel P2P piyasa modeline ve Q-learning algoritmasına kıyasla daha yüksek enerji transferi sağlamaktadır. Enerji ticaret hacmi arttıkça, modelin verimlilik avantajları daha belirgin hale gelmekte ve özellikle 80-120 birim ticaret seviyelerinde üstün performans sergilemektedir.

Bu üstünlük, modelin dinamik depolama yönetimi, dağıtılmış ticaret stratejileri ve gerçek zamanlı optimizasyon mekanizmaları ile enerji kayıplarını en aza indirerek şebeke verimliliğini artırmasından kaynaklanmaktadır. Önerilen model, sadece enerji transfer kapasitesini artırmakla kalmayıp, ticaret etkinliğini artırarak, daha güvenilir, ölçeklenebilir ve sürdürülebilir bir enerji yönetim sistemi sunmaktadır.



Şekil 5.5 Enerji ticareti ve enerji ilişkisi

5.3.6 Kullanıcı Sayısı ve Toplam Maliyet İlişkisi

Bu çalışmada, önerilen model ile geleneksel P2P piyasa yapısı ve Q-learning tabanlı yöntemlerin hesaplama verimliliklerini karşılaştırmak amacıyla “milisaniye başına maliyet (Maliyet/ms)” metriği kullanılmıştır. Bu metrik, yalnızca işlem süresine değil, aynı zamanda sistemin gerçekleştirdiği işlem yoğunluğuna da odaklanarak, modelin hesaplama yükünü zamana oranlayan normalize bir performans göstergesi sunmaktadır. Her modelin çalışması sırasında enerji teklifi oluşturma, eşleştirme, fiyat güncelleme ve karar alma gibi işlemler belirli aralıklarla gerçekleştirilmekte olup, bu adımların her birine eşit sabit bir işlem maliyet katsayısı atanmıştır. Bu katsayı, doğrudan parasal bir karşılık içermemekle birlikte, işlem yoğunluğunu ifade eden kuramsal ve karşılaştırmalı bir ölçüt olarak değerlendirilmiştir. Simülasyon boyunca gerçekleştirilen toplam işlem sayısı ise otomatik sayaçlarla takip edilerek elde edilmiştir. Ardından bu işlem sayısı ile işlem başına maliyet katsayısı çarpılarak modelin toplam hesaplama maliyeti hesaplanmıştır. Her simülasyon çalışması başlangıç ve bitiş zamanları MATLAB ortamında ‘tic’ ve ‘toc’ komutları ile ölçülmüş ve simülasyon süresi milisaniye cinsinden elde edilmiştir. Son aşamada ise toplam hesaplama maliyeti simülasyon süresine bölünerek “cost/ms” oranı hesaplanmış, böylece her bir milisaniyede sisteme düşen ortalama işlem maliyeti belirlenmiştir.

Denklem (5.6), bir sistemi veya hizmeti kullanan kişi sayısının N , milisaniye başına maliyet C üzerinde etkili olabileceğini varsayar. Burada, $C_{per\ user}$ her bir kullanıcıya ait maliyeti ifade etmektedir. Bu ilişki, kullanıcı sayısının artışıyla maliyetin nasıl yükseldiğini ortaya koymaktadır.

$$C = NC_{per\ user} \quad (5.6)$$

Tablo 5.7 Kullanıcı sayısı ile toplam hesaplanan maliyet/ms arasındaki ilişkinin gösterimi

Kullanıcı sayısı	Toplam hesaplanan maliyet/ms		
	P2P piyasa modeli	Q-learning algoritması	Önerilen model
10	500	577	658
20	715	832	951
30	1145	1323	1487
40	1652	1758	1876
50	2176	2394	2500

Şekil 5.6'da gösterildiği gibi, sistemdeki kullanıcı sayısının artmasıyla birlikte hesaplanan toplam maliyet (ms başına) yükselmektedir. Bu maliyet, enerji ticareti süreçlerinde yapılan hesaplamalar ve sistemin işletme giderlerini içermektedir. Her üç modelde de kullanıcı sayısı arttıkça hesaplama yükü artmakta, ancak önerilen modelin büyük ölçekli sistemlerde daha düşük maliyet sağladığı açıkça görülmektedir. Özellikle 40 ila 50 kullanıcı içeren senaryolarda, önerilen modelin P2P piyasa modeli ve Q-learning algoritmasına kıyasla daha iyi maliyet yönetimi sunduğu belirlenmiştir. Bu avantaj, önerilen modelin hesaplama kaynaklarını daha verimli kullanma, işlem yükünü optimize etme ve ticaret sürecini sadeleştirme yeteneğinden kaynaklanmaktadır.

Enerji ticaretinde hesaplanan maliyet (ms başına toplam maliyet), sistemdeki kullanıcı sayısına bağlı olarak artış gösterir. Bunun temel nedenleri şunlardır:

- Artan Kullanıcı Sayısı ile İşlem Yükünün Artması
 - Kullanıcı sayısı arttıkça, daha fazla enerji alışverişi gerçekleşmekte ve sistem, her işlem için daha fazla hesaplama yapmaktadır.
 - Özellikle P2P sistemlerinde her kullanıcının ticaret tekliflerini analiz etmek ve en uygun eşleşmeyi bulmak için karmaşık optimizasyon süreçleri devreye girmektedir.
- Büyük Ölçekli Ağlarda Koordinasyon Zorlukları
 - Enerji ticareti işlemlerinin senkronizasyonu, şebeke dengesi ve piyasa koşullarına bağlı olarak optimize edilmelidir.
 - Kullanıcı sayısı arttıkça, bu koordinasyon süreci daha karmaşık hale gelir ve hesaplama gereksinimleri katlanarak büyür.
- Geleneksel Sistemlerin Verimsizliği
 - P2P piyasası ve Q-learning algoritması, büyük kullanıcı ağlarında verimsiz kaynak yönetimi nedeniyle hesaplama maliyetlerini artırmaktadır.
 - Bu sistemlerde gereksiz veri transferleri, düzensiz ticaret işlemleri ve merkezi olmayan koordinasyon eksikliği, ekstra hesaplama yüküne neden olmaktadır.

Önerilen model, hesaplama maliyetlerini optimize etmek ve sistemin işlem yükünü azaltmak için aşağıdaki üç temel mekanizmayı kullanmaktadır:

- Akıllı Ticaret Eşleşme Mekanizması
 - P2P modelinde, her kullanıcı, enerji ticaretinde mevcut tüm olası ticaret eşleşmelerini değerlendirerek işlem yapar. Ancak bu süreç, büyük ölçekli ağlarda aşırı hesaplama yüküne neden olur.
 - Önerilen model, bölgesel ticaret önceliği ve dinamik eşleşme kriterleri kullanarak yalnızca en uygun eşleşmeleri değerlendirmekte ve böylece gereksiz hesaplama yükünü ortadan kaldırmaktadır.
- Dinamik Optimizasyon ve Adaptif Öğrenme
 - Q-learning algoritmasında, sistem geçmiş verilere dayanarak ticaret stratejilerini optimize etmeye çalışsa da, her yeni işlem için yeniden hesaplama yapması fazladan işlem yükü oluşturmaktadır.

- Önerilen model, gerçek zamanlı piyasa koşullarını analiz ederek adaptif ticaret kararları alır ve gereksiz hesaplama döngülerini azaltır. Bu sayede, özellikle büyük ölçekli ağlarda işlem süreleri kısılırken maliyetler düşmektedir.

➤ Enerji Kayıplarını Azaltarak Hesaplama Verimliliğini Artırma

- Geleneksel sistemlerde, kullanıcılar arasındaki ticaret sırasında fazla enerji transferi yapılması ve düzensiz ticaret süreçleri nedeniyle enerji kayıpları artmaktadır.
- Önerilen model, enerji depolama ve ticaret işlemlerini optimize ederek fazla enerji kaybını minimize eder ve böylece ek hesaplama maliyetlerinin önüne geçer.

Önerilen modelin sağladığı düşük hesaplama maliyetleri, sadece işlem yükünü azaltmakla kalmaz, aynı zamanda sistemin uzun vadeli sürdürülebilirliğini de artırır:

➤ Büyük Ölçekli Kullanıcı Ağlarına Uyum Sağlama

- 50 kullanıcı seviyesinde bile hesaplama maliyetleri P2P piyasasına göre daha düşük olup, sistemin büyük ölçekli ticaret ortamlarına entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır.

➤ Gerçek Zamanlı ve Esnek Ticaret Yönetimi

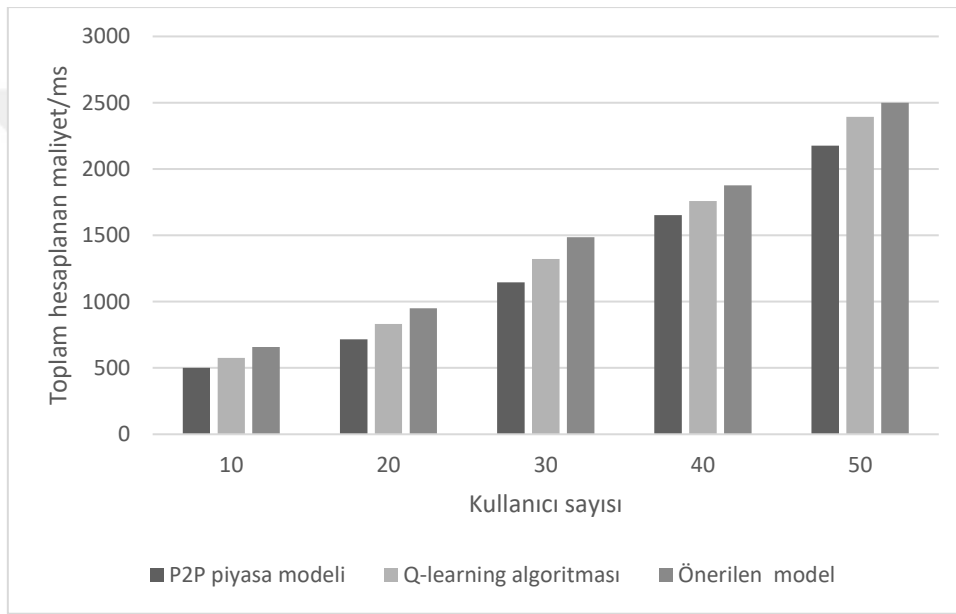
- Önerilen model, hesaplamaları yalnızca gerekli olduğunda çalıştırarak gerçek zamanlı optimizasyon sağlamaktadır.
- Bu sayede, ticaret işlemleri daha hızlı gerçekleştirilirken, gereksiz hesaplama yükleri önlenmektedir.

➤ Enerji Piyasalarında Rekabet Avantajı Sağlama

- Daha düşük işletme maliyetleri sayesinde, ticaret platformları önerilen modeli benimseyerek kullanıcılarına daha uygun maliyetli hizmetler sunabilir.
- Daha verimli işlem süreçleri, piyasa dalgalanmalarına karşı daha dirençli ve sürdürülebilir bir ticaret sistemi oluşturur.

Şekil 5.6'da gösterildiği gibi, kullanıcı sayısı arttıkça hesaplanan toplam maliyet de yükselmektedir. Ancak önerilen model, P2P piyasa modeli ve Q-learning algoritmasına kıyasla çok daha düşük hesaplama maliyetleri sunarak sistemin ölçeklenebilirliğini artırmaktadır.

Bu avantaj, optimize edilmiş ticaret eşleşme mekanizmaları, dinamik ticaret stratejileri ve enerji kayıplarını minimize eden akıllı depolama yönetimi sayesinde sağlanmaktadır. Sonuç olarak, önerilen model, büyük ölçekli enerji ticaret sistemlerinde düşük maliyetli, hızlı ve sürdürülebilir bir çözüm sunarak piyasa verimliliğini artırmaktadır.



Şekil 5.6 Kullanıcı sayısı ve toplam hesaplanan maliyet/ms ilişkisi

6 SONUÇ

Bu çalışma, çoklu enerji kaynaklarının merkeziyetsiz enerji sistemlerine entegrasyonu için yenilikçi bir model sunmaktadır. P2P enerji ticaretine dayalı bu model, elektrik, gaz ve ısı yönetimi ile ticaretini aynı çerçevede optimize ederek enerji paylaşımında daha verimli bir yapı oluşturmuştur. Gelişmiş blockchain teknolojisinin kullanımı sayesinde, sistem yalnızca enerji yönetimini iyileştirmekle kalmamış, aynı zamanda işlem güvenliğini artırmış, merkezi kontrol ihtiyacını ortadan kaldırmış ve dolandırıcılık risklerini en aza indirmiştir.

Bu çalışmada önerilen model, yalnızca sanal depolamanın varlığıyla değil, sanal depolamanın yönetiminde kullanılan dinamik optimizasyon stratejileri ile geleneksel yöntemlerden ayrılmaktadır. Üç karşılaştırmalı modelde de sanal depolama altyapısı kullanılmış olmasına rağmen, önerilen model sanal depolama yönetimini daha etkin hale getirerek depolama maliyetlerinde belirgin bir düşüş sağlamıştır.

Önerilen modelin sunduğu doğrusal olmayan programlama çoklu hedef optimizasyonu ve dinamik ticaret yönetimi mekanizmaları sayesinde, enerji depolama maliyetlerinde %18'lik bir azalma sağlanmıştır. Ayrıca, enerji depolama süreçlerinin akıllı yönetimi, pil döngü ömrünü %15–20 oranında uzatarak hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirliği artırmıştır. Bu sonuçlar, önerilen modelin yalnızca sanal depolamayı kullanmakla kalmayıp, sanal depolama kaynaklarını en verimli şekilde yönettiğini ve diğer modellerden daha üstün bir ticaret ve enerji yönetim mekanizması sunduğunu ortaya koymaktadır.

Ayrıca, Nash pazarlık modelinin merkeziyetsiz enerji ticaretine entegrasyonu, enerji akış dalgalanmalarına karşı sistemin duyarlılığını artırmış, enerji ticareti verimliliğini %15 oranında yükseltmiştir. Bu durum, özellikle yüksek talep

dönemlerinde ticaret akışının daha dengeli yönetilmesini sağlamış, aşırı yüklenmelerin önüne geçerek piyasa istikrarını artırmıştır.

MATLAB-R2023b simülasyon ortamında gerçekleştirilen analizler, önerilen modelin yüksek ölçeklenebilirlik sunduğunu ve prosümer sayısındaki artışa rağmen enerji paylaşım süreçlerini verimli şekilde optimize ettiğini göstermektedir. Sistem, elli prosümere kadar optimal enerji dağılımını sürdürebilmiş, işlem maliyetlerinde aşırı bir artış olmadan piyasa büyümesine uyum sağlayarak esneklik göstermiştir.

Blockchain tabanlı ödeme mekanizması, işlem bütünlüğünü garanti altına alarak kullanıcılar arasında güven oluşturmuş, anonimlik ve şeffaflığı koruyarak piyasa güvenilirliğini pekiştirmiştir. Özellikle enerji değişim başarı oranlarının artırılmasıyla birlikte, bireysel kullanıcıların piyasa teşvikleri daha geniş piyasa hedefleriyle uyumlu hale getirilmiş ve piyasa entegrasyonu daha sağlam bir yapıya kavuşmuştur.

Önerilen model, yalnızca enerji ticareti süreçlerini iyileştirmekle kalmamış, aynı zamanda sanal depolama mekanizmalarını optimize ederek toplam sistem verimliliğini artırmıştır. Böylece, yalnızca bireysel enerji yönetim seviyesinde değil, tüm sistem genelinde daha dengeli ve sürdürülebilir bir enerji paylaşımı sağlanmıştır.

Bu çalışma, dağıtık enerji sistemlerinde çoklu enerji bağlantılarının potansiyelini vurgulayarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının merkeziyetsiz enerji piyasalarına entegrasyonu için güçlü bir temel oluşturmaktadır. Önerilen P2P ticaret paradigması, merkezi enerji tedarikçilerine olan bağımlılığı azaltarak, sanal depolama ve akıllı ticaret mekanizmaları ile daha adil ve esnek bir piyasa ortamı oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

Gelecekteki çalışmalar, modelin daha büyük ölçekli enerji ağlarına entegrasyonunu sağlamaya, ek yenilenebilir enerji kaynaklarını dahil etmeye ve enerji piyasalarındaki fiyat dalgalanmalarına karşı daha duyarlı bir yapı oluşturmak için gerçek zamanlı fiyatlandırma stratejilerini geliştirmeye odaklanacaktır. Ayrıca, bu modelin küresel enerji piyasalarına uygulanmasının ekonomik ve çevresel etkileri daha kapsamlı olarak incelenecek, özellikle operasyonel maliyetleri azaltma ve sistem esnekliğini artırma konularında iyileştirmeler yapılacaktır.

- [1] Y. Wu, Y. Wu, H. Cimen, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Towards collective energy community: Potential roles of microgrid and blockchain to go beyond P2P energy trading," May 15, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119003.
- [2] D. Xu *et al.*, "Peer-to-Peer multienergy and communication resource trading for interconnected microgrids," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 17, no. 4, pp. 2522–2533, Apr. 2021, doi: 10.1109/TII.2020.3000906.
- [3] L. P. M. I. Sampath, A. Paudel, H. D. Nguyen, E. Y. S. Foo, and H. B. Gooi, "Peer-to-Peer energy trading enabled optimal decentralized operation of smart distribution grids," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 13, no. 1, pp. 654–666, Jan. 2022, doi: 10.1109/TSG.2021.3110889.
- [4] M. Shi, H. Wang, P. Xie, C. Lyu, L. Jian, and Y. Jia, "Distributed energy scheduling for integrated energy system clusters with peer-to-peer energy transaction," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 14, no. 1, pp. 142–156, Jan. 2023, doi: 10.1109/TSG.2022.3197435.
- [5] S. Ghaemi and A. Anvari-Moghaddam, "Local energy communities with strategic behavior of multienergy players for peer-to-peer trading: A techno-economic assessment," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 34, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.segan.2023.101059.
- [6] T. Chen, S. Bu, X. Liu, J. Kang, F. R. Yu, and Z. Han, "Peer-to-peer energy trading and energy conversion in interconnected multienergy microgrids using multi-agent deep reinforcement learning," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 13, no. 1, pp. 715–727, Jan. 2022, doi: 10.1109/TSG.2021.3124465.
- [7] G. Sun, J. Sun, S. Chen, Z. Wei, and H. Zang, "Market-based coordination of regional electric and natural gas systems: a peer-to-peer energy trading model," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2022, doi: 10.17775/CSEEJPES.2021.03970.
- [8] Y. Xia, Q. Xu, Y. Ding, L. Shi, and F. Wu, "Generalized nash equilibrium analysis for peer-to-peer transactive energy market considering coupling distribution network constraints," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 20, no. 6, pp. 8125–8137, Jun. 2024, doi: 10.1109/TII.2024.3366995.

- [9] T. Chen, S. Bu, X. Liu, J. Kang, F. R. Yu, and Z. Han, "Peer-to-peer energy trading and energy conversion in interconnected multienergy microgrids using multi-agent deep reinforcement learning," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 13, no. 1, pp. 715–727, Jan. 2022, doi: 10.1109/TSG.2021.3124465.
- [10] L. Chen, Q. Xu, Y. Yang, H. Gao, and W. Xiong, "Community integrated energy system trading: A comprehensive review," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 10, no. 6, pp. 1445–1458, Nov. 2022, doi: 10.35833/MPCE.2022.000044.
- [11] Y. Zhou, J. Wang, Y. Zhang, J. Wei, W. Sun, and J. Wang, "A fully-decentralized transactive energy management under distribution network constraints via peer-to-peer energy trading," *IEEE Transactions on Energy Markets, Policy and Regulation*, vol. 1, no. 4, pp. 297–309, Mar. 2023, doi: 10.1109/tempr.2023.3263685.
- [12] T. Huang, Y. Sun, J. Hao, C. Sun, and C. Liu, "A distributed peer-to-peer energy trading model in integrated electric–thermal system," *IET Renewable Power Generation*, 2023, doi: 10.1049/rpg2.12918.
- [13] Y. Jia, C. Wan, W. Cui, Y. Song, and P. Ju, "Peer-to-peer energy trading using prediction intervals of renewable energy generation," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 14, no. 2, pp. 1454–1465, Mar. 2023, doi: 10.1109/TSG.2022.3168150.
- [14] H. Hou *et al.*, "Distributed optimization for joint peer-to-peer electricity and carbon trading among multi-energy microgrids considering renewable generation uncertainty," *Energy Conversion and Economics*, vol. 5, no. 2, pp. 116–131, Apr. 2024, doi: 10.1049/enc2.12110.
- [15] L. Wang *et al.*, "Credible peer-to-peer trading with double-layer energy blockchain network in distributed electricity markets," *Electronics (Switzerland)*, vol. 10, no. 15, Aug. 2021, doi: 10.3390/electronics10151815.
- [16] F. Gulotta, E. Daccò, A. Bosisio, and D. Falabretti, "Opening of ancillary service markets to distributed energy resources: A review," Mar. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/en16062814.
- [17] M. Khojasteh, P. Faria, L. Gomes, and Z. Vale, "Energy trading strategy of community shared energy storage," *Electrical Engineering*, vol. 106, no. 3, pp. 3415–3426, Jun. 2024, doi: 10.1007/s00202-023-02163-0.
- [18] D. Wang, D. Huang, H. Jia, B. Liu, and Y. Lei, "Electricity-heat-based integrated demand response considering double auction energy market with multienergy storage for interconnected areas", doi: 10.17775/CSEEPES.2022.02140.
- [19] G. H. Krishna, K. V. S. M. Babu, D. Dwivedi, P. Chakraborty, P. K. Yemula, and M. Pal, "Energy Sharing among resources within electrical distribution systems: A systematic review," Jan. 2024, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2401.01597>

- [20] Z. Ye, Y. Wang, K. Han, C. Zhao, J. Han, and Y. Zhu, "Bi-objective optimization and emergy analysis of multi-distributed energy system considering shared energy storage," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 2, Jan. 2023, doi: 10.3390/su15021011.
- [21] L. Frölke, T. Sousa, and P. Pinson, "A network-aware market mechanism for decentralized district heating systems," *Appl Energy*, vol. 306, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117956.
- [22] X. Zhao, L. Li, Y. Tao, S. Lai, X. Zhou, and J. Qiu, "Aggregated operation of heterogeneous small-capacity distributed energy resources in peer-to-peer energy trading," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 141, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108162.
- [23] Y. Wang *et al.*, "Modelling and analysis of a two-level incentive mechanism based peer-to-peer energy sharing community," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 133, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107202.
- [24] Y. Zou, Y. Xu and J. Li, "Aggregator-Network Coordinated Peer-to-Peer Multi-Energy Trading via Adaptive Robust Stochastic Optimization," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 39, no. 6, pp. 7124-7137, Nov. 2024, doi: 10.1109/TPWRS.2024.3376808.
- [25] X. Zhao, L. Li, Y. Tao, S. Lai, X. Zhou, and J. Qiu, "Aggregated operation of heterogeneous small-capacity distributed energy resources in peer-to-peer energy trading," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 141, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108162.
- [26] A. Dixit, A. Singh, Y. Rahulamathavan, and M. Rajarajan, "FAST DATA: A fair, secure, and trusted decentralized IIoT data marketplace enabled by blockchain," *IEEE Internet Things J*, vol. 10, no. 4, pp. 2934–2944, Feb. 2023, doi: 10.1109/JIOT.2021.3120640.
- [27] A. S. Yahaya, N. Javaid, A. Almogren, A. Ahmed, S. M. Gulfam, and A. Radwan, "A two-stage privacy preservation and secure peer-to-peer energy trading model using blockchain and cloud-based aggregator," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 143121–143137, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3120737.
- [28] M. Davoudi and M. Moeini-Aghaie, "Local energy markets design for integrated distribution energy systems based on the concept of transactive peer-to-peer market," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 16, no. 1, pp. 41–56, Jan. 2022, doi: 10.1049/gtd2.12274.
- [29] W. Gan, M. Yan, W. Yao, and J. Wen, "Peer to peer transactive energy for multiple energy hub with the penetration of high-level renewable energy," *Appl Energy*, vol. 295, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117027.
- [30] J. Lei *et al.*, "A Shareholding-based resource sharing mechanism for promoting energy equity in peer-to-peer energy trading," *IEEE Transactions on*

Power Systems, vol. 38, no. 6, pp. 5113–5127, Nov. 2023, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3225656.

[31] J. Wang, N. Xie, V. Ilea, C. Bovo, H. Xin, and Y. Wang, “Cooperative trading mechanism and satisfaction-based profit distribution in a multienergy community,” *Front Energy Res*, vol. 9, Nov. 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.723192.

[32] Wang, Z., Hou, H., Zhao, B., Zhang, L., Shi, Y., & Xie, C. Risk-averse stochastic capacity planning and P2P trading collaborative optimization for multienergy microgrids considering carbon emission limitations: An asymmetric Nash bargaining approach. *Applied Energy*, 2024, 357, 122505. doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122505

[33] X. He, J. W. Xiao, S. C. Cui, X. K. Liu, and Y. W. Wang, “A new cooperation framework with a fair clearing scheme for energy storage sharing,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 18, no. 9, pp. 5893–5904, Sep. 2022, doi: 10.1109/TII.2021.3137823.

[34] M. Yunshou, W. Jiekang, C. Zhihong, W. Ruidong, Z. Ran, and C. Lingmin, “Cooperative operation framework for a wind-solar-CCHP multienergy system based on nash bargaining solution,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 119987–120000, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3107156.

[35] S. A. Sedgh, H. Aghamohammadloo, H. Khazaei, M. Mehdinejad, and S. Asadi, “A New design for the peer-to-peer electricity and gas markets based on robust probabilistic programming,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 8, Apr. 2023, doi: 10.3390/en16083464.

[36] S. S. Seyedhossein and M. Moeini-Aghtaie, “Risk management framework of peer-to-peer electricity markets,” *Energy*, vol. 261, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.125264.

[37] A. Dixit, A. Singh, Y. Rahulamathavan, and M. Rajarajan, “FAST DATA: A fair, secure, and trusted decentralized IIoT data marketplace enabled by blockchain,” *IEEE Internet Things J*, vol. 10, no. 4, pp. 2934–2944, Feb. 2023, doi: 10.1109/JIOT.2021.3120640.

[38] S. Seven, “Blockchain based peer-to-peer energy trading,” Ph.D. thesis, Elec. And Comp. Eng., Abdullah Gul Univ., Jun. 2023. [Online]. Available: <http://openaccess.agu.edu.tr:8080/xmlui/handle/20.500.12573/1877>.

[39] A. S. Yahaya, N. Javaid, A. Almogren, A. Ahmed, S. M. Gulfam, and A. Radwan, “A two-stage privacy preservation and secure peer-to-peer energy trading model using blockchain and cloud-based aggregator,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 143121–143137, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3120737.

[40] L. He, Y. Liu, and J. Zhang, “Peer-to-peer energy sharing with battery storage: Energy pawn in the smart grid,” *Appl Energy*, vol. 297, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117129.

- [41] T. Ma, W. Pei, W. Deng, H. Xiao, Y. Yang, and C. Tang, "A Nash bargaining-based cooperative planning and operation method for wind-hydrogen-heat multi-agent energy system," *Energy*, vol. 239, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122435.
- [42] L. Frölke, T. Sousa, and P. Pinson, "A network-aware market mechanism for decentralized district heating systems," *Appl Energy*, vol. 306, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117956.
- [43] L. He, Y. Liu, and J. Zhang, "Peer-to-peer energy sharing with battery storage: Energy pawn in the smart grid," *Appl Energy*, vol. 297, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117129.
- [44] T. Yu, F. Luo, C. Pu, Z. Zhao, and G. Ranzi, "Dual-blockchain-based P2P energy trading system with an improved optimistic rollup mechanism," *IET Smart Grid*, vol. 5, pp. 246–259, May 2022, doi:10.1049/stg2.12074.
- [45] 'SOLshare: Driving renewables adoption in Bangladesh by monetizing solar energy for all. UNLOCKED CASE STUDY | by Nelis Global | Medium'. <https://socialmedia-nelis.medium.com/solshare-driving-renewables-adoption-in-bangladesh-by-monetizing-solar-energy-for-all-a39d3fe162ec> (accessed March. 05, 2024).
- [46] 'Exploring the feasibility of peer-to-peer energy trading in Ghana', *Africa Energy Portal*, Jun. 25, 2018. <https://africa-energy-portal.org/blogs/exploring-feasibility-peer-peer-energy-trading-ghana> (accessed Aug. 05, 2024).
- [47] E. Elliott, N. Shanklin, S. Zehtabian, Q. Zhou, and D. Turgut, "Peer-to-Peer Energy Trading and Grid Impact Studies in Smart Communities", in *2020 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, Feb. 2020, pp. 674–678. doi: 10.1109/ICNC47757.2020.9049665.
- [48] A. Onumanyi, S. Isaac, C. Kruger, and A. Abu-Mahfouz, "Transactive Energy: State-of-the-Art in Control Strategies, Architectures, and Simulators", *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, Sep. 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3115154.
- [49] 'Understanding Peer-to-Peer Energy Trading – MindK Blog', *Web and Mobile App Development Company — MindK.com*, May 30, 2022. <https://www.mindk.com/blog/peer-to-peer-energy-trading/> (accessed Aug. 05, 2024).
- [50] Technavio, 'Electricity Trading Market to grow by USD 96.84 Billion and Record a CAGR of about 6% |17000+ Technavio Research Reports'. <https://www.prnewswire.com/news-releases/electricity-trading-market-to-grow-by-usd-96-84-billion-and-record-a-cagr-of-about-6-17000-technavio-research-reports-301266506.html> (accessed Aug. 05, 2024).
- [51] S.Vorrath, 'AGL tests household energy trading using blockchain in Melbourne pilot', *RenewEconomy*, May 26, 2017.

<https://reneweconomy.com.au/agl-tests-household-energy-trading-using-blockchain-in-melbourne-pilot-99263/> (accessed Jul. 07, 2024).

[52] ‘Comparte tu energía (share your energy)’, *Lumio Solar*. <https://lumio.solar/comparte-tu-energia/> (accessed Jul. 07, 2024).

[53] ‘sonnenCommunity’, *sonnen*. <https://sonnengroup.com/sonnencommunity/> (accessed Aug. 23, 2024).

[54] ‘Vandebron - Duurzame energie van Nederlandse bodem’, *Vandebron*. <https://vandebron.nl/> (accessed Jul. 07, 2024).

[55] A. Mujeeb, X. Hong, and P. Wang, “Analysis of Peer-to-Peer (P2P) Electricity Market and Piclo’s Local Matching Trading Platform in UK”, Apr. 2020. doi: 10.1109/EI247390.2019.9061733.

[56] D. Kaczorowska *et al.*, “A Case Study on Battery Energy Storage System in a Virtual Power Plant: Defining Charging and Discharging Characteristics”, *Energies*, vol. 13, p. 6670, Dec. 2020, doi: 10.3390/en13246670.

[57] G. Saulmon, ‘Solar power’s impact on grid seen in record number of “duck curve” days’, *ISO Newswire*, Feb. 13, 2023. <https://isonewswire.com/2023/02/13/solar-powers-impact-on-grid-seen-in-record-number-of-duck-curve-days/> (accessed Jun. 13, 2024).

[58] ‘gridX – Germany’s electricity duck curve’. <https://www.gridx.ai/blog/germanys-duck-curve-integrating-renewables-into-smart-grids> (accessed Jun. 13, 2024).

[59] S. B. Jacobs, “The Energy Prosumer”, *Ecol. Law Q.*, vol. 43, no. 3, pp. 519–579, 2016.

[60] A. Cheng, S. S. Sami, and J. Wu, “Benefits of using virtual energy storage system for power system frequency response”, *Appl. Energy*, vol. 194, pp. 376–385, May 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.06.113.

[61] ‘Virtual or physical battery? Which works best with PV system? | FUERGY’. <https://www.fuergy.com/blog/virtual-physical-battery-storage-comparison> (accessed Feb. 09, 2024).

[62] N. Naval and J. M. Yusta, ‘Virtual power plant models and electricity markets - A review’, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 149, p. 111393, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111393.

[63] F. Blom, ‘A Feasibility Study of Blockchain Technology As Local Energy Market Infrastructure’, 2018. Accessed: May 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Feasibility-Study-of-Blockchain-Technology-As-Blom/11c4e1e83d36b97eddbca7fe7735798a796abd53>

[64] ‘What is a smart contract security audit? A beginner’s guide’, *Cointelegraph*. <https://cointelegraph.com/learn/what-is-a-smart-contract-security-audit-a-beginners-guide> (accessed Jul. 06, 2024).

[65] N. Wang, Z. Liu, P. Heijnen, and M. Warnier, “A peer-to-peer market mechanism incorporating multienergy coupling and cooperative behaviors,” *Appl Energy*, vol. 311, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118572.

[66] C. Garcia-Santacruz, P. J. Gomez, J. M. Carrasco, and E. Galvan, “Multi P2P energy trading market, integrating energy storage systems and used for optimal scheduling,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 64302–64315, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3182698.

[67] T. Huang, Y. Sun, J. Hao, C. Sun, and C. Liu, “A distributed peer-to-peer energy trading model in integrated electric–thermal system,” *IET Renewable Power Generation*, 2023, doi: 10.1049/rpg2.12918.



A

AKILLI ENERJİ YÖNETİM SÜRECİNE AİT KARAR YAPISI

Akıllı Enerji Yönetimi: Optimum Karar Alma Süreci

1. Enerji Durumunun Analizi: Mevcut Durum Ne?

Her an sistemin mevcut enerji durumunun belirlenmesi kritiktir:

- Üretim = Tüketim → Sistem dengededir. İşlem gereksizdir.
- Üretim > Tüketim → Enerji fazlası yönetimi başlatılır.
- Üretim < Tüketim → Enerji açığı yönetimi başlatılır.

Bu analiz, enerji sisteminin güçlü ve zayıf yönlerini belirleyerek, atılacak adımları şekillendirir.

2. Enerji Fazlası Durumunda Optimum Değerlendirme

Enerji fazlası, doğru şekilde yönetilmediğinde ciddi kayıplara yol açabilir. Önerilen sistem, öncelikle düşük maliyetli, sonra orta ve en sonunda maliyetli çözümleri sırasıyla değerlendiren bir yapıdadır.

Aşama 1: P2P Enerji Ticareti Öncelikli mi?

❖ Evetse: Enerji doğrudan ticaretle satılır.

- Neden?
 - Yerel tüketim önceliklidir: Şebekeye gereksiz enerji aktarımı yerine, yerel ticaret tercih edilir.
 - Enerji kayıpları minimize edilir: Uzak mesafeye iletimde kayıplar oluşur, ancak P2P ticaret bu kayıpları en aza indirir.
 - Ekonomik olarak avantajlıdır: Nash pazarlığı ile hem alıcı hem de satıcı için adil fiyat belirlenir.

❖ Hayırsa: Sanal depolama değerlendirilir.

- Neden?
 - Eğer alıcı yoksa veya fiyat rekabetçi değilse, P2P ticareti ekonomik olmayabilir.

- Enerji kayıpları çok yüksekse, ticaret yerine depolama tercih edilir.

Aşama 2: Sanal Depolama Kullanılabilir mi?

- ❖ Evetse: Enerji sanal depolamaya aktarılır.
 - Neden?
 - Fiziksel bataryaya yatırım yapmadan depolama sağlar.
 - Esneklik sunar: Dinamik piyasa fiyatlarına göre en avantajlı zamanda kullanılabilir.
 - Fiziksel bataryaların ömrünü korur.
- ❖ Hayırsa: Fiziksel bataryaya yönlendirilir.
 - Neden?
 - Eğer sanal depolama dolmuşsa veya kullanılamıyorsa, enerji başka bir çözüm gerektirir.

Aşama 3: Fiziksel Batarya Kullanımı Gerekli mi?

- ❖ Evetse: Fiziksel batarya kullanılır.
 - Neden?
 - Son çare olarak devreye girer: Öncelikli olarak daha esnek ve düşük maliyetli çözümler tüketilir.
 - Şarj-deşarj döngüleri kontrol edilir: Gereksiz kullanım önlenerek batarya ömrü uzatılır.
- ❖ Hayırsa: Enerji şebekeye satılır veya üretim kısıtlanır.
 - Neden?
 - Batarya dolmuşsa ve başka seçenek kalmamışsa, şebeke satış opsiyonu veya üretimi kısma stratejisi uygulanır.

3. Enerji Açığı Durumunda Optimum Kaynak Kullanımı

Enerji açığı olduğunda, öncelikli olarak en düşük maliyetli ve verimli kaynaklardan başlanarak enerji sağlanmalıdır.

Aşama 1: P2P Ticaret ile Karşılanabilir mi?

- ❖ Evetse: P2P ticareti ile enerji satın alınır.
 - Neden?
 - Yerel üreticilerden alınan enerji şebekeye göre daha ucuz olabilir.
 - Enerji kayıpları düşükse, doğrudan ticaret daha verimli olur.
- ❖ Hayırsa: Sanal depolama kullanılmalıdır.

- Neden?
 - P2P fiyatları yüksekse veya uygun tedarikçi yoksa, sanal depolama daha ekonomik olabilir.

Aşama 2: Sanal Depolamada Yeterli Enerji Var mı?

- ❖ Evetse: Sanal depolamadan enerji çekilir.
 - Neden?
 - Fiziksel batarya gereksiz yere tüketilmez.
 - Fiyat dalgalanmalarına göre en uygun kaynak belirlenir.
- ❖ Hayırsa: Fiziksel batarya kullanılmalıdır.
 - Neden?
 - Eğer sanal depolama yetersizse, fiziksel bataryadan enerji çekilir.

Aşama 3: Fiziksel Batarya Yeterli mi?

- ❖ Evetse: Fiziksel bataryadan enerji çekilir.
 - Neden?
 - Batarya doluysa, öncelikli olarak buradan enerji sağlanmalıdır.
- ❖ Hayırsa: Şebekeden enerji alınır.
 - Neden?
 - Şebeke enerjisi en pahalı ve en son çare olarak tercih edilmelidir.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Z. Tanis and A. Durusu, “Blockchain-based dual-layer system model for enhanced security in energy trading,” in *Proc. 4th Int. Conf. Recent Academic Studies*, Mar. 4–5, 2025.

Makaleler

1. Z. Tanis and A. Durusu, “Cooperative behaviors and multienergy coupling through distributed energy storage in the peer-to-peer market mechanism,” *IEEE Access*, vol. 99, pp. 1–1, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3529205.

2. Z. Tanis, A. Durusu, and N. Altintas, "A comprehensive review on peer-to-peer energy trading: Market structure, operational layers, energy cooperatives and multi-energy systems," *IET Renewable Power Generation*, vol. 19, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.1049/rpg2.70075.