

**ZAMAN SERİLERİ YÖNTEMLERİ İLE HANE HALKI  
ENERJİ TÜKETİMİNİN MODELLENMESİ**

**MODELING HOUSEHOLD ENERGY CONSUMPTION  
WITH TIME SERIES METHODS**

**ELİF DUMAN**

**DOÇ. DR. HATİCE ÖNCEL ÇEKİM**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin

İstatistik Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2025

*Çınar'a*

## ÖZET

# ZAMAN SERİLERİ YÖNTEMLERİ İLE HANE HALKI ENERJİ TÜKETİMİNİN MODELLENMESİ

**Elif DUMAN**

**Yüksek Lisans, İstatistik Bölümü**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hatice ÖNCEL ÇEKİM**

**Haziran 2025, 89 sayfa**

Enerji talebindeki küresel artış, iklim değişikliği, tedarik problemleri, enerjiyi verimli kullanma ihtiyacı gibi nedenler enerji tüketiminin incelenmesi ihtiyacını meydana getirmiştir. Özellikle hane halkının enerji tüketimi, toplam enerji tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturması nedeniyle, enerji verimliliği stratejileri açısından kritik bir odak noktasıdır. Hane halkı enerji tüketiminin doğru bir şekilde tahmin edilmesi; enerji üretim planlarının optimize edilmesi, talep tarafı yönetimi programlarının etkinleştirilmesi ve tüketicilerin enerji tasarrufu yapmalarına olanak sağlanması açısından önem arz etmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, 2007-2023 yılları arasında hane halkı elektrik tüketim miktarı ve bu tüketimi açıklayacağı düşünülen makroekonomik değişkenler kullanılarak, Dışsal Değişkenli Mevsimsel Otoresif Bütünleşik Hareketli Ortalama Modeli (SARIMAX) ve Çok Değişkenli Tekil Spektrum Analiz (ÇTSA) zaman serisi analiz yöntemleri uygulamaktır. Hane halkı elektrik tüketimini; hane halkı sayıları, hane halkı kullanılabilir geliri ve soğutma gün dereceleri değişkenlerinin en iyi açıkladığı tespit edilmiş, ÇTSA

yöntemi daha düşük hata kriterine sahip sonuç vermiştir. Bu kapsamda gerçeğe yakın tahmin sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışma, hane halkı elektrik tüketiminin değişiminde belirleyici olan etkenlerin zaman serisi yöntemleri ile özellikle de bu alanda uygulaması bulunmayan ÇTSA yöntemi ile incelenmesi bakımından literatüre katkı sağlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Zaman Serisi, Enerji, İstatistik, SARIMAX, ÇTSA

## **ABSTRACT**

# **MODELING HOUSEHOLD ENERGY CONSUMPTION WITH TIME SERIES METHODS**

**Elif DUMAN**

**Master of Science, Department of Statistics**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hatice ÖNCEL ÇEKİM**

**June 2025, 89 pages**

The global increase in energy demand, climate change, supply problems and the need to use energy efficiently have led to the need to examine energy consumption. In particular, household energy consumption is a critical focal point for energy efficiency strategies as it constitutes a significant portion of total energy consumption. Accurate estimation of household energy consumption is important for optimizing energy generation plans, enabling demand side management programs and enabling consumers to save energy.

The main objective of this study is to analyze the household electricity consumption and the macroeconomic variables that are expected to explain this consumption between 2007 and 2023 using the Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables (SARIMAX) and Multivariate Singular Spectrum Analysis (MSSA) time series analysis methods. Household electricity consumption was found to be best explained by the variables of household numbers, household disposable income and cooling day degrees, and the MTSA method yielded results with a lower error criterion. In this context, realistic forecasting results were obtained. This study contributes to the literature in terms of analyzing the determinants of the change in household electricity consumption

with time series methods, especially with the MSSA method, which has not been applied in this field.

**Keywords:** Time Series, Energy, Statistics, SARIMAX, MSSA

## TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim boyunca yardıma ihtiyaç duyduğumda her an hemen dönüş yapan, sadece akademik yönde değil insani olarak da yol gösteren, desteğini ve sıcaklığını esirgemeyen, sürekli iyi ki beni kabul etmiş dediğim kıymetli hocam ve tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Hatice ÖNCEL ÇEKİM'e

Tez savunmam sürecinde bilgi ve değerlendirmeleriyle çalışmama katkı sunan, jüri üyeleri Sayın Prof. Dr. Cem KADILAR, Sayın Prof. Dr. Hacı Hasan ÖRKÇÜ ve lisans ve yüksek lisans öğrenimim esnasında bilgi ve birikimlerini paylaşan Hacettepe Üniversitesi İstatistik Bölümünün değerli hocalarına,

Bu sürecin her anında yanımda olan, tecrübesini paylaşan, desteğini ve sevgisini hiç eksik etmeyen canım eşim Fikret DUMAN'a ve varlığıyla, neşesiyle moral veren sevgili oğlum Çınar DUMAN'a,

Her zaman yanımda olan, kolaylık sağlayan, destek veren aileme ve eşimin ailesine,

Tez sürecimde anlayış gösteren Sayın Daire Başkanım Erkan ERŞEN'e, Sayın Grup Başkanım Mustafa YARDIMCI'ya, yardımlarını ve manevi desteklerini esirgemeyen Sayın Gökhan ELYILDIRIM, Sayın Fatih ŞAHİN, Sayın Özlem ATASEVER, Sayın Yasin IŞIK, Sayın Nuray TUNCER, Sayın Can DEMİRCİGİL, Sayın Alican GÜLDEN, Sayın Umur DEMİR, Sayın Dr. Semih ERGİŞİ, Sayın Duygu GÜR, Sayın Umur DEMİR ve Sayın Eda EVİN AKSU'ya,

En içten teşekkürlerimi sunarım...

Elif DUMAN

Haziran 2025, Ankara

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Önceki Çalışmalar .....	2
2. KAVRAMSAL BOYUTUYLA ENERJİ.....	12
2.1. Enerji Kavramı .....	12
2.2. Elektrik Tüketimi.....	13
2.3. Hane Halkı Enerji Tüketimi .....	18
2.3.1. Hane Halkı Enerji Tüketimini Belirleyen Faktörler .....	19
3. YÖNTEM.....	22
3.1. Box-Jenkins Modelleri .....	22
3.1.1. Mevsimsel Olmayan Box-Jenkins Modelleri.....	24
3.1.2. Mevsimsel Box-Jenkins Modelleri .....	25
3.1.3. Dışsal Değişkenli Otoregresif Bütünleşik Hareketli Ortalama Modeli (ARIMAX).....	26
3.2. Tekil Spektrum Analiz (TSA) .....	28
3.2.1. Tekil Spektrum Analiz (TSA) Algoritması.....	32
3.2.2. Çok Değişkenli Tekil Spektrum Analiz (Multivariate, Multi-channel Singular Spectrum Analysis; ÇTSA).....	36
3.3. SARIMAX ve ÇTSA Yöntemlerinin Kıyaslanması.....	39
4. TÜRKİYE’DEKİ HANE HALKI ENERJİ TÜKETİMİNİN MODELLENMESİ.....	42
4.1. Analizde Kullanılan Değişkenler .....	42

4.1.1. Durağanlık Analizi (ACF ve PACF Grafikleri) .....	52
4.2. SARIMAX ve TSA Analizi Sonuçları .....	60
4.2.1. SARIMAX Analizi Sonuçları.....	60
4.2.2. TSA Analizi Sonuçları.....	66
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	74
KAYNAKLAR .....	82
EKLER.....	90
EK 1 – Tez alışması Orijinallik Raporu.....	90
ZGEMİş .....	91

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. OECD ülkeleri net elektrik tüketimlerinin sektörel dağılımı.....	14
Çizelge 2.2. Faturalanan elektrik tüketiminin tüketici türü bazında yıllar itibarıyla gelişimi .....	16
Çizelge 3.1. SARIMA ve SARIMAX modellerinin özet karşılaştırması .....	28
Çizelge 3.2. ARIMAX ve ÇTSA yöntemlerinin özet karşılaştırması .....	41
Çizelge 4.1. Analizde kullanılan değişkenler ve tanımları.....	42
Çizelge 4.2. SARIMAX modellerine ilişkin RMSE, MAE ve MAPE sonuçları.....	60
Çizelge 4.3. SARIMAX(1, 2, 0)(1, 0, 0) <sub>36</sub> modeli katsayısı sonuçları .....	61
Çizelge 4.4. SARIMAX(1, 2, 0)(1, 0, 0) <sub>36</sub> modeli Ljung-Box Testi sonuçları.....	62
Çizelge 4.5. ÇTSA yöntemine ilişkin RMSE, MAE ve MAPE sonuçları .....	66
Çizelge 5.1. HANEHALKI_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD değişkenli SARIMAX modelinden elde edilen yıllık toplam öngörü tahminleri .....	76
Çizelge 5.2. Elektrik tüketiminde sektörlerin payı (%).....	78
Çizelge 5.3. HANEHALKI_SAYI değişkenli SARIMAX modelinden elde edilen yıllık toplam öngörü tahminleri.....	78
Çizelge 5.4. Ocak-Aralık 2024 faturalanan elektrik tüketiminin tüketici türü bazında dağılımının dönemler arası karşılaştırılması (MWh-%) .....	79
Çizelge 5.5. Tüketici sayısının tüketici türü bazında dağılımının dönemler arası karşılaştırılması (Adet-%) .....	79
Çizelge 5.6. Trafığe kayıtlı elektrikli otomobillerin dağılımı, 2011-2025.....	80
Çizelge 5.7. ÇTSA yönteminden elde edilen yıllık toplam öngörü tahminleri.....	80

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	2022 yılı net elektrik tüketimlerinin OECD ülkelerine göre sektörel dağılımı .....	15
Şekil 2.2.	Yıllar itibarıyla Türkiye net elektrik tüketiminin sektörlere dağılımı ...	16
Şekil 2.3.	Kişi başına toplam ve meskene ilişkin net elektrik tüketimi (kWh).....	17
Şekil 2.4.	2023 yılı Türkiye'nin ısıtma gün dereceleri .....	20
Şekil 2.5.	2023 yılı Türkiye'nin soğutma gün dereceleri .....	21
Şekil 3.1.	Box – Jenkins yönteminin adımları [68] .....	23
Şekil 3.2.	Tekil Spektrum Analiz Algoritması aşamaları .....	33
Şekil 4.1.	Hane halkı elektrik tüketimi için zaman serisi grafiği.....	43
Şekil 4.2.	GSYH için zaman serisi grafiği.....	45
Şekil 4.3.	Hane halkı sayısı için zaman serisi grafiği .....	45
Şekil 4.4.	Hane halkı kullanılabilir geliri değişkeni için zaman serisi grafiği.....	46
Şekil 4.5.	Hane halkı tüketim harcaması değişkeni için zaman serisi grafiği .....	48
Şekil 4.6.	HDD değişkeni için zaman serisi grafiği.....	49
Şekil 4.7.	CDD değişkeni için zaman serisi grafiği .....	50
Şekil 4.8.	Elektrik fiyatı değişkeni için zaman serisi grafiği .....	52
Şekil 4.9.	ELEKTRIK_DENGE değişkenine ait ACF ve PACF grafikleri.....	53
Şekil 4.10.	Birinci dereceden trend farkı alınmış ELEKTRIK_DENGE değişkenine ilişkin ACF ve PACF grafikleri .....	53
Şekil 4.11.	İkinci dereceden trend farkı alınmış ELEKTRIK_DENGE değişkenine ilişkin ACF ve PACF grafikleri .....	54
Şekil 4.12.	HANEHALKI_SAYI değişkenine ait ACF ve PACF grafikleri.....	55
Şekil 4.13.	Birinci dereceden trend farkı alınmış HANEHALKI_SAYI değişkenine ilişkin ACF ve PACF grafikleri .....	55
Şekil 4.14.	İkinci dereceden trend farkı alınmış HANEHALKI_SAYI değişkenine ilişkin ACF ve PACF grafikleri .....	56
Şekil 4.15.	HKULLANGELIR değişkenine ait ACF ve PACF grafikleri.....	57
Şekil 4.16.	Birinci dereceden trend farkı alınmış HKULLANGELIR değişkenine ilişkin ACF ve PACF grafikleri .....	57

Şekil 4.17.	İkinci dereceden trend farkı alınmış HKULLANGELIR değişkenine ilişkin ACF ve PACF grafikleri.....	58
Şekil 4.18.	CDD değişkenine ait ACF ve PACF grafikleri.....	59
Şekil 4.19.	Birinci dereceden mevsimsel farkı alınmış CDD değişkenine ilişkin ACF ve PACF grafikleri.....	59
Şekil 4.20.	ELEKTRİK_DENGE değişkenine ilişkin orijinal seri ve HANEHALKI_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD bağımsız değişkenlerinin SARIMAX ile elde edilen tahmin serisi uyum grafiği .....	63
Şekil 4.21.	ELEKTRİK_DENGE değişkenine ilişkin orijinal seri ve HANEHALKI_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD bağımsız değişkenlerinin SARIMAX ile elde edilen öngörü değerleri grafiği .....	63
Şekil 4.22.	ELEKTRİK_DENGE değişkenine ilişkin orijinal seri ve tahmin serileri uyum grafikleri.....	64
Şekil 4.23.	ELEKTRİK_DENGE değişkenine ilişkin orijinal seri ve öngörü değerleri.....	65
Şekil 4.24.	Sırasıyla L=12 ve L=24 için W-korelasyon matrisi.....	67
Şekil 4.25.	Bileşen dirsek yöntemi grafiği .....	68
Şekil 4.26.	Özvektör çiftleri grafiği .....	69
Şekil 4.27.	ÇTSA modeli ile elde edilen Trend, Mevsimsel ve Hata bileşenleri grafikleri .....	70
Şekil 4.28.	ELEKTRİK_DENGE değişkenine ilişkin orijinal seri ve HANEHALKI_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD bağımsız değişkenlerinin ÇTSA ile elde edilen tahmin değerleri uyum grafiği .....	71
Şekil 4.29.	ELEKTRİK_DENGE değişkenine ilişkin orijinal seri ve HANEHALKI_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD bağımsız değişkenlerinin ÇTSA ile elde edilen öngörü değerleri grafiği.....	71
Şekil 4.30.	ELEKTRİK_DENGE değişkenine ilişkin orijinal seri ve bağımsız değişkenlerin ÇTSA ile elde edilen tahmin değerleri uyum grafiği .....	72

Şekil 4.31.	ELEKTRIK_DENGE değişkenine ilişkin orijinal seri ve bağımsız değişkenlerin ÇTSA ile elde edilen öngörü değerleri grafiği .....	73
Şekil 5.1.	2012-2022 dönemi bina ve hizmetler sektörü enerji talebinin enerji kaynakları bazında gelişimi [66] .....	75
Şekil 5.2.	Sektörlere göre elektrik tüketim tahmini [49] .....	77

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

L	Pencere Uzunluğu
TWh	Terawatt-saat (1 TWh = 1 milyar kWh)
GWh	Gigawatt-saat (1 GWh = 1 milyon kWh)
KWh	Kilowatt-saat
TEP	Ton Eşdeğer Petrol
MTEP	Milyon Ton Eşdeğer Petrol

### Kısaltmalar

TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
TÜFE	Tüketici Fiyat Endeksi
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EİGM	Enerji İşleri Genel Müdürlüğü
RMSE	Root Mean Square Error (Karesel Ortalama Hatanın Karekökü)
MAE	Mean Absolute Error (Ortalama Mutlak Hata)
MAPE (%)	Mean Absolute Percentage Error (Ortalama Mutlak Yüzde Hata)
SARIMAX	Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables (Dışsal Değişkenli Mevsimsel Otoregresif Bütünleşik Hareketli Ortalama Modeli)
ÇTSA	Çok Değişkenli Tekil Spektrum Analiz
IEA	International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)

# 1. GİRİŞ

Küresel enerji talebindeki artış neticesinde artan talepleri karşılama ve iklim değişikliğiyle mücadele gerekliliği, enerji tüketim kalıplarının incelenmesi ihtiyacını oluşturmuştur [1]. Özellikle hane halkının enerji tüketimi, toplam enerjinin önemli bir bölümünü oluşturması nedeniyle, enerji verimliliği stratejileri açısından kritik bir odak noktası olmuştur. Hane halkı enerji tüketiminin doğru bir şekilde tahmin edilmesi; enerji üretim planlarının optimize edilmesi, talep tarafı yönetimi programlarının etkinleştirilmesi, şebeke dengesinin korunması ve tüketicilerin enerji tasarrufu yapmalarına olanak sağlanması gibi birçok fayda sunmuştur [2]. Enerji tüketiminin değişkenliği birçok faktöre bağlı olduğundan, bu tahminleri yapmak için yöntemler geliştirilmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı, hane halkı enerji tüketimi veri setini kullanarak, enerji tüketiminin makroekonomik göstergelerle ilişkisini zaman serisi yöntemleri ile araştırıp istatistiksel olarak başarılı tahminler üretmek, tahmin performanslarını karşılaştırmaktır.

Bu amaç doğrultusunda hazırlanan tez çalışması giriş dahil olmak üzere beş ana bölüme ayrılmıştır. Giriş bölümünde konu ile ilgili önceki yıllarda yapılmış olan çalışmalardan bahsedilmiştir. İkinci bölümde kavramsal olarak enerji, elektrik ve hane halkı enerji tüketimine değinilmiştir. Üçüncü bölümde çalışmada kullanılan Dışsal Değişkenli Mevsimsel Otoregresif Bütünleşik Hareketli Ortalama Modeli (SARIMAX) ve Çok Değişkenli Tekil Spektrum Analiz (ÇTSA) zaman serisi analiz yöntemleri açıklanmıştır. Tez çalışmasının uygulama bölümünü oluşturan dördüncü bölümde, 2007-2023 yılları arasında hane halkı elektrik tüketim miktarı ve bu tüketimi açıklayacağı düşünülen makroekonomik değişkenler kullanılarak SARIMAX ve ÇTSA yöntemleri ile analiz yapılmıştır.

Tez çalışmasının beşinci ve son bölümünde ise uygulanan yöntemler kıyaslanmış, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

## 1.1. Önceki Çalışmalar

Hane halkı enerji tüketiminin tahmini, daha önce gözlemlenen veri noktalarına dayanarak gelecekteki değerleri tahmin etmeyi içermekte ve sürdürülebilir enerji politikalarının geliştirilmesi ile enerji verimliliğinin artırılması açısından önemli bir rol oynamaktadır. Bu hedefle, zamana bağlı olayların dinamiklerinin anlaşılması ve tarihsel verilerde gizlenen kalıpların, eğilimlerin ve bağımlılıkların ortaya çıkarılması önem arz etmektedir.

Literatürde zaman serisi verilerini analiz etmek ve enerji tüketimini tahmin etmek için istatistiksel yöntemler, makine öğrenimi algoritmaları, derin öğrenme gibi çeşitli yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Enerji tüketim tahmini ve zamana göre değişim gösteren olayların analizlerine ilişkin literatür aşağıdaki gibi özetlenmektedir.

Enerji tahmini için popüler ve yaygın olarak kullanılan istatistiksel yöntemlerden biri otoregresif bütünleşik hareketli ortalama (ARIMA) modelidir. Bu yöntem, zaman serisi verilerini analiz ve tahmin etmek için uygundur. Düşük veri kümelerinde kolay ve doğru tahmin yapabilmesi yönleriyle öne çıkmaktadır [3]. Zaman serileri mevsimsellik gösterdiğinde, enerji tahmini için daha uygun model mevsimsel ARIMA (SARIMA) olmaktadır. Literatürde yer alan çok sayıda çalışmaya, enerji tahmini elde etmek için ARIMA veya SARIMA modelleri uygulanmaktadır. El Alaoui ve ark. (2023) çalışmalarında, Fas'ın Chefchaouen şehrindeki bir idari binada ısıtma enerjisi kullanımını tahmin etmede mevsimsel otoregresif bütünleşik hareketli ortalama (SARIMA) modellerinin eğitim aşamasında sınırlı veri boyutu ile enerji tahminindeki etkinliğini vurgulamaktadır. Bu çalışmadaki enerji tahmini, makine öğrenimi (yapay sinir ağları, torbalama ağaçları, artırma ağaçları ve destek vektör makineleri) ve istatistiksel yöntemler (14 SARIMA modeli) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelleri oluşturmak için dış sıcaklık, iç sıcaklık, güneş radyasyonu ve zaman faktörü model girdileri olarak seçilmiştir. Yapay sinir ağı diğer tüm modellerden daha iyi performans göstermiştir. Genel anlamda makine öğrenimi yöntemleri klasik istatistiksel yöntemlerden daha iyi performans gösteriyor gibi görünse de SARIMA modellerinin eğitim aşamasında çok fazla veriye ihtiyaç duymadan iyi bir tahmin doğruluğuna ulaştığı sonucuna varılmıştır [4].

Jeong ve ark. (2014) Güney Kore eğitim kurumlarındaki yıllık enerji maliyeti bütçesini tahmin etmek için SARIMA ve SARIMA ile Yapay Sinir Ağları (ANN)'ni birleştiren bir hibrit model kullanmışlardır. Önerilen hibrit model, geleneksel SARIMA modeline kıyasla daha doğru sonuç vermiştir [5]. Camara ve arkadaşları (2016), 1973'ten 2015'e kadar olan tarihsel verilere dayanarak, ABD'deki konut enerji tüketimini ANN ve istatistiksel bir yöntem olan SARIMA modeli yaklaşımlarını kullanarak tahmin etmiştir. Sonuçlar, her iki yöntemin de enerji tahmininde iyi performans gösterdiğini ve istatistiksel anlamlılık testlerine göre iki modelin tahminleri ile gerçek değerler arasında önemli bir fark olmadığını göstermiştir. Basitlik ilkesi gereği SARIMA modeli, enerji tüketimi tahmini için uygun bir seçenek olarak değerlendirilmektedir [6, 4].

Karki ve ark. (2024) çalışmalarında Nepal'deki elektrik talepleri hakkında tahminler yapmayı ve dinamik bir tarife sistemi önermeyi amaçlamaktadır. Panama City'nin saatlik elektrik yükü veri seti için Dışsal Değişkenli Mevsimsel Oto regresif Bütünleşik Hareketli Ortalama (SARIMAX) ve BATS (Box-Cox transformation, ARMA errors, Trend, Seasonal components) modeli denenmiştir. SARIMAX modeli, değerlendirme metrik değerleri ile en iyi uyumu sağlamıştır [7].

Alharbi ve Csala (2022) çalışmalarında zaman serisi modellemesi ile geçmiş verilere dayanarak elektrik sektörünün gelecekteki performansını incelemek ve analiz etmek için bir yaklaşım öne sürerek, elektrik sektörünün uzun vadeli performansını (elektrik tüketimi, üretim, puant yük ve kurulu kapasite) tahmin etmek için SARIMAX modelini uygulayan bir tahmin çerçevesi önermektedir. Modele girilen geçmiş veriler, Suudi Arabistan'dan 40 yıllık bir dönem boyunca (1980-2020) üç aylık aralıklarla toplanmaktadır. SARIMAX tekniği, yakın girdi ve çıktı veri seti uzunlukları durumunda bile hata değerlerini azaltmaya ve genel model doğruluğunu iyileştirmeye yardımcı olan mevsimsel ve dışsal etki faktörlerine sahip bir zaman serisi yaklaşımı uygulamaktadır. Deneysel bulgular, SARIMAX modelinin, daha basit oto regresif bütünleşik hareketli ortalama tabanlı tekniklere kıyasla tahmin doğruluğunu önemli ölçüde artırdığı için kategorizasyon ve değerlendirme açısından umut verici bir performansa sahip olduğunu göstermiştir. Geliştirilen SARIMAX tahmin modeli, klasik yöntemlerin karmaşık yöntemlere (karar ağaçları, çok katmanlı algılayıcılar (multilayer perceptrons, MLP), LSTM vb.) göre daha üstün olduğunu göstermiştir. Model, farklı türdeki tarihsel elektrik sektörü verileriyle (üretim, tüketim, tepe yükü, kurulu güç) test edilmiş ve yüksek

doğruluk oranları sergilemiştir. Ayrıca, SARIMAX modelinin diğer 11 tahmin modeline göre daha iyi performans gösterdiği ve enerji piyasalarının performansını artırma potansiyeline sahip olduğu vurgulanmıştır [8].

Tekil spektrum analizi (TSA), zaman serilerine ilişkin temel bileşenleri trend, mevsimsellik ve gürültü şeklinde ayrıştırmak amacıyla literatürde kullanılmaktadır. TSA, verideki gizli yapıları ortaya çıkararak öngörü modellerinin geliştirilmesine, sinyal gürültü oranının iyileştirilmesine ve mevsimsel etkilerin belirlenmesine olanak tanır. Ayrıca, çok değişkenli tekil spektrum analiz (ÇTSA), birden fazla zaman serisi arasındaki ortak dinamikleri ve etkileşimleri analiz ederek, farklı değişkenlerin ilişkilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koyar. Bu özelliği sayesinde çeşitli disiplinlerde karmaşık sistemlerin daha iyi anlaşılmasını ve modellenmesini desteklemektedir.

Öncel Çekim ve ark. (2023) çalışmalarında üç farklı katalogdan elde edilen deprem verilerini incelemiştir. Kümelenmemiş katalog 1970-2020 yılları için derlenmiş olup moment büyüklüğü (Mw) 3,0'dan büyük olan depremleri içermektedir. Bölgedeki depremlerin aylık ortalama büyüklükleri ARIMA, TSA, evrişimli sinir ağı (CNN) ve uzun - kısa süreli bellek (LSTM) gibi derin öğrenme yöntemleri kullanılarak elde edilmiş ve analiz edilmiştir. ARIMA zaman serisi trendlerini ve mevsimsel kalıpları analiz ederken, TSA ayrıştırma ve özellik çıkarma üzerine odaklanmaktadır. LSTM, hafıza mekanizmalarını kullanarak karmaşık ilişkileri yakalamaya çalışırken, CNN örüntü tanıma ve önemli özellikleri çıkarma konusunda güçlüdür. Bu çeşitlilik sayesinde, çalışma 36 dönem için ortalama deprem büyüklüklerine ilişkin daha kapsamlı ve güvenilir tahminler yapılmasına olanak sağlamaktadır. Her bir yöntemin tahmin yetenekleri ve hata oranları deprem büyüklüğü verilerine dayalı olarak analiz edilmiş ve LSTM yönteminin en etkin ve doğru tahminleri sağladığı tespit edilmiştir [9].

Nuralan (2023) tez çalışmasında su yapılarının planlanması ve yönetimi amacıyla lineer olmayan ve durağan olmayan karaktere sahip nehir akım verilerinin doğru tahmini için tahmin performansını artırmak üzere zaman serilerinin analizinde önemli bir yer tutan TSA kullanılarak alt bant verileri elde edilmiştir. Nehir akım tahmin verisine ait TSA alt bant verilerinin LSTM ağları ve GRU ağları ile bir ileri ve iki ileri adım tahmin çalışması gerçekleştirilmiştir. Aylık verilerin bir ileri tahmininde TSA-LSTM modelinin, günlük

verilerin bir ve iki ileri tahmini ile aylık verilerin iki ileri tahmininde TSA-GRU modelinin tahmin performansının oldukça başarılı olduğu görülmüştür [10].

Hassani ve ark. (2013) araştırmalarında Birleşik Krallık Sanayi Üretimi serisini kullanarak TSA yöntemini geliştirmek ve uygulamayı amaçlamıştır. TSA'nın harmonik ve trend bileşenlerini aynı anda başarılı bir şekilde ayırđırdığı ve yapısal kırılmaların bulunduğu durumlarda dahi iyi performans gösterdiği vurgulanmıştır. TSA'nın tahmin sonuçları, ARIMA modeliyle karşılaştırılmış ve TSA'nın daha yüksek doğruluk sağladığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, çok değişkenli TSA (ÇTSA), üretim serilerinin birbirleriyle yüksek korelasyona sahip olması nedeniyle tercih edilmiş ve ÇTSA'nın, Hata Kare Ortalamasının Karekökü (HKOK) kriteri ve değişim yönü tahmini açısından VAR modelinden daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur. TSA, ÇTSA, ARIMA ve VAR modelleri için hata dağılımları incelenmiş ve TSA'nın tek değişkenli durumda ARIMA'dan, ÇTSA'nın ise çok değişkenli durumda VAR modelinden daha küçük hatalar ürettiği gösterilmiştir [11].

Hassani ve ark. (2017) araştırmalarında Avrupa ülkelerinde turizm talebini tahmin etmek için çeşitli tahmin yöntemlerini karşılaştırmaktadır. Parametrik (ARIMA, ETS, ARFIMA, MA, WMA) ve parametrik olmayan (NN, TBATS, SSA-R, SSA-V) modeller kullanılarak 9 Avrupa ülkesi (Avusturya, Kıbrıs, Almanya, Yunanistan, Hollanda, Portekiz, İspanya, İsveç ve Birleşik Krallık) için 2000-2013 dönemi turist varışlarını tahmin etmişlerdir. Amaç kısa, orta ve uzun vadeli tahminler için en doğru modeli bulmaktır. Sonuçlar, tek bir modelin tüm ülkeler ve tahmin ufukları için en iyi performansı göstermediğini ortaya koymuştur. Bu, her ülke ve dönem için modelin özelleştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Ancak, tek bir model seçilmesi gerekiyorsa, TSA-R modeli genel olarak en düşük tahmin hatasıyla en iyi model olarak bulunmuştur. TSA-R, TSA-V, ARIMA ve TBATS modelleri ise en iyi alternatifler olarak öne çıkmaktadır [12].

Hassani ve ark. (2010) araştırmalarında pound/dolar döviz kurunu tahmin etmek için TSA ve ÇTSA yöntemlerini kullanmışlardır. Araştırmacılar, bu yöntemleri rassal yürüyüş (random walk) modeli ve hata düzeltme modeli (ECM) ile karşılaştırmışlardır. ÇTSA yöntemi, euro/dolar kuru ve pound/dolar kurunu tahmin etmede bir "rehber" olarak kullanılmıştır. ÇTSA yönteminin hem pound/dolar kurunun değerini hem de değişim

yönünü tahmin etmede rassal yürüyüş modelinden daha iyi performans gösterdiği ortaya konmuştur. Bu durum, TSA ve özellikle ÇTSA yöntemlerinin döviz kuru tahmininde umut verici alternatifler olabileceğini göstermektedir [13].

Patterson ve ark. (2011), ulusal hesaplar verilerinin nihai versiyonlarını tahmin etmek için ÇTSA yönteminin, geleneksel yöntemlere ve mevcut öncü verilere göre daha üstün bir yöntem olduğunu savunmaktadır. ÇTSA doğrusallık, normallik ve durağanlık gibi kısıtlayıcı varsayımlardan en az birini içeren standart modelleme yöntemlerinden çok daha esneklerdir. ÇTSA'nın esnekliği ve kısıtlayıcı varsayımlara ihtiyaç duymaması, bu tür verilerin modellenmesi ve tahmininde önemli bir avantaj sağlamaktadır [14].

Silva ve ark. (2018) Almanya, Fransa ve Birleşik Krallık ekonomileri için 24 aylık, mevsimsel düzeltme uygulanmamış sanayi üretimi (industrial production, IP) serileri arasındaki sektörler arası ilişkilerin öncü göstergelerini bulmak için optimize edilmiş ÇTSA yaklaşımını önermektedir. Yatay ÇTSA'nın (YÇTSA) hem tekrarlayan hem de vektör tahmin algoritmaları dikkate alınmıştır. Önerilen çok değişkenli yaklaşımdan elde edilen sonuçlar, tek değişkenli TSA sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Veriler normallik, mevsimsel birim kök hipotezi ve yapısal kırılmalar açısından titizlikle test edilmiştir. Bulgular, her üç ülke için de, önerilen ÇTSA algoritmasından elde edilen tahminlerin, vakaların %70'inden fazlasında optimize edilmiş TSA algoritmasından daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Buna göre, bu yeni yaklaşım öncü göstergeleri belirlemede başarılıdır ve bir kayıp fonksiyonunu en aza indiren TSA, L ve r parametreleri için uygun bir seçenektir [15].

Zhang ve Hui (2012), günlük döviz kurunu tahmin etmek amacıyla döviz kuru sisteminin doğrusal olmayan yapısını inceleyip ayırt ettikten sonra, günlük sterlin/dolar döviz kurunun değerini ve döviz kurlarındaki değişim oranlarını tahmin etmek için TSA ve ÇTSA kullanmışlardır. Çok değişkenli tekil spektrum analizine dayalı tahminin, hem değeri hem de günlük sterlin/dolar döviz kurundaki değişim oranını tahmin etmede rastgele yürüyüş modelinin tahminine göre daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır [16].

Enerjinin tüm üretim ve hizmet süreçlerine doğrudan ve dolaylı etkisinin olması bu alanda literatürde birçok araştırma yapılmasını beraberinde getirmektedir. Birçok araştırmacı, enerji ile çeşitli ekonomik, çevresel ve sosyal faktörler arasındaki ilişkiye ilgi duymuştur. Ekonomik büyüme, bir ekonomide üretim kapasitesinin zaman içinde artması, mal ve hizmet üretimi miktarında artış olmasıdır. Büyüme, geleneksel olarak reel GSYH (gayri safi yurt içi hasıla) veya reel GSYH artış oranı yüzdeleriyle ölçülür. GSYH genellikle reel olarak hesaplanır [17].

Ekonomik büyüme ve GSYH, enerji tüketimi ile yakından ilgili ekonomik parametreler olarak düşünülmektedir. Artan ekonomik büyüme ve milli gelire paralel olarak enerji tüketiminin artması beklenmektedir. Enerji tüketimi ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi incelemek için Tang ve ark. (2016), Vietnam için Granger nedensellik analizini kullanmışlardır. Bulgular, bu iki değişkenin çift yönlü nedensel ilişkiye sahip olduğunu göstermektedir. Benzer bir analiz Azam ve ark. (2015) tarafından beş farklı Asya ülkesi için yapılmış ve enerji tüketimi ile ekonomik göstergeler arasındaki ilişki türünün ülkelere göre farklılık gösterebileceği keşfedilmiştir. Benzer şekilde, Chontanawat (2020) enerji tüketimi ile ekonomi arasında uzun dönemli bir ilişki olduğunu ancak bu ilişkinin bazı ülkelerde tek yönlü, bazılarında ise çift yönlü olduğunu ortaya koymuştur. Magazzino (2015), İtalya'nın verileri üzerinden zaman serilerini kullanarak, enerji tüketimi ile GSYH arasında uzun vadeli ve çift yönlü bir ilişki olduğunu belirlemiştir. Öztürk (2017), çeşitli gelir gruplarındaki birçok ülkenin verilerini analiz etmiş ve Vektör Otoregresyon modeli ve Granger nedensellik analizi kullanarak enerji tüketimi ile reel GSYH arasındaki ilişkiyi incelemiştir [18, 19, 20, 21, 22, 23].

Literatürde sadece enerji olarak elektrik tüketimine odaklanan çalışmalar da mevcuttur. Raza ve ark. (2016) 1980-2010 yıllarını kapsayan yıllık zaman serisi verilerini kullanarak, Pakistan, Hindistan, Bangladeş ve Sri Lanka olmak üzere dört Güney Asya ülkesinin ekonomik büyümesi üzerinde elektrik tüketiminin etkisini araştırmıştır. Pedroni'nin panel eşbütünlük sonuçları, Güney Asya'da elektrik tüketimi ile ekonomik büyüme arasında geçerli bir uzun vadeli ilişki olduğunu doğrulamıştır. Rastgele etkiler modelinin sonuçları, elektrik tüketiminin Güney Asya ülkelerinin ekonomik büyümesi üzerinde pozitif ve anlamlı bir etkisi olduğunu göstermiştir. Pozitif ve anlamlı ilişkinin ilk bulgularının sağlamlığı, dört farklı duyarlılık analizi ile doğrulanmıştır. Panel Granger

nedensellik testinin sonuçları ile elektrik tüketiminden ekonomik büyümeye doğru tek yönlü nedensel bir ilişkinin olduğunu göstermiştir [24].

Benzer şekilde, Aslan (2014) çalışmasında Türkiye'nin elektrik tüketimi ile GSYH arasındaki nedenselliği incelemek için Granger testi kullanmış ve elektrik tüketimi ile GSYH arasında çift yönlü uzun dönemli Granger nedenselliği olduğu sonucuna varmıştır [25].

Enerji tüketimi üzerine yapılan çalışmaların yanı sıra, enerji tüketiminin gelecek değerlerinin tahmin edilmesi de literatürde önemli bir yere sahiptir.

1965-1999 döneminde Mohamed ve Bodger (2005) Yeni Zelanda'nın GSYH, ortalama elektrik fiyatı ve nüfus verilerini kullanarak elektrik tüketimini tahmin etmişlerdir. Çalışmada kullanılan modeller, çoklu doğrusal regresyon analizi ile geliştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda elektrik tüketiminin tüm değişkenlerle etkili bir şekilde ilişkili olduğu bulunmuştur [26].

Bianco ve ark. (2013) çalışmalarında, İtalya'da ekonomik ve demografik değişkenlerin yıllık elektrik tüketimi üzerindeki etkisini, basit ve veriye dayalı bir elektrik tüketimi tahmin modeli geliştirmek amacıyla araştırmışlardır. 1970-2007 yılları arasındaki elektrik tüketimi için GSYH, kişi başına GSYH ve nüfus serileri kullanılarak çoklu ve tekli regresyon modelleri geliştirilmiştir. Yıllık elektrik tüketimi, konut tüketimi için 0,990, konut dışı tüketim için 0,961 ve toplam tüketim için 0,981 düzeltilmiş belirtme katsayıları (adj.  $R^2$ ) ile güçlü bir şekilde açıklanmaktadır [27].

12 önemli Avrupa ülkesinde 1994'ten 2022'ye gelir ve fiyat değişikliklerine yanıt olarak Huang ve ark. (2024) hane halkı elektrik tüketim davranışlarını anlamaya odaklanmıştır. Çalışmalarında ekonometrik bir yaklaşım olan Otomatik Seçim Modelleri kullanmışlardır. Hane halkı elektrik tüketimini açıklamak için kullanılan temel değişkenler hane halkı geliri, elektrik fiyatları ve iklim koşulları (ısıtma ve soğutma gün dereceleri, HDD- CDD) dir. Kullandıkları model ile bu değişkenlerin hem mevcut hem de geçmiş dönemdeki değerlerini ve büyüme oranlarını dikkate alarak, elektrik tüketiminin uzun dönemli ve kısa dönemli esnekliklerini tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmadan elde edilen bulgular, ülkeler arasında değişen gelir ve fiyat esnekliği

düzelelerini ortaya koyarak ölkelerin kendine has ekonomik ve iklim koşullarını yansıtmaktadır [28].

Al-Bajjali ve Shamayleh (2018) araştırmalarında, Ürdün'de 1986-2015 döneminde önerilen elektrik tüketimi belirleyicilerini analiz etmiştir. Elektrik tüketiminin temel belirleyicilerini anlamak için altı bağımsız değişken kullanmışlardır: GSYH, elektrik fiyatları, nüfus, kentleşme, ekonominin yapısı ve toplam su tüketimi. Bağımsız değişkenlerin elektrik talebi üzerindeki etkisini incelemek için yıllık veriler kullanılarak çok değişkenli bir model oluşturmuşlardır. Bu modeldeki uzun vadeli ilişkileri incelemek için Johansen Eşbütünleşme testi ve ardından Vektör Hata Düzeltme Modeli (VECM) kullanılmıştır. VECM regresyon sonuçları, GSYH, kentleşme, ekonominin yapısı ve toplam su tüketiminin elektrik tüketimiyle anlamlı ve pozitif ilişkiye sahip olduğunu, elektrik fiyatlarının ise elektrik tüketimiyle anlamlı ve negatif ilişkili olduğunu göstermektedir. Nüfus, kısa vadede elektrik tüketimi üzerinde anlamlı ve pozitif etki gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır [29].

Shahbaz ve ark. (2017), 157 ölkenin 1960-2014 yılları arasındaki verileri kullanarak; ekonomik büyüme, elektrik tüketimi ve petrol fiyatları arasındaki ilişki küresel bir perspektifle analiz etmiştir. Veriler gelir, OECD ve bölgesel düzeylere göre kategorize edilmiştir. Panel eşbütünleşme, uzun vadeli parametre tahmini ve havuz ortalama grup testleri, değişkenler arasındaki eşbütünleşmeyi, kısa ve uzun vadeli ilişkileri analiz etmek için kullanılmıştır. Bu çalışma ile gelişmekte olan ölkelerde elektrik tüketiminin, endüstriyel altyapı ile ekonomik büyüme arasında petrol fiyatlarından daha önemli bir ilişkiye sahip olduğu ortaya konmuştur [30].

Konut sektörü enerji tüketiminde belirleyici etkenler literatürde birçok çalışmada yer almaktadır. Konutlarda enerji tüketiminde belirleyici olan ana etkenlerin mühendislik, ekonomik, psikolojik, sosyolojik ve antropolojik olduğu ifade edilerek her bir etkenin kendine özgü karakteristiği bulunduğu sıkça belirtilmektedir [31, 32].

Serrano ve ark. (2015) hane halkı sayısı, ortalama hane halkı büyüklüğü, kişi başına kullanım alanı gibi etkenlerin konutlardaki enerji tüketimine küresel, bölgesel ve ölk seviyesinde benzer şekilde etki ettiğini, ısıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketiminin ise benzer eğilimleri izlemediğini çalışmalarında belirtmiştir [33].

Lévy ve Belaid (2018) ise lojistik regresyon analizi kullanarak, hane halkı büyüklüğü, gelir ve konut büyüklüğü gibi sosyo-ekonomik faktörlerin enerji tüketimi üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmanın sonucunda tüketimin kişi ve metrekare başına farklılık gösterdiği vurgulanmıştır [34].

Nair, Gustavsson ve Mahapatra (2010), İsveç'te 3000 adet müstakil evde anket yaparak hane halkı gelirinin, eğitim durumunun, yaşının ve binanın karakteristik özelliklerinin (bina yaşı, geçmiş yatırımlar, enerji maliyetlerine yönelik algı vb.) enerji verimliliği yatırımlarında karar alma süreçlerine etki ettiğini saptamıştır [35].

Brounen, Kok ve Quigley (2012), Hollanda'da 300 bin adet konutta yapılan bir anket çalışmasında konutlardaki gaz tüketiminin esas olarak konutun yaşı, bina tipi ve özellikleri gibi yapısal konut özellikleri tarafından belirlendiğini, elektrik tüketiminin ise hane halkı yapısına, özellikle de gelir ve aile yapısına bağlı olarak değiştiğini çalışmalarında göstermiştir [36].

Hara ve ark. (2015), Osaka Japonya'da 2009 ve 2013 yıllarında konutlarda gerçekleştirilen büyük örneklemlerle anket çalışmasında sıralı logit modeli ile enerji tüketimindeki eğilimleri tespit etmeye çalışmış ve elde edilen sonuçlar, elektrik ve gaz tüketiminin temel olarak hane halkı geliri, aile bireylerinin sayısı, ev aletlerinin sayısı ve enerji tasarrufu algısı gibi faktörler tarafından belirlendiğini ortaya koymuştur [37].

Romero-Jordán, Peñasco ve Del Rio (2014), İspanya'nın farklı bölgelerindeki 1998-2009 yılları arasında hane halkı elektrik tüketimi verilerinin incelendiği çalışmalarında; gelir, ısıtma ve soğutma gün dereceleri ile elektrikli su ısıtıcısı sahiplik oranlarının konut elektrik tüketimini pozitif yönde etkilediği sonucuna varmıştır. Ayrıca, elektrik ve doğal gaz fiyatları, elektrikli ısıtıcılara sahiplik oranları ve yaşlı hane halkı varlığının elektrik tüketimine negatif yönde etki ettiğini belirtmişlerdir [38].

Kavousian, Rajagopal ve Fischer (2013) ise 1628 adet konutun elektrik tüketimlerini belirleyen en önemli etkenlerin hava durumu, konum ve kullanım alanı olduğunu tespit

etmiş, literatürdeki çalışmaların aksine bu çalışmada elektrik tüketimi ile gelir düzeyi, ev sahipliği veya bina yaşı arasında anlamlı bir ilişki gözlemlenmemiştir [39].

Silk ve Joutz (1997), 1949-1993 dönemi için ABD'deki hane halkı elektrik talebinin kısa ve uzun dönemli esnekliklerini eşbütünleşme teknikleri kullanarak analiz etmişlerdir. Reel kullanılabilir gelir, elektrik fiyatı, ağırlıklı ısıtma ve soğutma gün dereceleri ve reel faiz oranının elektrik tüketimini etkileyen temel değişkenler olduğunu savunmuşlardır [40].

Bouznit, Pablo-Romero ve Sánchez-Braza (2018) çalışmalarında, COP21 (Taraflar Konferansı) anlaşması çerçevesinde Cezayir'in, karbon emisyonlarını 2030 yılına kadar en az %7 oranında azaltma taahhüdünde bulunmuş ancak toplam nihai enerji tüketiminin 2010'dan 2014'e %32 arttığı ve en büyük enerji artışının konut sektöründeki elektrik kullanımıyla ilgili olduğunu belirtmiştir. Bu hedefe ulaşmak amacıyla 1970-2013 döneminde Cezayir için konut elektrik tüketimi ve gelir arasındaki ilişki, kişi başına düşen GSYH'ye, elektrik fiyatlarına ve mal ve hizmet ithalatına bağlı olan bir konut elektrik tüketimi talep fonksiyonu tahmin edilerek analiz edilmiştir. Tahmin sonuçları, elektrik kullanımı ile GSYH (kişi başına düşen) arasındaki ilişkilerin ters yönde olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla, Cezayir'de büyümeyi teşvik etmek elektrik tüketimini azaltmak için uygun olabilir, çünkü daha yüksek bir gelir seviyesi daha verimli cihazların kullanılmasına izin verebilir. Ayrıca, yenilenebilir enerjinin, artan konut talebini karşılamak amacıyla elektrik üretimini arttırmak için yeterli olabileceği tespit edilmiştir [41].

## 2. KAVRAMSAL BOYUTUYLA ENERJİ

Bu bölümde enerji, elektrik tüketimi ve hane halkı enerji tüketimi ile hane halkı enerji tüketimini etkileyen faktörlere değinilecek, güncel verilere yer verilecektir.

### 2.1. Enerji Kavramı

Türk Dil Kurumu, bir fizik terimi olan enerjiyi ; “*Maddede var olan ve ısı, ışık biçiminde ortaya çıkan güç, erke: Isıl enerji. Elektrik enerjisi. Mekanik enerji.*” olarak tanımlamıştır [42].

Evrensel bir tanım olarak; enerji, iş yapabilme yeteneğine denir. Enerjiye tarihsel süreçten baktığımızda uygarlıkların yükselmesinde ve modern yaşama geçişte enerji gereksinimi kademeli olarak arttığı görülmektedir [43].

Dolayısıyla, en önemli görevlerden biri ülkelerin sürdürülebilir bir enerji politikasına sahip olmalarını sağlamaktır. Etkili siyasi ve ekonomik faaliyetler, ekonomik sektörler hakkında bilgi toplanmasına ve bu bilgilerin tahmin, simülasyon ve karar alma süreçlerinde etkin bir şekilde kullanılmasına ve uzun vadede uygun mevzuatın kabul edilmesine dayanmalıdır [44].

Günümüz ekonomilerinde enerjinin, kalkınmada ve büyümede itici bir güç olduğu aşikârdır. Sanayide, ticarethanelerde, mesken elektrik kullanımlarında, sokak aydınlatmalarında, tarımsal sulamada, resmi dairelerde vb. alanlarda enerji kullanılmaktadır [45].

Artan talepler ve bu talepleri karşılamak için geliştirilen üretim süreçleri sebebiyle enerjiye ve enerji kullanımına olan ihtiyaç da artmaktadır [1]. Enerji konusunda kalıcı çözümlerin bulunması için enerji tüketiminin ele alınması oldukça önemlidir.

Türkiye’de artan nüfusla birlikte enerji tüketimi de artmaktadır. Teknoloji alanındaki gelişmeler, elektronik cihazların kullanımında artış ve çeşitli ürün yelpazesinin olması, konforlu yaşam tercihi, üretimde en önemli girdilerden biri olmasından dolayı ve

taşımacılıktaki kullanımıyla birlikte gün geçtikçe enerji gereksinimi daha da fazlalaşmaktadır [46].

Elektrik, çağdaş bir dünya için kalkınmanın, gelişmenin ve büyümenin başlıca unsurlarından biridir. Bu unsur, Türkiye'nin hem iktisadi büyüme hem de sürdürülebilir kalkınma amaçları için kritik öneme sahiptir. Zira elektrik, iktisadi faaliyetlerin birçok alanında kullanılmaktadır [45].

## **2.2. Elektrik Tüketimi**

Elektrik tüketiminin etkileri hem araştırmacılar hem de politikacılar için araştırma konularından biri olmuştur [47]. Ülke ekonomisindeki her sektörde elektriğin verimli kullanımı giderek daha önemli hâle gelmektedir. Bunun yanı sıra, enerji verimliliği olgusu, iklim ve enerji politikalarını ilgilendiren ve aynı zamanda işletmelerin üretim maliyetlerini (ve dolayısıyla da kârlarını) ve sosyo-ekonomik kalkınmayı etkileyen önemli bir faktördür. Bu bağlamda, elektriğin verimli kullanımının önemi gitgide artmaktadır [45].

Uluslararası Enerji Ajansı (UEA) Dünya Enerji Görünümü 2024 raporuna göre küresel elektrik talebi 2023 yılında %2,5' in üzerinde artarak son on yılın ortalamasına benzer bir oran yakalamıştır. 2023' ten 2030' a kadar, belirlenen senaryolara göre yıllık ortalama elektrik talebi artışının en az %3,3 olacağı; 2023'ten 2050'ye kadar ise bu artışın %2,4 olacağı öngörülmektedir [48].

Türkiye'nin elektrik enerjisi tüketimi ise 2000-2020 döneminde yılda ortalama %4,4 oranında artarak 128,3 TWh'ten 306,7 TWh'e yükselerek sürekli bir artış eğilimi göstermektedir. Elektrik enerjisi tüketiminde yıllık ortalama artış oranının 2020-2035 döneminde %3,5 artması öngörülürken, 2035-2053 döneminde ise yıllık ortalama artış oranının %5,2 düzeyine yükseleceği beklenmektedir. 2020 yılında nihai enerji tüketimi içinde %21,8'lik orana sahip elektrik enerjisinin payının 2053 yılında %55,6'ya ulaşacağı tahmin edilmektedir [49].

Elektriğin birçok kullanım alanı vardır. Bu alanlar: sanayi, mesken, kamu ve özel hizmetler, tarımsal faaliyetler, aydınlatma ile diğer tüketici türlerine göre

farklılaşmaktadır. Ülkelerin de elektriği kullanım alanları ve miktarları birbirinden farklılık göstermektedir.

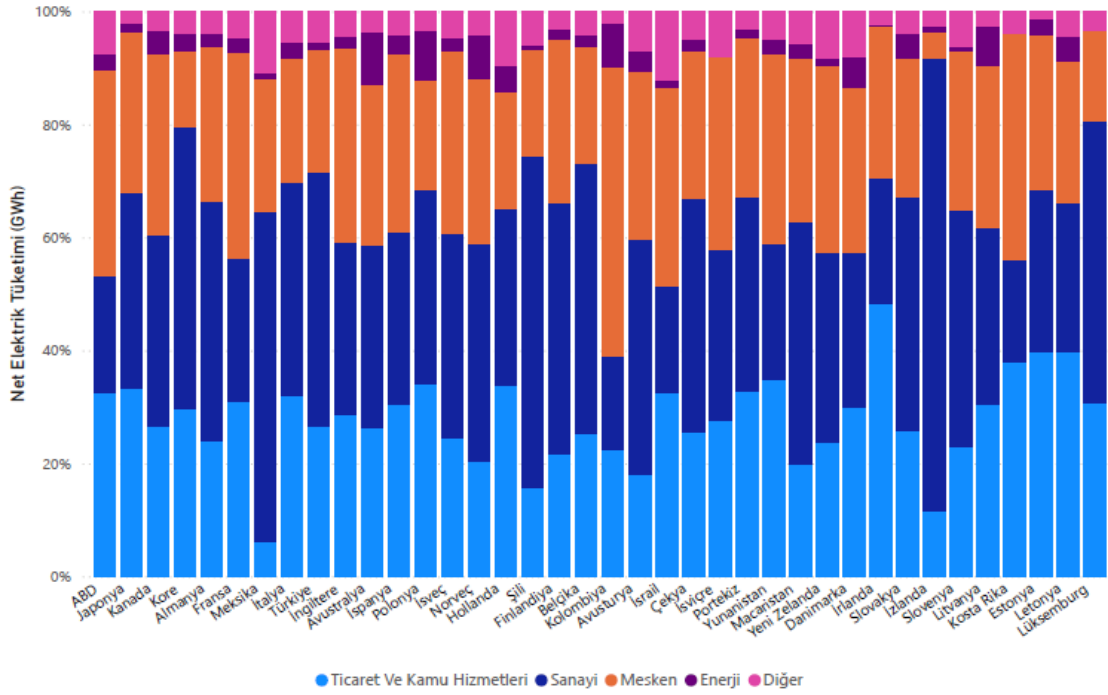
Çizelge 2.1. OECD ülkeleri net elektrik tüketimlerinin sektörel dağılımı (2022, TWh)

OECD ÜLKELERİ	MESKEN	TİCARET VE KAMU	SANAYİ	ENERJİ <sup>1</sup>	DİĞER <sup>2</sup>	TOPLAM	kWh/ Kişi
ABD	1.508,6	1.346,5	844,7	120,2	306,4	4.126,4	12.370
Almanya	134,3	117,6	207,6	11,7	18,3	489,5	5.841
Avustralya	69,3	64,4	78,6	22,9	8,5	243,8	9.371
Avusturya	19,7	12,0	27,6	2,3	4,7	66,1	7.307
Belçika	16,2	19,8	37,3	1,6	3,2	78,2	6.692
Çekya	15,7	15,4	24,7	1,3	2,9	59,9	5.603
Danimarka	9,5	9,7	8,8	1,7	2,6	32,3	5.463
Estonya	2,0	2,9	2,1	0,2	0,1	7,3	5.486
Finlandiya	22,7	17,0	34,8	1,4	2,4	78,3	14.090
Fransa	155,4	131,7	107,6	10,9	19,9	425,6	6.216
Hollanda	22,4	36,9	34,2	5,2	10,3	108,9	6.154
İngiltere	96,2	80,6	85,1	5,9	12,2	280,1	4.132
İrlanda	8,3	14,9	6,9	0,1	0,7	30,9	6.032
İspanya	73,5	70,4	70,9	7,5	9,6	231,8	4.850
İsrail	22,7	21,0	12,1	0,9	7,8	64,5	6.749
İsveç	40,6	30,9	45,5	3,0	5,9	125,8	11.991
İsviçre	19,4	15,8	17,3	0,0	4,6	57,0	6.498
İtalya	64,6	95,0	111,6	8,9	15,7	295,9	5.013
İzlanda	0,9	2,2	15,3	0,2	0,5	19,0	51.436
Japonya	262,2	306,9	317,6	13,1	20,0	919,9	7.362
Kanada	179,2	148,0	190,3	22,4	19,0	559,0	14.355
Kolombiya	39,0	17,2	12,5	6,0	1,5	76,2	1.508
Kore	75,0	166,0	278,6	16,4	22,2	558,1	10.810
Kosta Rika	4,2	4,0	1,9	0,0	0,4	10,4	2.001
Letonya	1,7	2,7	1,8	0,3	0,3	6,7	3.562
Litvanya	3,3	3,5	3,6	0,8	0,3	11,5	4.044
Lüksemburg	1,0	1,9	3,1	0,0	0,2	6,1	9.379
Macaristan	12,3	8,4	18,2	1,1	2,4	42,4	4.380
Meksika	71,2	18,9	177,0	2,8	33,1	302,8	2.355
Norveç	36,3	25,5	48,0	9,5	5,2	124,6	22.828
Polonya	30,0	52,9	53,2	13,6	5,3	155,1	4.100
Portekiz	13,9	16,2	17,0	0,8	1,5	49,5	4.803
Slovakya	5,9	6,2	9,9	1,1	0,9	24,0	4.367
Slovenya	3,7	3,0	5,5	0,1	0,8	13,1	6.225
Şili	15,0	12,6	46,9	0,6	4,8	80,0	4.034
Türkiye	61,7	76,3	129,0	4,3	15,2	286,6	3.360
Yeni Zelanda	13,0	9,3	13,1	0,5	3,2	39,0	7.592
Yunanistan	16,6	17,2	11,9	1,3	2,4	49,5	4.677
<b>OECD</b>	<b>3.147,1</b>	<b>3.001,6</b>	<b>3.111,7</b>	<b>300,3</b>	<b>574,8</b>	<b>10.135,6</b>	<b>7.349</b>

1 Kömür Ocakları, Petrol ve Gaz Çıkarımı, Petrol Rafinerileri vb.

2 Tarım, Taşımacılık ve Diğer alanların toplanmasıyla oluşturulmuştur.

Kaynak: IEA STATISTICS- Electricity Information 2024, TEDAŞ

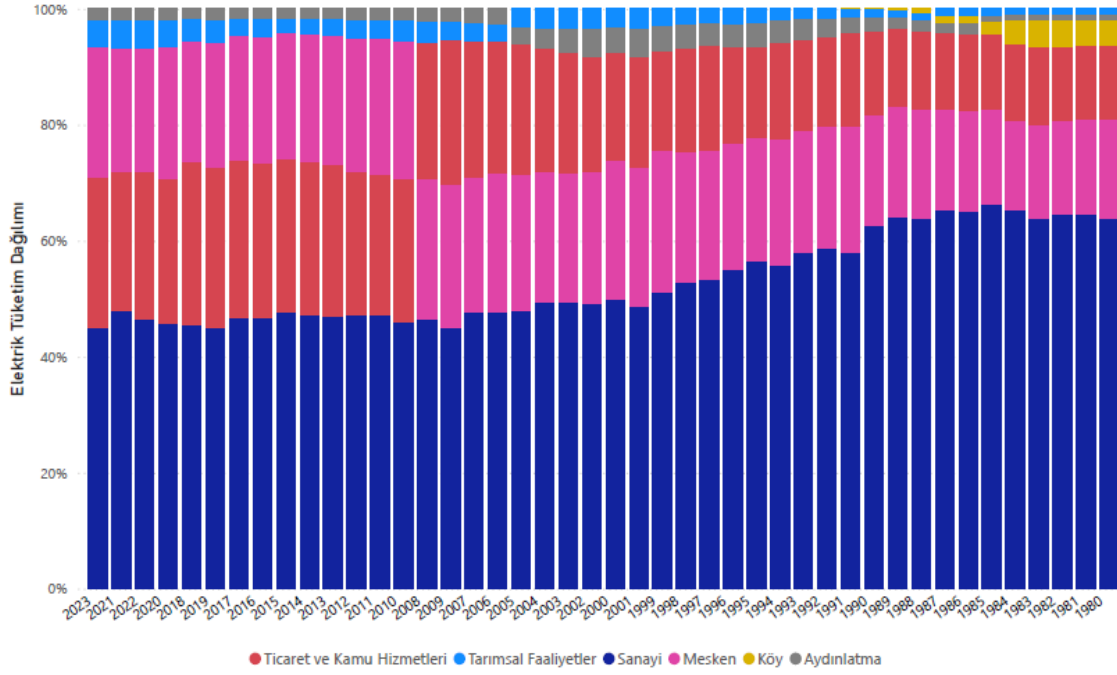


Şekil 2.1. 2022 yılı net elektrik tüketimlerinin OECD ülkelerine göre sektörel dağılımı

Çizelge 2.1 incelendiğinde OECD ülkeleri içinde 2022 yılına ilişkin en çok net elektrik tüketimi ABD’de gerçekleşmiştir. En düşük tüketim ise 6,1 TWh ile Lüksemburg’dadır. OECD ülkelerinin toplam tüketimine bakıldığında en fazla tüketim mesken alanında görülürken ikinci en fazla tüketim sanayi alanındadır.

OECD ülkelerinin 2022 yılındaki net elektrik tüketimi Şekil 2.1’de görüldüğü üzere Sanayi, Mesken ile Ticaret ve Kamu Hizmetleri alanlarında yoğunlaşmıştır. İzlanda’da sanayi tüketimi oransal olarak yüksek görünmektedir. Kolombiya’da ise mesken tüketimi yoğunlaşmaktadır.

OECD verilerine göre 2022 yılında konut sektörü nihai enerji tüketimi ABD’de 1508,6 TWh, Japonya’da 262,2 TWh, Kanada’da 179,2 TWh, Fransa’da 155,4, Almanya’da 134,3 TWh, İngiltere’de 96,2 TWh, Kore’de 75,0 TWh, İspanya’da 73,5 TWh, Meksika’da 71,2 TWh, Avustralya’da 69,3 TWh, İtalya’da 64,6 TWh ve Türkiye’de 61,7 olarak gerçekleşmiştir. OECD ülkeleri ile Türkiye’nin konut sektörü nihai enerji tüketimi Çizelge 2.1 ‘de sunulmaktadır.



Şekil 2.2. Yıllar itibarıyla Türkiye net elektrik tüketiminin sektörlere dağılımı

1980 yılından itibaren Türkiye net elektrik tüketimi Şekil 2.2’de görüldüğü gibi giderek azalmakla birlikte Sanayi alanında yoğunlaşmaktadır. Mesken ile Ticaret ve Kamu Hizmetleri tüketimin yoğunlaştığı diğer alanlardır.

Çizelge 2.2. Faturalanan elektrik tüketiminin tüketici türü bazında yıllar itibarıyla gelişimi

Tüketici Türü	Tüketim Miktarı (MWh)			
	2020	2021	2022	2023
Sanayi	99.635.062	111.762.705	108.369.171	103.962.230
Mesken	60.437.634	61.603.820	61.868.288	66.200.970
Kamu ve Özel Hizmetler Sektörü ile Diğer	57.328.859	60.839.211	64.550.205	65.947.930
Tarımsal Faaliyetler	10.947.411	13.497.475	13.332.526	13.426.456
Aydınlatma	5.048.410	5.353.694	5.501.261	5.530.430
<b>Genel Toplam</b>	<b>233.397.377</b>	<b>253.056.905</b>	<b>253.621.451</b>	<b>255.068.017</b>

Kaynak: EPDK, Elektrik Piyasası 2023 Yılı Piyasa Gelişim Raporu [50]

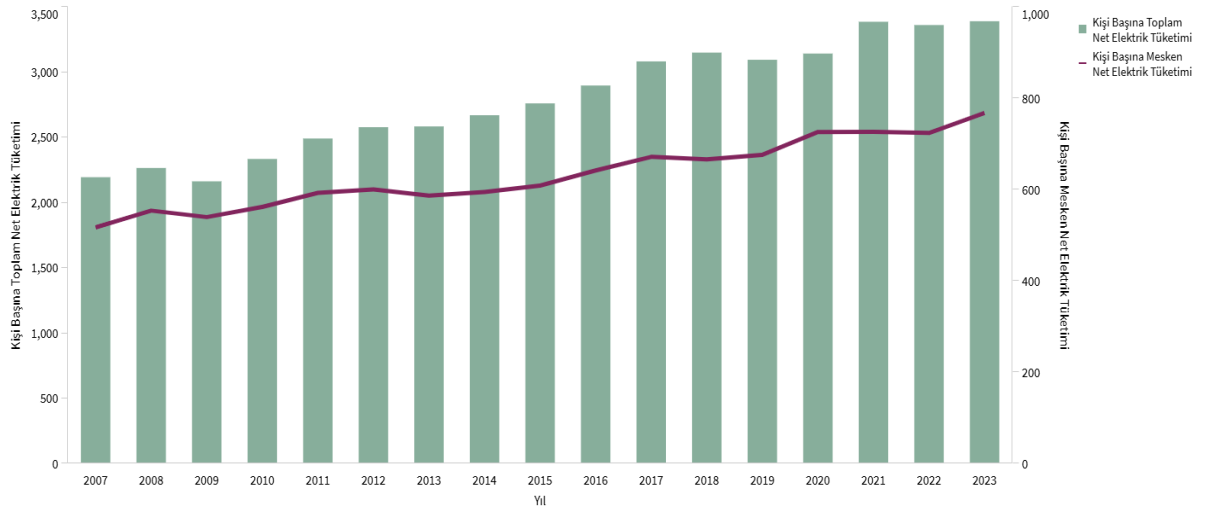
Türkiye için faturalanan tüketimin tüketici türüne göre dağılımı Çizelge 2.2’de gösterilmiş olup 2023 yılı için sanayi tüketimi %40,76 ile en yüksek paya sahiptir. Mesken tüketimi %25,95 ile ikinci sırada, Kamu ve özel hizmetler sektörü ile diğer

tüketimi ise %25,86 ile üçüncü sırada yer almaktadır. Aydınlatma ve tarımsal faaliyetlerde kullanılan elektrik tüketimi toplamı ise %7,43 olmuştur [50].

Elektrik tüketimi tahminleri, bir ülkenin ekonomik büyümesi, endüstriyel faaliyetleri ve halkın yaşam kalitesi ile sıkı bir ilişki içindedir. Bu nedenle, bu alandaki tahminler enerji politikaları, planlama ve sürdürülebilir kalkınma için temel bir rol oynamaktadır [51].

Günümüzde, elektrik tüketimi, endüstriyel tesislerden evlere kadar her alanda büyük bir role sahiptir. Bu bağlamda, elektrik tüketiminin etkili bir şekilde yönetilmesi ve tahmin edilmesi, enerji sektöründe ve daha geniş bir bağlamda toplumsal ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından önemlidir [51].

Türkiye'de kişi başı net elektrik enerjisi tüketimine ilişkin 2007 - 2023 dönemindeki tüketimi incelendiğinde (Şekil 2.3) 2007 yılından itibaren Türkiye'de kişi başı net elektrik enerjisi tüketimi sürekli bir artış göstermiştir. Bu artış, nüfus artışı, ekonomik büyüme ve sanayileşme gibi faktörlere bağlıdır. Türkiye'nin hızla gelişen bir ülke olması, elektrik talebinin artmasına neden olmuştur [51].



Şekil 2.3. Kişi başına toplam ve meskene ilişkin net elektrik tüketimi (kWh)

Kaynak: TEDAŞ

Toplumların refah seviyesi ile sıklıkla ilişkilendirilen kişi başına net elektrik tüketimi miktarı Şekil 2.3'te görüldüğü gibi 2007-2023 döneminde %53,2 oranında artarak 2194

kWh/kişiden 3360 kWh /kişiye yükselmiştir. Buna rağmen, Türkiye'nin kişi başına enerji tüketimi 2022 yılı OECD ortalaması olan 7349 kWh/kişi değerinin gerisinde kalmıştır.

### **2.3. Hane Halkı Enerji Tüketimi**

Dünya genelinde konutlarda kişi başına yıllık enerji talebi yaklaşık 2,5 MWh seviyesindedir. Bu talebin yaklaşık: %40'ı elektrikten, %40'ı doğal gazdan, %13'ü biyokütleden, %7'si ise petrolden karşılanmaktadır [52].

Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) 2023 Dünya Enerji Görünümü raporuna göre, küresel elektrik talebinin 2027 yılına kadar yıllık yaklaşık %4 oranında artması beklenmektedir. Bu artış, elektrikli araçların yaygınlaşması, klima kullanımının artması ve veri merkezlerinin enerji ihtiyacının yükselmesi gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Özellikle Çin ve Hindistan gibi büyük ve gelişmekte olan ekonomilerde elektrik talebinde önemli artışlar öngörülmektedir. Örneğin, Çin'in elektrik talebinin 2023 yılında %6,4 oranında artması beklenirken, Hindistan'da bu oranın %7 olması öngörülmektedir. Bu eğilimler, ekonomik büyüme ve hane halkı enerji kullanımındaki artışın etkisiyle, bu ülkelerde konut elektrik tüketiminin önemli ölçüde artacağını göstermektedir [53].

Binalarda Enerji Performans Yönetmeliği'nde bina; “kendi başına kullanılabilen, üstü örtülü olan insanların içine girebilecekleri ve insanların oturma, çalışma, eğlenme veya dinlenmelerine veya ibadet etmelerine yarayan ve hayvanların ve eşyaların korunmasına uygun yapı” olarak tanımlanmaktadır [54].

Türkiye'de bina sektörü, 2023 yılında 121 milyon 397 bin TEP olarak gerçekleşen toplam nihai enerji tüketimi içerisinde %32'lik pay ile en yüksek enerji tüketimine sahiptir. Bina sektörü enerji tüketimi, 26 milyon 428 bin TEP olan konut sektörü ile 12 milyon 743 bin TEP olan ticaret ve hizmetler sektörünün toplamından oluşmaktadır<sup>1</sup>.

Konut (mesken) sektörü, diğer bir adıyla hane halkı sektörü, ülkenin bütün hanelerinin toplamını tarif etmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'na (International Energy Agency, UEA) göre konut sektörünün enerji tüketimi, çölün ortasındaki göçebe çadırından

---

<sup>1</sup> Enerji tüketim verileri T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 15.11.2024 yayımlanma tarihli Enerji Denge Tablosundan alınmıştır [65].

anaketlerdeki çok katlı binalara kadar geniş bir aralığı temsil eden ve içerisinde en az bir kişinin yaşadığı özel ikametler ile ilişkilendirilmektedir [55].

Türkiye konut sektörü nihai enerji tüketimi son beş yılda %13 oranında artış göstermiştir. Ayrıca kişi başına mesken net elektrik tüketimi Şekil 2.3'te görüldüğü üzere artış eğilimi göstermektedir. Önümüzdeki yıllarda artan nüfus ve refah ile birlikte konut sektörünün enerji talebinin de artacağı öngörüldüğünde 2053 yılı net sıfır emisyon dönüşümünde odak sektörlerden biri olacağı değerlendirilmektedir [32].

### **2.3.1. Hane Halkı Enerji Tüketimini Belirleyen Faktörler**

Bu bölümde, hane halkı nihai enerji tüketiminde belirleyici olan demografik faktörler, ekonomik faktörler ve iklim koşulları ele alınmaktadır.

#### **2.3.1.1. Demografik Etkenler**

Türkiye'nin 2007 yılında 70,6 milyon olan nüfusu 2024 yılına kadar %21,4 oranında artarak 85,7 milyon kişiye ulaşmıştır [56].

Türkiye'de hane halkı sayıları, TÜİK- Gelir Dağılımı ve Yaşam Koşulları İstatistikleri çalışması ile yıllık olarak yayımlanmaktadır. 2007 yılında 17 milyon 802 bin olan hane halkı sayısı 2024 yılında 26 milyon 725 bine ulaşmıştır [57].

#### **2.3.1.2. Ekonomik Etkenler**

Enerji tüketimi üzerinde etkisi olduğu bilinen bir diğer faktör de ekonomik büyümedir. Hane halkı gelirinin artması ve tüketim harcamasının artması ile birlikte yükselen yaşam standartlarının enerji tüketimine bir etkisinin bulunması beklenir.

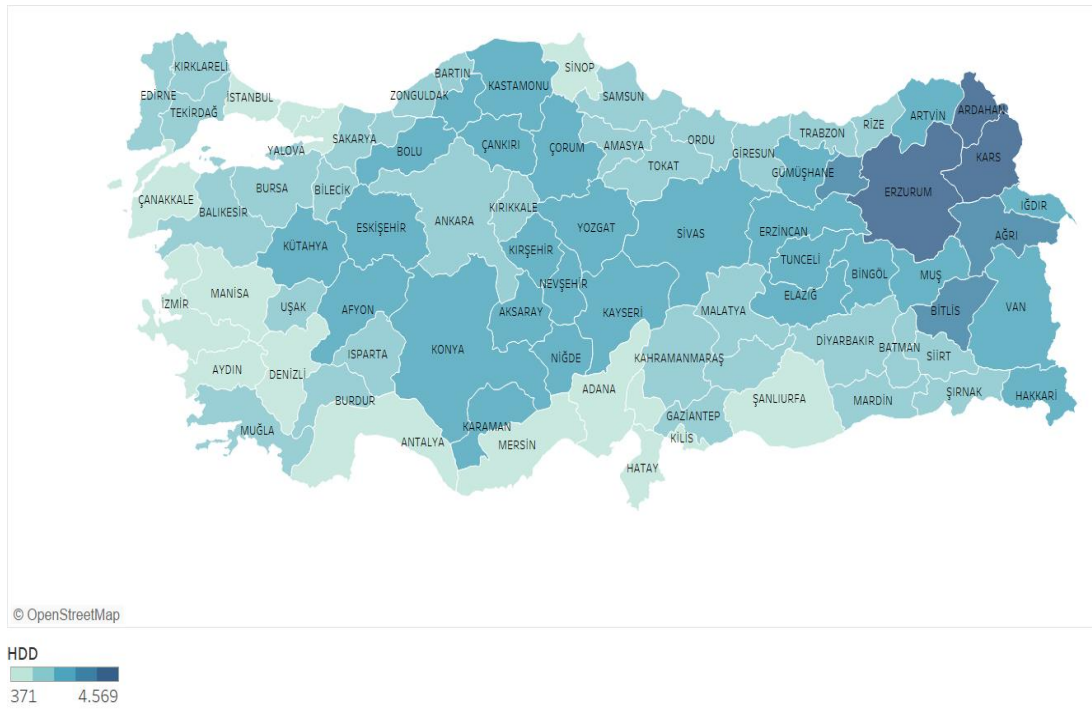
Yıllık hane halkı kullanılabilir geliri, 2007 yılında ortalama olarak 18 bin 827 TL iken 2023 yılında 181 bin 200 TL'ye yükselmiştir [57].

Toplam hane halkı tüketim harcaması, 2007 yılında aylık olarak 1 milyar 509 milyon TL iken 2023 yılında 22 milyar 318 milyon TL'ye yükselmiştir [58].

Cari fiyatlarla, harcama yöntemiyle GSYH (2009 Bazlı) da 2007-2023 döneminde sürekli bir artış eğilimi görülmektedir. GSYH analiz döneminde 887,7 milyar TL’den 26,5 trilyon TL’ye yükselmiştir<sup>2</sup>.

### 2.3.1.3. İklimsel Etkenler

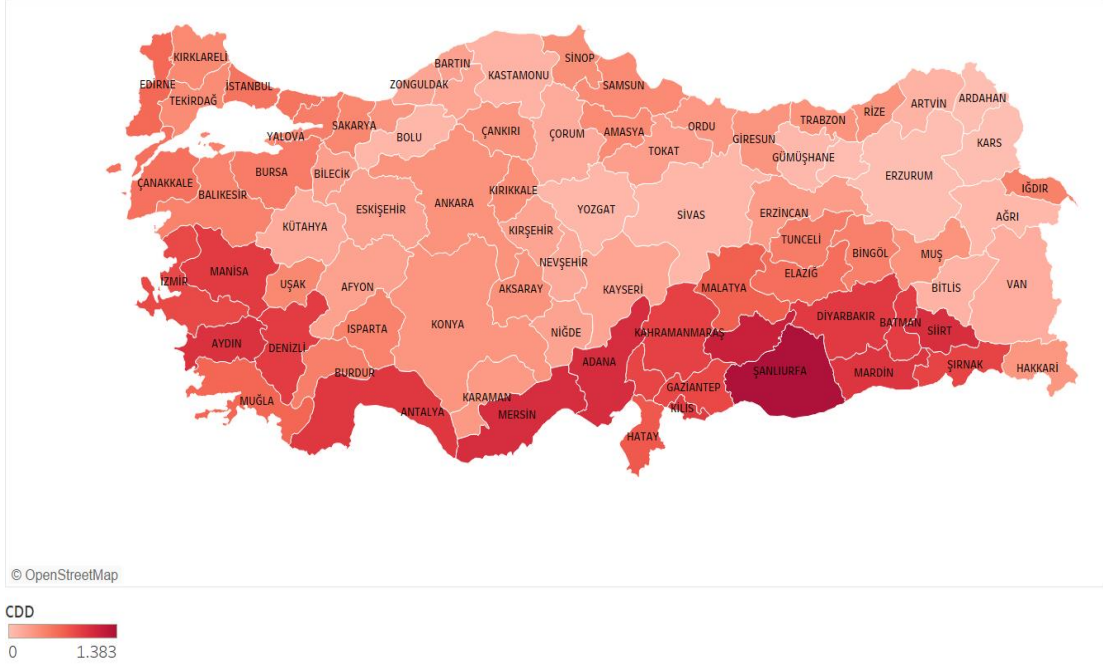
Konutlarda enerji tüketimi iklim ve hava koşullarıyla yakından ilgilidir. Dış ortam sıcaklığı, konutun ısıtma ve soğutma talebini etkilemektedir. Bir bölgenin soğukluk şiddetini ifade etmek için “ısıtma gün derecesi (Heating Degree Day, HDD)” göstergesi kullanılmaktadır. Benzer biçimde, sıcaklığın şiddetini ifade etmek için de “soğutma gün derecesi (Cooling Degree Day, CDD)” göstergesi kullanılmaktadır [59]. Türkiye için ısıtma ve soğutma gün dereceleri verisi ölçüm merkezleri bazında Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından paylaşılmaktadır.



Şekil 2.4. 2023 yılı Türkiye'nin ısıtma gün dereceleri

Şekil 2.4'e bakıldığında mavi rengin tonları koyulaştıkça özellikle Doğu Anadolu Bölgesinde ısıtma gün dereceleri yükselmektedir. Yani ısıtma ihtiyacı bu bölgelerde daha fazladır. Isıtma gereksinimi üst sınırı 4569 gün-derecedir.

<sup>2</sup> Gayrisafi yurt içi hasıla, harcama yöntemiyle cari fiyatlarla değer cinsinden hesaplanmıştır [69].



Şekil 2.5. 2023 yılı Türkiye'nin soğutma gün dereceleri

Şekil 2.5'e bakıldığında kırmızı rengin tonları koyulaştıkça özellikle ülkemizin güney illerinde soğutma gün dereceleri yükselmektedir. Yani soğutma ihtiyacı bu bölgelerde daha fazladır. Soğutma gereksinimi üst sınırı 1383 gün-derecedir.

Bu bölümde yer alan görseller Power BI, Qlik Sense ve Tableau veri görselleştirme programları kullanılarak oluşturulmuştur.

### 3. YÖNTEM

Bu bölümde Box-Jenkins Modelleri, Tekil Spektrum Analiz yöntemleri açıklanacak ve ARIMAX ile ÇTSA yöntemleri kıyaslanacaktır.

#### 3.1. Box-Jenkins Modelleri

Box ve Jenkins, 1976 yılında yayınladıkları kitaplarında, zaman serisi analizi için ARIMA modellerini kullanarak sistematik bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Bu yöntem büyük katkıları olduğundan ARIMA modellerine Box-Jenkins modelleri olarak da adlandırılmaktadır [60].

Box-Jenkins yöntemi sırasıyla Şekil 3.1'de görüldüğü üzere; seriye uygun modeli belirleme, modelin tahmini, tanısal denetimi ve öngörü işlemlerini içermektedir.

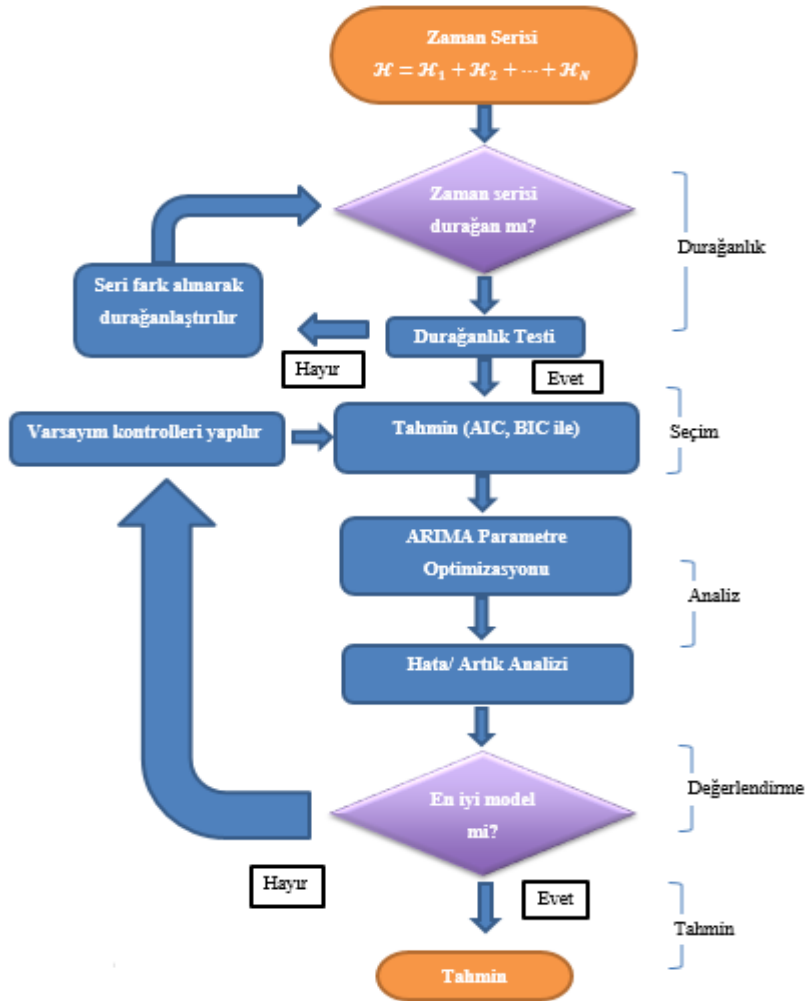
Bu işlemlerin yapılabilmesi için öncelikle serinin trendden ve mevsimsel dalgalanmalardan arındırılmış olmasına, yani serinin durağan olmasına dikkat edilmelidir.

Durağan olan ya da durağan hale dönüştürülen serinin ACF ve PACF grafiklerine göre seriye uygun olabilecek model belirlenir. Bu belirleme işlemine göre, eğer ACF grafiğindeki ilişki miktarları gecikme sayısı arttıkça yavaş yavaş azalıyor, ama PACF grafiğinde bu azalma bir anda yani hızlı bir şekilde oluyorsa seriye uygun model otoregresyon modeli (AR) olmaktadır. Aksi durumda, yani PACF grafiğindeki ilişki miktarları yavaş yavaş azalırken ACF grafiğindeki ilişki miktarları hızlı bir şekilde azalıyor ise model hareketli ortalama (MA) modeli olmaktadır. Hem ACF hem de PACF grafiklerinde ilişki miktarının azalışı yavaş yavaş olursa model otoregresif hareketli ortalama (ARMA) modeli olmaktadır.

ACF ve PACF grafiklerinden karar verilen modelin katsayılarından herhangi biri istatistiksel olarak önemsiz ise bu modelin seriye uygun olmadığı anlaşılır.

Box-Jenkins modellerinin katsayılarının tahmini en küçük kareler ya da en çok olabilirlik yöntemleriyle yapılmaktadır. Bu katsayıların önemlilik testi ise t testi ile yapılmaktadır. Eğer model katsayılarının önemli olup olmadığı da dikkate alınarak ACF ve PACF

grafiklerinden belirlendiyse, bu modelden elde edilen tahmin değerlerinin gerçek değerlere yakın olup olmadığını görebilmek amacıyla tahmin serisi ile orijinal serinin birlikte grafiği çizilir ve bu iki serinin birbiri ile olan uyumuna bakılır. Ayrıca, tahminin alt sınır ile üst sınır değerleri de bulunarak orijinal serinin tahmin sınırları arasında kalıp kalmadığı kontrol edilir. En son olarak da tüm yöntemlerde olduğu gibi hata serisinin akgürültü olup olmadığını tespit edebilmek için hataların ACF ve PACF grafikleri çizilir ve Box-Ljung, Portmanteau gibi testlerin sonuçlarına bakılır. Bu kontrol işlemlerinin hepsine tanısal denetim adı verilir. Eğer tanısal denetim sonucunda birden fazla model seri için uygunsa yani modeldeki bütün terimlerin katsayıları istatistiksel olarak önemliyse, tahmin serisi ile orijinal seri arasında iyi bir uyum varsa, orijinal seri tahmin sınırlarının arasında kalıyorsa ve hata serisi akgürültü serisi ise bu modellerin arasından seriye en uygun modelin tespiti için model seçim kriterlerinin (Schwarz, Akaike Bilgi Kriterleri gibi) sonucuna bakılır. Bu kriterlerin kullanımı sonucunda elde edilen seriye en uygun model üzerinden öngörü değerleri hesaplanır [61].



Şekil 3.1. Box – Jenkins yönteminin adımları [68]

Box- Jenkins modelleri, mevsimsel ve mevsimsel olmayan modeller şeklinde ikiye ayrılmaktadır.

### 3.1.1. Mevsimsel Olmayan Box-Jenkins Modelleri

Bu modeller, otoregresyon modeli AR(p), hareketli ortalama modeli MA(q) ve otoregresif hareketli ortalama modeli ARMA(p, q) olarak 3 farklı şekildedir. Genel olarak, ARIMA(p, d, q) şeklinde gösterilmektedir. Burada

**p**: Oto-regresyon (AR) modelinin derecesini,

**d**: Entegre (I) kısmının derecesini, yani serinin durağan hale gelmesi için gereken fark alma sayısını,

**q**: Hareketli ortalama (MA) modelinin derecesini belirtir.

Oto-regresyon modelleri **AR(p)** aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$h_t = \tau + \theta_1 h_{t-1} + \theta_2 h_{t-2} + \dots + \theta_p h_{t-p} + \varepsilon_t.$$

Burada,

$h_t$  : Zaman serisinin t. dönemdeki gözlenen değerini,

$\tau$  : Sabit terimi (Eğer serinin sabit bir ortalaması varsa bu terim seriyi modelde temsil eder.),

$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$  : Oto-regresyon katsayıları (Geçmiş dönemlerin  $h_{t-1}, h_{t-2}, \dots, h_{t-p}$  üzerindeki etkisini ifade eder.)

$h_{t-1}, h_{t-2}, \dots, h_{t-p}$  : Zaman serisinin geçmiş dönem değerlerini,

$\varepsilon_t$  : t. dönemdeki hata terimini göstermektedir.

Ayrıca,  $h_t$  zaman serisi durağan ve  $\varepsilon_t$  hata terimi akgürültü serisidir.

Hareketli ortalama modelleri **MA(q)** aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$h_t = \tau + \varepsilon_t - \alpha_1 \varepsilon_{t-1} - \alpha_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \alpha_q \varepsilon_{t-q}.$$

Burada  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_q$  : Hareketli ortalama modelinin katsayılarını (Hata terimlerinin geçmiş dönemlerdeki etkilerini ifade eder.),

$\varepsilon_{t-1}, \varepsilon_{t-2}, \dots, \varepsilon_{t-p}$  : Geçmiş dönem hata terimlerini belirtmektedir.

Burada,  $h_t$  zaman serisi durağan ve  $\varepsilon_t$  hata terimi akgürültü serisidir.

Oto-regresif hareketli ortalama modeli **ARMA(p, q)** aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$h_t = \tau + \theta_1 h_{t-1} + \theta_2 h_{t-2} + \dots + \theta_p h_{t-p} + \varepsilon_t - \alpha_1 \varepsilon_{t-1} - \alpha_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \alpha_q \varepsilon_{t-q}.$$

Eğer seri kendiliğinden durağan değilse, yani seride trend varsa serinin farkı alınarak seri durağan hale getirilir. Bu durumda, ilgili modele I(d) terimi eklenir. Bu nedenle, Mevsimsel olmayan Box- Jenkins modelleri genel olarak ARIMA(p, d, q) şeklinde gösterilmektedir [61].

### 3.1.2. Mevsimsel Box-Jenkins Modelleri

Mevsimsel Box- Jenkins modelleri genelde ARIMA(p, d, q)(P, D, Q)<sub>s</sub> biçiminde ifade edilir. Burada

**P:** Mevsimsel Otoregresyon (SAR) modelinin derecesini,

**D:** Mevsimsel Entegre (SI) kısmının derecesini, yani serinin durağan hale gelmesi için gereken mevsimsel fark alma sayısını,

**Q:** Mevsimsel Hareketli ortalama (SMA) modelinin derecesini,

**S:** Periyodu belirtmektedir.

Mevsimsel Box-Jenkins modellerinin istatistiksel analizi mevsimsel olmayan Box-Jenkins modelleriyle aynı işlemsel adımlarla yapılmaktadır. Bu modellerin belirlenebilmesi için serilerin durağan hale getirilmesi, yani fark işlemi ile trendden, mevsimsel fark işlemi ile de mevsimsellikten arındırılması gerekmektedir. Mevsimsel Box-Jenkins Modellerinin çeşitleri ve model denklemleri aşağıdaki gibi özetlenmektedir.

- **Mevsimsel Otoregresyon SAR(P)<sub>s</sub> Modelleri**

Mevsimsel Otoregresyon SAR(P)<sub>s</sub> modelinin denklemi

$$(1 - \Theta_1 B^S - \Theta_2 B^{2S} - \dots - \Theta_p B^{Ps}) h_t = \varepsilon_t$$

şeklinde ifade edilir. Bu modelde,

$\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_p$ : Mevsimsel otoregresyon (SAR) modelinin katsayılarını göstermektedir.

- **Mevsimsel Hareketli Ortalama SMA(Q)<sub>s</sub> Modelleri**

Mevsimsel Hareketli Ortalama SMA(Q)<sub>s</sub> modelinin denklemi

$(1 - A_1B^s - A_2B^{2s} - \dots - A_pB^{Qs})\varepsilon_t = \hat{h}_t$  şeklinde ifade edilir. Bu modelde,  $A_1, A_2, \dots, A_q$  : Mevsimsel hareketli ortalama (SMA) modelinin katsayılarını belirtmektedir [61].

- **Mevsimsel Otoregresif Hareketli Ortalama Modelleri**

En genel Box-Jenkins modeli olan ARIMA(p, d, q)(P, D, Q)<sub>s</sub> modeli,

$$(1 - \theta_1B - \theta_2B^2 - \dots - \theta_pB^p)(1 - \Theta_1B^s - \Theta_2B^{2s} - \dots - \Theta_pB^{Ps})(1 - B)^d(1 - B^s)^D \hat{h}_t = (1 - \alpha_1B - \alpha_2B^2 - \dots - \alpha_qB^q)(1 - A_1B^s - A_2B^{2s} - \dots - A_pB^{Qs})\varepsilon_t.$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu modele *karma çarpımsal Box-Jenkins* modeli de denilmektedir [61].

ARIMA modelleri, 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 [62].

### 3.1.3. Dışsal Değişkenli Otoregresif Bütünleşik Hareketli Ortalama Modeli (ARIMAX)

ARIMAX (Autoregressive Integrated Moving Average with eXogenous regressors, Dışsal Değişkenli Otoregresif Bütünleşik Hareketli Ortalama) modeli, ARIMA modelinin gelişmiş hali olup, dışsal değişkenleri de dikkate alarak zaman serisi analizi yapmaktadır. Bu sayede model, sadece geçmiş verilere değil, aynı zamanda dışsal etkilere de odaklanır. Bu model, bağımlı değişkenin zaman serisindeki otokorelasyon yapısını hesaba katarken aynı zamanda dışsal faktörlerin (ekonomik, demografik, sosyal ve çevresel şartlara bağlı değişkenler gibi) etkilerini de modelleyerek daha güçlü tahminler sağlamaktadır [62].

ARIMAX modelinin genel denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\hat{h}_t = \tau + \sum_{i=1}^p \theta_i \hat{h}_{t-i} + \sum_{i=1}^q \alpha_i \varepsilon_{t-i} + \sum_{j=1}^k \beta_j \mathcal{X}_{j,t} + \varepsilon_t.$$

Bu modelde,

$\mathcal{X}_{j,t}$ : t. dönemdeki dışsal (exogenous) değişkenleri ifade eder, bağımlı değişkeni açıklamak için kullanılır. Modelde j adet dışsal değişken vardır. Ayrıca,

$\beta_j$  : Dışsal değişkenlerin katsayılarıdır, her bir dışsal değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisini göstermektedir [62].

### 3.1.3.1. Dışsal Değişkenli Mevsimsel Otoregresif Bütünleşik Hareketli Ortalama Modeli (SARIMAX)

SARIMAX (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with eXogenous Regressors, Dışsal Değişkenli Mevsimsel Otoregresif Bütünleşik Hareketli Ortalama) modeli, ARIMAX modelinin mevsimsel bileşene sahip daha gelişmiş bir halidir. Trend, mevsimsellik ve dışsal değişkenlerin etkilerini bir arada ele alarak esnek bir yapı sunmaktadır. Belirli dönemde tekrarlayan etkileri de hesaba katmayı amaçlamaktadır.

SARIMAX modeli SARIMAX(p, d, q)(P, D, Q, S) olarak gösterilebilir ve daha detaylı şekilde aşağıdaki model denklemi ile ifade edilebilir:

$$h_t = \tau + \sum_{i=1}^p \theta_i h_{t-i} + \sum_{i=1}^q \alpha_i \varepsilon_{t-i} + \sum_{j=1}^k \beta_j X_{j,t} + \sum_{i=1}^P \Theta_i h_{t-s.i} + \sum_{i=1}^Q A_i \varepsilon_{t-s.i} + \varepsilon_t.$$

**SARIMAX** (Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average with Exogenous variables) ve **SARIMA** (Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average) modelleri arasındaki temel farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar aşağıdaki biçimde özetlenmektedir.

SARIMA modeli, zaman serisi verilerindeki mevsimsellik örüntülerini modellemek için kullanılan bir ARIMA modelinin genişletilmiş halidir. **Otoregresyon (AR)**, **entegre (I)** ve **hareketli ortalama (MA)** bileşenlerini kullanarak serinin geçmiş değerlerine ve hatalarına dayanarak gelecek değerleri tahmin etmeye çalışır. Serideki düzenli mevsimsel dalgalanmaları modellemek için ek parametreler içerir. Bu parametreler, belirli bir periyotta tekrar eden örüntüleri yakalamaya olanak tanır. Tahmin yaparken sadece serinin geçmiş değerlerini kullanır ve **dışsal (exogenous)** değişkenleri dikkate almaz. Bu, modelin yalnızca serinin kendi içsel dinamiklerini analiz ettiği anlamına gelir. Birçok durumda, gelecekteki değerlerin sadece geçmiş değerler tarafından belirlendiği varsayımı yetersiz kalabilmektedir.

SARIMAX modeli ise, SARIMA modelinin **dışsal değişkenleri** de dahil edebilecek şekilde genişletilmiş bir versiyonudur. Bu model, temel ARIMA bileşenlerine ek olarak,

zaman serisini etkileyebilecek **dış faktörleri** de hesaba katar. Dışsal değişkenlerin zaman serisi üzerindeki etkisini modelleyerek daha doğru tahminler yapmayı amaçlar. Bu değişkenler, modelin tahmin yeteneğini artırabilir ve karmaşık sistemlerin daha iyi anlaşılmasını sağlayabilir. Özellikle dışsal faktörlerin önemli rol oynadığı finans, ekonomi, çevre bilimi, sağlık, enerji ve ulaşım gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılır. SARIMAX modelinin gücü, otoregresif ve hareketli ortalama bileşenlerini dış değişkenlerle birleştirme yeteneğinden kaynaklanmaktadır.

**SARIMA** modeli, zaman serisi verilerindeki mevsimsel örüntüleri modellemek için iyi bir başlangıç noktasıdır. Ancak, dışsal değişkenlerin etkisi önemliyse, **SARIMAX** modeli daha uygun ve etkilidir. **SARIMAX**, karmaşık sistemlerde daha kapsamlı bir analiz ve daha doğru tahminler için daha güçlü bir araçtır. Bu model, dışsal faktörleri de dahil ederek, zaman serisi tahminlerinde daha geniş bir perspektif sunar. İki model arasındaki farklılıklar Çizelge 3.1 ile karşılaştırma kolaylığı sağlamaktadır.

Çizelge 3.1. SARIMA ve SARIMAX modellerinin özet karşılaştırması

Özellik	SARIMA	SARIMAX
<b>Temel Bileşenler</b>	AR, I, MA ve mevsimsellik bileşenleri	AR, I, MA, mevsimsellik bileşenleri ve <b>dışsal değişkenler</b>
<b>Dışsal Değişkenler</b>	Dikkate almaz.	Dikkate alır.
<b>Tahmin Yeteneği</b>	Sadece serinin kendi geçmiş değerlerine dayanır.	Serinin geçmiş değerlerine ek olarak, dışsal değişkenlerin etkisini de hesaba katarak daha doğru tahminler yapabilir.
<b>Kullanım Alanları</b>	Genellikle içsel dinamiklerin yeterli olduğu durumlarda kullanılır.	Dışsal faktörlerin önemli olduğu durumlarda daha uygundur.

### 3.2. Tekil Spektrum Analiz (TSA)

Bu bölümde, Tekil spektrum analiz algoritmasını açıklayabilmek için gerekli tanımlamalar verilerek daha sonra **Tekil Spektrum Analiz (TSA)** açıklanacaktır.

#### *Özdeğerler ve Özvektörler (Eigenvalues and Eigenvectors)*

$C$  bir kare matris olmak üzere, bir  $\lambda$  skaler büyüklüğü  $C$  matrisinin öz değeridir (eigenvalue). Bir  $\vec{x} \in \mathbb{R}^m$  vektör,  $\vec{x} \neq 0$  olacak şekilde, ( $\mathbb{R}^m$  :  $m$  boyutlu uzayda tüm reel

vektörlerin oluşturduğu kümeyi ifade eder.)  $\vec{x}$  vektörü  $\lambda$  özdeğerine karşılık gelen özvektör olarak adlandırılır.  $C_{n \times n}$  boyutlu bir kare matris

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix}$$

olsun.  $\lambda$  özdeğeri için

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

eşitliği yazılabilir. Benzer şekilde,

$$\begin{bmatrix} c_{11} - \lambda & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} - \lambda & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} - \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

ifade edilebilir. Ayrıca,  $(C - \lambda I)\vec{x} = 0$  koşulu sağlanmaktadır. Yani,  $\det(C - \lambda I) = 0$  dır. Öz değerler ve öz vektörler bu denklem yardımıyla bulunmaktadır [63].

### ***Bir Matrisin Köşegen (Diagonal) Formu***

$T$ ,  $n$  adet doğrusal bağımsız öz vektöre sahip  $n \times n$  boyutlu bir kare matris olmak üzere,

$\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n$  vektör kümesinin  $a_1\vec{v}_1 + a_2\vec{v}_2 + \dots + a_n\vec{v}_n = 0$ ;  $a_i = 0$ ;  $i = 1, \dots, n$  olması koşuluyla doğrusal bağımsız olmaktadır.

$B, T$  matrisinin öz vektörlerinden oluşan bir matris olmak üzere,

$$B^{-1}TB = \gamma$$

$\gamma$  köşegen (diyagonal) bir matristir ve negatif olmayan girdileri  $T$ 'nin öz değerleridir [63].

### ***LU Ayrıştırması ve LDU Ayrıştırması***

LU (Lower – Upper) ayrıştırması, bir  $C$  matrisini çarpanlarına ayırma yöntemidir. Bir alt üçgen matris ( $E$ ) ile bir üst üçgen matrisin ( $F$ ) çarpımı,  $C$  matrisini verecektir. Örneğin,  $C_{n \times n}$  verildiğinde, ayrıştırma şöyledir:

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & & & 0 \\ e_{21} & e_{22} & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ e_{n1} & e_{n2} & \cdots & e_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{22} & \cdots & f_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & & & f_{nn} \end{bmatrix}.$$

Bir matris sıfırdan farklı pivotlara sahipse, benzersiz bir LU ayrışımına sahiptir [3]. Yani matris  $C = EF$  şeklinde doğrudan ayrıştırılabilir (Bir matrisin pivotu, bir matrisin satır işlemleriyle belirli bir düzenlemeye getirilmiş hâline (satur eşelon formuna) dönüştürüldüğünde her satırdaki ilk sıfır olmayan elemandır.)

LDU (Lower - Diagonal - Upper) ayrıştırması, yine bir  $C$  matrisinin, köşegeninde birler olan alt üçgen matris ( $E$ ), köşegeninde birler olan birim üst üçgen matris ( $F$ ) ve köşegen matris ( $D$ ) çarpımını verecektir. Bu nedenle  $C, C = EDF$  şeklinde yazılabilir.  $C_{n \times n}$  için LDU ayrıştırması şöyledir:

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & 0 \\ e_{21} & 1 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ e_{n1} & e_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 & & & 0 \\ & d_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & d_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & f_{12}/d_1 & \cdots & f_{1n}/d_1 \\ & 1 & \cdots & f_{2n}/d_2 \\ & & \ddots & \vdots \\ 0 & & & 1 \end{bmatrix}.$$

Tekil bir matrise, (Determinantı sıfıra eşit olan matrisler tekil matrisler olarak adlandırılır. Determinantın sıfır olması tersinin alınamayacağı anlamına gelir.) LU ayrıştırması veya LDU ayrıştırması uygulanamaz, çünkü pivot elemanları sıfır olmayan bir matris oluşmayacaktır. (Pivot elemanları matrisin köşegenindeki elemanlardır.) LDU ayrıştırması uygulanırken, matrisin pivot elemanlarının sıfır olmaması gerekir. Burada, odak nokta tekil olmayan matrisler olacaktır [63].

### ***Spektral (Spectral) Ayrıştırma***

$\mathcal{Y}$  gerçel (reel) ve simetrik bir matris olmak üzere,  $\mathcal{Y}$ 'nin her öz değeri gerçel (reel) bir sayı olur. Eğer  $\mathcal{Y}$  matrisinin tüm öz değerleri birbirinden farklıysa bu öz değerlere karşılık gelen öz vektörler ortogonal (İki vektörün ortogonal olması, bu vektörlerin birbirine dik olması anlamına gelir. Yani bu vektörlerin skaler çarpımı sıfırdır.) olmaktadır.

Herhangi iki öz vektör  $\vec{v}_i$  ve  $\vec{v}_j$  için,

$$\vec{v}_i^T \cdot \vec{v}_j = 0, \forall i \neq j$$

olur.

Öz vektörler, elemanları normlarına bölünerek, birim uzunlukta (vektör uzunluğu, normu 1 olan) vektörlere dönüştürülebilir. Böylece normalleştirilmiş olurlar.

$$\vec{e}_i = \frac{\vec{v}_i}{\|\vec{v}_i\|}$$

Burada  $\vec{e}_i$  normalleştirilmiş öz vektördür.  $\|\vec{v}_i\|$ ,  $\vec{v}_i$ 'nin normudur.

Norm aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\|\vec{v}_i\| = \sqrt{v_{1i}^2 + v_{2i}^2 + \dots + v_{ni}^2}.$$

Burada  $v_{1i}, v_{2i}, \dots, v_{ni}$  öz vektörün bileşenleridir.

$$\vec{e}_i^T \cdot \vec{e}_j = 0, (i \neq j \text{ için})$$

ve

$$\vec{e}_i^T \cdot \vec{e}_j = 1, (i = j \text{ için})$$

olması koşuluyla  $\vec{e}_i$  ler bir ortonormal öz vektörler kümesidir.

$Z, Y$  matrisinin ortonormal özvektörleri tarafından oluşturulan bir matris olsun.

$$Z^{-1}YZ = \gamma$$

$Z^T, Z$  matrisinin transpozunu ve  $Z^{-1}, Z$  matrisinin tersini ifade edecek şekilde,  $Z^T Z = I$  yani,  $Z^T = Z^{-1}$  olur. Böylece,  $Y = Z \gamma Z^T$  olarak yazılabilir. Bu gösterime **spektral ayrışım** denmektedir. Burada  $Z, Y$ 'nin öz vektörlerini içeren bir matrisi;  $\gamma, Y$ 'nin öz değerlerini içeren köşegen bir matrisi göstermektedir.

Alternatif olarak spektral ayrıştırma,

$$Y = \lambda_1 \vec{e}_1 \vec{e}_1^T + \lambda_2 \vec{e}_2 \vec{e}_2^T + \dots + \lambda_n \vec{e}_n \vec{e}_n^T$$

şeklinde de ifade edilebilir. Bu gösterim,  $Y$  matrisinin öz değerler ve öz vektörler cinsinden ifade edilmesini sağlar. Burada,

$\lambda_i$ :  $Y$  matrisinin  $i$ . öz değerini,

$\vec{e}_i$ :  $\lambda_i$ 'ye karşılık gelen ortonormal öz vektörü,

$\vec{e}_i^T$ :  $\lambda_i$ 'ye karşılık gelen ortonormal öz vektörün transpozunu ifade etmektedir [63].

**Tekil Spektrum Analiz** (Singular Spectrum Analysis, TSA) zaman serilerini ayrıştırıran ve tahmin eden bir zaman serisi analiz yöntemidir. Zaman serisi analizi, dinamik sistemler ve sinyal işleme araçlarını içerir [63]. Kullanılan ana matematiksel araç tekil değer ayrıştırmasıdır. TSA yöntemi, orijinal zaman serisini mevsimsellik ve gürültü ile ilişkilendirilebilecek bir trend ve salınım bileşenleri olarak ayrıştırır.

TSA, temel olarak zaman serilerinin ayrıştırılması ve öngörülmesi için kullanılan model bağımsız (model-free method)<sup>3</sup> bir zaman serisi analiz yöntemidir. Yani, bu yöntemde, zaman serilerindeki desenleri ve yapıları keşfederken önceden belirlenmiş bir model (örneğin, ARIMA veya başka bir zaman serisi modeli) kullanılmaz. Bunun yerine, verilerin kendi iç yapısını analiz etmek için doğrudan matematiksel teknikler kullanılır. Tekil Spektrum Analizin temel amacı, bir zaman serisini bileşenlerine ayırarak (trend, mevsimsellik ve gürültü gibi) analiz etmektir. Kullanılan ana matematiksel araç tekil değer ayrıştırmasıdır.

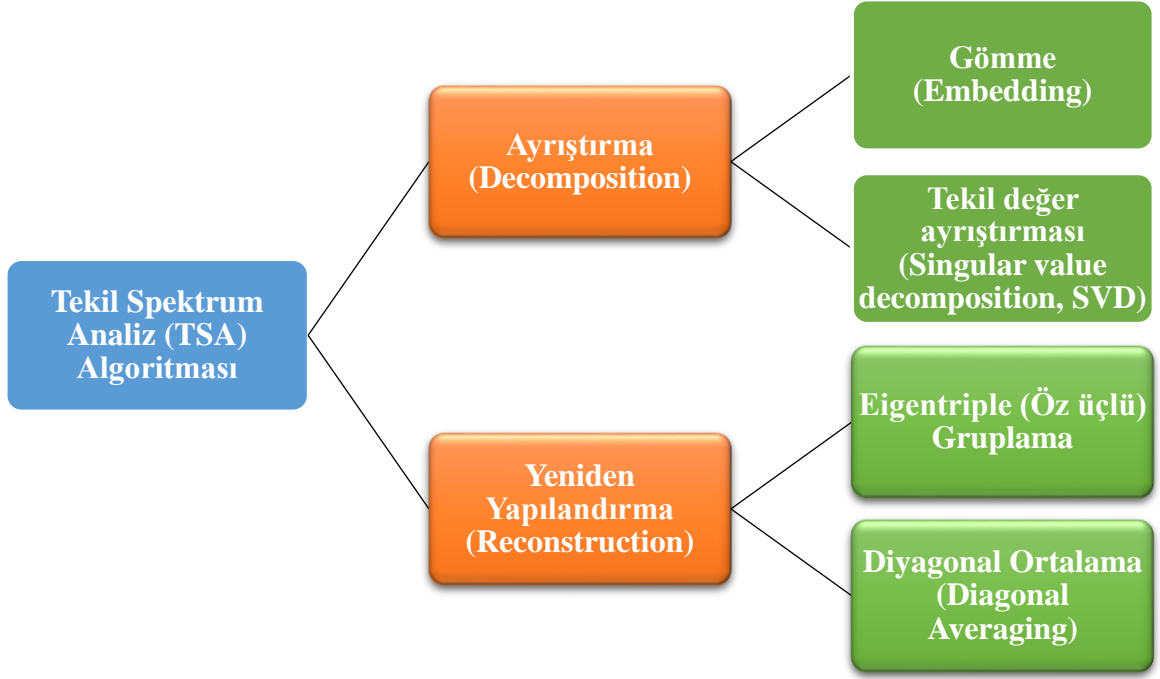
TSA, zaman serisi verilerinde düzenli desenleri, döngüleri veya eğilimleri tespit etmek için kullanılan bir tekniktir. Model bağımsız olması veri üzerinde yapılan analizlerin önceden belirlenmiş bir modelin varsayımlarına dayanmadan yapılmasını sağlar ve bu da metodun esnekliğini artırır. Bu yöntem genellikle mevsimsel bileşenleri, trendleri ve gürültüyü ayırmak için kullanılır.

### **3.2.1. Tekil Spektrum Analiz (TSA) Algoritması**

Tekil Spektrum Analizin temel algoritması iki temel aşama içermektedir: ayrıştırma (decomposition) ve yeniden yapılandırma (reconstruction). Her aşamanın iki adımı vardır. Ayrıştırma; gömme (embedding) ve tekil değer ayrıştırmasından (singular value decomposition, SVD), yeniden yapılandırma aşaması ise eigentriple gruplama (öz üçlü gruplama) ve diyagonal ortalamadan oluşmaktadır (Şekil 3.2).

---

<sup>3</sup> Belirli bir modelin varsayımlarına dayanmadan, doğrudan verilerden özellik çıkarımı yapmayı ifade eder. Yani, bu yöntemde, zaman serilerindeki desenleri ve yapıları keşfederken önceden belirlenmiş bir model (örneğin, ARIMA veya başka bir zaman serisi modeli) kullanılmaz. Bunun yerine, verilerin kendi iç yapısını analiz etmek için doğrudan matematiksel teknikler kullanılır.



Şekil 3.2. Tekil Spektrum Analiz Algoritması aşamaları

### 3.2.1.1. Ayrıştırma (Decomposition)

Ayrıştırma aşaması gömme (embedding) ve tekil değer ayrıştırması adımlarından oluşmaktadır.

#### **Gömme (Embedding)**

Bu adımın amacı, orijinal zaman serisini **yörünge matrisine** (trajectory matrix) eşitlemektir.  $\mathcal{H}_N = (\mathcal{h}_1, \mathcal{h}_2, \dots, \mathcal{h}_N)$   $N$  uzunluğunda bir zaman serisidir ve  $N > 2$  olmalıdır. Ayrıca, bu seri tamamen sıfır değerinden oluşmamalıdır.

İlk adım olan gömme işleminde,  $L$  pencere uzunluğu (window length) olmak üzere  $2 \leq L \leq N/2$  olacak şekilde bir tamsayı ve  $K = N - L + 1$  olarak tanımlanmaktadır.  $L$  boyutunda 'gecikmeli vektör (lagged vector)' ya da  $L$ -gecikmeli vektör,  $\vec{\mathcal{H}}_i = (\mathcal{h}_i, \dots, \mathcal{h}_{i+L-1})^T$  ( $1 \leq i \leq K$ ) olacak şekilde ifade edilmektedir. Tüm  $L$ -gecikmeli vektörler tarafından  $L$ -yörünge matrisi aşağıdaki gibi oluşturulmaktadır:

$$\mathcal{C} = [\vec{\mathcal{H}}_1, \vec{\mathcal{H}}_2, \dots, \vec{\mathcal{H}}_K] = (\mathcal{C}_{ij})_{i,j=1}^{L,K}$$

ya da

$$C = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & \dots & h_K \\ h_2 & h_3 & h_4 & \dots & h_{K+1} \\ h_3 & h_4 & h_5 & \dots & h_{K+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ h_L & h_{L+1} & h_{L+2} & \dots & h_N \end{bmatrix}$$

$C$ ,  $L \times K$  boyutlu bir matristir. Matrisin  $(i, j)$  bileşeni  $C_{ij} = h_{i+j-1}$ 'dir, bu da  $C$  matrisinin sabit bir  $i + j$  değeri için aynı değeri aldığını gösterir [63].

### ***Tekil değer ayrıştırması (Singular value decomposition, SVD)***

Bu adımda yörünge matrisi  $C$  'e tekil değer ayrıştırması uygulanır.  $S = CC^T$  ve  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L$  azalan sırada  $S$  'nin öz değerleri olsun ( $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_L \geq 0$ ),  $U_1, U_2, \dots, U_L$  bu öz değerlere karşılık gelen  $S$  matrisinin ortonormal öz vektörleri olsun.  $V_i = C^T \cdot U_i / \sqrt{\lambda_i}$  ( $i = 1, 2, \dots, d$ ),  $d$ ,  $C$  matrisinin rankı olmak üzere  $\lambda_i > 0$  olacak şekilde  $i$  değerinin maksimumudur. Burada,  $d = \max\{i : \lambda_i > 0\}$  şeklinde tanımlanır.

Genellikle  $d, L$  ve  $K$ 'nin minimum değerine eşittir. Bu nedenle, yörünge matrisi şu şekilde ayrıştırılabilir:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_d$$

( $C_i = \sqrt{\lambda_i} \cdot U_i \cdot V_i^T$  iken).

$C_i$  matrisleri,  $C_i$ 'nin rankı 1 ise temel matrisler olarak adlandırılır.  $\sqrt{\lambda_i}, U_i, V_i$  tekil üçlüsü aynı zamanda tekil değer ayrışımının i. eigentriple'ı (ET) olarak da bilinir. Tekil üçlü her bir  $i$  için  $C_i$  matrisinin ayrıştırılmasında kullanılır ve tekil değer ayrışımının yapı taşlarıdır [63].

Tekil değer ayrıştırması; veri boyutunu azaltma, gürültü giderme gibi amaçlarla kullanılır.

#### **3.2.1.2. Yeniden Yapılandırma (Reconstruction)**

Yeniden yapılandırma aşaması, öz üçlü gruplaması (eigentriple gruplama) ve diyagonal ortalama (diagonal averaging) adımlarından oluşmaktadır.

#### ***Eigentriple Gruplama (Öz üçlü gruplaması)***

Tekil değer ayrıştırması sonrasında  $C = C_1 + C_2 + \dots + C_d$  elde edilir ve öz üçlü gruplama adımı  $\{1, 2, \dots, d\}$  kümesini  $\{I = I_1, I_2, \dots, I_m\}$  ayrık alt kümelerine yeniden

gruplandırır. Burada her  $I_j$  birden fazla  $C_i$  içerebilen alt kümedir ve her  $I_j$  birbirinden farklıdır. Yani  $C = C_1 + C_2 + \dots + C_d$  yeniden düzenlenerek  $C = C_{I_1} + C_{I_2} + \dots + C_{I_m}$  şeklinde yazılır. Her bir  $C_{I_j}, I_j$  alt kümesindeki  $C_i$  lerin toplamıdır. Tüm bu işlemler **öz üçlü gruplama** olarak adlandırılır.

$I_j = \{j\}$  olmak üzere  $m = d$  ise, burada  $j = 1, 2, \dots, d$ , prosedürüne **temel gruplama** denir.

Bu adım, tekil değer ayrıştırması sonrasında elde edilen bileşenlerin daha büyük alt gruplara ayrılarak yeniden oluşturulmasını sağlar. Temel gruplama (elementary grouping) durumunda, bileşenler tek tek ele alınırken, genel durumda birden fazla bileşen birleştirilerek ele alınır [63].

### ***Diyagonal Ortalama (Diagonal Averaging)***

Öz üçlü gruplamadan sonra, her  $C_{I_j}$  matrisi  $N$  uzunluğunda yeni bir seriye dönüştürülecektir.  $T, L \times K$  boyutunda bir matris olsun.  $T_{ij}$ ,  $T$ 'nin elemanıdır ve  $T, t_1, t_2, \dots, t_N$  serilerine şu şekilde aktarılabilir:

$$t_p = \begin{cases} \frac{1}{p} \sum_{m=1}^p t_{m, p-m+1}^* & 1 \leq p < L^* \\ \frac{1}{L^*} \sum_{m=1}^{L^*} t_{m, p-m+1}^* & L^* \leq p \leq K^* \\ \frac{1}{N-p+1} \sum_{m=p-K^*+1}^{N-K^*+1} t_{m, p-m+1}^* & K^* < p \leq N \end{cases}$$

$1 \leq i \leq L, 1 \leq j \leq K$  ve  $L^* = \min(L, K), K^* = \max(L, K), N = L + K - 1, i + j = p + 1$ .

Örneğin;  $p = 1$  iken  $t_1 = t_{1,1}$  ve  $p = 3$  iken  $t_3 = \frac{t_{1,3} + t_{3,1} + t_{2,2}}{3}$  olur.

$C_{I_p}$  matrisine diyagonal ortalama uygulandıktan sonra,  $\tilde{Y}^{(p)} = (\tilde{y}_1^{(p)}, \tilde{y}_2^{(p)}, \dots, \tilde{y}_N^{(p)})$  olmak üzere,  $\tilde{Y}^{(p)}$  yeniden yapılandırılmış serisi elde edilir.

Orijinal seri  $Y_N, m$  adet yeniden yapılandırılmış serinin toplamı olarak ifade edilir.

$$y_n = \sum_{p=1}^m \tilde{y}_n^{(p)}, (n = 1, 2, \dots, N).$$

Burada:

1.  $y_n$ : Orijinal serinin n. terimi,
2.  $\tilde{y}_n^{(p)}$ : p. yeniden yapılandırılmış serinin n. terimi,
3.  $m$ : Gruplanan alt kümelerin sayısı (örneğin  $I = I_1, I_2, \dots, I_m$ ) dır [63].

Temel yeniden yapılandırılmış seriler, temel gruplama ile elde edilen yeniden yapılandırılmış serilerdir. Yani, her bir  $C_{I_p}$  matrisine ayrı ayrı diyagonal ortalama uygulanır.

Köşegen ortalama yöntemiyle, her bir  $C_{I_p}$  matrisinden yeniden yapılandırılmış bir zaman serisi  $\tilde{Y}^p$  elde edilir. Daha sonra, bu seriler toplanarak orijinal zaman serisi yeniden oluşturulur. Temel gruplama, her bileşeni tek başına ele alırken, diğer durumlarda bileşenler gruplanarak yeniden yapılandırılır.

Bu yöntem, hem gerçek zamanlı serilere hem de simüle edilmiş serilere uygulanabilir. Özellikle:

- Gürültüden arındırma,
- Örüntülerin ve trendlerin daha net şekilde ortaya çıkarılması,
- Zaman serisi analizi için ayrıştırılmış bileşenlerin incelenmesi gibi amaçlarla kullanılabilir [63].

### 3.2.2. Çok Değişkenli Tekil Spektrum Analiz (Multivariate, Multi-channel Singular Spectrum Analysis; ÇTSA)

Çok Değişkenli Tekil Spektrum Analiz (ÇTSA), TSA yönteminin çok değişkenli (multivariate) zaman serilerine genişletilmiş halidir. ÇTSA, birden fazla zaman serisi üzerinde aynı anda analiz yaparak ortak kalıpları, eğilimleri ve periyodiklikleri ortaya çıkarmayı amaçlar. ÇTSA, TSA'ya benzer şekilde, diğer adımların yanı sıra, gürültüden arındırma (denoising), trend çıkarma, nedensellik ve tahmin gibi birçok uygulamaya sahiptir. ÇTSA özellikle kısa ve uzun seri uzunluğuna sahip ekonomik ve finansal zaman serilerini analiz etmek ve tahmin etmek için popülerdir.

Bu bölümde, ÇTSA kullanılarak gürültüden arındırma ve tahmin ele alınacaktır:

$$\mathbb{Y}_n = \left[ y_n^{(1)}, \dots, y_n^{(M)} \right], n = 1, \dots, N.$$

$\mathbb{Y}$ ,  $N$  uzunluğunda  $M$  değişkenli bir zaman serisidir.

Çok değişkenli çerçevede her bir zaman serisi için farklı gözlem sayısı dikkate alınabilmektedir. Ancak burada eşit sayıda gözlem için anlatım yapılacaktır.

$\mathbb{Y}_n$  bir sinyal ve gürültü modeli cinsinden şu şekilde yazılabilir:

$$\mathbb{Y}_N = \begin{bmatrix} \mathbb{Y}_1 \\ \mathbb{Y}_2 \\ \vdots \\ \mathbb{Y}_N \end{bmatrix} = S_N + R_N = \begin{bmatrix} s_1^{(1)} & \dots & s_1^{(M)} \\ s_2^{(1)} & \dots & s_2^{(M)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_N^{(1)} & \dots & s_N^{(M)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1^{(1)} & \dots & r_1^{(M)} \\ r_2^{(1)} & \dots & r_2^{(M)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_N^{(1)} & \dots & r_N^{(M)} \end{bmatrix}$$

Buradaki amaç, gürültü  $R_N$  'yi verilerden çıkarmak ve sinyal için parametrik bir form belirtmek zorunda kalmadan, daha sonra tahmin için kullanılabilen bir sinyal  $S_N$  tahmini elde etmektir.

ÇTSA algoritması birbirini tamamlayan üç aşamadan oluşur: ayrıştırma, yeniden yapılandırma ve tahmin. İlk aşamada seri ayrıştırılır; ikinci aşamada gürültüden arındırılmış seri yeniden yapılandırılır ve son aşamada yeniden yapılandırılmış zaman serisi yeni veri noktalarını tahmin etmek için kullanılır. Bu algoritmadaki her aşama iki adım içerir.

### 3.2.2.1. Ayrıştırma

Ayrıştırma aşaması, gömme (embedding) ve tekil değer ayrıştırması adımlarından oluşmaktadır.

#### **Gömme (Embedding)**

TSA yöntemiyle benzer şekilde, pencere uzunluğu  $L$  ( $1 < L < N/2$ ) olarak ele alındığında, zaman serisinden ardışık  $L$  uzunluğunda vektörler oluşturulur. 1 gecikmeli zaman serisinin bir  $L$  boyutlu gömme aşaması ile tam bir tamamlanmış yörünge matrisi (augmented trajectory matrix) oluşturulur ve bir blok Hankel yörünge matrisi  $C$  elde edilir.

$C^{(m)}$ ,  $m = 1, \dots, M$  ile her bir zaman serisine ait **Hankel matrisi** oluşturulur.

Hankel matrisi  $L \times k$  boyutunda  $k = N - L + 1$  olan bir matristir.

ÇTSA'da yörünge matrisi 2 farklı şekilde ifade edilebilir:

Dikey (**V**ertical) form:

$$\mathbb{X} = \begin{bmatrix} C^{(1)} \\ \vdots \\ C^{(M)} \end{bmatrix}.$$

Bu formda Hankel matrisleri dikey olarak birleştirilir.

Yatay (**H**orizontal) form:

$$C = [C^{(1)}, \dots, C^{(M)}].$$

Bu formda Hankel matrisleri yatay olarak birleştirilir.

ÇTSA algoritmaları bu formları **V**ÇTSA ve **H**ÇTSA şeklinde adlandırarak **yörünge matrisi** olarak kullanır.

### ***Tekil Değer Ayrıştırması***

$\mathbb{U} = [\mathbb{U}_1, \dots, \mathbb{U}_d]$  ve  $\Sigma = \mathbf{diag}\{\lambda_1, \dots, \lambda_d\}$  sırasıyla  $CC^T$  nin öz vektörlerini ve öz değerlerini içeren matrisleri gösterebilir.

$CC^T = \mathbb{U}\Sigma\mathbb{U}^T$  olur ve  $C$ 'nin tekil değer ayrıştırması aşağıdaki şekilde yapılır:

$$C = \mathbb{U}\mathbb{U}^T C = \sum_{i=1}^d \mathbb{U}_i \mathbb{U}_i^T C = C_1 + \dots + C_d,$$

$C_i = \mathbb{U}_i \mathbb{U}_i^T C$ ,  $i$  inci en büyük tekil değere ( $\sqrt{\lambda_i}$ ) karşılık gelen bir matristir ve  $d$ ,  $C$ 'nin rankıdır.

### **3.2.2.2. Yeniden Yapılandırma**

Yeniden yapılandırma aşaması TSA ile benzer adımlarından oluşmaktadır.

### ***Eigentriple (Öz üçlü) Gruplama***

$C_i$ ,  $C$  'nin en büyük tekil değerine karşılık gelen bileşen olmak üzere, bu adım sinyal ve gürültü bileşenlerini aşağıdaki gibi ayırmayı amaçlamaktadır:

$$C = \hat{S} + \hat{R}.$$

Burada,  $d$  toplam bileşen sayısı,  $r$  sinyali temsil etmek için yeterli olan bileşen sayısıdır.  $r < d$  olacak şekilde  $\hat{S} = C_1 + \dots + C_r$  şeklinde ifade edilebilir.

$\hat{R}$  geri kalan bileşenleri (gürültü) temsil eder.

### ***Diyagonal Ortalama (block Hankelisation)***

Bu adımda,  $\hat{S}$  yani sinyal bileşenine anti-diyagonal ortalama uygulanır ve gürültüden arındırılmış zaman serisi yeniden yapılandırılmış olur. Gürültüden arındırma işlemi, verideki anlamlı (sinyal) kısmı koruyarak, gürültü kaynaklı hataları ortadan kaldırmayı amaçlar [64].

ÇTSA'nın temel özellikleri aşağıdaki gibi özetlenmektedir:

- ÇTSA, birden fazla zaman serisini birlikte analiz ederek, bu seriler arasındaki ilişkileri ve ortak davranışları ortaya çıkarır.
- Zaman serilerini eğilim (trend), periyodik (oscillatory), ve rastgele (noise) bileşenlere ayrıştırabilir.
- Tekil değer ayrışımı sayesinde, yüksek boyutlu zaman serilerini daha az boyutla temsil edebilir.
- Zaman serileri arasındaki ortak düzenli hareketleri ve dinamik ilişkileri belirler.

### **3.3. SARIMAX ve ÇTSA Yöntemlerinin Kıyaslanması**

SARIMAX modeli, SARIMA modelinin bir uzantısıdır ve dışsal değişkenleri de dahil ederek zaman serisi tahminlerini iyileştirmeyi amaçlar. Bu model, otoregresyon (AR), entegre (I) ve hareketli ortalama (MA) bileşenlerini, dışsal değişkenlerle birleştirir. Tahmin sürecine dışsal faktörleri dahil ederek daha kapsamlı bir analiz sunar. SARIMAX, finans, ekonomi ve çevre gibi farklı alanlarda kullanılabilir ve dış faktörlerin

önemli rol oynadığı durumlarda tercih edilir. Örneğin, hisse senedi fiyatlarını tahmin ederken faiz oranları ve enflasyon gibi dışsal değişkenler kullanılabilir. SARIMAX modelinin uygulanmasında, veri hazırlığı çok önemlidir. Bu süreçte eksik değerlerin giderilmesi, aykırı değerlerin tespiti ve dışsal değişkenlerin doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekir. Zaman serisinin durağan olması, SARIMAX modelinin önemli bir gerekliliğidir. Durağanlık, serinin ortalama ve varyansının zaman içinde sabit kalması anlamına gelir. Durağanlık sağlanamazsa, fark alma gibi yöntemler kullanılır. SARIMAX modelinde, uygun otoregresif (AR) ve hareketli ortalama (MA) bileşenlerinin seçimi için otokorelasyon fonksiyonu (ACF) ve kısmi otokorelasyon fonksiyonu (PACF) grafikleri kullanılır. Model parametreleri, genellikle Maksimum Olabilirlik Tahmini (MLE) yöntemi ile tahmin edilir. Modelin geçerliliği, artık analizleri ile kontrol edilir. Artıkların akgürültü serisi olması gerekmektedir.

ÇTSA, çok kanallı zaman serilerini analiz etmek için kullanılan, tek değişkenli TSA'nın bir uzantısıdır. Bu yöntem, birden fazla zaman serisi arasındaki ilişkileri ve örüntüleri ortaya çıkarmayı hedefler. ÇTSA, zaman serilerini trendler, mevsimsel bileşenler ve gürültü gibi farklı bileşenlere ayırır. Parametrik olmayan bir yöntemdir, yani verinin belirli bir dağılımı izlemesi gibi varsayımlara dayanmaz. Tek bir zaman serisi yerine birden fazla zaman serisini aynı anda analiz edebilir. Bu, özellikle farklı zaman serileri arasındaki etkileşimleri incelemek için faydalıdır. İklim biliminde, jeolojide ve biyomedikal sinyal işleme vb. alanlarda kullanılır. Pencere uzunluğu (L), analiz edilecek verinin özelliklerine göre seçilir. Genellikle, mevsimsel örüntüleri yakalamak için 12'nin katları kullanılır. Zaman serilerini trend, periyodiklik ve gürültü gibi bileşenlere ayırır ve bu bileşenler yeniden birleştirilerek analiz yapılır. Doğrusal olmayan zaman serilerini de analiz edebilir. Çizelge 3.2'de SARIMAX ve ÇTSA yöntemlerinin önemli farklılıkları özet olarak verilmektedir.

Çizelge 3.2. ARIMAX ve ÇTSA yöntemlerinin özet karşılaştırması

Özellik	ARIMAX	ÇTSA
<b>Temel Yaklaşım</b>	İstatistiksel modelleme ve dışsal değişkenler içerir.	Parametrik olmayan, çok kanallı zaman serilerini bileşenlerine ayırarak analiz eder.
<b>Dışsal Değişkenler</b>	Model, dışsal değişkenleri açıkça hesaba katar.	Model, doğrudan dışsal değişkenleri dahil etmez, ancak çok kanallı analiz ile seriler arası etkileşimleri inceler.
<b>Varsayımlar</b>	Durağanlık varsayımı gerektirir.	Alta yatan zaman serisi hakkında varsayımda bulunmaz.
<b>Çok Kanallı Analiz</b>	Tek bir zaman serisini analiz eder, dışsal değişkenler dahil edilebilir.	Birden fazla zaman serisini aynı anda analiz edebilir.
<b>Doğrusallık</b>	Temel olarak doğrusal ilişkileri modellemek için tasarlanmıştır.	Doğrusal olmayan zaman serilerini analiz edebilir.
<b>Model Seçimi</b>	ACF ve PACF grafikleri ile uygun AR ve MA bileşenleri belirlenir.	Pencere uzunluğu ve W-korelasyon matrisi kullanılır.
<b>Uygulama Alanları</b>	Finans, ekonomi, çevre bilimleri gibi dışsal faktörlerin önemli olduğu alanlarda kullanılır.	İklim bilimi, jeoloji, biyomedikal sinyal işleme gibi alanlarda kullanılır.

SARIMAX, zaman serisi verilerinde dışsal değişkenlerin etkisini modellemek için güçlü bir araçtır. Bu model, hem içsel dinamikleri hem de dışsal etkenleri dikkate alarak daha doğru tahminler yapabilir.

ÇTSA, çok kanallı zaman serilerini analiz etmek, farklı bileşenlere ayırmak ve aralarındaki ilişkileri incelemek için kullanışlı bir yöntemdir. Bu yöntem, parametrik olmaması ve doğrusal olmayan analizlere uygun olmasıyla öne çıkar.

## 4. TÜRKİYE'DEKİ HANE HALKI ENERJİ TÜKETİMİNİN MODELLENMESİ

Çalışmanın bu bölümünde, 2007-2023 yılları arasında Türkiye'deki hane halkı elektrik tüketim miktarı ve bu tüketimi açıklayacağı düşünülen makroekonomik değişkenler kullanılarak durağanlık analizi ile SARIMAX ve ÇTSA Analizi uygulanmış, sonuçlar yorumlanmıştır.

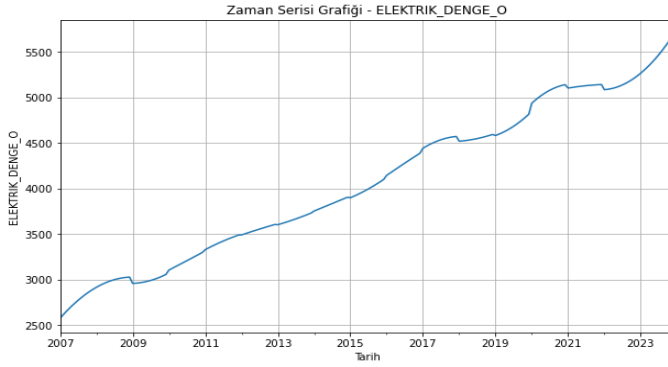
### 4.1. Analizde Kullanılan Değişkenler

Bu çalışmada, Python 3.11 Spyder kütüphanesi ile 4.2.3 versiyonlu R Studio aracılığıyla analizler yapılmıştır. 2007-2023 yılları arasında hane halkı elektrik tüketim miktarı ve bu tüketimi açıklayacağı düşünülen GSYH, hane halkı sayısı, toplam hane halkı tüketim harcaması, hane halkı kullanılabilir geliri, ısıtma ve soğutma gün derecesi (HDD ve CDD) ve elektrik ücreti değişkenleri kullanılmıştır. Değişkenlerin her biri farklı dönemlerde elde edildiğinden, dönüşümler ile aylık formata dönüştürülmüştür. Pandemi nedeniyle toplam hane halkı tüketim harcaması değişkeninde yer alan kayıp gözlemler interpolasyon yöntemi ile doldurulmuştur. Veri setini standardize etmek amacıyla tüm değişkenlerin doğal logaritması (ln) alınarak analize dahil edilmiştir. Çalışmada kullanılan değişkenler ayrıntılı olarak Çizelge 4.1'de tanımlanmaktadır.

Çizelge 4.1. Analizde kullanılan değişkenler ve tanımları

Değişken Adı	Değişken Tanımı	Sorumlu Kurum/Kuruluş
ELEKTRIK_DENGE	Ulusal Enerji Denge Tablosu Konut Elektrik Tüketimi (GWh), Yıllık	ETKB – EİGM
GSYH	Harcama Yöntemiyle, Gayrisafi Yurtiçi Hasıla, (2009 Bazlı), (Değer; Cari Fiyatlarla ve Bin TL-Hane Halklarının Nihai Tüketimi), Çeyreklik	TÜİK Dönemsel Ulusal Hesap İstatistikleri
HANEHALKI_SAYI	Hane Halkı Sayıları (Bin), Yıllık	TÜİK Gelir Dağılımı ve Yaşam Koşulları İstatistikleri
HKULLANGELIR	Hane Halkı Kullanılabilir Geliri (Ortalama, TL), Yıllık	TÜİK Gelir Dağılımı ve Yaşam Koşulları İstatistikleri
HH_TUKET_HARC	Toplam Hane Halkı Tüketim Harcaması (TL/Ay), Yıllık	TÜİK Hane Halkı Tüketim Harcaması İstatistikleri
HDD	Nüfus ile Ağırlıklandırılmış Isıtma Gün Derecesi Oranı, Aylık	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
CDD	Nüfus ile Ağırlıklandırılmış Soğutma Gün Derecesi Oranı, Aylık	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
ELK_FIYAT	Elektrik Ücreti (TL/Ay) (Ortalama Fiyatlar, 2003 Bazlı), Aylık	TÜİK TÜFE

**Hane Halkı Elektrik Tüketimi:** "ETKB EİGM Ulusal Enerji Denge Tabloları," Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na (ETKB) bağlı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (EİGM) tarafından hazırlanan ve yayımlanan bir enerji istatistikleri raporudur. Bu tablolar, Türkiye'nin enerji üretimi, tüketimi, ithalatı, ihracatı ve diğer enerji akışlarını kapsamlı bir şekilde gösterir. Ulusal Enerji Denge Tabloları, ülkenin enerji arz ve talep dengesi hakkında detaylı bilgi sunar ve enerji politikalarının oluşturulmasında önemli bir kaynak olarak kullanılır. Bu tablolar, enerji planlaması ve yönetimi için kritik öneme sahiptir ve enerji sektöründeki trendleri, gelişmeleri ve gelecekteki ihtiyaçları analiz etmek için kullanılır. Çalışmada Ulusal Enerji Denge Tablosu konut elektrik tüketimi (GWh) verisi kullanılmıştır [65]. Konut (mesken) sektörü, diğer bir adıyla hane halkı sektörü, ülkenin hane toplamını ifade etmektedir. Bu çalışmada hane sayısı olarak ele alınmıştır.



Şekil 4.1. Hane halkı elektrik tüketimi için zaman serisi grafiği

Şekil 4.1'deki zaman serisi grafiğinden ELEKTRIK\_DENGE serisinin yıllar boyunca artış yönünde bir trende sahip olduğu görülmektedir. Bu grafik, her yıl artarak devam eden hanelerdeki elektrik tüketiminin 2007 ile 2023 yılları arasında devam ettiğini göstermektedir. Bu artışın elektronik eşya kullanımı, artan hane halkı sayısı, hanelerin ısınma ya da soğutma ihtiyacındaki artış gibi nedenlerden kaynaklandığı bilinmektedir.

**Harcama yöntemiyle Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GSYH):** Bir ekonomide belirli bir dönemde üretilen nihai mal ve hizmetlerin toplam değerinin, bu mallara yapılan harcamalar yoluyla hesaplanmasıdır. Bu yöntem, GSYH'nin üç temel hesaplama yönteminden biridir (diğerleri üretim ve gelir yöntemleridir). Bu çalışmada kullanılan, "Hane Halklarının Nihai Tüketimi", Gayri Safi Yurtiçi Hasıla'nın (GSYH) harcama yöntemi ile hesaplanmasında kullanılan temel bileşenlerden biridir. Dönemlik (çeyreklik)

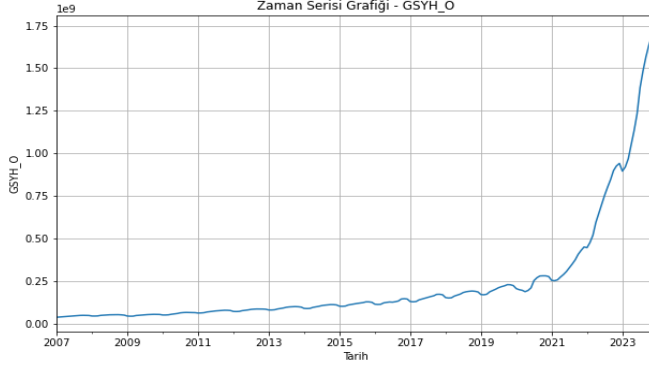
olarak hesaplanmaktadır. Bireylerin ve hane halklarının nihai tüketim amacıyla yaptıkları mal ve hizmet harcamalarını ifade eder. Bu harcamalar, ekonomik faaliyetlerin toplumun refahına doğrudan katkısını göstermek açısından önemlidir.

GSYH, harcama yöntemiyle aşağıdaki bileşenlerin toplamı olarak hesaplanır:

Hane halklarının Nihai Tüketim Harcamaları, Devletin nihai tüketim harcamaları, Gayrisafi sabit sermaye oluşumu, Mal ve hizmet ihracatı, Mal ve hizmet ithalatı (çıkartılır).

Bu bağlamda, hane halklarının nihai tüketimi, GSYH'nin en büyük bileşenlerinden biridir ve genellikle bir ekonomideki toplam talebin büyük bir kısmını oluşturur. Hesaplamalarda kullanılan referans yılı 2009'dur; bu, ekonomik büyüklüklerin belirli bir yıldaki fiyatlarla değerlendirildiği anlamına gelir. O yılki mevcut piyasa fiyatlarıyla hesaplanır ve enflasyon etkisini içerir. Veriler, bin Türk Lirası biriminde sunulur ve büyük ölçekli ekonomik göstergelerin daha anlaşılır bir şekilde ifade edilmesini sağlar. Bu değişken, tüketim harcamaları yoluyla ekonomik büyümenin itici gücünü ve hane halklarının refah düzeyini analiz etmek için önemli bir göstergedir. Aynı zamanda, tüketim davranışlarını anlamak ve ekonomik politika geliştirmek için temel bir veri kaynağıdır.

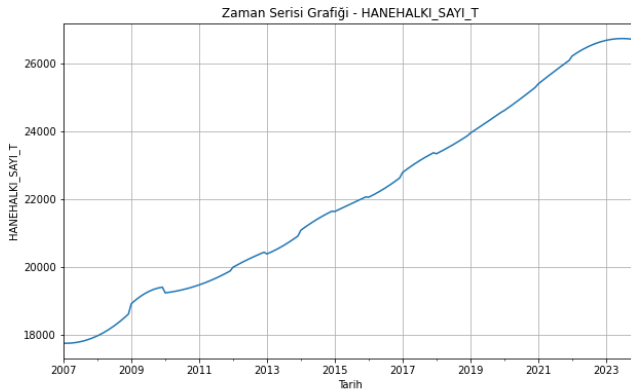
GSYH serisinin artış yönündeki trend yapısı 2021 yılına kadar yavaş artış gösterirken 2021 yılından itibaren ani artışa geçtiği Şekil 4.2'de görülmektedir. Bu ani artışın, bireylerin ve hane halklarının nihai tüketim amacıyla yaptıkları mal ve hizmet harcamalarında 2021 yılından itibaren artan ürün fiyatları ve maaşlar ile birlikte ani bir artış gösterdiği düşünülmektedir.



Şekil 4.2. GSYH için zaman serisi grafiği

**Hane halkı sayıları (Bin):** Aralarında akrabalık bağı bulunsun ya da bulunmasın aynı adreste yaşayan bir veya birden fazla kişiden oluşan toplulukların sayısını ifade etmektedir. TÜİK- Gelir Dağılımı ve Yaşam Koşulları İstatistikleri aracılığıyla elde edilen hane halkı sayıları bu çalışmada kullanılmaktadır [57].

HANEHALKI\_SAYI serisinin artış yönünde bir trende sahip olduğu Şekil 4.3'te, görülmektedir. Bu artış, Türkiye'deki artan nüfus ile birlikte hane halkı sayısının da yıllar içindeki hızlı artışının göstergesidir. Ancak bu artışın 2023 yılında sabitlendiği Şekil 4.3'te görülmektedir.

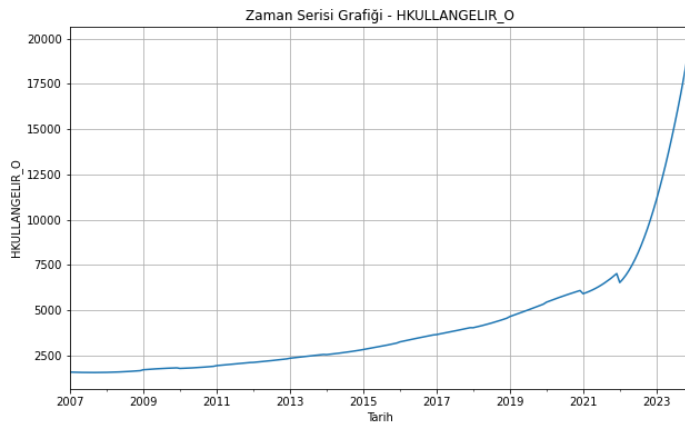


Şekil 4.3. Hane halkı sayısı için zaman serisi grafiği

**Hane Halkı Kullanılabilir Geliri:** Hane halkı kullanılabilir net gelirine, hane halkındaki her bir ferdin elde ettiği kişisel yıllık kullanılabilir gelirlerin (maaş-ücret, yevmiye, müteşebbis geliri ile emekli maaşı, dul-yetim aylıkları ve yaşlılara yapılan ödemeler,

karşılıksız burs vb. aynı veya nakdi gelirlerin toplamı) toplamı ile hane bazında elde edilen yıllık gelirlerin (gayrimenkul kira geliri, haneye yapılan karşılıksız yardımlar, 15 yaşın altındaki fertlerin elde ettiği gelirler vb.) toplamından, gelir referans döneminde ödenen vergiler ve diğer hane veya kişilere yapılan düzenli transferler düşüldükten sonra ulaşılmaktadır. TÜİK- Gelir Dağılımı ve Yaşam Koşulları İstatistikleri aracılığıyla elde edilerek bu çalışmada kullanılmaktadır [57].

HKULLANGELIR serisinin artış yönünde bir trende sahip olduğu Şekil 4.4'te görülmektedir. 2022 yılının ortasından sonra üstel bir artış söz konusudur.



Şekil 4.4. Hane halkı kullanılabilir geliri değişkeni için zaman serisi grafiği

**Toplam Hane Halkı Tüketim Harcaması:** Bu değişken, hane halklarının bir ay içinde tüketim amacıyla yaptığı harcamaların parasal değerini ifade eder. Harcamalar, 3'lü düzey Elektrik, Gaz ve Diğer Yakıtlar (COICOP 045) kategorisine aittir. TÜİK- Hane Halkı Tüketim Harcaması İstatistikleri aracılığıyla elde edilerek bu çalışmada yer almaktadır. Hane halklarının enerji tüketimi ve enerjiyle ilişkili diğer giderler konusundaki ekonomik davranışlarını anlamak ve tüketim alışkanlıklarını belirleyecek çıkarımlar sağlamak amacıyla kullanılmıştır.

Tüketim harcaması, hane halklarının tüketim amacıyla yapmış oldukları ve aşağıdaki bileşenlerden oluşan aylık ortalama harcama değeridir.

*Satın alış:* Herhangi bir mal ya da hizmete belli bir ücret ödeyerek sahip olmaktır. Hane halkının anket ayında kendi ihtiyaçlarını karşılamak üzere tüketim amaçlı olarak yaptıkları satın alışlar kapsamaktadır.

*Kendi üretiminden tüketim:* Hanelerin kendi üretimleri sonucu elde ettikleri maddeleri, ya ürettikleri gibi ya da işleyerek tüketmeleridir. Örneğin; hane halkının kendi ürettiği sütün anket ayında yine süt olarak ya da peynir yapılarak tüketilen değeri harcama olarak kapsamaktadır.

*Aynı gelirlerden tüketim:* Hanede iktisaden faal olan fertlerin çalıştıkları işyerinde üretilen ya da satışa sunulan mal ve hizmetlerden hanede tüketilenler, aynı gelirlerden tüketim olarak alınmaktadır. Örneğin; ücretli olarak çalışan bir ferde işyerince verilen yiyecek, giyecek vb. maddeler, servis vb. hizmetler ücretlinin elde ettiği aynı gelirden tüketim olarak; işveren ya da kendi hesabına çalışan bir ferdin de kendisine ait işyerinde ürettiği ya da sattığı mallardan hanesine tüketmek üzere getirdikleri aynı gelirden tüketim olarak değerlendirilmektedir.

*Hane halkının özel kişi veya kuruluşlara hediye vermek veya yardım etmek amacıyla satın aldığı mal ve hizmetler:* Hane halkı fertleri tarafından anket ayı süresince, özel kişi veya kuruluşlara verilmek üzere (hediye etmek veya yardımda bulunmak amacıyla) satın alınan mal ve hizmetlerin değeri kapsamaktadır.

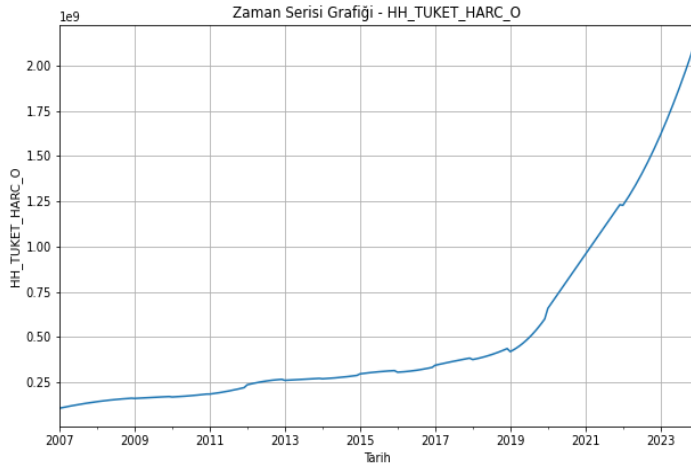
*Dayanıklı tüketim harcamaları:* Hane halkı tarafından anket ayını içine alan son üç ay için elektrikli ve elektriksiz büyük ev aletleri, mutfak mobilyaları, yatak odası, yemek odası ve oturma odası mobilyaları, televizyon, bilgisayar vb. eşyalar, konut bakım teçhizatları ve hizmetleri, sağlıkla ilgili hane halkı tarafından yapılan bazı harcamalar; son on iki ay için motorlu taşıtlar, paket turlar, konaklama hizmetleri ve eğitimle ilgili harcamalar türünden dayanıklı ve yarı dayanıklı, harcaması seyrek yapılan mal ve hizmet harcamalarının aya düşen değeri de tüketim harcaması içinde kapsamaktadır.

*İzafi kira:* Konuta mülkiyet şekli ev sahibi, lojman ve diğer (babasına, akrabasına vb. kişilere ait yerlerde ikamet edip hiç bir şekilde ücret ödemeyenler) şekilde olan hane halkının ikamet ettiği konutun kira değeri izafi kira olarak değerlendirilmiştir. İzafi kira, tüketim harcaması içinde kapsamaktadır. İzafi kira değeri, benzer özelliklere sahip olan,

aynı semtte ve yerleşim yerinde kira ile oturlan konutun kira değeri emsal alınarak hane halkı tarafından belirlenmektedir.

*Sınıflamalar:* Tüketim harcamalarının sınıflanmasında 2023 yılından itibaren COICOP 2018 sınıflaması kullanılmıştır [58].

Şekil 4.5'te HH\_TUKET\_HARC serisinin 2007-2019 yılları arasında yavaş artan bir trende sahip iken 2019 yılından sonra ani bir artışa sahip olduğu görülmektedir. 2019–2023 yılları arasında enerji fiyatları, genel enflasyon oranının (TÜFE) üzerinde artış göstermiştir. Bu dönemde, elektrik fiyatları konutlarda ilk kademe tüketimde %222,7 oranında artmıştır. Doğal gaz fiyatları konutlarda %358,4 oranında yükselmiştir. Bu artışlar, aynı dönemdeki %211,8'lik TÜFE artış oranını aşmıştır. Türkiye'nin enerji arzında dışa bağımlılığı yüksektir; doğal gazın %98'i ithal edilmektedir. Bu durum, döviz kurlarındaki artışlarla birleşerek enerji maliyetlerini artırmıştır. Bu nedenlerle hane halkı tüketim harcamaları 2019 yılından itibaren ani bir artış göstermiştir.



Şekil 4.5. Hane halkı tüketim harcaması değişkeni için zaman serisi grafiği

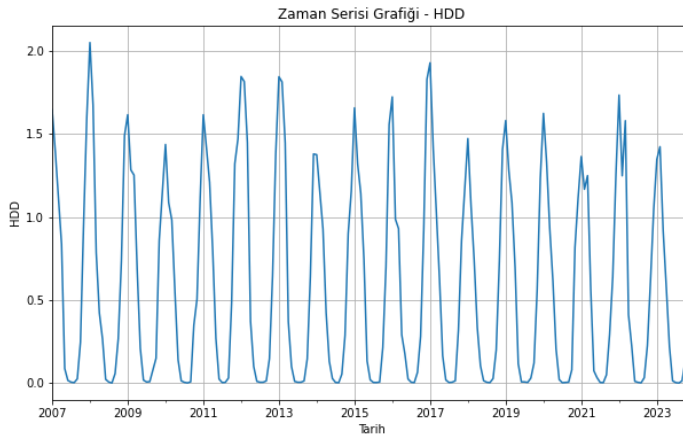
**Isıtma ve Soğutma Gün Derecesi Oranları:** Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 24 saatlik periyodun ne kadarının sıcak ve ne kadarının soğuk geçtiğini Isıtma ve Soğutma Gün Derecesi (HDD – Heating Degree Days, CDD - Cooling Degree Days) verileri ile açıklamaktadır.

Isıtma Gün Dereceleri (HDD): Belirli bir zamanda (gün, ay, yıl) dış ortam ve oda sıcaklığını hesaba katarak soğğun şiddetini açıklar. Birçok ülke gün derecenin hesabı için farklı tanımlar kullanır. Karşılaştırılabilir ve ortak bir kullanım oluşturmak için Avrupa Topluluğu İstatistik Ofisi (Eurostat) HDD'nin hesabı için aşağıdaki metodu önermektedir:

$$HDD = \begin{cases} (18^{\circ}\text{C} - T_m), & T_m \leq 15^{\circ}\text{C} \\ 0, & T_m > 15^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

Burada,  $T_m$  = Günlük ortalama sıcaklık ve  $T_m \leq 15^{\circ}\text{C}$  ısıtma eşiğidir. Hesaplama günlük bazda yapılır. Aylık ve yıllık gün dereceler bunların toplanması ile bulunur. Örneğin; Ankara'nın 29 Aralık 2005 günü ortalama sıcaklığı  $2,0^{\circ}\text{C}$ ' dir. Buna göre:  $HDD = 18-2=16$ ' dir [59].

HDD serisinde, kış aylarında meydana gelen ısıtma dereceleri oranlarındaki artışın ve benzer şekilde yaz aylarında ise sıcaklığın 15 derecenin üstüne çıkması ile ısıtma dereceleri oranlarındaki azalışın düzenli mevsimsel bir dalgalanmaya neden olduğu Şekil 4.6'da görülmektedir.



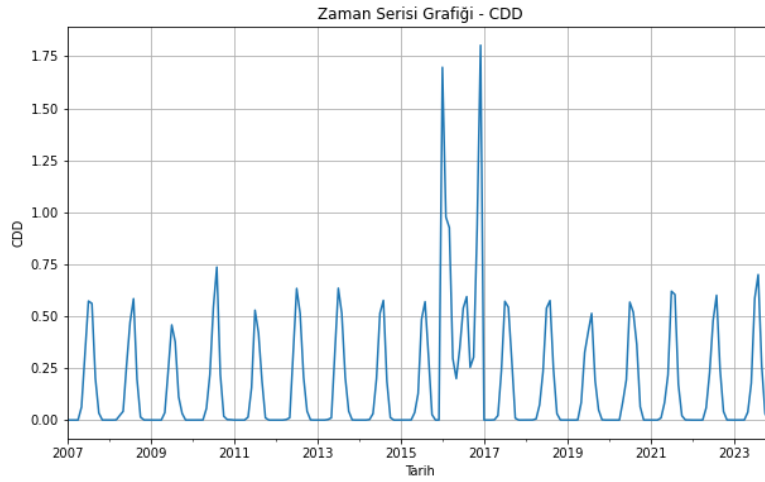
Şekil 4.6. HDD değişkeni için zaman serisi grafiği

Soğutma Gün Dereceleri (CDD): Belirli bir zamanda (gün, ay, yıl) dış ortam sıcaklığını hesaba katarak sıcaklığın şiddetini açıklar. Resmi olarak belirlenmiş bir eşik sıcaklık olmamakla birlikte inşaat sektörü enerji yönetim pratiklerinde soğutma eşik sıcaklık  $22^{\circ}\text{C}$  olarak alınır. Buna göre:

$$CDD = \begin{cases} 0, & T_m \leq 22 \text{ }^\circ\text{C} \\ (T_m - 22 \text{ }^\circ\text{C}), & T_m > 22 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases}$$

şeklinde hesaplanır. Örneğin; Ankara'nın 25 Ağustos 2005 günü ortalama sıcaklığı 25,9°C' dir. Buna göre:  $CDD = 25,9 - 22 = 3,9$  'dur [59].

CDD serisinde, sıcaklığın 18 derecenin üstünde olduğu günlerde soğutma dereceleri oranlarındaki artışın düzenli bir mevsimsel etkiye neden olduğu Şekil 4.7'de görülmektedir. 2016 ve 2017 yıllarının ilk aylarının diğer yıllara göre sıcak geçmesi CDD değerlerinde ani artışların görülmesine neden olmaktadır.



Şekil 4.7. CDD değişkeni için zaman serisi grafiği

Isıtma ya da soğutma gün dereceleri toplamının bilinmesi binaların ısıtılması ya da soğutulması için gerekli olan enerji gereksiniminin bilinmesi açısından önemlidir. Dış ortam sıcaklığı 15°C'nin üzerinde ise ısıtma gereksizdir.

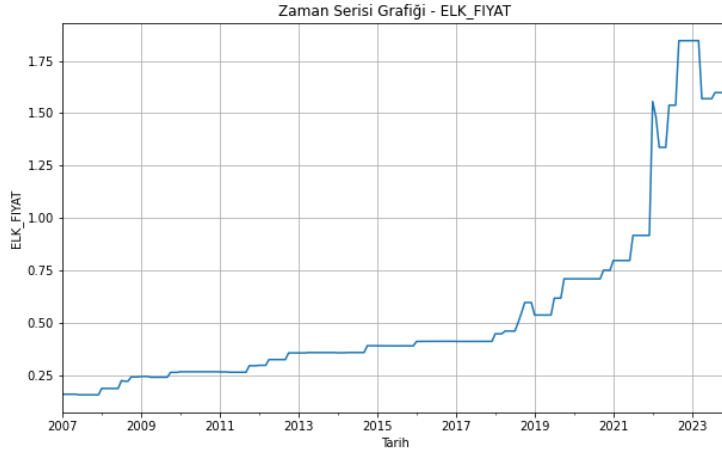
HDD kış mevsiminin sertliğini göreceli olarak önceki ve uzun yıllara göre karşılaştırmak için de kullanılır. Aynı zamanda yeni binalar yapılırken yalıtım, ısıtma ve soğutma giderlerinin hesaplanması için inşaat sektörü tarafından ihtiyaç duyulan bir parametredir [59].

Bu çalışmada, Isıtma ve Soğutma Gün Derecesi değişkenleri enerji talebini ve iklimle ilişkili enerji kullanımını daha anlamlı bir şekilde analiz edebilmek amacıyla ölçüm merkezlerinin nüfusları göz önünde bulundurulmuş ve nüfusa göre ağırlıklandırma yapılarak değerler elde edilmiştir. Bu şekilde, HDD ve CDD'nin etkisini insanların yoğun olduğu bölgelerdeki enerji talebine göre daha doğru bir şekilde yansıtacağı düşünülmektedir.

**Elektrik Ücreti:** Elektrik tüketimi, hane halklarının temel harcamalarından biri olduğu için elektrik ücreti, tüketici fiyat endeksi (TÜFE) sepetinde seçilmiş maddeler arasında yer almaktadır. **TÜFE hesaplanırken, hane halklarının tüketim alışkanlıklarını yansıtan geniş bir "mal ve hizmet sepeti" kullanılır. Bu sepetin içinde yüzlerce farklı madde bulunur. "Seçilmiş maddeler" ise, bu geniş sepet içinden özellikle takip edilen ve fiyat değişimleri kamuoyuyla paylaşılan bazı önemli kalemlerdir. Elektrik ücreti de bu seçilmiş maddelerden biridir.** Elektrik ücretlerindeki değişimler, TÜFE'yi ve dolayısıyla enflasyon oranını etkileyebilmektedir.

Bu değişken, hane halklarının tüketimine yönelik elektrik fiyatlarının zaman içindeki değişimini ölçmektedir. 2003 temel yılı kullanılarak ortalama fiyatlar ile oluşturulmaktadır. TÜİK- Tüketici Fiyat Endeksi aracılığıyla elde edilerek bu çalışmada yer almaktadır. Bu değişken, hane halklarının elektrik tüketimine ilişkin ekonomik davranışlarını anlamak için kullanılmıştır.

ELK\_FIYAT serisi yıllar içinde yavaş artış gösterirken 2022 yılında ani bir artış sergilediği Şekil 4.8'de görülmektedir.



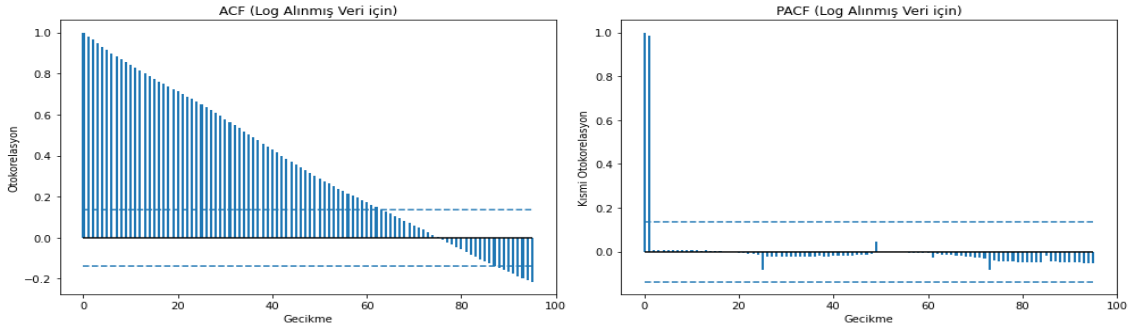
Şekil 4.8. Elektrik fiyatı değişkeni için zaman serisi grafiği

Veri seti hane halkı enerji tüketimini detaylandırarak belirleyebilmek amacıyla oluşturulmuştur, hem demografik hem de makroekonomik göstergeleri içermektedir. Bu özellikleri sayesinde, hane halkı nihai enerji tüketimini tahmin etmek için önemli bir kaynak sunmaktadır.

Çalışmanın bu bölümünden itibaren SARIMAX analizinde ileriye doğru değişken seçme yöntemi (forward selection) kullanılarak değişkenler tek tek modele eklenmiştir. Bu analizler sonucunda anlamlı çıkan değişkenler HANEHALKI\_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD olarak belirlenmiştir. Çalışmanın devamında, bu değişkenler dikkate alınarak analizlerin sonuçlarına yer verilmiştir. Modeller arasında karşılaştırmaların güvenilir sonuçları yansıtabilmesi amacıyla ÇTSA modellerinde de aynı değişkenler kullanılarak analiz sonuçları elde edilmiştir.

#### 4.1.1. Durağanlık Analizi (ACF ve PACF Grafikleri)

Çalışmada yer alan bağımlı değişken ELEKTRIK\_DENGE'ye ilişkin ACF ve PACF grafikleri Şekil 4.9'daki gibi elde edilmektedir.



Şekil 4.9. ELEKTRIK\_DENGE değişkenine ait ACF ve PACF grafikleri

ACF grafiğinde gecikmeler çoğunlukla alt ve üst güven sınırını geçtiğinden bu serinin durağan olmadığı söylenebilir. PACF grafiğinde iki gecikmenin güven sınırını geçmesi bu durumu desteklemektedir.

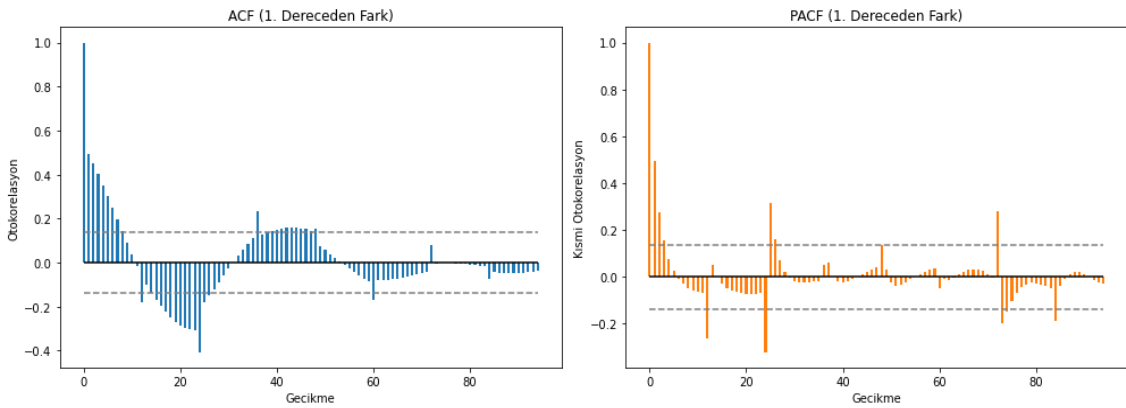
Ayrıca serinin durağan olup olmadığını anlamak için Augmented Dickey-Fuller (ADF) testi de uygulanabilir. Bu test için hipotezleri aşağıdaki şekilde kurulmaktadır:

“ $H_0: \rho = 1$  Seri durağan değildir.

$H_s: \rho < 1$  Seri durağandır.”.

ADF testi sonucunda istatistik değeri -0,6512 ve P-değeri 0,8590 olarak hesaplanmaktadır.

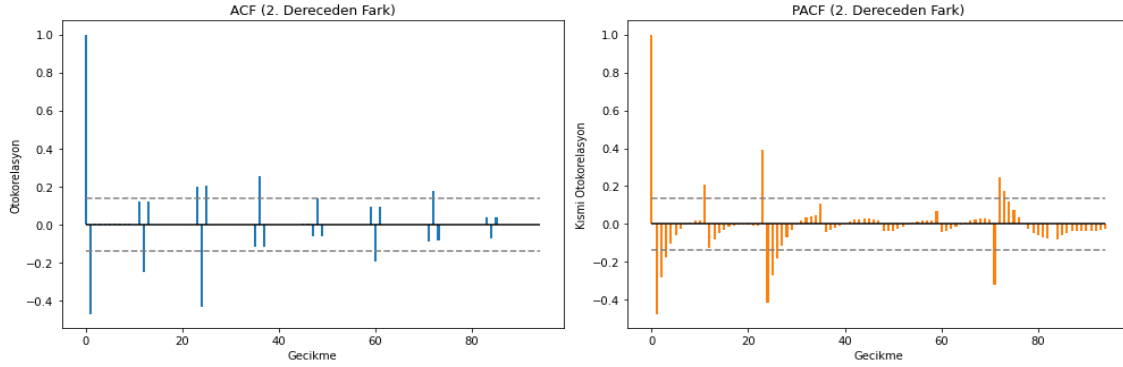
P-değeri  $> 0,05$  olduğundan serinin durağan olmadığı %95 güven düzeyi ile söylenebilir. (Yani, sıfır hipotezi reddedilemez.) Bu nedenle seriyi durağanlaştırmak amacıyla trend farkı alınmalıdır.



Şekil 4.10. Birinci dereceden trend farkı alınmış ELEKTRIK\_DENGE değişkenine ilişkin ACF ve PACF grafikleri

Birinci dereceden trend farkı alınmış bağımlı değişkene ait ADF testi sonucunda istatistik değeri -2,7849 ve P-değeri 0,0605 olarak hesaplanmaktadır.

P-değeri  $> 0,05$  olduğundan serinin durağan olmadığı %95 güven düzeyi ile söylenebilir. (Yani, sıfır hipotezi reddedilemez.) Şekil 4.10'da görüldüğü üzere ACF grafiğinde gecikmeler çoğunlukla alt ve üst güven sınırını geçtiğinden bu serinin ilk farkta trendden arınmadığı görülmüştür ve 2. dereceden trend farkı alınmıştır.

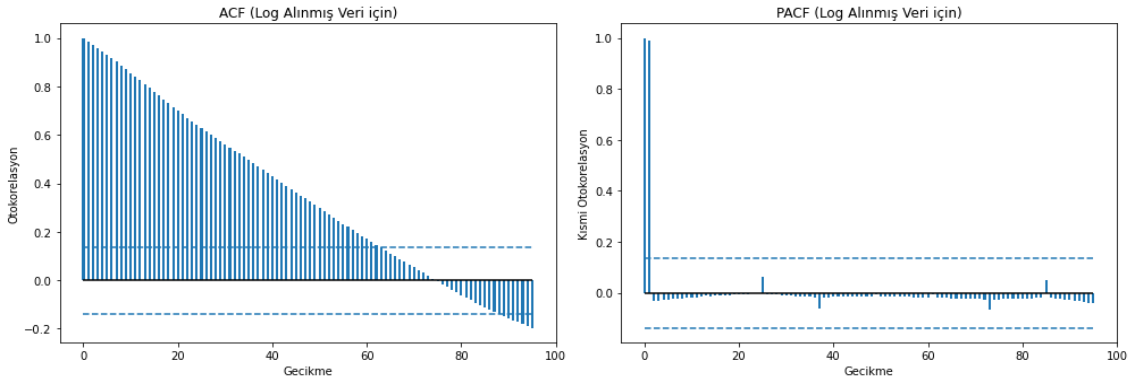


Şekil 4.11. İkinci dereceden trend farkı alınmış ELEKTRİK\_DENGE değişkenine ilişkin ACF ve PACF grafikleri

İkinci dereceden trend farkı alınmış bağımlı değişkene ilişkin ADF testi sonucunda istatistik değeri -4,1715 ve P-değeri 0,0007 olarak hesaplanmaktadır.

P-değeri  $< 0,05$  olduğundan serinin durağan olduğu %95 güven düzeyi ile söylenebilir. (Yani, sıfır hipotezi reddedilir.) Ayrıca, Şekil 4.11'de görüldüğü üzere ACF grafiğinde gecikmeler çoğunlukla alt ve üst güven sınırları arasında yer aldığından ve ADF Testi sonucuna göre  $H_0$  hipotezi reddedildiğinden serinin ikinci trend farkı ile trendin ortadan kalktığı söylenebilir. ACF ve PACF grafiğinden seride mevsimsel dalgalanmalar olduğu da görülmektedir. Serinin periyodu 36 olarak belirlenmiştir.

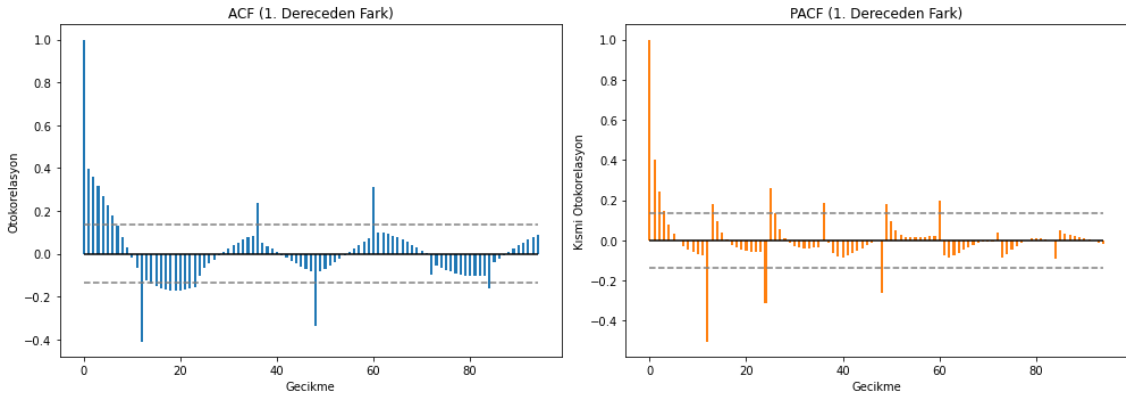
Çalışmada yer alan HANEHALKI\_SAYI değişkenine ilişkin ACF ve PACF grafikleri Şekil 4.12'deki gibi elde edilmektedir.



Şekil 4.12. HANEHALKI\_SAYI değişkenine ait ACF ve PACF grafikleri

ACF grafiğinde gecikmeler çoğunlukla alt ve üst güven sınırını geçtiğinden bu serinin durağan olmadığı söylenebilir. PACF grafiğinde iki gecikmenin güven sınırını geçmesi bu durumu desteklemektedir.

Ayrıca serinin durağan olup olmadığını anlamak için ADF testi sonucunda istatistik değeri -1,0495 ve P-değeri 0,7348 olarak hesaplanmaktadır. P-değeri  $> 0,05$  olduğundan serinin durağan olmadığı %95 güven düzeyi ile söylenebilir. (Yani, sıfır hipotezi reddedilemez.) Bu nedenle seriyi durağanlaştırmak amacıyla trend farkı alınmalıdır.

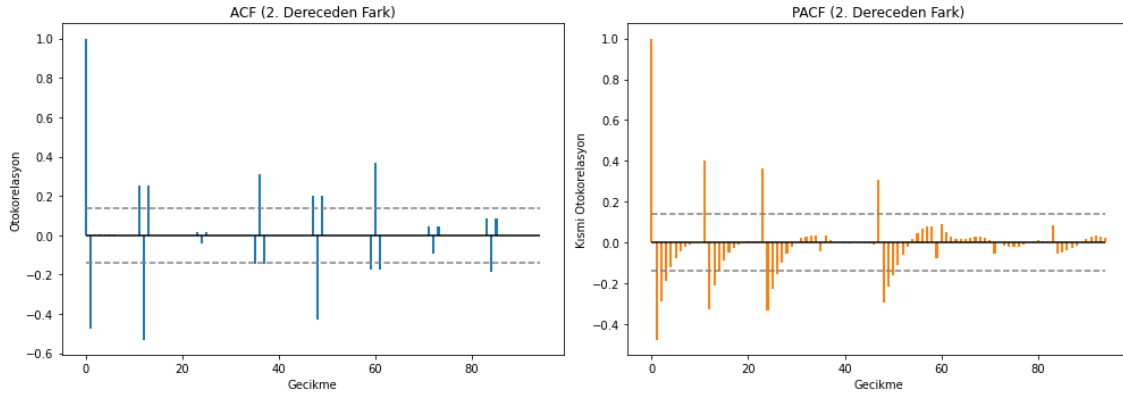


Şekil 4.13. Birinci dereceden trend farkı alınmış HANEHALKI\_SAYI değişkenine ilişkin ACF ve PACF grafikleri

Birinci dereceden trend farkı alınmış HANEHALKI\_SAYI değişkenine ait ADF testi sonucunda istatistik değeri -1,7500 ve P-değeri 0,4055 olarak hesaplanmaktadır.

P-değeri  $> 0,05$  olduğundan serinin durağan olmadığı %95 güven düzeyi ile söylenebilir. Ayrıca, Şekil 4.13'te görüldüğü üzere ACF grafiğindeki gecikmeler çoğunlukla alt ve üst

güven sınırlarını geçmektedir. Bu nedenle seriyi durağanlaştırmak amacıyla ikinci trend farkı alınmalıdır.

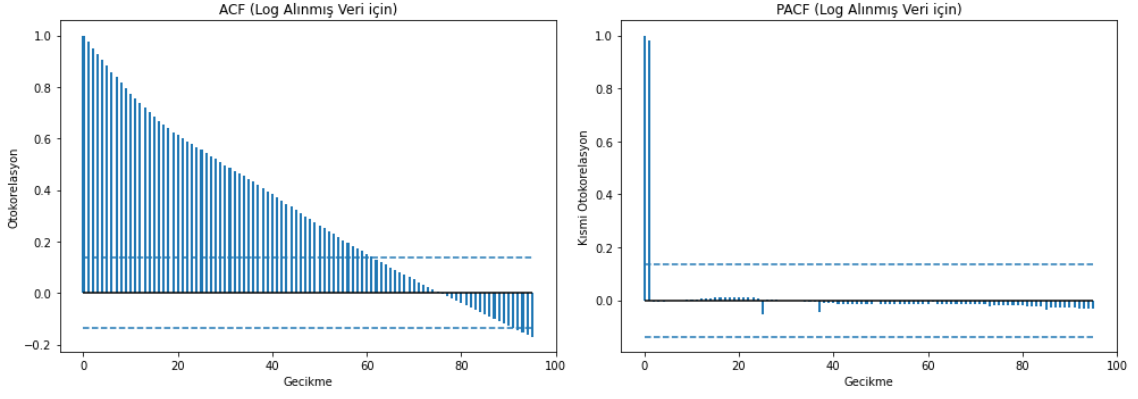


Şekil 4.14. İkinci dereceden trend farkı alınmış HANEHALKI\_SAYI değişkenine ilişkin ACF ve PACF grafikleri

İkinci dereceden trend farkı alınmış HANEHALKI\_SAYI değişkenine ait ADF testi sonucunda istatistik değeri -2,2688 ve P-değeri 0,1823 olarak hesaplanmaktadır.

P-değeri  $> 0,05$  olduğundan serinin durağan olduğu %95 güven düzeyi ile söylenebilir. Ayrıca, Şekil 4.14'te görüldüğü üzere ACF grafiğinde gecikmeler çoğunlukla alt ve üst güven sınırları arasında yer aldığından ve ADF Testi sonucuna göre  $H_0$  hipotezi reddedildiğinden serinin ikinci trend farkı ile trendin ortadan kalktığı söylenebilir. ACF ve PACF grafiğinden HANEHALKI\_SAYI serisine ait mevsimsel dalgalanmalar olduğu da görülmektedir. Serinin periyodu 36 olarak belirlenmiştir.

Çalışmada yer alan HKULLANGELIR değişkenine ilişkin ACF ve PACF grafikleri Şekil 4.15'deki gibi elde edilmektedir.

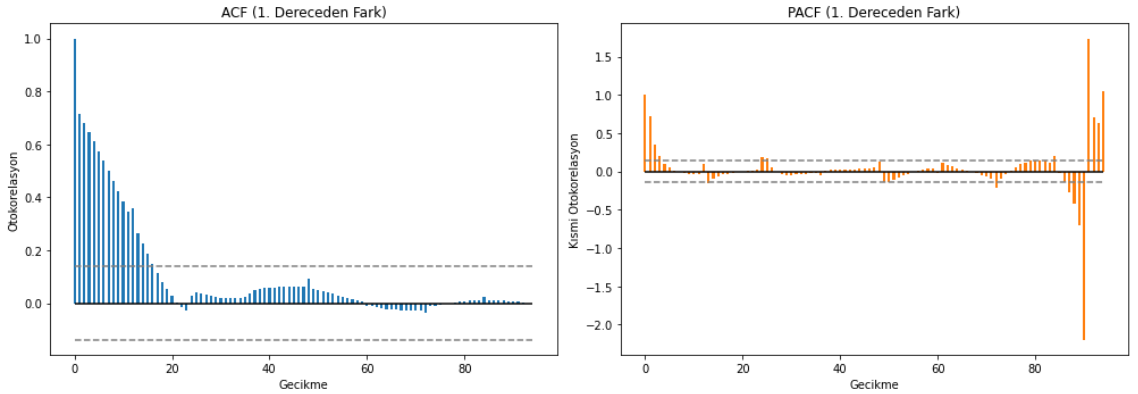


Şekil 4.15. HKULLANGELIR değişkenine ait ACF ve PACF grafikleri

ACF grafiğinde gecikmeler çoğunlukla alt ve üst güven sınırını geçtiğinden bu serinin durağan olmadığı söylenebilir. PACF grafiğinde iki gecikmenin güven sınırını geçmesi bu durumu desteklemektedir.

Ayrıca serinin durağan olup olmadığını anlamak için ADF testi sonucunda istatistik değeri 2,4512 ve P-değeri 0,999 olarak hesaplanmaktadır.

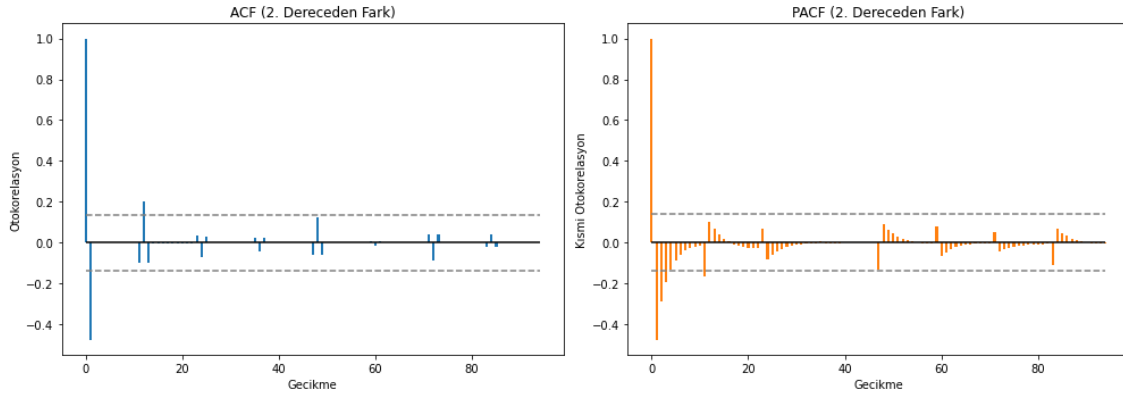
P-değeri  $> 0,05$  olduğundan serinin durağan olmadığı %95 güven düzeyi ile söylenebilir. Bu nedenle seriyi durağanlaştırmak amacıyla trend farkı alınmalıdır.



Şekil 4.16. Birinci dereceden trend farkı alınmış HKULLANGELIR değişkenine ilişkin ACF ve PACF grafikleri

Birinci dereceden trend farkı alınmış HKULLANGELIR değişkenine ait ADF testi sonucunda istatistik değeri -1,0431 ve P-değeri 0,7372 olarak hesaplanmaktadır.

P-değeri  $> 0,05$  olduğundan serinin durağan olmadığı %95 güven düzeyi ile söylenebilir. Şekil 4.16'da görüldüğü üzere ACF grafiğinde gecikmeler çoğunlukla alt ve üst güven sınırını geçtiğinden bu serinin ilk farkta trendden arınmadığı görülmüştür ve 2. dereceden trend farkı alınmıştır.



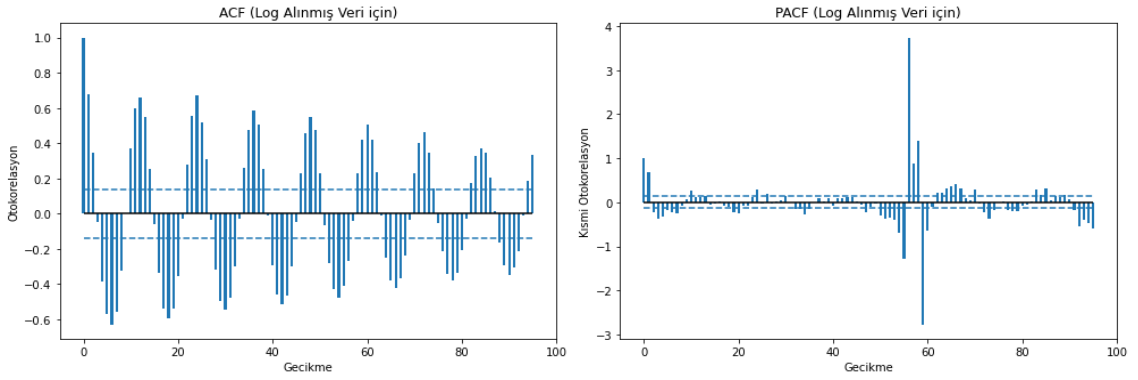
Şekil 4.17. İkinci dereceden trend farkı alınmış HKULLANGELIR değişkenine ilişkin ACF ve PACF grafikleri

İkinci dereceden trend farkı alınmış bağımlı değişkene ilişkin ADF testi sonucunda istatistik değeri -10,6541 ve P-değeri 0,0000 olarak hesaplanmaktadır.

P-değeri  $< 0,05$  olduğundan serinin durağan olduğu %95 güven düzeyi ile söylenebilir. Ayrıca, Şekil 4.17'de görüldüğü üzere ACF grafiğinde gecikmeler çoğunlukla alt ve üst güven sınırları arasında yer aldığından ve ADF Testi sonucuna göre  $H_0$  hipotezi reddedildiğinden serinin ikinci trend farkı ile trendin ortadan kalktığı söylenebilir.

Ayrıca, ACF ve PACF grafiğinden HKULLANGELIR serisinin 12 periyot ile mevsimselliğe sahip olduğu görülmektedir. Ancak seri durağan olduğu için mevsimsel fark işlemi yapılmamıştır.

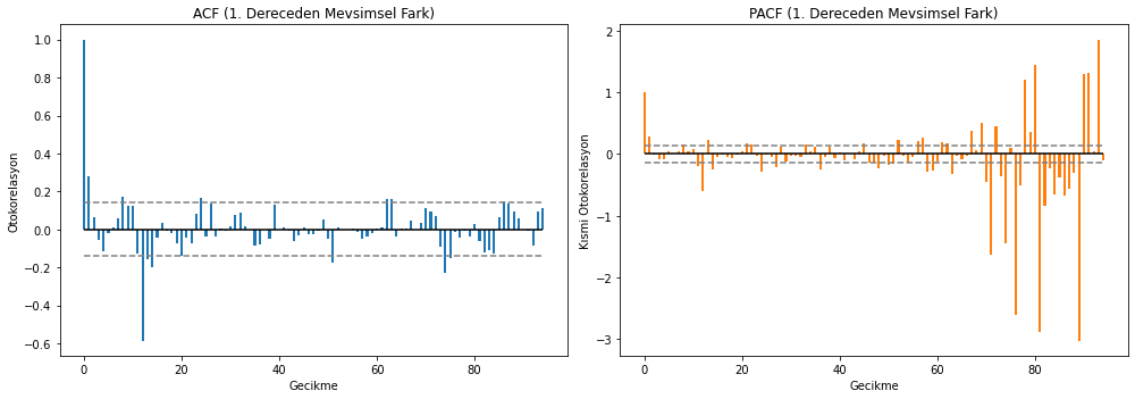
Çalışmada yer alan CDD değişkenine ilişkin ACF ve PACF grafikleri Şekil 4.18'deki gibi elde edilmektedir.



Şekil 4.18. CDD değişkenine ait ACF ve PACF grafikleri

ACF grafiğinde gecikmeler çoğunlukla belirli dönemlerde alt ve üst güven sınırını geçtiğinden bu serinin durağan olmadığı söylenebilir. Pozitif gecikmelerden her on iki gecikmede birbirini tekrarlamaktadır. PACF grafiğinde on ikinci gecikmenin güven sınırını geçmesi bu durumu desteklemektedir. Serinin periyodu 12'dir.

Bu nedenle seriyi durağanlaştırmak amacıyla mevsimsel farkı alınmalıdır.



Şekil 4.19. Birinci dereceden mevsimsel farkı alınmış CDD değişkenine ilişkin ACF ve PACF grafikleri

Birinci dereceden mevsimsel farkı alınmış CDD değişkenine ait ACF ve PACF grafiklerinden mevsimselliğin ortadan kalktığı görülmektedir. Serinin durağan hale geldiği söylenebilir (Şekil 4.19).

## 4.2. SARIMAX ve ÇTSA Analizi Sonuçları

### 4.2.1. SARIMAX Analizi Sonuçları

ELEKTRIK\_DENGE değişkeni ikinci dereceden trend farkı alındıktan sonra durağanlaştığı için SARIMAX modellerinin analizlerinde fark parametreleri  $d=2$  ve  $D=0$  olarak ele alınmaktadır.

ELEKTRIK\_DENGE değişkeninin durağanlaştırılmış ACF ve PACF grafiklerindeki (Şekil 4.11) güven sınırları dışındaki ilk gecikmelere göre parametre değerleri  $p$ 'nin derecesi maksimum 4,  $q$ 'nun derecesi maksimum 2 olacak şekilde belirlenmektedir. HANEHALKI\_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD bağımsız değişkenlerinin tüm kombinasyonları ile SARIMAX modelleri oluşturulmaktadır. Bu modellerle belirlenen parametre değerleri göz önünde bulundurularak tüm model denemeleri yapılmaktadır. Bağımsız değişkenlerin tüm model kombinasyonlarının her birinden elde edilen en iyi modellere ait sonuçlar Çizelge 4.2' de verilmektedir.

Çizelge 4.2. SARIMAX modellerine ilişkin RMSE, MAE ve MAPE sonuçları

BAĞIMSIZ DEĞİŞKENLER	SARIMAX MODELİ	RMSE	MAE	MAPE
HANEHALKI_SAYI	$(1, 2, 0)(1, 0, 0)_{36}$	12,3309	6,1503	0,1408
HKULLANGELIR	$(0, 2, 1)(2, 0, 0)_{36}$	10,5985	5,8676	0,1304
CDD	$(1, 2, 0)(1, 0, 0)_{36}$	12,8277	6,7743	0,1526
HANEHALKI_SAYI ve HKULLANGELIR	$(0, 2, 1)(1, 0, 0)_{36}$	11,3151	6,5673	0,1504
HANEHALKI_SAYI ve CDD	$(0, 2, 1)(2, 0, 0)_{36}$	11,3108	6,7257	0,1538
HKULLANGELIR ve CDD	$(0, 2, 1)(1, 0, 0)_{36}$	11,2709	6,5190	0,1460
HANEHALKI_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD	$(1, 2, 0)(1, 0, 0)_{36}$	11,9074	6,1609	0,1422

Hane Halkı Elektrik Tüketimini açıklamak için kullanılan bağımsız değişkenler SARIMAX modeli ile analiz edilmektedir. Anlamlı değişkenlerin ilgili kombinasyonları Çizelgede 4.2' de görüldüğü şekilde en iyi modeller için model seçim ölçütlerine göre kıyaslanmaktadır. HANEHALKI\_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD bağımsız değişkenleri ile açıklanan SARIMAX $(1, 2, 0)(1, 0, 0)_{36}$  modeli açıklayıcı değişken kaybetmemek için tercih edilmiştir. Bu modele ait sonuçların özeti aşağıdaki gibidir.

Çizelge 4.3. SARIMAX(1, 2, 0)(1, 0, 0)<sub>36</sub> modeli katsayısı sonuçları

Model	SARIMAX(1, 2, 0)(1, 0, 0) <sub>36</sub>			
	Katsayı	Standart hata	Z değeri	P değeri
HANEHALKI_SAYI	-1,3914	0,0650	-21,2970	0,0000
HKULLANGELIR	0,0346	0,0150	2,2480	0,0250
CDD	0,0000	0,0000	3,2240	0,0010
AR(1)	-0,4802	0,0330	-14,4540	0,0000
AR(36)	0,5290	0,0230	23,4780	0,0000

Çizelge 4.3'te modeldeki katsayıların değerleri, katsayıların standart hatası ve anlamlılık düzeyleri (P-değerleri) yer almaktadır. Burada yer alan tüm katsayılar için hipotezler sırasıyla;

- AR(1) terimi için:

“H<sub>0</sub>: AR(1) = 0 (Modelin 1 dönem önceki gecikme değerinin ELEKTRIK\_DENGE üzerinde etkisi yoktur).

H<sub>s</sub>: AR(1) ≠ 0 (Modelin 1 dönem önceki gecikme değerinin ELEKTRIK\_DENGE üzerinde etkisi vardır).”

- Mevsimsel AR(36) terimi için:

“H<sub>0</sub>: AR(36) = 0 (Modelin hatalarının 36 dönem önceki mevsimsel değerinin ELEKTRIK\_DENGE üzerinde etkisi yoktur).

H<sub>s</sub>: AR(36) ≠ 0 (Modelin hatalarının 36 dönem önceki mevsimsel değerinin ELEKTRIK\_DENGE üzerinde anlamlı bir etkisi vardır).”

- HANEHALKI\_SAYI değişkeni için:

“H<sub>0</sub>: HANEHALKI\_SAYI değişkeninin ELEKTRIK\_DENGE üzerinde etkisi yoktur.

H<sub>s</sub>: HANEHALKI\_SAYI değişkeninin ELEKTRIK\_DENGE üzerinde anlamlı bir etkisi vardır.”

- HKULLANGELIR değişkeni için:

“H<sub>0</sub>: HKULLANGELIR değişkeninin ELEKTRIK\_DENGE üzerinde etkisi yoktur.

H<sub>5</sub>: HKULLANGELIR değişkeninin ELEKTRIK\_DENGE üzerinde anlamlı bir etkisi vardır.” ,

- CDD değişkeni için:

“H<sub>0</sub>: CDD değişkeninin ELEKTRIK\_DENGE üzerinde etkisi yoktur.

H<sub>5</sub>: CDD değişkeninin ELEKTRIK\_DENGE üzerinde anlamlı bir etkisi vardır.” şeklinde kurulmaktadır.

Çizelge 4.3’ten AR(1) terimi, AR(36) terimi, HANEHALKI\_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD değişkeninin katsayıları P-değeri 0,05’ten küçük olduğundan istatistiksel olarak anlamlı etkilerinin olduğu %95 güven düzeyi ile söylenebilir.

SARIMAX modellerinin ele alınan seriye uygun olup olmadığının tespiti hata analizi ile yapılır. Bir modelin doğruluğu modelden elde edilen tahmin değerleri ile gerçek değerler arasındaki farkın yani hata teriminin küçüklüğü ile doğru orantılıdır. Hata serisi, akgürültü serisi olmadığında seriye uydurulan modelin tahmin ve öngörülerine güvenilmez. Hata serisi tamamıyla rasgele hareketlere sahip olmalı ve ele alınan zaman serisi ile ilgili hiçbir bilgi taşımamalıdır [61]. Bu nedenle çalışmada yer alan modellerin geçerliğinin testi için,

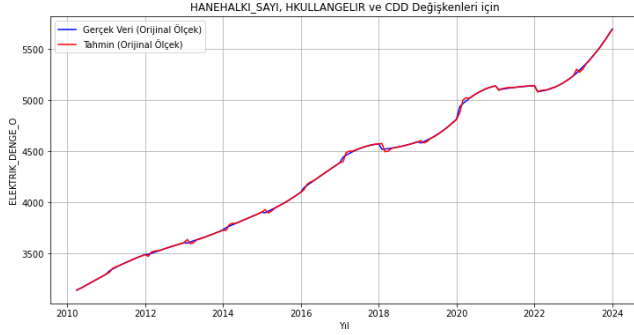
“H<sub>0</sub>: Hata terimleri ak gürültüdür (Otokorelasyon yoktur).

H<sub>5</sub>: Hata terimleri ak gürültü değildir (Otokorelasyon vardır).” hipotezleri kurulmuştur.

Çizelge 4.4. SARIMAX(1, 2, 0)(1, 0, 0)<sub>36</sub> modeli Ljung-Box Testi sonuçları

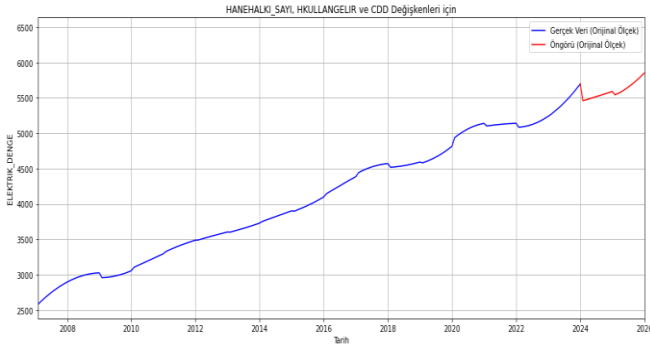
Gecikme Sayısı	P Değeri	Gecikme Sayısı	P Değeri	Gecikme Sayısı	P Değeri	Gecikme Sayısı	P Değeri
1	0,268	13	0,842	25	0,751	37	0,290
2	0,271	14	0,883	26	0,783	38	0,313
3	0,410	15	0,919	27	0,808	39	0,348
4	0,577	16	0,940	28	0,843	40	0,390
5	0,711	17	0,960	29	0,875	41	0,431
6	0,804	18	0,974	30	0,900	42	0,474
7	0,876	19	0,984	31	0,922		
8	0,928	20	0,990	32	0,940		
9	0,950	21	0,994	33	0,954		
10	0,967	22	0,993	34	0,891		
11	0,954	23	0,995	35	0,673		
12	0,783	24	0,706	36	0,260		

Ljung-Box Testi sonucunda tüm gecikmelere ait P değerleri 0,05'ten büyük olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, 0,05'ten büyük olduğundan  $H_0$  reddedilemez. Hata serisinin akgürültü serisi olduğu %95 güven düzeyi ile söylenebilir. SARIMAX(1, 2, 0)(1, 0, 0)<sub>36</sub> modelini kullanmak güvenilirdir.



Şekil 4.20. ELEKTRİK\_DENGE değişkenine ilişkin orijinal seri ve HANEHALKI\_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD bağımsız değişkenlerinin SARIMAX ile elde edilen tahmin serisi uyum grafiği

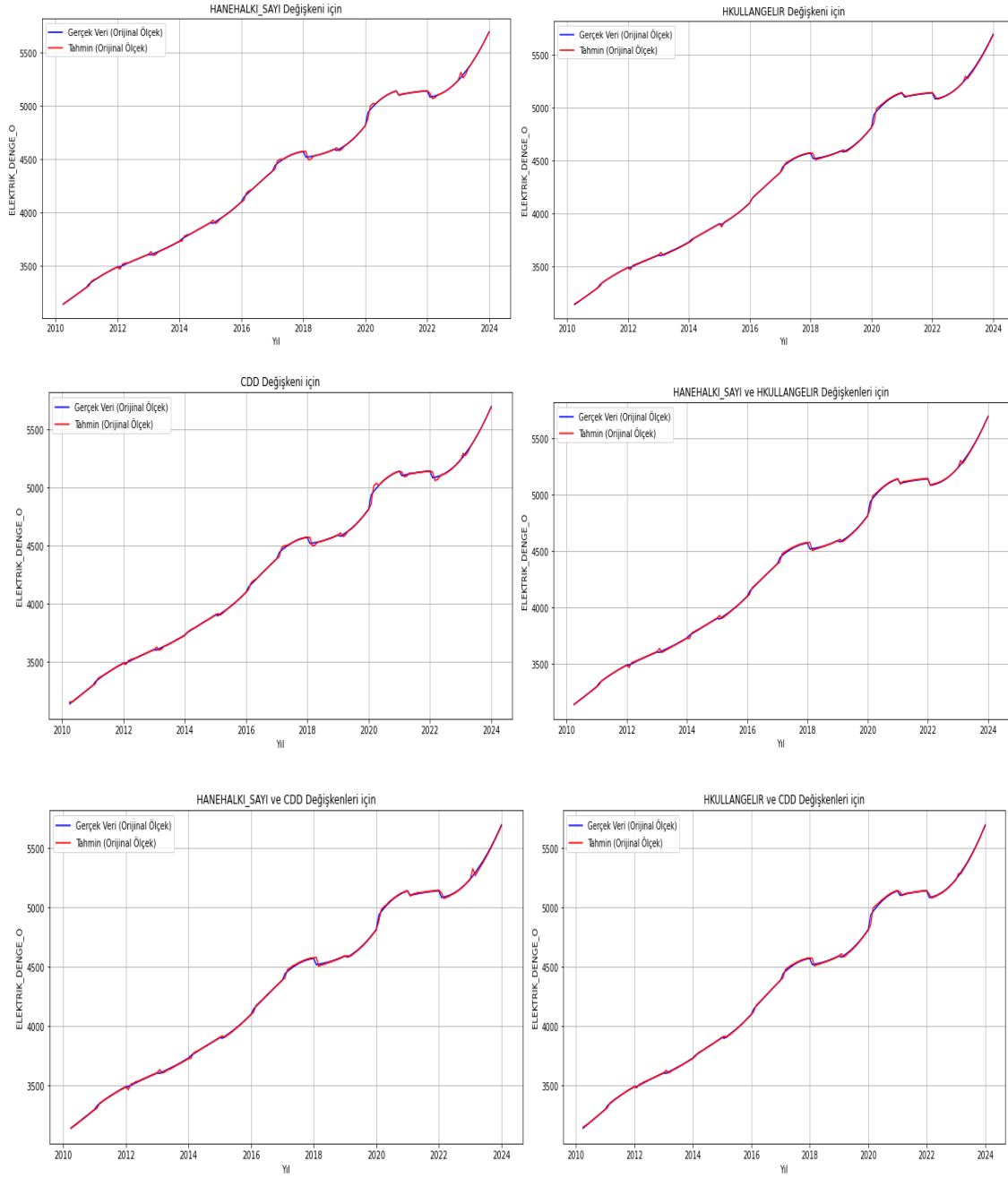
Şekil 4.20 incelendiğinde, orijinal seri ile tahmin serisinin uyumlarının oldukça iyi olduğu görülmektedir. Öngörü değerleri tahmini Şekil 4.21 'de incelendiğinde önümüzdeki üç yıl hızlı artış içinde olacağı beklenmektedir.



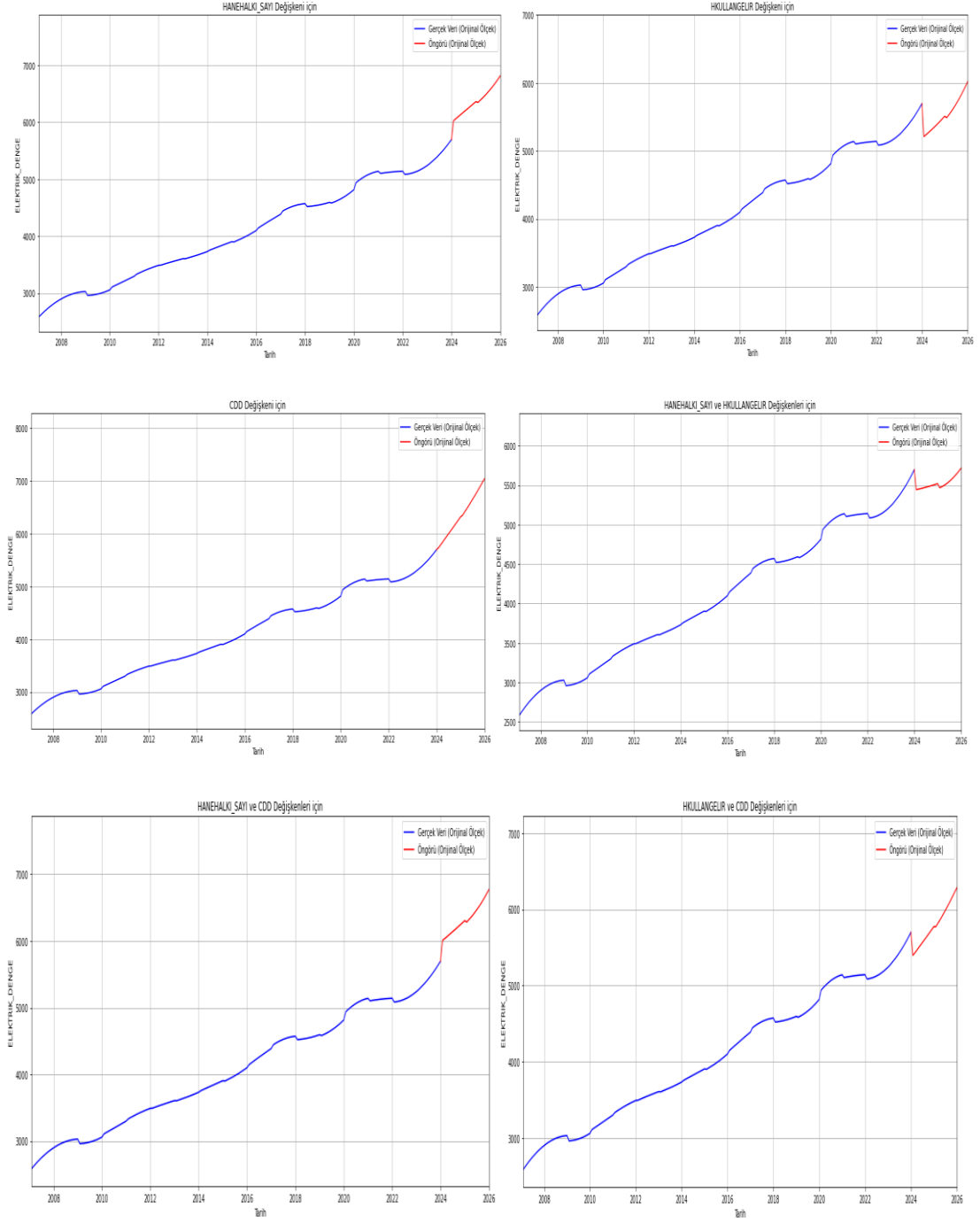
Şekil 4.21. ELEKTRİK\_DENGE değişkenine ilişkin orijinal seri ve HANEHALKI\_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD bağımsız değişkenlerinin SARIMAX ile elde edilen öngörü değerleri grafiği

Çizelge 4.2' de yer alan tüm SARIMAX modelleri için benzer işlemler ile katsayıların anlamlılığına bakılmış ve hata serilerinin ak gürültü serisi olup olmadığı kontrol edilmiştir. Anlamlı modeller içinden seçilen en uygun modellerden elde edilen tahmin ve

öngörü serileri hesaplanmıştır. Bu serilere ait grafikler sırasıyla Şekil 4.22 ve 4.23'te verilmektedir.



Şekil 4.22. ELEKTRİK\_DENGE değişkenine ilişkin orijinal seri ve tahmin serileri uyum grafikleri



Şekil 4.23. ELEKTRİK\_DENGE değişkenine ilişkin orijinal seri ve öngörü değerleri

#### 4.2.2. ÇTSA Analizi Sonuçları

ÇTSA modelleri için öncelikle L (pencere uzunluğu) ve r (bileşen sayısı) parametreleri belirlenmelidir. L değeri 12 ve 12'nin katları olmalıdır. Aylık verilerde yıllık döngüyü yakalamak için L değeri genellikle 12 veya 24 olarak belirlenmektedir. Veri setimiz 204 gözleme sahip olduğundan 12'den başlayıp 12'nin katları 96'ya (N/2) kadar denenmiştir.

L (pencere uzunluğu), analizin temel parametrelerinden biridir ve ayrıştırılacak toplam bileşen sayısını doğrudan belirlemektedir. Eğer 'L=24' ise, ÇTSA toplamda 24 temel bileşen (özvektör) üretecektir. Bu bileşenler, açıkladıkları varyans miktarına göre büyükten küçüğe doğru sıralanır (1'den 24'e kadar). Bileşenlerin seçiminde en büyük tekil değerlere sahip olanlar belirlenir. r değeri her zaman L değerinden küçük olacak şekilde seçilmelidir. Bu çalışmadaki her bir model için uygun L ve r parametreleri çeşitli analizler ile belirlenmektedir.

Çizelge 4.5. ÇTSA yöntemine ilişkin RMSE, MAE ve MAPE sonuçları

BAĞIMSIZ DEĞİŞKENLER	Model parametreleri (L,r)	RMSE	MAE	MAPE
HANEHALKI_SAYI	L=36, r=17	8,2988	5,1499	12,4855
HKULLANGELIR	L=12, r=10	1,9809	1,2424	0,0304
CDD	L=12, r=7	4,5141	2,3717	0,0585
HANEHALKI_SAYI ve HKULLANGELIR	L=12, r=10	1,9808	1,2424	0,0304
HANEHALKI_SAYI ve CDD	L=12, r=7	4,4898	2,3671	0,0585
HKULLANGELIR ve CDD	L=12, r=7	3,7904	2,1262	0,0526
HANEHALKI_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD	L=12, r=7	3,9626	2,2085	0,0547

Hane Halkı Elektrik Tüketimini açıklamak için kullanılan bağımsız değişkenler ÇTSA yöntemi ile de analiz edilmektedir. Bağımsız değişkenlerin ilgili kombinasyonları Çizelge 4.5'te görüldüğü şekilde hata ktiterlerine göre kıyaslanmaktadır. HANEHALKI\_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD bağımsız değişkenleri ile açıklanan L=12 ve r=7 parametrelili yöntem açıklayıcı değişken kaybetmemek için tercih edilmiştir. Bu yöntemle ait detaylı analiz aşağıdaki gibidir.

Öncelikle L değeri 12'den başlayıp 12'nin katları şeklinde sırasıyla 96'ya kadar denenmiştir. Her bir L değeri için W-korelasyon matrisi analizi ile en uygun değeri belirlenmiştir. W-korelasyon matrisi grafiği, ÇTSA'da elde edilen yeniden yapılandırılmış bileşenler (Reconstructed Components - RCs) arasındaki zamansal

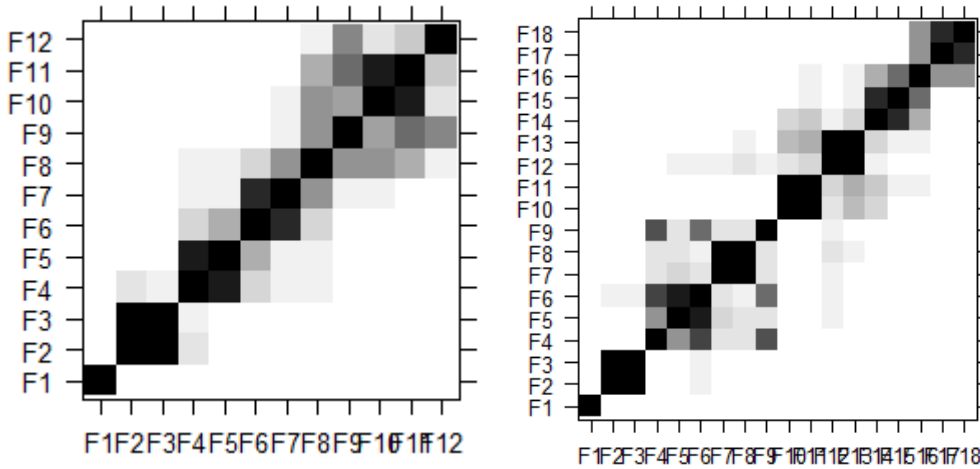
korelasyonu göstermektedir. Bu matris, ÇTSA'nın farklı bileşenlerinin ne kadar bağımsız olduğunu veya birbirleriyle ne kadar ilişkili olduğunu anlamak için kullanılır. Bileşenlerin bağımsızlık sayısı arttıkça L sayısının bir sonraki değerine geçilir. L değeri belirlendikten sonra W-korelasyon matrisindeki yüksek ilişkiye sahip olan bileşenlerin sayısı ile r değerine karar verilmektedir. Bileşenler arasındaki ilişkinin derecesi W-korelasyon matrisinin renkleri ile belirlenmektedir.

**Koyu Renk (Siyaha Yakın):** Yüksek pozitif W-korelasyonu gösterir. Bu, iki bileşenin zamansal olarak çok benzer şekilde davrandığı, yani birlikte artıp azaldığı anlamına gelir.

**Açık Renk (Beyaza Yakın):** Düşük W-korelasyonu veya korelasyon yok anlamına gelir. Bu, iki bileşenin zamansal olarak birbirinden bağımsız davrandığı veya çok az ortak örüntüye sahip olduğu anlamına gelir.

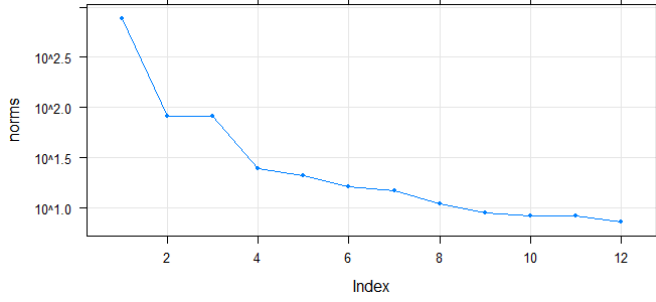
**Gri Tonlar:** Orta seviyede korelasyonu gösterir.

HANEHALKI\_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD bağımsız değişkenleri ile açıklanan ELEKTRIK\_DENGE değişkeni analizinde L=12 ve L=24 için elde edilen W-korelasyon matrisi Şekil 4.24'deki gibi elde edilmektedir. 7. bileşenden sonra bileşenlerin birbiriyle ilişkilerinin arttığı görülmektedir. L değeri artırılarak L=24 için W-korelasyon matrisi incelendiğinde, bileşenler arasındaki ilişkinin fazlaştığı görülmektedir. Bu nedenle, L değeri 12 olarak belirlenmektedir.



Şekil 4.24. Sırasıyla L=12 ve L=24 için W-korelasyon matrisi

L=12 için elde edilen W-korelasyon matrisindeki bileşen çiftleri arasında bağımsız ve yüksek ilişkiye sahip olan bileşenler r değerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. 1. bileşenin bağımsız olması trende sahip, (2,3), (4,5), (6,7) bileşenleri arasında yüksek korelasyon olması mevsimsellik mevcut olduğunu göstermektedir. r değerinin kesin olarak belirlenmesi için dirsek yöntemi ve özvektör çiftleri grafikleri de incelenmektedir.



Şekil 4.25. Bileşen dirsek yöntemi grafiği

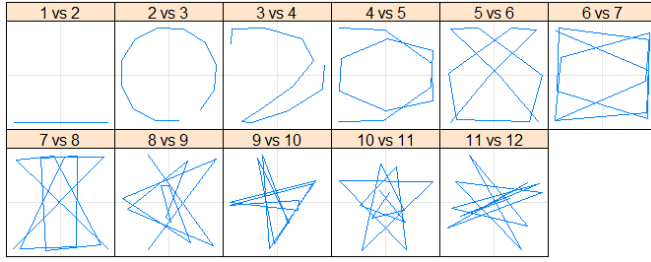
Şekil 4.25'te elde edilen dirsek yöntemi grafiği bileşenlerin önemini görselleştirmek için kullanılmaktadır.

**Yatay Eksen (Index):** Bu eksen, ÇTSA'da elde edilen bileşenlerin önem derecesine göre sırasını göstermektedir. Yani 1. bileşen en önemli bileşen, 2. bileşen ikinci en önemli bileşen şeklinde devam etmektedir.

**Dikey Eksen (norms):** Bu eksen, bileşenlerin normlarını (büyüklük) göstermektedir. Norm, bir bileşenin veri setindeki varyansa ne kadar katkıda bulunduğu bir ölçüsüdür. Bu eksen logaritmik ölçekte (10 tabanında) gösterilmektedir.

İlk 4 bileşen daha yüksek norma sahiptir ve veri setindeki varyansın büyük bir kısmını açıklamaktadır. Trend ve baskın mevsimsellikleri temsil eder. Daha sonraki bileşenlerin normları hızla düştüğünden veri setindeki varyansa daha az katkıda bulunurlar, gürültüyü veya daha az önemli örüntüleri temsil ederler.

Dirsek noktası (elbow), kaç bileşenin önemli örüntüleri yakaladığını ve kaç bileşenin gürültüyü temsil ettiğini ayırmak için bir göstergedir. Şekil 4.25'e göre r değeri 7 olarak düşünülmektedir.



Şekil 4.26. Özvektör çiftleri grafiği

Özvektör çiftleri grafiği elde edilen özvektör çiftlerinin arasındaki ilişkiyi ve veri setindeki örüntüleri anlamak için kullanılmaktadır (Şekil 4.26). Özellikle trend ve mevsimsellikleri görselleştirmede etkilidir. Özvektör çiftlerinin birbirine karşı çizilmiş halini göstermektedir.

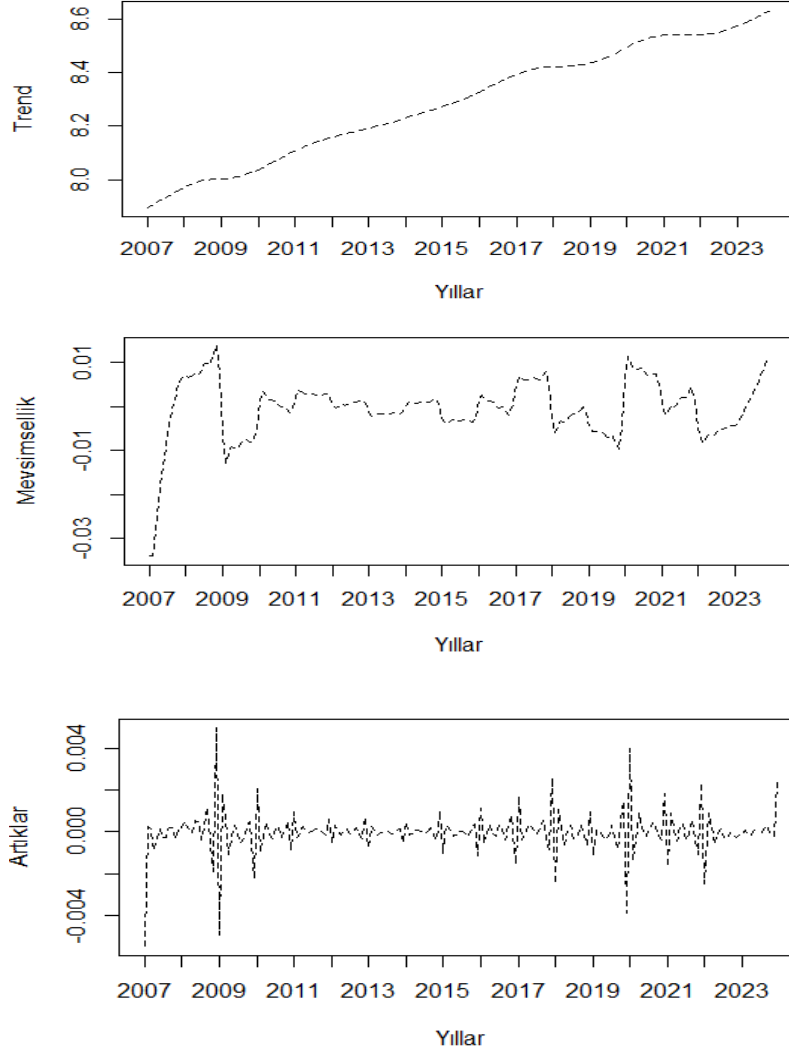
“1 ve 2” panelinde görüldüğü gibi yatay düz bir çizgi özvektörlerin birbirinden bağımsız veya çok az ilişkili olduğunu göstermektedir. Düz çizgi genellikle trendi ifade etmektedir.

“2 ve 3”, “4 ve 5” veya “6 ve 7” panelinde görüldüğü gibi daireye/elipse benzer bir şekil (kapalı döngü) özvektör çiftleri arasında mevsimsellik olabileceğine işaret etmektedir.

“11 ve 12” panelinde görüldüğü gibi karmaşık şekiller/dağınık noktalar mevcut ise daha az düzenli, gürültüye daha yakın veya mevsimsel olmayan bileşenleri temsil edebilmektedir.

Ortası boş olan, ortasına nokta konabilen grafikler ise özvektör çiftleri arasında mevsimsellik olduğunun göstergesidir. (2, 3), (4, 5) ve (6, 7) çiftleri arasında mevsimsellik ve 1. bileşende trend olduğu düşünülür. Bu analiz sonuçlarına göre r değeri 7 olarak seçilmektedir.

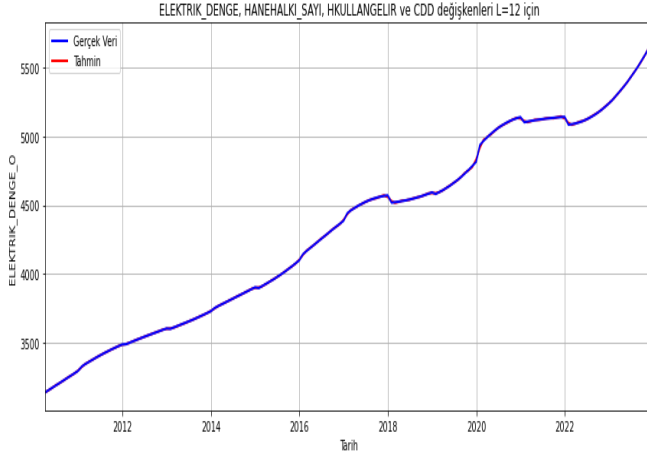
Buradan elde edilen  $L=12$  ve  $r=7$  parametre değerleri ile oluşturulan ÇTSA modeli ile tahmin serisi elde edilmeden önce trend, mevsimsellik ve hata bileşenleri ayrı ayrı Şekil 4.29’daki gibi elde edilir. Bu grafikten tahmin serisinin artan bir trende, baskın olmayan bir mevsimselliğe sahip olduğu görülmektedir.



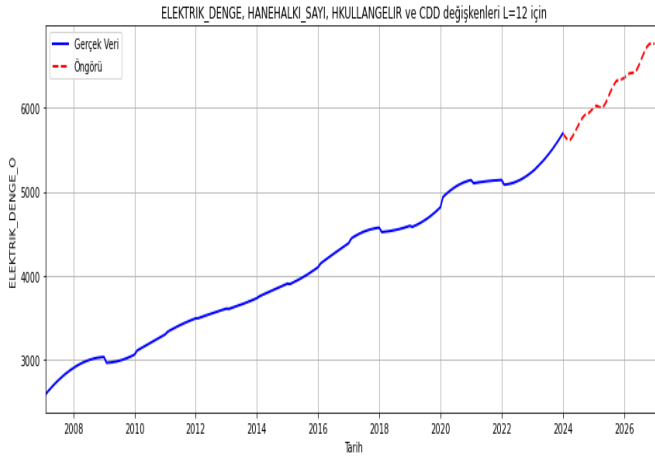
Şekil 4.27. ÇTSA modeli ile elde edilen Trend, Mevsimsel ve Hata bileşenleri grafikleri

Şekil 4.27'deki hata bileşenleri grafiğindeki 2009 yılı civarındaki yüksek sapmalar, o dönemde yaşanan küresel bir ekonomik olayın, yani 2008 Küresel Finans Krizi'nin bir sonucu olabilir. Bu durum, hane halklarının gelirlerini ve iş güvencelerini olumsuz etkilemiştir. Ekonomik belirsizlik ve gelir kaybı yaşayan hane halkları, tasarruf etmek amacıyla enerji dahil olmak üzere tüketimlerini azaltma eğiliminde olabilirler. 2020'deki sapma ise Pandemi etkisiyle elektrik tüketimindeki dalgalanmalardan kaynaklanabilir. Model bu anormal durumları öngöremediği için artıklar grafiğinde belirgin sapmalar görülmüştür.

ÇTSA modeli ile elde edilen tahmin değerleri Şekil 4.28 incelendiğinde orijinal seri ile tahmin serisi uyumlarının oldukça iyi olduğu görülmektedir. Öngörü değerleri tahmini Şekil 4.29’da incelendiğinde önümüzdeki üç yıl artış içinde olacağı beklenmektedir.

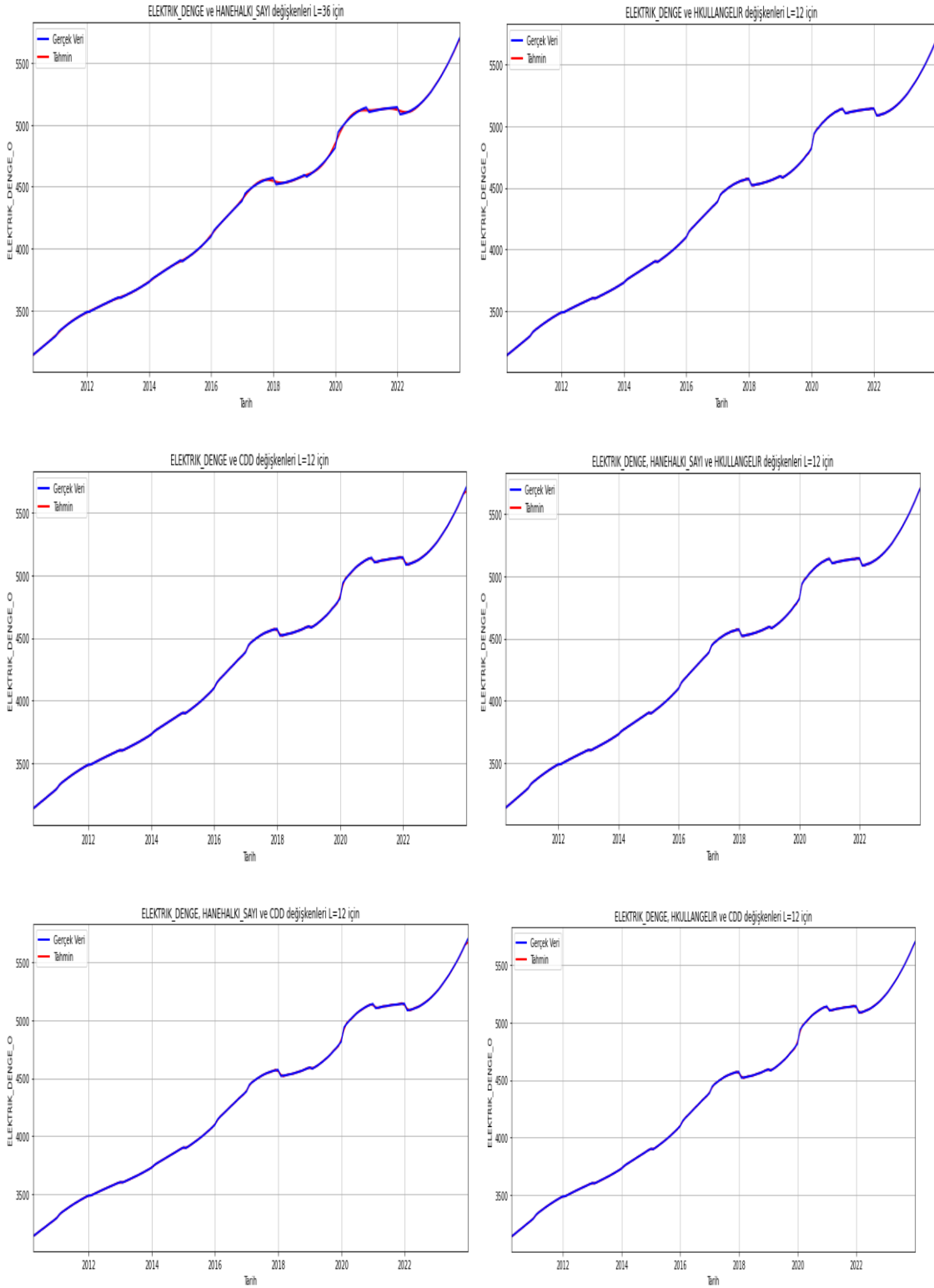


Şekil 4.28. ELEKTRIK\_DENGE değişkenine ilişkin orijinal seri ve HANEHALKI\_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD bağımsız değişkenlerinin ÇTSA ile elde edilen tahmin değerleri uyum grafiği

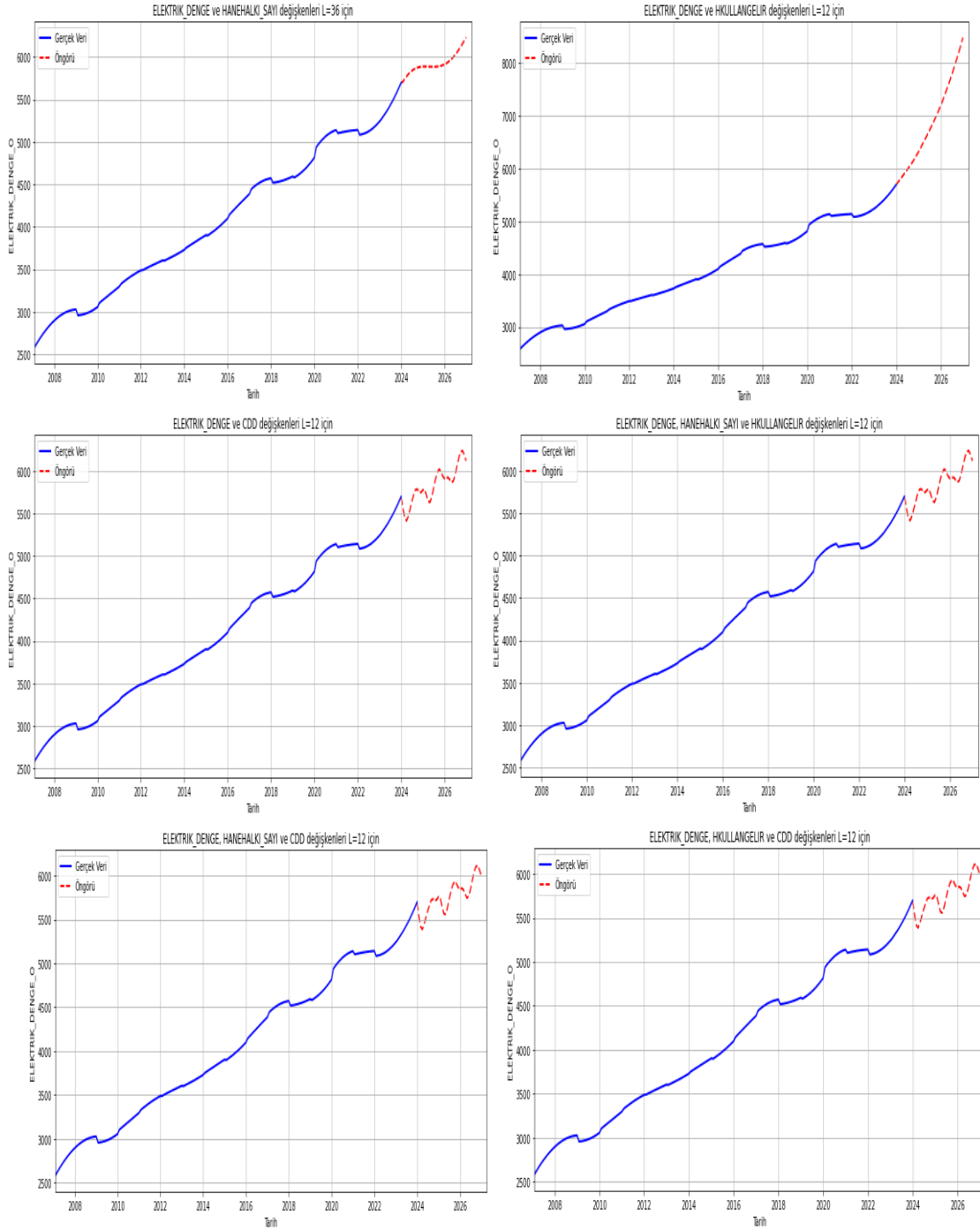


Şekil 4.29. ELEKTRIK\_DENGE değişkenine ilişkin orijinal seri ve HANEHALKI\_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD bağımsız değişkenlerinin ÇTSA ile elde edilen öngörü değerleri grafiği

Çizelge 4.5’te yer alan tüm ÇTSA modelleri için benzer işlemler ile parametre değerleri L ve r belirlenmiştir. Bu modellerden elde edilen tahmin ve öngörü grafikleri sırasıyla Şekil 4.30 ve 4.31’de verilmektedir.



Şekil 4.30. ELEKTRIK\_DENGE değişkenine ilişkin orijinal seri ve bağımsız değişkenlerin ÇTSA ile elde edilen tahmin değerleri uyum grafiği



Şekil 4.31. ELEKTRIK\_DENGE değişkenine ilişkin orijinal seri ve bağımsız değişkenlerin ÇTSA ile elde edilen öngörü değerleri grafiği

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

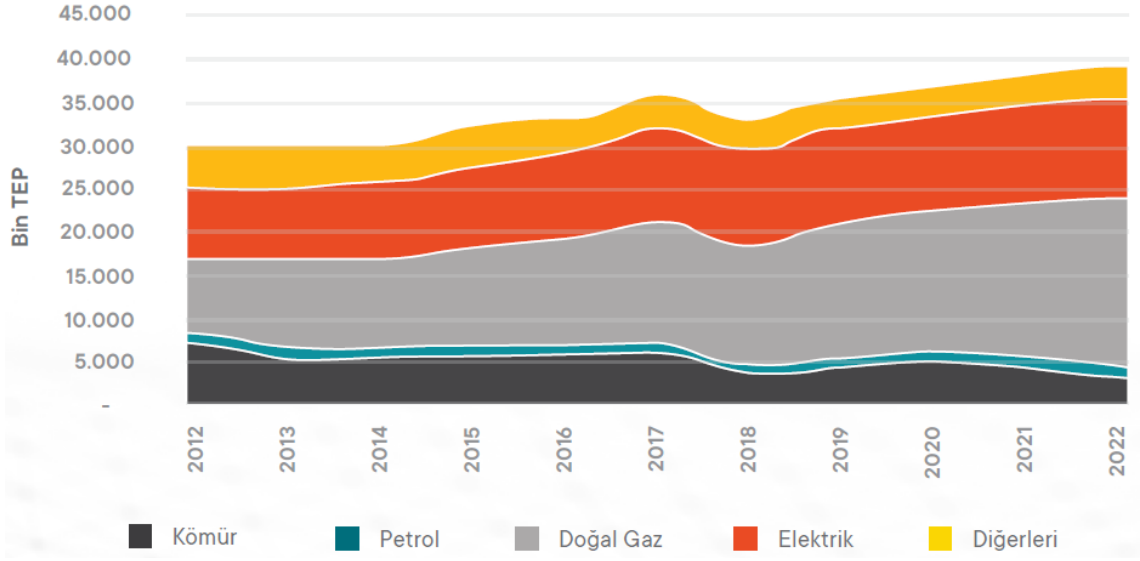
Teknoloji alanındaki gelişmeler, elektronik cihazların kullanımındaki artış, ürün yelpazesinin çeşitlenmesi ile konforlu yaşam tercihi; artan nüfusla birlikte enerji tüketimini de artırmaktadır. Küresel enerji talebindeki artış neticesinde artan talepleri karşılama, enerjiyi verimli kullanma ve iklim değişikliğiyle mücadele gerekliliği, enerji tüketim kalıplarının incelenmesi ihtiyacını oluşturmuştur [1]. Enerji konusunda kalıcı çözümlerin bulunması için enerji tüketiminin ele alınması oldukça önemlidir.

Üretimde en önemli girdilerden biri olmasından ve taşımacılıktaki kullanımıyla birlikte Türkiye’de artan nüfus ile enerji gereksinimi gün geçtikçe artmaktadır [46]. Enerji dünyası iklim değişikliği ve tedarik zinciri problemleri ile karşı karşıyadır. Bu gelişmelere bağlı olarak artan emtia ve enerji fiyatlarında yükselmeler yaşanmıştır.

Yüksek enerji maliyetleri ve tedarik sorunları, enerji kaynaklarında dışa bağımlı olan ülkelerde enerji arz güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Bu sebeple birçok ülke enerji arz güvenliğinin sağlanmasına yönelik yeni planlar yapmaktadır. Avrupa’da Yeşil Mutabakat, ABD’de Enflasyonu Düşürme Yasası gibi merkezinde temiz enerji dönüşümü olan ekonomik programlar devreye alınmaktadır.

Yeşil Kalkınma Devrimi ile Türkiye 2053 yılı net sıfır emisyon hedefini ilan etmiştir. Ülkemizin 2053 yılı net sıfır iklim hedefleri doğrultusunda sürdürülebilir ve çevreye duyarlı bir enerji politikası gereği, enerjide arz güvenliğini güçlendirmek ve dışa bağımlılığı azaltmak için Enerji Verimliliği 2030 Stratejisi ve 2024-2030 yılları arasında uygulanacak olan II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı uygulanmaya başlanmıştır [66].

Ülkemizde son yıllarda hızla gelişen binalardaki ve hizmetler sektöründeki nihai enerji tüketimi Enerji Verimliliği Strateji Belgesi’nin yürürlükte olduğu 2012-2022 yılları arasında %30,0 artarak 30,3 MTEP’ten 39,2 MTEP’e yükselmiştir. Enerji talebindeki yıllık ortalama artışın %2,6 olarak gerçekleştiği bina ve hizmetler sektörü, 2022 yılında nihai enerji tüketiminde %32,6 paya sahip olmuştur (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. 2012-2022 dönemi bina ve hizmetler sektörü enerji talebinin enerji kaynakları bazında gelişimi [66]

2012 yılında 19,8 milyon olan hane halkı sayısı 2022 yılına gelindiğinde %36 artarak 26,9 milyona ulaşmıştır. 2022 yılı itibarıyla yaklaşık 9,6 milyona erişen bina stokunun %87'sini konut nitelikli yapılar oluşturmaktadır. Hızla büyüyen ve dönüşen yapı stokunda, enerjinin verimli kullanılması ve yerinde üretimin yaygınlaştırılması açısından önemli bir potansiyel bulunmaktadır.

2023 yılı verilerine göre 26,71 MTEP enerji tüketimine sahip konut sektörü %22 pay ile sanayi ve ulaştırma sektörlerinin ardından nihai enerji tüketimi içerisinde en büyük paya sahip üçüncü sektördür.

Konut sektöründe enerji verimliliğinin enerji tüketimine olan etkisinin tespit edilmesi ve veriye dayalı doğru politika seçeneklerinin belirlenebilmesi için öncelikle enerjinin tüketim noktalarının bilinmesi gerekmektedir.

Özellikle hane halkının elektrik tüketimi, toplam nihai elektrik tüketiminin %23'lük kısmını<sup>4</sup> oluşturması nedeniyle, enerji verimliliği stratejileri açısından kritik bir odak noktasıdır. Hane halkı elektrik tüketiminin doğru bir şekilde tahmin edilmesi; enerji üretim planlarının optimize edilmesi, talep tarafı yönetimi programlarının

<sup>4</sup> ETKB 2023 yılı Ulusal Enerji Denge Tablosu [65] kullanılarak hesaplanmıştır.

etkinleştirilmesi, şebeke dengesinin korunması ve tüketicilerin enerji tasarrufu yapmalarına olanak sağlanması gibi birçok fayda sunar [2]. Enerji tüketiminin değişkenliği birçok faktöre bağlı olduğundan bu tahminleri yapmak için yöntemler geliştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, hane halkı elektrik tüketimi (ELEKTRIK\_DENGE) açıklanmak/tahmin edilmek istenen değişkendir. Bu değişkenin, dikkate alınan değişkenler arasından hane halkı sayıları (HANEHALKI\_SAYI), hane halkı kullanılabilir geliri (HKULLANGELIR) ve soğutma gün dereceleri (CDD) değişkenleri ile en iyi açıkladığı tespit edilmiştir. Bu nedenle, SARIMAX ve ÇTSA yöntemleri için bu değişkenler ile kurulan modeller en iyi modeller olarak belirlenmiştir. İki yöntem arasında ise ÇTSA yöntemi ile bu değişkenin en iyi açıklandığı tespit edilmiştir.

Literatürde de bu tez çalışmasında kullanılan açıklayıcı değişkenleri destekleyici çalışmalar mevcuttur. Hane halkı elektrik tüketim davranışlarını anlamaya odaklanan ve tüketimi açıklamak için hane halkı sayısı, hane halkı geliri ve iklim koşulları (soğutma gün derecesi, CDD) değişkenlerinin hepsini ya da bazılarını kullanan çalışmalar Huang ve ark. (2024), Serrano ve ark. (2015), Lévy ve Belaid (2018), Brounen, Kok ve Quigley (2012), Hara ve ark. (2015), Romero-Jordán, Peñasco ve Del Rio (2014), Kavousian, Rajagopal ve Fischer (2013), Silk ve Joutz (1997) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalar, bu değişkenlerin elektrik tüketimini etkileyen temel değişkenler olduğunu savunmuştur [28, 36, 37, 38, 39, 40].

SARIMAX ve ÇTSA yöntemleri ile elde edilen Hane halkı elektrik tüketim tahminleri elektrik piyasasına ait rapor, plan ve resmi veriler ile aşağıdaki şekilde kıyaslanmıştır.

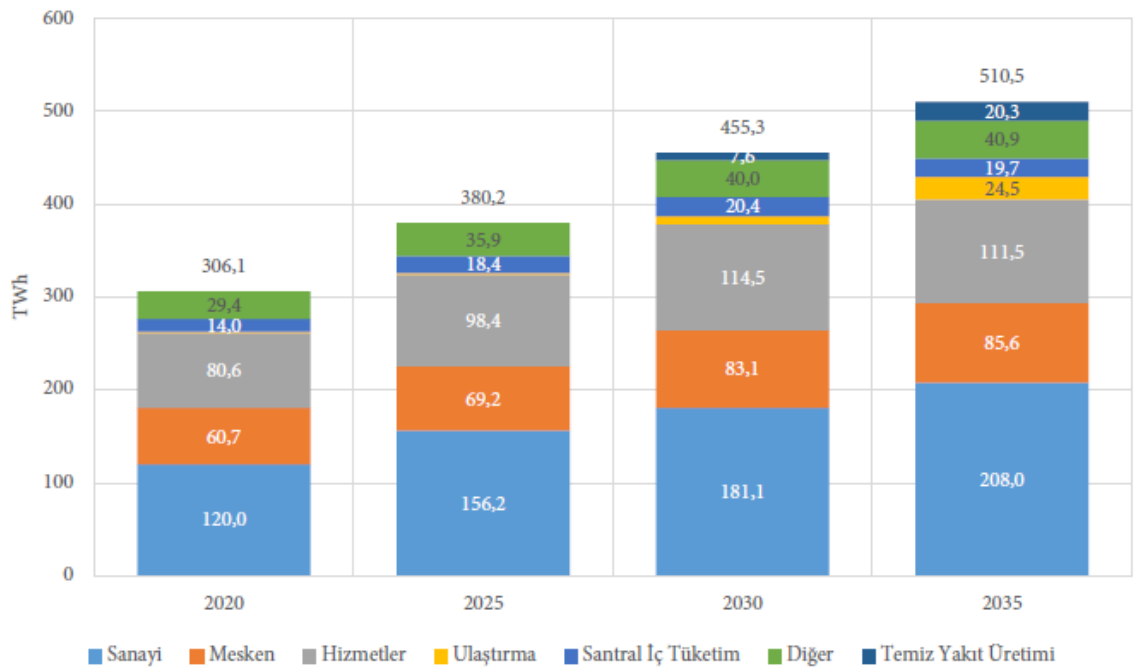
Çizelge 5.1. HANEHALKI\_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD değişkenli SARIMAX modelinden elde edilen yıllık toplam öngörü tahminleri

Yıl	Hane Halkı Elektrik Tüketimi (GWh)
2024	66.290,86
2025	68.136,90
2026	73.842,79

SARIMAX yönteminin HANEHALKI\_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD değişkenleriyle kurulan modeli ile elde edilen 36 aylık öngörü değerleri 2024, 2025 ve 2026 yıl toplamları şeklinde Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Türkiye’de bina sektörü, 2023 yılında 121 milyon 397 bin TEP olarak gerçekleşen toplam nihai enerji tüketimi içerisinde %32’lik pay ile en yüksek enerji tüketimine sahiptir. Bina sektörü enerji tüketimi, 26 milyon 428 bin TEP olan konut sektörü ile 12 milyon 743 bin TEP olan ticaret ve hizmetler sektörünün toplamından oluşmaktadır. Konut (mesken) sektörü, diğer bir adıyla hane halkı sektörü, ülkenin bütün hanelerinin toplamını tarif etmektedir. Türkiye hane halkı nihai enerji tüketimi son beş yılda %13 oranında artış göstermiştir.

2000-2020 döneminde yılda ortalama %4,4 oranında artarak 128 TWh’ten 306,1 TWh’e yükselen elektrik tüketiminin, 2035 yılına kadar yıllık ortalama %3,5 düzeyinde artarak 510,5 TWh seviyesine ulaşması beklenmektedir (Şekil 5.2). Tahmin dönemi boyunca yıllık bazda sanayi sektöründe %3,7, meskenlerde %2,3, hizmetler sektöründe %2,2 yıllık ortalama elektrik tüketim artışı olacağı öngörülmektedir (Çizelge 5.2).



Şekil 5.2. Sektörlere göre elektrik tüketim tahmini [49]

Çizelge 5.2. Elektrik tüketiminde sektörlerin payı (%)

	2025	2030	2035
Sanayi	47,9	46,8	48,4
Mesken	21,2	21,5	19,9
Hizmetler	30,2	29,6	26,0
Ulaştırma	0,7	2,2	5,7
Sektörler Toplam	100,0	100,0	100,0

Türkiye Ulusal Enerji Planı Elektrik Tüketim Tahmini raporuna göre Şekil 5.2’de de görüldüğü üzere 2025 yılında 69,2 TWh hane halkı elektrik tüketimi öngörülmektedir [49]. Çizelge 5.1’de SARIMAX yöntemi ile 2025 yılında 68.136,90 GWh hane halkı elektrik tüketim tahmini elde edilmiştir. Sonuçlar, Türkiye Ulusal Enerji Planı Elektrik Tüketim Tahmini ile yakınsamaktadır.

Çizelge 5.3. HANEHALKI\_SAYI değişkenli SARIMAX modelinden elde edilen yıllık toplam öngörü tahminleri

Yıl	Hane Halkı Elektrik Tüketimi (GWh)
2024	74.333,31
2025	78.746,71
2026	86.733,97

Ayrıca SARIMAX yönteminin HANEHALKI\_SAYI değişkeniyle kurulan modelin Şekil 4.25’teki aylık öngörü değerleri incelendiğinde hızlı artışın gelecek beklentileri karşıladığı dikkat çekmektedir. Bu model ile elde edilen 36 aylık öngörü değerleri 2024, 2025 ve 2026 yıl toplamları şeklinde Çizelge 5.3’te verilmiştir.

EPDK 2024 Yılı Aralık Aylık Elektrik Sektör Raporu’na göre 2024 yılı mesken tüketicisi elektrik tüketimi bir önceki yıla göre %13,43 artarak yaklaşık 75 milyon MWh olarak gerçekleşmiştir (Çizelge 5.4). Mesken tüketicisi sayısı ise 2024 yılı Aralık ayında bir önceki yılın aynı ayına göre yaklaşık %2 artmıştır (Çizelge 5.5).

Çizelge 5.4. Ocak-Aralık 2024 faturalanan elektrik tüketiminin tüketici türü bazında dağılımının dönemler arası karşılaştırılması (MWh-%)

	2023		2024		
	Ocak – Aralık		Ocak –Aralık		
Tüketici Türü	Miktar	Pay (%)	Miktar	Pay (%)	Değişim (%)
Aydınlatma	5.530.992,17	2,10	5.735.782,61	2,06	3,70
Kamu ve Özel Hizmetler Sektörü ile Diğer	65.948.464,63	25,00	71.859.638,59	25,75	8,96
Mesken	66.201.076,70	25,09	75.092.613,06	26,91	13,43
Sanayi	112.737.522,91	42,73	113.966.801,35	40,84	1,09
Tarımsal Faaliyetler	13.426.458,44	5,09	12.410.926,20	4,45	-7,56
<b>Genel Toplam</b>	<b>263.844.514,85</b>	<b>100,00</b>	<b>279.065.761,80</b>	<b>100,00</b>	<b>5,77</b>

Kaynak: EPDK 2024 Aylık Elektrik Sektör Raporu [67]

SARIMAX yönteminin HANEHALKI\_SAYI değişkeniyle kurulan modeli sonucunda 2024 yılında 74.333,31 GWh hane halkı elektrik tüketimi tahmin edilmiştir (Çizelge 5.3). Sonuçlar EPDK 2024 Yılı Aralık Ayı Elektrik Sektör Raporu ile yakınsamaktadır. Çizelge 5.3'te görüldüğü üzere 2025 yılında 78.746,71 GWh ve 2026 yılında ise 86.733,97 GWh hane halkı elektrik tüketimi öngörülmektedir.

Çizelge 5.5. Tüketici sayısının tüketici türü bazında dağılımının dönemler arası karşılaştırılması (Adet-%)

	2023		2024		
	Aralık		Aralık		
Tüketici Türü	Tüketici Sayısı	Pay (%)	Tüketici Sayısı	Pay (%)	Değişim (%)
Aydınlatma	280.098	0,56	284.654	0,56	1,63
Kamu ve Özel Hizmetler Sektörü ile Diğer	7.114.036	14,31	7.248.942	14,30	1,90
Mesken	41.501.522	83,46	42.311.778	83,47	1,95
Sanayi	68.115	0,14	66.535	0,13	-2,32
Tarımsal Faaliyetler	762.774	1,53	781.721	1,54	2,48
<b>Genel Toplam</b>	<b>49.726.545</b>	<b>100,00</b>	<b>50.693.630</b>	<b>100,00</b>	<b>1,94</b>

Çizelge 5.4'te görüldüğü gibi, 2023 yılı mesken elektrik tüketimi EPDK raporunda 66.201,08 GWh olarak açıklanmıştır. 2024 yılında %13,43 artış ile 75.092,61 GWh olmuştur. Bu artış hane halkı elektrik tüketimi serisi incelendiğinde ortalamannın üstünde kalmaktadır. Çizelge 5.5'te görüldüğü üzere, tüketici sayısı 2024 yılı Aralık ayında 2023

yılı Aralık ayına göre yaklaşık 1 milyon abone ile %2 oranında artış göstermiştir. Ayrıca Trafiğe kayıtlı elektrikli otomobillerin dağılımı incelendiğinde elektrikli araçların sayısı 2024 ve 2025 yılında büyük oranda artış göstermektedir (Çizelge 5.6). Bu nedenler ile hane halkı elektrik tüketiminin ortalamanın üstünde artması desteklenmektedir.

Çizelge 5.6. Trafiğe kayıtlı elektrikli otomobillerin dağılımı, 2011-2025

Yıl	Toplam	Elektrikli	Pay(%)
2011	8.113.111	24	0,0
2012	8.648.875	175	0,0
2013	9.283.923	353	0,0
2014	9.857.915	412	0,0
2015	10.589.337	565	0,0
2016	11.317.998	643	0,0
2017	12.035.978	760	0,0
2018	12.398.190	952	0,0
2019	12.503.049	1.176	0,0
2020	13.099.041	2.797	0,0
2021	13.706.065	6.267	0,0
2022	14.269.352	14.552	0,1
2023	15.221.134	80.043	0,5
2024	16.232.458	183.776	1,1
2025	16.499.996	218.238	1,3

Kaynak: TÜİK, Motorlu Kara Taşıtları, Mart 2025

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) “Dünya Enerji Görünümü 2024” raporuna göre küresel elektrik talebi 2023 yılında %2,5'in üzerinde artarak son on yılın ortalamasına benzer bir oran yakalamıştır. 2023'ten 2030'a kadar, belirlenen senaryolara göre yıllık ortalama elektrik talebi artışının en az %3,3 olacağı; 2023'ten 2050'ye kadar ise bu artışın %2,4 olacağı öngörülmektedir [48].

Çizelge 5.7. ÇTSA yönteminden elde edilen yıllık toplam öngörü tahminleri

Yıl	Hane Halkı Elektrik Tüketimi (GWh)
2024	69.642,38
2025	74.114,95
2026	78.899,58

Türkiye Ulusal Enerji Planı Elektrik Tüketim Tahmini, EPDK VE IEA raporları incelendiğinde beklenen tahminlere ÇTSA yöntemi için en uygun öngörü değerlerine HANEHALKI\_SAYI, HKULLANGELIR ve CDD değişkenleri ile ulaşılmaktadır. Bu modelin 36 aylık öngörü değerleri 2024, 2025 ve 2026 yıl toplamaları şeklinde Çizelge 5.7’de verilmiştir. Bu modelin öngörülerinin, uzman görüşü ile en düşük hata kriterlerine sahip durumlardan biri de olduğundan gerçeğe yakın sonuçlar vereceği düşünülmektedir. Yayımlanan tüm raporlar birlikte dikkate alındığında her yılın bir sonrakine göre daha büyük artış oranlarıyla artması beklendiğinden, öngörü sonuçlarının 2026 yılında 78.899,58 GWh ile hane halkı elektrik tüketimi gerçekleşeceği beklenmektedir.

Hane halkı sayısındaki ve hane halkı gelirindeki artış eğilimi, soğutma sistemlerinin ve elektrikli cihaz kullanımının yaygınlaşması ile yaşam standartlarının gelişmesi neticesinde hane halkı elektrik tüketiminin gelecek yıllarda artış yönünde bir trende sahip olması beklenmektedir. Bu demografik, sosyoekonomik ve teknolojik gelişmeler, öngörü modelinde de elde edilen artış eğilimini desteklemekte, tutarlılık göstermektedir.

Kullanılan değişkenlere ilişkin aylık ve günlük düzeyde veri bulunmaması nedeniyle veri mevcudiyeti sınırlıdır. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen analizler, aylık ve günlük verilerin yayımlanmaya başlamasıyla ve Türkiye ile kıyaslanabilir diğer ülke verilerinin de temin edilmesiyle ve hane halkı sayısı, iklim, hane halkı kullanılabilir gelirinin yanı sıra farklı demografik, sosyoekonomik, kültürel ve psikolojik gibi değişkenlerin de çalışmaya dahil edilmesiyle ileriki çalışmalarda geliştirilebilir. Ayrıca il, ilçe ve mahalle düzeyinde bilgilerin elde edilebilmesi halinde daha kapsayıcı mekana bağlı analizler uygulanabilir. Verideki beklenmedik sıçramaları açıklayabilmek için transfer fonksiyonu/dummy değişken eklenerek modelleme çalışması yapılabilir.

Bu çalışma, hane halkı elektrik tüketiminin değişiminde belirleyici olan etkenlerin zaman serisi yöntemleri ile özellikle de bu alanda uygulaması bulunmayan ÇTSA yöntemi ile incelenmesi bakımından literatüre katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasıyla hane halkı elektrik tüketiminin tahmin edilmesine yönelik iki yöntem kıyaslanmış düşük hata kriterlerine sahip yöntem ve gerçeğe yakın tahmin sonuçları elde edilmiş, politika yapıcılara yol göstermesi amacıyla tahmin sonuçları sunulmuştur.

## KAYNAKLAR

- [1] N. Karabağ, C. B. Ç. Kayıkcı ve A. Öngen, %100 Yenilenebilir Enerjiye Geçiş Yolunda Dünya ve Türkiye, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, cilt 21, pp. 230-240, **2021**.
- [2] E. Yavuz, Konutlarda enerji tüketimi kestirimi için derin öğrenme ve makine öğrenme yöntemlerinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, **2020**.
- [3] M. H. Alsharif, M. K. Younes ve J. Kim, Time series ARIMA model for prediction of daily and monthly average global solar radiation: The case study of Seoul, South Korea, Symmetry, cilt 11, no. 2, p. 240, **2019**.
- [4] M. E. Alaoui, L. O. Chahidi, M. Rougui, A. Lemrani ve A. Mechaqrane, Prediction of Energy Consumption of an Administrative Building using Machine Learning and Statistical Methods, Civil Engineering Journal, cilt 9, no. 05, pp. 1007-1022, **2023**.
- [5] K. Jeong, C. Koo ve T. Hong, An estimation model for determining the annual energy cost budget in educational facilities using SARIMA (seasonal autoregressive integrated moving average) and ANN (artificial neural network), Energy, cilt 71, pp. 71-79, **2014**.
- [6] A. Camara, W. Feixing ve L. Xiuqin, Energy Consumption Forecasting Using Seasonal ARIMA with Artificial Neural Networks Models, International Journal of Business and Management, cilt 11, no. 5, p. 231, **2016**.
- [7] A. M. Karki, A. Lekhak, A. Shrestha, B. Bastola, A. Acharya ve A. Acharya, Electric load prediction using SARIMAX, Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering, p. 1-14, **2024**.
- [8] F. R. Alharbi ve D. Csala, A Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Factors (SARIMAX) Forecasting Model-Based Time Series Approach, Inventions, p. 94, **2022**, 7(4).

- [9] H. Ö. Çekim, H. N. Karakavak, G. Özel ve S. Tekin, Earthquake magnitude prediction in Turkey: a comparative study of deep learning methods, ARIMA and singular spectrum analysis, *Environmental Earth Sciences*, cilt 82, no. 387, **2023**.
- [10] K. B. Nuralan, Tekil Spektrum Analizi, Uzun Kısa-Süreli Bellek Ağları Ve Geçişli Tekrarlayan Birim Ağları İle Nehir Akım Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, **2023**.
- [11] H. Hassani, S. Heravi ve A. Zhigljavsky, Forecasting UK Industrial Production with Multivariate Singular, *J. Forecast*, cilt 32, no. 5, p. 395–408, **2013**.
- [12] H. Hassani, Forecasting accuracy evaluation of tourist arrivals, *Annals of Tourism Research*, cilt 63, p. 112–127, **2017**.
- [13] H. Hassani, A. S. Soofi ve A. A. Zhigljavsky, Predicting daily exchange rate with singular spectrum analysis, *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, cilt 11, pp. 2023-2034, **2010**.
- [14] K. Patterson, H. Hassani, S. Heravi ve A. Zhigljavsky, Multivariate singular spectrum analysis for forecasting revisions to real-time data, *Journal of Applied Statistics*, cilt 38, no. 10, p. 2183–2211, **2011**.
- [15] E. S. Silva, H. Hassani ve S. Heravi, Modeling European industrial production with multivariate singular spectrum analysis: A cross-industry analysis, *Journal of Forecasting*, cilt 37, p. 371–384, **2018**.
- [16] Y. Zhang ve X.-f. Hui, Research on Daily Exchange Rate Forecasting with Multivariate Singular Spectrum Analysis, *International Conference on Management Science & Engineering 19th Annual Conference Proceedings*, pp. 1365-1370, **2012**.
- [17] Vikipedi, Ekonomik Büyüme, [https://tr.wikipedia.org/wiki/Ekonomik\\_b%C3%BCy%C3%BCme](https://tr.wikipedia.org/wiki/Ekonomik_b%C3%BCy%C3%BCme) (Erişim tarihi: **21 02 2025**).
- [18] C. F. Tang, B. W. Tan ve I. Ozturk, Energy Consumption And Economic Growth in Vietnam, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, cilt 54, pp. 1506-1514, **2016**.

- [19] M. Azam, A. Q. Khan, B. Bakhtyar ve C. Emirullah, The Causal Relationship Between Energy Consumption And Economic Growth in The ASEAN-5 Countries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, cilt 47, pp. 732-745, **2015**.
- [20] J. Chontanawat, Dynamic Modelling of Causal Relationship between Energy Consumption, CO<sub>2</sub> Emission, and Economic Growth in SE Asian Countries, *Energies*, cilt 13, no. 24, p. 6664, **2020**.
- [21] C. Magazzino, Energy Consumption And GDP In Italy: Cointegration And Causality Analysis, *Environment, Development and Sustainability*, cilt 17, no. 1, pp. 137-153, **2015**.
- [22] F. Öztürk, Energy Consumption–GDP Causality In MENA Countries, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, cilt 12, no. 3, pp. 231-236, **2017**.
- [23] S. Atılgan, Sürdürülebilir Kalkınma Doğrultusunda Elektrik Tüketimi ve Rüzgâr Türbini Üretiminin Tahminlenmesi ve Ekonomik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı, Batman, **2022**.
- [24] S. A. Raza, S. T. Jawaid ve M. H. Siddiqui, Electricity Consumption And Economic Growth In South Asia, *South Asia Economic Journal*, cilt 17, no. 2, pp. 200-215, **2016**.
- [25] A. Aslan, Causality Between Electricity Consumption and Economic Growth in Turkey: An ARDL Bounds Testing Approach, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, cilt 9, no. 1, pp. 25-31, **2014**.
- [26] Z. Mohamed ve P. Bodger, Forecasting Electricity Consumption In New Zealand Using Economic And Demographic Variables, *Energy*, cilt 30, no. 10, pp. 1833-1843, **2005**.
- [27] V. Bianco, O. Manca ve S. Nardini, Linear Regression Models to Forecast Electricity Consumption in Italy, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, cilt 8, no. 1, pp. 86-93, **2013**.

- [28] W. Huang, H. Li ve Z. Li, A comprehensive study to estimate income and price elasticities of household electricity consumption using Auto-metrics, *Heliyon*, cilt 10, no. 28, **2024**.
- [29] S. K. Al-Bajjali ve A. Y. Shamayleh, Estimating the determinants of electricity consumption in Jordan, *Energy*, cilt 147, pp. 1311-1320, **2018**.
- [30] M. Shahbaz, S. Sarwar, W. Chen ve M. N. Malik, Dynamics of electricity consumption, oil price and economic growth: Global perspective, *Energy Policy*, cilt 108, p. 256–270, **2017**.
- [31] J. Keirstead, Evaluating the applicability of integrated domestic energy consumption frameworks in the UK, *Energy Policy*, cilt 34, no. 17, p. 3065–3077, **2006**.
- [32] B. Düzgün, Konut Sektörünün Enerji Tüketimine Yönelik Çok Yönlü Verimlilik Analizi Ve Uzun Dönemli Politika Önerileri, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2022**.
- [33] S. Serrano, D. Ürge-Vorsatz, C. Barreneche, A. Palacios ve L. F. Cabeza, Heating and cooling energy trends and drivers in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, cilt 41, p. 85–98, **2015**.
- [34] J.-P. Lévy ve F. Belaïdb, The determinants of domestic energy consumption in France: Energy modes, habitat, households and life cycles, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, cilt 81, no. 2, p. 2104–2114, **2018**.
- [35] G. Nair, L. Gustavsson ve K. Mahapatra, Factors influencing energy efficiency investments in existing Swedish residential buildings, *Energy Policy*, cilt 38, no. 6, p. 2956–2963, **2010**.
- [36] D. Brounen, N. Kokb ve J. M. Quigley, Residential energy use and conservation: Economics and demographics, *European Economic Review*, cilt 56, p. 931–945, **2012**.
- [37] K. Hara, M. Uwasu, Y. Kishita ve H. Takeda, Determinant factors of residential consumption and perception of energy conservation: Time-series analysis by large-scale questionnaire in Suita, Japan, *Energy Policy*, cilt 87, p. 240–249, **2015**.

- [38] D. Romero-Jordán, C. Peñasco ve P. D. Rio, Analysing the determinants of household electricity demand in Spain. An econometric study, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, cilt 63, pp. 950-961, **2014**.
- [39] A. Kavousian, R. Rajagopal ve M. Fischer, Determinants of residential electricity consumption: Using smart meter data to examine the effect of climate, building characteristics, appliance stock, and occupants' behavior, *Energy*, cilt 55, p. 184–194, **2013**.
- [40] J. I. Silk ve F. L. Joutz, Short and long-run elasticities in US residential electricity demand: a co-integration approach, *Energy Economics*, cilt 19, p. 493–513, **1997**.
- [41] M. Bouznit, M. P. Romero ve A. Sánchez-Braza, Residential Electricity Consumption and Economic Growth in Algeria, *Energies*, cilt 11, no. 7, p. 1656, **2018**.
- [42] Türk Dil Kurumu Güncel Türkçe Sözlük, <https://sozluk.gov.tr/> (Erişim tarihi: **24 02 2025**)
- [43] L. Aydın, Enerji Ekonomisi ve Politikaları, Ankara: Seçkin Yayıncılık, **2016**.
- [44] M. Kott, Efficiency of Electricity Utilisation in Households in the Context of European Energy Policy, *Acta Energetica*, cilt 4, no. 25, pp. 54-59, **2015**.
- [45] H. Keskin, Türkiye’de Bölgelere Göre Elektrik Tüketiminin İktisadi Analizi: Bölgesel Kalkınma Ve Enerji Verimliliği Perspektifinden Bir Değerlendirme, Doktora Tezi, Gaziantep Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İktisat Ana Bilim Dalı, Gaziantep, **2024**.
- [46] N. Yılankırkan ve H. Doğan, Türkiye’nin enerji görünümü ve 2023 yılı birincil enerji arz projeksiyonu, *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, cilt 10, no. 2, pp. 77-92, **2020**.
- [47] B. D. Çadırcı ve B. Güner, Türkiye’de iller bazında sektörel elektrik tüketimi ve ekonomik büyüme ilişkisi: Panel ARDL sınır testi yaklaşımı, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, cilt 31, pp. 41-60, **2020**.
- [48] Uluslararası Enerji Ajansı Dünya Enerji Görünümü 2024 Yılı Raporu, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024> (Erişim tarihi: **24 02 2025**).

- [49] ETKB, Türkiye Ulusal Enerji Eylem Planı 2022, [https://enerjiverimliliği.enerji.gov.tr/template/dist/pdf/T%C3%BCrkiye\\_Ulusal\\_Enerji\\_Plan%C4%B1.pdf](https://enerjiverimliliği.enerji.gov.tr/template/dist/pdf/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf) (Erişim tarihi: **24 02 2025**).
- [50] EPDK, Elektrik Piyasası 2023 Yılı Piyasa Gelişim Raporu, <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-0-102/yillik-rapor-elektrik-piyasasi-gelisim-raporlari> (Erişim tarihi: **24 02 2025**).
- [51] F. Güler, Elektrik Tüketiminin Derin Öğrenme Yöntemleriyle Tahmin Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Maltepe Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, **2024**.
- [52] Thunder Said Energy, <https://thundersaidenergy.com/downloads/us-residential-energy-consumption-over-time/#:~:text=Global%20residential%20energy%20demand%20runs,reach%2050%25%20of%20global%20electricity> (Erişim tarihi: **24 02 2025**).
- [53] Uluslararası Enerji Ajansı Dünya Enerji Görünümü 2023, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> (Erişim tarihi: **24 02 2025**).
- [54] Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği, T.C. Resmî Gazete, 27075, **05 12 2008**.
- [55] International Energy Agency, Energy Efficiency Indicators: Fundamentals on Statistics, **2014**. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-indicators-fundamentals-on-statistics> (Erişim tarihi: **24 02 2025**).
- [56] TÜİK, Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları 2024, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayal%C4%B1-N%C3%BCfus-Kay%C4%B1t-Sistemi-Sonu%C3%A7lar%C4%B1-2024-53783&dil=1> (Erişim tarihi: **24 02 2025**).
- [57] TÜİK Merkezi Dağıtım Sistemi (MEDAS), Gelir Dağılımı ve Yaşam Koşulları İstatistikleri, <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?locale=tr> (Erişim tarihi: **02 07 2025**).
- [58] TÜİK Merkezi Dağıtım Sistemi (MEDAS), Hanehalkı Tüketim Harcaması İstatistikleri, <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?locale=tr> (Erişim tarihi: **02 07 2025**).

- [59] Meteoroloji Genel Müdürlüğü Isıtma ve Soğutma Gün Dereceleri, <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/gun-derece.aspx> (Erişim tarihi: **25 02 2025**).
- [60] V. Önen, ARIMA-ARIMAX Yöntemiyle Türkiye Havayolu Yolcu Talep Tahmin Modellemesi, Öngörüsü Ve Karşılaştırması, Journal of Transportation and Logistics, cilt 8, no. 2, p. 242–273, **2023**.
- [61] C. Kadılar ve H. Öncel Çekim, SPSS ve R Uygulamalı Zaman Serileri Analizine Giriş, Ankara, Seçkin, **2024**.
- [62] M. E. Malkoç, Sınır Ötesi Elektrik Ticaretinin Gün Öncesi Piyasası Fiyat Oynaklığı Üzerindeki Etkisi: Türkiye Örneği, İstanbul, **2024**.
- [63] C. Deng, Time Series Decomposition Using Singular Spectrum Analysis, Master of Science in Mathematical Sciences, the Department of Mathematics, East Tennessee State University, **2014**.
- [64] P. C. Rodrigues ve R. Mahmoudvand, The benefits of multivariate singular spectrum analysis over the univariate version, Science Direct, cilt 355, no. 1, pp. 544-564, **2018**.
- [65] ETKB Ulusal Enerji Denge Tabloları, <https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari> (Erişim tarihi: **01 07 2025**).
- [66] Enerji Verimliliği 2030 Stratejisi ve II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2024-2030), [https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/BHIM/tr/Duyurular/T%C3%BCrkiyeninEnerjiVerimlili%C4%9Fi2030StratejisiVeIIUlusalEnerjiVerimlili%C4%9FiEylemPlan%C4%B1\\_202401161407.pdf](https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/BHIM/tr/Duyurular/T%C3%BCrkiyeninEnerjiVerimlili%C4%9Fi2030StratejisiVeIIUlusalEnerjiVerimlili%C4%9FiEylemPlan%C4%B1_202401161407.pdf) (Erişim tarihi: **24 05 2025**).
- [67] EPDK 2024 Yılı Aylık Sektör Raporu, <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-23/elektrikaylik-sektor-raporlar> (Erişim tarihi: **21 05 2025**).
- [68] H. Öncel Çekim, H. N. Karakavak, G. Özel ve S. Tekin, Earthquake magnitude prediction in Turkey: a comparative study of deep learning methods, ARIMA and singular spectrum analysis, Environmental Earth Sciences, cilt 82, no. 16, p. 387, **2023**.

[69] TÜİK Merkezi Dağıtım Sistemi (MEDAS), Dönemsel Ulusal Hesaplar, <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?locale=tr> (Erişim tarihi: **02 07 2025**).