



**YENİLENEBİLİR SANTRALLERDE
DİJİTALLEŞMENİN ENERJİ ŞİRKETİ
MALİYETLERİNE ETKİSİ**

Yüksek Lisans

Hande Aydemir

Eskişehir 2025

**YENİLENEBİLİR SANTRALLERDE DİJİTALLEŞMENİN ENERJİ ŞİRKETİ
MALİYETLERİNE ETKİSİ**

Hande AYDEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İktisat Ana Bilim

İktisat Programı

Doç. Dr. Sevilay KÜÇÜKSAKARYA

Anadolu Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

05 2025

Eskişehir

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Hande AYDEMİR'in "Yenilenebilir Santrallerde Dijitalleşmenin Enerji Şirketi Maliyetlerine Etkisi" başlıklı tezi .../.../20.. tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi LisansüstüEğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, İktisat Ana Bilim/Ana Sanat dalında İktisat Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Ünvanı Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Danışman):		
Üye :		
Üye :		
Üye :		
Üye :		

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ÖZET

YENİLENEBİLİR SANTRALLERDE DİJİTALLEŞMENİN ENERJİ ŞİRKETİ MALİYETLERİNE ETKİSİ

Hande AYDEMİR

İktisat Ana Bilim/Ana Sanat Dalı

İktisat Programı

Anadolu Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 05 2025

Danışman: Doç. Dr. SEVİLAY KÜÇÜKSAKARYA

Bu tez, yenilenebilir enerji santrallerinde dijitalleşmenin enerji sektörü üzerindeki maliyet etkilerini incelemektedir. Dijitalleşme, enerji üretim ve tüketim süreçlerini optimize etmek için IoT cihazları, yapay zeka ve batarya teknolojilerinin entegrasyonunu içermektedir. IoT cihazları, enerji üretim tahminlerinin doğruluğunu artırarak operasyonel verimlilik sağlamaktadır. Yapay zeka, enerji talebi ve üretim planlamasında hızlı ve hassas tahminler sunarak yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır. Batarya sistemleri ise enerji depolama ve arz-talep dengesi açısından önemli bir çözüm sunmaktadır. Dijitalleşme süreçleri, enerji sektöründeki dengesizlik maliyetlerini düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda karbon salınımını azaltarak sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemektedir. Türkiye enerji piyasası üzerinden seçilen örnek bir yenilenebilir enerji santralinin gün içi piyasadaki ticari performansı otomasyon öncesi ve sonrası verilerle karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Net pozisyon, dengesizlik maliyeti ve kesinleşmiş üretim planından sapma tutarı gibi göstergeler temel alınarak yapılan bu analizde, otomatik ticaret sistemlerinin entegrasyonunun piyasa maliyetlerini anlamlı ölçüde düşürdüğü ortaya konmuştur. Dijitalleşmenin, yalnızca teknik bir iyileşme değil, aynı zamanda ticari rekabetçilik ve sürdürülebilirlik açısından da enerji şirketleri için stratejik bir avantaj sunduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Yenilenebilir enerji, Enerjide dijitalleşme, Enerji piyasası, Otomatik enerji ticareti, Enerji maliyetleri

ABSTRACT

THE DIGITALIZATION OF RENEWABLE POWER PLANTS AND ITS IMPACT ON ENERGY COMPANIES' COSTS

Hande AYDEMİR

Department of Economic

Programme in Economic

Graduate School of Anadolu University, 05 2025

Supervisor: Doç. Dr. SEVİLAY KÜÇÜKSAKARYA

This thesis examines the cost impacts of digitalization in renewable energy power plants on the energy sector. Digitalization involves the integration of IoT devices, artificial intelligence, and battery technologies to optimize energy production and consumption processes. IoT devices enhance the accuracy of energy production forecasts, providing operational efficiency. Artificial intelligence offers rapid and precise forecasts in energy demand and production planning, facilitating the integration of renewable energy sources into the grid. Battery systems present a significant solution for energy storage and supply-demand balancing. Digitalization processes not only reduce imbalance costs in the energy sector but also support sustainability goals by reducing carbon emissions. The commercial performance of a selected renewable energy power plant in Turkey's energy market has been comparatively analyzed using pre- and post-automation data in the intraday market. This analysis, based on indicators such as net position, imbalance cost, and deviation from the finalized production plan, reveals that the integration of automated trading systems significantly reduces market costs. It has been observed that digitalization offers not only technical improvement but also a strategic advantage for energy companies in terms of commercial competitiveness and sustainability.

Keywords: Renewable energy, Digitalization in energy, Energy market, Automated energy trading, Energy costs

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı hazırlarken bana rehberlik eden ve desteğini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Sevilay Küçüksakarya'ya, iş birliği ve anlayışlarıyla bu süreci benim için kolaylaştıran çalışma arkadaşlarıma ve CEO'muz Önder Akar'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca her zaman yanımda olan ve beni motive eden partnerim Toygar Sekmen'e de özel olarak teşekkür ederim.

Enerji sektöründeki teknolojik ilerlemeler, sektörün dinamiklerini kökten değiştiren ve verimliliği artıran bir hızla devam etmektedir. Bu çalışmada, yenilenebilir enerji santrallerinde dijitalleşmenin sektöre olan etkilerini analiz ederek, bu dönüşümün daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmayı amaçladım. Umuyorum ki, bu çalışma, enerji sektöründe daha verimli ve sürdürülebilir çözümler için bir ışık tutar.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “Bilimsel İntihal Tespit” programıyla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.



Hande AYDEMİR

ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ KULLANIM BEYANI

Bu tezi hazırlarken ChatGPT üretken yapay zekâ programından destek aldığımı beyan ederim. Tezin hazırlığı aşamasında üretken yapay zekâ programlarından çeviri, bilimsel makale kaynakçalarına ulaşabilmek adına destek aldım. Üretken yapay zekâ programlarından aldığım bilgilerin doğruluğunu kontrol ettiğimi bildiririm.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Hande Aydemir

İÇİNDEKİLER

BAŞLIK SAYFASI.....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vii
ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ KULLANIM BEYANI.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
KISALTMALAR DİZİNİ	xii
GİRİŞ.....	1
BİRİNCİ BÖLÜM	
1. ENERJİ TİCARETİNDE DİGİTAL DÖNÜŞÜMÜN YERİ	2
1.1. IOT Cihazlarının Enerji Ticaretine Katkısı	4
1.2. Batarya Teknolojisinin Enerji Santrallerinde Kullanımı Ve Ticari Etkileri	7
1.3. Yapay Zekanın Enerji Sektöründe Kullanımı	11
İKİNCİ BÖLÜM	
2. TÜRKİYE’DE ENERJİ PİYASASI OLUŞUMUNA GENEL BAKIŞ	13
2.1. Gün Öncesi Piyasası	15
2.1.1. Saatlik, Blok, Esnek Teklif	18
2.1.2. İkili Anlaşma.....	19
2.2. Gün İçi Piyasası	20
2.3. Dengeleme Güç Piyasası.....	23
2.3.1. Yük Alma Teklif Fiyatı (YALF).....	24
2.3.2. Yük Atma Teklif Fiyatı (YATTF).....	24

2.3.3.	Sistem Marjinal Fiyatı (SMF)	25
2.4.	Türkiye Enerji Piyasası Maliyetleri ve Otomatik Ticaretin Etkisi	26
2.5.	Ticaret İçin Gerekli Pozisyonun Enerji Piyasasında Oluşumu.....	28
2.6.	Kesinleşmiş Üretim Planından Sapma Tutarı	322
BÖLÜM ÜÇ		
3.1.	Dengesizlik Ve KUPST Maliyetini Otomatik Ticaretle Yöneterek Sağlanan Fayda.....	41
SONUÇ		48
KAYNAKÇA		51
ÖZ GEÇMİŞ		58

TABLÖLER DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1 : Sistem Marjinal Fiyatının Belirlenmesi	33
Tablo 2 : Net Pozisyonun Değişimi	37
Tablo 3 : Dengesizlik Maliyeti Dikkate Alınarak Yapılan Ticari İşlem	45
Tablo 4: KUPST Maliyeti Dikkate Alınarak Yapılan Ticari İşlem.....	46
Tablo 5: Poyraz Rüzgar Santrali Gün içi piyasa işlemleri aracılığıyla sağlanan fayda	51



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1 : IoT cihazları ile üretici tüketici birimlerinin takibi	14
Şekil 2: Batarya Santral Şebeke Enerji Akışı.....	16
Şekil 3 : Yapay zekanın enerji sektöründe kullanım alanları	19
Şekil 4 : Gün öncesi teklif setlerinden bir saate ait oluşan arz talep eğrisi.....	24
Şekil 5 : EPIAŞ Gün içi Piyasası İşlem Hacimleri (MW)	29
Şekil 6 : Santral Üretim Planındaki Değişim	35
Şekil 7 : Kesinleşmiş Üretim Planındaki Sapma	42
Şekil 8 : Poyraz RES Gün Öncesi ve Gerçekleşen Üretimin Karşılaştırılması Şubat 2023	53
Şekil 9 : Poyraz RES Gün İçi Piyasasında Ticari İşlemlerin Maliyetlere Etkisi-2023	54
Şekil 10 : Poyraz RES Gün İçi Piyasasında Ticari İşlemlerin Maliyetlere Etkisi - 2024... ..	55

KISALTMALAR DİZİNİ

BESS	:Batarya Enerji Depolama Sistemi (Battery Energy Storage System)
BUDÜP	:Beklenen Uzlaştırma Dönemi Üretim/Tüketim Planı
CME	:Chicago Mercantile Exchange (Chicago Ticaret Borsası)
DGP	:Dengeleme Güç Piyasası
EAK	:Emre Amade Kapasite
EPDK	:Elektrik Piyasası Düzenleme Kurulu
EPIAŞ	:Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.
ETKB	:Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
GİP	:Gün İçi Piyasası
IoT	:Nesnelerin İnterneti
KGÜP	:Kesinleşmiş Günlük Üretim Planı
KUDÜP	:Kesinleşmiş Uzlaştırma Dönemi Üretim/Tüketim Planı
KUPST	:Kesinleşmiş Üretim Planından Sapma Tutarı
NTM	:Net Talimat Miktarı
OMIE	:Operador del Mercado Ibérico de Energía (İspanya ve Portekiz'in elektrik piyasası)
PMUM	:Piyasa Mali Uzlaştırma Merkezi
PTF	:Piyasa Takas Fiyatı
PV	:Fotovoltaik Güneş Sistemi (Photovoltaic)
SDAC	:Single Day-Ahead Coupling (Avrupa'da piyasa entegrasyonu)
SMF	:Sistem Marjinal Fiyat
SRM	:Sekonder Frekans Kontrol Rezerv Miktarı
TEİAŞ	:Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
UDÜPS	:Uzlaştırma Dönemi Üretim/Tüketim Planı Sapması
UEÇM	:Uzlaştırmaya Esas Çekiş Miktarı
UEVM	:Uzlaştırmaya Esas Veriş Miktarı
YAL	:Yük Alma Durumu
YALM	:Yük Alma Miktarı
YALTF	:Yük Alma Teklif Fiyatı
YAT	:Yük Atma Durumu
YATM	:Yük Atma Miktarı
YATTF	:Yük Atma Teklif Fiyatı

GİRİŞ

Yazılım teknolojilerindeki ilerlemelerle birlikte sermaye piyasalarında otomatik alım-satım yapan programlar büyük gelişim göstermiş ve borsadaki işlem hacimlerinin önemli bir kısmını kapsamıştır. Otomatik ticaret sistemlerinin tarihçesine bakıldığında, bu sistemlerin temelini oluşturan kurallar seti 1949 yılında Richard Donchian tarafından tanıtılmıştır. Donchian, fonları alıp satmak için bir dizi kural kullanımı önererek, daha sonra “Donchian trend takibi” olarak bilinen kural tabanlı ticaret yaklaşımını geliştirmiştir. 1980’lerde popülerleşen kural tabanlı ticaret, 1990’lı yıllarda trend takip modellerinin ticari ürünler haline gelmesine olanak sağlamıştır. 1990’ların sonuna doğru Chicago Mercantile Exchange (CME) tarafından elektronik ticaret platformu Globex aracılığıyla ticari emirlerin ilk kez otomatik olarak borsaya gönderilmesi mümkün hale gelmiştir. Böylece, ticaret katılımcıları yalnızca pozisyonlarını belirlemekle kalmamış, aynı zamanda ticaretlerini otomatik olarak gerçekleştirebilmiştir (Narayan et al., 2021).

Ekonomik gelişmelerle birlikte, bireysel ve küçük işlem hacimlerinin ticarete büyük katılımı, ticari işlemlerin yanı sıra yazılım ve veri analiz modellerinin gelişimine de katkı sağlamıştır. Bu gelişmeler, veriyi anlamlandırma, ölçeklenebilir sistem mimarisi, veri dağıtım şeması, hızlı gösterge hesaplama algoritmaları ve paralel veri analizi tekniklerinin gelişimini teşvik etmiştir. Otomatik ticaretin ilerlemesi, yalnızca finansal piyasalarda değil, enerji ticaretinde de önemli etkiler yaratmıştır. Elektrik piyasalarındaki serbestleşme ve yeniden yapılandırma süreci, enerji ticaretinin daha dinamik ve verimli hale gelmesini sağlamış, arz ve talebe yönelik daha hızlı ve doğru kararların alınmasını mümkün kılmıştır (IEA, 2017).

Otomatik ticaretin temel amacı, piyasa dengesizliğini etkin bir şekilde yönetmek ve özellikle enerji ticaretinde, dengesizliklerin minimize edilmesine yardımcı olmaktır. Elektrik piyasasında ticari adımlara gelene kadar, santrallerin operasyonel verilerinin yakından takip edilmesi ve doğru tahminlerin yapılması kritik önem taşır. Bu noktada, IoT cihazlar ve akıllı şebekeler, veri toplama ve analiz süreçlerini optimize ederek santrallerin daha iyi tahmin ve karar mekanizmalarına ulaşmasını sağlar. Ayrıca, dengesizliklerin yönetiminde batarya teknolojilerinin santrallere adaptasyonu, enerji depolama ve arz-talep dengelemesi için önemli bir çözüm sunar. Bu teknolojik dönüşümler, yalnızca ticari karar süreçlerini değil, aynı zamanda enerji piyasasında sürdürülebilirlik ve verimlilik hedeflerini de desteklemektedir (Safi et al., 2023).

Elektrik piyasalarının serbestleşmesi ve özelleştirilmesi; üretim, iletim ve dağıtım süreçlerinin ayrışması, bağımsız düzenleyicilerin kurulması ve rekabetçi piyasaların oluşumuyla sonuçlanmıştır. Piyasa katılımcıları, sistemin dengede tutulması için düzenlemelerle belirlenen sorumlulukları üstlenmekte, hızlı değişimlere müdahale edebilmek için otomatikleştirilmiş süreçlerden faydalanmaktadır. Özellikle fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması ve iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi, dalgalanan enerji fiyatlarının yönetimini ve enerji ticaretinin optimizasyonunu daha kritik hale getirmiştir. Bu noktada, santrallerin 7/24 aktif bir piyasada rekabetçi ve sürdürülebilir bir şekilde faaliyet göstermesi, yalnızca teknoloji adaptasyonu ile mümkün hale gelmiştir (IEA, 2021).

Çalışma kapsamında, birinci bölümde enerji ticaretinde dijital dönüşümün yeri, IoT cihazlarının enerji ticaretine katkısı, batarya teknolojisinin ticari etkileri ve yapay zekanın enerji sektöründeki kullanım alanları detaylandırılmaktadır. İkinci bölümde, Türkiye enerji piyasasının oluşumu, gün öncesi piyasası, gün içi piyasası ve dengeleme güç piyasasının işleyişi açıklanarak, otomatik ticaret sistemlerinin piyasa maliyetlerine etkisi incelenmektedir. Üçüncü bölümde ise, dengesizlik yönetimi ve kesinleşmiş üretim planından sapma tutarının otomatik ticaretle nasıl optimize edilebileceği tartışılmakta ve dijitalleşmenin enerji ticaretindeki ekonomik kazanımları analiz edilmektedir. Çalışma sonunda, enerji piyasalarında dijitalleşmenin yaygınlaşmasıyla birlikte oluşabilecek fırsatlar ve politika önerileri sunulmaktadır (Saldarini et al., 2023).

BİRİNCİ BÖLÜM

1. ENERJİ TİCARETİNDE DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN YERİ

Enerji sektörünün dijital dönüşümü, sürdürülebilir bir geleceğe ulaşmada ve küresel iklim kriziyle mücadelede kritik bir rol oynamaktadır. Teknolojik gelişmeler ve dijitalleşme, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasına ve operasyonel süreçlerin etkinliğinin artırılmasına olanak tanımaktadır. Veri toplama, depolama ve analiz süreçlerindeki ilerlemeler, olası krizlerin erken tespit edilmesini ve geleceğe yönelik sağlıklı planlamaların yapılmasını mümkün kılmaktadır (International Energy Agency, 2017). Bu bağlamda, özellikle Nesnelerin İnterneti (IoT) ve yapay zeka (YZ) gibi teknolojiler, enerji sektörünün temel yapı taşlarını yeniden şekillendirmektedir (Davies, 2021).

Dijital teknolojilerin gelişimiyle birlikte veri depolama ve analiz süreçleri kolaylaşmış, toplanan verilerle daha geniş güven aralıkları içinde analiz yapılabilir hale gelmiştir. Bu durum, enerji sektöründe daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamış, sektörün geleceğe yönelik stratejik planlama yeteneklerini artırmıştır. Özellikle IoT, fiziksel cihazların internet üzerinden birbirine bağlanarak veri alışverişinde bulunmasını sağlamış ve enerji santrallerinde, iletim hatlarında ve tüketici tesislerinde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. IoT teknolojisi, santrallerin en küçük birimlerinden iletim hatlarına kadar birçok süreçte verimlilik optimizasyonu sağlamaktadır. Santrallerde kullanılan IoT cihazları, her bir bileşenin performansını izleyerek enerji üretim süreçlerini daha verimli hale getirmekte, aynı zamanda veri odaklı karar alma süreçlerini desteklemektedir (Whitefield-Madrano, 2023).

Enerji sektörü kapsamında her an veri üretilmektedir. Elektrik üretildiği, tüketildiği ve iletim hatlarından geçtiği her anda bu süreçlerden çeşitli veriler toplanmaktadır. IoT teknolojisi, enerji üretimi, iletimi ve tüketimi süreçlerini birbirine bağlayarak bu verilerin toplanmasını ve analizini optimize etmektedir. Örneğin, bir enerji santralinde IoT sensörleri aracılığıyla toplanan veriler, bu santralin üretim kapasitesini artırmak, arıza tahmini yapmak ve enerji üretim maliyetlerini düşürmek için kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, YZ teknolojisi bu verileri analiz ederek enerji talebi ve arzı arasındaki dengeyi sağlamak, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştırmak ve enerji verimliliğini artırmak için kritik bir rol oynamaktadır (Safi et al., 2023).

Yapay zeka, enerji talep tahminleri, üretim planlaması ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektriğin şebekeye entegrasyonu gibi süreçlerde yüksek doğrulukta öngörüler sunmaktadır. Ayrıca, yapay zeka algoritmaları, değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş ve rüzgar gibi) üretim desenlerini analiz ederek bu kaynakların elektrik şebekesine entegrasyonunu optimize etmektedir. Yapay zeka destekli akıllı yazılımlar, enerji arzı ve talebi arasındaki dengeyi otonom bir şekilde yöneterek enerji sektörünün daha verimli bir yapıya kavuşmasını sağlamaktadır (Hitachi Energy, 2023).

Enerji sektöründe dijital dönüşüm sürecinde en önemli yeniliklerden biri, batarya teknolojilerindeki ilerlemeler ve bu teknolojilerin üretim santrallerine entegrasyonudur. Bataryalar, yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekliliğini sağlamada kritik bir rol oynamaktadır. Güneş ve rüzgar gibi kaynakların kesintili doğası, bu enerjilerin sürekli ve güvenilir bir şekilde kullanılamamasına neden olabilmektedir. Ancak, enerji depolama

sistemleri bu kesintili üretim sorununu çözerek yenilenebilir kaynakların daha etkin bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Örneğin, bir güneş enerji santralinde üretilen fazla enerji, bataryalarda depolanarak güneş ışığının olmadığı saatlerde kullanılabilir. Bu durum, enerji üretim sürecinde süreklilik sağlamak ve enerji kayıplarını minimuma indirmektedir. (McKinsey & Company, 2022).

Üretim santrallerine entegre edilen bataryalar, yalnızca enerji depolama aracı olarak değil, aynı zamanda enerji arz güvenliğini artırmak için de kullanılmaktadır. Batarya sistemleri, şebeke kararlılığını korumak için talep artışlarına veya üretim kesintilerine hızlı bir şekilde yanıt verebilmekte ve bu süreçte enerji arzındaki dengesizlikleri minimize etmektedir. Ayrıca, batarya teknolojilerinin gelişimi, elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte enerji sektöründe daha büyük bir öneme sahip olmuştur. Elektrikli araçların enerji talebini karşılamak için üretim santrallerinde kullanılan batarya sistemleri, hem şarj altyapısının verimliliğini artırmakta hem de enerji yönetimi süreçlerini daha sürdürülebilir hale getirmektedir (Forsyth, 2023).

Enerji sektöründe dengesizliklerin yönetimi, hem bölgesel hem de ulusal düzeyde büyük bir öneme sahiptir. Enerji şirketleri, üretim ve tüketim süreçlerini optimize etmek ve bu süreçlerin çevresel ve ekonomik etkilerini minimize etmek için kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle iletim hatlarının optimum şekilde kullanımı, enerji verimliliğini artırmanın yanı sıra enerji kayıplarını azaltmada etkili bir stratejidir. Enerji şirketleri, IoT ve yapay zeka teknolojilerini kullanarak, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki dengesizlikleri daha etkin bir şekilde yönetebilir. Örneğin, bölgesel dengesizlikler, enerji akışının gerçek zamanlı izlenmesi ve talep tahminleriyle giderilebilirken, ulusal düzeyde enerji şebekesinin stabilitesi sağlanabilir.

1.1. IOT Cihazlarının Enerji Ticaretine Katkısı

Enerji üretim santralleri, modern toplumların enerji talebini karşılamada kritik bir rol oynar. Ancak bu tesislerde üretim süreçlerinin verimli, güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi giderek daha karmaşık bir hale gelmektedir. Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazları, enerji santrallerinde bu karmaşıklığı yönetmek ve operasyonel verimliliği artırmak için devrim niteliğinde bir çözüm sunmaktadır. IoT, enerji üretim süreçlerini gerçek zamanlı veri toplama, analiz etme ve optimize etme yetenekleriyle destekler. Özellikle yenilenebilir enerji santrallerinde IoT cihazları, üretim tahminlerini iyileştirerek arz-talep dengesini sağlamada önemli bir rol oynar. Ayrıca, IoT cihazları ile enerji santralleri arasında oluşturulan bağlantılı sistemler, arıza tahmini, uzaktan izleme ve sürdürülebilir enerji yönetimi gibi kritik işlevlerde

fark yaratmaktadır. Bu teknolojiler, enerji üretim sektörünün dijital dönüşümünü hızlandırırken karbon emisyonlarını azaltma hedeflerine ulaşılmasına da katkı sağlar (IEA, 2017; Whitefield-Madrano, 2023).

Giderek genişleyen ve yenilenebilir enerji kaynaklarına daha fazla bağımlı hale gelen günümüz enerji şebekelerinde, yük talebinin tahmini, sürekli bir enerji arzını sağlamak için kritik bir öneme sahiptir. Şebeke boyunca yerleştirilen IoT sensörleri ve cihazları, yararlı tahminler yapmak için kullanılabilecek hayati verileri toplamamıza olanak tanır. Levi Randall ve arkadaşlarının (2021) yaptığı çalışmada, IoT sensörlerinden elde edilen veriler kullanılarak saatlik yük talebinin son derece hassas bir şekilde tahmin edilebildiği gösterilmiştir. Bu tür tahminler, değişken yenilenebilir enerji kaynakları arasında enerji üretimini güvenilir bir şekilde planlamak ve yönetmek için kullanılabilir (Randall et al., 2021).

IoT cihazlarının kullanımıyla akıllı şebekelere geçiş öncesinde, enerji santralleri ve büyük tüketicilerin üretim veya tüketim verileri, genellikle meskenlerdeki sayaç okuma süreçlerine benzer bir yöntemle takip edilmekteydi. Bu süreçte, belirli bir t zamanında ve $t+1$ zamanında sayaçtan okunan endeks değerleri arasındaki fark hesaplanarak, ilgili zaman aralığındaki üretim veya tüketim miktarına ulaşılmaktaydı. Elde edilen bu veriler, enerji sistemindeki dengesizlikleri yönetmekle sorumlu olan yük tevzi merkezleri veya benzeri kurumsal yapılar tarafından değerlendirilmekteydi. Ancak, bu verilerin ilgili kurumlara iletilmesi süreci büyük ölçüde manuel olarak gerçekleşmekteydi ve enerji üreticileri, özellikle de büyük santral operatörleri tarafından ara yüzler üzerinden sisteme veri girişleri sağlanmaktaydı (IEA, 2021).

Bu manuel veri giriş süreci, her t zaman dilimi için bir operatörün sisteme veri girmesini zorunlu kıldığından, kesintisiz 7/24 mesai gerektiren bir ekip oluşturulmasını gerekli kılmaktadır. Bu durum, operasyonel açıdan oldukça zorlu bir süreç yaratmakta ve aynı zamanda insan kaynaklı hataların oluşma riskini artırmaktadır. Özellikle saatlik zaman dilimlerinin temel alındığı durumlarda, veri giriş frekansı sınırlamaları yenilenebilir enerji santralleri açısından tahminleme süreçlerini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu gibi sınırlamalar, yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken üretim profiline uygun tahminleme yapma kapasitesini kısıtlamakta ve enerji sisteminin genel verimliliğini düşürebilmektedir (Randall et al., 2021).

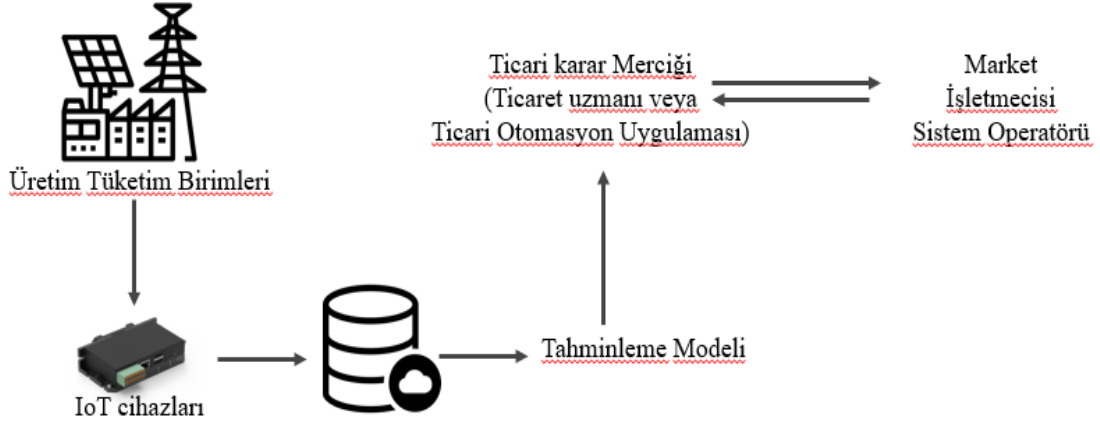
Randall ve arkadaşları (2021) bu konuda yaptıkları araştırmada, IoT cihazlarının tüm teknolojik alanlarda yaygınlaştığını ve farklı türde verileri kolayca erişilebilir hale getirdiğini belirtmektedir. Heterojen IoT kaynaklarından elde edilen bu veriler birleştirilerek, hızlı ve kısa vadeli yük tahminine yönelik uygulanabilir. Bu çalışmada, hava durumu verileri, geçmiş ve mevcut yük talebini birleştirerek bir saatlik yük talebini tahmin etmek amacıyla Long Short-Term Memory (LSTM) tabanlı bir tahmin modeli önerilmektedir. LSTM'ler, zaman serisi verilerinde desenleri tanımlamada ve uzun vadeli bağımlılıkları öğrenmede mükemmel bir performans sergileyerek, uzun süreli tahminler yapılmasına olanak tanır.

Önerilen LSTM modeli kullanılarak, saatlik yük tahmini için Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (MAPE) %0.62 olarak elde edilmiştir. Model, Wavelet Dönüşümleri (WT-LSTM) ile geliştirilmiş ve LSTM modeline göre %16 oranında iyileşme gözlemlenmiştir. Her iki model de, karşılaştırıldıkları Yapay Sinir Ağları (ANN) modellerinden belirgin şekilde daha iyi performans göstermiştir; LSTM ve WT-LSTM modelleri sırasıyla ANN ve WT-ANN modellerini %50 oranında geride bırakmıştır. IoT sensörlerinden gelen sürekli veri akışıyla çalışan bu tür kısa vadeli yük tahmin modelleri, hızlı jeneratör dengelemesi yapmak için kullanılabilir. Böylece şebeke, değişimlere daha hızlı tepki verebilir ve güvenilir bir enerji arzı sağlayabilir (Randall et al., 2021).

Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojileri aracılığıyla enerji santrallerinin üretim ve tüketim eğilimlerini kısa vadede doğru bir şekilde tahmin edebilme yeteneği, enerji ticaretinde önemli bir avantaj sağlamaktadır. IoT sensörlerinden elde edilen yüksek frekansta ve sürekli veri akışı, enerji arz ve talebindeki değişimlerin daha hassas bir şekilde öngörülmesine olanak tanır. Bu tür öngörüler, enerji piyasalarında dengesizlik maliyetlerini azaltmak ve ticari kararların doğruluğunu artırmak için kritik bir rol oynar. Gerçekleşen değerlere yakın tahmin yapabilme kapasitesi, enerji ticareti yapan kuruluşların spot piyasa ve gün içi piyasa işlemlerindeki stratejilerini optimize etmelerine yardımcı olur. Ayrıca, şebeke operatörleri, bu tür tahminlerle jeneratörleri daha verimli bir şekilde dengeleyerek enerji sisteminde güvenilirliği artırabilir. IoT tabanlı tahmin modellerinin bu işlevselliği, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre olduğu sistemlerde esneklik sağlayarak şebekenin genel performansını iyileştirme potansiyeli taşımaktadır (Safi et al., 2023).

Şekil 1

IoT cihazları ile üretici tüketici birimlerinin takibi



Not. Bu şekil, yazar tarafından oluşturulmuştur.

1.2. Batarya Teknolojisinin Enerji Santrallerinde Kullanımı Ve Ticari Etkileri

Günümüzde enerji sektöründe, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve elektrik şebekesinin esnekliği, enerji sistemlerinin sürdürülebilirliği açısından kritik bir önem taşımaktadır. Büyük ölçekli enerji santralleri, elektrik üretiminde yüksek verimlilik sağlarken, sistemdeki dalgalanmalara karşı dirençli yapılarıyla enerji arz güvenliğine katkı sunmaktadır. Bununla birlikte, enerji batarya sistemleri, bu santrallerin operasyonel verimliliğini artırmak ve enerji arz-talep dengesizliğini minimize etmek amacıyla kullanılan yenilikçi teknolojiler arasında yer almaktadır. Büyük santrallerde kullanılan batarya enerji depolama sistemleri, hem yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektriğin entegrasyonunu kolaylaştırmakta hem de enerji piyasalarında esneklik sağlayarak sistem maliyetlerini düşürmektedir. Bu bağlamda, enerji bataryalarının büyük santrallerde kullanımı, enerji üretiminde çevresel sürdürülebilirliği teşvik eden stratejik bir çözüm olarak ön plana çıkmaktadır (IRENA, 2020; McKinsey & Company, 2022).

Enerji santrallerinde bataryaların kullanımı, enerji üretimi, depolanması ve elektrik şebekesiyle entegrasyonu açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu kapsamda, bataryalar ile üretim tesisleri ve elektrik şebekesi arasındaki fiziksel enerji akışları, belirli karar mekanizmalarıyla optimize edilmektedir. Bu akış türleri, batarya teknolojisinin geliştirilmesindeki güvenlik ve performans kriterleri ile doğrudan ilişkilidir. Bates ve arkadaşları (2022), katı hal bataryalarının farklı

başarısızlık senaryolarındaki termodinamik davranışlarını inceleyerek, bu bataryaların güvenlik performanslarının enerji yoğunluğu ve kullanılan malzemelerle doğrudan ilişkili olduğunu vurgulamaktadır (Bates et al., 2022).

Enerji santrallerinde bataryaların kullanımı, enerji üretimi, depolanması ve elektrik şebekesiyle entegrasyonu açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu kapsamda, bataryalar ile üretim tesisleri ve elektrik şebekesi arasındaki fiziksel enerji akışları, belirli karar mekanizmalarıyla optimize edilmektedir. Bu akış türleri şu şekilde tanımlanabilir:

Santralden Bataryaya Enerji Akışı: Üretim tesislerinden (örneğin, güneş panellerinden) üretilen enerjinin bataryalara aktarılmasıdır. Bu yöntem, fazla enerjinin depolanmasını ve ihtiyaç duyulan zamanlarda kullanılmasını sağlar.

Santralden Şebekeye Enerji Akışı: Üretim tesislerinde üretilen enerjinin doğrudan elektrik şebekesine iletilmesidir. Bu yöntem, anlık enerji talebini karşılamak için uygulanır.

Bataryadan Şebekeye Enerji Akışı: Bataryalarda depolanan enerjinin elektrik şebekesine satılmasıdır. Bu yaklaşım, enerji arz ve talep dengesini sağlamak için önemli bir rol oynar.

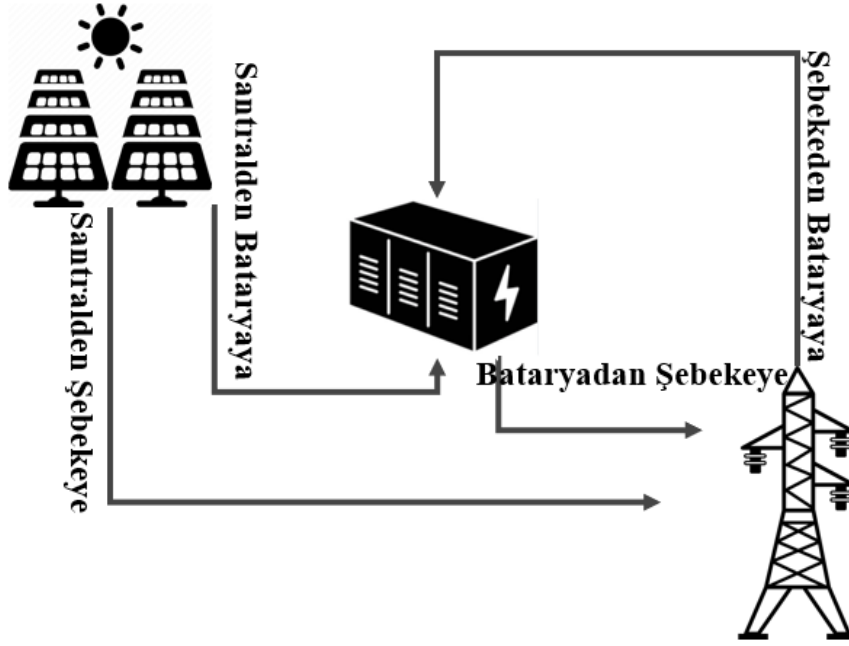
Şebekeden Bataryaya Enerji Akışı: Elektrik şebekesinden alınan enerjinin bataryalara depolanmasıdır. Bu yöntem, düşük maliyetli enerji dönemlerinde enerji depolayarak gelecekte kullanılmak üzere rezerv oluşturmayı hedefler.

Enerji Kısıntısı: Üretim kapasitesinin talebe veya batarya kapasitesine uyum sağlayamadığı durumlarda, enerji üretiminin sınırlandırılmasıdır. Bu durumda üretilen enerji kullanılamaz ve boşa gider.

Bu akış türleri, enerji üretim tesisleri ile elektrik şebekesi arasında enerji yönetiminin en verimli şekilde sağlanması için planlanmaktadır. Bataryalar, enerji arz ve talebi arasındaki dalgalanmaları dengeleyerek sistemin daha verimli çalışmasına ve sürdürülebilir enerji yönetimine önemli katkılar sunmaktadır (IRENA, 2019).

Şekil 2

Batarya Santral Şebeke Enerji Akışı



Not. Bu şekil, yazar tarafından oluşturulmuştur.

Batarya enerji depolama sistemleri (BESS), enerji sektöründe yenilenebilir enerji entegrasyonu, şebeke stabilitesi ve enerji ticareti süreçlerinde kilit bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Lityum iyon bataryalar, verimlilik, ölçeklenebilirlik ve operasyonel esneklik gibi özellikleriyle BESS uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu sistemler, enerji üretim fazlalığını düşük talep dönemlerinde depolayıp, ihtiyaç anında kullanıma sunarak sürdürülebilir enerji yönetimine katkıda bulunmaktadır (Saldarini et al., 2023).

Peng, C.-Y., & Kuo, C.-C. (2021) yılında yaptığı araştırmada "PV-Plus-BESS" (Fotovoltaik Güneş Sistemi ve Batarya Enerji Depolama Sistemi) uygulamalarının "arka tarafta sayaç" (Behind-the-Meter, BTM) analizine odaklanılmıştır. Endüstriyel bir kullanıcı örneği üzerinden, enerji maliyetlerini düşürmek için PV ve batarya kapasiteleri ölçümlenmiş ve enerji maliyetlerinde %33,66 tasarruf sağlanmış. Özellikle düşük enerji fiyatlarına sahip ülkelerde önemli maliyet tasarrufu sağlanabileceği belirtilmiştir (Peng & Kuo, 2021).

Şebeke Yönetimindeki Rolü:

BESS, şebeke stabilitesini artırma ve enerji dengesizliklerini azaltma kabiliyeti ile kritik bir öneme sahiptir. Şebekede enerji arz ve talep dengesizliklerini dengelemek için hızlı tepki verebilme yeteneğine sahiptir ve talep yoğunluğu dönemlerinde enerji sağlama işlevi görerek elektrik kesintilerinin önlenmesine katkıda bulunur (IRENA, 2020).

Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu:

Bu sistemler, rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksizliğini azaltmak ve bu kaynakların sürekli kullanılabilirliğini sağlamak için kritik bir rol oynar. Yenilenebilir enerji üretim fazlalıklarını depolayıp talep arttığında kullanıma sunarak enerji arz-talep dengesini sağlamada önemli bir araçtır (IEA, 2021).

Enerji Ticareti ve Pazar Katılımı:

BESS, enerji piyasalarında farklı ölçeklerde kullanılmaktadır:

Ön Sayaç (FTM): Büyük ölçekli uygulamalarda enerji arbitrajı, frekans düzenleme ve şebeke destek hizmetleri sağlar.

Arka Sayaç (BTM): Konut ve ticari alanlarda enerji maliyetlerini düşürme, yedek güç sağlama ve yenilenebilir enerji kullanımını optimize etme işlevleriyle kullanılır (Padmanabhan et al., 2020).

Pazar Eğilimleri ve Zorluklar:

Araştırma, büyük ölçekli enerji depolama projelerine olan yatırımların arttığını ve hükümet teşvikleriyle desteklenen yenilenebilir enerji hedeflerinin BESS projelerini hızlandırdığını ortaya koymaktadır. Ancak, bataryaların maliyetleri, ömürleri ve geri dönüşüm süreçleri hala önemli zorluklar arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, katı hal bataryalar gibi yeni teknolojiler, gelecekte daha güvenli ve etkili enerji depolama seçenekleri sunma potansiyeline sahiptir (Saldarini et al., 2023).

Bu araştırma, batarya enerji depolama sistemlerinin sürdürülebilir bir enerji altyapısına geçişte nasıl kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Hem teknik hem de ekonomik boyutlarıyla ele alınan BESS, gelecekteki enerji dönüşümüne önemli katkılar sağlayacaktır.

Padmanabhan, Ahmed ve Bhattacharya'nın (2020) çalışmasında, batarya enerji depolama sistemlerinin (BESS) piyasa katılımının enerji maliyetlerini düşürerek sosyal refahı artırdığı ve sistemin ekonomik ömrünü uzattığı belirtilmiştir. Bu sonuca, BESS'in fiziksel ve operasyonel özelliklerini (örneğin, şarj durumu - SOC, deşarj oranı ve bozulma maliyetleri) dikkate alan bir operasyonel maliyet modeli geliştirilerek ve bu modelin enerji ve yedekleme piyasalarında uygulanmasıyla ulaşılmıştır. Ayrıca, LMP (Locational Marginal Price) temelli matematiksel bir modelle enerji piyasalarına entegrasyonu desteklenmiş ve bu süreçte şarj teklifleri ve deşarj taleplerini temsil eden bir yapı önerilmiştir (Padmanabhan et al., 2020).

1.3. Yapay Zekanın Enerji Sektöründe Kullanımı

Enerji sektöründe dijital dönüşümün hız kazandığı günümüzde, yapay zeka (YZ) teknolojileri, enerji ticaretinden üretim planlamaya, arıza tespitten izleme sistemlerine kadar birçok alanda yenilikçi çözümler sunmaktadır. Özellikle, enerji piyasalarının karmaşıklığı ve yenilenebilir kaynakların entegrasyonu ile birlikte ortaya çıkan belirsizlikler, YZ uygulamalarının önemini artırmaktadır. Yapay zeka algoritmaları, büyük veri setlerini analiz ederek daha hızlı ve doğru tahminler yapmayı, arıza ve anomalileri önceden tespit etmeyi ve enerji üretim süreçlerini optimize etmeyi mümkün kılmaktadır (Safari et al., 2024; Azevedo et al., 2024).

Safari ve arkadaşlarının (2024) çalışmasında, enerji yönetim sistemlerinde yapay zeka ve makine öğrenimi (ML) kullanımını ve enerji sektörü üzerindeki etkisini ele alan 200'den fazla bilimsel makalenin (45 inceleme ve 155'ten fazla araştırma çalışması) bulgularını bir araya getirdikleri çalışmada tespit edilmiştir ki; bu alandaki gelişmeler güvenilirlik ve dayanıklılığı artırarak enerji sisteminin etkin bir şekilde geliştirilmesine katkı sağlayabilir. YZ ve ML'nin hızlı ilerlemesi, enerji yönetim sistemlerini (EMS'ler) köklü bir şekilde dönüştürerek tahmin, arıza tespiti, elektrik piyasaları, binalar ve elektrikli araçlar gibi çeşitli alanlarda büyük bir değişim yaratmaktadır.

Çoğunlukla fiyat modelleri için Conejo ve arkadaşları (2005), Aggarwal ve arkadaşları (2009), Illic ve arkadaşları (2011), Dudek (2016), Ghasemi ve arkadaşları (2016) ve Ghoddusi ve arkadaşları (2019) yılları arasında yayınlanan birçok makalede enerji fiyatlarının tahmini (örneğin, ham petrol, doğal gaz ve elektrik), talep tahmini, risk yönetimi, ticaret stratejileri, veri işleme ve makro/enerji trendlerinin analizi gibi alanlardaki uygulamalarda yapay zekanın başarılı sonuçlarını değerlendirmiştir (Conejo et al., 2005; Aggarwal et al., 2009; Dudek, 2016; Ghoddusi et al., 2019).

Benzer şekilde, Azevedo ve arkadaşları (2024), optimizasyon ve makine öğrenmesi yöntemlerini birleştiren hibrit yaklaşımları ele almış ve bu yöntemlerin enerji yönetiminde yenilikçi çözümler sunduğunu vurgulamıştır. Özellikle, kümeleme ve sınıflandırma gibi görevler için hibrit algoritmaların, enerji sistemlerindeki karmaşık problemlerin çözümünde geleneksel yöntemlere kıyasla daha etkili sonuçlar ürettiği belirtilmiştir. Hibrit yöntemlerin, optimizasyon ve makine öğrenimi algoritmalarının güçlü yönlerini birleştirerek sistemlerin

performansını artırdığı ve bu yöntemlerin enerji yönetimi süreçlerinde daha yaygın olarak benimsenmesi gerektiği ifade edilmiştir. Ayrıca, makalede, hibrit yaklaşımların gelecekteki araştırmalar için çerçeve sunabileceği ve enerji sektöründeki dijital dönüşümü hızlandırabileceği öne sürülmektedir (Azevedo et al., 2024).

Yapay zekanın en yoğun kullanımı ön görülmesi güç olan, yenilenebilir enerji santrallerinin geleceğe yönelik planlamasını kolaylaştırmak amacıyla tahminleme modellerinde kullanılmasıdır. Kratzenberg ve arkadaşlarının 2021 yılındaki araştırmasına göre yenilenebilir enerji santralleri, özellikle rüzgar ve fotovoltaik enerji santralleri tarafından gerçekleştirilen enerji üretiminin mevcut genişlemesinin, doğal olarak sahip olduğu üstel büyüme fonksiyonu nedeniyle 2030 yılında %100 yenilenebilir enerji arzına yol açacağı varsayılmaktadır. Bu tür bir %100 yenilenebilir enerji üretimine geçişi mümkün kılacak koşulları tartışıldığında, bu arz yönetimlerinin tahminlenmesi ve yönetilmesinde IoT cihazlarından gelen verilerin YZ yöntemleriyle tahminlenmesi hatta batarya sistemleriyle birlikte enerji arzının yönetilmesinde büyük bir çağın eşiğinde olduğumuz gözükmektedir (Kratzenberg et al., 2021).

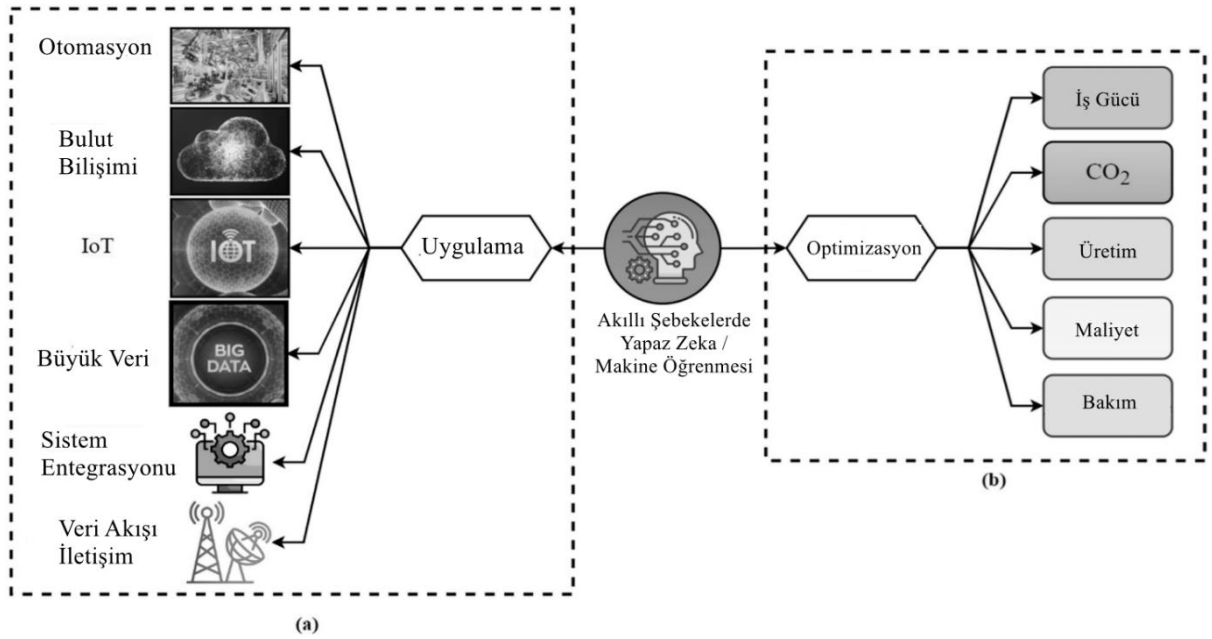
Elsisi ve arkadaşlarının (2023) çalışması, IoT cihazları ve yapay zekanın enerji yönetimi üzerindeki etkisini daha da derinlemesine incelemektedir. Çalışmada, talep tarafı enerji yönetimi ve enerji tasarrufu için kullanılan IoT tabanlı sistemlerin, yapay zeka ve makine öğrenimi modelleriyle birleştirilerek nasıl daha verimli hale getirilebileceği açıklanmıştır. Örneğin, akıllı enerji yönetim sistemlerinin (IEMS), IoT sensörleri ve takviyeli öğrenme (Reinforcement Learning) algoritmalarıyla desteklenerek enerji tüketimini optimize ettiği ve sistem maliyetlerini düşürdüğü belirtilmiştir. Ayrıca, IoT'nin sağladığı büyük veri analiz yetenekleri sayesinde enerji tüketim modellerinin daha iyi tahmin edilebildiği ve böylece düşük enerji maliyetli dönemlerde operasyonel stratejilerin optimize edilebildiği vurgulanmıştır (Elsisi et al., 2023).

Safari ve arkadaşlarının (2024) çalışmasından örnek alınan aşağıdaki görselde anlatıldığı üzere yapay zeka, akıllı şebekelerde verimlilik artırma amacıyla iş yüklerini veri merkezleri arasında dağıtmak gibi birçok alanda kullanılabilir. Ayrıca, enerji santrallerinden kaynaklanan enerji tüketimini ve CO2 emisyonlarını azaltmak için çalışmalar yapılmış, yeni enerji tasarruf yöntemlerinin etkinliğini artırmaya yönelik uygulamalar geliştirilmiştir. Modern endüstride enerji maliyetleri, üretim giderlerinin önemli bir kısmını oluşturduğundan, bu maliyetleri kontrol altına almak karar alıcılar için kritik öneme sahiptir. AI ve makine

öğrenimi (ML) modelleri sayesinde veriler, makinelerin sadece ihtiyaç duyulduğunda çalıştırılmasını sağlayan matematiksel modeller oluşturmak için kullanılabilir. Bu sayede enerji tüketimi azalırken, düşük enerji fiyatlı dönemlerde operasyonların kaydırılmasıyla ek maliyetler düşürülebilir ve talep zirvelerinde yeni enerji santrallerine ihtiyaç duyulması önlenebilir. Böylece, enerji üretimi daha düşük karbon salınımıyla sürdürülebilir hale gelir (Safari et al., 2024).

Şekil 3

Yapay zekanın enerji sektöründe kullanım alanları



Kaynak: Safari, A., Daneshvar, M., & Anvari-Moghaddam, A. (2024)

İKİNCİ BÖLÜM

2. TÜRKİYE'DE ENERJİ PİYASASI OLUŞUMUNA GENEL BAKIŞ

Türkiye'de enerji piyasalarının oluşumu, 1980'li yıllarda başlayan kamu yönetimi reformları ile enerji sektörünün yeniden yapılanması çerçevesinde şekillenmiştir. Bu süreçte özelleştirme politikaları, serbestleşme ve piyasa ekonomisi ilkelerinin benimsenmesi, enerji alanında da rekabetçi piyasa yapılarının oluşturulmasını gündeme getirmiştir (Alagöz & Aydın, 2017). 1990'lı yılların sonlarına doğru enerji arz güvenliğinin sağlanması, yatırım ortamının iyileştirilmesi ve fiyatların piyasa koşullarına göre belirlenmesi amacıyla düzenleyici reformlara ihtiyaç duyulmuştur.

Bu kapsamda, 2001 yılında yürürlüğe giren 4628 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu ile Enerji

Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) kurulmuştur. EPDK, elektrik piyasasında şeffaflık, tarafsızlık ve öngörülebilirlik ilkelerine dayalı bir yapı oluşturarak, sektör oyuncularını arasında adil rekabet koşullarını tesis etmeyi amaçlamıştır. Bu kuruluş, aynı zamanda Bakanlık yetkilerinin bir kısmını devralarak elektrik piyasasının serbestleşmesi sürecinde düzenleyici ve denetleyici bir kurum olarak konumlandırılmıştır (Ataay, 2002).

EPDK'nın temel görevleri arasında; tüzel kişilere faaliyet lisansları verilmesi, piyasa performansının izlenmesi ve raporlanması, düzenlemeye tabi tarifelerin hazırlanması ve uygulanması, piyasa katılımcılarının kanuna uygun davranmalarının sağlanması yer almaktadır. Bu görev tanımı, EPDK Faaliyet Raporu'nda da detaylı şekilde açıklanmıştır (EPDK, 2013). Kurum, ikincil mevzuatın hazırlanması ve güncellenmesi konusunda da aktif rol üstlenmiş, elektrik piyasasının gelişimine yön veren birçok düzenleyici karara imza atmıştır.

Elektrik sektöründeki serbestleşme çabaları yalnızca yasal düzenlemelerle sınırlı kalmamış, aynı zamanda kurumsal reformlarla da desteklenmiştir. 2004 yılında kabul edilen Elektrik Enerjisi Sektörü Reformu ve  zelleştirme Strateji Belgesi, sektördeki özelleştirmeleri hızlandırmayı ve elektrik ticaretinin temellerini oluşturan elektrik borsasının kurulmasını öngörmüştür. Bu belge ile birlikte, geçici dengeleme ve uzlaştırma mekanizması hayata geirilm ş, 2006-2009 yılları arasında elektrik piyasasında önemli yapısal dönüşümler gerçekleştirilmiştir (Yeldan & Voyvoda, 2012).

2009 yılında Gün  ncesi Piyasası'nın (G P) kurulmasıyla birlikte, elektrik piyasasında alım ve satım işlemlerinin bir gün öncesinden planlı şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanınmıştır. Bu durum, hem arz-talep dengesinin sağlıklı bir şekilde yönetilmesini hem de fiyatların rekabetçi koşullarda belirlenmesini mümkün kılmıştır. G P' n yanı sıra, 2011-2015 yılları arasında Piyasa Mali Uzlaştırma Merkezi (PMUM), Türkiye Elektrik İletim A.ř. (TEİAş) bünyesinde faaliyet göstermiş ve gerçek zamanlı fiziksel dengeleme ile mali uzlaştırma görevlerini yerine getirmiştir (etintaş & Biçil, 2015).

Türkiye'de enerji piyasalarının gelişiminde önemli bir kilometre taşı da 2013 yılında yürürlüğe giren 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu'dur. Bu kanun, piyasa işletmeciliği faaliyetlerine hukuki dayanak kazandırmış ve 2015 yılında Enerji Piyasaları İşletme A.ř. (EPİAş) resmen faaliyete geçmiştir. EPİAş'ın kuruluşuyla birlikte, gün öncesi piyasası, gün içi piyasası ve dengeleme güç piyasası, organize enerji borsası yapısında EPİAş tarafından işletilmeye başlanmıştır. Bu gelişme, Türkiye enerji piyasasının şeffaf, rekabetçi ve güvenilir bir yapıya kavuşmasında belirleyici olmuştur (Erdem, 2019).

Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği, bu yapının teknik ve idari çerçevesini belirleyen temel mevzuat metinlerinden biridir. Yönetmelik, sistem dengesizliği ve mali uzlaştırma süreçlerine ilişkin yükümlülükleri belirlemekte, piyasa katılımcılarının bu süreçlerdeki rol ve sorumluluklarını tanımlamaktadır. 2025 yılında yapılan güncelleme ile birlikte, yönetmelikte önemli bir yenilik olarak "toplayıcılık" lisans türü tanımlanmıştır. Bu kapsamda, toplayıcılık; bir veya birden fazla şebeke kullanıcısının tüketim ve/veya üretimlerinin birleştirilerek elektrik piyasasında işlem yapılmasını mümkün kılan yeni bir piyasa katılım biçimi olarak yer almıştır. Toplayıcı lisansı sahipleri, topluluk bazlı üretim ve tüketim birimlerini yöneterek piyasa katılımını daha esnek ve etkin hale getirebilmektedir. Yönetmelikte tanımlanan "toplayıcılık faaliyetleri", enerji sisteminin daha adil ve katılımcı hale gelmesine olanak tanımakta, aynı zamanda enerji arz güvenliği ve sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sunmaktadır (Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği, 2025).

Türkiye'de enerji piyasalarının oluşumu; yasal düzenlemeler, kurumsal yapılanmalar ve teknik altyapı reformlarıyla desteklenmiş çok boyutlu bir dönüşüm sürecidir. EPDK'nın düzenleyici rolü, EPIAŞ'ın piyasa işletmeciliği işlevi ve Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği gibi ikincil mevzuat metinleri, bu dönüşümün temel yapı taşlarını oluşturmaktadır.

2.1. Gün Öncesi Piyasası

Gün öncesi piyasası, enerji ticaretinin temel yapı taşlarından biri olarak, ertesi gün için üretim ve tüketim planlarının optimize edilmesini sağlayan bir piyasa modelidir. Bu piyasada, elektrik üreticileri ve tüketiciler, enerji ticaretine konu olacak miktarları ve bu miktarları hangi fiyatlarla alıp satmak istediklerini piyasayı işleten kuruma, Türkiye'de EPIAŞ'a (Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.), iletmektedir. Gün öncesi piyasası, enerji arz ve talebinin bir araya getirildiği ve bu süreçte piyasa takas fiyatının (PTF) olduğu organize bir ticaret platformudur.

Gün öncesi piyasasında, piyasa katılımcıları belirli teklif türleri kullanarak işlemlerini gerçekleştirirler. Bu teklifler genellikle saatlik teklifler, blok teklifler ve esnek teklifler olarak sınıflandırılmaktadır. Katılımcılar, D günü için enerji alış ve satış tekliflerini, D-1 günü mevzuat tarafından belirlenen bir saat dilimine kadar EPIAŞ'a iletme zorundadır. EPIAŞ, bu teklifleri toplayarak arz ve talep eğrilerini oluşturur ve bu eğrilerin kesişim noktasını kullanarak piyasadaki faydayı maksimize edecek şekilde piyasa takas fiyatını belirler. PTF, hem alıcılar hem de satıcılar için işlemlerin gerçekleşeceği fiyatı ifade eder ve tüm katılımcılar bu fiyat üzerinden ticaretlerini tamamlar. Bu süreçte, arz ve talebin matematiksel modellenmesi,

piyasanın dengeye ulaşmasında kritik bir rol oynar.

Türkiye’de gün öncesi piyasası, yalnızca merkezi bir teklif toplama ve dengeleme mekanizması olarak çalışmaktadır. Katılımcıların teklifleri doğrudan EPIAŞ tarafından toplanmakta ve merkezi bir model üzerinden fiyatlandırılmaktadır. Bu sistem, piyasada şeffaflık ve güvenilirlik sağlarken, enerji ticaretinin standart bir çerçeve içinde yürütülmesine olanak tanımaktadır. Ancak, Türkiye’de gün öncesi piyasasına ek olarak ihale mekanizması bulunmamaktadır, bu durum enerji ticareti süreçlerinin Avrupa piyasalarına göre daha sınırlı bir yapı içinde işletildiğini göstermektedir.

Avrupa enerji piyasalarında ise Türkiye’den farklı olarak, hem gün öncesi piyasası hem de ihale mekanizmaları bir arada bulunmaktadır. Bu yapı, enerji ticaretinin daha esnek bir çerçevede yürütülmesini sağlamaktadır. Avrupa’daki enerji piyasalarının organize yapısı, piyasaların daha etkin, şeffaf ve rekabetçi bir şekilde işlemlerini hedeflemektedir. Örneğin, İspanya’nın OMIE (Operador del Mercado Ibérico de Energía) ve Avrupa’nın önde gelen enerji piyasaları olan Nord Pool ve EPEX Spot, gün öncesi piyasası ile birlikte ihale mekanizmasını da etkin bir şekilde kullanmaktadır.

OMIE Piyasası: OMIE’nin işleyişinde, gün öncesi piyasası piyasa katılımcılarının D-1 günü içerisinde tekliflerini sunduğu ve ertesi günün fiyatlarının belirlendiği organize bir yapıya sahiptir. Katılımcılar, 24 saatlik bir zaman dilimi için arz ve talep tekliflerini sunarlar. OMIE, bu teklifleri toplayarak arz ve talep eğrilerinin kesişim noktasını kullanır ve her saat için elektrik fiyatlarını belirler. Bu süreçte, fiyat oluşumu şeffaf bir şekilde gerçekleştirilir ve katılımcıların piyasa takas fiyatı üzerinden işlemlerini tamamlaması sağlanır. Ayrıca, OMIE’de gün öncesi piyasasına ek olarak düzenlenen ihale oturumları, piyasa katılımcılarının ticari faaliyetlerini optimize etmelerine olanak tanır. Bu ihalelerde, katılımcılar daha uzun vadeli ticaret anlaşmaları yapabilir ve bu anlaşmalara ilişkin fiyat ve miktar kararlarını serbest bir şekilde belirleyebilir.

Ratliff ve Grasso’nun (2014) araştırmasında da yer aldığı üzere Nord Pool ve EPEX Spot: Avrupa’nın en büyük enerji piyasalarından biri olan Nord Pool, gün öncesi piyasasını ve ihale mekanizmalarını birlikte işleten bir sistem sunmaktadır. Katılımcılar, D-1 günü tekliflerini sunar ve bu teklifler üzerinden PTF belirlenir. Bununla birlikte, Nord Pool’da ihale mekanizmaları, piyasa katılımcılarının daha uzun vadeli ticaret planlamalarını desteklemek için devreye girmektedir. EPEX Spot piyasasında ise saatlik teklifler üzerinden gerçekleşen gün öncesi piyasasına ek olarak, katılımcılar ihaleler yoluyla daha esnek ticaret fırsatlarına erişebilmektedir. Bu durum, piyasa dinamiklerini zenginleştiren bir yapı sunar.

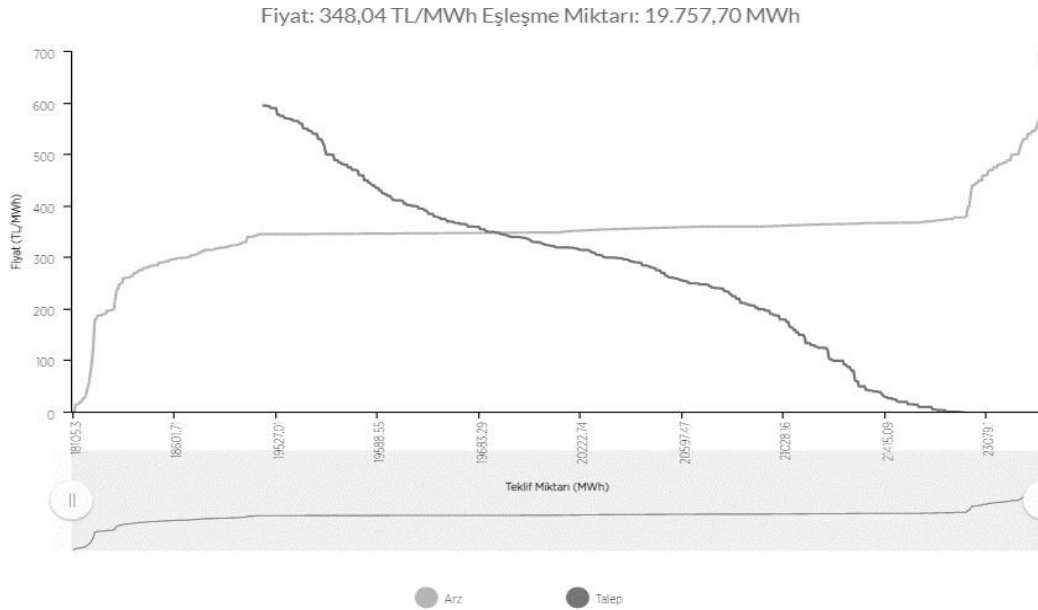
Avrupa piyasalarında, ihale mekanizmaları ve gün öncesi piyasalarının bir arada bulunması, enerji ticaretinde daha geniş bir yelpaze sunar. Bu çift yapı, fiyat şeffaflığını artırmanın yanı sıra sınır ötesi ticareti de desteklemektedir. Özellikle Single Day-Ahead Coupling (SDAC) adı verilen ve Avrupa'daki farklı ülkelerin enerji piyasalarını birbirine entegre eden sistem, enerji ticaretinin sınırların ötesinde gerçekleşmesini sağlar. Bu sistem sayesinde, piyasa katılımcıları hem yerel hem de uluslararası piyasalarda daha etkili bir şekilde ticaret yapabilirler.

Türkiye'nin enerji piyasalarında yalnızca gün öncesi piyasasının bulunması, mevcut ticaret yapısının daha sınırlı bir çerçevede yürütülmesine yol açmaktadır. Avrupa'daki piyasalar ise gün öncesi piyasasını ihale mekanizmaları ile birleştirerek enerji ticaretine daha esnek ve kapsamlı bir yaklaşım sunmaktadır. Avrupa'da ihalelerin dahil edilmesi, piyasa katılımcılarının ticaret planlamalarını optimize etmelerine olanak tanırken, aynı zamanda piyasa fiyatlarının daha rekabetçi bir şekilde oluşmasını sağlamaktadır. Türkiye'nin bu mekanizmalardan öğrenebileceği çok şey bulunmaktadır.

Gün öncesi piyasasına ihale mekanizmalarının eklenmesi, Türkiye'de enerji piyasasının uluslararası standartlara uyumunu artırabilir ve enerji ticaretine yeni fırsatlar sunabilir. Bu tür bir yapı, Türkiye'nin enerji ticaretindeki rekabetçiliğini artırarak piyasanın daha şeffaf, etkin ve sürdürülebilir bir yapıya kavuşmasını sağlayabilir.

Şekil 4

Gün öncesi teklif setlerinden bir saate ait oluşan arz talep eğrisi



Kaynak: Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPIAŞ Seffaflık Platformu) 2024

2.1.1. Saatlik, Blok, Esnek Teklif

Piyasa katılımcısı Gün Öncesi bildirimini stratejisine uygun olarak saatlik teklif tipi, blok veya esnek olarak kullanabilir. Piyasa katılımcısının piyasaya üretim ve tüketim kanalından girişi teklif tiplerini belirlerken temel faktördür.

Saatlik teklifler alış yönünde 32, satış yönünde 32 en fazla 64 seviyeden oluşurlar. Saatlik tekliflerde seviyelere ait fiyatlar artan biçimde belirlenir, tek bir fiyat seviyesinde ve tek bir saatte geçerli hem alış hem satış yönünde saatlik teklif bulunamaz. Piyasa katılımcısı bu kurallara göre teklifini verirken, açıklanan piyasa takas fiyatına göre kesişim anındaki teklif miktarının kabul edilecektir. Piyasa katılımcılarının özellikle altında yenilenebilir santral olup bu santrallerin üretimlerini piyasaya satış yönlü teklif veren veya tüketicilerin ihtiyaçları için piyasada alıcı teklif verenler fiyat ne çıkarsa çıksın satma veya alma yani fiyattan bağımsız teklif verme eğilimine sahiptir. Örneğin bir rüzgar santrali rüzgar estiğinde fiyat ne çıkarsa çıksın üretim gerçekleştirme potansiyelinden dolayı, üretime baz olan temel girdisinin rüzgar olması ve bir maliyetinin olmamasından dolayı açıklanacak fiyat 0 veya azami fiyat olsa dahi saatlik teklif verme eğilimindedir (Dursun, Eke ve Tezcan, 2020).

Fiyat, miktar ve zaman dilimi bilgilerini içeren blok teklifler 3 ila 24 saati kapsar. Bu teklifler kapsamında, teklif verilen saatler ardışık ve tam saat dilimi şeklinde ifade edilirler ve bölünmeden işlem gördüğü için bu şekilde adlandırılırlar. Bir blok teklif verilirken hangi saatleri kapsadığı piyasa yapıcısına bildirilir, kapsadığı zaman dilimi için bu teklifin tamamı ilgili saatler için kabul edilir ya da hiç kabul edilmez. Blok teklif kapsamında alış veya satış yönlü olmak üzere maksimum 6 adet bağlı blok teklifi verilebilir. (Dursun, Eke ve Tezcan, 2020). Bu teklif tipi üretime başladığında birkaç saat blok halinde üretmek zorunda olan, yani başlangıç maliyeti yüksek olan doğalgaz veya kömür gibi santral tiplerine çok uygundur, benzer şekilde blok halinde tüketim yapacak şirketler de çalışma saatini blok halinde ayarlaması gereken büyük sanayi grupları için de blok teklif kullanılabilir.

Esnek tekliflerde belli bir zaman aralığı boyunca belli bir teklif süresi boyunca değişiklik gösteren miktarlar söz konusudur ve esnek teklifler, bu miktarlar için tek fiyat bilgisini içerirler. Esnek teklifler, alış veya satış yönünde, 8 ila 24 saati diliminde verilir ve en fazla 4 saat süresince verilebilirler. Katılımcılar, bir teslim gününde, aynı zaman aralığında veya farklı zaman aralıklarında en fazla 6 adet esnek teklif verebilirler. Bu tekliflerin, teklif süresinde geçerli hem alış hem de satış miktarı bulunamaz (Dursun, Eke ve Tezcan, 2020).

2.1.2. İkili Anlaşma

Gün öncesi teklif mekanizması bahsedilirken, piyasa katılımcılarının almak veya satmak istedikleri elektrik miktarını belirli teklif tiplerine uygun olarak piyasa yapıcısına bildirdikleri ifade edilmiştir. Bu mekanizmada, piyasa katılımcıları EPIAŞ'a (Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.) maksimum beş güne ait teklif setlerini sunabilir ve bu teklifler piyasa takas fiyatı (PTF) ile işleme alınır. Bu yapı, merkezi bir piyasa mekanizması çerçevesinde işlem yapmayı sağlar ve piyasa şeffaflığı ile düzenlemelerin daha sıkı bir şekilde uygulanmasını mümkün kılar (EPIAŞ, 2023; Yumurtacı & Akkaya, 2020). Ancak, gün öncesi piyasası dışında enerji ticaretinde sıklıkla kullanılan ikili anlaşmalar ise farklı bir işleyişe sahiptir ve piyasa katılımcıları arasında doğrudan yapılır.

İkili anlaşmalar, piyasa katılımcılarının birbirleriyle doğrudan ticaret yapmalarına olanak tanır. Gün öncesi piyasasından farklı olarak, bu anlaşmalar daha esnek bir yapı sunar ve iki katılımcı arasında, tarafların ihtiyaçlarına uygun olarak aynı döneme ait birden fazla ticaret yapılabilmesine olanak sağlar. Bu anlaşmalarda, EPIAŞ'a her bir ticaret tek tek bildirilmez; bunun yerine, anlaşmaya konu olan net miktarlar piyasa yapıcısına bildirilir. Bu durum, katılımcıların daha az idari yük altında işlem yapmasını sağlar ve ticaretin daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanır. Fiyatlandırma açısından da ikili anlaşmalar gün öncesi piyasasından farklılık gösterir. Gün öncesi piyasasında fiyatlar, piyasa takas fiyatına göre belirlenirken, ikili anlaşmalarda fiyat tamamen taraflar arasında yapılan müzakereler sonucunda belirlenir. Bu da piyasa katılımcılarının kendi ticari stratejilerini esneklikle uygulamalarına imkân tanır (Köse, 2019; Khatib & Galiana, 1994).

Enerji sektöründe ikili anlaşmalar, uzun vadeli enerji ticareti için sıklıkla tercih edilir. Bu anlaşmalar, katılımcılara 60 güne kadar bir dönemi kapsayacak şekilde işlem yapma olanağı tanır. Örneğin, büyük sanayi tesisleri veya organize sanayi bölgeleri, enerji tüketimlerini karşılamak için üreticilerle ikili anlaşmalar yaparak sabit bir fiyat ve arz güvenliği sağlayabilir. Bu tür bir esneklik, hem üreticilere hem de tüketicilere talep dalgalanmalarını ve fiyat risklerini yönetme konusunda avantaj sunar (Kalcheva et al., 2022). Ancak, ikili anlaşmaların bir başka önemli özelliği de tarafların kendi risk yönetimi süreçlerini bağımsız bir şekilde organize etmelerini gerektirmesidir. Gün öncesi piyasasında, haklar ve yükümlülükler genellikle bir takas bankası gibi merkezi bir kuruluş tarafından korunur. Buna karşılık, ikili anlaşmalarda teminat süreçleri taraflar arasında belirlenir ve bu süreçlerin yönetimi tamamen anlaşmayı yapan tarafların sorumluluğundadır. Bu nedenle, ikili anlaşmalarda taraflar, karşı taraf riskini minimize etmek için detaylı finansal ve hukuki mekanizmalar oluşturmak zorundadır (Erdem, 2017; Wang et al., 2022).

İkili anlaşmalar enerji sektöründe fiyat volatilitesine karşı koruma sağlamak için de kullanılır. Örneğin, piyasa fiyatlarının belirsizlik gösterdiği dönemlerde, sabit fiyatlı bir ikili anlaşma yapmak, piyasa katılımcılarının maliyetlerini öngörülebilir bir şekilde yönetmelerine olanak tanır. Aynı zamanda, yenilenebilir enerji projelerinde ikili anlaşmalar, projelerin finansal sürdürülebilirliği açısından kritik bir rol oynar. Yenilenebilir enerji üreticileri, uzun vadeli alım anlaşmalarıyla gelirlerini sabitleirken, tüketiciler de temiz enerji kaynaklarına erişimlerini güvence altına alabilirler (Raja & Grammatico, 2023).

İkili anlaşmalar, enerji piyasasında piyasa katılımcılarına esneklik, öngörülebilirlik ve ticaret stratejilerini özelleştirme fırsatı sunar. Ancak, tarafların kendi teminat süreçlerini yönetmek zorunda olmaları, bu anlaşmaları gün öncesi piyasasına kıyasla daha karmaşık ve riskli hale getirebilir. Bu nedenle, ikili anlaşmaların başarılı bir şekilde uygulanabilmesi, tarafların risk yönetimi becerilerine ve hukuki altyapılarına bağlıdır (Özel, Büyüktanır & Özel, 2013).

2.2. Gün İçi Piyasası

Gün içi elektrik piyasaları (intraday electricity markets), enerji sektöründe arz ve talep dengesizliğinin gün içinde giderilmesini mümkün kılan esnek piyasa yapılarıdır. Bu piyasalar, özellikle yenilenebilir enerji üretimindeki belirsizliklerin yönetimi ve sistem kararlılığının sağlanması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Geleneksel olarak bir gün öncesinden yapılan üretim-tüketim planlamaları, rüzgar ve güneş gibi değişken kaynakların tahmin hataları nedeniyle gün içinde geçerliliğini yitirebilmektedir (Morales & Pérez-Ruiz, 2014; Weber, 2010). Bu tür durumlarda gün içi piyasaları, arz-talep dengesinin yeniden sağlanması için etkin bir araç olarak öne çıkar.

Gün içi piyasalarının temel işlevi, D-1 günü yapılan planlamalardaki öngörülemeyen sapmaları dengelemektir. Özellikle rüzgar hızı ve güneş ışıınımı gibi değişken parametrelerdeki anlık değişimler, enerji üretimini ciddi ölçüde etkileyebilmektedir. Bu bağlamda, gün içi ticaret, tahmin hatalarını düzeltme ve sistem dengesizliklerini azaltma konusunda önemli bir katkı sunar (Gürtler & Krämer, 2020). Sürekli ticaret (continuous trading) ve açık artırma (auction-based trading) gibi çeşitli piyasa modelleri ile bu piyasa, katılımcılara farklı ticaret stratejileri uygulama imkânı sunmaktadır (Kuppelwieser & Wozabal, 2018).

Avrupa enerji piyasalarında, gün içi piyasaları 2009 yılında Norveç'te Nord Pool bünyesinde başlatılmış, daha sonra EPEX Spot ile Almanya ve Fransa gibi ülkelerde uygulanmaya başlamıştır. Bu piyasaların yapısal farklılıkları, likidite seviyeleri, işlem maliyetleri ve fiyat

sinyalleri üzerinde belirleyici olmaktadır. Örneğin, İtalya'daki açık artırma modeli, düşük likidite maliyetleriyle avantaj sağlarken; Almanya'daki sürekli ticaret modeli, teslimat zamanına yaklaştıkça daha fazla esneklik sunmaktadır (Kuppelwieser & Wozabal, 2018). Graeber ve Tallau (2022), sık açık artırmaların fiyat sinyallerinin güvenilirliğini artırabileceğini savunmuş ve bu yöntemin sürekli ticarete göre bazı avantajlarını ortaya koymuştur.

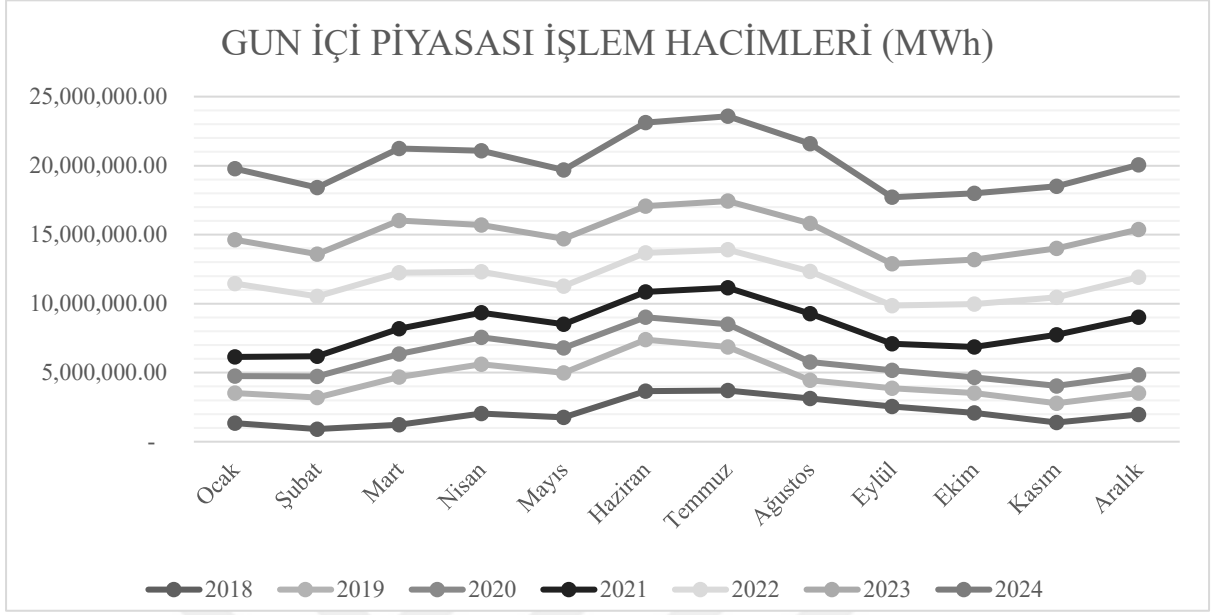
Stokastik süreç modellemeleri, gün içi piyasalarında saatlik fiyat tahmini için sıkça kullanılmaktadır. Özellikle Hollanda ve Almanya gibi ülkelerde yapılan çalışmalar, bu modellere dayalı olarak gün içi fiyat davranışlarının öngörülmesinde başarılı sonuçlar elde edildiğini göstermektedir (Graeber & Tallau, 2022; TUDelft Repository, 2022). Ayrıca, yapay zekâ ve makine öğrenimi temelli yaklaşımlar da gün içi piyasa fiyatlarının tahmininde kullanılmakta ve geleneksel modellere kıyasla daha iyi sonuçlar verebilmektedir (Forecasting Electricity Prices for Intraday Markets, 2023).

Elbas sistemi gibi sürekli işlem gören gün içi piyasalarında, katılımcıların ticaret davranışları detaylı şekilde analiz edilmiş; piyasa verimliliği, zamanlama stratejileri ve işlem hacmi gibi kriterler açısından önemli bulgular elde edilmiştir (Trading Behaviour on the Continuous Intraday Market Elbas, 2023). Bu analizler, piyasa yapılarının davranışsal ekonomiyle ilişkili yönlerini de aydınlatmaktadır.

Türkiye'de gün içi piyasaları, 2015 yılında EPİAŞ tarafından devreye alınmıştır. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması (YEKDEM) çerçevesinde, üretim planlarından sapmaların finansal sorumluluğunun piyasa katılımcılarına yüklenmesiyle birlikte, gün içi piyasalar daha aktif hale gelmiştir (EPİAŞ, 2022). Bu gelişme, sistem esnekliğini artırmış ve ticaret hacminde kayda değer bir büyüme yaratmıştır. 2016-2022 yılları arasında Türkiye gün içi piyasasındaki işlem hacmi yaklaşık yedi kat artmıştır (EPİAŞ, 2022). Şekil 5'de 2016'dan günümüzdeki enerji piyasa katılımcılarının işlem hacimleri görülmektedir.

Şekil 5

EPİAŞ Gün içi Piyasası İşlem Hacimleri (MW)



Not. Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPİAŞ) tarafından 2018 – 2024 yılları arasında açıklanan veriler kullanılarak yazar tarafından işlenmiştir.

2018 yılında Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği'nde yapılan değişiklikle, santrallerin üretim planlarındaki sapmaların maliyetlendirileceği katılımcılara beyan edilmiştir. Bu düzenleme, gün içi piyasasındaki işlem hacimlerini Avrupa'daki ülkelerle karşılaştırıldığında daha hızlı bir artış trendine sokmuştur. 2024 yılına doğru Türkiye gün içi piyasasına katılım oranının çok büyük ölçüde arttığı işlem hacimleri grafiğinden anlaşılmaktadır. Türkiye'de bu radikal ticari işlem hacimlerindeki artış otomatik ticaret uygulamalarının enerji ticaret şirketlerinde kullanımının oldukça yaygınlaştığının bir göstergesi olabilir.

EPİAŞ'ın gün içi piyasası çalışma mekanizmasında saatlik tahtada kontratlar, D günü saat 18:00'de D+1 günü için açılır ve her bir kontrat için son işlem yapma zamanı H saati için H-1 saatidir. Bu yapı, yenilenebilir enerji santralleri için büyük önem arz eder; çünkü kontrat saatine yaklaştıkça, üretim tahmini daha kesin hale gelir. Weber (2010), likiditenin artırılmasının hem piyasaları daha etkin hale getireceğini hem de yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyon maliyetlerini azaltacağını belirtmiştir.

Kuppelwieser ve Wozabal'ın çalışmasına göre, likidite maliyetlerini azaltmak için piyasa

yapısında çeşitli yenilikler gereklidir. Özellikle açık artırma ve sürekli ticaret mekanizmalarının birleştirilmesi, hem piyasa katılımcılarının esnekliğini artıracak hem de maliyetleri düşürecektir. Bu, Türkiye gibi hızla büyüyen piyasalarda işlem hacimlerinin sürdürülebilir bir şekilde artmasını destekleyecektir.

2.3. Dengeleme Güç Piyasası

Gün öncesinden yani D-1'den D için arz talep eğrileri belirlenir, fakat D-1 zamanında ancak tahmini değerlerden bu planlama yapılmaktadır. Gün içinde ise gerçek ana yaklaştıkça bir gün önce belirlenen denge noktasından sapmalar meydana gelir. Türlü koşullar gerçekleştiği için bozulan elektrik sistem dengesi, sistem operatörü TEİAŞ tarafından santrallere yük alma talimatı (YAL) ve yük atma talimatı (YAT) verilerek dengeye getirilmeye çalışılır (Tür, 2019).

Uzlaştırmaya esas 15 dakika içinde 10 MW yük alabilme ve yük atabilme özelliğine sahip veriş birimleri dengeleme birimleri olur. Güneş, rüzgar, kojenerasyon, biokütle, kanal tipi hidrolik santraller gibi yenilenebilir kaynaklara dayalı kesintili üretim tesisleri dengeleme birimi olarak sayılmamaktadır. Sistem işletmecisi ve sistemden enerji alırken tek alıcı, enerji çıkarırken tek satıcı gibi olan TEİAŞ elektrik piyasası üzerinde mutlak hâkimiyete sahiptir. Elektriğin frekansı her an nominal değeri olan 50 Hertz (Hz) baz alınarak %0.4 tolerans ile 49.8 Hz - 50.2 Hz aralığında tutulmalıdır. Talep edilen aktif elektrik enerji, sistemde var olan yükü geçerse frekans düşer, aksi halde frekans yükselir. Bunlar istenmeyen durumlar olduğu için, TEİAŞ yük değişimi durumlarında, üretimi artırmalarını veya azaltmalarını üreticilerden isteyerek sistemin dengelenmesini sağlar (Elektrik Piyasası Dengeleme Ve Uzlaştırma Yönetmeliği, 2019).

Enerji piyasasında dengeleme mekanizması, arz ve talep arasındaki hassas dengenin korunması için kritik bir rol oynamaktadır. Dengeleme güç piyasası, özellikle üretim ve tüketim arasında ortaya çıkan farklılıkları düzenleyerek sistem istikrarını sağlar. Bu mekanizma, elektrik enerjisinin kesintisiz bir şekilde son kullanıcıya ulaştırılmasını temin eder.

Dengeleme güç piyasasının etkin çalışabilmesi için, santral operatörlerinin TEİAŞ tarafından verilen talimatlara hızla yanıt verebilmesi şarttır. Bunun yanı sıra, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin çoğu kez kesintili üretime sahip olması, dengeleme piyasası üzerindeki baskıyı artırmaktadır. Bu durum, fosil yakıt temelli santrallerin yedek güç olarak kullanılmasını gerekli kılmaktadır.

Güç dengesizliği sorunlarını azaltmak için, piyasa oyuncularına uygulanan ceza ve teşvikler önemli bir yer tutar. Gün öncesi piyasasında verilen tekliflerle gerçek zamanlı operasyonları arasındaki farklar, piyasada rekabeti teşvik eden şekilde düzenlenir. Bu şekilde, sistem

katılımcıları daha hassas tahmin yapmaya yönlendirilir.

Enerji depolama teknolojilerinin gelişimi, dengeleme piyasasında devrim niteliğinde etkiler yaratmıştır. Piller ve diğer enerji depolama çözümleri, anında tepki verebilme yetenekleriyle dengesizliklerin giderilmesine yardımcı olmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerjinin çoğaldığı piyasalarda, enerji depolama sistemlerinin yaygınlaşmasıyla dengeleme maliyetlerinin azalması beklenmektedir.

Dengeleme piyasasında rekabeti artırmak amacıyla birçok ülkede düzenleyici kurallar devreye sokulmuştur. Bu kurallar, piyasa oyuncularının şeffaf bir şekilde hareket etmesini ve sistemin daha verimli çalışmasını sağlar. Bununla birlikte, dengeleme piyasasına özel yazılımlar ve algoritmalar, karar verme süreçlerini hızlandırmak için önemli bir rol oynamaktadır.

Dengeleme ve güç piyasalarındaki dönüşüm, özellikle karbon salınımlarını azaltma hedefleriyle paralel ilerlemektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması, elektrik sisteminin esneklik ihtiyacını artırmıştır. Bu bağlamda, yeni nesil teknolojiler ve piyasa mekanizmaları dönüşümü desteklemektedir.

Avrupa Birliği gibi bölgelerde dengeleme piyasalarının entegrasyonu, enerji ticaretinin sınırlar ötesine yayılmasını sağlamış ve daha büyük bir piyasa havuzu oluşturmuştur. Bu entegrasyon, enerji üreticileri ve tüketiciler için maliyetleri düşürmeyi ve arz güvenliğini artırmayı hedeflemektedir.

Son olarak, dengeleme piyasalarının geleceği, hem dijitalleşme hem de yapay zeka gibi teknolojilere olan yatırımlarla şekillenecektir. Sistem operatörlerinin ve piyasa oyuncularının şeffaf ve verimli bir şekilde etkileşimi, hem enerji arz güvenliğini hem de maliyet etkinliğini sağlayacaktır.

2.3.1. Yük Alma Teklif Fiyatı (YALF)

Dengeleme güç piyasası katılımcılarının yük alma için talep ettikleri birim fiyatlardır. Belli bir gün ve belli bir saatte 1 MWh üretim artışı veya tüketim azalışı için bir santralin en düşük fiyat talebidir.

2.3.2. Yük Atma Teklif Fiyatı (YATTF)

Dengeleme güç piyasası katılımcılarının yük atma için talep ettikleri birim fiyatlardır. Belli bir gün ve belli bir saatte 1 MWh üretim azalışı için bir santralin en düşük fiyat talebidir (Tür, 2019).

Eğer belli bir saatte, YAL talimatları, YAT talimatlarından büyükse, enerji açığı bulunur ve bu durum sistem YAL yönünde olarak adlandırılır. Eğer belli bir saatte, YAT talimatları, YAL talimatlarından büyükse, enerji fazlası bulunur ve bu durum sistem YAT yönünde olarak adlandırılır. Eğer belli bir saatte, YAL ve YAT talimatları eşitse, denge durumu söz konusudur ve bu durum sistem dengede olarak tanımlanır. Dengeleme güç piyasasında verilen talimatların net hacminin denk geldiği teklifin fiyatı, sistem marjinal fiyatını (SMF) belirler. Sistemde enerji açığı varsa (sistem YAL yönündeyse) ve net talimat hacimlerinin toplamı pozitifse, YALF belirlenirken SMF'nin altında teklif fiyatlarına SMF ve SMF'nin üzerinde olanlara ise kendi fiyatlarından ödemeler yapılır. Ters yönlü verilen teklifler yani YAT teklifleri ise yine kendi fiyatları üzerinden ödeme yapılır.

(1) Net Talimat Hacmi > 0 ise $YALF = \max(YALTF, SMF)$ ve $YATF = YATTF$

Sistemde enerji fazlası varsa (sistem YAT yönündeyse) ve net talimat hacimlerinin toplamı negatif ise, YATF belirlenirken SMF'nin altında teklif fiyatlarına SMF, SMF'nin üzerinde olanlara ise kendi teklif fiyatları uygulanır. Ters yönlü verilen teklifler yani YAL teklifleri ise yine kendi teklif fiyatları uygulanır.

$NTM < 0$ ise $YATF = \min(YATTF, SMF)$ ve $YALF = YALTF$

Sistemde enerji dengesi varsa, yani net talimat hacmi $= 0$ ise, verilmiş olan tüm talimatlara kendi teklif fiyatları uygulanır.

$NTM = 0$ ise $YATF = YATTF$ ve $YALF = YALTF$

2.3.3. Sistem Marjinal Fiyatı (SMF)

Sistem marjinal fiyatı, net talimat hacmine göre belirlenir. Net talimat hacmi ise bir önceki başlıkta anlatıldığı üzere, sistem işletmecisi tarafından ilgili saat için verilen toplam yük alma talimat miktarı ile toplam yük atma talimat miktarı arasındaki farktır (Biçen, 2016).

İlgili saat ve bölgede enerji eksikliği olarak açık meydana geldiğinde, SMF belirlenmesi için, YAL için verilen teklif fiyatları küçükten büyüğe göre sıralanır ve en düşüğünden başlanılarak hesaplanan NTH değerine denk gelen en yüksek olarak verilen eşik olarak kabul edilir. İlgili dönemde sistemde denge durumu oluşacağına, SMF, teklif bölgesi (t) ve uzlaştırma dönemi (u) üzerinden belirlenen gün öncesi fiyatı oluşur (Biçen, 2016).

Tablo 1*Sistem Marjinal Fiyatının Belirlenmesi*

YAL teklifleri			YAT teklifleri		
Fiyat (TL)	Miktar(MWh)	Etiket	Fiyat (TL)	Miktar(MWh)	Etiket
102,5	25	-	47,5	25	2
97,5	125	0	45	75	2
95	150	1	42,5	50	1
92,5	125	0	40	50	2
70	75	-	35	50	2
65	100	2	25,5	50	-
62,5	50	-	20	50	1
60	75	0	17,5	25	-
57,5	100	0	7,5	30	-
55	25	0	2,5	20	-

*Kaynak: Biçen, 2016*

2.4. Türkiye Enerji Piyasası Maliyetleri ve Otomatik Ticaretin Etkisi

Elektrik ticaretini diğer emtia ticaretlerinden ayıran en temel özelliği, elektriğin depolanma problemlerinden kaynaklanan sistemin dengede olmasındaki zorluktur. Elektrik arz ve talep dengesinin yakalanması, verimlilik ve taleplerin karşılanması için kritik bir önem taşır. Bu sebeple piyasa yapımcıları ve sistem operatörleri, arz ve talep dengesini sistem yönünü yakından takip ederek piyasa katılımcılarının dengede kalmasını teşvik etmektedir.

Gün öncesi planlama ve ticaret ile gerçek zamanlı operasyon arasında herhangi bir değişiklik yaşanmasaydı, kısa vadeli ayarlamalara gerek kalmayacak, planlar aynen uygulamaya konulacaktı. Ancak, yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken yapısı ve üretim tahminlerindeki belirsizlikler nedeniyle bu dengenin sürdürülmesi genellikle mümkün olmamaktadır. Bu ayarlamalar prensipte hem gün içi hem de dengeleme piyasaları aracılığıyla yapılabilir. Etkin bir piyasa tasarımında, gerçek zamanlı dengelemede daha pahalı esnek kaynakların kullanılmasından kaçınmak için bu ayarlamaların çoğunun gün içi piyasasında yapılması önerilmektedir (Weber, 2010).

Enerji ticaretinin otomasyonu, bu ayarlamalara olan ihtiyacı önemli ölçüde azaltabilir ve piyasa işleyişini optimize edebilir. Özellikle, gün içi piyasasında aktif şekilde teklif vermek ve işlem hacimlerinin artmasını sağlayacak algoritmik ticaret sistemlerinin kullanımı, piyasa katılımcılarının daha hızlı ve daha verimli kararlar almasına olanak tanımaktadır. Li ve Yu'nun 2021 yılındaki enerji sektöründe otomatik ticaretle ilgili yaptığı çalışmasında, piyasa katılımcılarının kısa vadeli tıkanıklık farklarından faydalanarak piyasa dengesizliğini azalttığı belirtilmiştir. Bu stratejiler, piyasa katılımcılarına risk kısıtlamaları altında bile kar elde etme fırsatı sunmaktadır.

Li & Tesfatsion, 2009 yılında yaptıkları araştırmada enerji piyasalarında yazılım uygulanabilirliği için önemli örnekler ortaya koymuşlardır. Yazılım yardımıyla enerji ticaretine aktif katılımın; farklı fiyatlandırma mekanizmalarının piyasa davranışlarına etkisini incelemek ve stratejik kapasitelerin kullanımını analiz etmesini aynı zamanda piyasa performansını iyileştirerek enerji piyasalarının daha verimli ve şeffaf hale gelmesine katkı sağlandığını ifade etmişlerdir.

Elektrik piyasalarında otomasyonun bir diğer önemli boyutu da her bir piyasa katılımcısının farklı stratejilerle ticaret otomasyon sistemlerini kullanımıdır. Lopes ve Coelho'nun 2011 yılında yayınladığı makalesi, çok fazla otomatik ticaret yapan katılımcının kullandıkları sistemlerin enerji ticaretinde oynadığı kritik rolü vurgulamaktadır. Bu sistemler, piyasa katılımcıları arasındaki bilgi akışını optimize ederek daha etkin bir ticaret ortamı yaratır. Birden fazla otomatik ticaret uygulaması ile katılımcıların ticari stratejilerinin entegre edilmesi, piyasa değişkenlerinin yakın takibini kolaylaştırır ve katılımcıların karar alma süreçlerini iyileştirir. Bu sistemler, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunda ortaya çıkan belirsizliklerin yönetiminde etkili araçlar sunmaktadır.

Türkiye enerji piyasasında, gün içi piyasasındaki gelişmeler ve otomatik ticaretin kullanımıyla işlem hacimleri önemli ölçüde artmıştır. EPIAŞ tarafından sunulan yenilikler, piyasa katılımcılarının dengesizliklerini daha etkin bir şekilde yönetmelerine olanak sağlamıştır. Gün içi piyasasında geliştirilen otomasyon sistemleri, sadece maliyetleri düşürmekle kalmayıp aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu da kolaylaştırmıştır. Örneğin, gün içi piyasasında aktif şekilde teklif veren katılımcılar, arz-talep dengesini gerçek zamanlı olarak yönetme esnekliği kazanmaktadır.

Elektrik piyasalarında algoritmik ticaret, enerji fiyatlarının optimize edilmesine ve ticaret süreçlerinin hızlandırılmasına önemli katkılar sağlamaktadır. Li ve Yu'nun 2021 yılındaki çalışmasında ele alındığı üzere, algoritmaların kullanımı, piyasa verilerinin daha hızlı işlenmesini ve daha verimli kararlar alınmasını mümkün kılmaktadır. Türkiye'de, bu tür teknolojilerin uygulanması, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştırmış ve maliyetlerin daha etkili bir şekilde yönetilmesine olanak tanımıştır.

Ayrıca, enerji ticaretindeki otomasyon sistemleri, piyasa katılımcılarının karmaşık piyasa dinamiklerini daha kolay anlamasına ve yönetmesine yardımcı olmaktadır. Çok ajanlı sistemler, piyasa katılımcılarının stratejik kararlarını desteklemek için gerçek zamanlı analiz ve tahmin araçları sunar. Bu sistemler, piyasa yapılarının şeffaflığını artırarak, tüm katılımcıların daha eşit koşullarda ticaret yapmasına olanak tanımaktadır (Weber, 2010).

Türkiye’de enerji piyasasının dönüşümü, gün içi piyasaları ve otomatik ticaretin entegrasyonu ile hızlanmıştır. Otomasyon, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının daha geniş ölçekte kullanılmasını sağlamış ve piyasa işleyişinde verimlilik artışına yol açmıştır. EPIAŞ’ın geliştirdiği yenilikler, bu sürecin en önemli unsurlarından biridir ve gelecekte enerji ticaretinde daha fazla entegrasyon beklenmektedir.

Enerji ticaretinde otomasyonun artması, hem Türkiye hem de global piyasalar için önemli bir dönüşüm yaratmaktadır. Bu teknolojiler, piyasa işleyişindeki verimsizlikleri azaltarak ve katılımcıların karar alma kapasitelerini geliştirerek daha dengeli ve etkin bir ticaret ortamı oluşturmaya katkı sağlamaktadır. Algoritmik ticaret sistemleri ve çok ajanlı yapılar, piyasa katılımcılarının ticaret süreçlerini hızlandırırken, aynı zamanda maliyetlerin düşürülmesine de olanak tanımaktadır. Bu süreç, hem tüketici hem de üretici tarafında büyük bir değer yaratmakta ve enerji ticaretinin geleceği için umut vadetmektedir.

2.5. Ticaret İçin Gerekli Pozisyonun Enerji Piyasasında Oluşumu

Şirketlerin ticari kararlarını verebilmeleri için hem gün öncesinde hem gün içinde net pozisyon hesabı yapmaları gerekmektedir. Net pozisyon hesabı birçok farklı verinin değerlendirilmesi ve planlama yapılmasıyla ilişkilidir. Aşağıda net pozisyona ulaşılabilmesi için gerekli planlamaya konu olan veri tipleri bulunmaktadır:

o Katılımcıya ait veriler

- Santral üretim planı
- Santral gerçekleşen üretim bilgisi
- Santral arıza bilgisi
- Santral üretim tahmini (yenilenebilirler için)
- Santral tipine göre santral verileri (Hidro için su seviyesi, su geliri, rüzgar için rüzgar hızı vb. veriler)
- Bakım planı bilgisi
- Organize piyasa işlemleri
 - Vadeli Elektrik Piyasası (VEP)
 - Gün Öncesi Piyasası (GÖP)
 - Gün İçi Piyasası (GİP)
 - Dengeleme Güç Piyasası (DGP)
- Organize olmayan piyasa işlemleri
 - İkili Anlaşmalar
- Tüketim tahmini

- Serbest tüketici
- İç Çekiş
- Kurum dışı veriler
 - PTF
 - SMF
 - Sistem yönü
 - Canlık emir defteri bilgileri
 - Gerçekleşen işlemler

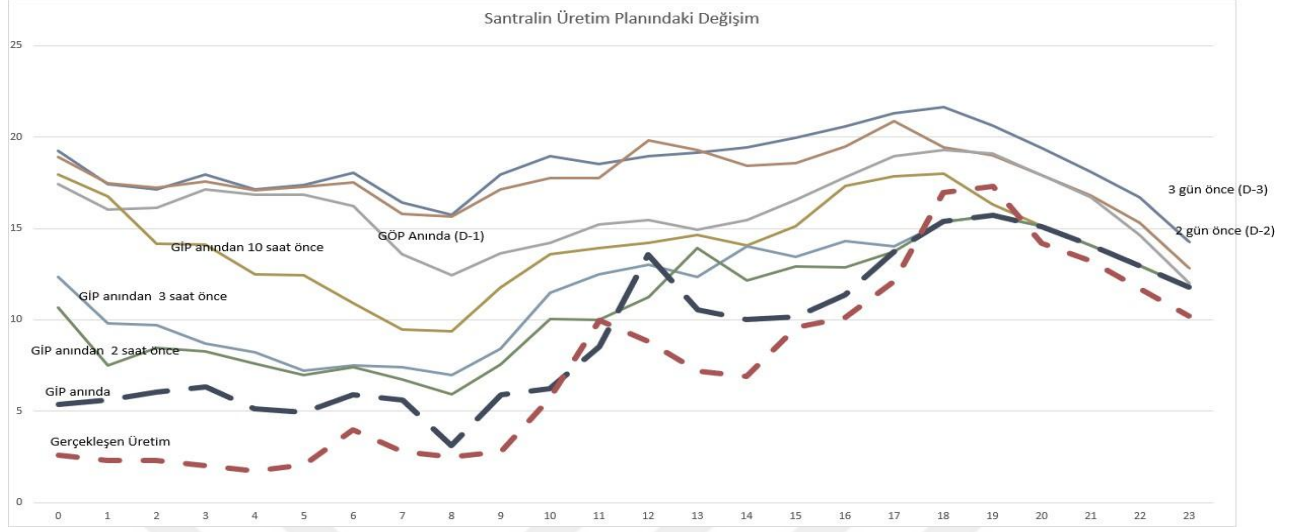
Daha önce elektrik piyasasında arz ve talep dengesinin ne kadar önemli olduğu bahsedildiği üzere, bir katılımcının kendi iç dengesini sağlaması tüm piyasadaki dengenin sağlamasında kelebek etkisiyle katkı sağlayacaktır. Bir şirketin net pozisyon miktarı yani tahmini dengesizlik miktarını oluşturan asıl değişkenler: Net GÖP miktarı, net İkili Anlaşma miktarı, net GİP işlem miktarı, üretim tahmini, tüketim tahmini olarak sıralanabilir.

7/24 çalışan elektrik piyasasında finansal piyasalarda olduğu gibi zaman serisi yönetimi söz konusudur. Canlı olarak veriler takip edilmeli, kayıt altında tutulmalı değişimi incelenmelidir. Detaylı bir takip için milisaniyeler içinde çalışan bir otomasyon ve veri yönetiminin olabildiğince kolay olduğu bir veri tabanı önem arz eder.

Şekil 3'te net pozisyon hesaplamasında rüzgar üretim planı olan bir piyasa katılımcısının takip ettiği tahminin ilgili an gelene kadarki 24 saatlik değerleri ile gerçekleşen üretim değerleri grafikte gösterildiği üzere GÖP bildirim anında santralin üretim planından çok daha farklı seyrettiği görülebilir. GİP anında tahmin edilen değerler hala gerçekleşen değerlerden çok farklıdır. GİP anındaki tahminler dikkate alınarak ancak piyasa katılımcısı enerji dengesizlik maliyetini düşürebilir. GÖP anındaki tahminini piyasaya sattığı varsayılırsa ve hiç gün içi piyasasında ticari işlem yapmazsa yüksek miktarda bir dengesizlik maliyetine maruz kalabilir.

Şekil 6

Santral Üretim Planındaki Değişim



Not. Veriler Poyraz Rüzgar Enerjisi Santraline ait olup Meteologica Tahmin kaynağından indirilmiştir (2024) yazar tarafından düzenlenmiştir.

Piyasa katılımcılarının piyasadan ya da diğer bir katılımcıdan aldıkları elektrik enerjisi miktarı, aynı katılımcının aynı zaman için piyasaya ya da diğer bir piyasa katılımcısına sattığı miktar ile aynı katılımcının varsa satış yaptığı son tüketicinin tüketim miktarına eşit olmalıdır. Aksi takdirde oluşan fark dengesizlik olarak tanımlanmaktadır.

$$\text{Dengesizlik} = \text{Alış} + \text{Üretim} - \text{Satış} - \text{Tüketim}$$

Sistem işletmecileri tarafından ayarlanabilir enerji kaynaklarına iletilen anlık talimatlar ile sistem dengesi sağlanmaktadır. Sistem dengesinden sorumlu olan sistem işletmecisi her teslimat an için planlara ve sapmalara bakarak, sistemde bağlı olan ve yükünü kolaylıkla ayarlayabilen santrallerin yükünü artırarak ya da azaltarak sapmaları dengeler. Bu faaliyet sonucunda devreye giren bu santrallere yapılan ödemeler basit bir yaklaşımla sisteme bir dengesizlik maliyeti oluştururlar. Bu dengesizlik maliyeti, bu dengesizliğe sebep olan piyasa katılımcılarına bir ceza olarak yansıtılır. Dengesizlik miktarı pozitif olan bir piyasa katılımcısı, yani üretim ve alımından daha az satış ve tüketim yapmış ise sistemde fazla enerjiye sebep olduğundan dolayı fazla enerjisini düşük bir fiyata satmak zorunda kalırken, üretim ve alımından daha fazla satış ve tüketim yaparak negatif dengesizlik yaratan bir piyasa katılımcısı da eksik enerjisini pahalı fiyata satın almak zorunda kalır. Burada ucuz ve pahalı tanımlamaları, referans piyasa olarak kabul edilen gün öncesi piyasa fiyatlarına göre yapılmaktadır. Türkiye’de dengesizlik fiyatları, her saat için pozitif ve negatif durumuna göre farklı şekilde

hesaplanır.

$$\text{Pozitif Enerji Dengesizlik Fiyatı} = \text{Min} (PTF, SMF) \times 0.97$$

$$\text{Negatif Enerji Dengesizlik Fiyatı} = \text{Max} (PTF, SMF) \times 1.03$$

Bu formüllerde kullanılan PTF, gün öncesi piyasasında oluşan saatlik fiyatı temsil ederken, SMF ise dengeleme güç piyasasında üretimi ayarlanabilir santrallerin üretimlerini değiştirmek için verilen talimatların piyasasında oluşan saatlik fiyattır.

Tablo 2
Net Pozisyonun Değişimi

Zaman Akışı	İçinde Bulunulan Saat	21 Kontratı	
	18:00 (21 kontratı GİP işlemi yapılabilmesi için son 2 saat)	Net Pozisyon Girdileri	MWh
		GOP Saatlik	-7
		GOP Blok	-2
		GOP Esnek	0
		GİP Saatlik	0
		GİP Blok	0
		İkili anlaşma	3
		Üretim Tahmini	10.12
		Tüketim Tahmini	-1
		Net Pozisyon	3.12
	İçinde Bulunulan Saat	21 Kontratı	
	19:00 (21 kontratı GİP işlemi yapılabilmesi için son 1 saat)	Net Pozisyon Girdileri	MWh
		GOP Saatlik	-7
		GOP Blok	-2
		GOP Esnek	0
		GİP Saatlik	-3
		GİP Blok	0
		İkili anlaşma	3
		Üretim Tahmini	9.1
		Tüketim Tahmini	-2
		Net Pozisyon	-1.9
	İçinde Bulunulan Saat	21 Kontratı	
	20:00 (21 kontratı için GİP işlemi kapanmıştır)	Net Pozisyon Girdileri	MWh
		GOP Saatlik	-7
		GOP Blok	-2
		GOP Esnek	0
		GİP Saatlik	-1
		GİP Blok	0
		İkili anlaşma	3
		Üretim Tahmini	8.01
		Tüketim Tahmini	-2
		Net Pozisyon	-0.99

2 MW'lık satış işlemi GİP'te gerçekleşti.

Saat 18'de 21 kontratı için üretim ve tüketim tahmini güncellendi.

Yeni üretim planı ile 2MW'lık alışla GİP'teki net işlem miktarı -1 satış olarak güncellendi

Not. Bu tablo örnek verilerle yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tahmini dengesizlik miktarı net pozisyon olarak anılmaktadır, Tablo 2'de görüldüğü üzere henüz gerçekleşen değer üzerinden devam edilmemektedir, tahmin değerleri ile net pozisyon hesabı yapılarak piyasada işlem yapılma kararı verilir.

2.6. Kesinleşmiş Üretim Planından Sapma Tutarı

Üretim tarafı bulunan piyasa katılımcıları UEVCB (uzlaştırmaya esas veriş çekiş birimi) olarak TEİAŞ'ın TPYS (TEİAŞ Piyasa Yönetim Sistemi) üzerinden her gün emre amade kapasitelerini ve kesinleşmiş üretim planlarını işletmekle yükümlüdürler. Aynı gün öncesi piyasasında olduğu gibi Emre Amade Kapasite (EAK) D+1 günü için D gününde 09:00-16:00 saatleri arasında yapılması gerekirken, Kesinleşmiş Günlük Üretim Planı (KGÜP) D+1 günü için D gününde 14:00-16:00 saatleri arasında yapılır. 2018'de Elektrik Piyasası Dengeleme Ve Uzlaştırma Yönetmeliği'nde yapılan aşağıdaki düzenlemeye istinaden artık santraller D gününde D+1 için gönderdikleri KGÜP'leri hava şartları arıza ve bakım sebebiyle değiştiyse D+1'de ilgili kontrat kapısı kapandığında yarım saat içinde güncellemeleri gerekmektedir. Aşağıda mevzuatta geçen formül bulunmaktadır.

Bir piyasa katılımcısının adına kayıtlı ve DGP'ye KGÜP bildirmek zorunda olan bir uzlaştırmaya esas veriş-çekiş biriminin bir uzlaştırma dönemine ait kesinleşmiş günlük üretim/tüketim programından sapma miktarı ve sapma tutarı aşağıdaki formüllere göre hesaplanır:

$$BUDÜP_{p,t,b,u} = KUDÜP_{p,t,b,u} + \left(\sum_{r=1}^h KEYALM_{p,t,b,u,r} - \sum_{r=1} KEYATM_{p,t,b,u,r} \right)$$

$$UDÜPS_{p,t,b,u} = UEVM_{p,t,b,u} - UEÇM_{p,t,b,u} - BUDÜP_{p,t,b,u}$$

$$(UDÜPS_{p,t,b,u} - SRM_{p,t,b,u}) \leq 0 \text{ ise } KÜPSM_{p,t,b,u} = 0$$

$$(UDÜPS_{p,t,b,u} - SRM_{p,t,b,u}) > 0 \text{ ise } UDÜPS_{p,t,b,u} \leq m \times BUDÜP_{p,t,b,u}$$

$$KÜPSM_{p,t,b,u} = 0$$

$$UDÜPS_{p,t,b,u} > m \times BUDÜP_{p,t,b,u} \text{ ise}$$

$$KÜPSM_{p,t,b,u} = UDÜPS_{p,t,b,u} - (m \times BUDÜP_{p,t,b,u})$$

Bu formüllerde geçen;

BUDÜP _{p,t,b,u}	p piyasa katılımcısı adına kayıtlı ve t teklif bölgesinde yer alan b uzlaştırmaya esas veriş-çekiş biriminin u uzlaştırma dönemine ait kesinleşmiş uzlaştırma dönemi üretim/tüketim planının, p piyasa katılımcısı adına kayıtlı b uzlaştırmaya esas veriş-çekiş biriminin u uzlaştırma dönemindeki r teklifi kabul edilerek verilen ve yerine getirilen yük alma ve yük atma talimatları neticesinde güncellenmesiyle oluşan, beklenen uzlaştırma dönemi üretim/tüketim planı (MWh),
KUDÜP _{p,t,b,u}	p piyasa katılımcısı adına kayıtlı ve t teklif bölgesinde yer alan b uzlaştırmaya esas veriş-çekiş biriminin u uzlaştırma dönemine ait kesinleşmiş günlük üretim/tüketim programı miktarının gün içi piyasasının kapanışından sonra güncellenmesiyle elde edilen, kesinleşmiş uzlaştırma dönemi üretim/tüketim planını (MWh),
KÜPSM _{p,t,b,u}	p piyasa katılımcısının, adına kayıtlı ve t teklif bölgesinde yer alan b uzlaştırmaya esas veriş-çekiş biriminin u uzlaştırma dönemine ait beklenen uzlaştırma dönemi üretim/tüketim miktarından sapma miktarını (MWh),
KÜPST _p	p piyasa katılımcısının, beklenen uzlaştırma dönemi üretim/tüketim miktarından sapması nedeniyle ödemekle yükümlü olduğu tutarı (TL),
KEYALM _{p,t,b,u,r}	p piyasa katılımcısı adına kayıtlı b uzlaştırmaya esas veriş-çekiş biriminin u uzlaştırma dönemindeki r teklifi kabul edilerek verilen yük alma talimatı miktarını (MWh),
KEYATM _{p,t,b,u,r}	p piyasa katılımcısı adına kayıtlı b uzlaştırmaya esas veriş-çekiş biriminin u uzlaştırma dönemindeki r teklifi kabul edilerek verilen yük atma talimatı miktarını (MWh),
SRM _{n,t,b,u}	p piyasa katılımcısı adına kayıtlı ve t teklif bölgesinde yer alan b uzlaştırmaya esas veriş-çekiş biriminin u uzlaştırma döneminde sağlaması için Sistem İşletmecisi tarafından talimat verilen Sekonder Frekans Kontrol Rezerv Miktarı (MWh),

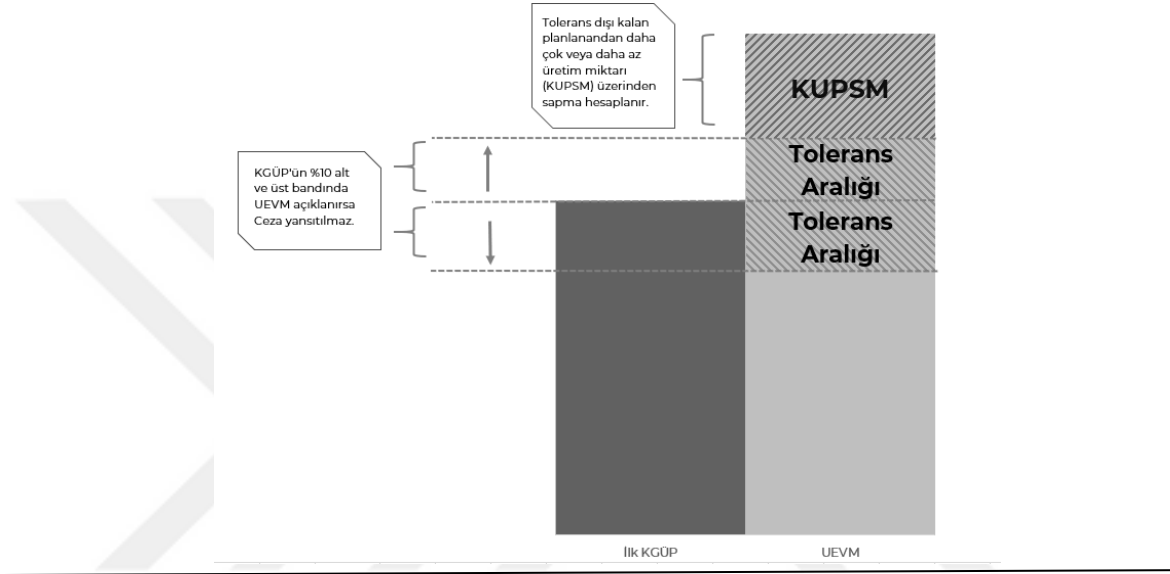
UEVM _{p,t,b,u}	p piyasa katılımcısı adına kayıtlı ve t teklif bölgesinde yer alan b uzlaştırmaya esas veriş-çekiş biriminin u uzlaştırma dönemine ait uzlaştırmaya esas veriş miktarını (MWh),
UEÇM _{p,t,b,u}	p piyasa katılımcısı adına kayıtlı ve t teklif bölgesinde yer alan b uzlaştırmaya esas veriş-çekiş biriminin u uzlaştırma dönemine ait uzlaştırmaya esas çekiş miktarını (MWh),
h	u uzlaştırma dönemi için b dengeleme birimine verilen yük alma talimatı sayısını,
g	u uzlaştırma dönemi için b dengeleme birimine verilen yük atma talimatı sayısını,
m	Başlangıç değeri 0,1 olan ve Kurul Kararıyla değiştirilebilen, üretim planından sapmaya ilişkin tolerans katsayısı,
n	Başlangıç değeri 0,05 olan ve Kurul Kararıyla değiştirilebilen, üretim planından sapmaya ilişkin tutarın hesaplanmasında kullanılacak fiyatın belirlenmesine dair katsayı,
a	Bir fatura döneminde yer alan uzlaştırma dönemi sayısını,
z	p piyasa katılımcısı adına kayıtlı uzlaştırmaya esas veriş çekiş birimi sayısı,
j	İlgili fatura dönemi için belirlenmiş olan teklif bölgesi sayısını,

ifade eder (Elektrik Piyasası Dengeleme Ve Uzlaştırma Yönetmeliği, 2018).

2018 yılındaki mevzuat düzenlemesini takiben, santral üretimleri üzerinden piyasa katılımcı olan şirketlerin üstlendiği maliyetlere, dengesizlik maliyetlerinin yanı sıra bir de KGÜP'lerinden sapma miktarlarından doğan Kesinleşmiş Üretim Planından Sapma Tutarı (KUPST) da bir maliyet olarak eklenmiştir. Piyasa katılımcılarının KUPST maliyetinden korunmaları için üretim planlarını da gün içerisinde olması gereken değere doğru güncellemeleri gerekmektedir. Gün içi piyasasında yapacakları hamlelerde iki maliyeti de önemseyip doğru hamlelerde bulunarak maliyetleri minimumda tutarken bir taraftan da sistem yönünün sistem operatörü tarafından doğru olarak belirlenmesine destek olmaktadır. Öncelikle kesinleşmiş günlük üretim planlarının işlem gerçekleşecek kontrat anında en güncel

üretim planlarının takibini yapıp kendilerini hem dengesizliğe düşürmeden hem de kesinleşmiş üretim planlarından sapma tutarlarına düşmeden ticari kararları almaları beklenir.

Şekil 7
Kesinleşmiş Üretim Planındaki Sapma



Not. Bu şekil yazar tarafından düzenlenmiştir.

Piyasa katılımcısının Kesinleşmiş Üretim Planından Sapma Tutarı (KUPST) maliyetinden korunması için yapacağı GİP işlemiyle tolerans aralığında kalması beklenmektedir. Tolerans aralığında kalması için gerekli adımlar aşağıda sıralanmıştır:

Santrallerin revizyon ihtiyaçları belirlenir: Planlanandan daha az üretim ya da fazla üretim durumunda bir sapma miktarı oluşmaktadır. Bu sapma miktarı $Max(PTF, SMF) \times 1.03$ ile oluşan fiyat ile çarpılarak bir maliyet oluşturur. Bu maliyet üretim planı ancak EPDK Tarafından belirlenen bir katsayı olan %10 sapmanın dışında ise yansıtılacaktır. Şekil 4'te gözükeceği üzere üretim planının %10 altında ya da üstünde olması durumunda herhangi bir maliyet oluşmayacaktır. Bu aralık belirlenerek üretim planında yapılacak minimum revizyon miktarı hesaplanır. Aşağıdaki kurala göre minimum ihtiyaç duyulan revizyon miktarı belirlenir:

- Eğer $TAHMINs = KGÜPs$ ise
 $Revizyon\ ihtiyacı = 0$

- Eğer $KGÜPs=0$ ve $TAHMINs<1$ ise

$$Revizyon\ İhtiyacı = TAHMIN$$

- Eğer $KGÜPs<1$ ve $TAHMINs=0$ ise

$$Revizyon\ İhtiyacı = KGÜPs$$

- Eğer $TAHMINs>KGÜPs$ ise

$$Revizyon\ İhtiyacı = \frac{TAHMINs}{(1 + m)} - KGÜPs$$

- Eğer $TAHMINs<KGÜPs$ ise

$$Revizyon = \frac{TAHMINs}{(1 - m)} - KGÜPs$$

- Eğer $KUPST = 0$ ise

$$Revizyon = 0$$

m: Başlangıç değeri 0,1 olan ve Kurul Kararıyla değiştirilebilen, üretim planından sapmaya ilişkin tolerans katsayısıdır.

Üretim planını revize etmek için santral revizyon ihtiyacına istinaden GİP ihtiyacının belirlenir: KGÜP revizyonu yapılabilmesi için GİP’te işlem yapılması gerekmektedir. GİP’te alış yönlü işlem yapıldığında üretimi azaltmaya yönelik, satış yönlü işlem yapıldığında ise arttırmaya yönelik revizyon gerçekleştirilecektir. Bu sebeple revizyon ihtiyacı belirlendikten sonra pozitif veya negatif yönlü revizyon ihtiyaçları gruplandırılır ve GİP işleminin hangi yönlü yapılacağı karar verilir. Revizyon İhtiyacı: Tahmin – KGÜP olmak üzere, revizyon ihtiyaçları gruplandırılarak GİP Satış ve GİP Alış gereksinimi bulunur. Revizyon ihtiyacı pozitif ve Negatif olarak gruplandırılır ve GİP’te alım veya satım yapıp yapılmayacağı kararı verilir.

- Revizyon İhtiyacı<0 olanların toplamı GİP Alış Gereksinimi’dir:

$$GİP\ Alış\ Gereksinimi = \sum_{s=0}^n Revizyon\ İhtiyacı \text{ (eğer } R < 0 \text{ ise)}$$

- Revizyon İhtiyacı >0 olanların toplamı GİP Satış Gereksinimi’dir:

$$GIP \text{ Satış Gereksinimi} = \sum_{s=0}^n \text{Revizyon İhtiyacı} \text{ (eğer } R > 0 \text{ ise)}$$

Revizyon ihtiyacı negatifse üretim azaltılır yani negatif revizyon miktarı kadar GIP Alış yapılabilir (Daha önce yapılmış NETGIP işlem sonucuna bakılmak kaydı ile) Revizyon ihtiyacı pozitifse üretim artırılır yani GIP Satış yapılabilir. (Daha önce yapılmış GIP işlem sonucuna bakılmak kaydı ile) Yeni GIP ihtiyacı hesaplaması aşağıdaki gibi yapılmaktadır:

- $GIP < 0$ ve $ABS(GipAlisGereksinimi) > ABS(GipSatisGereksinimi)$ ise
Yeni GIP İhtiyacı = $ABS(GIP) + ABS(GipAlisGereksinimi)$
- $GIP \geq 0$ ve $ABS(GipAlisGereksinimi) > GIP$ ise
Yeni GIP İhtiyacı = $Math.ABS(GipAlisGereksinimi) - GIP$
- $GIP > 0$ $ABS(GipAlisGereksinimi) < GIP$
Yeni GIP İhtiyacı = 0
- $GIP \leq 0$ ve $ABS(GipSatisGereksinimi) > ABS(GipAlisGereksinimi)$ ve $GipSatisGereksinimi > ABS(GIP)$
Yeni GIP İhtiyacı = $ABS(GIP) - GipSatisGereksinimi$
- $GIP > 0$ ve $GipSatisGereksinimi < GIP$
Yeni GIP İhtiyacı = $GIP + GipSatisGereksinimi * -1$
- $GIP < GipSatisGereksinimi < ABS(GIP)$
Yeni GIP İhtiyacı = 0

Dengesizlik ve KUPST maliyeti bir gün önceden planlanan ticari kararlarla yüksek bir ilişki içindedir. Bir gün önceden belirlenen ticari kararın gün içinde sapması dolayısıyla maliyet ortaya çıkar ve şirketler gün içinde oluşan yeni planla gün içi piyasasında ticaret yaparak maliyetlerden korunurlar. Fakat mevzuat gereği dengesizlik maliyeti piyasa katılımcısı bazlıyken KUPST maliyeti ise santral kırımındadır, üstelik piyasa katılımcı bölümünde gün içi piyasasında ticaret izni vardır ve piyasa yapısı ticari işlemi serbest piyasa koşullarına uygun olarak hangi sebeple yaptığını kayıt altına almaz, yapılan işlem kârlılık amacıyla yani alım ve satım fiyat farkını gözeterek ticari işlem olabileceği gibi dengesizlik veya KUPST maliyetini gidermek amaçlı da olabilir. Sistem operatörü piyasa operatöründen piyasa katılımcısı bazında yapılan ticari işlemleri her kontrat kapanışında

çeker. Piyasa katılımcısına altındaki santralin kesinleşmiş üretim planından sapma tutarını revize edebilmesi için yarım saat tanır ve yapabileceği kesinleşmiş günlük üretim planı yalnızca kapanan kontrat saatine ilişkin olup ticari işlemin yönüne uygun olarak santrallerin üretim planını güncelleyebilir. Kısaca şu şekilde açıklanabilir;

piyasa katılımcısı eğer net GİP işlemi satış yönlüyse, piyasa operatörü net GİP işlem miktarını sistem operatörüne iletir, sistem operatörü ise net GİP işlemine istinaden piyasa katılımcısının altındaki tüm uzlaştırmaya esas veriş çekiş birimindeki alt birimlerin her birinin kesinleşmiş gün öncesi üretim planlarını yalnızca arttırma yönünde izin verecektir, eğer alış yönlü net GİP işlemi varsa her bir alt birimin yalnızca azaltma yönlü KGÜP'lerini güncellemeye izin verecektir. Piyasada katılımcısının net pozisyonunu oluşturan birimlerden bazıları arttırma bazıları da azaltma yönünde gün öncesi planına göre konumlanmış olabilirler, bu katılımcının net pozisyonundan doğan dengesizlik maliyetini olumlu etkiler fakat piyasa katılımcısına KUPST maliyeti olarak dönüşü olabilir. Bu sebeple piyasa katılımcısının pozisyonunu konumlandırması ve maliyetlerini dikkate alarak optimum kararı verebilmesi önem arz eder.

Tablo 3

Dengesizlik Maliyeti Dikkate Alınarak Yapılan Ticari İşlem

Dengesizlik Maliyeti Dikkate Alınarak Yapılan Ticari İşlemlerde					
14:00 - 15:00		Piyasa Katılımcısı			
	GÖP	-66			
	GİP	4			
		Santral 1	Santral 2	Santral 3	Topl.
	İlk KGUP	18	26	22	66
	Olması Gereken KGÜP	20	23	19	62
	Dengesizlik	4			
	Yeni GİP	-4			
	KUDÜP	20	26	22	68
	UDÜPS	0	3	3	
	Santral KUPST	0	103.5	85.5	
	PTF	150.00			
	SMF	100.00			
	GİP Alış Fiyatı	120.00			

Gip Satış Fiyatı	85.00
Dengesizlik Maliyeti	0.00
Gip Tedarik Maliyeti	-260.00
PK KUPST	-189.00
Toplam Maliyet	-449.00

Not. Bu tablo, örnek verilerle yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 4

KUPST Maliyeti Dikkate Alınarak Yapılan Ticari İşlem

KUPST Maliyeti Dikkate Alınarak Yapılan Ticari İşlem					
14:00 - 15:00	Piyasa Katılımcısı				
	GÖP	-66			
	GİP	4			
		Santral 1	Santral 2	Santral 3	Topl.
	İlk KGUP	18	26	22	66
	Olması Gereken KGÜP	20	26	22	68
	Dengesizlik	4			
	Yeni Gip	6			
	KUDÜP	18	26	22	66
	UDÜPS	2	0	0	
	Santral KUPST	72	0	0	
	PTF	150.00			
	SMF	100.00			
	Gip Alış Fiyatı	120.00			
	Gip Satış Fiyatı	85.00			
	Dengesizlik Maliyeti	-530.00			
	Gip Tedarik Maliyeti	180.00			
	PK KUPST	-72.00			
	Toplam Maliyet	-422.00			

Not. Bu tablo, örnek verilerle yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 3 dengesizlik miktarını sıfırlamaya yönelik bir hamleyi ifade eder. Piyasa katılımcısı yalnızca altındaki birimlerin ürettiği enerjiyi gün öncesi piyasasına satmıştır

ve gün içinde en güncel üretim planlarını dikkate alıp net pozisyonunu gün içi piyasasında değerlendirmiştir. Bu hamleyle net pozisyonunu sınırlandırırken KUPST maliyetinde artışa sebep olmuştur, net pozisyonuna göre yaptığı GİP işlemi yalnızca tek bir santralin KGÜP'ünü revize etmeye yeterli olmuştur. Tablo 4 'teki gibi bir ticari işlem kararı yüksek KUPST maliyetini dikkate alarak yapılsaydı bu ticari hamle dengesizlik maliyetini yükseltecekti. Burada sistem marjinal fiyatı da etkisi gözükmemektedir. Sistem marjinal fiyatı dengeleme güç piyasasında sistem yönüne göre talimat verilen santrallerin çalışmak için teklif ettikleri fiyata göre oluşup gün içi piyasasında alıcı ve satıcı fiyatları belirlenirken henüz açıklanmamıştır. Piyasa katılımcılarının sistemin yönünü tahmin edip sistem yönünün açık veya fazla vermesi üzerine bir fiyat tahmini yapması tahtadaki en iyi alıcı ve satıcı fiyatlarını etkilemektedir. Sistem marjinal fiyatı öncelikle piyasa katılımcısının GİP'te işlem yaptığından mı kara geçeceğini yoksa sistem yönüne göre oluşacak SMF'ye göre dengesizliğe kendini bıraktığında mı daha az maliyete maruz kalacağını belirler. Dolayısıyla piyasadaki en önemli faktörlerden biri de sistem yönünü tahmin edebilmekte yatar. Bunun altında ise sistemi dengesizliğe bırakacak tüm katılımcıların üretim planını iyi takip etmeyi ve sistem dengesizliğe maruz kalacaksa da bunun yönünü bilip yönüne göre de sistem marjinal fiyatını tahmin etmeye bağlıdır. Bu çok büyük bir optimizasyon modelidir ve bir ülkenin dengesizlik yönünü belirlemek çok büyük veriye anlık erişimi ve buna göre tahmini gerektirir. Piyasa verilerinin açıklandığı şeffaflık platformunda ise gün öncesinden ve gün içinden tahminin yapılması için gerekli detayda girdinin açıklaması yapılmamaktadır.

Tüm bu koşullarda piyasa katılımcılarının hem kısıtlı zaman dilimlerinde işlem yapma durumu hem de bir çok veri girdisini değerlendirerek işlem yaptığı dikkate alındığında, etki eden verilerin analizini dikkate alan kapsamlı ve büyük veriyi yönetebileceği otomatik olarak işlem yapabileceği bir platform üzerinden ticari işlem yapması gerekliliğini ortaya çıkmaktadır, aksi takdirde piyasa katılımcıları büyük miktarda maliyetlere maruz kalır ve sistem operatörü piyasadaki denge noktasının oluşması için katılımcılardan gerekli katkıyı bulamaz. Sistem operatörünün piyasadaki denge noktasını bulabilmesi için tüm katılımcıların aktif bir şekilde buna hizmet etmesi gerekmektedir.

BÖLÜM ÜÇ

3.1.Dengesizlik Ve KUPST Maliyetini Otomatik Ticaretle Yöneterek Sağlanan

Fayda

Bu çalışmada, çalışma kapsamı altında tek bir santral bulunmakta ve bu santralin üretim kaynağı rüzgar enerjisine dayanmaktadır. Söz konusu piyasa katılımcısının gün öncesi bildirimi, santralinin üretim planı doğrultusunda hazırlanmış ve bu planın piyasa tarafından gönderilen teklif edilen miktar kadar kabul edilmiştir. Bu kapsamda, gün öncesi piyasada belirlenen üretim planı ve buna dayalı olarak verilen kesinleşmiş günlük üretim planı (KGÜP), sistem operatörüne bildirilen değerler temel alınmıştır.

Çalışmanın özünde, bu yöntem, aslında karmaşık enerji piyasası süreçleri arasında yönetimi nispeten daha basit olan bir işleyişi temsil etmektedir. Gün öncesi satış miktarı kadar KGÜP gönderimi, dengesizlik maliyetlerinin ve Kesinleşmiş Üretim Planı Satış Teklifi (KUPST) maliyetlerinin aynı anda yönetimini mümkün kılmaktadır. Bu durum, piyasa katılımcısının altında yer alan tek bir verici birimin KGÜP değerinin gün öncesi satış miktarına eşit olması sayesinde, dengesizlik ve KUPST maliyet yönetimi için gerekli ticari işlemin aynı yönlü olmasını sağlamaktadır.

Ancak çalışma, dengesizlik maliyetleri ve KUPST maliyetleri üzerinden ilerlemekle birlikte, önemli bir faktör olan gün içi piyasa fiyatlarını dikkate almamaktadır. Gün içi ticari işlem fiyatları, ilgili saat için henüz açıklanmamış olan Sistem Marjinal Fiyatı (SMF) değerine bağlı olarak farklılık gösterebilir. Bu durum, SMF'ye göre olumlu ya da olumsuz etkiler yaratabilecek bir fiyatlama ortamının oluşmasına neden olabilir. Çalışma kapsamında, gün içi piyasasının devreye alınmaması durumunda piyasa katılımcısının ödeyeceği potansiyel maliyetler hesaplanmış ve bu piyasa üzerinden işlem yapıldığı takdirde maliyetlerin nasıl etkilenebileceği ölçülmüştür. Bu kapsamda, işlem yapılmış ve işlem yapılmamış senaryolar karşılaştırılmış ve bu senaryolar üzerinden piyasa katılımcısının genel verimliliği analiz edilmiştir.

Ayrıca, rüzgar santrali işletimi yapan piyasa katılımcısının IoT cihazları ve diğer teknolojik altyapıları kullanarak gün öncesi üretim tahminlerini optimize ettiği, bu tahminleri gün içi piyasasında nasıl kullanabileceğini inceleyen bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Özellikle, gerçekleşme anına en yakın tahminlerin en iyi performansı sergileyeceği varsayımıyla hareket edilmiş, bu tahminlerin gün içi ticari işlemlere entegrasyonu sağlanmıştır. Bu noktada, otomatik ticaret uygulamaları için teknolojik

```

var netPosition = tahmin - kgup + netgip;

if (netPosition === 0) {
    return {"ResultMessage" : "Tahmini – KGÜP - NetGIP 0 olduğu için işlem
    yapılmadı."};
}
if (netPosition > 0) { price
= PTF * 0.97;
message += " Satış teklifi oluşturuldu. Miktar: " + quantity + " Lot, Fiyat: " + price + " ";
} else if (netPosition < 0) { price =
    PTF * 1.03;
    if (proposalResult.Success)
        message += " Alış teklifi oluşturuldu. Miktar: " +
quantity + " Lot, Fiyat: " + price + " ";
    else
        message += " Hata! " return
{"ResultMessage": message };
}

```

altyapı gereklilikleri ve kodlama için bir kural setinin tanımlanması önemli bir adım olmuştur.

Ticari işlem kararlarının tetikleyiciler üzerinden yönetilmesi önemsenmiş ve bu tetikleyiciler arasında net pozisyon değişiklikleri, piyasadaki derinlik ve en iyi alıcı-satıcı fiyatlarındaki değişiklikler dikkate alınmıştır. Örneğin, tahmin modelinden elde edilen değerler ticari teklifin atılacağı anın belirlenmesinde etkili olmuş ve bu anın gerçek zamanın en yakınında, ticaret kapısının kapanmadığı bir zaman diliminde olması sağlanmıştır.

Bu çalışma, yenilenebilir enerji santrallerinin gün öncesi planlaması ve gün içi piyasa işlemleri arasında nasıl bir etkileşim ve maliyet avantajı yaratabileceğini kapsamlı bir şekilde ortaya koyarken, teknolojik altyapının ve otomatik ticaret algoritmalarının bu süreçlerdeki etkinliğini de detaylı olarak incelemiştir.

JavaScript dilince aşağıdaki gibi bir kod bloğu üzerinden ticari işlem gerçekleştirilmiştir:

Tetikleyici : Kontrat kapanışından 10 dakika önce teklifin atılması

Ticari tekliflerin otomatik yapılması ile dengesizlik maliyeti giderilmiş hemen takibinde

ise TEİAŞ'ın Portföy dengeleme ismiyle anılan Gün içi işlemleri sonrası Net GİP işlem hacmine bağlı olarak kontrat kapanışının yarım saati içerisinde aşağıdaki kurallara istinaden sistem operatörü üzerinde otomatik yazılım aracılığıyla KGÜP güncellemesi yapılmıştır.

- Yapılan GİP işlemi üretim tahmini ve KGÜP arasındaki fark kadarsa GİP kadar KGÜP revizesi yapılmış
- Üretim tahmini ve KGÜP arasındaki fark GİP'ten daha az ise üretim tahmini ve KGÜP farkı kadar KGÜP güncellenmiş
- GİP işlemi yönü ve üretim planı KGÜP arasındaki fark ters yönlü ise KGÜP güncellenmesi yapılmamış
- Üretim planı ve KGÜP arasındaki fark GİP işlemi ile aynı yönlü ise fakat GİP işlem miktarından daha büyük bir fark var ise mevzuat kuralları gereği maksimum GİP işlemi kadar KGÜP revizesi yapılmıştır.

Peş peşe yapılması gereken bu iki adımın sonucunda ise ticari işlem 2023-2024 yılları süresince 7 gün 24 saat boyunca gerçekleştirilmiş olup bu basit kurala istinaden piyasa işletmecisinin maliyet faydası saatlik olarak hesaplanarak aylık toplamaları aşağıdaki gibi raporlanmıştır:

Tablo 5*Poyraz Rüzgar Santrali Gün içi piyasa işlemleri aracılığıyla sağlanan fayda*

	GİP'siz Enerji Dengesizlik Tutarı (TL)	GİP'siz Kesinleşmiş Üretim Planından Sapma Tutarı (KÜPST)	GİP ile Enerji Dengesizlik Tutarı (TL)	GİP ile Kesinleşmiş Üretim Planından Sapma Tutarı (KÜPST)	Saygılanan Fayda
2023 Ocak	3,802,595.37	253,624.66	2,209,670.59	152,019.66	1,694,529.78
2023 Şubat	7,956,822.65	313,574.23	2,046,369.42	214,163.09	6,009,864.37
2023 Mart	2,322,779.74	119,390.54	399,824.50	91,887.25	1,950,458.54
2023 Nisan	638,588.95	90,533.85	(538,425.26)	85,498.69	1,182,049.37
2023 Mayıs	3,259,544.73	135,931.67	801,231.24	89,710.24	2,504,534.92
2023 Haziran	2,178,917.01	108,001.10	581,540.05	81,022.28	1,624,355.78
2023 Temmuz	3,558,635.85	145,227.03	1,079,708.34	98,118.67	2,526,035.87
2023 Ağustos	2,998,562.34	124,189.60	1,386,256.09	99,146.87	1,637,348.98
2023 Eylül	3,651,159.86	121,933.75	1,207,663.34	87,662.13	2,477,768.14
2023 Ekim	3,351,784.95	128,494.26	29,937.65	84,125.88	3,366,215.68
2023 Kasım	2,190,404.33	185,796.91	(60,386.37)	152,880.96	2,283,706.65
2023 Aralık	3,944,148.53	142,226.77	152,944.26	89,909.26	3,843,521.78
2024 Ocak	4,405,060.06	192,120.60	1,353,342.93	114,946.20	3,128,891.52
2024 Şubat	3,025,948.29	125,167.31	818,853.36	84,229.84	2,248,032.40
2024 Mart	2,395,388.40	138,028.65	881,022.66	104,714.68	1,547,679.71
2024 Nisan	945,618.30	118,333.60	(188,401.86)	104,338.94	1,148,014.81
2024 Mayıs	2,053,204.27	120,504.08	154,589.34	95,050.14	1,924,068.87
2024 Haziran	3,065,399.56	110,678.48	1,027,796.07	86,358.54	2,061,923.43
2024 Temmuz	3,856,045.21	155,753.00	1,031,960.90	136,584.79	2,843,252.53
2024 Ağustos	3,383,678.08	165,344.47	817,694.45	137,667.73	2,593,660.38
2024 Eylül	3,463,570.65	151,919.23	994,481.89	106,056.82	2,514,951.16
2024 Ekim	2,319,733.66	156,733.03	213,240.31	134,229.93	2,128,996.46
2024 Kasım	1,970,372.16	127,659.43	834,979.65	104,439.20	1,158,612.74

Not. Veriler Poyraz RES santraline ait olup, 2023-2024 yıllarını kapsamaktadır

Enerji dengesizlik tutarı hesaplanırken, daha önce bahsedildiği gibi, şirketin net pozisyonu belirlenir. Bu net pozisyon, sistem operatörünün şirketten denge noktasında, yani net sıfır pozisyonda olmasını beklemesiyle sonuçlanır. Ancak, yenilenebilir enerji

santrallerinin, özellikle de rüzgar santralleri gibi değişken üretim kapasitesine sahip olanların, üretim tahminlerini yapmak oldukça zordur. Bu nedenle, tahminlerde ciddi sapmalar meydana gelebilir.

Sistem operatörü, oluşan dengesizlikleri Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından açıklanan Uzlaştırma Yönetmeliği'ne uygun bir şekilde değerlendirerek maliyetlendirmektedir. Eğer şirket, gün öncesi planlamasından saparak nete sisteme satış yönünde bir pozisyonda kalırsa, bu satıştan elde edeceği ödeme, ilgili saatin PTF (Piyasa Takas Fiyatı) ve SMF (Sistem Marjinal Fiyatı) değerlerinin minimumunun 0.97'si ile hesaplanır. Bu durum, bir MWh enerji satışının normal PTF fiyatına kıyasla çok daha düşük bir birim fiyata gerçekleşmesine neden olur.

Tam tersi bir senaryoda, yani şirket alış yönünde bir pozisyonda kalırsa, bu kez ilgili saatin PTF ve SMF değerlerinin maksimumu dikkate alınır. Ancak bu maksimum değer, 1.03 ile çarpılarak maliyetlendirilir ve alış pozisyonundaki enerji miktarıyla çarpılarak şirkete ek bir maliyet yüklenir.

Bu maliyetlendirme mekanizmaları enerji piyasasındaki katılımcıları denge noktasına ulaşmaya teşvik etmektedir. Böylece piyasa, dengesizliklerin minimize edilmesi ve sistemin sürdürülebilir şekilde yönetilmesi hedeflerine yönlendirilmektedir.

Örneğin 2023 Ocak ayı incelenmesinde firma günlük avans ödemeleri ile PTF ve gün öncesi üretim değerleri çarpımı ile günlük gelir elde etmiştir, toplam gelir 18milyon civarındadır, fakat ay sonu uzlaştırma verileri açıklanmasıyla sistemi dengesizliğe düşürdüğü gözlemlenerek piyasa işletmecisi tarafından dengesizlik tutarı 3milyon hesaplanmış ve firmadan bu geri ödeme olarak alınacak bir maliyet olarak uzlaştırma kalemi olarak açıklanmıştır, fakat gün içi piyasasında ticari işlemlerle 2 milyon civarına çekilmiştir. 2023 yılında toplam 7200MW üretim saatlik ortalama 10 MWh civarı bir gerçekleşen üretim söz konusudur, fakat saatlik toplam 5900MW ortalama 8 MWh civarı bir satış işlemi gerçekleşmiştir. Ortalama 2 MWh bir sapmadan bahsedebiliriz, bu sapma 3milyonluk bir maliyete sebep olurken ticari işlemlerle aylık ortalama 1.1MWh ticari işlemlerle dengesizlik azaltılmıştır, bu azalmanın etkisi de dengesizlik maliyetine de yansımıştır.

Kesinleşmiş Üretim Planından Sapma Tutarı maliyetinde ise 2023 Ocak ayı incelendiğinde 253000TL seviyelerinden 152000TL seviyelerine maliyet çekilmiştir. Eğer gün öncesinden bildirilen KGÜP değerleri UEVM verileri ile eşit olsaydı herhangi

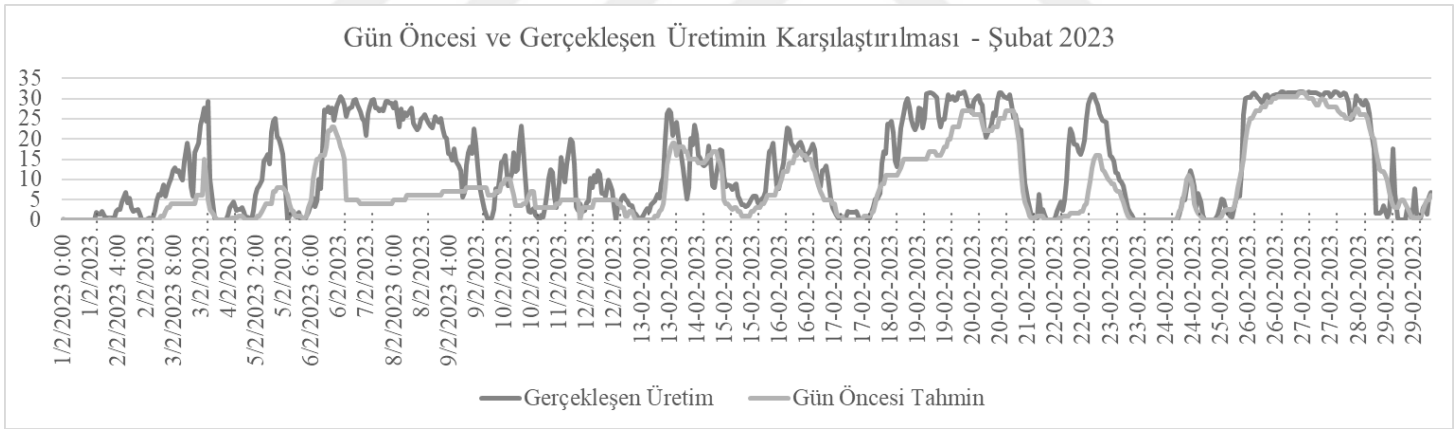
bir maliyet oluşmayacaktı, fakat rüzgar santralinin tahminindeki belirsizliğin santrale ekstra çıkardığı maliyet göz önüne alındığında gün içi piyasasında ticari işlemlerle yarı yarıya bir düşüş sağlanmıştır.

Nisan 2023 değerlendirildiğinde GİP işlemi gerçekleştirilen maliyet -538425.26 civarında negatif yönlü bir hespalama aslında sistem dengesizliğinin piyasaya satıcı yönlü olarak kaldığını ve piyasadan 500000TL civarında ödeme alacağı anlamına gelmektedir.

Şubat 2023 değerlendirildiğinde ise gerçekleşen üretim değerleri ile gün öncesinden yapılan tahminlerin arasında 4MW civarında bir sapma söz konusudur. Yani gün öncesi tahmin gerçekleşen değerlerden ciddi anlamda saptığı için yapılan GİP işlemleri ile dengesizlik maliyetinde çok büyük oranda azalma sağlanmıştır. Şubat ayı önemli bir operasyonel hatanın da göstergesi olabilir, gün içi piyasası işlemleri aracılığıyla sorun giderilmiş olabilir. Ticari süreçlerde bu tarz operasyonel riskler de yer almaktadır.

Şekil 8

Poyraz RES Gün Öncesi ve Gerçekleşen Üretimin Karşılaştırılması Şubat 2023



Not. Veriler EPİAŞ (Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.) platformu üzerinden temin edilmiştir. Grafik yazar tarafından oluşturulmuştur.

Maliyetlerin düşüşleri bar grafik olarak incelendiğinde yapılan ticari işlemlerin etkileri daha iyi gözlemlenmektedir. Eğer bu santral tahminleme yöntemi daha iyi olsaydı, maliyetleri en aza indirmek üzere daha iyi sonuçlar üretebilirdi. Aynı zamanda, günüçi piyasası saatlik işlem olanağı aracılığıyla dengesizlik yönetimi yapıldığı için ticari işlemler, günüçi piyasasının işlem yoğunluğuna da bağlı olmaktadır. Bu durum, firmanın her günüçi piyasası teklifinin eşleşmeme ihtimalini de beraberinde getirmektedir.

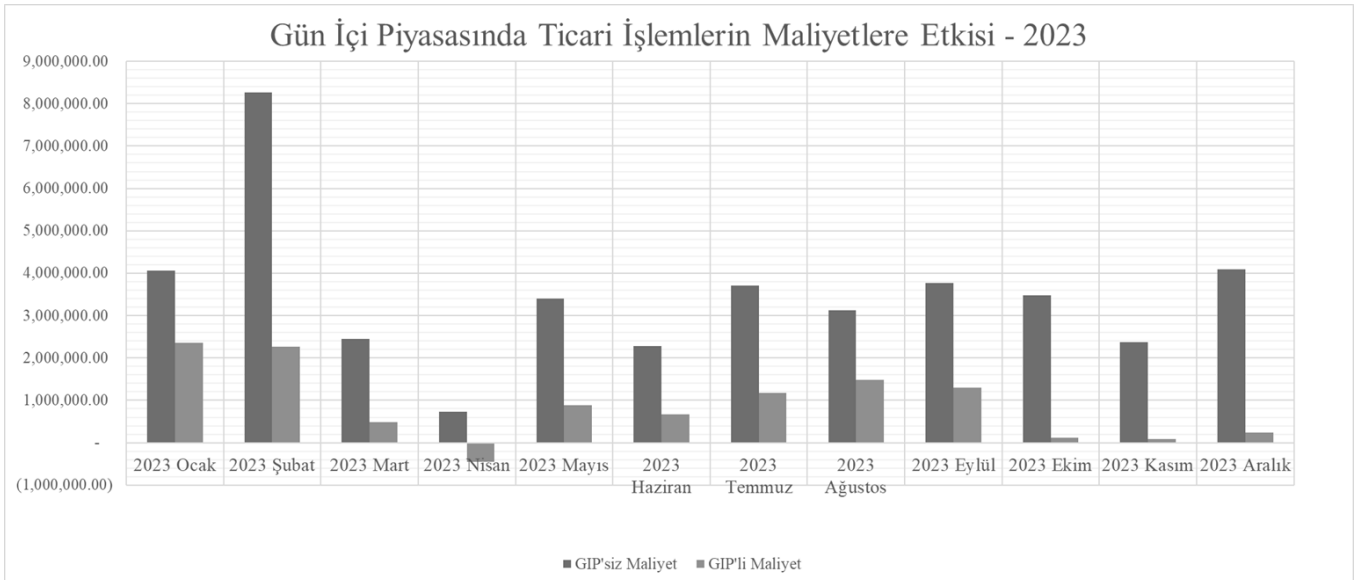
Özellikle rüzgar ve güneş gibi üretimi değişken kaynaklarda bu belirsizlik daha belirgin hale gelmektedir.

Batarya sistemlerinin gelişmesiyle birlikte, santral üretimi istenilen seviyede olmadığında batarya devreye sokularak piyasa katılımcıları maliyetlerden ciddi anlamda korunabilir. Örneğin, ani üretim düşüşlerinde bataryalar aracılığıyla sistemde hızlı bir dengeleme sağlanarak enerji arzı sürdürülebilir bir şekilde yönetilebilir. Böylece hem üretici maliyetleri düşerken hem de sistemin güvenilirliği artar. Bu durum, yenilenebilir enerji kaynaklarının piyasadaki payını artırarak daha sürdürülebilir ve dengeli bir enerji piyasası oluşturulmasına olanak tanır.

Buna ek olarak, enerji depolama sistemleri sayesinde ticari stratejiler daha esnek hale gelir. Örneğin, üretimin düşük olduğu saatlerde depolanan enerji, piyasadaki fiyatların yüksek olduğu saatlerde satılarak gelir optimizasyonu sağlanabilir. Bununla birlikte, entegre batarya sistemleri, enerji sistemine daha fazla yenilenebilir kaynak dahil edilmesini teşvik ederek karbon emisyonlarının azaltılmasına da katkıda bulunabilir. Uzun vadede, bu tür teknolojik yatırımlar enerji piyasasında hem ekonomik hem de çevresel faydalar sağlayacaktır.

Şekil 9

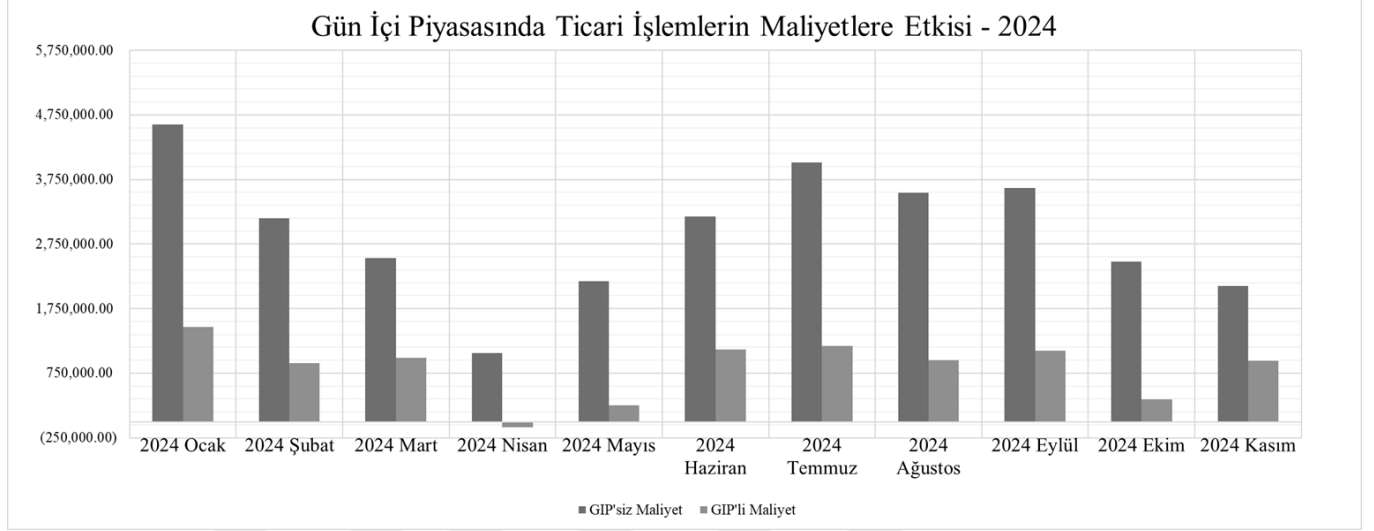
Poyraz RES Gün İçi Piyasasında Ticari İşlemlerin Maliyetlere Etkisi - 2023



Not. Veriler EPIAŞ (Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.) platformu üzerinden temin edilmiştir. Grafik yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 10

Poyraz RES Gün İçi Piyasasında Ticari İşlemlerin Maliyetlere Etkisi - 2024



Not. Veriler EPİAŞ (Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.) platformu üzerinden temin edilmiştir. Grafik yazar tarafından oluşturulmuştur.

SONUÇ

7 gün 24 saat çalışan bir piyasa olan enerji piyasasında maliyetlerin yönetilmesi, özellikle yenilenebilir santrallerin ön görülemez üretim planları dikkate alınarak ve tüm verilerin kaydının tutulması veriler arasındaki değişimin hızlı bir şekilde hesaplanması, piyasa işletmecisi ve sistem operatörünün açıkladığı verilerinin yakın takibi ve tahmin edilmesi ile mümkündür. Bu çalışmada en temel seviyede piyasa fiyat fırsatları yakalanmasından ziyade yalnızca üretim planının bir gün önce planlanan ve piyasaya bildirilen değerlerden farkı alınarak yapılan ticari kararın ne kadar katkı sağladığı değerlendirilmiş olup bunun yadsınamaz katkısı gözlemlenmiştir.

Piyanın sürekli ve saatlik olarak çalışması piyasa katılımcılarının vardiyalı olarak çalışma koşulları hazırlamasını gerektirir ve piyasa kurallarına göre yapılacak işlemler her zaman kısıtlı süreler çerçevesinde yapılabilir geçmişe yönelik düzeltme mümkün olmayıp her zaman geleceğe yönelik hamleler ile yönetilebilmektedir, gelecek kavramı da ancak belirli bir süreye kadar kısıtlanmıştır. Bu koşullar altında piyasa işletmecisi ve sistem operatörü, piyasa katılımcısını her an planındaki değişimleri gözetmesi, sistem yönünü doğru tahmin etmesi ve ticari işlem yapabileceği kontrattaki

fiyat değişiminin kendisine en kar getirecek şekilde değerlendirmesi ve ticari kararını vermesi yönünde zorlamaktadır, bu derece fazla parametresi olan ve süreklilik arz eden bir piyasada ticari karar almasını kolaylaştıracak bir yazılım uygulamasıyla sürecini yöneten bir piyasa katılımcısı aynı zamanda sistem operatörünün ülke enerji ihtiyacını doğru olarak tahmin etmesine katkı sağlayacaktır.

Bu çalışma, yenilenebilir enerji santrallerinin dijitalleşme süreçleri ve bu süreçlerin santral maliyetlerine etkilerini incelemeyi amaçlamış; bu kapsamda enerji piyasalarındaki dijital dönüşümün teorik altyapısı, teknik olanakları ve ticari etkileri ele alınmıştır. İlgili literatür taraması, veriler ve vaka incelemeleri ışığında şu temel sonuçlar elde edilmiştir:

Yenilenebilir enerji santrallerinin dijitalleşmesi, IoT cihazları, yapay zeka destekli tahmin sistemleri ve batarya enerji depolama teknolojileri gibi çözümlerin entegrasyonu ile operatif verimliliği artırırken, maliyetlerin optimize edilmesine olanak tanımıştır. IoT tabanlı sensör teknolojileri sayesinde enerji üretimi ve tüketimindeki belirsizlikler azaltılmış, bu da arz-talep dengesinin daha hassas bir şekilde sağlanmasına katkı sağlamıştır.

Batarya enerji depolama sistemleri ise yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekliliği sağlamlasında kritik bir rol oynamış, özellikle enerji fiyatlarının volatilitelerini azaltarak ticari fayda yaratmıştır. Yenilenebilir kaynakların kesintili yapısı, depolama teknolojileri ile minimize edilmiş ve şebeke kararlılığı artırılmıştır.

Enerji piyasalarının dijitalleşmesi, özellikle otomatik ticaret sistemlerinin yaygınlaşması ile desteklenmiş ve bu sistemler piyasa katılımcılarının daha hızlı ve etkin karar alabilmelerine olanak sağlamıştır. Otomatik ticaret sistemleri, gün öncesi ve gün içi piyasalarında işlem hacmini artırırken, dengesizlik maliyetlerinin azaltılmasına yardımcı olmuştur.

Özellikle, EPİAŞ tarafından yürütölen gün içi piyasası mekanizması, yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim tahminlerindeki sapmaların düzenlenmesine olanak tanımış ve katılımcıların daha çevik ticari stratejiler benimsemesini sağlamıştır. Avrupa enerji piyasalarında uygulanan hibrit modeller, likiditeyi artırırken fiyat risklerini azaltmada örnek teşkil etmiş ve bu modellerin Türkiye piyasalarına adaptasyonu potansiyel faydalar sunmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, dijital dönüşüm teknolojileriyle

desteklenerek hem çevresel hem de ekonomik sürebilirliği desteklemiştir. Bu çalışma, enerji sektörünün dijitalleşmesinin iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir rol oynadığını ve bu dönüşümün enerji arzının sürekliliğini sağlamada etkili bir çözüm olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışma, mevcut veriler ve literatür üzerine inşa edilmiş, ancak enerji piyasalarındaki dönüşümün tüm boyutlarını kapsamamıştır. Gelecekte, enerji depolama teknolojilerinin ekonomik etkileri, ülkeler arası enerji ticaretinde dijitalleşmenin oynadığı rol ve enerji piyasasında yapay zekanın daha etkin kullanımı gibi konular daha ayrıntılı incelenmelidir.

Son olarak, dijitalleşmenin enerji piyasalarında etkin bir şekilde uygulanabilmesi için politika yapıcıların, yenilikçi teknolojilere yatırımları teşvik eden stratejiler geliştirmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda çalışma, enerji ticaretinde dijital dönüşümün potansiyel faydalarını vurgulamış ve sektörel anlamda yol gösterici olmuştur.

KAYNAKÇA

- Aggarwal, S. K., Saini, L. M., & Kumar, A. (2009). Electricity price forecasting in deregulated markets: A review and evaluation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 31(1), 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2008.09.003>
- Alagöz, M., & Aydın, N. (2017). Türkiye Elektrik Piyasasının Gelişimi: Mevzuat ve Kurumsal Yapı. *Enerji Hukuku Dergisi*, 8(1), 10–26.
- Ali Dursun, İ., Eke, İ., & Tezcan, S. S. (2020). Gün Öncesi Piyasası için Yapay Sinir Ağları ile Türkiye Enterkonnekte Sistemi İletim Hatları Kayıplarının Tahmini. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 549-564.
- Ataay, F. (2002). Enerji sektöründe özelleştirme: Rekabetçi bir piyasada yönetim mi? *Praksis*, 9, 233.
- Ataay, M. E. (2002). Elektrik Piyasasında Düzenleme Kurumu: EPDK. *Ankara Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi Dergisi*, 57(2), 55–72.
- Azevedo, B. F., Rocha, A. M. A. C., & Pereira, A. I. (2024). Hybrid approaches to optimization and machine learning methods: A systematic literature review. *Machine Learning*, 113, 4055–4097. <https://doi.org/10.1007/s10994-023-06467-x>
- Azevedo, I. M. L., Hittinger, E., & Trancik, J. E. (2024). Hybrid machine learning and optimization models for energy management: A systematic review. *Energy AI*, 12, 100185.
- Bates, A. M., Preger, Y., Torres-Castro, L., Harrison, K. L., Harris, S. J., & Hewson, J. (2022). Are solid-state batteries safer than lithium-ion batteries? *Joule*, 6(4), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.02.007>
- Bates, A., Chen, W., & Mukherjee, R. (2022). Thermal performance analysis of all-solid-state batteries under abuse conditions. *Journal of Power Sources*, 524, 231081.
- Biçen, Y. (2016). Türkiye elektrik enerjisi piyasası gelişim süreci: Gün öncesi ve dengeleme güç piyasası özellikleri. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 432 - 438.
- Çetintaş, H., & Bicil, İ. M. (2015). Elektrik piyasalarında yeniden yapılanma ve Türkiye elektrik piyasasında yapısal dönüşüm. *Optimum Ekonomi ve Yönetim Bilimleri Dergisi*, 2(2).
- Çetintaş, H., & Biçil, M. (2015). Türkiye Elektrik Piyasasında EPIAŞ'ın Rolü ve Piyasa

İşleyişine Etkileri. TEPAV Enerji Raporu, (14), 1–18.

Conejo, A. J., Contreras, J., Espínola, R., & Plazas, M. A. (2005). Forecasting electricity prices for a day-ahead pool-based electric energy market. *International Journal of Forecasting*, 21(3), 435–462.

Conejo, A. J., Contreras, J., Espinola, R., & Plazas, M. A. (2005). Forecasting electricity prices for a day-ahead pool-based electric energy market. *International Journal of Forecasting*, 21(3), 435–462. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2004.12.005>

Davies, G. (2021). How IoT and AI are revolutionizing energy management. *Energy World Journal*, 59(2), 34–41. <https://www.energyworldjournal.com/articles/2021/02/iot-ai-energy>

Dudek, G. (2016). Multilayer perceptron for GEFCom2014 probabilistic electricity price forecasting. *International Journal of Forecasting*, 32(3), 1057–1060. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2015.11.003>

Dudek, G. (2016). Short-term load forecasting using random forests. *Electric Power Systems Research*, 130, 132–140.

Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği (EPDÜY). (2025). Resmî Gazete, 14 Nisan 2009 tarihli ve 27200 sayılı (güncellenmiş 2025 versiyonu).

Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği. (2018).

Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği. (2019).

Elsisi, M., Amer, M., Dababat, A., & Su, C.-L. (2023). A comprehensive review of machine learning and IoT solutions for demand side energy management, conservation, and resilient operation. *Energy*, 281, 128256. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128256>

Elsisi, M., Tran, Q.-T., Mahmoud, K., & Lehtonen, M. (2023). Reinforcement learning based demand response and energy saving with IoT in smart buildings. *Sustainable Cities and Society*, 91, 104432.

EPDK. (2013). Faaliyet Raporu 2013. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-1/epdk-faaliyet-raporlari>

EPİAŞ. (2022). Gün İçi Piyasası İşleyiş Raporu. Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. <https://www.epias.com.tr>

- EPIAŞ. (2023). Gün Öncesi Piyasası İşleyiş Raporu. Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.
- Erdem, C. (2017). Elektrik Piyasalarında Türev Ürünlerin Kullanımı ve Türkiye Uygulaması. Yayımlanmamış Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi.
- Erdem, F. (2019). Elektrik piyasalarında şeffaflık ve piyasa işletmeciliği: EPIAŞ örneği. *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, 22(3), 45–59.
- Ertaylan, A., Aktaş, Ö., & Doğan, Y. (2021). Yapay sinir ağları ile piyasa takas fiyatı tahminlemesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(67), 93–105. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2021236708>
- Forecasting electricity prices for intraday markets with machine learning. (2023). <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2%3A1746031/FULLTEXT01.pdf>
- Forsyth, R. (2023). The impact of electric vehicles on energy storage and grid balance. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 18(1), 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.ses.2023.01.006>
- Ghasemi, A., Shayeghi, H., Moradzadeh, M., & Nooshyar, M. (2016). A novel hybrid algorithm for electricity price and load forecasting in smart grids with demand-side management. *Applied Energy*, 177, 40–59. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.095>
- Ghoddusi, H., Creamer, G. G., & Rafizadeh, N. (2019). Machine learning in energy economics and finance: A review. *Energy Economics*, 81, 709–727.
- Ghoddusi, H., Creamer, G. G., & Rafizadeh, N. (2019). Machine learning in energy economics and finance: A review. *Energy Economics*, 81, 709–727. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.04.015>
- Graeber, C., & Tallau, C. (2022). Frequent auctions for intraday electricity markets. *The Energy Journal*, 43(1).
- Gürtler, M., & Krämer, A. (2020). Intraday electricity markets: An empirical analysis of trading and pricing dynamics. *Energy Economics*, 86, 104692. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104692>
- Gürtler, M., & Krämer, N. (2020). The effect of forecast errors on intraday electricity trading. *Energy Economics*, 86, 104631.
- Hitachi Energy. (2023). Artificial intelligence for smart energy systems: Shaping the

- future of power. <https://www.hitachienergy.com/research/ai-in-smart-energy>
- IEA. (2017). Digitalization & energy. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>
- IEA. (2021). World Energy Outlook 2021. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- Ilic, M. D., Xie, L., & Joo, J.-Y. (2011). Efficient coordination of wind power and price-responsive demand—Part I: Theoretical foundations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(4), 1875–1884. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2111320>
- International Energy Agency. (2017). Digitalization & energy. <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>
- IRENA. (2019). Innovation landscape brief: Utility-scale batteries. International Renewable Energy Agency.
- IRENA. (2020). Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030. International Renewable Energy Agency.
- Joskow, P. (2008). Capacity payments in imperfect electricity markets: Need and design. *Utilities Policy*, 16(3), 159-171.
- Kalcheva, I., Dupuy, M., & Lin, J. (2022). Power market coupling and integration: Challenges and trends in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, 112579.
- Khatib, H., & Galiana, F. D. (1994). Negotiating bilateral contracts in multi-agent electricity markets: A case study. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(2), 584–590.
- Köse, A. (2019). Türkiye Elektrik Piyasasında İkili Anlaşmaların Rolü ve Etkileri. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Kratzenberg, F., Schneider, M., & Krug, M. (2021). 100% renewable energy by 2030? A system dynamics approach. *Renewable Energy*, 172, 1228–1241.
- Kratzenberg, M. G., Zürn, H. H., & Rüther, R. (2021). One hundred percent renewable energy generation in 2030 with the lowest cost commercially available power plants. Fotovoltaica UFSC – Solar Energy Research Laboratory, Federal University of Santa Catarina. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.08829>

- Kuppelwieser, T., & Wozabal, D. (2018). Liquidity costs on intraday power markets: Continuous trading versus auctions. *Energy Economics*, 70, 399–414. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.12.026>
- Li, H., & Tesfatsion, L. (2009). Development of open source software for power market research: The AMES test bed. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275311>
- Li, Y., & Yu, N. (2021). Learning to arbitrage congestion in electricity market with virtual bids. *Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, 1-6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISGTEUROPE52324.2021.9640104>
- Lopes, F., & Coelho, H. (2011). Multi-agent negotiation in electricity markets. *Lecture Notes in Business Information Processing*, 10, 134-146. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23014-1_10
- Market power and intraday market issues. (2021). <https://www.nhh.no/en/nhh-bulletin/article-archive/2021/juni/market-power-and-intraday-market-issues/>
- McKinsey & Company. (2022). Battery storage: The next disruptive technology in power. <https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/battery-storage-opportunities>
- Morales, J. M., & Perez-Ruiz, J. (2014). Integrating renewable energy sources into the electricity market: Challenges and opportunities. *Renewable Energy*, 69, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.040>
- Narayan, P. K., Sharma, S. S., & Thiraisamy, K. S. (2021). Algorithmic trading and high-frequency trading: An overview. *Journal of Economic Surveys*, 35(1), 223–247.
- Özel, A., Büyüktanır, Ö., & Özel, B. (2013). Türkiye Elektrik Piyasası: Mevcut Durum ve Gelecek Beklentileri. *Enerji ve Çevre Dergisi*, 2(1), 25–34.
- Padmanabhan, N., Ahmed, M., & Bhattacharya, K. (2020). Battery energy storage systems in energy and reserve markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(1), 215-226. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2936131>
- Peng, C.-Y., Kuo, C.-C., & Tsai, C.-T. (2021). Optimal configuration with capacity analysis of PV-Plus-BESS for behind-the-meter application. *Applied Sciences*, 11(17), 7851. <https://doi.org/10.3390/app11177851>

- Raja, A. A., & Grammatico, S. (2023). Bilateral peer-to-peer energy trading via coalitional games. arXiv preprint arXiv:2301.12271.
- Randall, L., Agrawal, P., & Mohapatra, A. (2022). IoT based load forecasting for reliable integration of renewable energy sources. *Journal of Signal Processing Systems*. <https://doi.org/10.1007/s11265-022-01785-0>
- Research areas and methods of interest in European intraday electricity markets: A systematic review. (2024). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352467724000973>
- Safari, A., Daneshvar, M., & Anvari-Moghaddam, A. (2024). Energy intelligence: A systematic review of artificial intelligence for energy management. *Applied Sciences*, 14(23), 11112. <https://doi.org/10.3390/app142311112>
- Safari, M., Ghofrani, M., & Makki, S. (2024). Artificial intelligence in energy systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 176, 113232.
- Safi, S., Gupta, R., & Elattar, E. (2023). AI-powered energy management in smart grids: A review and case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, Article 112403. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112403>
- Saldarini, F., Ahmed, H., & Bhattacharya, R. (2023). Battery energy storage systems (BESS) in renewable energy integration and electricity markets. *Journal of Renewable Energy Systems*, 12 (3), 221–245.
- Stochastic process model for energy prices in the intraday market. (2022). <https://repository.tudelft.nl/record/uuid%3A8cb56b27-a9be-4a1a-b2ea-04bb00bbece2>
- The future electricity intraday market design. (2019). <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/>
- Trading behaviour on the continuous intraday market Elbas. (2023). https://www.researchgate.net/publication/285627689_Trading_behaviour_on_the_continuous_intraday_market_Elbas
- Wang, N., Verzijlbergh, R. A., Heijnen, P. W., & Herder, P. M. (2022). An energy system model for mixed bilateral and pool markets. arXiv preprint arXiv:2201.01685.
- Weber, C. (2010). Adequate intraday market design to enable the integration of wind energy into the European power systems. *Energy Policy*, 38(7), 3155–3163.

Whitefield-Madrano, R. (2023). The role of IoT in optimizing power plant efficiency. *Journal of Smart Infrastructure and Energy Systems*, 11(3), 210–225. <https://doi.org/10.1177/23998083231124567>

Yumurtacı, M., & Akkaya, S. (2020). Türkiye elektrik piyasasında gün öncesi fiyatlarının analizi. *Enerji, Piyasa ve Hukuk Dergisi*, 5(2), 37–49.



ÖZ GEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hande Aydemir

Yabancı Dil : İngilizce

Doğum Yeri / Yılı :

E-Posta :

ORCID Numarası :

Eğitim Bilgileri:

2025, Anadolu Üniversitesi, İktisat, İktisat Ana Bilim Dalı

Mesleki Deneyimi:

