

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**SINIR ÖTESİ ELEKTRİK TİCARETİNİN GÜN ÖNCESİ PİYASASI FİYAT  
OYNAKLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mustafa Emin MALKOÇ**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**EKİM 2024**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**SINIR ÖTESİ ELEKTRİK TİCARETİNİN GÜN ÖNCESİ PİYASASI FİYAT  
OYNAKLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mustafa Emin MALKOÇ  
(301171023)**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sermin ONAYGİL**

**EKİM 2024**



**ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL**

**IMPACT OF CROSS-BORDER ELECTRICITY TRADE ON DAY-AHEAD  
MARKET PRICE VOLATILITY: A CASE STUDY OF TURKEY**

**M.Sc. THESIS**

**Mustafa Emin MALKOÇ  
(301171023)**

**Energy Science and Technology Division**

**Energy Science and Technology Programme**

**Thesis Advisor: Prof. Dr. Sermin ONAYGİL**

**OCTOBER 2024**



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 301171023 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mustafa Emin MALKOÇ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SINIR ÖTESİ ELEKTRİK TİCARETİNİN GÜN ÖNCESİ PİYASASI FİYAT OYNAKLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Sermin ONAYGİL** .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Önder GÜLER** .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Nurettin UMURKAN** .....

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : **30.09.2024**  
**Savunma Tarihi** : **03.10.2024**





*Kıymetli eşim ve çocuklarıma,*



## ÖNSÖZ

Yüksek Lisans öğrenim hayatımın tamamında benden ümidini kesmeyen, desteğini esirgemeyen ve bana inanan değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Sermin ONAYGİL'e ve kıymetli vaktini ayırarak bu çalışmayı tamamlamam konusunda bana çok destek olan Sayın Araş. Gör. Rabia CİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez hazırlık aşamasında fikirleri ve yönlendirmeleri ile bana destek olan değerli çalışma arkadaşlarıma ve yöneticilerime ayrı ayrı teşekkür ederim.

Son olarak, her zaman yanımda olan ve bu çalışmayı bitirmem konusunda bana en büyük desteği vererek bir çok fedakarlıkta bulunan sevgili eşime şükranlarımı sunarım.

Eylül 2024

Mustafa Emin MALKOÇ  
(Elektrik Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER .....	xi
KISALTMALAR .....	xiii
SEMBOLLER .....	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY .....	xxiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı.....	5
1.2 Çalışmanın Aşamaları.....	5
<b>2. TÜRKİYE ELEKTRİK ENERJİSİ PİYASASI.....</b>	<b>7</b>
2.1 Türkiye Elektrik Sektörünün Tarihsel Gelişimi .....	7
2.2 Türkiye Elektrik Piyasaları ve Fiyat Oluşumu .....	10
<b>3. SINIR ÖTESİ ELEKTRİK TİCARETİ (CROSS BORDER TRADING) .....</b>	<b>17</b>
<b>4. VERİ VE İSTATİSTİKSEL YAKLAŞIM .....</b>	<b>33</b>
4.1 Kullanılan Veriler .....	33
4.2 ARIMAX Modeli.....	35
4.3 GARCH Modeli.....	37
<b>5. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>41</b>
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>49</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>53</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>59</b>



## KISALTMALAR

<b>AB</b>	: Avrupa Birliği
<b>ABD</b>	: Amerika Birleşik Devletleri
<b>ACER</b>	: Enerji Düzenleyicileri İşbirliği Ajansı
<b>AR</b>	: Otoresif
<b>ARIMAX</b>	: Auto Regressive Integrated Moving Average With Exogenous Variables
<b>ATC</b>	: Available Transfer Capacity
<b>BOTAŞ</b>	: Boru Hatları İle Petrol Taşıma Anonim Şirketi
<b>DAM</b>	: Day Ahead Market
<b>DGP</b>	: Dengeleme Güç Piyasası
<b>ENTSO-E</b>	: European Network of Transmission System Operators for Electricity
<b>EPDK</b>	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
<b>EPIAŞ</b>	: Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketi
<b>ETKB</b>	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
<b>EU</b>	: European Union
<b>EÜAŞ</b>	: Elektrik Üretim Anonim Şirketi
<b>EXIST</b>	: Energy Exchange Istanbul
<b>FB</b>	: Flow Based
<b>GARCH</b>	: Generalized AutoRegressive Conditional Heteroskedasticity
<b>GİP</b>	: Gün İçi Piyasası
<b>GÖP</b>	: Gün Öncesi Piyasası
<b>GWh</b>	: gigawatt saat
<b>IMF</b>	: International Monetary Fund
<b>İHD</b>	: İşletme Hakkı Devri
<b>KCETAŞ</b>	: Kayseri ve Civarı Elektrik Türk Anonim Şirketi
<b>kV</b>	: kilovolt
<b>kW</b>	: kilowatt
<b>kWh</b>	: kilowatt saat
<b>MA</b>	: Hareketli Ortalama
<b>MCP</b>	: Market Clearing Price

<b>MW</b>	: megawatt
<b>OECD</b>	: Organisation for Economic Co-operation and Development
<b>OTC</b>	: Over The Counter
<b>PMUM</b>	: Piyasa Mali Uzlaştırma Merkezi
<b>PTF</b>	: Piyasa Takas Fiyatı
<b>SMF</b>	: Sistem Marjinal Fiyatı
<b>TEAŞ</b>	: Türkiye Elektrik Üretim İletim Anonim Şirketi
<b>TEDAŞ</b>	: Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
<b>TEİAŞ</b>	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
<b>TEK</b>	: Türkiye Elektrik Kurumu
<b>TETAŞ</b>	: Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt Anonim Şirketi
<b>TWh</b>	: terawatt saat
<b>YEKDEM</b>	: Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması
<b>YİD</b>	: Yap-İşlet-Devret
<b>VIOP</b>	: Vadeli İşlem ve Opsiyon Piyasası

## SEMBOLLER

$CO_2$	: Karbondioksit
$y$	: Bağımlı değişken
$c$	: Sabit terim
$\phi_i$	: Otoregresif katsayısı
$\theta_i$	: Hareketli ortalama katsayısı
$X$	: Bağımsız değişken
$\beta_j$	: Dışsal değişken katsayısı
$\beta$	: Beta
$\epsilon$	: Hata terimi
$\sigma$	: Varyans
$\omega$	: Omega
$\alpha$	: Alpha



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 3.1 : İthal ve ihraç edilen MWh cinsinden elektrik enerjisinin yıllar itibariyle ülkelere dağılımı.....	21
Çizelge 4.1 : Değişkenlerin istatistiksel özeti.....	35
Çizelge 4.2 : Değişkenlerin özeti.....	37
Çizelge 5.1 : ARIMAX modeli sonuçları.....	41
Çizelge 5.2 : Senaryolar arası oynaklık parametreleri.....	44





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Türkiye yıllık elektrik enerjisi tüketimi gelişimi.....	1
Şekil 1.2 : Türkiye kişi başı yıllık elektrik enerjisi tüketimi değişimi.....	2
Şekil 1.3 : Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücü ve elektrik üretiminin gelişimi.....	2
Şekil 1.4 : OECD ülkelerinin elektrik ithalatı, ihracatı ve net ticaret değişimi.....	3
Şekil 1.5 : Türkiye'nin elektrik ithalat ve ihracat miktarları.....	4
Şekil 2.1 : Elektrik piyasalarında merit order eğrisi.....	11
Şekil 2.2 : Türkiye toptan elektrik piyasaları.....	12
Şekil 2.3 : Elektrik piyasalarındaki ticaretin zaman açısından görünümü.....	16
Şekil 3.1 : 2000-2018 yılları arasında elektrik ithalat ve ihracatının bölgelere göre gelişimi [30].....	17
Şekil 3.2 : 2023 yılı Avrupa ülkeleri arasındaki net ithalat ve ihracat değerleri [31].	18
Şekil 3.3 : Türkiye'nin mevcut uluslararası iletim hatları [34].....	20
Şekil 5.1 : Gerçekleşen PTF ve modellenen PTF'nin saatlik karşılaştırması.....	43
Şekil 5.2 : Senaryolara göre oynaklık parametreleri.....	46



## SINIR ÖTESİ ELEKTRİK TİCARETİNİN GÜN ÖNCESİ PİYASASI FİYAT OYNAKLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ

### ÖZET

Hızla artan teknolojik gelişmeler, elektrik enerjisinin kullanımını yaygınlaştırarak modern hayatın vazgeçilmez bir unsuru haline getirmiştir. Enerji talebinin artması ve bu talebi karşılamak için sağlanması gereken kesintisiz arz ihtiyacı, sektörün şekillenmesinde rol oynayan en önemli başlıklardan birisidir. Diğer mal ve hizmetler gibi elektrik enerjisi de arz-talep prensibine tabiidir, ancak sürekli olarak depolanamaması, frekans kontrolü ve şebeke işletimi gibi kendine has bazı özellikleriyle farklılaşmaktadır.

Dünya genelinde liberalleşme ve serbest piyasa koşullarına geçişin etkileri enerji sektöründe de görülmüştür. Eskiden dikey entegre olan elektrik enerjisi sektörü, üretim, iletim ve dağıtım olmak üzere üç ana faaliyet koluna ayrılmıştır. Türkiye elektrik piyasası, 2001 yılında yürürlüğe giren 4628 Sayılı Elektrik Piyasası Kanunu ile serbestleşme sürecine girmiş, faaliyet alanlarındaki ayrıştırmalar ve özelleştirmelerin ardından şeffaf ve referans fiyat üretme yeteneğine sahip bir yapıya dönüşmüştür.

Elektrik fiyatları, temel olarak üretim ve tüketim miktarlarına bağlıdır. Günümüzde elektrik üretimi, doğal gaz, kömür, hidroelektrik, rüzgar ve güneş gibi çeşitli kaynaklar başta olmak üzere bir çok farklı kaynaktan sağlanmaktadır. Ülkeler, bu kaynaklardan belirli bir kompozisyonda elektrik üreterek enerji taleplerini karşılamaktadırlar. Enerji arz güvenliğinin kritik bir konu olduğu günümüzde, sınır ötesi elektrik ticareti alternatif bir arz kaynağı, sistem esnekliğine yapacağı katkı ve fiyatların yakınsamasını sağlayarak maliyet üstünlüğü sunması gibi faydaları nedeniyle ülkelerin sıklıkla başvurduğu bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Avrupa Birliği (AB), sınır ötesi elektrik ticaretinde hem fiziksel altyapı hem de düzenleyici çerçeve bakımından iyi uygulama örneklerini içermektedir. AB ülkeleri arasındaki iletim hatları, elektrik enerjisinin düşük fiyatlı bölgelerden yüksek fiyatlı bölgelere aktarılmasını sağlayarak, fiyatların dengelenmesine katkı sunmaktadır. Bu sayede maksimum ve minimum fiyat değerlerinde azalma yaşanırken, daha istikrarlı bir fiyat yapısı oluşmakta ve böylece sosyal fayda maksimize edilmektedir.

Türkiye, batıda AB üyesi olan Yunanistan ve Bulgaristan ile doğu ve güneyde ise Gürcistan, Azerbaycan, Ermenistan, İran, Irak ve Suriye ile enerji ithalat ve ihracatı yapabilecek altyapıya sahiptir. Bu çift yönlü elektrik ticareti, Türkiye'nin enerji dengesi ve fiyat oluşumunda önemli bir rol oynamaktadır.

Bu çalışma sınır ötesi elektrik ticaret hacminin Türkiye gün öncesi elektrik piyasasında oluşan saatlik fiyat oynaklığı üzerindeki etkisini ölçmeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında 2016 yılından başlayıp 2023 yılı sonuna kadar olan sekiz yıllık süredeki saatlik frekansta elektrik enerjisi üretim verileri, elektrik talebi ve elektrik fiyatları kullanılmıştır. İlgili veriler Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketi'nin (EPIAŞ) Şeffaflık Platformu'ndan temin edilmiştir.

İlk olarak kaynak bazında elektrik üretim verileri segmente edilmiş ve yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanan toplam üretim, barajlı santrallerden yapılan elektrik üretimi, kömür ve doğal gazdan elektrik üretimi, toplam elektrik talebi, ithalat ve ihracat miktarı verileri, elektrik fiyatları ve elektrik üretim amaçlı kullanılan doğal gaz tarifesi olmak üzere dokuz farklı değişkene ilişkin veri setleri hazırlanmıştır.

İthalat ve ihracat miktarlarının elektrik fiyatına olan etkisi, elektrik fiyatının bağımlı değişken olarak kabul edildiği bir Oto Regresif Bütünleşik Hareketli Ortalama Dışsal Değişkenli (ARIMAX) model ve bu modelden çıkan sonuçları analiz eden bir Genelleştirilmiş Otoregresif Koşullu Değişen Varyans (GARCH) modeli ile irdelenmiştir. Geçmiş sekiz yıla ilişkin verilerle yapılan bu modellemelerin ardından dört ana senaryo dikkate alınarak elektrik fiyatlarındaki oynaklık ölçülmüştür.

Birinci senaryoda ithalat ve ihracatın gerçekleştiği yani sınır ötesi elektrik ticaretinin bugüne kadarki haliyle devrede olduğu durum dikkate alınmıştır. Gerçekleşen veriler ile yapılan bu modelleme sonucu Piyasa Takas Fiyatı (PTF) zaman serisinin oynaklık parametreleri tespit edilmiştir.

İkinci senaryoda ise ithalat ve ihracatın gerçekleşmediği varsayımı yapılmış ve ithalat gerçekleşmediğinden ilgili miktar kadar elektriğin marjinal santral olan doğal gaz santralinden üretildiği, ihracat olmayacağı için ise ilgili miktar kadar daha az bir enerji talebi gerçekleşeceği kabulü altında yeni değişkenlerle tekrar hesaplama yapılmıştır. Sonuçlar elektrik ithalat ve ihracatı gerçekleştirilmesinin fiyat oynaklığını azaltıcı etki yaptığını ortaya koymuştur.

Sınır ötesi elektrik ticaret hacminin artırılmasının fiyatlar üzerinde nasıl bir etkisi olabileceğini gözlemlemek için tasarlanan üçüncü ve dördüncü senaryolarda ise ilk senaryoya göre sırasıyla ortalama iki kat ve üç kat daha yüksek miktarda enerji ithalat ve ihracatı olduğu kabul edilmiş ve oynaklığın hacim arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir.

Son yıllarda yüksek ekonomik büyüme performansı sergileyen Türkiye'nin enerji talebinde sürekli bir artış yaşanmıştır. Bu bağlamda sınır ötesi elektrik ticareti, maliyet üstünlükleri sunarak arz güvenliğine katkı sağlamakta, sistemin esnekliğini artırmakta ve ek arz yatırımı ihtiyacını azaltabilecek önemli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmanın bulguları, sınır ötesi elektrik ticaretinin, elektrik fiyatlarındaki dalgalanmaları azaltarak sunduğu ek bir faydayı ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, düzenleyicilerin ve politika yapıcıların, sınır ötesi ticaret hacminin artmasının potansiyel yararlarını daha iyi kavramalarına yardımcı olabilir.

Tezin ilk bölümünde amaç ve yöntemler açıklanmış, ikinci bölümde Türkiye'de elektrik enerjisi ticaretinin gelişimi, piyasa yapısı ve fiyat oluşumuna ilişkin bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, Türkiye'deki ve dünyadaki sınır ötesi elektrik ticaretinin mevcut durumu ele alınmış; ardından bu konudaki literatür çalışmaları özetlenmiş ve kapsamlı bir şekilde tartışılmıştır. Dördüncü ve beşinci bölümlerde ise veri ve istatistiksel yaklaşımlar ile senaryo analizleri yoluyla yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Son bölümde ise sonuçlar ve öneriler okuyucuların dikkatine sunulmuştur.

## **IMPACT OF CROSS-BORDER ELECTRICITY TRADE ON DAY-AHEAD MARKET PRICE VOLATILITY: A CASE STUDY OF TURKEY**

### **SUMMARY**

Rapidly increasing technological developments have made the usage of electrical energy increasingly widespread and it has become one of the indispensable elements for modern people. The increasing demand for electrical energy and the need for uninterrupted energy supply caused the sector to gradually grow and become more complex. The supply-demand principle, seen in the trade of many products and services, also appears in electrical energy. However, it differs from other products due to its unique features. One of these is that it cannot be stored continuously and for long periods of time. In addition, frequency control must be kept within a certain range. Another important feature is that it requires a specific physical network infrastructure.

The effects of liberalization around the world and the transition to free market conditions in many areas have also been seen in the energy sector. The electricity sector, which was previously a vertically integrated structure, has been divided into three main activity branches over time: generation, transmission, and distribution. Turkish Electricity Market entered the liberalization process with the Electricity Market Law No. 4628, which came into force in 2001. On the same date, the Energy Market Regulatory Authority (EPDK), an independent regulatory body, was established. Through privatizations, the electricity generation sector largely and the electricity distribution sector completely have been transformed into private-sector activity areas. Electricity transmission activity is carried out by the Turkish Electricity Transmission Corporation (TEİAŞ), which is a public institution. With the establishment of Energy Exchange Istanbul (EXIST) in 2015 and the launch of the Day Ahead Market (DAM), the Turkish electricity market has gained a structure that is transparent and capable of producing reference prices.

Due to the structure of today's electricity markets, the formation of electricity prices is basically related to the amount of production and consumption. Today, electricity production can be provided from many different sources. Natural gas, coal, hydraulic resources, wind, and solar are just some of them. Countries meet their energy demands by producing electricity in a certain composition from these sources. In today's world, where energy supply security is a hot topic, cross-border electricity trade emerges as a different instrument. Providing an alternative supply source, flexibility in system operation, and cost advantage through economic convergence of prices are just some of the potential benefits of cross-border electricity trade.

The European Union (EU) has been working on cross-border electricity trade for many years, and it has the best practice examples in terms of physical infrastructure and regulatory framework. Electrical energy flows across the EU from where the price is low to where it is high through the transmission lines between neighboring countries. This maximizes social welfare and contributes to the security of supply by ensuring the convergence of prices across the continent.

Turkey has the physical infrastructure to import and export energy with its eight neighbors: EU members Greece and Bulgaria to the west and Georgia, Azerbaijan, Armenia, Iran, Iraq, and Syria to the east and south. Two-way electrical energy exchange is one of the important elements for Turkey's energy balance and electricity price formation.

This thesis aims to analyze the impact of Turkey's cross-border electricity trade on the volatility of day-ahead market prices. What would be the impact on prices if there was no cross-border electricity trade? Will increasing the volume of cross-border electricity trade reduce the volatility of electricity prices? It was aimed to find answers to questions such as. Hourly electricity production data, electricity demand and electricity prices were used for an eight-year period starting from 2016 until the end of 2023. The relevant data was obtained from EXIST's Transparency Platform.

Firstly, electricity production data was segmented on a resource basis, and data sets were prepared for nine different variables: total production from renewable energy sources, electricity production from power plants with dams, electricity production from coal and natural gas, total electricity demand, import and export amounts, natural gas tariff and electricity prices. Data descriptions were prepared for these variables, and summary statistical information was provided.

The effect of import and export quantities on electricity prices is demonstrated with an Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variance (ARIMAX) model, where electricity prices are considered as dependent variables, and a Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity (GARCH) model, which analyzes the results of this model. After these models, which are made with data for the past 8 years, the change in electricity prices is measured by considering four main scenarios.

In the first scenario, the existing situation where imports and exports take place, that is, cross-border electricity trade has been in effect until today, was taken into account. As a result of this modeling made with the actual data, the volatility parameters of the Market Clearing Price (MTP) time series were determined.

In the second scenario, it was assumed that imports and exports did not occur. As a result, the electricity that would have been imported was instead produced by the marginal power plant, natural gas. Additionally, since no exports took place, the demand was recalculated with lower energy consumption. Under this scenario, it was found that volatility parameters increased compared to the first scenario.

In the third and fourth scenarios, designed to observe how increasing the volume of cross-border electricity trade might affect prices, it is assumed that energy imports and exports are two times and three times higher than in the first scenario, and it is observed that volatility decreases as the volume increases.

For Turkey, which has a high economic growth performance and mostly increasing energy demand in recent decades, cross-border electricity trade comes to the fore as a solution that will contribute to supply security, increase system flexibility and reduce the need of additional supply investment by providing cost advantages. The results of this study show a significant benefit that cross-border electricity trade can provide by reducing the volatility in electricity prices.

This study highlights the importance of increasing Turkey's cross-border electricity trade to enhance market stability and reduce price volatility. Specifically, the results of the third and fourth scenarios indicate that higher transmission capacity and

increased trade volumes contribute to reducing price fluctuations. Therefore, it is recommended that Turkey take more proactive steps to expand its cross-border electricity trade, which not only stabilizes the energy market but also strengthens energy security. By importing electricity during peak demand hours, Turkey can avoid activating marginal plants, which are often more expensive. Moreover, enhancing transmission capacity could help alleviate grid congestion, reduce the need for costly redispatch orders, and ultimately lower system operating costs. Increased collaboration between the private and public sectors is crucial to maximize the economic benefits of cross-border electricity trade.

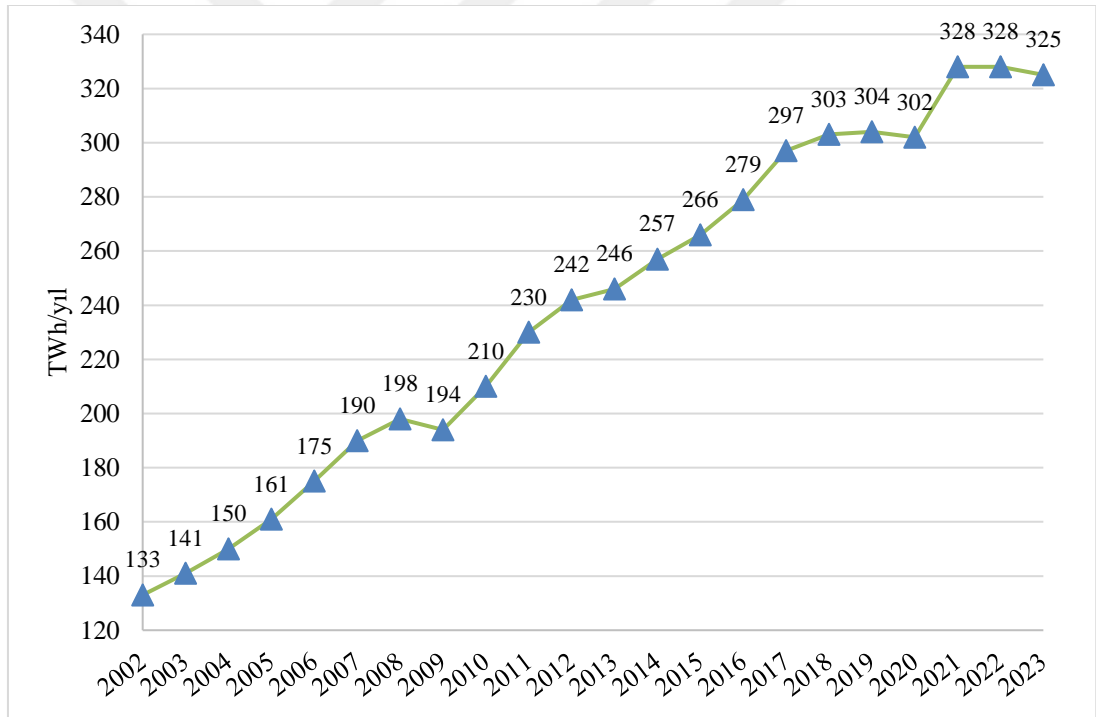
Despite providing significant insights, this study has several limitations. Firstly, the analysis is primarily focused on Turkey's cross-border trade and its impact on local market prices. The findings may not necessarily apply to other regions with different market structures and energy mixes. Future research could broaden the scope by analyzing cross-border electricity trade in a wider geographic context or investigating its relationship with various energy sources. Secondly, the models used in this study are based on current market structures and regulations. However, potential changes in regulatory frameworks, technological advancements, and the growing share of renewable energy may alter these impacts. Further studies are needed to explore the effects of such variables under different scenarios.

In the first part of this thesis study, the purpose and the stages are stated. In the second part, the structure of the Turkish Electricity Market and the formation of the electricity price are summarized from the perspective of electrical energy trade. In the third section, the current situation of cross-border electricity trade in Turkey and the rest of the world is discussed. Then, the literature studies in this field are summarized and the subject is discussed in all its aspects. In the following fourth and fifth chapters, scenario studies were conducted with data and statistical approaches. In the final section, results and suggestions are given and future studies are mentioned.



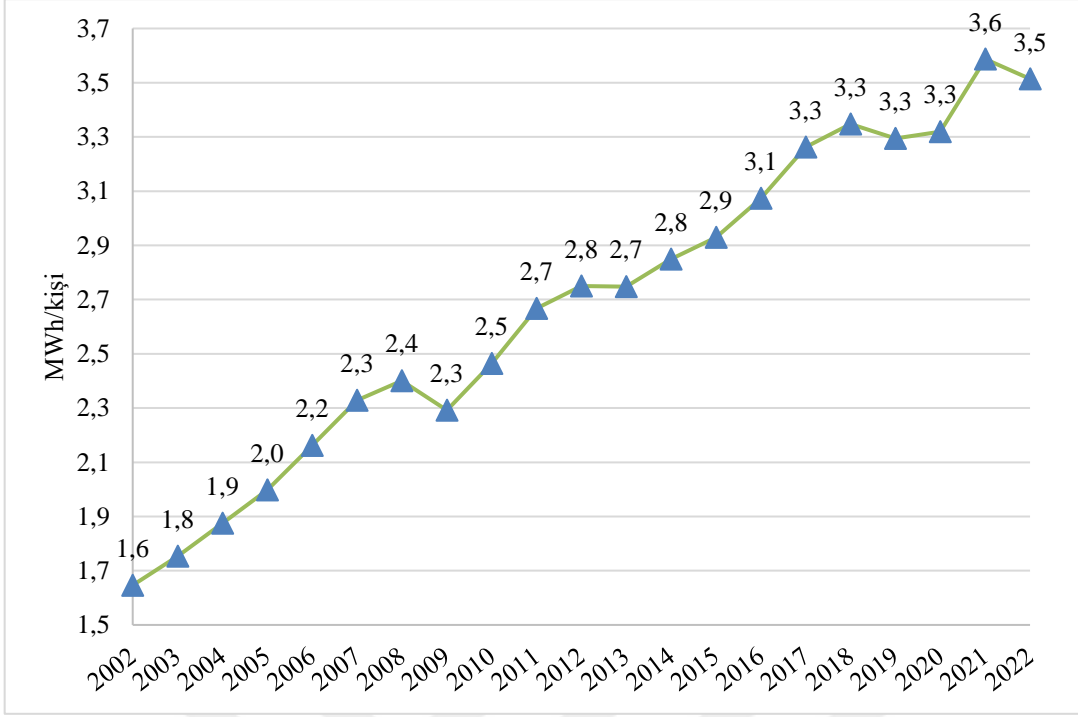
## 1. GİRİŞ

Elektrik günümüzde insan hayatı için neredeyse vazgeçilemez bir temel ihtiyaç haline almıştır. Ulaşımından sanayiye, ticaretten sosyal hayata kadar tüm alanlardaki yaygın kullanımı ile elektriğin olmadığı bir dünya düşünülemez. Özellikle Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde ise elektrik tüketimi, ekonomik büyüme ve kalkınma ile doğrudan ilişkilidir. Şekil 1.1’de Türkiye’nin 2002 yılından bu yana toplam elektrik tüketimindeki değişim gösterilmektedir [1]. Sürekli yükseliş eğilimli bu grafikteki azalma ve duraksamalar ekonomik daralmaların yaşandığı tarihlerdir.



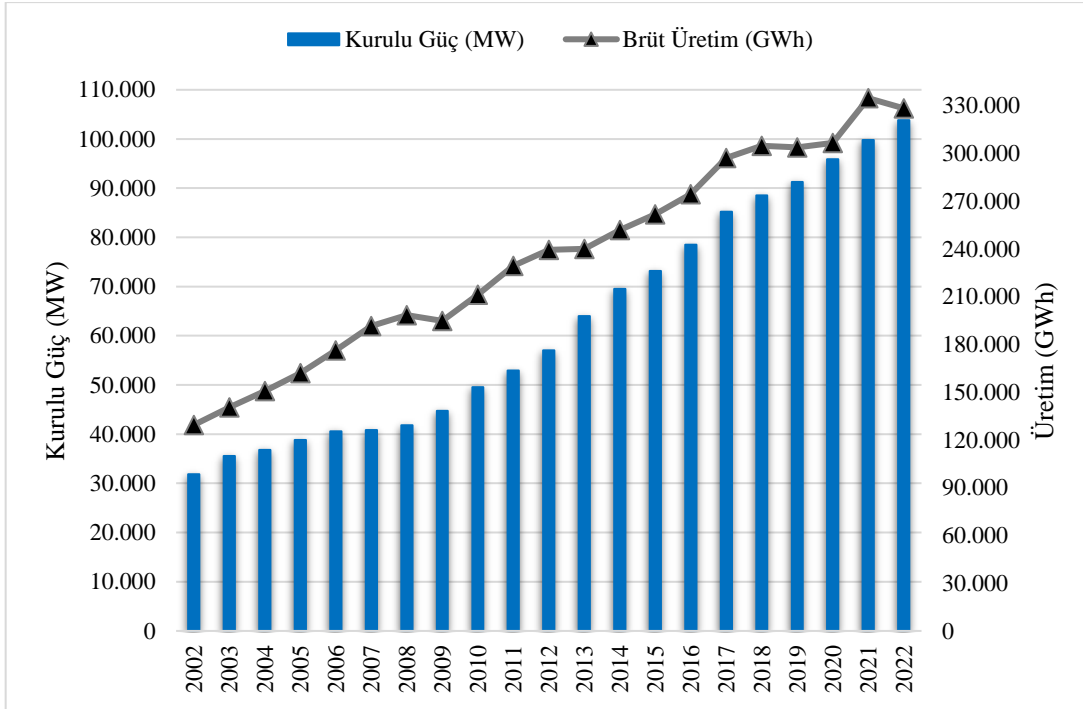
Şekil 1.1 : Türkiye yıllık elektrik enerjisi tüketimi gelişimi.

Toplam elektrik tüketiminin artışı önemli bir gösterge olmakla beraber, daha anlamlı olan diğer bir gösterge ekonomik büyüme ve kalkınmaya ilişkin fikir veren kişi başı elektrik enerjisi tüketim miktarıdır. Şekil 1.2’de Türkiye’nin 2002 yılından bu yana kişi başı yıllık elektrik enerjisi tüketim miktarındaki değişim gösterilmektedir [2].



**Şekil 1.2 :** Türkiye kişi başı yıllık elektrik enerjisi tüketimi değişimi.

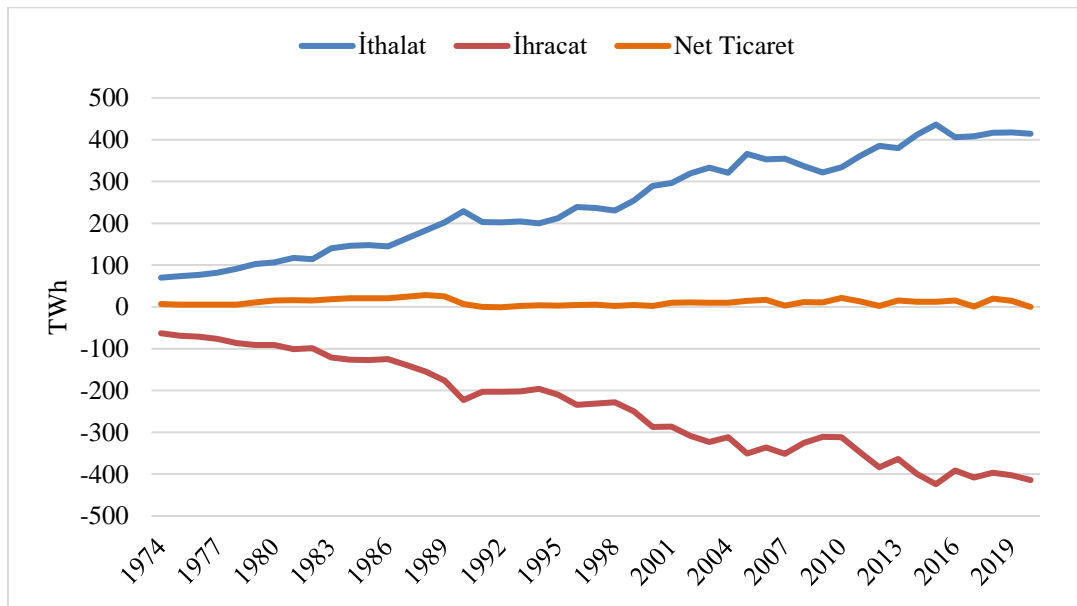
Her geçen yıl nüfusu artan bir ülke için, kişi başı elektrik tüketimini her yıl arttırarak sürdürmek ancak yeni yatırımlar ve üretim kapasitesindeki ciddi artışlar ile mümkün olabilmektedir. Şekil 1.3'te 2002-2022 yılları arasında Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücü ve brüt elektrik enerjisi üretim miktarlarındaki değişim gösterilmektedir [3].



**Şekil 1.3 :** Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücü ve elektrik üretiminin gelişimi.

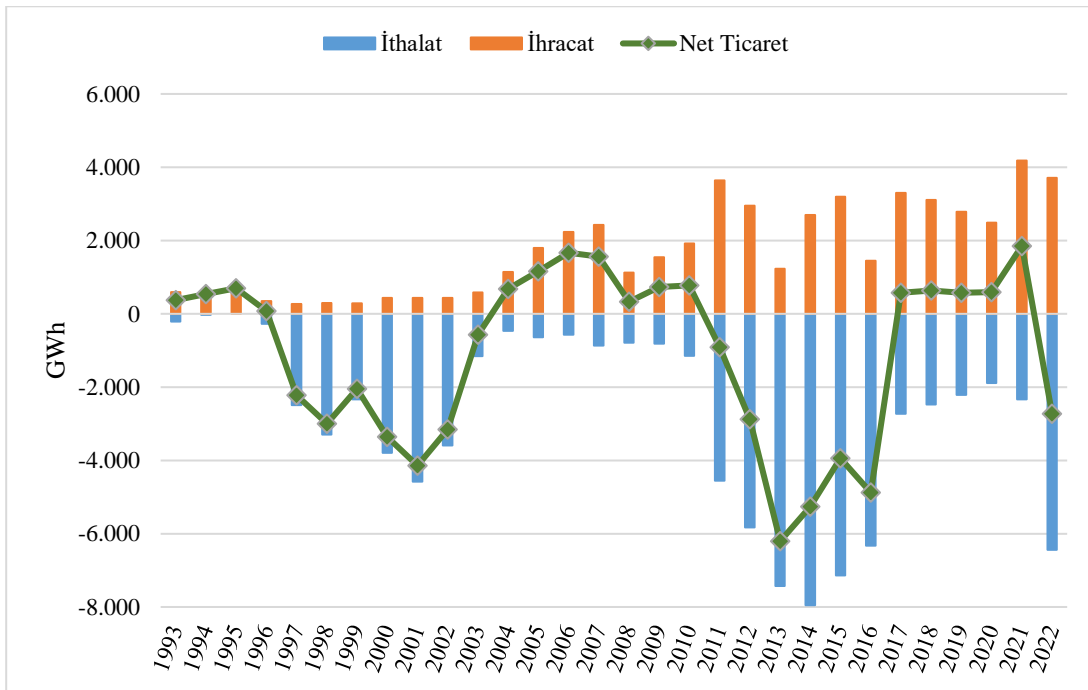
Endüstriyel çağın son 50 yıllık süresinde enerji konusu sürekli olarak sıcak gündem olmuştur. 1970’li yıllarda özellikle petrol fiyatlarındaki yükseliş ile başlayan sürecin ardından tüm ülkeler enerji arz güvenliğine ilişkin daha kapsamlı planlamalar yapmaya başlamıştır. Bu durum mevcut enerji tüketimini karşılamak için doğrudan üretim kapasitesini arttırmak yerine alternatif çözümlerin üretilmesi gerekliliğini beraberinde getirmiştir. Komşu ülkelerin birbirleriyle olan elektrik enerjisi ticareti de bu çözümlerden biridir.

Günümüzde, enerji sektöründeki teknolojik gelişmeler ve uluslararası ticaretin artması, ülkeler arasındaki elektrik enerjisi alışverişini önemli ölçüde etkilemektedir. Avrupa Birliği (AB) bütünleşik pazarı bunun en çarpıcı örneklerindedir. Üye ülkeler arasındaki enerji ticareti, AB enerji politikalarının merkezinde yer almakta ve enerji güvenliği ile sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamaktadır. Entegre piyasaların oluşturulması, AB elektrik altyapısının güçlendirilmesi, hızla artan yenilenebilir enerji kurulu gücü ve enerji arz güvenliği gibi konular elektrik enerjisi ticareti ile doğrudan ilişkili başlıklardır. Bu bağlamda, AB enerji politikaları sınır ötesi elektrik ticaretini teşvik ederek üye ülkeler arasında elektrik enerjisi alışverişinin artmasını sağlamaktadır. Şekil 1.4’te 1974 yılından 2020 yılına kadar Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) ülkeleri arasında gerçekleşen yıllık elektrik enerjisi ithalat ve ihracat miktarları ile net ticaret gösterilmektedir [4].



**Şekil 1.4 :** OECD ülkeleri arasındaki elektrik ithalatı, ihracatı ve net ticareti değişimi.

Türkiye de bu konudaki gelişmeleri izleyen ve uygulayan ülkeler arasındadır. Türkiye komşu ülkeler ile tesis etmiş olduğu enterkonneksiyonlar vasıtasıyla sınır ötesi elektrik ticareti gerçekleştirmektedir. Bu konuda en yoğun iş birliği sağladığı iki ülke AB üye ülkeleri olan Bulgaristan ve Yunanistan'dır. Şebeke işletim sistemi, Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ)'nin European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E) ile yaptığı iş birliği ve imzaladığı sözleşmeler vasıtasıyla şu anda Avrupa kıtasıyla senkronize bir şekilde çalışmaktadır. 2016 yılında iki taraf arasında imzalanmış "Gözlemci Üyelik Anlaşması" ile de Türkiye kalıcı bağlantıdan önceki son aşamaya gelmiş bulunmaktadır [5]. Şekil 1.5'te Türkiye'nin 1993 yılından 2022 yılına kadar olan elektrik enerjisi ithalat ve ihracat rakamları gösterilmiştir [3]. Grafiğe bakıldığında, 1990'ların başlarından 2000'li yılların başlarına kadar Türkiye'nin sınır ötesi elektrik ticareti düşük seviyelerde seyretmiştir. Bu dönemde, elektrik piyasasının liberalizasyonunun sınırlı olması ve altyapı yetersizlikleri ticaret hacminin düşük kalmasına neden olmuştur. 2004'ten itibaren komşu ülkelerle gitgide artan ticari ilişkiler ve elektrik enerjisi üretim kapasitesindeki artış ihracatı desteklemiştir. 2011 yılı ve takip eden yıllarda Türkiye'nin ENTSO-E'ye entegrasyonu ile ticaret hızlanmış ve kapasite yatırımları artmıştır. 2012-2016 arasında ithalat yeniden artış gösterse de sonraki yıllarda Türkiye net ihracatçı konumuna geçmiştir.



Şekil 1.5 : Türkiye'nin elektrik enerjisi ithalat ve ihracat miktarları.

## 1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, Türkiye'nin sınır ötesi elektrik ticaretinin gün öncesi piyasa fiyat oynaklığı üzerindeki etkilerini incelemektir. Tez kapsamında, sınır ötesi ticaretin fiyat oynaklığına olan etkisini değerlendirmek için ARIMAX ve GARCH modellerinin kullanıldığı senaryo analizlerine yer verilmiştir. Bu bağlamda, sınır ötesi ticaretin piyasa fiyatlarında stabiliteyi artırıcı bir rol oynayıp oynamadığını araştırmak ve Türkiye'nin enerji arz güvenliğine potansiyel katkısını değerlendirmek hedeflenmiştir.

Çalışmada, sınır ötesi elektrik ticareti ile enerji fiyatları arasındaki ilişki, ithalat ve ihracat hacimlerinin piyasa dalgalanmalarına olan etkileri gözlemlenerek analiz edilmiştir. Farklı senaryolar kapsamında ticaret hacminin artırıldığı durumlar incelenmiş ve bu artışın piyasa oynaklığı üzerindeki sonuçları değerlendirilmiştir. Bu sayede, sınır ötesi ticaretin artmasının elektrik enerjisi piyasası üzerinde özellikle fiyat istikrarı açısından olumlu etkiler doğurabileceği hipotezi irdelenmiştir.

Ayrıca dikkat çekilmesi gereken diğer bir nokta ise bu çalışmanın tek başına bir fiyat tahmini çalışması olmadığıdır. Türkiye elektrik piyasası gibi regülasyonların ve kuralların yoğun olduğu bir yapıda, saatlik bazlı fiyat tahminlerinin yalnızca yaklaşık hesaplamalar sunabileceği düşünülmektedir. Bunun yerine, sınır ötesi ticaret hacminin artırılmasının fiyat oynaklığını nasıl azaltabileceği ve bu yolla sağlanabilecek potansiyel faydalara dikkat çekilmek istenmiştir. Türkiye gibi enerji arz güvenliği konusunda zorluklar yaşayan ülkeler için sınır ötesi elektrik ticareti, elektrik fiyatlarındaki oynaklığı azaltarak piyasa stabilitesine katkıda bulunabilecek önemli bir alternatif olarak değerlendirilebilmektedir. Çalışma kapsamında oluşturulan ithalat ve ihracatın artış gösterdiği senaryolarda, bu artışın elektrik fiyatlarına ve piyasa yapısına olumlu yansımaları ortaya konularak elde edilebilecek sonuçların, politika yapıcılar ile düzenleyici kurumlara bir öneri niteliğinde sunulması amaçlanmıştır.

## 1.2 Çalışmanın Aşamaları

Çalışmanın giriş bölümünde Türkiye enerji tüketiminin seyrine ve hem küresel hem de yerel anlamda elektrik enerjisi ithalat ve ihracatına ilişkin verilere yer verilmiştir. İkinci bölümde Türkiye'de elektrik enerjisi ticaretinin gelişimi, piyasa yapısı ve fiyat oluşumuna açıklık getirilmiştir. Üçüncü bölümde sınır ötesi elektrik ticaretine ilişkin

literatür özetlenmiş, diğer ülke ve bölgelerdeki uygulama örnekleri karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Daha sonra hangi veri setlerinin ne amaçla ve hangi yöntemlerle kullanılacağı kararları verilerek karşılaştırmalı senaryo analizleri gerçekleştirilmiştir. Ardından sonuç ve öneriler kısmı ile çalışma sonlandırılmıştır.

Çalışma kapsamında kullanılacak olan “sınır ötesi”, “enerji ticareti” veya “ticaret” ve benzeri terimler dış ticaret veya genel ekonomi alanıyla ilişkilendirilebilir. Ancak elektrik enerjisinin ticaretine odaklanılan bu tez kapsamında yalnızca elektrik enerjisi ticareti konuları ele alınacağından, bu bağlamda okunması ve değerlendirilmesi gerekmektedir.



## **2. TÜRKİYE ELEKTRİK ENERJİSİ PİYASASI**

Enerji terimi birçok başlığı içerisinde barındırmaktadır. Günümüzde enerji dendiğinde akla petrol ve doğal gaz başta olmak üzere fosil yakıtlar geldiği gibi, içerisinde hidrolik, rüzgar ve güneş başta olmak üzere farklı başlıkları barındıran yenilenebilir enerji kaynakları da gelebilmektedir.

Elektrik enerjisi modern toplumun her alanında merkezi bir konuma sahip ve vazgeçilmez bir hal almıştır. Önceleri az sayıda üretici ve tüketici varken bugünkü yapıda iki tarafta da hem oyuncu sayıcı hem de ölçekler çok farklılaşmış durumdadır. Üretim birçok farklı kaynaktan ve birçok farklı yerde yapılabildiği gibi talep de oldukça farklı ve esnek bir yapıya evrilmiştir. Elektriğin kimi zaman bir son ürün kimi zamansa bir ara mamul olarak kullanılması maliyet ve fiyatlandırma yapısı ihtiyacını beraberinde getirmektedir. Elektriğin ticari bir ürüne dönüşmesi ve fiyatlandırılması enerji piyasaları yoluyla sağlanmaktadır. Takip eden bölümde bu konu daha detaylı olarak açıklanmıştır.

### **2.1 Türkiye Elektrik Sektörünün Tarihsel Gelişimi**

Enerji piyasasının bugünkü durumunu anlamak için tarihsel gelişimi incelemek önemlidir. Türkiye'de elektrik üretimi 1902 yılında Mersin Tarsus'da 2 kilowatt (kW) gücünde bir dinamoyla başlamıştır. 1914 yılında Macar GANZ Anonim Şirketi, İstanbul'da Silahtarağa Santrali'ni kurarak ilk kez büyük ölçekli elektrik üretimini gerçekleştirmiştir. 1925'te Alman MAN ve AEG şirketleri, Ankara'ya dizel jeneratörle üretilen elektriği sağlamışlardır. Dünya genelindeki teknolojik ilerleme ve artan elektrifikasyon ile birlikte 1930 yılında Türkiye'nin kurulu gücü 74,8 megawatt (MW), elektrik üretimi ise yıllık 106,3 gigawatt saat (GWh) olmuştur [6].

1930-1950 yılları arasında sanayileşmeyi hızlandırmak için termik ve hidrolik kaynaklara yönelim artmıştır. 1930'da yürürlüğe giren 1580 sayılı Belediye Kanunu ile yerel yönetimlere elektrik enerji tesisi kurma yetkisi verilmiştir. 1935 yılında Maden Tetkik ve Arama, Etibank ve Elektrik İşleri Etüt İdaresi kurulmuştur [6]. 1938-

1944 yılları arasında yerli özel sermayeli bir girişim olan Kayseri ve Civarı Elektrik Türk Anonim Şirketi (KCETAŞ) hariç tüm yabancı ve imtiyazlı şirketler devletleştirilmiştir [7]. 1950 yılında Türkiye'nin kurulu gücü 407,8 MW, yıllık elektrik üretimi 789,5 GWh ve kişi başına düşen yıllık elektrik tüketimi 32 kilowatt saat (kWh) değerine ulaşmıştır [6].

1950'li yıllarda benimsenmeye başlanan karma ekonomi politikası, yabancı sermayeyi ülkeye çekmeyi ve enerji sektöründe özel sektörün teşebbüslerini arttırmayı hedef edinmiştir. 1949 yılında kurulan Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 1953 yılında Birinci İstisari Enerji Kongresini toplamıştır [8]. 1960 yılında Devlet Planlama Teşkilatı kurulmuş ve ilk iki Beş Yıllık Kalkınma Planı'nın odak noktası elektrifikasyonun artırılması olmuştur. 1963 yılında ise Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) oluşturulmuştur. 1970 yılına gelindiğinde Türkiye'nin toplam kurulu gücü 1.272,4 MW ve yıllık elektrik üretimi 2.815,1 GWh seviyesine yükselmiştir [6].

1970 yılına kadar olan dönemde birçok farklı alanda hem kamu hem de özel sektör girişimleri ile ülkemizdeki tüm kaynaklar elektrik enerjisi ihtiyacının giderilmesi amacıyla ekonomiye kazandırılmaya çalışılmıştır. Türkiye'deki elektrik üretim, iletim, dağıtım ve ticaretine ilişkin faaliyetlerin dağınık halde olması ve hızla büyümesi, bu faaliyetlerin bütünleşik bir yapıda ve tek çatı altında toplanması ihtiyacını doğurmuştur. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla 1312 sayılı "Türkiye Elektrik Kurumu Kanun"u uyarınca Türkiye Elektrik Kurumu (TEK) kurulmuş ve Etibank, İller Bankası, Devlet Su İşleri ve belediyelerin işletmekte olduğu kamuya ait santraller ve şebekeler TEK'e devredilmiştir [7].

1980'li yıllarda yaygınlaşan ekonomideki liberalleşme politikaları elektrik sektöründe de görülmüştür. 1982'de özel sektöre elektrik üretme ve TEK'e satma hakkı tanınmış ve bu yolla özel sektör yatırımlarının önü açılmıştır. Yap-İşlet-Devret (YİD), İşletme Hakkı Devri (İHD) ve otoprodüktör gibi yeni yatırım modelleri uygulanmaya başlanmıştır [7].

Elektrik enerji sektörünün her geçen gün büyümesi ve faaliyetlerinin çoğalması TEK bünyesinde yürütülen işlerin farklı uzmanlık alanlarına bölünmesi ihtiyacını doğurmuştur. Bu nedenle 1993 yılında TEK, Türkiye Elektrik Üretim İletim Anonim Şirketi (TEAŞ) ve Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi (TEDAŞ) olarak ikiye ayrılmıştır [9].

2000’li yıllar ve sonrasında küreselleşmenin etkilerinin belirginleşmesi ile Türkiye, Dünya Bankası, International Monetary Fund (IMF) ve AB ile etkileşim içinde olmuştur. 15.05.1998’de Dünya Bankası ile yapılan anlaşma, elektrik enerjisi sektöründe ulusal bir iletim şirketi kurulmasını öngörmüştür. 09.05.1999’daki stand-by anlaşması ve 2000’deki “Economic Recovery Loan” anlaşması ile hükümet, özelleştirmeleri kolaylaştırma ve elektrik enerji sektörünü serbestleştirme taahhüdünde bulunmuştur [10].

21.01.2000’de uluslararası tahkim müessesesi düzenlenmiş ve AB mevzuatına uyum çalışmaları başlamıştır. 2001’de “Ekonomik İstikrar ve Enflasyonla Mücadele Programı” ile elektrik sektörü yeniden yapılandırılmış, serbestleştirilmiş ve rekabete açılmıştır. 02.03.2001’de yürürlüğe giren Bakanlar Kurulu Kararı ile TEAŞ; Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ), Elektrik Üretim Anonim Şirketi (EÜAŞ) ve Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt Anonim Şirketi (TETAŞ) olarak üç ayrı kuruluşa ayrılmıştır [10]. Elektrik enerjisi sektörü ile ilgili yapılan bu reformlara paralel olarak serbest piyasa yapılanmasına zemin hazırlamak üzere 20.02.2001 tarihinde 4628 sayılı “Elektrik Piyasası Kanunu” yürürlüğe girmiştir. Kanun ile dikey bütünleşik yapıda olan elektrik piyasası serbestleştirilmiş ve piyasa faaliyetleri iki kategoriye ayrılmıştır. Bunlar rekabete açılan üretim ve tedarik faaliyetleri ile regülasyona tabi iletim ve dağıtım faaliyetleridir. Ayrıca ilgili kanun uyarınca piyasayı düzenlemek ve denetlemek üzere; bağımsız bir düzenleyici kuruluş olan Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) kurulmuştur [11].

2001 yılında elektrik sektöründeki yeniden yapılanma sonrası, 17.03.2004’te yayımlanan "Elektrik Enerjisi Reformu ve Özelleştirme Stratejisi Belgesi" ile öngörülen özelleştirme süreçleri devam etmiştir. Bu belgeye göre, sektörde verimlilik artışı, arz güvenliği, teknik kayıpların ve kaçak kullanımın azaltılması, rekabetin tesisi ve hizmet kalitesinin arttırılması hedeflenmiştir [12]. Özelleştirme süreciyle iletim ulusal tekel olarak bırakılırken, dağıtım 21 bölgesel tekele ayrılmış ve rekabete açılmıştır. Ancak, özelleştirme süreçlerinde gecikmeler yaşanmış, tüm dağıtım bölgeleri ancak 2012-2013 yıllarında özelleştirilebilmiştir.

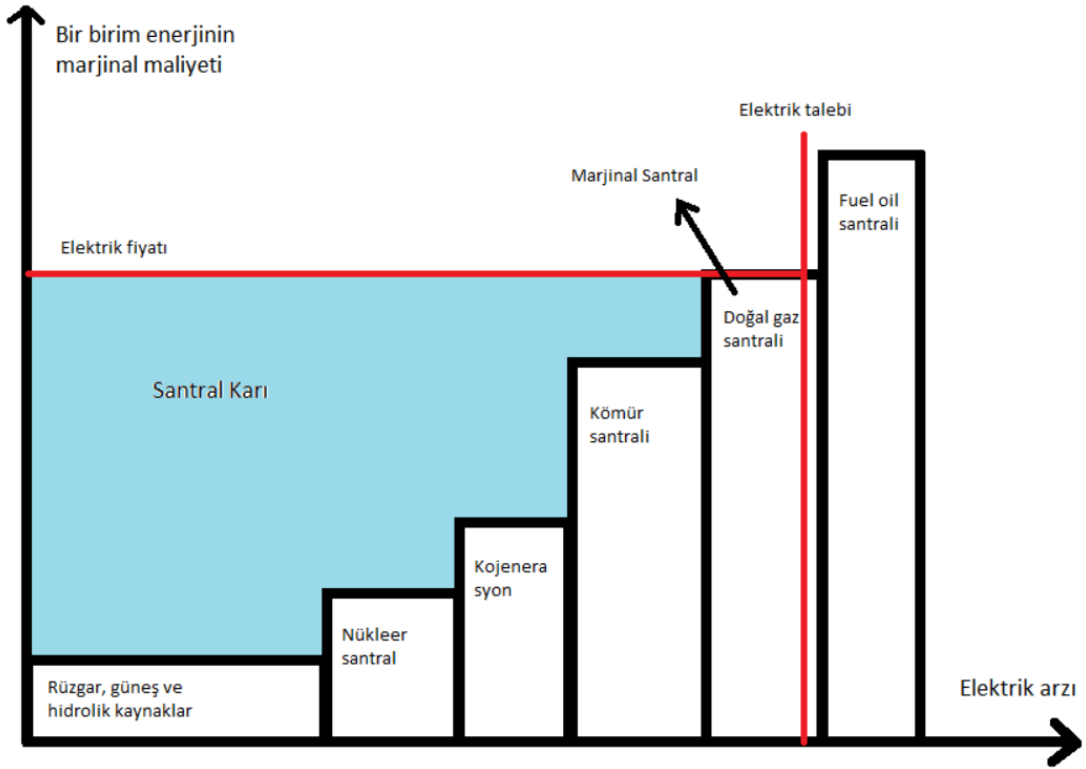
Elektrik enerji sektörünün bir diğer önemli dönüm noktası da 2005 yılında 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kanunu’nun yürürlüğe girmesiyle Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması (YEKDEM)’nin devreye sokulması olmuştur. Alım garantisiyle işleyen bu sistem sayesinde Türkiye’de yenilenebilir enerji

kaynaklarından elektrik üretim kapasitesi hızla yükselmiştir. Temmuz 2006'dan itibaren ise Piyasa Yönetim Sistemi saatlik fiyatlarla işletilmeye başlanmıştır [13].

Sektördeki gelişmeler ve ihtiyaçlar doğrultusunda 30.03.2013'te 6446 sayılı "Elektrik Piyasası Kanunu" yürürlüğe girmiştir. Bu Kanun, 4628 sayılı Kanun'un büyük kısmını yürürlükten kaldırmış ve yeni düzenlemeler getirmiştir. Yeni düzenlemelerde elektrik piyasasının rekabetçi, mali açıdan güçlü, istikrarlı ve şeffaf bir yapıda olması hedeflenmiştir [14]. Kanun ile elektrik piyasasındaki lisans türleri yeniden düzenlenmiştir. Daha önce TEİAŞ bünyesinde faaliyet gösteren Piyasa Mali Uzlaştırma Merkezi (PMUM) 2015 yılında faaliyete başlayan EPIAŞ bünyesine dahil edilmiş ve organize toptan elektrik piyasalarının işletilmesi ayrıştırılmıştır [15].

## **2.2 Türkiye Elektrik Piyasaları ve Fiyat Oluşumu**

Türkiye elektrik piyasası için kurgulanan yapıda fiyat oluşumu merit order (liyakat sıralaması) modeline dayanmaktadır. Bu model elektrik arzını ekonomik olarak optimize etmek için hangi santrallerin hangi sırayla elektrik sağlayabileceğini modellemektedir [16]. Talebi karşılamadaki öncelik birim elektrik enerjisi üretim maliyeti en düşük olan santrallerin olmaktadır. Sabit maliyetler bu hesaba katılmazken, yakıt maliyeti, santral teknolojisi ve operasyonel maliyetler baz alındığında marjinal maliyeti en düşük olan santrallerin en ucuzdan elektrik üretmesi ve talebi karşılamada ilk sırayı alması beklenmektedir. Santrallerin maliyetlerine göre artan şekilde bu sırayı alması ve taleple kesişen noktada da fiyatın oluşması esastır. Arz ve talebin kesiştiği bu noktadaki santrale marjinal santral adı verilmektedir [17]. Şekil 2.1'de örnek bir merit order eğrisi gösterilmektedir. Buna göre yakıt maliyeti en düşük santraller olan yenilenebilir enerji santralleri merit order eğrisinde ilk sırayı alarak arz eğrisini oluşturmaya başlamaktadır. Onu elektrik üretim maliyeti düşük olan nükleer santraller izlemektedir. Ardından kojenerasyon santrallerinden sağlanan elektrik üretimi arz eğrisinde yerini almaktadır. Bir sonraki adımda kömür santrallerinin maliyet seviyesine gelinmektedir ve bunu doğal gaz santralleri takip etmektedir. Ülkemizde marjinal santraller genellikle doğal gaz santralleri olmaktadır. PTF doğal gaz santrallerinin maliyetlerini yansıtacak şekilde, onların teklif verdiği fiyat bandına yakın oluşmaktadır.



**Şekil 2.1 :** Elektrik piyasalarında merit order eğrisi.

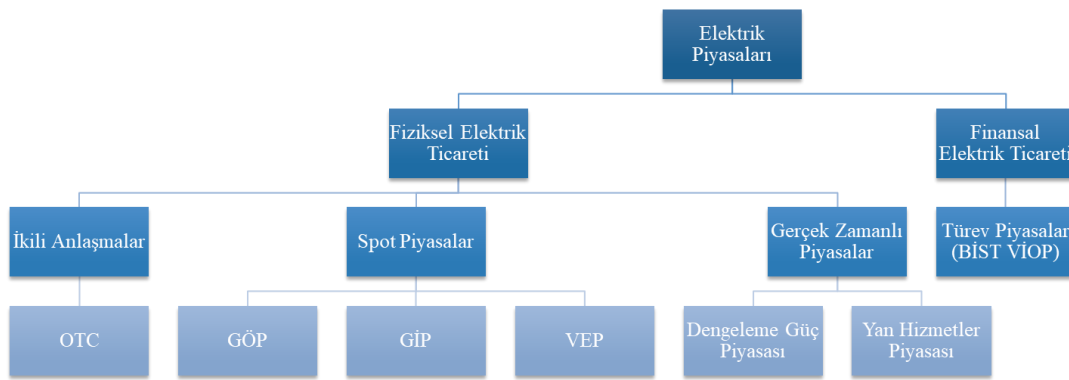
Elektrik piyasalarının serbestleşmesi süreciyle birlikte, önceden entegre bir ürün olarak ele alınan elektrik, gitgide ticareti yapılan bir emtia niteliği kazanmıştır. Üretim şirketleri, tıpkı diğer tüm işletmeler gibi kar amacı güttükleri için kurulduklarından bu yana elektrik enerjisi ticareti yapmalarına rağmen, bu ticaretin şekli zaman içerisinde büyük değişime uğramıştır. Hem arz hem de talep tarafında yaşanan değişim ve dönüşüm yeni ihtiyaçların ve yeni piyasa oyuncularının ortaya çıkmasına neden olmuş ve böylelikle elektrik enerji ticaretinin seyri ve yapısı günden güne değişmiştir. Günümüz elektrik piyasasını bir emtia olarak satılmak üzere üreticiler tarafından üretilen elektriğin, tüketim veya tekrar satış amaçlı olarak ticaretinin gerçekleştirilmesine olanak veren yapı olarak tanımlamak mümkündür [18].

Elektrik enerjisinin kendine has özellikleri nedeniyle, ticaretinin yapıldığı piyasaların da diğer piyasalardan farklı bazı özellikleri mevcuttur [19]. Elektrik enerjisi dışındaki birçok farklı emtia için fiyat oluşumuna etki etmeyen fiziksel bazı dengeler ve zorluklar bu piyasanın işletilmesinde hayati öneme sahiptir. Hem bu dengelerin korunması hem de tam rekabet ve serbest piyasa kurgusunun hayata geçirilmesi teoride mümkün olsa bile pratikte hayata geçirilememiştir. Ulus devletlerin bağımsız düzenleyici kuruluşları oluşturması ve görevlendirmesi bu çözüm arayışının neticesidir.

Elektrik piyasalarının temelde iki ana amacı bulunmaktadır. Bunlardan ilki piyasa koşullarını yansıtan bir fiyat sinyalinin oluşturulmasıdır. Gelecekte yapılacak olan yatırımların seyri ve piyasa katılımcılarının finansal sürdürülebilirliğinin sağlanması bu fiyat sinyaline bağlıdır. Diğer bir amacı ve faydası ise gerçek zamanlı elektrik enerji sisteminin işleyişini kolaylaştırması ve sistem işletmecisine teslim gününden önce çok büyük ölçüde dengelenmiş bir yapı sunmasıdır. Söz konusu piyasalar vasıtasıyla fiziki teslimattan aylar, günler ve hatta saatler önce taraflar elektrik alım satımı gerçekleştirerek dengesizliklerini yönetebilir ve yükümlülüklerini yerine getirebilirler.

Ülkemizde hem fiziksel hem de finansal elektrik ticaretine olanak veren bir toptan satış piyasası faaliyet göstermektedir. Bu piyasada katılımcılar ikili anlaşmalar piyasası yoluyla özel hukuk hükümlerine tabi olarak kendi aralarında ticaret yapabileceği gibi, merkezi bir karşı tarafa sahip olan spot piyasalarda veya türev piyasalarda da işlem gerçekleştirebilirler. Mevcut bu yapıda dengeleme mekanizmasını merkeze alan ikili anlaşmalar piyasası modeli uygulanmakta ve spot piyasalarda oluşan fiyatların da bu piyasa için referans teşkil etmesi beklenmektedir.

Toptan piyasaların daha iyi anlaşılabilmesi için bir ayırım yapmak gerektiğinde elektriğin teslim koşulu en temel farklılığı oluşturmaktadır. İkili anlaşmalar ve spot piyasalarda fiziki teslimat zorunluluğu varken tamamen finansal olarak işleyen türev piyasalarda bu şart aranmamaktadır. Şekil 2.2’de bu ayırım esas alınarak toptan elektrik piyasalarının mevcut yapısı gösterilmektedir [20].



**Şekil 2.2 :** Türkiye toptan elektrik piyasaları.

Ülkemizde fiziksel teslimatlı elektrik piyasaları üçe ayrılmaktadır. Bunlar ikili anlaşmalar piyasası, spot piyasalar ve gerçek zamanlı piyasalardır.

İkili anlaşmalar piyasası üreticiler, tedarikçiler ve serbest tüketicilerin bir başka deyişle gerçek veya tüzel kişilerin kendi aralarında müzakere yoluyla elektriğin miktarını, fiyatını ve teslim zamanını serbestçe belirleyerek ticaret yapmasına imkan tanıyan piyasadır. Merkezi bir karşı tarafın bulunmadığı ve ürün standardının olmadığı bu piyasaya organize olmayan piyasa da denilmektedir. Burada taraflar hiçbir aracı olmadan anlaşma yapabileceği gibi bir broker vasıtasıyla da alım satım gerçekleştirebilirler. Brokerlerin aracılık ettiği bu piyasaya tezgah üstü piyasalar, İngilizce kısaltması olan OTC (over the counter) piyasalar da denilmektedir.

Elektrik piyasasına bütünsel olarak bakıldığında ikili anlaşmalar sistemin ilk adımını oluşturur. Onun ardından gün öncesi piyasası (GÖP), gün içi piyasası (GİP) ve gerçek zamanlı dengelemeden oluşan faaliyetler gelmektedir. İkili anlaşmalar yoluyla piyasadaki arz ve talebin büyük bölümü karşılıklı olarak eşleşir. Fiyat bilgisi taraflar arasında mahfuz kalırken miktar bilgisini iki taraf da Piyasa İşletmecisi'ne bildirmekle yükümlüdür. Genelde uzun dönemli yapılmaları nedeniyle de piyasanın orta ve uzun vadede nasıl bir seyir izleyeceği ve fiyat sinyalinin ne yönde oluşacağı ile ilgili fikir verirler. Ayrıca anlaşmayı yapan taraflara spot piyasadaki fiyat dalgalanmalarından korunma imkanı sağlanmaktadır. Diğer yandan organize piyasalardaki gibi merkezi bir karşı taraf bulunmaması, teminat mekanizması ve benzeri risk azaltıcı unsurların olmaması spot piyasalara nazaran daha riskli bir ortam sunmaktadır.

Spot Piyasalar genellikle piyasa işletmecisi tarafından işletilen ve piyasa katılımcılarına kısa vadeli ticaret imkanları veren piyasalardır. Bu piyasaların temel fonksiyonu taraflara elektriğin teslim edileceği güne kadar kendilerini mümkün olan en iyi şekilde dengeleme fırsatı sunmaktır [21]. İkili anlaşmalar piyasasını destekleyen ve tamamlayan bir spot piyasanın varlığı sadece dengeleme mekanizmasının yönetilmesi için değil, aynı zamanda referans fiyatın oluşumu için de zorunludur. Literatürde Piyasa Takas Fiyatı (PTF - market clearing price) olarak adlandırılan bu fiyat, perakende satış piyasasının düzenlenmesi ve rekabetin tesisi için çok önemlidir. Çünkü spot piyasada oluşan fiyat, üretimin gerçek değerini ifade etmektedir ve bu değer piyasaya ilişkin birçok diğer parametrenin hesabında kullanılmaktadır [22].

Türkiye'de Piyasa İşletmecisi olan EPIAŞ GÖP ve GİP piyasalarını işletmektedir. Gün öncesi piyasası, piyasa katılımcılarının teslim gününden bir gün önce saatlik olarak yapabilecekleri alış ve satışlarla kendilerini dengelemelerine olanak veren piyasadır. Bu piyasaya katılım zorunlu değildir. Gün öncesi piyasasında ihale usulü ticaret

yapılmaktadır. Yani tüm alıcılar ve satıcılar her saat için miktar ve fiyat bilgisi girerek teklif oluştururlar. Fiyat teklifleri için 0 Türk Lirası/ Megawatt Saat (TL/MWh) ve 2.000 TL/MWh aralığı belirlenmiştir. Fakat azami fiyat limiti zaman zaman güncellenmektedir. Mevcut durumda EPDK'nın 27.06.2024 tarih ve 12716 sayılı Kararı uyarında bu limit 3.000 TL/MWh olarak uygulanmaktadır [23]. Değişen piyasa koşullarına göre Piyasa İşletmecisi, asgari ve azami fiyat limitlerini güncelleyebilir. Piyasa katılımcıları saatlik, blok ve esnek tekliflerden istediklerini kullanarak kendilerine özgü ticaret stratejilerini uygulayabilirler [24]. 24 saatin tamamı için toplanan bu alıŖ ve satıŖ teklifleri, teminat kontrolleri ve teyit iŖlemleri gibi proseslerin ardından optimizasyon motoru vasıtasıyla değerlendirilir. Her saat için arz ve talep kesiŖtirilmek suretiyle optimizasyon problemi çözümlür ve saat 13.00'da takip eden günün her saati için ayrı ayrı PTF hesaplanır. Hesaplanan bu fiyat üzerinden piyasa katılımcıları saatlik olarak uzlaŖtırılır [25].

Gün içi piyasası, ikili anlaşmalar ve gün öncesi piyasası vasıtasıyla ticaretini büyük ölçüde gerçekleŖtirmiş piyasa katılımcılarına fiziki teslimattan bir saat öncesine kadar alım satım olanağı veren piyasadır. Bu piyasaya katılım da gün öncesi piyasası gibi zorunlu değildir. Gün içi piyasasında ticaret gün öncesi piyasasındaki tüm tekliflerin toplanması Ŗeklinde gerçekleŖen ihale usulünün aksine, verilen tekliflerin hemen eŖleŖebilmesi ve iŖlem görmesine imkan tanıyan sürekli ticaret yöntemiyle gerçekleŖir. Piyasa katılımcıları saatlik tekliflerini her gün saat 18.00'dan başlayarak 00.00'a kadar günün her saati için verebilir [26]. Ayrıca piyasa katılımcıları GİP'de fiyatın düşük olduğu saate alım yapıp yüksek olduğu saatte ise satım iŖlemi gerçekleŖtirerek arbitraj imkanına da sahip olabilirler.

Önce ikili anlaşmalar, ardından GÖP ve GİP'te gerçekleŖen iŖlemler yoluyla Sistem İşletmecisine üretim ve tüketim açısından dengelenmiş bir piyasa sunuluyor olsa da; planlanan üretiminde değişim olan bir santral olması veya talepte yaşanan ani değişimler neticesinde gerçek zamanda sapmalar meydana gelebilmektedir. Bu sapmaların giderilmesi ve gerçek zamanlı dengelemenin sağlanabilmesi için de gerçek zamanlı piyasalar iŖletilmektedir.

Türkiye'de Sistem İşletmecisi olan TEİAŞ Dengeleme Güç Piyasası (DGP) ve yan hizmetler piyasasını iŖletmektedir. DGP, Sistem İşletmecisine gerçek zamanlı dengeleme için en fazla 15 dakika içerisinde devreye girebilecek yedek kapasiteyi sağlamaktadır. Bağımsız olarak 15 dakika içerisinde asgari 10 MW yük alma veya yük

atma kabiliyetine sahip olan dengeleme birimleri DGP'ye katılmak zorundadır. Bu piyasada süreç GÖP'ün tamamlanmasının ardından saat 14.00'de başlar. Saat 16.00'ya kadar piyasa katılımcıları emre amade kapasitelerini, kesinleşmiş günlük üretim programlarını ve bununla birlikte yük alma ve yük atma talimatlarını TEİAŞ Piyasa Yönetim Sistemi'ne girerler. Girilen bu teklifler Sistem İşletmecisi tarafından fiyata göre sıralanır. Sistem yönünün enerji açığını göstermesi halinde yük alma teklif fiyatlarının en düşüğünden, sistem yönünün enerji fazlasını göstermesi halinde yük atma teklif fiyatlarının en yükseğinden başlanılmak üzere, dengeleme güç piyasası kapsamında verilen tüm teklifler dikkate alınarak belirlenen net talimat hacmine tekabül eden teklif fiyatına Sistem Marjinal Fiyatı (SMF) adı verilir. Diğer bir deyişle elektrik enerjisinin üretildiği ve tüketildiği o aynı andaki gerçek fiyatıdır. Sistemde arz ve talebin gerçek zamanlı olarak dengelenmesi için 0 kodlu talimatlar, sistemdeki iletim kısıtlarının giderilmesi için ise 1 kodlu talimatlar kullanılarak bu teklifler kabul edilir ve bu yolla piyasa işletilmiş olur [27].

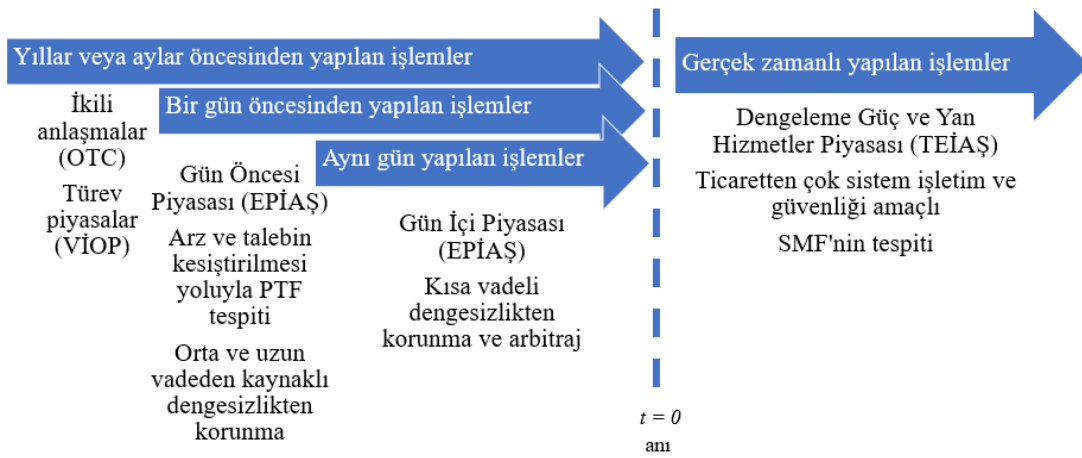
Yan hizmetler, Elektrik Şebeke Yönetmeliği ve Elektrik Piyasası Yan Hizmetler Yönetmeliği kapsamında *“iletim sistemine veya dağıtım sistemine bağlı ilgili gerçek/tüzel kişilerce sağlanacak olan, iletim veya dağıtım sisteminin güvenilir şekilde işletimini ve elektriğin gerekli kalite koşullarında hizmete sunulmasını sağlamak üzere”* gerçekleştirilen hizmetler şeklinde tanımlanmıştır [28]. Bunlar primer frekans kontrolü, sekonder frekans kontrolü, bekleme yedekleri, anlık talep kontrolü, reaktif güç kontrolü, sistem oturmalarının toparlanması ve bölgesel kapasite kiralama vb. hizmetleri kapsamaktadır. Buradaki piyasa öncekilerin aksine elektrik ticareti odaklı olmayıp sistem işletmesi odaklıdır.

Finansal elektrik ticareti Borsa İstanbul bünyesinde yer alan Vadeli İşlem ve Opsiyon Piyasası (VİOP) altındaki Elektrik Vadeli İşlem Sözleşmeleri vasıtasıyla gerçekleştirilebilmektedir. Bu piyasada işlem yapabilmek için enerji sektörüne özel lisans ve benzeri izinlere gerek olmamaktadır. Burada dayanak varlık vade ayının her bir saati için Piyasa İşletmecisi tarafından açıklanan Piyasa Takas Fiyatlarının basit aritmetik ortalamasıdır [29]. Elektrik üreticileri, dağıtım şirketleri, toptan ve perakende ticaret şirketleri ile elektrik maliyet riskini koruma altına almak isteyen her türlü tüketiciler bu üründen faydalanarak elektrik ticareti gerçekleştirebilmektedir.

Elektrik türev ürünleri, rekabetçi bir elektrik piyasasının oluşmasına katkıda bulunan araçlardan biridir. Spot piyasalarda işlem yapan piyasa oyuncularını, bu piyasadaki

sözleşmeleri kullanarak fiyat ve miktarı belirli olan elektriğin ileri bir tarihte alım veya satım işlemini yaparak, sözleşme anıyla fiziksel teslimat anı arasındaki fiyat değişim riskinden veya alıcı bulamama gibi risklerden korunmuş olmaktadır. Ayrıca finansal piyasalar, spot elektrik piyasasının aksine elektrik piyasa katılımcısı olmayan üçüncü tarafların işlem yapmasına da imkan sağladığı için daha likit bir piyasa oluşumuna da katkıda bulunmaktadır [19]. Bu piyasalarda işlem yapılırken elektriğin ileri tarihteki fiyatı öngörüldüğü için burada oluşan fiyatlar PTF'ye ilişkin de bir fikir vermektedir.

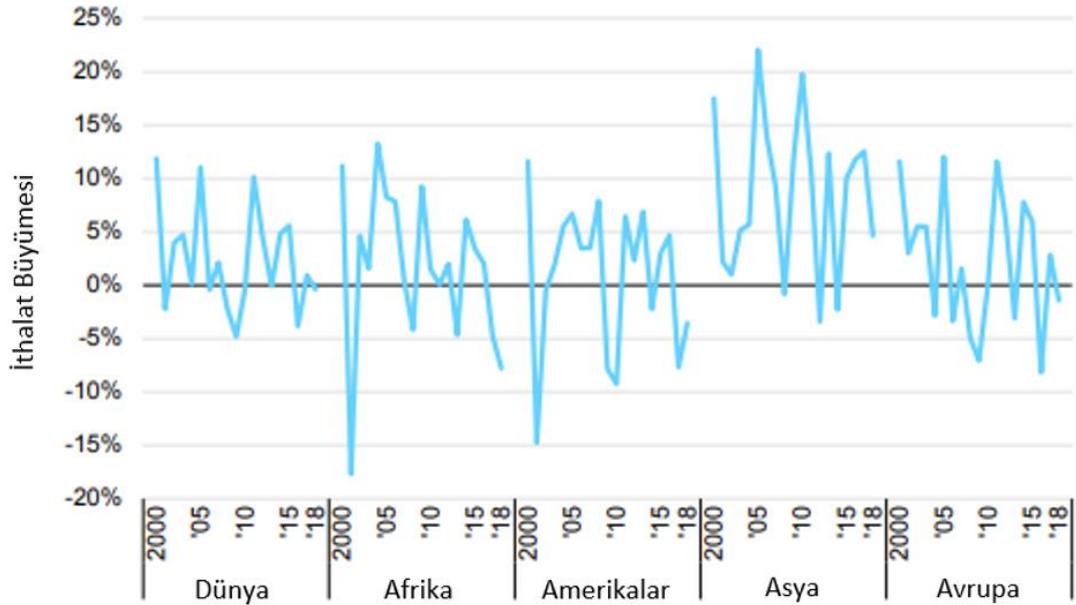
Elektrik piyasasındaki ticaretin zaman açısından görünümü Şekil 2.3'de özetlenmiştir.



Şekil 2.3 : Elektrik piyasalarındaki ticaretin zaman açısından görünümü.

### 3. SINIR ÖTESİ ELEKTRİK TİCARETİ (CROSS BORDER TRADING)

Elektrik enerjisi ve/veya kapasitesinin uluslararası enterkonneksiyonlar (uluslararası iletim hatları) vasıtasıyla ithalat ve ihracatının gerçekleştirilmesi sınır ötesi elektrik ticaretinin en yakın tanımıdır. Küresel çapta bakıldığında sınır ötesi elektrik ticareti hacmi 2018 yılında 728 terawatt saat (TWh) ile toplam elektrik enerjisi arzının %2,8'ine karşılık gelmiştir. Bu oran 2010 yılındaki 588 TWh'den %24 fazla ve yıllık ortalama %2,7 mertebesinde bir artışı ifade etmektedir. 2000'li yılların başından itibaren Asya bölgesi, Çin öncülüğünde artan enerji talebinin bir sonucu olarak elektrik ithalatında büyümenin en yüksek yaşandığı bölge olmuştur. AB ise tek ülke benzeri hareket etme stratejisi sonucu yapılan düzenlemeler neticesinde sınır ötesi elektrik ticaretinin en uzun süredir uygulandığı bölge olarak öne çıkmaktadır. 2018 yılı verilerine bakıldığında sınır ötesi elektrik ticareti vasıtasıyla yapılan ithalat Avrupa'da toplam elektrik arzının %9,1'ine, Afrika'da %4,5'ine, Orta Doğu'da %2,2'sine, Amerika kıtalarında %1,9'una ve Asya'da ise %0,6'sına karşılık gelmektedir. Şekil 2.4'te elektrik enerjisinin iki yönlü ticaretinin ülke ve bölgelere göre artışı gösterilmektedir [30].



Şekil 3.1 : 2000-2018 yılları arasında elektrik ithalat ve ihracatının bölgelere göre gelişimi [30].

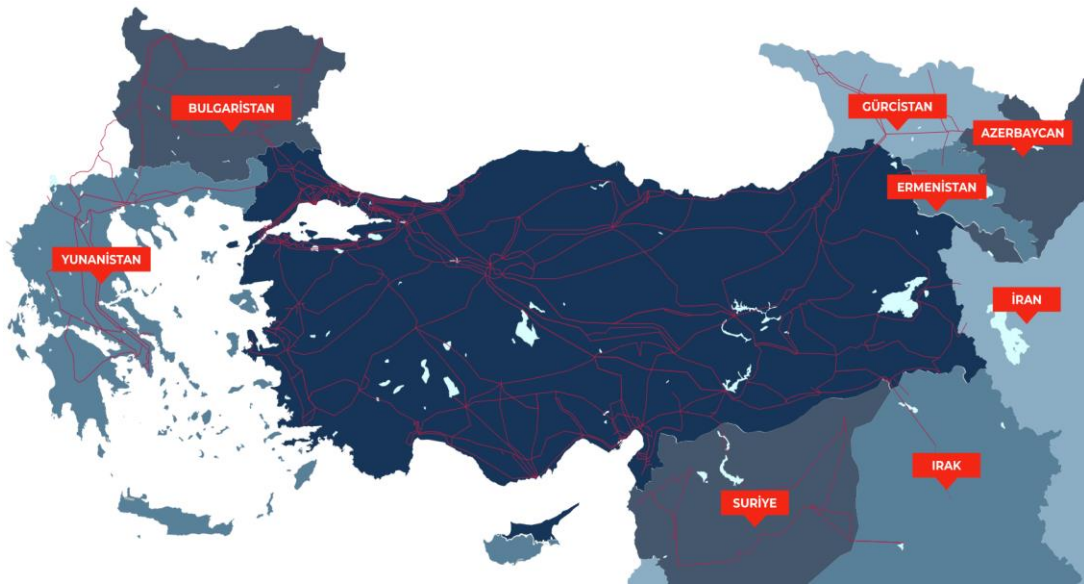


Toplam enerji tüketimine göre en büyük beş ülke olan Çin, Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Hindistan, Japonya ve Rusya ise, sahip oldukları büyük iç piyasa ve sınırlı enterkonekte kapasitelerinin etkisiyle daha düşük miktarda sınır ötesi elektrik ticareti gerçekleştirmektedir.

Sınır ötesi elektrik ticareti, ekonominin temel prensiplerinden olan arz ve talep dengesi çerçevesinde gerçekleşmektedir. Bu yolla, enerji piyasalarının daha verimli şekilde işletilmesi sağlanırken; taraflar arasında ekonomik ve stratejik iş birliğinin de artırılmasına katkı sağlanmaktadır. Elektrik enerjisinin sınır ötesi akışı, elektriğin ihtiyaç duyulan bölgelere iletilmesi için ülkeler arasında bağlantı sağlayan elektrik iletim hatları üzerinden gerçekleştirilir. Elektrik enerjisi maliyet avantajı sunan ülke veya bölgeden daha yüksek fiyatlı bölgeye doğru akmaktadır. Böylece hem piyasalarda fiyatın yakınsaması sağlanmakta hem de arz güvenliğine katkıda bulunmaktadır. Elektrik iletim hatlarının yeterli kapasiteye sahip olması ve işleyen bir piyasa yapısının varlığı, bu ticaretin verimli şekilde yürütülmesinde kritik öneme sahiptir. İletim kapasitesi, ihale mekanizmaları aracılığıyla piyasa katılımcılarına tahsis edilebileceği gibi, bazı durumlarda ikili anlaşmalar veya bölgesel iş birliği modelleri çerçevesinde de kullanılabilir. Bu mekanizmalar, sınır ötesi elektrik ticaretinin etkinliğini artırırken, iletim hatlarının optimal şekilde kullanılmasını ve piyasa katılımcılarının rekabetçi koşullarda faaliyet göstermesini sağlamaktadır.

Türkiye’de sınır ötesi elektrik ticareti yeni bir kavram değildir. TEİAŞ verilerine bakıldığında ithalatın ilk olarak Bulgaristan ile 1975 yılında başladığı görülmektedir. Çok küçük miktarlarda ve piyasa mekanizmasından tamamen uzak bu uygulamalar ilk enterkonekte hatların tesis edilmesiyle hayata geçirilmeye başlanmıştır. Zamanla diğer komşu ülkelerle de elektrik iletim hatları inşa edilerek elektriğin fiziksel akışına olanak sağlanmıştır. Bu süreç, ülkeler arasındaki enerji arz güvenliğini artırmanın yanı sıra, olası enerji kesintilerinin etkilerini de hafifletmeyi amaçlamaktadır. Türkiye ve komşuları arasındaki enterkoneksiyonların sınır ötesi elektrik enerjisi transfer kapasitesini sistem işletmecisi olan TEİAŞ belirlemektedir. Bulgaristan ve Yunanistan ile yapılan ticarete ihale yöntemi uygulanırken Gürcistan, Azerbaycan, Ermenistan, İran, Irak ve Suriye ile doğrudan kapasite tahsisi şeklinde ilerlenmektedir [32]. Buna göre TEİAŞ, günlük, aylık veya yıllık olabilecek şekilde Net Transfer Kapasitesi, Tahsis Edilmiş Kapasite ve Kullanıma Açık Kapasite değerlerini MW cinsinden belirlemekte ve ilan etmektedir. Bu uygulama, ticaret yapacak şirketlere önceden

planlama yapma imkânı sunarken, iletim hatlarının kullanım verimliliğini de artırmayı hedeflemektedir. Ardından ilgili kapasiteler için TEİAŞ Kapasite İhale Sistemi aracılığıyla ihaleler düzenlenmekte ve kazanan şirket Ticari İletim Hakkı'nı elde etmektedir [33]. Karşı ülke İletim Sistemi Operatörü veya ticaret yapmak isteyen tüzel kişilerden gelen talepler doğrultusunda kapasiteler belirlenmekte ve ihaleler gerçekleştirilmektedir. Teknik açıdan paralel çalışma, izole besleme yöntemi ve benzeri birtakım gereklilikleri de beraberinde getirdiği için enterkonneksiyonların var olması sınır ötesi ticaret için tek başına yeterli değildir. Şekil 2.6'da Türkiye'nin enterkonneksiyon hatlarının mevcut olduğu ülkeler gösterilmektedir [34].



**Şekil 3.3 :** Türkiye'nin mevcut uluslararası iletim hatları [34].

Söz konusu sınır ötesi ticaretin boyutu Türkiye'nin kendi iç enerji tüketimi ve ticareti düşünüldüğünde oldukça küçüktür. Çizelge 2.1'de Türkiye'nin yıllar itibariyle elektrik enerjisi ihracat ve ithalat miktarlarının toplamı GWh cinsinden gösterilmektedir [35]. Buna göre Türkiye'nin Irak ve Suriye ile sadece ihracat ilişkisi mevcutken; Bulgaristan, Gürcistan, Azerbaycan, İran ve Yunanistan ile hem ithalat hem de ihracat gerçekleştirdiği görülmektedir. Fakat Gürcistan ve Azerbaycan'dan elektrik ithalatı, bu ülkelere ihraç edilen elektriğin bedelinin, karşılıklı anlaşılan oranlarda yine elektrik olarak tahsili yoluyla yapılmaktadır. Ayrıca enterkonneksiyon mevcut olmasına rağmen Kars Trafo Merkezi'nde 154/220 kilovolt (kV) trafo mevcut olmadığından; mevcut durumda bu hat üzerinden ihracat veya ithalat gerçekleştirilememektedir.

**Çizelge 3.1 : İthal ve ihraç edilen MWh cinsinden elektrik enerjisinin yıllar itibariyle ülkelere dağılımı.**

<b>Ticaret</b>	<b>Ülkeler</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>
<b>İthalat</b>	Bulgaristan	3.966,8	4.571,2	5.300,7	4.842,0	4.587,0	2.073,0	2.051,3	1.960,6	1.689,5	1.059,2	2.284,8
	Gürcistan	79,0	3,3	293,9	417,5	1.039,3	493,9	414,9	247,0	169,9	1.254,9	3.980,8
	Azerbaycan	277,4	276,7	102,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	İran	1.499,7	2.405,0	2.252,0	1.867,7	635,8	160,8	0,0	0,0	0,0	0,0	151,6
	Yunanistan	3,7	173,2	4,0	8,4	68,3	0,5	10,7	3,9	30,1	20,3	21,7
	<b>Toplam</b>	<b>5.826,7</b>	<b>7.429,4</b>	<b>7.953,3</b>	<b>7.135,5</b>	<b>6.330,3</b>	<b>2.728,3</b>	<b>2.476,9</b>	<b>2.211,5</b>	<b>1.889,5</b>	<b>2.334,5</b>	<b>6.438,8</b>
<b>İhracat</b>	Gürcistan	0,0	0,1	0,9	2,2	0,0	0,8	105,9	0,2	315,0	162,5	0,0
	Bulgaristan	1,7	0,2	0,2	1,9	3,1	98,0	89,6	120,7	326,0	260,2	126,4
	Yunanistan	1.704,9	804,7	1.909,4	2.818,6	1.444,3	3.204,9	2.912,0	2.667,8	1.841,1	2.912,2	2.966,3
	Azerbaycan	12,9	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	151,2
	İran	0,0	0,0	0,0	371,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Irak	0,0	421,6	785,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	642,0	0,0
	Suriye	1.234,1	0,0	0,0	0,0	4,3	0,0	4,4	0,0	1,6	209,5	469,1
	<b>Toplam</b>	<b>2.953,6</b>	<b>1.226,7</b>	<b>2.696,0</b>	<b>3.194,5</b>	<b>1.451,7</b>	<b>3.303,7</b>	<b>3.111,9</b>	<b>2.788,7</b>	<b>2.483,6</b>	<b>4.186,4</b>	<b>3.713,0</b>
<b>Net İthalat</b>		<b>2.873,1</b>	<b>6.202,7</b>	<b>5.257,3</b>	<b>3.941,1</b>	<b>4.878,6</b>	<b>-575,4</b>	<b>-635,0</b>	<b>-577,2</b>	<b>-594,4</b>	<b>-1.851,9</b>	<b>2.725,9</b>

Sınır ötesi elektrik ticareti, hem ülkemizde hem de diğer ülke ve bölgelerde modern enerji piyasalarının entegre yapısının giderek daha önemli bir parçası haline gelmektedir. Küreselleşen ekonomi ve enerjiye artan talep, ülkeler arasında elektrik enerjisinin ticaretini hem arz güvenliği hem de ekonomik verimlilik açısından kritik bir unsur haline getirmektedir. Özellikle elektrik üretiminin farklı kaynaklardan sağlanması ve bu kaynakların belirli bölgelerde yoğunlaşması, elektrik enerjisinin uluslararası ticaretini daha stratejik bir başlık haline getirmektedir. Bu bağlamda, gelişmiş ülkelere gelişmekte olan ülkelere, fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına kadar geniş bir yelpazede elektrik enerjisi ticareti; enerji arz-talep dengesini sağlamaya yönelik stratejik bir araç olmanın yanı sıra, hem yerel enerji arzını çeşitlendirmek hem de küresel enerji piyasalarındaki dalgalanmalara karşı dayanıklılığı artırmak için güçlü bir araç olarak ön plana çıkmaktadır.

İkinci Dünya Savaşı'nın ardından dünya genelinde ülkeler arası ticaretin serbestleşmesi ve yaygınlaşması neticesinde birçok konuda karşılıklı ticari ilişkiler hız kazanmıştır. Fosil yakıtların ticareti erken dönemde bu artışa öncülük etmiş olsa da son 50 yılda elektrifikasyonun hızla artması ve teknolojinin imkan vermesiyle enerji ticareti başlığının altına elektrik enerjisi de dahil olmuştur. Son 20 yılda sınır ötesi elektrik ticaretinin etkilerini konu alan birçok çalışma gerçekleştirilmiştir.

Avrupa Birliği sınır ötesi elektrik ticaretinin en yaygın ve ileri uygulamalarının görüldüğü bölgedir. Güneydoğu Avrupa ülkelerinden Yunanistan, İtalya ve Bulgaristan arasındaki sınır ötesi elektrik ticaretinin Granger nedensellik ağ analizi kullanılarak incelendiği Papaioannou ve arkadaşları tarafından 2020 yılında yapılan bir çalışmada, ülkelerin spot piyasa fiyatları, toplam elektrik talebi ve yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisi miktarı gibi temel bir takım veriler ile sınır ötesi elektrik ticaretine ilişkin veriler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Sınır ötesi elektrik ticaretini ithalat, ihracat ve net transfer kapasiteleri üzerinden ele alan bu çalışma ilgili veriler arasındaki nedenselliği ve birbirlerine olan etkilerini ortaya koymuştur. Özellikle 2015-2018 dönemi için yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanan elektrik üretiminin artan paylarının adı geçen ülkeler arasındaki elektrik ticareti üzerindeki etkilerine odaklanılarak, söz konusu değişkenler arasındaki tüm olası etkileşimler tespit edilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın sonuçları Yunanistan, İtalya ve Bulgaristan elektrik fiyatları arasında güçlü bir nedensel ilişki olduğunu göstermektedir. İlgili tarih aralığında İtalya'daki yenilenebilir enerji üretiminin artış

veya azalışının, sınır ötesi ticaretin fiyatlar üzerindeki etkilerinden ötürü Yunanistan'daki spot fiyatlarını doğrudan etkilediği ifade edilmektedir. Ayrıca benzer şekilde fakat daha sınırlı olmak kaydıyla Yunanistan ve Bulgaristan spot fiyatları arasında da sınır ötesi ticaretten kaynaklanan bir korelasyon saptanmıştır. Çalışmada, elektrik fiyatlarının oluşumunda sınır ötesi elektrik ticaretinin önemli bir rol oynadığı ve bu ticaretin ülkeler arasındaki fiyat farklılıklarını azaltarak fiyat yakınsamasına katkıda bulunduğu ortaya konulmuştur. Yunanistan, İtalya ve Bulgaristan arasındaki ticaretin özellikle Yunanistan ve İtalya'daki fiyatları doğrudan etkilediği ve ticaretin fiyatları artırıcı veya azaltıcı bir etki yaparak piyasa dengesine olumlu yönde katkı sağladığı tespit edilmiştir [36].

Sınır ötesi elektrik ticareti için en önemli gerekliliklerden birisi elektrik iletim hatlarının yeterli miktarda ve kapasitede hizmet verebilir olmasıdır. Avrupa elektrik piyasasının entegre yapısını ve sınır ötesi ticareti de belirli oranda dikkate alan optimizasyon mekanizması sayesinde; elektrik enerjisi akışı fiyatların düşük olduğu bölgeden yüksek olduğu bölgeye doğru olacak şekilde dizayn edilmiştir. Bu akışın beklenen miktarda gerçekleşmemesi yani kapasite yetersizliği yaşanması durumlarında sıkışıklık meydana gelmektedir. Güneydoğu Avrupa sınır ötesi elektrik iletim mekanizmaları ile ilgili olarak Kristiansen tarafından 2007 yılında yapılan bir çalışmada “congestion management” olarak tanımlanan bu sıkışıklık yönetimi için iki temel yaklaşım incelenmiştir [37]. Bunlardan ilki halen daha çok kullanılan Kullanılabilir Transfer Kapasitesi (ATC) mekanizması ve diğeri de gitgide kullanımı artan Akış Bazlı (FB) yaklaşımıdır.

ATC, enerji piyasalarında sınır ötesi elektrik ticareti için belirlenen bir kavramdır. Bir ülkenin elektrik sisteminden diğeri bir ülkenin elektrik sistemine aktarılacak elektrik enerjisi kapasitesini ifade etmektedir. Bu yöntem elektrik iletim hatlarının ve diğeri enerji aktarım altyapısının mevcut durumunu dikkate alarak kapasitenin hesaplandığı geleneksel bir yöntemdir. Söz konusu kapasite, ticareti yapılabilir elektrik miktarını belirlemektedir ve enerji ticareti işlemlerinin planlanması ve gerçekleştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. ATC değerleri, sınır ötesi elektrik ticaretinin verimli ve güvenli bir şekilde gerçekleşmesini sağlamak için düzenleyici otoriteler ve enerji şirketleri tarafından yakından takip edilmektedir [37].

FB ise, enerji piyasalarında sınır ötesi elektrik ticareti için kullanılan bir diğeri yöntemdir ve elektrik iletim hatlarının gerçek zamanlı kapasitesini temel alarak

ticaretin planlanması ve gerçekleştirilmesinde daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmeyi amaçlamaktadır. FB yöntemi, elektrik akışını optimize etmek ve sınır ötesi elektrik ticaretinin verimliliğini artırmak için kullanılmaktadır. Bu yöntem ile enerji ticaretinin daha dengeli ve adil bir şekilde gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Piyasa katılımcılarına daha güvenilir ticaret koşulları sunan bu yöntem Avrupa Birliği'nin enerji iç piyasasının entegrasyonunu desteklemek ve enerji arz güvenliğini artırmak için önemli bir araç olarak kabul edilmektedir [37].

Yunanistan, Kuzey Makedonya, Bulgaristan, Sırbistan ve Romanya olmak üzere Güneydoğu Avrupa bölgesindeki 5 ülke için her iki yaklaşımın da uygulanmış ve etkinliklerinin karşılaştırılmış olduğu, Makrygiorgou ve arkadaşlarının 2020 yılında yaptığı bir çalışmanın sonuçlarına bakıldığında, ATC ve FB yaklaşımlarının sınır ötesi elektrik ticaretinde farklı üstünlüklere sahip olduğu görülmektedir. ATC, elektrik iletim kapasitesini temel almakta ve ticaretin planlanması ve gerçekleştirilmesinde belirli bir öngörülebilirlik ve güvenlik sağlamakta, ancak bazı durumlarda ticaret hacmini sınırlayabilmektedir.

Öte yandan, FB yöntemi, elektrik iletim hatlarının gerçek zamanlı kapasitesini temel alarak daha esnek bir ticarete zemin hazırlamaktadır. Bu yöntem, ATC yöntemine göre daha dinamik bir yaklaşım sunmakta ve ticaret hacmini artırabilmektedir. Ancak, FB yöntemi daha karmaşık bir yapıya sahiptir ve uygulanması bazı teknik zorlukları beraberinde getirebilir. İlgili çalışmanın sonucunda, iki yöntemin de kendine has güçlü ve zayıf yanları olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, bölgedeki enerji piyasalarının daha fazla entegrasyon ve gelişimi için her iki yöntemin de dikkate alınması gerektiği ifade edilmiştir [38].

Avrupa Birliği ülkelerinde görülen bölgesel elektrik piyasası tasarımı, teklif bölgeleri arasındaki sıkışıklık yönetimi için yukarıdaki yöntemlerin uygulanmasının ardından dengeleme mekanizmasının devreye girmesini de esas almaktadır. Bu yapı gün öncesi ve gün içi piyasalarını takiben üretim birimlerinin yeniden dağıtılmasına yani bazı santrallerin yük alıp bazılarının yük atmasına dayanan bir sistemdir. Bu mekanizmanın işleyişinde karşılaşılan en büyük zorluklardan birisi yine sıkışıklık yönetimi olmaktadır. Değişken yenilenebilir enerji kaynakları ve diğer dağıtık enerji kaynaklarının gitgide artan üretim miktarı, Avrupa enerji piyasalarının girift yapısıyla birleşince sıkışıklık olaylarının sıklığı ve büyüklüğü artış gösterdiği gibi sınır ötesi elektrik ticareti potansiyeli de sınırlanabilmektedir. Öyle ki Enerji Düzenleyicileri

İşbirliği Ajansı (ACER)'nin 2018 yılında yayınlamış olduğu market izleme raporunda, 2017 yılında Almanya'da sıkışıklık yönetimi için piyasada yapılan iyileştirme işlemlerinin maliyetinin 1 milyar avroyu aştığı ifade edilmektedir [39]. Yine ilgili raporda ifade edildiği üzere sistem işletmecisinin gerçek zamanlı dengeleme için kullandığı yük alma ve yük atma talimatlarıyla oluşan bu yeniden dağıtımın maliyetleri ve bölgesel piyasalar arasında yeterince yakınsayamayarak yüksek kalan elektrik fiyatları refah kayıplarına da yol açmaktadır.

FB yöntemi ve yeniden dağıtımın birleşik verimliliğini arttırmak üzere sıkışıklık yönetimi için yeni bir metodoloji üzerinde çalışan Poplavskaya ve arkadaşlarının 2020 yılında yaptığı bir çalışmada, yeniden dağıtım amaçlı yapılacak işlemler gün öncesi piyasasına entegre edilmiş ve bu yolla sıkışıklık azaltılarak sınır ötesi ticaret için daha yüksek şebeke kapasitesi sağlanması hedeflenmiştir. Üç basamaklı bir optimizasyon modelinin kullanıldığı bu senaryoda nodal market model ve zonal market modelleri karşılaştırılarak sonuçlara ulaşılmıştır. Çıktılar, önerilen metodolojinin sınır ötesi kapasiteyi önemli ölçüde artırma ve yeniden dağıtım maliyetlerini azaltma potansiyeli olduğunu ortaya koymaktadır [40].

Elektrik ticareti için teslimattan önce fiziki akışın tahsis edildiği Vadeli Piyasa, Gün Öncesi Piyasası ve Gün İçi Piyasası olmak üzere üç farklı piyasa söz konusudur. Yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanan değişken enerji üretim miktarının giderek artması piyasa katılımcılarının dengede olmasını zorlaştırmaktadır. Avrupa genelinde entegre bir gün içi piyasası rekabeti ve fiyatlandırmayı etkileyecek, likiditeyi arttıracak ve üretim kaynaklarının daha verimli şekilde dağıtılmasını sağlayacaktır. Sınır ötesi elektrik ticaretini de bu denkleme dahil etmeyi amaçlayan Gün İçi Sınır Ötesi Projesi (The Intraday Cross-Border Project) Avrupa genelinde enerji piyasaları ve sistem işletmecilerinin ortak girişimiyle başlatılmış bir inisiyatiftir [41]. Bu girişimin gerçekten sınır ötesi elektrik ticaretine etkisi olup olmadığını değerlendirmek adına Kaht tarafından 2019 yılında yapılan bir çalışmada Avrupa genelindeki en likit ve büyük Gün İçi Piyasası'na sahip Almanya verileri dikkate alınmıştır. Çalışmada Gün İçi Sınır Ötesi Projesi'nin, piyasa fiyatları, işlem hacmi ve oynaklık üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Çalışmanın temel bulgularına göre, bu projenin uygulamaya konulmasının fiyatlar veya oynaklık üzerinde doğrudan ölçülebilir bir etkisi olmamıştır. Bu sonuçlar, ilgili projenin piyasadaki verimliliği ve likiditeyi arttırmaya

yönelik teorik beklentileri tam olarak karşılamadığını ve bu nedenle her modelde zorunlu olarak yer alması gerektiğini kanıtlamaktadır [42].

Abrell ve Rausch tarafından 2016 yılında yapılan bir diğer çalışmada, Avrupa Birliği genelindeki artan yenilenebilir enerji kaynakları üretimi, iletim altyapısı ve sınır ötesi elektrik ticareti birlikte ele alınmıştır. Bu politika önerisi niteliğindeki çalışmada gerek AB'nin karbon nötr olma hedefleri gerekse enerjide dışa bağımlılığı azaltma çabaları düşünüldüğünde sınır ötesi elektrik ticaretinin yardımcı bir enstrüman olabileceği ifade edilmektedir [43]. Farklı ülkelerin farklı kaynaklardan üretmiş olduğu yenilenebilir enerji üretimlerinin yeterli iletim altyapısı vasıtasıyla birbirine iletilmesi neticesinde enerji dengesinin sağlanması kolaylaşabilecektir. Örneğin, İspanya'da güçlü olan güneş enerjisinden elektrik üretimi ile Almanya'da güçlü olan rüzgar enerjisinden elektrik üretiminin bir sinerji oluşturarak daha kesintisiz, sürdürülebilirliği yüksek ve dengeli bir elektrik enerjisi arzı sağlamanın mümkün olacağına dikkat çekilmiştir.

Yine aynı çalışmada ticaretten elde edilen kazançların ve elektrik üretiminden kaynaklanan karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonlarının bölgesel dağılımı için Avrupa'da iletim altyapısı genişletilerek; yenilenebilir enerji üretiminin artışı, sınır ötesi elektrik ticaretinin seyri ve çevresel etkilerine odaklanan çok ülkeli ve çok sektörlü bir genel denge modeli geliştirilmiştir. Bu model aracılığıyla Avrupa'nın karbon emisyon azaltım hedeflerine ulaşmak için iletim altyapısının önemi farklı bir açıdan ortaya konulmuştur. Avrupa'da planlanan iletim altyapısı genişlemesinin, Avrupa enerji ve iklim politikası kapsamında 2020 yılı için hedeflendiği gibi nispeten yüksek yenilenebilir enerji seviyeleri için bile, karbon emisyonlarını artırdığı görülmüştür. Ancak 2030 yılındaki daha büyük miktarda yenilenebilir enerji üretimi devreye alındığında karbon emisyonları düşüş gösterebilmektedir. Bu durum iletim altyapısının genişleme politikaları ile karbon emisyon azaltım politikalarının son derece koordineli olmak zorunda olduğunun ispatı niteliğindedir. Çalışmada bu sonuçla dolaylı olarak ilişkili olan sınır ötesi elektrik ticaretinin ve ülkelerin spot fiyatlarının seyrinin de iletim altyapılarının genişlemesiyle yakından ilişkili olduğu ortaya konulmuştur [43].

Antweiler'in 2016 yılında yaptığı çalışmasında, sınır ötesi ticarete konu olan elektrik enerjisinin, salt ticari bakış açısıyla değerlendirildiğinde ithalat ve ihracatı gerçekleştirilen ve arz talep dinamiklerine göre işleyen homojen bir mal olarak

yorumlanabileceği ifade edilmektedir. Kanada ve ABD'nin Kuzey Eyaletleri arasındaki sınır ötesi elektrik ticaretini mercek altına alan bu yaklaşımda "karşılıklı yük düzeltme" olarak adlandırılan uluslararası ticaret, komşu ülkeler arasında arz ve talebin dengelenmesine katkı yaparak bir sigorta görevi görmektedir. Elektrik talebinin stokastik ve bölgeler arasında korelasyonlu olduğu bir ortamda, elektrik şirketleri komşu bölgelerden daha ucuz düşük talep dönemlerinde elektrik ithal ederek zirve dönemlerindeki maliyetlerini azaltabilmektedir. Kanada eyaletleri ile ABD eyaletleri arasında gözlemlenen ticaret, gerçekleşen veriler analiz edildiğinde bu tezi doğrular niteliktedir [44].

Yuan ve arkadaşlarının 2021 yılında yaptığı bir çalışmada, Kanada'nın sahip olduğu geniş hidrolik kaynakların ABD'nin Kuzeydoğu bölgesinde yer alan New York ve New England gibi eyaletlerin karbon nötr olma hedeflerine ulaşmak için iyi bir araç olup olmayacağı araştırılmıştır. Fakat mevcut iletim kapasitesinin yetersizliği, hidroelektrik ithalatının bölgeye genişletilmesinde sınırlayıcı bir faktör olarak tespit edilmiştir. Quebec'den ABD'nin Kuzeydoğu eyaletlerine doğru uzanan iletim altyapısının genişletilmesinin nasıl bir ekonomik değer oluşturabileceğini incelemeyi amaçlayan bu çalışmada mevcut iletim kapasitenin %10, %30 ve %50 üzerinde bir genişleme yaşanması durumunda olası sonuçlarının neler olabileceği senaryo çalışmalarıyla tahminlenmiştir. Sonuçlar kapasitenin artırılmasının üretim maliyeti sıfır olan hidrolik kaynakların ithalatını kolaylaştıracağı için enerji maliyetleri üzerinde azaltıcı bir etki yaptığını ortaya koymaktadır. Ayrıca her yıl artış göstermesi beklenen karbon fiyatlarının da hidrolik kaynaklardan sağlanan elektrik enerjisi ithalatının artması sonucu, beklentiler paralelinde baskılandığı görülmüştür [45]. Karbon salımlarını azaltma hedefleriyle ilişkili olarak Chen ve arkadaşlarının 2020 yılında yaptığı bir başka çalışmada ise Kuzeybatı Avrupa enerji sisteminin karbon yoğunluğunun azaltılmasında sınır ötesi elektrik ticaretinin ekonomik potansiyeli Balmorel enerji modeli ile ölçülmeye çalışılmıştır. Burada mevcut planlanan iletim hattı kapasite kurulumları ile en düşük toplam sistem maliyetlerinde modellenen optimal iletim kapasiteleri olmak üzere iki senaryo karşılaştırılmıştır. Çıkan sonuçlardan daha güçlü ve yüksek kapasitede elektrik iletim hatlarına sahip şebekenin toplam sistem işletme maliyetini düşürdüğü görülmüştür. Ayrıca dolaylı olarak da daha yüksek miktarda elektrik enerjisi iletimine imkan sağladığından fiyatların daha çok yakınsamasına zemin hazırladığı ve bölgesel fiyat farklarının azaldığı

gözlemlenmiştir. Bu etki daha yüksek miktardaki rüzgar ve hidroelektrik kaynaklardan sağlanan üretimin şebekeye entegre edilebilmesiyle mümkün olmuştur [46].

Sınır ötesi elektrik ticaretinin, ticarete taraf olan ülkeler arasında fiyatların yakınsaması ve giderek optimize olması yoluyla sağladığı bir sosyal refah kazancı söz konusudur. Avrupa Birliği bunu entegre enerji piyasaları vasıtasıyla adım adım hayata geçirme yolundadır. Buna ilave olarak enerji kaynaklarının, tedarikçilerinin ve rotalarının kıtalararası olarak çeşitlendirilmesini desteklemektedir. Son on yılda artan bir elektrik tüketimi ile hızlı ekonomik büyüme yaşayan Güney Kafkasya ve Orta Asya da dahil olmak üzere belirli bölgeler bu konuda potansiyel alanlardır. Bu bağlamda yeni bir yaklaşım ve senaryo ortaya koymak amacıyla Purvins ve arkadaşlarının 2021 yılında yaptığı bir çalışmada Türkiye, Gürcistan, Azerbaycan ve Kazakistan'ı Avrupa'ya bağlayan bir enterkonnekte elektrik iletim hattının ekonomik faydalarının neler olabileceği saptanmaya çalışılmıştır. Bu çalışmada ilgili ülkelerin iletim sistemi operatörlerinin 2040 yılına kadar olan yatırım planları referans senaryo olarak dikkate alınmış ve ek elektrik iletim hatlarının tesis edildiği alternatif bir Trans-Asya senaryosu kurgulanmıştır. Kurgulanan bu modelde hayata geçirilmesi planlanan elektrik iletim hattı altyapı projesi için fayda maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda 1.598 M€ ile 3.251 M€ arasında değişen bir toplam yatırım maliyetine karşılık, yıllık 140 M€'luk bir sosyal refah artışı hesaplanmıştır. Faydalı ömrü 40 yıllık bir süre olarak hesaplanan bir elektrik iletim altyapısı ile bunun hayata geçirilebilir olduğu düşünülmektedir [47].

Sınır ötesi elektrik ticareti karşılıklı bağımlılığı ve entegrasyonu arttıran bir faktör olduğundan, dolaylı olarak görece olumsuz sonuçlar doğurduğu vakalar da mevcuttur. Entegre iki piyasadan birinde görülen bir bozulma, yeni bir düzenleme veya yeni bir uygulama diğer piyasanın dinamiklerini doğrudan veya dolaylı şekilde etkileyebilmektedir. İngiltere'nin uygulamaya koyduğu ek karbon vergisinin Fransa ve Hollanda ile olan sınır ötesi elektrik ticareti üzerindeki etkilerini ekonometrik bir modelle açıklamaya çalışan Gou ve Newbery 2020 yılında yaptıkları bir çalışmada dikkate değer bazı sonuçlara ulaşmışlardır. Buna göre ek karbon vergisinin uygulandığı 2015-2018 yılları arasında ucuz ithalatın artış göstermesi nedeniyle İngiltere Gün Öncesi Piyasası spot fiyatları 11 €/MWh artış göstermiştir. Bu durum aynı zamanda ithalatın ağırlıklı olarak yapıldığı ülkeler olan Fransa ve Hollanda'da fiyatların sırasıyla 3,5 €/MWh ve 2,8 €/MWh artmasına neden olmuştur. Ek karbon

vergesi İngiltere'nin yıllık toplam talebinin %4'üne karşılık gelen 12 TWh/yıl seviyesinde bir ithalat artışına neden olmuş ve dolayısıyla karbon vergisi gelirin 100 Milyon €/yıl azalmasını beraberinde getirmiştir. Karbon vergisi gelirlerindeki bu düşüş 2017 yılındaki toplam gelirin yaklaşık %10'una eşittir. Ayrıca ithalat yapılan ülkeler ile aradaki oluşan arbitraj fiyat farkından sağlanan gelirin yarısı yaklaşık 75 Milyon €/yıl ülke dışına transfer edilmiştir [48].

Avrupa enerji piyasaları yeni şebeke yatırımları ve piyasaların birleştirilmesine yönelik yapılan sürekli düzenlemelerin de etkisiyle gitgide birbirine daha bağımlı hale gelmektedir. Avrupa'nın göbeğinde yer alan ve komşuları olan Almanya, Avusturya, Fransa ve İtalya'nın şebekelerine toplam 7 GW'ın üzerinde enterkonnekte hat ile bağlı olan İsviçre bunun en çarpıcı örneklerinden biridir [49]. Büyük komşu ülkelerden giderek daha çok etkilenen nispeten küçük İsviçre enerji piyasası komşu ülkelerin arz ve talep değişkenlerinden etkilenmektedir. İsviçre'yi merkeze alarak komşularıyla olan etkileşimini inceleyen Keles ve arkadaşlarının 2020 yılında yaptığı bir çalışmada; İsviçre elektrik fiyatlarının yaz aylarında Almanya elektrik fiyatlarıyla güçlü bir korelasyon gösterdiği, ancak kış döneminde Fransa elektrik fiyatlarını takip etme eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca elektrik üretimi amaçlı kullanıldığından doğal gaz fiyatlarının ve elektrik talebinin yine çok büyük oranda fiyatları etkilediği sonucuna varılmıştır. Kış aylarında Fransa ve İtalya'da artan talep İsviçre fiyatlarını yukarı çekerken yaz döneminde artan Almanya kaynaklı yenilenebilir enerji üretimi ise fiyatların aşağı yönde hareket etmesine neden olmaktadır [50].

Sınır ötesi elektrik ticaretine ilişkin uygulamalara Avrupa ve Amerika kıtasında rastlandığı gibi Asya kıtasında da örneklerini görmek mümkündür. Dünya'nın en yüksek noktası olan Everest'in hemen yakınındaki Nepal ve Butan denize kıyısı olmayan fakat sahip oldukları coğrafi konum itibarıyla hidrolik kaynaklar bakımından zengin iki ülkedir. Komşuları olan Hindistan ve Bangladeş ise gelişmekte ve hızla büyümekte olan iki ekonomidir. Sınır ötesi elektrik ticaretinin tam bu noktada kazan kazan formülüne dönüşebileceği düşünülerek Nepal için SWOT analizi gerçekleştirilen Dhakal ve arkadaşlarının 2019 yılında yaptığı bir çalışma, doğru politikalar ve yeterli teknik altyapı yatırımları sonucunda bölgedeki dört ülkenin de toplam refahını arttıracak bir sinerji oluşabileceğini ortaya koymuştur [51].

Dünya üzerindeki görece gelişmiş ülke ve bölgelerde sınır ötesi elektrik ticareti daha çok elektrik enerjisi fiyatları, yenilenebilir enerji kaynakları ve iklim hedefleri ile

mevcut altyapının güçlendirilmesi gibi konu başlıklarıyla birlikte ele alınmaktadır. Fakat Afrika gibi bu konularda nispeten geriden gelen bir bölgede sınır ötesi elektrik ticareti farklı sorunların çözümünde rol oynayabilecek bir enstrüman olarak görülebilir. Batı Afrika bölgesindeki ulusal elektrik şirketlerinin bir iş birliği örgütü olan Batı Afrika Enerji Havuzu (West African Power Pool), komşu ülkeler arasında tesis edilecek olan enterkonnekte hatlar vasıtasıyla entegre bir elektrik piyasası oluşturarak bölgedeki tüm ülkelerin uygun fiyatlı ve kesintisiz elektriğe erişimini sağlamayı amaçlayan bir organizasyondur [52]. İlgili organizasyonun senaryolarını dikkate alarak Adeoye ve Spataru'nun 2020 yılında yaptığı bir çalışmada Batı Afrika enerji sisteminin çok bölgeli bir ekonomik dağıtım modeli geliştirilmiş ve artan sınır ötesi elektrik ticaretinin yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretim maliyeti, karbon emisyonu, elektrik arzı ve hızla artan elektrik talebi üzerindeki etkisi ölçülmüştür. Sonuçlar sınır ötesi elektrik ticaretinin artmasının elektrik kesintilerini büyük ölçüde azalttığını göstermektedir. Mevcut planlanan üretim santrallerinin faaliyette olduğu 2023 senaryosunda artan sınır ötesi elektrik ticareti, fosil yakıtlardan gelen üretimi %10'un üzerinde arttırmaktadır. Bu durum elektrik fiyatlarında yükseliş ve karbon salımlarında artışı beraberinde getirecektir. Bölgedeki 14 ülkenin tamamının birbirine bağlı olduğu diğer senaryoda ise net ihracatçı ve net ithalatçı olan ülkelerin çoğunda ortalama marjinal maliyetler azalmaktadır. Bu yolla hem elektrik kesintileri azalmakta hem fiyatlar düşüş göstermekte hem de daha yüksek miktarda yenilenebilir enerji kaynağı şebekeye bağlanabildiğinden karbon salımı düşmektedir [53].

Sınır ötesi elektrik ticaretinin farklı enerji kaynaklarından elektrik üretimine etkilerinin rolünü vurgulamak adına Boz'un 2020 yılında yaptığı bir başka çalışma ise bu konuda ampirik bazı kanıtlar sunmaktadır. Farklı ülke ve bölgelerdeki enerji piyasalarından örnekleri barındırması amacıyla üç kıtadan (Amerika, Avrupa ve Asya) 48 ülke seçilmiş ve 1991 ve 2018 yılları arasında veri toplanmıştır. Panel birim kök testi ve panel eşbütünleşme (koentegrasyon) testleri ile doğal gaz, güneş ve rüzgardan sağlanan elektrik üretimi ile uluslararası elektrik ticareti arasındaki ilişkinin varlığı mercek altına alınmıştır. Ampirik kanıtlar, bir ülkede güneş ve rüzgar enerjisi kaynaklarından elektrik üretiminin uluslararası elektrik ticareti ile etkileşime girmesinin, doğal gazdan elektrik üretimini istatistiksel olarak önemli ölçüde azalttığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, güneş ve rüzgar enerjisi kaynakları için verimlilik endeksleri oluşturulmuş ve uluslararası elektrik ticareti yapan ülkelerde

güneş ve rüzgar enerjisinden elektrik üretimi kullanımının arttığına dair sonuçlara ulaşılmıştır [54].

Bu tez çalışması kapsamında sınır ötesi elektrik ticaretinin piyasa fiyatları üzerindeki etkisini anlamak üzerine yapılan literatür incelemesinde, genel olarak bu ticaretin arz ve talep dengesi sağlayarak elektrik fiyatlarında istikrar sağladığı tespit edilmiştir. Ancak, mevcut literatürde fiyat oynaklığına yönelik kapsamlı bir inceleme eksikliği de gözlemlenmiştir. Bu nedenle tez çalışmasında, fiyat tahmininden ziyade fiyat oynaklığına odaklanılarak, sınır ötesi elektrik ticaretinin piyasa üzerindeki daha derin etkilerini incelemek amaçlanmıştır. Mevcut literatür, elektrik ticaretinin enerji fiyatları üzerindeki doğrudan etkilerini ele alırken, fiyat dalgalanmalarının piyasa dengeleri üzerindeki uzun vadeli etkilerine odaklanmamıştır.

Bu tez çalışmasının temel hedeflerinden biri, sınır ötesi elektrik ticaretinin fiyat oynaklığını nasıl etkilediğini ölçerek, bunun azaltıcı bir unsur olarak değerlendirilebilir olup olmadığını sorgulamaktadır. Bu bağlamda “Sınır ötesi elektrik ticareti olmasaydı fiyatlara etkisi ne olurdu? Sınır ötesi elektrik ticaret hacmini arttırdığımızda bu durum elektrik fiyatlarının oynaklığını azaltacak mı?” gibi sorulara cevap aranmak istenmiştir. Sadece fiyat seviyelerindeki değişiklikleri gözlemlemek yerine, oynaklık üzerindeki etkilerin analiz edilmesi, ticaret hacminin artışının piyasalar üzerinde oluşturabileceği potansiyel faydaları daha net bir şekilde ortaya koyacaktır. Ayrıca bu çalışmada nihai hedefin tek başına ve yüksek doğrulukta bir elektrik fiyatı tahmini olmadığı tekrar hatırlatılmalıdır. Elektrik fiyatlarını uzun vadede birçok kabul ve varsayım altında tahmin etmek ve sınır ötesi elektrik ticaretinin artışıyla elde edilebilecek ekonomik kazancın ticari değerini belirlemek, gelecekteki araştırmaların konusu olabilir. Bu çalışmanın temel odak noktası, ticaret hacmindeki artışın enerji piyasasındaki dalgalanmaları azaltarak fiyat istikrarını nasıl artırabileceğini incelemektir.

Daha önce de vurgulandığı gibi literatürdeki önemli eksikliklerden biri, sınır ötesi elektrik ticaretinin piyasa oynaklığı üzerindeki etkilerinin yeterince araştırılmamış olmasıdır. Oysa ki oynaklığın azalması, piyasaların daha öngörülebilir hale gelmesini sağlar ve bu da piyasa katılımcıları için riskleri azaltan kritik bir unsurdur. Bu bağlamda, çalışmamızda fiyat oynaklığına odaklanarak, sınır ötesi elektrik ticaretinin piyasadaki istikrarını nasıl etkilediğini derinlemesine analiz etme gereği doğmuştur.



#### 4. VERİ VE İSTATİSTİKSEL YAKLAŞIM

Bu bölümde, çalışmanın analiz aşamasında kullanılan veri setleri, ARIMAX ve GARCH modelleri aracılığıyla elektrik fiyatlarının (PTF) modellenmesi ve oynaklığın tahmini süreçleri ele alınmaktadır. Elektrik fiyatları, arz ve talep dinamikleriyle şekillenmekte olup, bu çalışmada Türkiye geneli elektrik talebi ve arz tarafındaki üretim kaynaklarının etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elektrik üretiminde özellikle yenilenebilir enerji, barajlı santraller, kömür ve doğal gaz santrallerinin katkıları bağımsız değişkenler olarak dikkate alınmış ve ithalat, ihracat gibi dışsal değişkenler ile doğal gaz fiyatları da modele dahil edilmiştir. Kullanılan bu veriler, 2016-2023 dönemini kapsayan saatlik zaman serisi olarak EPIAŞ ve BOTAŞ kaynaklarından elde edilmiş ve analizlerde kullanıma hazır hale getirilmiştir. İlk olarak, verilerin istatistiksel özeti sunularak modelleme sürecine geçilmiş ve bu süreçte regresyon analizinin yetersiz kalması üzerine zaman serisi modelleri tercih edilmiştir.

Çalışmada, elektrik fiyatlarını etkileyen faktörleri daha iyi anlamak ve bu faktörlerin değişmesi durumunda fiyat oynaklığının nasıl değişeceğini analiz etmek amacıyla ARIMAX ve GARCH modelleri birlikte kullanılmıştır. ARIMAX modeli, bağımlı değişken olan PTF'yi açıklamak için hem geçmiş fiyat verilerini hem de dışsal faktörleri kullanarak genel seviyeyi modellemiştir. Ancak, sadece fiyatların seviyesini tahmin etmek yeterli olmadığından, GARCH modeliyle oynaklığın zamana bağlı değişkenliğini yakalamak amaçlanmıştır. Bu sayede, ithalat ve ihracat miktarlarının değiştiği dört farklı senaryo altında oynaklığın nasıl değiştiği analiz edilmiştir.

##### 4.1 Kullanılan Veriler

Bu çalışmada elektrik fiyatının elektrik arz ve talebinin fonksiyonu olduğu yaklaşımıyla, PTF'yi açıklamak amacıyla öncelikle Türkiye geneli elektrik enerjisi talebi, arz tarafında ise en değişken ve elektrik fiyatını etkileme kabiliyetine sahip üretim kaynakları dikkate alınmıştır. Fiyattan bağımsız teklif vererek üretim yapan rüzgar, güneş, nehir tipi santraller, jeotermal kaynaklardan sağlanan üretim ve

biyokütle üretiminin tamamı yenilenebilir kaynaklardan sağlanan üretim olarak bir araya getirilmiştir. Ayrıca barajlı santrallerden sağlanan üretim, kömür santrallerinin elektrik üretimi ve doğal gazdan yapılan üretim de ayrı ayrı değişken olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte etkilerini inceleyeceğimiz ithalat ve ihracat miktarları da birer değişken olmuştur. Bağımlı değişken olarak dikkate alınacak olan PTF verisi de euro bazında saatlik olarak temin edilmiştir. Son olarak modelin anlamlılık sonuçlarına pozitif katkı sağladığı için elektrik üretimi amaçlı kullanılan doğal gaz tarifesi euro cinsinden hazırlanarak çalışmaya dahil edilmiştir. İlgili veriler 2016 yılının başından 2023 yılının sonuna kadar sekiz yıllık aralık için saatlik kırımda EPIAŞ'ın Şeffaflık Platformu'ndan temin edilerek excelde bir veri tabanı haline getirilmiştir. Doğal gaz tarifesi ise Boru Hatları İle Petrol Taşıma Anonim Şirketi (BOTAŞ)'nin internet sitesinden temin edilen TL/Sm<sup>3</sup> değerlerinin, Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası'dan alınan aylık ortalama euro kuru verilerine bölünmesi suretiyle oluşturulmuştur.

Kullanılan veri setlerinden ithalat ve ihracatın hangi ülkelerle yapıldığına ilişkin detaylar EPIAŞ Şeffaflık Platformu'nda yer almamaktadır. EPDK'nın yayınlamış olduğu yıllık raporlarda bu verilere yıllık bazda ve toplu halde ulaşmak mümkündür, Fakat bu çalışma özelinde saatlik frekansta veriler kullanıldığından bu raporlardaki veriler ihtiyacımıza tam olarak yanıt verememiştir. Bu ayrımı tespit edebilmek adına ENTSO-E Transparency Platform'da yer alan verilere başvurulmuştur. İlgili platformdan Türkiye ile Yunanistan ve Türkiye ile Bulgaristan arasındaki enerji akışı verileri temin edilerek Türkiye tarafındaki kümülatif verilerle karşılaştırma yapılmıştır. Buna göre toplam ithalat ve ihracatın içerisinde ihale modeliyle ticareti gerçekleştirilen, yani Bulgaristan ve Yunanistan ile yapılan ticaretin payının yüksek olduğu görülmüştür.

Veri seti hazırlık aşamasında iki saate ilişkin verilerin var olmadığı farkedilmiştir. 27.03.2016 tarihinde yer alan 03.00 ve 04.00 saatleri için eksik olan veriler bir önceki ve bir sonraki saatlerin verilerinin aritmetik ortalaması alınarak tamamlanmıştır. Bu veri temizleme işleminin ardından veri bütünlüğü sağlanarak ilgili veriler kullanıma hazır hale getirilmiştir. Çizelge 4.1'de kullanılan bu veri setlerinin istatistiksel bir özeti verilmektedir.

**Çizelge 4.1 : Değişkenlerin istatistiksel özeti.**

Değişken	PTF (€/MWh)	Yenilenebilir (MWh)	Barajlı (MWh)	Kömür (MWh)	Doğal Gaz (MWh)	Talep (MWh)	İthalat (MWh)	İhracat (MWh)	BOTAS (€/Sm <sup>3</sup> )
Gözlem sayısı	70.128	70.128	70.128	70.128	70.128	70.128	70.128	70.128	70.128
Ortalama	60	7.388	5.465	10.342	8.496	32.794	433	300	309
Standart sapma	45	3.159	2.727	2.106	3.816	5.527	311	160	225
En düşük	0	1.361	196	2.955	126	14.579	0	0	147
%25	35	4.995	3.339	8.777	5.775	28.614	177	181	173
%50	46	6.852	5.247	10.581	8.634	32.666	383	298	235
%75	63	9.325	7.332	12.047	11.190	36.743	654	421	332
En yüksek	519	21.548	15.841	14.874	18.288	52.957	1.590	962	1.135

## 4.2 ARIMAX Modeli

Bu tez çalışmasının analiz kısmında kullanılan veriler ile işletilmek istenen senaryo analizlerini üretebilmek adına ilk olarak regresyon modeli denenmiştir. Fakat regresyon analizinde daha çok, bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki doğrusal ilişkiler dikkate alındığından istenilen anlamlılık düzeyinde sonuçlara ulaşılamamıştır. PTF gibi zaman serisi verilerinde, genellikle bir önceki zaman dilimindeki değerlerin mevcut değerleri etkilediği seri bağımlılığı söz konusudur. Regresyon modelleri, bu yapıyı modelleyemezken, ARIMA (Otomatik Regresif Entegre Hareketli Ortalama) modeli, geçmiş değerleri (autoregressive), farkları (integrated) ve hata terimlerinin hareketli ortalamasını (moving average) dikkate alarak zaman serilerindeki bu tür bağımlılıkları daha iyi yakalamaktadır [55]. Bu durum, modelleme sürecinde değişen trend ve mevsimsellik gibi etkileri dikkate alarak, daha iyi bir tahmin performansının yakalanmasını sağlamaktadır.

ARIMA modeli, zaman serisi verilerinde kullanılan ve verinin kendi geçmişi üzerinden tahmin yapılmasını sağlayan bir istatistiksel modeldir. Model, geçmiş verilerin lineer kombinasyonları ve hata terimleri ile tahmin yapmaktadır [56]. Diğer yandan ARIMA modeli verinin kendisini kullanarak modelleme yapmaktadır. Bizim bu çalışma özelindeki ihtiyacımız ise değişkenler yardımıyla bir model oluşturmak ve değişkenlerde yapacağımız değişiklikler ile farklı sonuçları karşılaştırmaktır. Bu nedenle ARIMA değil, değişkenlerle birlikte kullanılan ARIMAX modeli ihtiyacımıza cevap verecek seçenek olarak belirlenmiştir.

ARIMAX (Oto Regresif Bütünleşik Hareketli Ortalama Dışsal Değişkenli) modeli, ARIMA modelinin bir genişletmesi olup, eksojen (dışsal) değişkenleri de dikkate alarak zaman serisi analizine eklemeler yapmaktadır. Bu sayede model, sadece geçmiş verilere değil, aynı zamanda dışsal faktörlerin etkilerine de odaklanır. Bu model, bağımlı değişkenin zaman serisindeki otokorelasyon yapısını hesaba katarken aynı zamanda dışsal faktörlerin (ekonomik, çevresel ya da piyasa şartlarına bağlı değişkenler gibi) etkilerini de modelleyerek daha güçlü tahminler sağlamaktadır. Örneğin, elektrik fiyat tahminlemede hava durumu, doğal gaz fiyatları veya enerji talebi gibi dışsal değişkenler ARIMAX modeli ile analiz edilebilmektedir. Bu, özellikle enerji piyasaları gibi karmaşık ve çok değişkenli sistemlerde daha iyi performans sağlamak ve doğru sonuçlar elde etmeye yardımcı olmaktadır [57, 58].

$$y_t = c + \sum_{i=1}^p \phi_i y_{t-i} + \sum_{i=1}^q \theta_i \epsilon_{t-i} + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{j,t} + \epsilon_t \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de görüldüğü üzere ARIMAX modeli aşağıdaki değişkenlerden oluşmaktadır.

$y_t$  : Zaman  $t$ ’deki bağımlı değişken (tahmin edilmek istenen zaman serisi).

$c$  : Sabit terim.

$\phi_i$  : Oto-regresif (AR) katsayıları. Bağımlı değişkenin geçmiş  $p$  dönemlerine dayanan etkilerini temsil eder.

$\theta_i$  : Hareketli ortalama (MA) katsayıları. Geçmiş  $q$  dönemlere ait hata terimlerinin etkilerini içerir.

$x_{j,t}$  : Zaman  $t$ ’deki dışsal (exogenous) değişkenler. Modeldeki dışsal değişkenlere  $j$  sayısı kadar eklenir ve bu değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini gösterir.

$\beta_j$  : Dışsal değişkenlerin katsayılarıdır, her bir dışsal değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisini ölçer.

$\epsilon_t$  : Hata terimi, modelde açıklanamayan kısım.

Aşağıdaki Çizelge 4.2’de modelde kullanılan değişkenler açıklanmaktadır.

**Çizelge 4.2 : Değişkenlerin özeti.**

Değişkenler	Tanım	Matematiksel Gösterim	Birim	Modeldeki Rolü
PTF	Gün Öncesi Piyasası Fiyatı	$y_t$	€/MWh	Bağımlı değişken
Yenilenebilir	Yenilenebilir Enerji Üretimi	$\mathcal{X}_{1,t}$	MWh	Bağımsız değişken
Barajlı	Barajlı Hidroelektrik Santralleri Üretimi	$\mathcal{X}_{2,t}$	MWh	Bağımsız değişken
Kömür	Kömür Santralleri Üretimi	$\mathcal{X}_{3,t}$	MWh	Bağımsız değişken
Doğal Gaz	Doğal Gaz Santralleri Üretimi	$\mathcal{X}_{4,t}$	MWh	Bağımsız değişken
Talep	Elektrik Talebi	$\mathcal{X}_{5,t}$	MWh	Bağımsız değişken
İthalat	Elektrik İthalatı	$\mathcal{X}_{6,t}$	MWh	Bağımsız değişken
İhracat	Elektrik İhracatı	$\mathcal{X}_{7,t}$	MWh	Bağımsız değişken
BOTAŞ	Elektrik Üretimi Amaçlı Kullanılan Doğal Gaz Fiyatı	$\mathcal{X}_{8,t}$	€/Sm <sup>3</sup>	Bağımsız değişken

Bu çalışmada kullanılan ARIMAX modelinde bağımlı değişken ( $y_t$ ) yani PTF zaman serisi, dışsal değişkenlerin ( $\mathcal{X}_{i,t}$ ) etkisiyle modellenmiştir. Matematiksel olarak model aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir.

$$y_t = c + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \beta_1 \mathcal{X}_{1,t} + \beta_2 \mathcal{X}_{2,t} + \dots + \epsilon_t \quad (4.2)$$

Her bir senaryo için ilgili analizler python yardımıyla hazır kütüphaneler kullanılarak yapılmıştır.

### 4.3 GARCH Modeli

Uygulanacak senaryolar için PTF'nin nasıl oluşturulacağına karar verdikten sonra oynaklığın tespit edilmesi aşamasına geçilmiştir. Yapılan literatür taraması sonucu bu aşamada GARCH modeli kullanılmasına karar verilmiştir. GARCH modeli zaman serisi analizinde varyansın zamanla değişken olduğu durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Bu model, özellikle finansal piyasalar gibi oynaklığın yüksek olduğu alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. GARCH modeli, geçmişteki hata terimleri ve varyansın kendisini hesaba katarak, gelecekteki varyansın tahmin edilmesini sağlar. Bu durum, özellikle elektrik fiyatlarının tahmin edilmesinde kullanılabilir; çünkü enerji piyasaları da finansal piyasalar gibi oynaklığın yüksek olduğu piyasalardır. GARCH modeli, hem elektrik fiyatlarının hem de bu fiyatlardaki oynaklıkların doğru bir şekilde tahmin edilmesine olanak tanır [59].

$$\sigma_t^2 = \omega + \alpha \epsilon_{t-1}^2 + \beta \sigma_{t-1}^2 \quad (4.3)$$

Denklem 4.2'de görüldüğü üzere GARCH modeli aşağıdaki değişkenlerden oluşmaktadır.

$\sigma_t^2$  : Zaman  $t$  'deki koşullu varyans (oynaklık).

$\omega$  : Sabit terim. Temel oynaklık düzeyini gösterir, yani şoklar ve uzun vadeli etkilerden bağımsız olarak modelin varsaydığı minimum oynaklık düzeyidir.

$\alpha$  : Bir önceki dönemin hata teriminin karesi ( $\epsilon_{t-1}^2$ ) üzerinden hesaplanan kısa vadeli şokların (haber etkisi) oynaklığa olan etkisidir.

$\epsilon_{t-1}^2$  : Geçmişteki ( $t - 1$ ) hata teriminin karesi, önceki dönemdeki şokları temsil eder.

$\beta$  : Bir önceki dönemdeki koşullu varyansın ( $\sigma_{t-1}^2$ ) bugünkü oynaklığa olan etkisi, yani oynaklığın süregiden etkisi (uzun vadeli oynaklık).

$\sigma_{t-1}^2$  : Önceki dönemin koşullu varyansı (geçmiş oynaklık).

Omega, alpha ve beta parametrelerinin birbirine göre büyüklükleri ve ilişkileri, GARCH modelinin sağlıklı olup olmadığı hakkında önemli ipuçları verebilir. Genel olarak, sağlıklı bir GARCH modelinde bu parametrelerin büyüklükleri belirli bir dengede olmalıdır. Ancak modelin yapısına, verinin niteliğine ve oynaklık dinamiklerine bağlı olarak bazı sapmalar gözlenebilir. Enerji ve finans piyasaları gibi farklı alanlarda parametrelerin sonuçları değişiklik gösterebilir [60, 61].

Kısa vadeli şokların etkisini tespit etmeye yarayan alpha parametresi, piyasaya gelen ani haberler veya şoklar üzerinden oynaklığı açıklamaktadır. Tipik bir GARCH modelinde alpha'nın değeri genellikle 0,05 ile 0,2 arasında olabilir. Eğer alpha çok düşükse, kısa vadeli şokların piyasaya etkisi azdır. Beta parametresi ise uzun vadeli oynaklığın etkisini ölçer ve genellikle alpha'dan daha büyük olur. Beta, oynaklığın sürekliliğiyle ilgilidir. Yüksek beta değeri, piyasada uzun vadeli dalgalanmaların daha kalıcı olduğunu gösterir. Beta'nın tipik olarak 0,8 ila 0,99 arasında olması beklenir. Yani, oynaklık çoğunlukla önceki dönem oynaklık değerlerine bağlı olarak devam eder. Omega ise temel oynaklığı, yani uzun vadeli şoklar veya önceki oynaklığın etkisi olmadan piyasada var olan temel oynaklık seviyesini ifade eder. Omega'nın büyüklüğü genellikle alpha ve beta'ya göre çok daha küçük olur. Tipik olarak omega değeri 0,001 ile 0,1 arasında olabilir, ancak piyasanın temel oynaklığına göre değişebilir [62].

Bu çalışmada ilk etapta ARIMAX ve ardından GARCH modelinin ayrı ayrı uygulanması yoluyla bir oynaklık seviyesi elde edilmeye çalışılmıştır. Fakat bu şekilde bir yaklaşım sergilendiğinde oynaklığın tespiti konusunda istenilen hassasiyet ve doğruluk elde edilememiştir. Bunun üzerine iki modelin birleştirilmesi ve güçlü yanlarının biraraya getirilmesi yolu denenmiştir.

ARIMAX ve GARCH modelleri birlikte kullanılarak hem elektrik fiyatlarının genel seviyesi hem de bu seviyedeki oynaklık modellenmiştir. ARIMAX modeli, zaman serisinin genel seviyesini tahmin etmek için kullanılmıştır. Burada geçmiş veriler ve dışsal değişkenler (örneğin, yenilenebilir enerji üretimi, ithalat, ihracat gibi) dikkate alınarak PTF'nin gelecekteki değerleri öngörülmüştür. ARIMAX'in temel amacı, elektrik fiyatlarının ortalama seviyesinin nasıl hareket ettiğini anlamak ve dışsal faktörlerin bu seviyeyi nasıl etkilediğini ortaya koymak olmuştur. Ancak fiyatların seviyesini tahmin etmek tek başına yeterli değildir. Fiyatların seviye tahminlerinin yanında, bu seviyeden sapmaların yani oynaklığın zaman içinde nasıl değiştiği bizim asıl ulaşmak istediğimiz sonuçtur. İşte bu noktada GARCH modeli devreye girmiştir. GARCH, ARIMAX modelinden çıkan tahminlerin artıklarını kullanarak, bu artıklardaki oynaklığın modellenmesinde kullanılmıştır. Bu sayede geçmiş oynaklığın gelecekteki oynaklığı etkileme kabiliyeti dikkate alınırken, fiyatların koşullu oynaklığı da sonuçlara etki edebilmiştir. Bu iki modeli birlikte kullanmanın en büyük faydası, elektrik fiyatlarının genel seviyesini tahmin etmenin yanısıra bu seviyedeki belirsizliği de hesaba katabilmek olmuştur.

Bu çalışmada dört farklı senaryo geliştirilerek, sınır ötesi elektrik ticaretinin Türkiye elektrik piyasasındaki fiyat oynaklığı üzerindeki etkileri analiz edilmeye çalışılmıştır. Senaryoların her biri, ithalat ve ihracatın hacmindeki farklı değişiklikleri içermekte olup, bu değişikliklerin piyasa fiyatlarına olan etkileri karşılaştırılmıştır. İlk senaryoda mevcut ithalat ve ihracat değerleri korunarak piyasa oynaklığı analiz edilmiştir. İkinci senaryoda, ithalatın tamamının doğal gaz üretimine eklendiği ve ihracatın sıfıra indirilerek talebin azaltıldığı bir yapı değerlendirilmiştir. Üçüncü ve dördüncü senaryolar ise ithalat ve ihracat miktarlarının sırasıyla iki ve üç kat artırıldığı durumları ele almıştır.

Bu senaryoların amacı, sınır ötesi elektrik ticaretinin piyasa oynaklığını nasıl etkilediğini daha derinlemesine anlamaktır. İthalat ve ihracatın artmasının, piyasa

oynaklığını dűşürücü bir etkiye sahip olduğu varsayımından hareketle, farklı ticaret hacimlerinin fiyat oynaklığı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.



## 5. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada ithalat ve ihracatın etkilerini gözlemlemek amacıyla ARIMAX ve GARCH modelleri birlikte kullanılarak oynaklığın tespiti yapılmaya çalışılmıştır. İlk etapta değişken olarak belirlenen veri setleri kullanılarak bir ARIMAX modeli kurulmuştur. PTF bağımlı değişkeni dikkate alınarak ARIMAX modeliyle yapılan analizin temel bulguları ve her bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkileri Çizelge 5.1’de gösterilmektedir.

**Çizelge 5.1 : ARIMAX modeli sonuçları.**

Değişken	katsayı	standard hata	z-istatistiği	P değeri	[0,025	0,975]
sabit terim	$7,885e^{-11}$	$2,180e^{-11}$	-3,612	0,00000	$-1,220e^{-10}$	$-3,610e^{-11}$
$X_{1,t}$	-0,00170	0,00000	-11,88400	0,00000	-0,00200	-0,00100
$X_{2,t}$	-0,00030	0,00000	-2,18300	0,02900	-0,00100	-0,00003
$X_{3,t}$	0,00940	0,00000	54,41200	0,00000	0,00900	0,01000
$X_{4,t}$	0,00480	0,00000	34,00700	0,00000	0,00500	0,00500
$X_{5,t}$	0,00070	0,00000	4,70200	0,00000	0,00000	0,00100
$X_{6,t}$	0,01540	0,00000	33,51700	0,00000	0,01500	0,01600
$X_{7,t}$	-0,01580	0,00100	-20,55600	0,00000	-0,01700	-0,01400
$X_{8,t}$	-0,01090	0,00800	-1,39000	0,16500	-0,02600	0,00400
ar.L1 (AR katsayısı)	0,45470	0,00200	182,20800	0,00000	0,45000	0,46000
ma.L1 (MA katsayısı)	-0,76520	0,00200	-404,05800	0,00000	-0,76900	-0,76100
sigma2	123,34530	0,20700	597,23300	0,00000	122,94000	123,75000

ARIMAX modelinin sonuçları, PTF üzerinde farklı enerji kaynaklarının ve talebin anlamlı etkilerini ortaya koymaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanan elektrik üretimi, PTF üzerinde negatif bir etkiye sahiptir. Modelde, yenilenebilir enerji üretimindeki bir birimlik artışın elektrik fiyatlarını 0,0017 birim azalttığı görülmektedir. Benzer şekilde, barajlı üretim de fiyatları düşürücü bir etkiye sahiptir ancak bu etki -0,00003 değeriyle sınırlı kalmıştır. Her iki enerji kaynağı için de p değerleri anlamlı çıkmıştır, bu durum sonuçların istatistiksel olarak geçerli olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, fosil yakıt kaynaklarından kömür ve doğal gazın fiyatlar

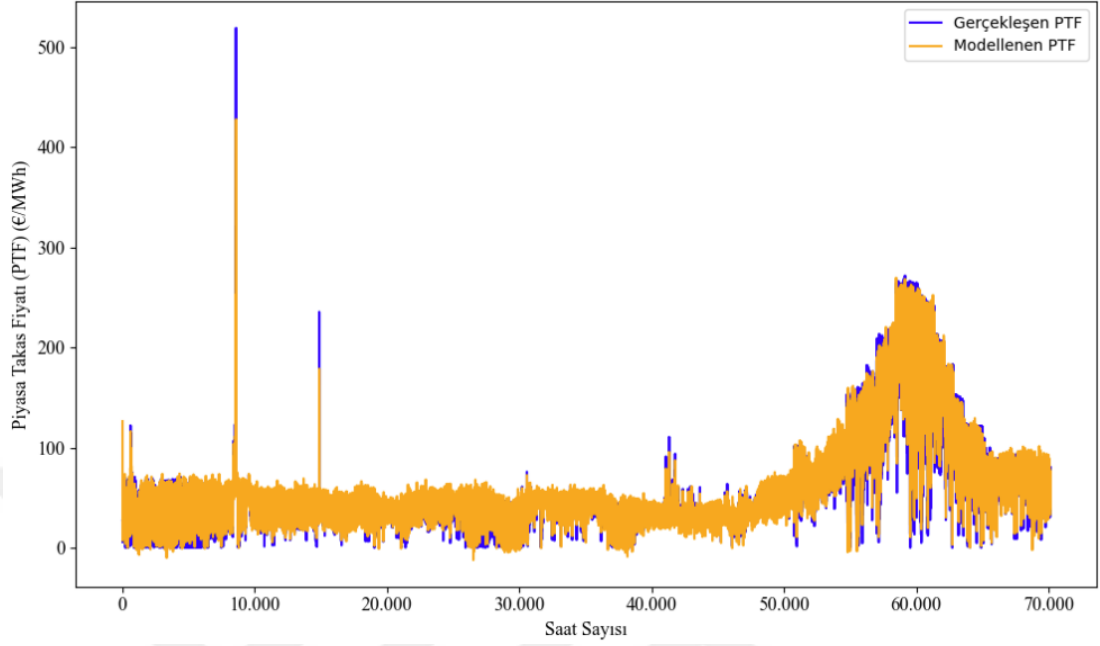
üzerinde önemli bir baskı oluşturduğu görülmektedir. Kömür üretiminde bir birim artış, elektrik fiyatlarını 0,0094 birim artırırken, doğal gazdan elektrik üretimindeki bir birim artış PTF'yi 0,0048 birim yükseltmektedir. Her iki fosil yakıtın etkisi de oldukça anlamlıdır ve bu sonuçlar, Türkiye'de fosil yakıtların elektrik fiyatlarındaki rolünün büyüklüğünü göstermektedir.

Talep ile ithalat ve ihracat değişkenlerinin de elektrik fiyatları üzerinde önemli etkileri gözlemlenmiştir. Elektrik talebi, klasik arz-talep ilişkisine uygun olarak fiyatları artırıcı bir etkiye sahiptir; modelde talepteki bir birimlik artış, PTF'yi 0,0007 birim artırmaktadır. İthalat ve ihracatın etkileri ise beklendiği gibi karşıt yönlü olarak saptanmıştır. Bu durum da modelin doğru çalıştığının bir diğer göstergesidir. İthalatın elektrik fiyatlarını 0,0154 birim artırdığı, ihracatın ise fiyatları 0,0158 birim azalttığı görülmüştür. Her iki değişkenin de istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir.

BOTAŞ gaz fiyatlarının ise p değeri 0,165 olduğu için modelde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Fakat senaryo analizleri kurgulanırken ARIMAX modeli tek başına dikkate alınmadığı ve oynaklığın tespiti için modelin artıklarının da modellenerek bunların GARCH modeline uygulandığı bir yöntem izlenmiştir. Bu yolla oynaklığın tespiti yapıldığında BOTAŞ değişkeninin modelde var olması olumlu katkı sağlamıştır. Diğer taraftan, modelin otoregresif (AR) ve hareketli ortalama (MA) bileşenlerinin de anlamlı olduğu görülmektedir. AR katsayısı 0,4547 ile pozitif ve anlamlı bir etki gösterirken, MA katsayısı -0.7652 ile negatif ve anlamlıdır. Bu, fiyatların önceki dönem fiyatlarıyla pozitif bir ilişkiye sahip olduğunu, ancak kısa vadeli şokların hareketli ortalama bileşeniyle dengelendiğini göstermektedir.

Senaryo çalışmalarında kullanılacak olan bu ARIMAX modeli ile ilk etapta geçmiş gözlemlere dayanılarak bir modelleme gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1'de ARIMAX sonucu modellenen PTF ile gerçekleşen PTF'nin bir grafiği gösterilmektedir. Grafikteki mavi ve turuncu çizgilerin ne kadar örtüştüğüne bakarak, modelin ne kadar başarılı olduğu ile ilgili fikir yürütülebilmektedir. ARIMAX modeli, verilerin çoğu yerinde başarılı bir şekilde fiyatları tahmin etmiştir. Fakat oynaklığın yüksek olduğu dönemlerde (örneğin grafik üzerinde 10.000 ve 60.000 saat civarı), modellenen PTF değerlerinin gerçek değerlerle birebir örtüşmediği de görülmektedir. Ancak bu çalışmanın asıl amacı saatlik fiyat tahmini gerçekleştirmek değildir. ARIMAX vasıtasıyla fiyatların genel seviyesinin anlamlı bir model vasıtasıyla büyük oranda

tahmini ve bu tahmin vasıtasıyla elde edilecek asıl çıktı olan oynaklığın tespiti ulaşılmak istenen hedef olduğu için ilgili model kullanıma uygundur.



**Şekil 5.1 :** Gerçekleşen PTF ve modellenen PTF'nin saatlik karşılaştırması.

ARIMAX modelinin kullanılabilirliği ve ulaşılmak istenen sonuca katkı sağladığı saptandıktan sonra farklı senaryolar için karşılaştırma çalışmalarına geçilmiştir. Birinci senaryo normal durumu baz alarak ithalat ve ihracat miktarlarının gerçekleştiği şekilde dikkate alınması ile oluşturulmuştur. Bu senaryoda tüm değişkenler ve gerçekleşen PTF olduğu gibi dikkate alınmış ve ARIMAX modeli ardından GARCH modeli uygulanmıştır. İkinci senaryoda ise, ithalat ve ihracatın olmadığı bir piyasa simüle edilmiştir. Bu senaryoda, ithalatın olmadığı durumda marjinal santral olarak doğal gazdan elektrik üretiminin arttığı ve ihracat yapılmadığı için enerji talebinde bir azalma olduğu varsayılmıştır. Yeni değişken kabulleri ile ARIMAX modeli çalıştırılmış ve sonuçlar GARCH ile modellenmiştir. Bulgular, sınır ötesi ticaretin olmadığı bu durumda piyasa fiyat oynaklığının arttığını göstermektedir. Sınır ötesi elektrik ticaretinin devre dışı bırakılmasıyla, elektrik fiyatlarının daha dalgalı hale geldiği ve piyasanın daha kırılğan bir yapıya büründüğü gözlemlenmiştir.

Üçüncü bir senaryoda ise sınır ötesi elektrik ticaret hacminin iki katına çıktığı varsayımı yapılmıştır. Bu durumda  $X_{6,t}$   $X_{7,t}$  değişkenleri 2 ile çarpılarak ARIMAX modeline girdi oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar, ticaret hacminin artmasıyla birlikte fiyat oynaklığının azaldığını göstermektedir. Ticaret hacminin artması, piyasa

fiyatlarının daha stabil hale gelmesine katkıda bulunmuş ve arz-talep dengesinin daha kolay sağlanmasını mümkün kılmıştır.

Dördüncü bir senaryoda ise bu değerlerin üç katına çıkartılmasıyla oluşacak sonuçlar incelenmiştir. Burada ise, sınır ötesi ticaretin hacmi arttıkça piyasa istikrarına olan katkısının daha güçlü hale geldiği tespit edilmiştir.

Bu sonuçlar, sınır ötesi elektrik ticaretinin piyasa fiyatları üzerindeki stabilizasyon etkisini net olarak ortaya koymaktadır. Ticaretin olmadığı durumlarda piyasa dengesizliklerinin daha belirgin olduğu ve piyasa katılımcılarının fiyat dalgalanmalarına karşı daha savunmasız hale geldiği görülmektedir. Ticaret hacmi artışıyla birlikte ise piyasa esnekliğinin artması ve fiyatların daha stabil hale gelmesi, sınır ötesi elektrik ticaretinin piyasa istikrarına sağladığı katkıyı net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Senaryolara göre çıkan sonuçlar Çizelge 5.2’de gösterilmektedir.

**Çizelge 5.2 : Senaryolar arası oynaklık parametreleri.**

Senaryolar	Tanım	omega ( $\omega$ )	alpha ( $\alpha$ )	beta ( $\beta$ )
1. Senaryo	İthalat ve İhracat Dahil	0,2259	0,0552	0,9437
2. Senaryo	İthalat ve İhracat Sıfır	0,3119	0,0661	0,9324
3. Senaryo	İthalat ve İhracat 2x	0,2234	0,0525	0,9462
4. Senaryo	İthalat ve İhracat 3x	0,2142	0,0518	0,9469

Bu parametrelerden alpha, kısa vadeli şokların piyasa üzerindeki etkisini ölçmekte ve genellikle 0,05 ile 0,2 arasında değerler almaktadır. Alpha'nın düşük olması, piyasanın ani değişikliklere karşı daha dayanıklı olduğunu ve şokların piyasa üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu gösterir. Beta, oynaklığın uzun vadede ne kadar kalıcı olduğunu belirler ve genellikle 0,8 ile 0,99 aralığında bulunur, bu da oynaklığın büyük ölçüde önceki dönemlerin etkisiyle sürdüğünü ifade etmektedir. Omega ise, piyasanın temel oynaklık seviyesini gösteren diğer bir parametredir. Alpha ve beta'dan genellikle daha küçük olup, 0,001 ile 0,1 arasında bir değer almaktadır.

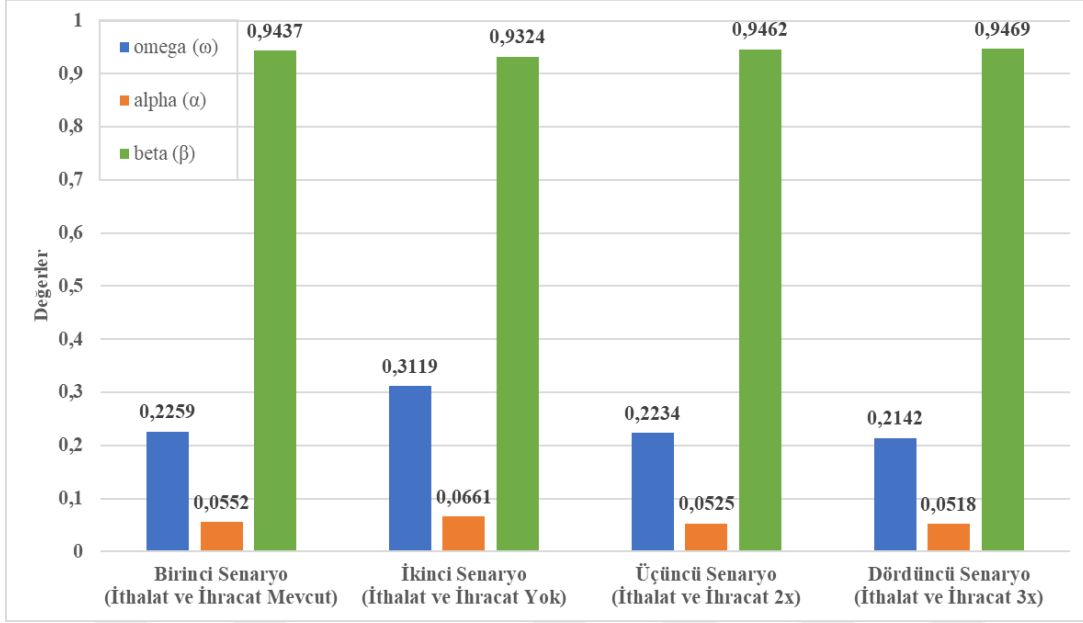
Bu çalışma kapsamında işletilen senaryoların sonuçları da bu genel beklentilerle uyumludur. Çizelge 5.2’de görüldüğü üzere tüm senaryolarda beta değeri 0,93 ile 0,95 arasında değişmektedir. Bu piyasanın uzun vadeli oynaklığının oldukça güçlü

olduğunu ifade etmektedir. Alpha parametresi ise genellikle 0,05 ile 0,06 arasında seyretmiştir. Bu da kısa vadeli şokların oynaklık üzerinde nispeten düşük bir etkisi olduğunu göstermektedir. Omega ise alphanın büyük ve 0,2 ile 0,3 arasında değişmektedir. Bu durum bize temel oynaklığın piyasada etkin rol oynadığını ifade eder.

Alpha ve omega'nın beta'ya göre daha düşük olması beklenen bir durumdur. Sağlıklı bir GARCH modelinde beta genellikle daha baskın bir parametredir, çünkü beta'nın büyük olması, oynaklığın uzun süre devam etmesi anlamını taşır. Ancak omeganın alphanın büyük olması, piyasadaki temel oynaklığın kısa vadeli şoklara kıyasla daha baskın olduğunu gösteriyor olabilir. Bu durum her zaman yaygın olmasa da, enerji piyasası gibi arz ve talep dinamiklerinin etkili olduğu dış şoklar ve haber akışlarının nispeten daha az etkili olduğu piyasalarda görülebilen bir durumdur [61].

Bu senaryo çalışması ithalat ve ihracatın, yani dolaylı olarak arz ve talepteki değişikliğin PTF'nin oynaklığı üzerindeki etkilerini saptamaya odaklanmıştır. 1. Senaryo her şeyin gerçekleşmeler şeklinde olduğu durumu modellemiş ve oynaklık parametrelerini tespit etmiştir. 2. Senaryo'da sınır ötesi elektrik ticaretinin olmadığı durum varsayılmış. Bu durumda oynaklığın 1. Senaryo'ya göre arttığı gözlemlenmiştir. Bu etkinin tersi durumda da yaşanıp yaşanmayacağını ölçmek adına 3. ve 4. Senaryo'lar işletilmiş ve "İthalat ve ihracatı yapılan enerji miktarı artarsa ne olurdu?" sorusunun yanıtı aranmıştır. Bu durumda da oynaklığın ithalat ve ihracatın olmadığı duruma göre giderek azaldığı gözlemlenmiştir.

Senaryolarımızdaki sonuçlar bu genel beklentilerle de uyumlu çıkmıştır. Şekil 5.2'de görüldüğü üzere, beta değeri 0,93 ile 0,95 arasında sabit kalmıştır. Bu, piyasanın uzun vadeli oynaklığının oldukça güçlü olduğunu ve geçmiş oynaklığın bugünkü oynaklık üzerinde büyük bir etkisi olduğunu göstermektedir. Alpha ise genellikle 0,05 ile 0,06 arasında seyretmiştir. Bu değer, kısa vadeli şokların oynaklık üzerinde nispeten düşük bir etkisi olduğunu göstermektedir. Omega ise 0,2 ile 0,3 arasında değişmiştir. Bu aralık, temel oynaklık seviyesinin piyasada kalıcı bir unsur olduğunu ve fiyat dalgalanmalarının yapısal faktörlerden kaynaklandığını göstermektedir. Omega, alpha'dan daha büyüktür ve bu da temel oynaklığın piyasada etkili olduğunu göstermektedir [60].



**Şekil 5.2 :** Senaryolara göre oynaklık parametreleri.

Bu çalışmanın bulguları, literatürdeki diğer çalışmalarla büyük ölçüde uyumludur. Papaioannou ve arkadaşlarının Yunanistan, İtalya ve Bulgaristan arasındaki sınır ötesi ticaret üzerine yaptıkları çalışmada, ticaretin piyasa fiyatlarını stabilize ettiği belirtilmiştir [36]. Aynı şekilde, Türkiye'nin sınır ötesi ticaretindeki artışın da fiyat istikrarı üzerinde benzer bir etkisi olduğu görülmektedir.

Ayrıca, Kristiansen'in Güneydoğu Avrupa'da sınır ötesi ticaretin fiyat oynaklığı üzerindeki etkilerini incelediği çalışması da, bu tezin sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. Kristiansen'in çalışması, iletim hatlarının kapasitesinin ticaret hacmini belirlemede ve fiyat dengesini sağlamada kritik bir faktör olduğunu ortaya koymuştur [37]. Türkiye'de de ithalat ve ihracatın hacminin artması, fiyat dengesini sağlayan önemli bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır.

Öte yandan, Makrygiorgou ve arkadaşlarının Güneydoğu Avrupa'da sınır ötesi ticaretin farklı iletim kapasiteleri altında nasıl işlediğini analiz eden çalışması, iletim hatlarının kapasite yetersizliğinin ticaret hacmini sınırladığını ve fiyat istikrarını olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır [38]. Türkiye'nin sınır ötesi ticaretinde de benzer bir durum söz konusudur. Kapasite yetersizliği ve sıkışıklık yönetimi gibi sorunlar, ticaret hacminin artmasına engel olurken, fiyatlardaki oynaklıkları da tetikleyebilmektedir. Ancak, iletim altyapısının güçlendirilmesi ve kapasite artırıcı yatırımların yapılması, sınır ötesi ticaretin hem hacmini artırabilir hem de fiyat dengesine katkı sağlayabilir. Bu artışın da özellikle ihale mekanizması yoluyla ticareti

gerçekleştirilen tarafta olması beklenen olumlu maliyet azaltıcı etkilerin ortaya çıkmasına katkı sağlayacaktır.

Bir diğerk önemli konu ise bu alanda yapılan düzenleme ve regülasyonlardır. İngiltere'nin sınır ötesi elektrik ticaretine uyguladığı ek karbon vergisinin etkilerini inceleyen Guo ve Newbery'nin çalışması, sınır ötesi ticaretin piyasalar arasındaki fiyat farklarını nasıl etkilediğini göstermektedir. Çalışmada, İngiltere'nin uyguladığı ek karbon vergisi sonucunda ülkeler arası ticarete ucuz elektrik ithalatının arttığı ve bu durumun İngiltere'deki spot piyasa fiyatlarını yukarı çektiği belirtilmektedir [48]. Benzer bir durum Türkiye için de geçerli olabilir; ithal edilen elektriğin maliyeti ve kaynakları, yerel piyasa fiyatlarına doğrudan etki edebilmektedir. Bu tür vergi düzenlemeleri veya ticaret politikalarının, elektrik enerjisi fiyatlarında dalgalanmalara neden olabileceği ve piyasa oynaklığını artırabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bunlar şu anda Türkiye'de sınır ötesi ticaretin hem fiziksel hem de finansal olarak büyümesinin önündeki zorluklar olarak karşımıza çıkmaktadır.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Türkiye'nin sınır ötesi elektrik ticaretinin gün öncesi piyasa fiyatı oynaklığı üzerindeki etkileri dört farklı senaryo üzerinden analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, ithalat ve ihracatın piyasa fiyatlarını dengeleyici bir etkisi olduğu ve fiyat oynaklığını azalttığı tespit edilmiştir. Senaryoların karşılaştırılması, sınır ötesi ticaret hacminin artmasıyla piyasa fiyat oynaklığının düştüğünü ortaya koymuştur. Bu bulgular, enerji ticaretinin piyasa stabilizasyonu için önemli bir araç olduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca, literatürdeki çalışmalara paralel olarak, sınır ötesi elektrik ticaretinin Türkiye için piyasa istikrarına olumlu katkı sunduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, Papaioannou ve arkadaşlarının Yunanistan, İtalya ve Bulgaristan arasındaki sınır ötesi ticareti inceledikleri çalışmada ticaretin piyasa fiyatlarını stabilize ettiği belirtilmiş, benzer şekilde Türkiye'nin ticaret hacmindeki artışın da fiyat istikrarına katkı sunduğu görülmüştür.

Kristiansen'in Güneydoğu Avrupa'da sınır ötesi ticaretin fiyat oynaklığı üzerindeki etkilerini incelediği çalışmada da iletim hatlarının kapasitesinin ticaret hacmini belirleyici bir unsur olduğu ve fiyat dengesine katkı sağladığı tespit edilmiştir. Bu tez çalışması da aynı paralelde bulgular sunarak, ithalat ve ihracat hacminin Türkiye'nin piyasa dengesine sağladığı katkıları vurgulamaktadır. Öte yandan, Makrygiorgou ve arkadaşlarının sınır ötesi ticaretin iletim kapasitesi altındaki sınırlarını inceleyen çalışmasında, kapasite yetersizliği ve sıkışıklık yönetimi gibi sorunların ticaret hacmini sınırladığı ve fiyat istikrarını olumsuz etkilediği vurgulanmıştır. Türkiye'de de benzer durumlar söz konusudur; kapasite yetersizliği gibi faktörler, ticaretin hacmini ve piyasa oynaklığını doğrudan etkileyebilmektedir. Ancak iletim altyapısının güçlendirilmesi ve kapasite artırıcı yatırımların yapılması bu etkinin olumlu yönde değişmesine katkı sağlayacaktır.

Ayrıca, sınır ötesi elektrik ticareti üzerindeki düzenlemeler ve regülasyonlar da önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, İngiltere'nin sınır ötesi ticaretine uyguladığı ek karbon vergisinin piyasa fiyatları üzerindeki etkilerini inceleyen Guo ve Newbery'nin çalışması, ticaretin piyasalar arasındaki fiyat farklarını nasıl etkilediğini

göstermektedir. Bu tür vergi düzenlemelerinin ve ticaret politikalarının Türkiye’de de benzer şekilde piyasa fiyatlarını etkileyebileceği, fiyat oynaklığını artırabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Türkiye’nin sınır ötesi ticaret hacmini artırma sürecinde karşılaşıcağı bu tür zorluklar, hem fiziksel hem de finansal açıdan ele alınması gereken önemli konulardır.

Senaryo analizleri yardımıyla yapılan bu çalışmanın temel bulguları ışığında, ithalat ve ihracat hacminin olmadığı durumlarda fiyat oynaklığının arttığı, ihale mekanizması işletilerek gerçekleştirilen ticaret hacminin arttırıldığı durumlarda ise oynaklığın azaldığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, çalışmanın hipotezini desteklemekte ve sınır ötesi elektrik enerjisi ticaretinin piyasa oynaklığını azalttığını göstermektedir. Özellikle üçüncü ve dördüncü senaryolar, ticaret hacminin iki ve üç katına çıkarılması durumunda oynaklığın belirgin şekilde düştüğünü ortaya koymaktadır. Bu, sınır ötesi elektrik ticaretinin piyasaya olan esneklik katkısının altını çizmektedir.

Bu çalışma, sınır ötesi elektrik enerjisi ticareti konusunda literatüre ve Türkiye enerji piyasası üzerine politika yapıcılara katkılar sunmaktadır. Özellikle, Türkiye gibi enerji arz güvenliği ve arz-talep dengesini sağlama konusunda zorluklarla karşılaşan ülkeler için, sınır ötesi ticaretin oynaklık azaltıcı etkisinin net olarak ortaya konması, bu ticaretin artırılması yönünde stratejik adımların önemini vurgulamaktadır.

Ayrıca, Avrupa Birliği’nin sınır ötesi ticaret mekanizmalarına benzer şekilde, Türkiye’nin de bu tür entegrasyon süreçlerine daha fazla dahil olmasının piyasa istikrarı ve maliyet avantajları sunabileceği gösterilmiştir. Bu sonuçlar, sadece Türkiye'nin değil, bölgedeki diğer ülkelerin de elektrik enerjisi ticareti hacmini artırmasının önemini ortaya koymakta ve bu doğrultuda regülasyonların geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır.

Çalışmanın bulguları önemli katkılar sağlamakla birlikte, bazı sınırlılıklar da göz önünde bulundurulmalıdır. Birincisi, çalışmada kullanılan veri setleri sadece Türkiye’nin sınır ötesi ticareti ve fiyatları üzerine odaklanmaktadır. Diğer bölgesel piyasalarda ve farklı enerji üretim kompozisyonlarına sahip ülkelerde sınır ötesi ticaretin farklı etkileri olabileceği dikkate alınmalıdır. Dolayısıyla, gelecekteki çalışmalar, sınır ötesi ticaretin daha geniş bir coğrafi bağlamda incelenmesi ve bu ticaretin farklı enerji kaynakları ile ilişkisi üzerine odaklanabilir.

İkincisi, çalışmada kullanılan modeller, mevcut piyasa yapısına dayanarak sınır ötesi ticaretin oynaklık üzerindeki etkilerini incelemiştir. Ancak piyasa yapılarında gelecekte yaşanacak regülasyon ve düzenlemeler, teknolojik değişiklikler ve özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının artan kullanımı gibi dinamikler, bu etkilerin yönünü değiştirebilir. Bu sebeple, gelecekteki çalışmalar, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha büyük bir pay aldığı veya enerji ticareti dinamiklerinin değiştiği farklı senaryolarda sınır ötesi ticaretin fiyat oynaklığı üzerindeki etkisini inceleyebilir.

Son olarak, bu çalışma, sınır ötesi elektrik ticaret hacminin sadece fiyat oynaklığı üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Gelecek araştırmalar, bu ticaretin diğer ekonomik ve sosyal etkilerini kapsayacak şekilde genişletilebilir. Örneğin arz güvenliğine katkı sağlaması adına yeni bir santral inşa etme kararı ile sınır ötesi iletim kapasitesinin artırılması seçeneklerinin ekonomik açıdan fizibilite karşılaştırması akla gelen ilk örneklerden biridir. Yine benzer şekilde fiyat oynaklığının azalması sonucu sağlanan sosyal faydanın ekonomik karşılığı tespit edilmeye çalışılabilir. Türkiye'nin enerji politikalarının geliştirilmesinde bu tür daha geniş ve kapsamlı analizler yapılması, hem literatürün zenginleşmesine hem de karar alıcılara çeşitli katkılar sunabilir.

Bu çalışmanın bulguları doğrultusunda, Türkiye'nin enerji politikalarına ve sınır ötesi ticaret stratejilerine yönelik bazı önerilerde bulunulabilir. İlk olarak, Türkiye'nin sınır ötesi elektrik ticaret hacmini artırmaya yönelik daha fazla girişimde bulunması gerektiği açıktır. Üçüncü ve dördüncü senaryoda görüldüğü üzere daha yüksek miktarda iletim kapasitesi ve dolayısıyla ticaret hacmi olması fiyatların oynaklığının düşmesini sağlayabilecektir.

İkinci olarak, sınır ötesi elektrik enerji ticaretinin artırılması, enerji arz güvenliğinin sağlanmasına katkıda bulunabilir. Elektrik enerjisi ihtiyacı olan saatlerde ithalat gerçekleştirmek o saatlerde marjinal santralleri devreye alarak üretim yapmak yerine daha ekonomik bir seçenek olabilir ve sistemin esnekliğini arttırabilir. Yine aynı bağlamda daha yüksek miktarda iletim kapasitesi sayesinde sistem işletimi esnasında yaşanan sıkışıklıkların azaltılması ve bu yolla yük alma ve yük atma talimatlarının düşürülmesi maliyetlerin azaltılmasına yardımcı olabilir. Bu nedenle, sınır ötesi ticaretin ekonomik faydaları üzerine daha fazla farkındalık yaratılması ve bu konuda özel sektör ile kamu sektörünün daha fazla iş birliği yapması teşvik edilmelidir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Url-1** <[https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm\\_istatistikler.jsf](https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf)>, erişim tarihi 25.04.2024.
- [2] **Url-2** <<https://www.iea.org/countries/turkiye/electricity>>, erişim tarihi 25.04.2024.
- [3] **Url-3** <<https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>>, erişim tarihi 25.04.2024.
- [4] **Url-4** <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/oecd-europe-electricity-imports-and-exports-1974-2020p>>, erişim tarihi 25.04.2024.
- [5] **ENTSO-E Gözlemci Üyelik Anlaşması İmzalandı.** (16.12.2022). Erişim: 25.04.2024, <https://www.teias.gov.tr/haberler/entso-e-gozlemci-uyelik-anlasmasi-imzalandi>
- [6] **Sür, B.** (2007). *Türkiye’de Elektrik Enerjisinin Geçmişi, Bugünü ve Gelecek Planlamaları.* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] **Türkmen, E.** (2014). *Elektrik Piyasası ve Tarifeler.* (Yüksek lisans tezi). Galatasaray Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- [8] **Örücü, E. O.** (2023). Enerji Tarihimiz. *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, (473), 38-42. [https://www.emo.org.tr/ekler/3f0f02d7ef8f2c9\\_ek.pdf?dergi=1325](https://www.emo.org.tr/ekler/3f0f02d7ef8f2c9_ek.pdf?dergi=1325)
- [9] **TEDAŞ,** (t.y.). *Hakkımızda.* TEDAŞ Resmi Web Sitesi. <https://www.tedas.gov.tr/tr/1/hakkimizda/Page/63c639b9846b47cf4ea2ff56>
- [10] **Devir, K.** (2017). *Türkiye Elektrik Enerjisi Piyasası ve Uygulamadaki Hukuki Esaslar.* (Yüksek Lisans Tezi). Özyeğin Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- [11] **EPDK,** (t.y.). *Tarihçe.* EPDK Resmi Web Sitesi. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/1-1051/kurumumuztarihce>
- [12] **Yiğit, H. V.** (2018). *Türkiye Elektrik Piyasasında Kapasite Mekanizması Uygulaması ve Santral Gelirlerine Katkısına İlişkin İnceleme.* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [13] **Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun.** (2005). *T.C. Resmi Gazete*, 25819, 18 Mayıs 2015.
- [14] **6446 Sayılı Elektrik Piyasası Kanunu.** (2013). *T.C. Resmi Gazete*, 28603, 30 Mart 2013.
- [15] **EPIAŞ,** (t.y.). *Biz Kimiz.* EPIAŞ Resmi Web Sitesi. <https://www.epias.com.tr/epias-kurumsal/biz-kimiz/>

- [16] **Appunn, K.** (2015). Setting the power price: the merit order effect. <<https://www.cleanenergywire.org/factsheets/setting-power-price-merit-order-effect>>. Erişim 25.04.2024.
- [17] **Bahar, H., & Sauvage, J.** (2013). Cross-Border Trade in Electricity and the Development of Renewables-Based Electric Power: Lessons from Europe. *OECD Trade and Environment Working Papers, 2013, 02*. OECD Publishing.
- [18] **Taşdemir, T.** (2019). *Türkiye Elektrik Piyasasında Tüketici ve Üretici İçin Fiyat Tahmin Model Önerisi*. (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [19] **İlter, B.** (2018). *Elektrik Türev Piyasaları: Dünya ve Türkiye Karşılaştırmalı Bir Analiz*. (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- [20] **İbiş, M.** (2019). *Türkiye Elektrik Piyasası ve İdari Yaptırımlar* [PowerPoint sunumu]. Erişim <https://www.dunyaenerji.org.tr/wp-content/uploads/2019/02/Mehmet%C4%B0bisDers4.pdf>
- [21] **Yitgin, B.** (2017). *Türkiye Organize Elektrik Piyasalarında Talep Tarafı Katılımı Regülasyonu*. (Yüksek lisans tezi). Özyeğin Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- [22] **Hunt, S.** (2002). Making Competition Work in Electricity. Erişim [https://regulationbodyofknowledge.org/wp-content/uploads/2013/03/Hunt\\_Making\\_Competition\\_Work.pdf](https://regulationbodyofknowledge.org/wp-content/uploads/2013/03/Hunt_Making_Competition_Work.pdf)
- [23] **Gün Öncesi Piyasasında ve Dengeleme Güç Piyasasında asgari ve azami fiyat limitlerinin belirlenmesine ilişkin usul ve esaslarda değişiklik yapılmasına dair usul ve esaslar.** (2014). *T.C. Resmi Gazete, 32587*, 29 Haziran 2024.
- [24] **EPIAŞ**, *Gün Öncesi Elektrik Piyasası Piyasa Takas Fiyatı Belirleme Yöntemi*, erişim tarihi 19.12.2021, Erişim [https://www.epias.com.tr/wp-content/uploads/2016/03/public\\_document\\_v4\\_released.pdf](https://www.epias.com.tr/wp-content/uploads/2016/03/public_document_v4_released.pdf)
- [25] **EPIAŞ**, <https://www.epias.com.tr/gun-oncesi-piyasasi/surecler/>, erişim tarihi 25.04.2024.
- [26] **EPIAŞ**, <https://www.epias.com.tr/gun-ici-piyasasi/surecler/>, erişim tarihi 25.08.2024.
- [27] **EPIAŞ**, <https://www.epias.com.tr/talimat-etiketlendirme-esaslari/>, erişim tarihi 25.04.2024.
- [28] **Elektrik Piyasası Yan Hizmetler Yönetmeliği.** (2017). *T.C. Resmi Gazete, 30252*, 26 Kasım 2017.
- [29] **BİST**, <https://borsaistanbul.com/tr/sayfa/324/enerji-vadeli-islem-sozlesmeleri>, erişim tarihi 25.04.2024.
- [30] **IEA.** (2020). *Electricity Market Report - December 2020*

- [31] **Url-5** <[https://www.energycharts.info/charts/import\\_export\\_map/chart.htm?l=en&c=DE&exp=tcs&interval=year&year=2023&color\\_scale=multiColorScaleRedYellowGreen&choose\\_color\\_scale=multiColorScaleRedYellowGreen&show\\_map\\_labels=1](https://www.energycharts.info/charts/import_export_map/chart.htm?l=en&c=DE&exp=tcs&interval=year&year=2023&color_scale=multiColorScaleRedYellowGreen&choose_color_scale=multiColorScaleRedYellowGreen&show_map_labels=1)>, erişim tarihi 25.04.2024.
- [32] **TEİAŞ**, <<https://tcat.teias.gov.tr/#/main/dashboard>>, erişim tarihi 25.04.2024.
- [33] **Elektrik Piyasası İthalat Ve İhracat Yönetmeliği**. (2014). *T.C. Resmi Gazete*, 29003, 17 Mayıs 2014.
- [34] **TEİAŞ**, <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/enterkonneksiyonlar>, erişim tarihi 25.04.2024.
- [35] **TEİAŞ**, <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>, erişim tarihi 25.04.2024.
- [36] **Papaioannou, G. P., Dikaiakos, C., Kaskouras, C., Evangelidis, G. & Georgakis, F.** (2020). Granger Causality Network Methods for Analyzing Cross-Border Electricity Trading between Greece, Italy, and Bulgaria. *Energies*, 13, 900.
- [37] **Kristiansen, T.** (2007). Cross-border transmission capacity allocation mechanisms in South East Europe, *Energy Policy*, 35, 4611–4622.
- [38] **Makrygiorgou, D. I., Andriopoulos, N., Georgantas, I., Dikaiakos, C. & Papaioannou, G. P.** (2020). Cross-Border Electricity Trading in Southeast Europe Towards an Internal European Market. *Energies*, 13, 6653.
- [39] **ACER/CEER**. (2018). Annual Report on the Results of Monitoring the Internal Electricity and Natural Gas Markets in 2017 - Electricity Wholesale Markets Volume.
- [40] **Poplavskaya, K., Totschnig, G., Leimgruber, F., Doorman, G., Etienne, G. & Vries, L.** (2020). Integration of day-ahead market and redispatch to increase cross-border exchanges in the European electricity market. *Applied Energy*, 278, 115669.
- [41] **Cross-Border Intraday: Questions & Answers**. <[https://www.amprion.net/Dokumente/Strommarkt/Engpassmanagement/XBID-Project/Sonstiges/questions\\_and\\_answers\\_v2.pdf](https://www.amprion.net/Dokumente/Strommarkt/Engpassmanagement/XBID-Project/Sonstiges/questions_and_answers_v2.pdf)>, erişim tarihi 26.04.2024.
- [42] **Kaht, C.** (2019). Modeling Intraday Markets under the New Advances of the Cross-Border Intraday Project (XBID): Evidence from the German Intraday Market, *Energies*, 12, 4339.
- [43] **Abrell, J. & Rausch, S.** (2016). Cross-Country Electricity Trade, Renewable Energy and European Transmission Infrastructure Policy (Working Paper 16/229). Center of Economic Research at ETH Zurich: Economics Working Paper Series.
- [44] **Antweiler, W.** (2016). Cross-border trade in electricity, *Journal of International Economics*, 101, 42-51.
- [45] **Yuan, M., Tapia-Ahumada, K. & Reilly, J.** (2021). The role of cross-border electricity trade in transition to a low-carbon economy in the Northeastern U.S. *Energy Policy*, 154, 112261.

- [46] **Chen, Y., Koduvere, H., Gunkel, P. A., Kirkerud, J. G., Skytte, K., Ravn, H. & Bolkesjø, T. F.** (2020). The role of cross-border electricity trade in transition to a low-carbon economy in the Northeastern U.S. *Journal of Environmental Management*, 261, 110194.
- [47] **Purvins, A., Gerbelova, H., Sereno, L. & Minnebo, P.** (2021). Social welfare impact from enhanced Trans-Asian electricity trade. *Energy*, 215, 119106.
- [48] **Guo, B. & Newbery, D.** (2020). The Cost of Trade Distortion: Britain's Carbon Price Support and Cross-border Electricity Trade (EPRG Working Paper 2005). Energy Policy Research Group, University of Cambridge.
- [49] **Swissgrid**, <<https://www.swissgrid.ch/content/dam/dataimport/energy-statistic/EnergieUebersichtCH-2024.xlsx>>, Erişim tarihi 02.05.2024.
- [50] **Keles, D., Dehler-Holland, J., Densing, M., Panos, E. & Hack, F.** (2020). Cross-border effects in interconnected electricity markets - an analysis of the Swiss electricity prices. *Energy Economics*, 104802.
- [51] **Dhakal, S., Karki, P. & Shrestha, S.** (2019). Cross-border electricity trade for Nepal: a SWOT-AHP analysis of barriers and opportunities based on stakeholders' perception. *International Journal of Water Resources Development*, 1–22.
- [52] **WAPP**. <<https://www.ecowapp.org/en/content/creation-wapp>>, Erişim tarihi 25.04.2024.
- [53] **Adeoye, O., & Spataru, C.** (2020). Quantifying the integration of renewable energy sources in West Africa's interconnected electricity network. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109647.
- [54] **Boz, D. E.** (2020). *Uluslararası Elektrik Ticaretinin Farklı Enerji Kaynaklarından Elektrik Üretimine Etkilerinin Analizi*. (Yüksek Lisans Tezi). İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi, Ekonomi ve Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- [55] **Tarı, R.** (2021). *Ekonometri*. Alfa Yayınları.
- [56] **Doğan, U. F.** (2023). *YEKDEM katılım kararı için ARIMA modeli kullanılarak uzun dönemli elektrik fiyat tahminlemesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [57] **Doğusoy, S.** (2018). *Türkiye elektrik piyasasını modellemede arz-talep bazında modeller ile zaman serileri modellerinin karşılaştırılması* (Doktora Tezi). Haliç Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- [58] **Yetginer, B.** (2017). *BIST-100 fiyat endeksi tahminlemesi* (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- [59] **Dalgın, A.** (2017). *Yapay sinir ağları kullanılarak Türkiye gün öncesi piyasası elektrik fiyat tahmini* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü.
- [60] **Bühlmann, P., & McNeil, A. J.** (2002). *An algorithm for nonparametric GARCH modelling*. *Computational Statistics & Data Analysis*, 40(4), 665-683.

- [61] **Kenton, W.** (2020). What is the GARCH process? How it's used in different forms. <<https://www.investopedia.com/terms/g/garch.asp>> Erişim tarihi 10.09.2024.
- [62] **Chung, S.** (2023). *Modelling and forecasting energy market volatility using GARCH and machine learning approach.* arXiv.





## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Mustafa Emin MALKOÇ

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
- **Lisans** : 2019, Anadolu Üniversitesi, İşletme Fakültesi, İşletme Bölümü

### MESLEKİ DENEYİM:

- **Entek Elektrik Üretim Anonim Şirketi** (Ara. 2021 – Devam ediyor)
  - Kıdemli Ticaret ve Portföy Yönetim Uzmanı
- **Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketi** (Mar. 2019 – Ara. 2021)
  - Risk Yönetimi Uzmanı