

**KİMYA SEKTÖRÜNDE ENERJİ YOĞUN SÜREÇLERDE
VERİMLİLİK DEĞERLENDİRMESİ VE GES
UYGULANABİLİRLİĞİ ANALİZİ**

BERA OSMAN KAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. İREM DÜZDAR**

DÜZCE, 2025

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KİMYA SEKTÖRÜNDE ENERJİ YOĞUN SÜREÇLERDE VERİMLİLİK
DEĞERLENDİRMESİ VE GES UYGULANABİLİRLİĞİ ANALİZİ

Bera Osman Kaya tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. İrem DÜZDAR

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. İrem Düzdar

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Murat Kale

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Yıldız Şahin

Kocaeli Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 02/07/2025

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

02 Temmuz 2025
Bera Osman KAYA

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim süresince akademik gelişimime değerli katkılarda bulunan ve tez çalışmam boyunca bilgi birikimi, rehberliği ve desteğiyle yol gösteren danışmanım Doç. Dr. İrem DÜZDAR'a, tez sürecindeki desteklerinden ötürü sevgili Öznur Çelik'e, her koşulda yanımda olan, beni destekleyen aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

02 Temmuz 2025

Bera Osman KAYA



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
KISALTMALAR.....	ix
SİMGELER	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1.GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
2.1.SANAYİDE ELEKTRİK TÜKETİMİNİN ÖNEMİ VE TARİHSEL PERSPEKTİF	3
3. MATERYAL VE METOD.....	9
3.1. ENERJİ ETÜDÜ.....	9
3.2. ENERJİ YOĞUNLUĞU	10
3.3. ARIMA-SARIMA YÖNTEMİ	11
3.4. GES SİSTEMİ.....	13
4. UYGULAMA VE BULGULAR	15
4.1.ENERJİ ETÜDÜ.....	15
4.2.ENERJİ YOĞUNLUĞU	17
4.3.ENERJİ TÜKETİMİ TAHMİNLEMESİ.....	22
4.4. 325 KWP ÇATI UYGULAMALI FOTOVOLTAİK GES YATIRIM FİZİBİLİTE ÇALIŞMASI.....	28
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	36
6. KAYNAKLAR.....	39
ÖZGEÇMİŞ	45

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2. 1.Sanayide nihai enerji tüketiminin sektörlere göre dağılımı (%), 2023 (TÜİK, 2023).....	5
Şekil 3. 1 Tez kapsamında uygulanan akış şeması	14
Şekil 4. 1. 5 yıllık elektrik enerjisi tüketim ve üretim dağılımı.	18
Şekil 4. 2. Fabrika enerji yoğunluğu karşılaştırma (IEA, 2023; IEA, 2022; ETKB, 2023).....	21
Şekil 4. 3. Elektrik tüketimi, doğalgaz tüketimi ve üretilen ürün miktarı zaman serileri.....	22
Şekil 4. 4. ADF test sonucu.	23
Şekil 4. 5. Fark alma işlemi sonrası durağanlaştırılmış zaman serileri.....	23
Şekil 4. 6. Elektrik tüketimi için ACF ve PACF grafikleri.....	24
Şekil 4. 7 Doğalgaz tüketimi için ACF ve PACF grafikleri.	24
Şekil 4. 8. Elektrik tüketimi için SARIMA tahmini.	27
Şekil 4. 9. Doğalgaz tüketimi için SARIMA tahmini.....	28
Şekil 4. 10. Fabrika Google Earth görüntüsü.....	29
Şekil 4. 11. Google Earth fabrika güneş paneli yerleşim görüntüsü.....	30
Şekil 4. 12. Yıllık Tahmini Toplam Üretim.....	32
Şekil 4. 13. 2025 yılı için sistem kazanç grafiği-325 kWp.....	33

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 4. 1. Toplam elektrik enerjisi tüketimleri.	15
Çizelge 4. 2. Toplam doğalgaz enerjisi tüketimleri.	16
Çizelge 4. 3. Toplam elektrik enerji maliyeti.	17
Çizelge 4. 4. Toplam doğalgaz enerji maliyeti.	19
Çizelge 4. 5. Fabrika enerji yoğunluğu.	21
Çizelge 4. 6. Güneş enerjisi sistemi temel teknik özellikleri.	30
Çizelge 4. 7. Güneş enerjisi yıllık tahmini toplam üretim kwh.	31
Çizelge 4.8. Fotovoltaik sistem yıllık üretim hesaplamalarında kullanılan temel parametreler.	31
Çizelge 4. 9. Güneş enerjisi sistemi temel teknik ve ekonomik parametreleri.	32

KISALTMALAR

\$	: Dolar
ABD	: Amerika Birleşik Devleti
AC	: Alternatif Akım
CEMEP	: Avrupa Elektrik Makineleri Güç Elektroniği İmalatçılar Komitesi
CO ₂	: Karbondioksit
ÇS	: Çalışma Süresi
ÇSB	: Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
DAH	: Değer Akışı Haritalama
Db	: Desibel
Dk	: Dakika
EİEİ	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
EY	: Enerji Yöneticisi
GEPA	: Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
GÖS	: Geri Ödeme Süresi
IE	: Uluslararası Verimlilik
IE1	: Standart Verimlilik
IEC	: Uluslararası Elektro Teknik Komitesi
MBS	: Mevzuat Bilgi Sistemi
R ²	: Regresyon Uyumluluk Katsayısı
TEP	: Ton eşdeğer petrol

SİMGELER

h	: Saat
kCal	: Kilo Kalori
kg	: Kilo Gram
kW	: Kilo Watt
kWh	: Kilo Watt Saat
m ²	: Metre Kare
m ³	: Metre Küp
MWh	: Mega Watt Saat
tCO ₂	: Ton Karbondioksit
TEP	: Ton eşdeğer petrol
W	: Watt



ÖZET

KİMYA SEKTÖRÜNDE ENERJİ YOĞUN SÜREÇLERDE VERİMLİLİK DEĞERLENDİRMESİ VE GES UYGULANABİLİRLİĞİ ANALİZİ

Bera Osman KAYA

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. İrem DÜZDAR

Temmuz 2025, 44 sayfa

Kimya sektörü, yüksek ısı ve basınç gerektiren prosesler ile sürekli çalışan sistemleri nedeniyle yoğun enerji tüketimine sahip endüstriyel alanlar arasında yer almaktadır. Bu durum hem üretim maliyetlerini yukarı çekmekte hem de fosil yakıt kullanımına bağlı olarak sera gazı emisyonlarının artmasına yol açmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması ve enerji verimliliği uygulamalarının hayata geçirilmesi, kimya tesislerinde hem ekonomik hem de çevresel açıdan kritik bir gereklilik haline gelmiştir. Enerji etüdü, mevcut tüketim noktalarının ve proseslerin detaylı incelenmesi sayesinde tesis içindeki enerji kayıplarını ve iyileştirme fırsatlarını belirlemeyi amaçlar. Bununla birlikte “enerji yoğunluğu” göstergesi, üretilen her birim ürün başına düşen enerji miktarını ortaya koyarak karşılaştırmalı performans izleme ve hedef belirleme sürecine temel oluşturur. Zaman serisi analizi yöntemlerinden özellikle ARIMA modelleri, geçmiş yıllara ait tüketim verileri üzerinden geleceğe yönelik güvenilir tahminler sunarak stratejik planlama ve bütçe optimizasyonunu kolaylaştırır. Güneş enerjisi santrali (GES) kurulumu ise kimya tesislerinde fosil yakıtlara bağımlılığı azaltarak enerji maliyetlerinde uzun vadeli düşüş sağlar ve karbon ayak izinin sınırlandırılmasına katkıda bulunur. Güneş panellerinin maliyetlerinin son yıllarda kaydettiği azalma, yatırım geri dönüş sürelerini kısaltmakta; devlet teşvik ve destek mekanizmaları da fizibilite çalışmalarını cazip kılmaktadır. Bu çalışmada, kimya sektörünün enerji verimliliği ihtiyaçları doğrultusunda önce enerji etüdü ve yoğunluk analizi yapılmış, ardından ARIMA modeli kullanılarak gelecek tüketim öngörülleri elde edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında, tesise uygun kapasitede bir GES yatırımının teknik ve ekonomik yaşama dâhil edilme potansiyeli detaylı olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Arima, Enerji Verimliliği, Enerji Yoğunluğu, Güneş Enerjisi Fizibilitesi, Kimyasal Üretim.

ABSTRACT
EFFICIENCY ASSESSMENT AND SES APPLICABILITY ANALYSIS IN
ENERGY INTENSIVE PROCESSES IN THE CHEMICAL INDUSTRY

Bera Osman KAYA

Düzce University

Graduate School, Department of Electrical-Electronics Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İrem DÜZDAR

July 2025, 44 pages

The chemical industry ranks among the most energy-intensive sectors due to its reliance on high-temperature, high-pressure processes and continuous operation of complex units. This intensive energy use drives up production costs and contributes significantly to greenhouse gas emissions when fossil fuels are the primary energy source. Consequently, the adoption of renewable energy solutions and the implementation of energy-efficiency measures have become both an economic imperative and an environmental necessity for modern chemical plants. An energy audit systematically examines existing consumption points and process streams to identify losses and opportunities for improvement. Complementing this, the energy-intensity metric—expressed as energy consumed per unit of product—provides a benchmark for performance tracking and target setting. Time-series forecasting, particularly using ARIMA models, leverages historical consumption data to generate reliable projections of future energy needs, thereby supporting strategic planning and budget optimization. Integrating a solar photovoltaic (PV) system offers a pathway to reduce dependence on fossil fuels, lower long-term energy expenditures, and curb the facility's carbon footprint. Recent declines in PV module costs and the availability of government incentives have shortened payback periods and enhanced project viability. In this study, a comprehensive energy audit and energy-intensity analysis of a chemical manufacturing plant's five-year consumption data are first conducted. Next, ARIMA-based forecasts inform the sizing and financial evaluation of a prospective solar PV installation, assessing its technical feasibility and economic benefits.

Keywords: Arima, Energy Efficiency, Energy Intensity, Solar Energy Feasibility, Chemical Production

1.GİRİŞ

Enerji, ekonomik büyüme, endüstriyel gelişim ve toplumsal refahın temel dinamiklerinden biri olarak, sanayi sektöründe stratejik bir role sahiptir (IEA, 2023). Özellikle kimya endüstrisi gibi enerji yoğun sektörlerde, enerji tüketimi yalnızca üretim maliyetlerini değil, aynı zamanda çevresel etkileri ve karbon ayak izini de doğrudan etkilemektedir (Çomaklı ve Yüksel, 2006). Sanayideki enerji tüketimi, küresel enerji kullanımının yaklaşık %37'sini oluşturmakta ve bu oran, sektörün sürdürülebilir kalkınma hedeflerine etkisini de açıkça ortaya koymaktadır (IPCC, 2022). Sanayi tesislerinde enerji tüketiminin doğru yönetilmesi; maliyetlerin düşürülmesi, enerji kaynaklarının etkin kullanımı ve sera gazı emisyonlarının azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır (Taner, 2017). Bu bağlamda, enerji etütleri, mevcut enerji tüketim yapısının detaylı biçimde analiz edilmesini, enerji verimliliği potansiyelinin ortaya konulmasını ve buna yönelik uygulanabilir stratejilerin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır (EIE, 2011). Enerji yönetimi süreçlerinin başarısı ise yalnızca tüketim verilerinin ölçülmesiyle değil, aynı zamanda üretimle ilişkilendirilerek enerji yoğunluğunun analiz edilmesiyle daha anlamlı hale gelmektedir. Enerji yoğunluğu kavramı, birim üretim başına tüketilen enerji miktarını ifade eder ve hem ekonomik hem de çevresel performans açısından kritik bir göstergedir (Odyssee-Mure, 2021). Düşük enerji yoğunluğu, daha az enerjiyle daha fazla üretim anlamına gelirken; bu değer aynı zamanda bir işletmenin enerji verimliliği düzeyini de yansıtmaktadır. Türkiye'nin enerji yoğunluğu, OECD ülkeleri ortalamasına kıyasla daha yüksek seviyededir ve bu durum, enerji verimliliği politikalarının sanayideki uygulanabilirliği açısından önemli bir gelişim alanı olduğunu göstermektedir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023). Bu çalışmanın temel motivasyonu; enerji yoğunluğu yüksek olan kimya sektörüne ait bir üretim tesisinde, enerji tüketiminin sistematik biçimde incelenmesi ve sürdürülebilir enerji yönetimine katkı sunacak çözüm önerilerinin geliştirilmesidir. Batı Karadeniz Bölgesi'nde yer alan ve yıllık enerji tüketimi 1000 TEP'in altında olan bir kimyasal üretim tesisinde gerçekleştirilen enerji etüdü kapsamında, öncelikle üretim süreçlerinde yer alan ekipmanların enerji tüketimleri analiz edilmiştir. Elde edilen elektrik ve doğalgaz verileri ile tesisin enerji yoğunluğu hesaplanmış; sonuçlar Türkiye ve dünya ortalamalarıyla karşılaştırılmıştır. Gelecekteki enerji talebinin öngörülebilmesi amacıyla, zaman serisi

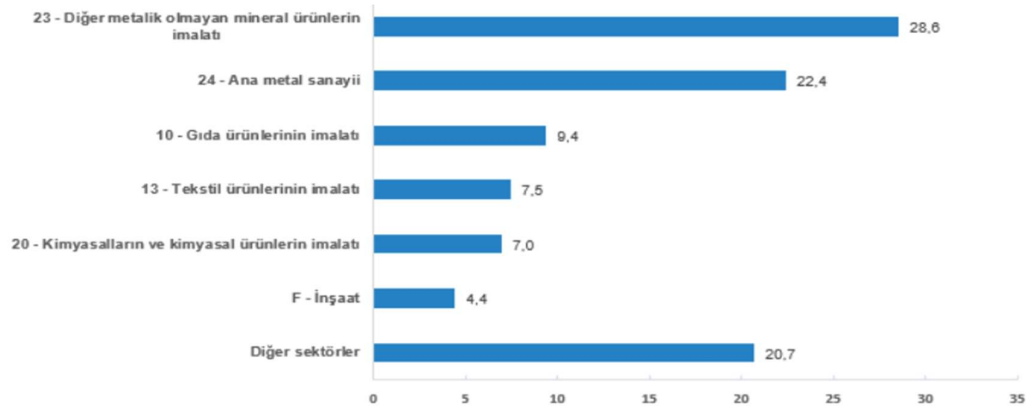
analizlerinden ARIMA ve SARIMA modelleri MATLAB yazılımı aracılığıyla uygulanarak beş yıllık enerji tüketim tahminleri elde edilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, fabrikanın çatı alanına entegre edilmesi planlanan bir güneş enerjisi santrali (GES) için teknik ve ekonomik bir fizibilite çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu bütüncül yaklaşım ile çalışmanın amacı, enerji verimliliğini artırmak, karbon emisyonlarını azaltmak ve sürdürülebilir üretim süreçlerini teşvik edecek uygulamaların yaygınlaşmasına katkı sunmaktır. Ayrıca elde edilen bulguların, benzer ölçekteki sanayi tesislerinde yenilenebilir enerji entegrasyonu ve enerji verimliliği stratejileri açısından örnek teşkil etmesi beklenmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1.SANAYİDE ELEKTRİK TÜKETİMİNİN ÖNEMİ VE TARİHSEL PERSPEKTİF

Sanayide elektrik tüketimi, enerji maliyetlerinin düşürülmesi, sürdürülebilirlik ve çevre koruma hedefleri doğrultusunda büyük bir öneme sahiptir. Özellikle 20. yüzyılda sanayileşmenin hız kazanmasıyla birlikte enerji talebi büyük ölçüde artmış ve bu durum elektrik tüketiminin doğru yönetilmesini zorunlu hale getirmiştir (International Energy Agency [IEA], 2020). Elektriğin sanayide yaygın kullanımı ekonomik büyümeyi desteklese de doğal kaynakların aşırı tüketimi ve çevresel etkiler gibi ciddi sorunları da beraberinde getirmiştir (EIA, 2019). 2015 yılında imzalanan Paris Anlaşması, küresel ısınmayı 2°C'nin altında tutma ve mümkünse 1.5°C'yi geçmeyecek şekilde sınırlama hedefi koyarak ülkeleri sera gazı emisyonlarını azaltmaya teşvik etmiştir (United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], 2015). Bu bağlamda, sanayide elektrik tüketimi ve enerji verimliliği çalışmaları büyük önem kazanmıştır. Sanayi, küresel sera gazı emisyonlarının önemli bir kısmını oluşturan enerji tüketiminin başlıca kaynaklarından biridir. Anlaşma sonrasında birçok ülke, sanayide enerji verimliliğini artırmaya yönelik teşvik ve düzenlemeler getirmiştir (IEA, 2021). Tarihsel olarak 18. yüzyılın sonlarında başlayan Sanayi Devrimi, enerji tüketiminde bir dönüm noktası olmuştur. İlk başta buhar gücü ile başlayan sanayi faaliyetleri, 20. yüzyıla birlikte elektriğin endüstriyel üretim süreçlerine dahil edilmesiyle büyük bir ivme kazanmıştır (Smil, 2017). Elektriğin kullanımı, sanayideki otomasyon düzeyini artırarak üretim süreçlerinin daha hızlı ve verimli yapılmasına olanak tanımıştır. Ancak bu gelişmeler enerji talebinde büyük artışa yol açmış ve enerji kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı gibi kavramların önem kazanmasına neden olmuştur (EIA, 2019). Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), sanayide elektrik tüketiminin azaltılmasını ve verimliliğin artırılmasını küresel bir öncelik olarak tanımlamaktadır. IEA'nın raporlarına göre, enerji verimliliği projeleri ile küresel enerji tüketiminde %10-15'e varan azalmalar sağlanabilir (IEA, 2020). Sanayi sektöründe enerji verimliliğini artırmak için birçok ülkede enerji yönetim sistemleri, enerji etütleri ve enerji verimliliği projeleri gibi uygulamalar teşvik edilmektedir. Sanayide elektrik tüketimini optimize etme çabaları günümüzde dijitalleşme ve otomasyon teknolojileri ile desteklenmektedir. Akıllı ölçüm sistemleri,

enerji izleme yazılımları ve endüstriyel otomasyon çözümleri, sanayide enerji tüketimini daha verimli hale getirmektedir (IEA, 2021). Dijitalleşmenin sunduğu bu imkanlar, aynı zamanda Paris Anlaşması'na uyum çerçevesinde sanayi sektörünün karbon ayak izini azaltmaya da katkı sağlamaktadır (UNFCCC, 2015). Kimya sektörü, özellikle enerji yoğun süreçler gerektiren üretim yöntemleri sebebiyle yüksek elektrik tüketimiyle bilinir. ABD Enerji Bilgi İdaresi (EIA) ve Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre kimya sektörü, endüstriyel elektrik tüketiminde başı çeken sektörlerden biridir. Bu sektör, tüm endüstriyel elektrik tüketiminin yaklaşık %20'sini oluşturmaktadır (EIA, 2019). Kimya sektörü, yüksek enerji gereksinimi ile tanınır ve elektrik tüketiminde ilk sıralarda yer alır. Özellikle enerji yoğun alt sektörler olan petrokimya, amonyak ve gübre üretimi elektrik talebini artırmaktadır (IEA, 2020). Metalürji ve çelik sektöründe de enerji tüketimi oldukça yüksektir; ancak bu sektörde elektrikten ziyade kömür ve doğalgaz kullanımı öne çıkmaktadır. Elektrik kullanımı toplam enerji tüketiminin %10-15'i civarındadır (World Steel Association [WSA], 2021). Gıda işleme sektöründe ise elektrik genellikle soğutma, pişirme ve paketleme gibi işlemler için kullanılmakta olup, toplam enerji tüketiminin %5-7'si arasında bir paya sahiptir (FAO, 2020). Kâğıt ve selüloz sektöründe, özellikle kâğıt kurutma ve hamur işlemleri gibi enerji yoğun süreçlerde elektrik tüketimi kritik öneme sahiptir (IEA, 2020). Otomotiv sektöründe elektrik kullanımı ise daha çok montaj ve boyama gibi işlemlerle sınırlıdır ve toplam enerji tüketiminin yaklaşık %5'i elektrikten sağlanmaktadır (International Organization of Motor Vehicle Manufacturers [OICA], 2020). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın verilerine göre, kimya sektörü Türkiye'nin sanayi enerji tüketiminin yaklaşık %15-20'sini oluşturmaktadır (ETKB, 2021). Türkiye'de petrokimya, plastik, ilaç ve gübre üretimi gibi kimyasal üretim süreçleri, yüksek elektrik enerjisi gerektirir. Türkiye, Paris Anlaşması'nı onaylamış bir ülke olarak karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik adımlar atmaktadır. Bu doğrultuda, kimya sektöründe enerji verimliliğini artırmaya yönelik çeşitli uygulamalar geliştirilmiştir. Enerji Verimliliği Derneği ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, kimya sektörüne yönelik enerji tasarrufu ve verimlilik çalışmalarında rehberlik etmektedir (ETKB, 2021).



Şekil 2. 1.Sanayide nihai enerji tüketiminin sektörlere göre dağılımı (%), 2023 (TÜİK, 2023).

Enerji yönetimi ile ilgili literatürde, enerji yoğunluğu, enerji verimliliği, yenilenebilir Enerji ve enerji etüdü kavramları sıklıkla birbiriyle bağlantılı şekilde ele alınmakta; bazı çalışmalarda ise bu kavramlar ayrı ayrı değerlendirilmektedir. Bu kavramların sanayide uygulanış biçimleri hem enerji tüketiminin azaltılması hem de çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılması bakımından önem taşımaktadır. Enerji yoğunluğu, birim üretim başına tüketilen enerji miktarını ifade eder ve genellikle sanayide verimlilik düzeyini göstermek amacıyla kullanılır (Odyssee-Mure, 2021). Bu gösterge, birçok çalışmada enerji verimliliğiyle birlikte değerlendirilmiş; enerji yoğunluğu yüksek olan sektörlerde enerji verimliliği yatırımlarının öncelikli olması gerektiği belirtilmiştir (Çomaklı ve Yüksel, 2006). Enerji verimliliği ise, aynı üretim miktarını daha az enerji kullanarak gerçekleştirme yeteneği olarak tanımlanmakta ve hem çevresel hem de ekonomik faydaları nedeniyle uluslararası literatürde geniş yer bulmaktadır. IEA (2023) raporunda, enerji verimliliği politikalarının doğru şekilde uygulanması durumunda sanayi sektöründe %10 ila %20 arasında tasarruf sağlanabileceği belirtilmektedir. Bu iki kavramın birlikte ele alındığı bir örnek olarak, Ürgev (2020), Türkiye'deki organize sanayi bölgelerinde enerji yoğunluğunun azaltılmasına yönelik verimlilik artırıcı projeleri incelemiş; enerji yoğunluğu yüksek tesislerde verimlilik önlemleri alınmasının karbon emisyonlarını düşürdüğünü ortaya koymuştur. Buna karşılık, yenilenebilir enerji kavramı bazı çalışmalarda enerji verimliliği ile doğrudan ilişkilendirilmiş; bazı çalışmalarda ise bağımsız olarak, fosil yakıt tüketiminin azaltılması ve karbon nötrlük hedefleri çerçevesinde ele alınmıştır (Şahin et al., 2021). Örneğin, Yılmaz ve Kaya (2019) çalışmasında, güneş enerjisi santrali entegrasyonunun, enerji yoğunluğu yüksek tesislerde fosil kaynaklı elektrik tüketimini azaltarak hem çevresel etkiyi azalttığı hem de ekonomik

avantaj sağladığı vurgulanmıştır. Enerji etüdü sayesinde tesisin enerji yoğunluğu belirlenebilmekte, verimlilik potansiyeli hesaplanmakta ve uygun yenilenebilir enerji yatırımları için veri temeli oluşturulmaktadır (EIE, 2011). Pek çok akademik çalışma, enerji etütlerinin enerji yönetimi sistemleri içinde temel araç olduğunu ve sürdürülebilir üretim için vazgeçilmez olduğunu ifade etmektedir (Gürkan ve Kaya, 2018). Kampüs tipi büyük ölçekli yapılarda yapılan enerji etüdü uygulamalarına dair önemli bir örnek sunan bu çalışmada, farklı bina tiplerinin (eğitim, idari, yurt ve sosyal tesis) enerji tüketim profilleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elektrik ve doğalgaz tüketimlerinin mevsimsel ve yıllık değişimleri üzerinden yapılan değerlendirmeler, kullanıcı alışkanlıklarının enerji verimliliği üzerindeki etkilerini de ortaya koymuştur. Söz konusu analiz yöntemi ve verimlilik artırıcı önerilerin bina bazlı detaylandırılması, bu tez kapsamında yürütülen enerji etüdü çalışmalarının yapılandırılmasında yol gösterici bir yaklaşım sunmaktadır. Özellikle toplu yapılarda sistematik veri analizi ve enerji yönetimi stratejilerinin belirlenmesi açısından çalışmanın bulguları önemli bir referans oluşturmaktadır (Ener, Topçu, Karanfil Celep, Çeltek, & Rüşen, 2018). Enerji yoğun üretim süreçlerinin analiz edilmesi açısından önemli bir örnek sunan bu çalışmada, döküm sektöründe faaliyet gösteren bir fabrikanın enerji tüketim bileşenleri detaylı olarak incelenmiştir. Özellikle elektrik motorları, fırınlar ve aydınlatma sistemleri gibi yüksek tüketim unsurlarına yönelik ölçüm ve analizlerin yapılması, enerji tasarrufu potansiyelinin belirlenmesi açısından yol gösterici olmuştur. Ayrıca kullanılan ölçüm yöntemleri ve değerlendirme kriterleri, benzer şekilde endüstriyel nitelikli tesislerde yapılacak enerji etütleri için önemli bir metodolojik referans sağlamaktadır. Bu yönüyle söz konusu çalışma, enerji etüdü süreçlerinin yapılandırılması ve enerji verimliliği önlemlerinin sahaya uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi açısından tezin uygulamalı kısmına doğrudan katkı sunmaktadır (Akkurt & Taşdemir, 2021). Gıda sanayisinde enerji tüketiminin yoğun olduğu proseslerden biri olan süt işleme sektörüne odaklanan bu çalışma, endüstriyel tesislerde enerji etüdü uygulamalarının nasıl yapılandırılabileceğine dair kapsamlı bilgiler sunmaktadır. Tesisteki enerji kullanım noktaları detaylı şekilde analiz edilmiş; proses bazında elektrik ve ısı enerji tüketimleri ölçülerek verimlilik değerlendirmesi yapılmıştır. Ayrıca, enerji tasarruf potansiyeli olan alanlara yönelik teknik öneriler ve maliyet-etkinlik analizleri sunulmuştur. Çalışmanın gıda sektörüne özgü üretim hatlarındaki enerji karakteristiğini ayrıntılı biçimde ele alması, bu tezde yapılan enerji etüdü uygulamalarına özellikle sektör çeşitliliği açısından metodolojik katkı sağlamaktadır (Özsan, 2024). Enerji tüketim tahminlerinde doğruluk oranının

artırılmasına yönelik olarak geliştirilen melez model yaklaşımının değerlendirildiği bu çalışmada, ARIMA ve yapay sinir ağları (YSA) birlikte kullanılarak bütün endüstrisinde vaka temelli bir uygulama sunulmuştur. Modelin yalnızca ARIMA ya da yalnızca YSA kullanımına göre daha düşük hata payı ile çalıştığı tespit edilmiştir. Bu durum, özellikle endüstriyel tesislerde kısa ve orta vadeli enerji planlaması açısından öngörü doğruluğunun artırılmasına katkı sunmaktadır. Tez kapsamında yürütülen ARIMA tabanlı enerji tahmin çalışmalarının desteklenmesi ve doğruluk analizlerinin çeşitlendirilmesi açısından, bu tür melez model örnekleri metodolojik referans niteliği taşımaktadır (Reşat, 2020). Yapay sinir ağları ile geliştirilen bu modelde, 112 Acil Çağrı Merkezi'ne gelen çağrı sayıları tahmin edilmiştir. Modelin zaman serisi verilerinde başarılı sonuçlar vermesi, makine öğrenmesi temelli yaklaşımların talep tahmininde etkinliğini göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, ARIMA temelli analizlere alternatif olarak değerlendirilebilecek yöntemlere ışık tutmaktadır (Aydemir, Karaatlı, Yılmaz, & Aksoy, 2014). Termik santraldeki ana buhar sıcaklığı, hem ARIMA hem de yapay sinir ağı (YSA) yöntemleriyle modellenmiş; iki yöntemin kestirim performansları karşılaştırılmıştır. Çalışma, endüstriyel süreçlerde sıcaklık gibi dinamik parametrelerin tahmini açısından ARIMA modelinin uygulanabilirliğini göstermekle birlikte, YSA'nın doğruluk bakımından avantajlarını da ortaya koymaktadır (Tunçkaya, 2020). Avustralya'nın Queensland bölgesine ait talep verileriyle yapılan bu çalışmada, kısa vadeli elektrik talep tahmini için ARIMA, SVR ve MARS modelleri karşılaştırılmıştır. ARIMA modeli, zamansal bağımlılığı güçlü olan verilerde güvenilir tahminler üretmiş; model performansları veri yapısına göre değişkenlik göstermiştir. Bu yönüyle çalışma, elektrik talep projeksiyonlarında ARIMA modelinin uygulanabilirliğini destekleyen önemli bir referans sunmaktadır (Al-Musaylh, Deo, Adamowski, & Li, 2018). Lübnan'ın elektrik talebi üzerine yapılan bu çalışmada, ekonometrik analizlerle talebin belirleyicileri incelenmiş ve uzun dönemli talep tahminleri oluşturulmuştur. Enerji tüketiminin gelir ve fiyat duyarlılığı vurgulanmış; politika yapıcılar için öngörü geliştirme açısından temel göstergeler sunulmuştur. Bu yönüyle çalışma, enerji talep analizlerinde ekonomik faktörlerin ARIMA gibi zaman serisi modelleriyle bütünleştirilmesinin önemini ortaya koymaktadır (Abosedra, Dah, & Ghosh, 2011). Elektrik tüketiminin tahmini amacıyla ARIMA ve yapay sinir ağı (ANN) yöntemleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş; her iki modelin öngörü performansları analiz edilmiştir. Sonuçlar, veri yapısına göre model başarımının değişebileceğini göstermiştir. ARIMA modelinin istatistiksel güvenilirliği ile ANN'in öğrenme kabiliyetinin birlikte değerlendirilmesi, tez kapsamında model seçimi

sürecine metodolojik katkı sağlamaktadır (Chandar, 2024). Zaman serisi tahmin yöntemlerinin karşılaştırılmasına yönelik olarak geliştirilen yeni bir değerlendirme yaklaşımı sunulmuştur. Geleneksel test seti kıyaslamalarının ötesine geçen bu yöntem, farklı modellerin dış örnekleme performanslarını daha güvenilir şekilde analiz etmeye olanak tanımaktadır. ARIMA gibi istatistiksel modellerin diğer modern yaklaşımlarla karşılaştırılmasında kullanılabilecek bu yöntem, tezdeki model performans değerlendirmelerine ölçüsel katkı sağlamaktadır (Ilic, Görgülü, & Cevik, 2020). Brezilya'nın aylık enerji talebi, ekonomik, endüstriyel ve iklimsel dışsal değişkenler kullanılarak farklı zaman serisi modelleriyle tahmin edilmiştir. ARIMA ve diğer yöntemlerin karşılaştırmalı performansı, dışsal değişkenlerin modele entegrasyonunun tahmin doğruluğunu önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Bu yaklaşım, tez kapsamında enerji tüketimi üzerine yapılan tahmin çalışmalarına veri setinin genişletilmesi ve açıklayıcı değişkenlerin dâhil edilmesi açısından yöntemsel katkı sunmaktadır (Serrano et al. 2024). Özetle, bazı çalışmalarda enerji yoğunluğu ve enerji verimliliği birlikte değerlendirilirken, yenilenebilir enerji yatırımları bu verimliliği tamamlayıcı unsur olarak işlenmiştir. Bazı araştırmalarda ise enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji tamamen ayrı stratejik planlamalar olarak ele alınmıştır. Enerji etüdü ise bu yaklaşımlar arasında köprü kuran ve uygulamayı yönlendiren araç olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada ise, enerji etüdü, enerji yoğunluğu, ARIMA ile enerji tüketim tahminlemesi ve güneş panelleri ile yenilenebilir enerji fizibilitesi kavramları bütüncül bir analiz modeli ile ele alınmaktadır. Enerji etüdü ile mevcut durum analiz edilmekte, enerji yoğunluğu hesaplanmakta, ARIMA temelli zaman serisi analiziyle ileriye dönük enerji tüketimi öngörülmekte ve bu öngörü çerçevesinde güneş enerjisi santrali (GES) yatırımı için fizibilite yapılmaktadır. Böylece literatürdeki parçalı yaklaşımların aksine, sistematik bir model önerisi sunulmaktadır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. ENERJİ ETÜDÜ

Enerji tüketimi, sanayi sektörünün en önemli maliyet unsurlarından biri olup, özellikle enerji yoğun kimyasal üretim tesislerinde bu durum daha belirgindir. Sanayide enerji verimliliği çalışmalarının artan önemi, sürdürülebilirlik hedefleri ve maliyet tasarrufları ile ilişkilidir. Genel olarak üretimde zamanı azaltmak ve maliyetleri düşürmek üretim sistemini geliştirmek için atılması gereken en önemli adımlardır (Helleno vd, 2015; Jasti ve Kodali, 2015). Türkiye'de sanayi sektörü, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı verilerine göre toplam enerji tüketiminin yaklaşık %35' ini oluşturmaktadır (ÇSB,2021). Enerjide ortak bir birim olarak formül 3.1'de bulunan “Ton Eşdeğer Petrol” kullanılır (Uzun ve Değirmen, 2018).

$$TEP = \frac{\text{Tüketim miktarı (verilen birimde)} \times \text{Isıl değer}}{10000000 \text{ kcal}} \quad (3.1)$$

Ülkemizde 5627 No'lu Enerji Verimliliği Kanununa göre; yıllık enerji tüketimi 1.000 TEP ve üzeri olan endüstriyel işletmelerde her 4 yılda bir enerji etüdü yaptırma zorunluluğu vardır (MBS, 2007). Fakat 1000 TEP altı işletmelerde enerji etüdü yapılmadığından verimsiz kullanılan enerji tespit edilememektedir. Enerji, sanayileşmenin temel dinamiklerinden biri olup, üretim süreçlerinin sürdürülebilirliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Küresel ölçekte enerjiye duyulan ihtiyaç giderek artarken, enerji kaynaklarının sınırlı olması ve çevresel sorunların artması, enerji verimliliği çalışmalarını zorunlu hale getirmiştir. Sanayi sektöründe enerji verimliliği uygulamaları, enerji maliyetlerini azaltmanın yanı sıra karbon salınımını düşürerek çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır (Türkiye Sınai Kalkınma Bankası [TSKB], 2017). Bu bağlamda, enerji yoğun sektörlerden biri olan kimya sanayinde, enerji etüdü ve verimlilik çalışmaları önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir (ETKB, 2021).

$$\text{Oransal Fark (\%)} = \left(\frac{(\text{Reaktör Tüketimi} - \text{Diğer Tüketimi})}{\text{Diğer Tüketimi}} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

3.2. ENERJİ YOĞUNLUĞU

Enerji yoğunluğu, bir ekonominin enerji verimliliğini değerlendirmek için kullanılan önemli bir göstergedir. Genel olarak, bir ülkenin toplam enerji tüketiminin gayri safi yurt içi hasılaya (GSYİH) oranı olarak ifade edilir ve birim GSYİH başına düşen enerji miktarını gösterir. Bu gösterge, ekonomik faaliyetlerin enerji tüketimiyle ilişkisini anlamak için kullanılır. (ETKB) Türkiye'de enerji yoğunluğu, birincil ve nihai enerji yoğunluğu olarak iki şekilde hesaplanmaktadır. Birincil enerji yoğunluğu, toplam birincil enerji tüketiminin GSYİH'ye oranıdır. Türkiye'nin 2023 yılı birincil enerji yoğunluğu 0,126 ton eşdeğer petrol (TEP) / bin 2015\$ olarak hesaplanmıştır. (ETKB) Nihai enerji yoğunluğu, nihai enerji tüketiminin GSYİH'ye oranıdır. 2023 yılında Türkiye'nin nihai enerji yoğunluğu 0,097 TEP / bin 2015\$ olarak belirlenmiştir. (ETKB) Sektörel bazda enerji yoğunluğu verileri, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı gibi resmî kurumlar tarafından yayımlanmaktadır. Örneğin, 2021 yılında Türkiye'de nihai enerji tüketiminde en yüksek payı %33,8 ile sanayi sektörü almıştır. (ETKB). Doğalgazın enerjiye çevrilmesi için formül 3.3'te verilen standart alt ısı değer (9,5 kWh/m³) kullanılmıştır (IEA, 2023).

$$\text{Doğalgaz Tüketimi (kWh)} = \text{Doğalgaz Tüketimi (m}^3\text{)} \times 9,5 \quad (3.3)$$

Toplam enerji tüketimi, elektrik tüketimi ile doğalgaz tüketiminin toplamı olarak hesaplanmıştır (European Commission Energy Directorate, 2023).

$$\text{Toplam Enerji Tüketimi (kWh)} = \text{Elektrik Tüketimi (kWh)} + \text{Doğalgaz Tüketimi (kWh)} \quad (3.4)$$

Fabrikanın enerji yoğunluğu, formül 3.5'te bulunan, toplam enerji tüketiminin üretim miktarına oranlanmasıyla elde edilmiştir (UNIDO, 2023).

$$\text{Enerji Yoğunluğu} = \frac{\text{Toplam Enerji Tüketimi (kWh)}}{\text{Toplam Üretim Miktarı(kg)}} \quad (3.5)$$

Enerji tüketiminin uluslararası standartlarda kıyaslanabilmesi için TEP (Ton Eşdeğer Petrol) cinsine çevrilmiştir. 1 TEP $\approx$ 11.630 kWh olarak kabul edilmiştir (World Bank, 2023).

$$\text{Enerji Tüketimi (TEP)} = \frac{\text{Toplam Enerji Tüketimi (kWh)}}{11.630} \quad (3.6)$$

Üretim miktarı ve birim ürün değeri çarpımı ile ekonomik çıktı, formül 3.7'ye göre hesaplanmıştır (OECD, 2023).

$$\text{GSYİH (1.000 \$)} = \frac{\text{Toplam Üretim Miktarı (Kg)} \times \text{Birim Ürün Değeri} \left(\frac{\$}{\text{kg}} \right)}{1.000} \quad (3.7)$$

Fabrikanın enerji yoğunluğu, Türkiye ve dünya kimya sanayi enerji yoğunluğu verileri ile kıyaslanabilmesi için, formül 3.8'e göre TEP/1.000\$ cinsine çevrilmiştir (CEFIC, 2023).

$$\text{Enerji Yoğunluğu (TEP/1.000\$)} = \frac{\text{Enerji Tüketimi (TEP)}}{\text{GSYİH (1.000\$)}} \quad (3.8)$$

GSYİH formülü (Eğilmez, 2013).

$$\text{GSYİH (1.000 2015 \$)} = \frac{\text{GSYİH (1.000 USD)}}{(\text{Düzeltilme Katsayısı})} \quad (3.9)$$

Düzeltilme katsayısı formülü. (OECD,2024).

$$\text{Düzeltilme Katsayısı} = \frac{\text{GSYİH Deflatörü(Yıl)}}{100} \quad (3.10)$$

3.3. ARIMA-SARIMA YÖNTEMİ

ARIMA modeli, zaman serisi verilerini analiz etmek ve gelecekteki değerleri tahmin etmek için kullanılan güçlü bir istatistiksel yöntemdir. Bu model üç bileşenden oluşur: Otoregresif (AR), fark alma işlemi (I) ve hareketli ortalama (MA). Elektrik ve doğalgaz tüketimi genellikle doğrusal olmayan ve mevsimsel etkiler içeren bir zaman serisidir. Bu nedenle, ARIMA modeli bu tür verileri işleyerek anlamlı tahminler üretebilir. Yapılan literatür taramasında, fabrikalarda enerji tüketimi tahmini için ARIMA modelinin yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür (Box & Jenkins, 1976; Hyndman & Athanasopoulos, 2018). Bu çalışmada kullanılan veri seti, kimya fabrikasının 2020-2024 yılları arasında aylık olarak ölçülen enerji tüketim verilerinden oluşmaktadır. Veri seti üç temel değişkenden oluşmaktadır: elektrik tüketimi (kWh cinsinden), doğalgaz tüketimi (m³ cinsinden) ve üretilen toplam ürün miktarı (kg cinsinden). Veriler, fabrikanın elektrik, doğalgaz sayaçları ve stok raporları üzerinden sağlanmış olup, her yıl için 12 gözlem içeren toplam 60 veri noktası bulunmaktadır. Endüstriyel enerji tüketiminin modellenmesi konusunda yapılan önceki çalışmalar, enerji tüketimi tahmininde zaman serisi modellerinin başarılı olduğunu göstermektedir (Suganthi & Samuel, 2012; Al-Rabbaie et al. 2020). Veri setinin işlenmeden önce durağan olup olmadığı Augmented Dickey-Fuller (ADF) testi ile incelenmiştir. Durağan olmayan zaman serileri için birinci dereceden fark alma ($\Delta Y_t = Y_t - Y_{t-1}$) işlemi uygulanarak veri durağan hale getirilmiştir.

Ayrıca, veride eksik değer olup olmadığı analiz edilmiş ve eksik gözlemler lineer enterpolasyon yöntemiyle tamamlanmıştır. Bu teknikler, Box ve Jenkins (1976) tarafından önerilen zaman serisi modelleme ilkeleri doğrultusunda uygulanmıştır.

ARIMA(p,d,q) modelinin parametreleri—p (otoregresyon derecesi), d (durağanlık için fark alma derecesi) ve q (hareketli ortalama derecesi)—ACF (Otokorelasyon Fonksiyonu) ve PACF (Kısmi Otokorelasyon Fonksiyonu) grafikleri kullanılarak belirlenmiştir. Alternatif olarak, parametre optimizasyonu için MATLAB’da yerleşik auto.arima fonksiyonu kullanılmış ve en uygun model parametreleri tespit edilmiştir. ACF ve PACF yöntemleri Box ve Jenkins (1976) tarafından önerilmiş olup, zaman serisi analizinde yaygın biçimde kullanılmaktadır (Hyndman & Athanasopoulos, 2018). Zaman serisi analizinde, serinin modellemeye uygun hale getirilmesi için öncelikle durağanlık (stationarity) kontrolü gerçekleştirilmiştir. Çünkü ARIMA ve SARIMA modelleri, teorik olarak sadece durağan zaman serileri üzerinde çalışabilir (Box & Jenkins, 1976). Elektrik ve doğalgaz tüketimi gibi endüstriyel enerji verileri, genellikle mevsimsel dalgalanmalar içeren zaman serileridir. Bu tür verilerde klasik ARIMA modeli yalnızca trend ve rastgele bileşenleri dikkate alırken, SARIMA modeli mevsimsel örüntüleri de modelleyerek daha isabetli tahminler sunabilmektedir (Hyndman & Athanasopoulos, 2018). Zaman serisinin ortalaması, varyansı ve kovaryansının zaman içinde sabit kalıp kalmadığını test etmek amacıyla Augmented Dickey-Fuller (ADF) testi uygulanmıştır. ADF testi, serinin birim kök içerip içermediğini analiz ederek durağan olup olmadığını belirler. Birim kök varlığı, serinin durağan olmadığını gösterir; dolayısıyla ADF testi sonucunda elde edilen p-değerine göre seriye fark alma işlemi uygulanması gerekebilir (Dickey & Fuller, 1979). ADF testi, geleneksel Dickey-Fuller testine ek olarak otokorelasyonları gidermek amacıyla gecikmeli fark terimleri içerir. Bu yönüyle ADF testi, ekonomik ve endüstriyel zaman serilerinde güvenilir sonuçlar verdiği için yaygın olarak tercih edilmektedir (Gujarati, 2011). Seri durağan hale getirildikten sonra, modelin otoregresif (AR) ve hareketli ortalama (MA) parametrelerinin belirlenmesi amacıyla Otokorelasyon Fonksiyonu (ACF) ve Kısmi Otokorelasyon Fonksiyonu (PACF) grafiklerinden yararlanılmıştır. ACF grafiği, serinin kendisiyle olan korelasyonlarını farklı gecikmelerde gösterirken, PACF yalnızca ilgili gecikmenin seriye katkısını ölçer (Hyndman & Athanasopoulos, 2018). Bu grafikler, ARIMA modelinde yer alacak p (AR derecesi) ve q (MA derecesi) parametrelerinin ön belirlemesi için kullanılır. ACF ve PACF analizleri, Box-Jenkins metodolojisinin temel bileşenlerinden biri olup, modelin yapılandırılmasında

yön gösterici niteliktedir (Box et al. 2015). Modelin başarısını değerlendirmek için Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE) ve Mean Absolute Percentage Error (MAPE) hata ölçütleri hesaplanmıştır. Model, geçmiş veriler üzerinde test edilerek hata oranları analiz edilmiş ve tahmin doğruluğu incelenmiştir. Enerji tüketimi tahmininde kullanılan hata metrikleri, geçmiş çalışmalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır (Makridakis et al., 1998; Willmott & Matsuura, 2005).

3.4. GES SİSTEMİ

Boyutlandırma ve maliyet analizi sürecinde, ARIMA/SARIMA modelleriyle elde edilen 5 yıllık aylık elektrik tüketim tahminleri, güneş enerjisi sisteminin kapasite planlaması için temel veri kaynağını oluşturur. Bu tahminler, yılın hangi aylarında daha yüksek veya düşük tüketim gerçekleşeceğini öngörerek, panel kapasitesinin (kW/MW) doğru belirlenmesine olanak tanır. Bu aşamada, üretim-tüketim dengesi göz önünde bulundurularak, gereken panel sayısı, invertör kapasitesi ve varsa enerji depolama sistemlerinin (batarya vb.) büyüklüğü teknik olarak boyutlandırılmalıdır. Maliyet analizine geçildiğinde, projenin yatırım maliyeti (panel, montaj, altyapı, mühendislik vb.), işletme ve bakım giderleri, varsa devlet teşvikleri ve hibeler, ayrıca karbon emisyon azaltımı sonucu elde edilecek çevresel kazançlar ve enerji tasarrufu kalemleri detaylı şekilde ele alınmalıdır. Bu finansal göstergeler ışığında, yatırımın geri ödeme süresi (ROI) ve Net Bugünkü Değeri (NPV) hesaplanmalı; bu hesaplamalar da projenin ekonomik fizibilitesinin değerlendirilmesinde temel kriter olarak kullanılmalıdır. Güneş enerjisi sistemleri doğası gereği mevsimsel dalgalanmalara tabidir. Bu nedenle, güneş enerjisi üretiminin yıl içerisindeki değişkenliği ile sanayi tesisinin elektrik tüketimindeki mevsimsel örüntüler eş zamanlı olarak analiz edilmelidir. Bu analiz, sistemin doğru boyutlandırılması ve enerji dengesizliğinin önlenmesi açısından önemlidir (IEA, 2020). Üretim ve tüketim arasında ortaya çıkabilecek geçici dengesizlikler, özellikle düşük güneşlenme dönemlerinde şebekeden elektrik çekilmesini; fazla üretim durumunda ise, ilgili mevzuat çerçevesinde şebekeye satış ya da mahsuplaşma stratejilerini gerektirebilir (ETKB, 2022). Türkiye'deki düzenlemeler, Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği kapsamında, fazla üretilen elektriğin şebekeye verilmesine ve aylık mahsuplaşmaya olanak sağlamaktadır (EPDK, 2022). Bu doğrultuda, güneş enerjisi yatırımlarında sadece teknik değil, aynı zamanda yasal çerçevenin de dikkate alınması gerekmektedir. Ayrıca, enerji depolama sistemleri ve akıllı şebeke çözümleri, güneş enerjisine dayalı sistemlerin

sürdürülebilirliğini artırmak adına literatürde önerilen destekleyici teknolojilerdir (Hirth et al. 2015).



Şekil 3. 1 Tez kapsamında uygulanan akış şeması

4. UYGULAMA VE BULGULAR

4.1.ENERJİ ETÜDÜ

Fabrika 2009 yılında bor yağı, kızak yağı ve talaşlı imalat sektöründe kullanılan lubricantlar üretmek üzere kurulmuştur. Kurulu sistemde 1 ton (1adet), 5 ton (2 adet), 1 ton (pilot reaktör) olmak üzere toplamda 4 adet karıştırıcı ile faaliyet göstermektedir.

Çizelge 4.1 ve 4.2’de reaktörlerin toplam enerji tüketim değerleri elektrik sayaç verileri, motor kW’ları ve doğalgaz sayaç verilerine göre hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 1. Toplam doğalgaz enerjisi tüketimleri.

Enerji Tüketim Şekli	Doğalgaz Tüketimi m ³ /h)	10 Saatlik Çalışma Sonucu Günlük Tüketilen Enerji Miktarı(m ³ /h)	Yıllık Tüketilen Enerji Miktarı (m ³ /h)
Evaporatör	0,00	0,00	0,00
Vakum Filtre Sistemi	0,00	0,00	0,00
Trafo Yağ Pompa Sistemi Motoru	0,00	0,00	0,00
Hidrofor Su Pompa Motorları x 2 Adet	0,00	0,00	0,00
Kompresör	0,00	0,00	0,00
Kızgın Yağ Pompa Motorları x 2 Adet	0,00	0,00	0,00
Kızgın Yağ Pompa Motorları 2- x 2 Adet	0,00	0,00	0,00
Chiller Sistemi Pompa Motoru	0,00	0,00	0,00
1 Ton Reaktör	8,00	80,00	19.200,00
5 Ton Reaktör	14,00	140,00	33.600,00
5+1 Ton Reaktör	18,00	180,00	43.200,00
Yıllık Diğer Doğalgaz Toplam Tüketimi (m ³ /h)			0,00
Reaktör Toplam Doğalgaz Enerjisi Tüketimi (m ³ /h)			96.000,00
Yıllık Doğalgaz Enerjisi Tüketim Farkı (m ³ /h)			96.000,00

Çizelge 4. 2. Toplam elektrik enerjisi tüketimleri.

Enerji Tüketim Şekli	Tüketilen Toplam Enerji Miktarı (kWh)	10 Saatlik Çalışma Sonucu Günlük Tüketilen Enerji Miktarı(kWh)	Yıllık Tüketilen Enerji Miktarı (kWh)
Evaporatör	15	150	36.000,0
Vakum Filtre Sistemi	25	250	60.000,0
Trafo Yağ Pompa Sistemi Motoru	4	40	9.600,0
Hidrofor Su Pompa Motorları x 2 Adet	6	60	14.400,0
Kompresör	22	220	52.800,0
Kızgın Yağ Pompa Motorları x 2 Adet	30	300	72.000,0
Kızgın Yağ Pompa Motorları 2- x 2 Adet	4,4	44	10.560,0
Chiller Sistemi Pompa Motoru	15	150	36.000,0
1 Ton Reaktör	46	460	110.400,0
5 Ton Reaktör	47	470	112.800,0
5+1 Ton Reaktör	57	570	136.800,0
Yıllık Diğer Elektrik Toplam Enerji Tüketimi (kWh)			291.360,0
Reaktör Toplam Elektrik Enerjisi Tüketimi (kWh)			360.000,0
Yıllık Elektrik Enerjisi Tüketim Farkı(kWh)			68.640,0

Çizelge 4.1 ve çizelge 4.2'ye göre gerçekleştirilen enerji etüdü kapsamında, elektrik ve doğalgaz sayaç verileri ile ekipman etiket bilgilerinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda, proseste yer alan reaktörlerin diğer ekipmanlara kıyasla %23,56 oranında daha fazla elektrik enerjisi tükettiği tespit edilmiştir. Bu oran, reaktörlerin sistemdeki en yüksek elektrik enerjisi tüketimine sahip ekipmanlar olduğunu ortaya koymaktadır. Doğalgaz tüketimi bakımından, 1 Ton, 5 Ton ve 5+1 Ton kapasiteli reaktörlerin yıllık toplam tüketimi 96.000 m³ olarak belirlenmiştir. Reaktör bazlı yıllık tüketimler incelendiğinde; 5+1 Ton reaktör 43.200 m³, 5 Ton reaktör 33.600 m³ ve 1 Ton reaktör 19.200 m³ doğalgaz tüketmiştir. Bu değerler, reaktörlerin doğalgaz tüketiminde de açık ara en yüksek tüketim oranlarına sahip ekipmanlar olduğunu göstermektedir. Elde edilen veriler doğrultusunda, reaktörlerin enerji performanslarının detaylı olarak incelenmesine karar verilmiştir. Reaktörlerin enerji tüketim düzeylerinin yüksek olması, iyileştirme çalışmaları için öncelikli hedef alanı olarak belirlenmiştir. Fabrikanın enerji tüketim analizinde, yıllık ve beş yıllık toplam tüketim verileri kullanılmıştır. Yıllık veriler kısa vadeli değişimleri, beş yıllık veriler ise uzun vadeli eğilimleri göstermektedir.

4.2.ENERJİ YOĞUNLUĞU

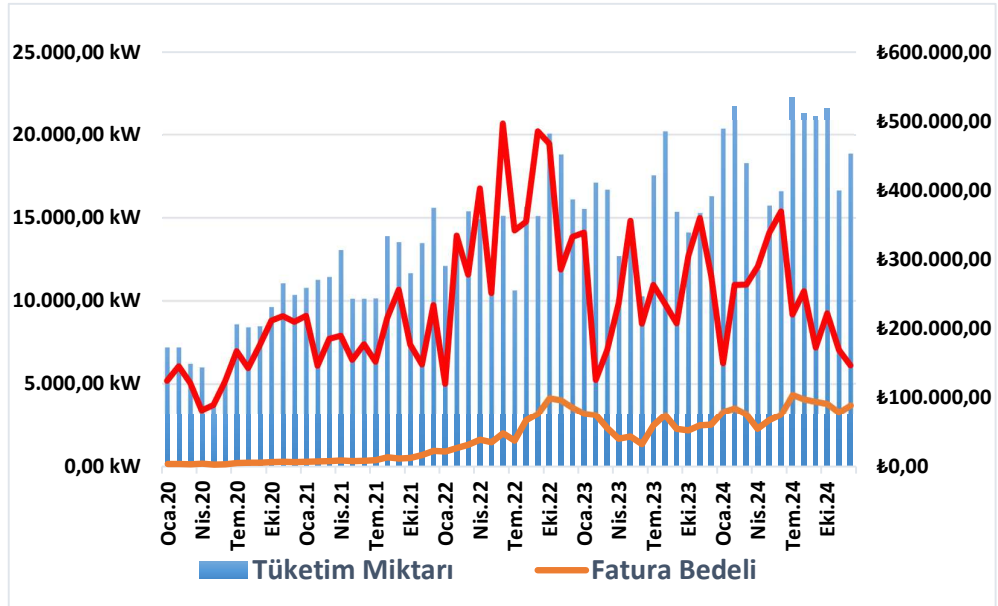
Çizelge 4. 3. Toplam elektrik enerji maliyeti.

ELEKTRİK ENERJİSİ				
Ay	Tüketim	Fatura Bedeli	Ortalama Yıllık Tüketim	Ortalama 5 Yıllık Tüketim
Oca.20	7.213,79 kW	₺3.896,28	7.663,45 kW	42.297,95 kW
Şub.20	7.213,79 kW	₺3.691,93		
Mar.20	6.235,40 kW	₺3.408,43		
Nis.20	6.010,80 kW	₺4.230,93		
May.20	3.705,67 kW	₺2.690,96		
Haz.20	5.000,50 kW	₺3.496,40		
Tem.20	8.605,47 kW	₺5.099,46		
Ağu.20	8.419,61 kW	₺5.284,76		
Eyl.20	8.481,15 kW	₺5.285,39		
Eki.20	9.640,34 kW	₺6.221,86		
Kas.20	11.067,30 kW	₺6.839,99		
Ara.20	10.367,53 kW	₺6.382,37		
Oca.21	10.792,69 kW	₺6.835,29	12.101,50 kW	
Şub.21	11.273,30 kW	₺7.274,19		
Mar.21	11.451,62 kW	₺7.920,22		
Nis.21	13.064,44 kW	₺9.069,83		
May.21	10.140,28 kW	₺8.206,66		
Haz.21	10.135,79 kW	₺8.383,76		
Tem.21	10.152,97 kW	₺9.388,61		
Ağu.21	13.903,43 kW	₺13.274,80		
Eyl.21	13.538,39 kW	₺11.671,66		
Eki.21	11.675,91 kW	₺12.509,42		
Kas.21	13.486,27 kW	₺16.645,86		
Ara.21	15.602,91 kW	₺22.915,01		
Oca.22	12.106,80 kW	₺21.466,21	15.040,12 kW	
Şub.22	14.065,50 kW	₺26.677,63		
Mar.22	15.393,29 kW	₺31.653,65		
Nis.22	14.924,88 kW	₺39.154,75		
May.22	12.483,18 kW	₺35.040,43		
Haz.22	15.119,10 kW	₺48.237,63		
Tem.22	10.637,03 kW	₺37.451,91		
Ağu.22	15.661,74 kW	₺67.049,77		
Eyl.22	15.110,23 kW	₺77.170,10		
Eki.22	20.061,21 kW	₺99.504,44		
Kas.22	18.811,96 kW	₺96.754,20		
Ara.22	16.106,55 kW	₺85.550,25		
Oca.23	15.540,63 kW	₺76.999,89	15.423,92 kW	
Şub.23	17.118,52 kW	₺74.784,92		
Mar.23	16.691,94 kW	₺56.099,14		
Nis.23	12.701,06 kW	₺40.407,78		

Çizelge 4.3. (Devamı).Toplam elektrik enerji maliyeti .

ELEKTRİK ENERJİSİ				
Ay	Tüketim	Fatura Bedeli	Ortalama Yıllık Tüketim	Ortalama 5 Yıllık Tüketim
May.23	13.932,63 kW	₺43.267,15	18.862,38 kW	
Haz.23	10.285,17 kW	₺32.746,39		
Tem.23	17.551,01 kW	₺60.168,08		
Ağu.23	20.197,47 kW	₺74.800,84		
Eyl.23	15.364,27 kW	₺54.580,61		
Eki.23	14.117,12 kW	₺52.732,43		
Kas.23	15.289,67 kW	₺59.545,52		
Ara.23	16.297,51 kW	₺60.812,46		
Oca.24	20.360,34 kW	₺79.721,88		
Şub.24	21.723,61 kW	₺84.810,04		
Mar.24	18.295,38 kW	₺75.955,57		
Nis.24	11.894,59 kW	₺54.931,11		
May.24	15.734,67 kW	₺67.301,39		
Haz.24	16.602,12 kW	₺75.920,98		
Tem.24	22.237,05 kW	₺104.439,00		
Ağu.24	21.288,71 kW	₺98.175,84		
Eyl.24	21.125,97 kW	₺94.327,05		
Eki.24	21.580,88 kW	₺91.410,40		
Kas.24	16.642,90 kW	₺78.575,00		
Ara.24	18.862,38 kW	₺89.028,26		

2020-2024 yılları arasındaki beş yıllık dönemde, elektrik enerjisi tüketimine ilişkin faturaların incelenmesi sonucunda çizelge 4.3'e göre toplam elektrik gideri 2.537.876 Türk Lirası (TL) ≈66.786,21 USD (1 USD=38 TL) olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. 1. 5 yıllık elektrik enerjisi tüketim ve üretim dağılımı.

Şekil 4.1, üretim miktarları, elektrik tüketimi ve elektrik tüketim maliyetlerinin yıllık eğilimlerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Yatay eksen, Ocak 2020'den Kasım 2024'e kadar olan dönemi kapsayan zaman dilimini temsil etmektedir. Dikey eksenler ise, bir tarafta elektrik tüketimi (kW) ve üretim miktarını, diğer tarafta elektrik fatura bedelini (₺) ifade etmektedir. Şekil 4.1'de, elektrik tüketimi ile üretim arasında belirgin bir ilişki gözlemlenmekte olup, elektrik tüketiminde artışların üretim seviyelerine yansıdığı görülmektedir. Elektrik tüketim maliyetleri, incelenen dönem boyunca dalgalı bir seyir izlemiştir. Özellikle 2022 yılının ortalarına doğru maliyetlerde belirgin bir artış gözlemlenirken, bu durum enerji fiyatlarındaki dalgalanmaların işletme maliyetlerine doğrudan etkisini ortaya koymaktadır. Daha sonraki dönemde maliyetlerde kısmi azalmalar yaşanmış olsa da, genel eğilim artış yönünde ilerlemiştir. Bu durum, enerji tüketim miktarının artışının yanı sıra, enerji fiyatlarındaki değişimlerin de maliyetlere yansıdığını göstermektedir.

Çizelge 4. 4. Toplam doğalgaz enerji maliyeti.

DOĞALGAZ				
Ay	Tüketim	Fatura Bedeli	Ortalama Yıllık Tüketim	Ortalama 5 Yıllık Tüketim
Oca.20	1.481 M3	₺3.597,80	1.117 M3	2.347 M3
Şub.20	768 M3	₺1.867,27		
Mar.20	1.419 M3	₺3.460,36		
Nis.20	952 M3	₺2.311,77		
May.20	676 M3	₺1.608,73		
Haz.20	1.035 M3	₺2.474,88		
Tem.20	1.172 M3	₺2.716,64		
Ağu.20	834 M3	₺1.923,78		
Eyl.20	856 M3	₺1.992,91		
Eki.20	857 M3	₺2.032,41		
Kas.20	1.917 M3	₺4.622,25		
Ara.20	1.431 M3	₺3.514,00		
Oca.21	1.886 M3	₺4.728,00	1.835 M3	
Şub.21	1.859 M3	₺4.694,00		
Mar.21	2.078 M3	₺5.271,00		
Nis.21	1.743 M3	₺4.410,00		
May.21	2.108 M3	₺5.297,00		
Haz.21	1.490 M3	₺3.751,00		
Tem.21	1.094 M3	₺2.979,00		
Ağu.21	2.103 M3	₺5.718,00		
Eyl.21	2.208 M3	₺6.097,00		
Eki.21	1.768 M3	₺4.990,00		

Çizelge 4.4. (Devamı). Toplam doğalgaz enerji maliyeti.

DOĞALGAZ					
Ay	Tüketim	Fatura Bedeli	Ortalama Yıllık Tüketim	Ortalama 5 Yıllık Tüketim	
Kas.21	1.745 M3	₺5.026,00	2.785 M3		
Ara.21	1.942 M3	₺5.830,00			
Oca.22	1.955 M3	₺8.103,38			
Şub.22	3.120 M3	₺13.180,99			
Mar.22	2.623 M3	₺11.637,44			
Nis.22	2.580 M3	₺15.406,75			
May.22	3.167 M3	₺18.932,31			
Haz.22	3.109 M3	₺24.875,38			
Tem.22	1.334 M3	₺10.601,10			
Ağu.22	2.181 M3	₺17.262,00			
Eyl.22	1.979 M3	₺23.222,50			
Eki.22	5.439 M3	₺64.950,50			
Kas.22	3.562 M3	₺43.164,50			
Ara.22	2.366 M3	₺29.196,50			
Oca.23	2.366 M3	₺37.980,50	2.215 M3		
Şub.23	1.761 M3	₺21.977,00			
Mar.23	2.260 M3	₺28.093,50			
Nis.23	2.567 M3	₺31.791,00			
May.23	2.084 M3	₺25.413,00			
Haz.23	1.550 M3	₺15.081,00			
Tem.23	1.901 M3	₺23.450,00			
Ağu.23	2.277 M3	₺27.938,00			
Eyl.23	1.149 M3	₺14.488,00			
Eki.23	3.047 M3	₺45.878,00			
Kas.23	3.346 M3	₺51.260,00			
Ara.23	2.266 M3	₺35.261,00			
Oca.24	3.201 M3	₺50.444,00			3.785 M3
Şub.24	5.439 M3	₺85.859,00			
Mar.24	3.721 M3	₺58.714,00			
Nis.24	2.812 M3	₺43.219,60			
May.24	4.219 M3	₺64.829,40			
Haz.24	3.082 M3	₺45.819,00			
Tem.24	3.205 M3	₺47.375,00			
Ağu.24	2.983 M3	₺56.455,00			
Eyl.24	4.332 M3	₺83.102,00			
Eki.24	3.943 M3	₺77.180,00			
Kas.24	4.517 M3	₺69.940,00			
Ara.24	3.969 M3	₺67.427,35			

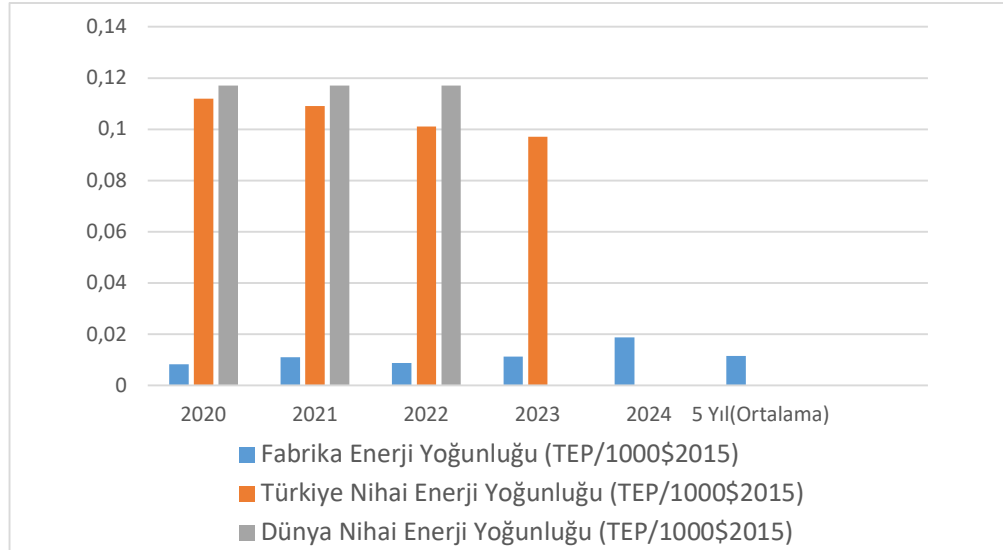
Çizelge 4.4'e göre 2020-2024 yılları arasındaki beş yıllık dönemde, doğalgaz enerjisi tüketimine ilişkin faturaların incelenmesi sonucunda toplam doğalgaz gideri 1.480.422,50 Türk Lirası (TL) ≈38.958,49 USD (1 USD=38 TL) olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada incelenen fabrikaya ait enerji yoğunluğu verileri, 2020-2024 yılları

arasındaki beş yıllık dönem için analiz edilmiş ve Türkiye ile dünya genelindeki nihai enerji yoğunluğu değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.5 ve şekil 4.2 incelendiğinde, fabrikanın enerji yoğunluğu değerlerinin incelenen yıllar boyunca dünya enerji yoğunluğu ortalaması olan 0,117 ve Türkiye enerji yoğunluğu ortalaması olan 0,101'in çok altında kalarak yalnızca 0,0113 seviyesinde gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, fabrikanın dünya ortalamasından 0,106 puan, Türkiye ortalamasından ise 0,090 puan daha düşük bir enerji yoğunluğu değerine sahip olması nedeniyle şu anda daha verimli olduğunu göstermektedir

Çizelge 4. 5. Fabrika enerji yoğunluğu.

Yıl	Elektrik Tüketimi (kWh)	Doğalgaz Tüketimi (m ³)	Toplam Enerji Tüketimi (kWh)	Üretim Miktarı (Kg)	Fabrika Enerji Yoğunluğu (TEP/1000\$2015)
2020	91.961,35	13.398	219.242,35	1.810.700,80	0,0083
2021	145.218,00	22.024	354.446,00	2.253.967,07	0,0111
2022	180.481,47	33.415	497.923,47	4.144.177,98	0,0089
2023	185.087,00	26.574	437.540,00	3.077.680,99	0,0113
2024	226.348,60	45.423	657.867,60	2.856.130,52	0,0188
5 Yıl (Toplam)	828.096,42	140.834	2.166.019,42	14.142.657,36	0,0115



Şekil 4. 2. Fabrika enerji yoğunluğu karşılaştırma (IEA, 2023; IEA, 2022; ETKB, 2023).

4.3.ENERJİ TÜKETİMİ TAHMİNLEMESİ



Şekil 4. 3. Elektrik tüketimi, doğalgaz tüketimi ve üretilen ürün miktarı zaman serileri.

Şekil 4.3'teki veriler incelendiğinde 2020 ve 2021 yılları arasında nispeten düşük ve istikrarlı bir seyir izlendiği, ancak 2022 yılı itibarıyla tüketimde belirgin bir artışın başladığı görülmektedir. Bu artışı takiben, 2023 ve 2024 yıllarında daha düzensiz ve dalgalı bir tüketim eğilimi gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, doğalgaz tüketiminde de önemli değişiklikler dikkat çekmektedir. Özellikle kış aylarında tüketim miktarının artış göstermesi, mevsimsel etkilerin belirgin olduğunu ortaya koymaktadır. 2022 yılında ise doğalgaz kullanımında ani bir yükseliş meydana gelmiş ve takip eden dönemde dalgalanmalar devam etmiştir. Üretilen ürün miktarına ilişkin veriler de enerji tüketimi ile paralel bir davranış sergilemiştir. Özellikle 2022 yılında üretim hacminde belirgin bir artış kaydedilmiş olup, bu durumun elektrik ve doğalgaz tüketimindeki yükselişle doğrudan ilişkili olduğu düşünülmektedir. Tüm bu veriler, üretim hacmi ile enerji tüketimi arasında anlamlı bir korelasyon olduğunu göstermekte ve süreç yönetiminin enerji verimliliği açısından kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu analizler sonucunda, ARIMA modeli uygulanmadan önce zaman serilerinin durağan olup olmadığı test edilmelidir. Bunun için Augmented Dickey-Fuller (ADF) testi uygulanacaktır. Zaman serilerinin durağan olup olmadığını belirlemek için MATLAB'da Econometrics Toolbox kullanılarak ADF testi uygulanmıştır.

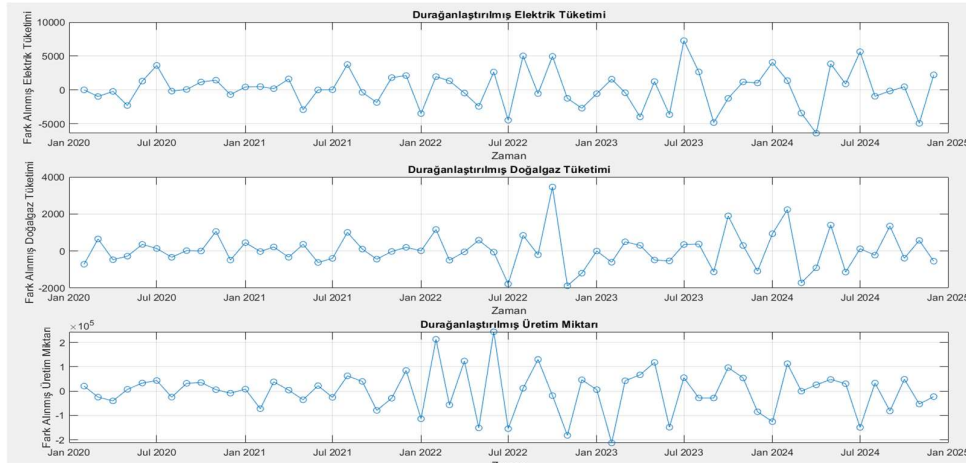
ADF testi, zaman serisinin durağan olup olmadığını belirlememize yardımcı olan bir

istatistiksel testtir. Test sonucunda şekilde 4.4'te görüldüğü üzere, elektrik tüketimi, doğalgaz tüketimi ve üretim miktarı serilerinin durağan olmadığı belirlenmiştir

```
Command Window
>> energy_analysis
Warning: Column headers from the file were modified to make them valid MATLAB identifiers before creating variable names for the table. The original column headers are saved in the VariableDescriptions property. Set 'VariableNamingRule' to 'preserve' to use the original column headers as table variable names.
Elektrik tüketimi serisi durağan değildir, fark alma işlemi gereklidir.
Doğalgaz tüketimi serisi durağan değildir, fark alma işlemi gereklidir.
Üretilen ürün miktarı serisi durağan değildir, fark alma işlemi gereklidir.
fx >>
```

Şekil 4. 4. ADF test sonucu.

Elektrik tüketimi serisi durağan değildir, fark alma işlemi gereklidir. Doğalgaz tüketimi serisi durağan değildir, fark alma işlemi gereklidir. Üretilen ürün miktarı serisi durağan değildir, fark alma işlemi gereklidir. Bu sonuçlara göre serileri durağan hale getirmek için fark alma işlemi uygulanmıştır. ADF testi sonucunda durağan olmayan seriler için aşağıdaki fark alma işlemi gerçekleştirilmiştir.



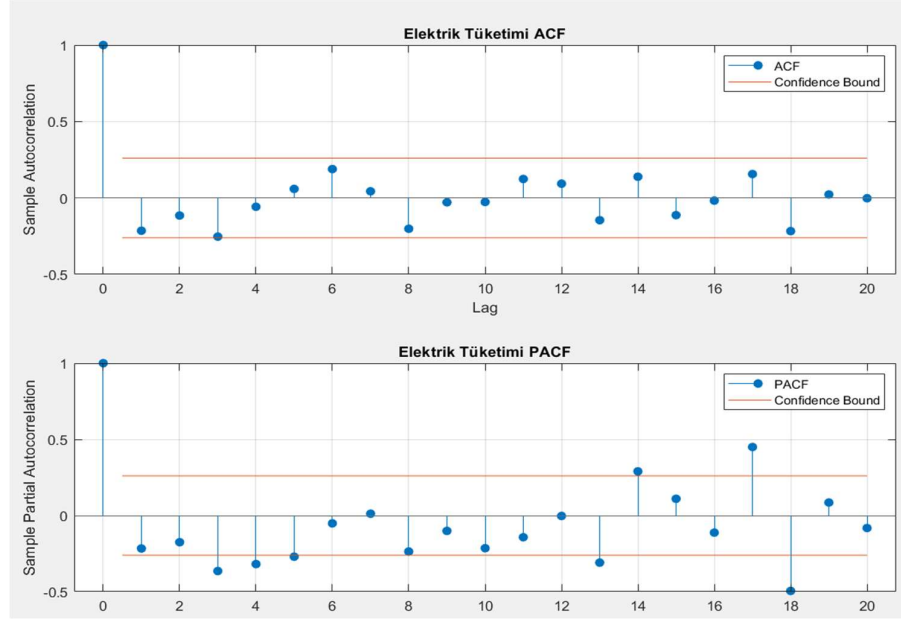
Şekil 4. 5. Fark alma işlemi sonrası durağanlaştırılmış zaman serileri.

Şekil 4.5 elektrik tüketimi, doğalgaz tüketimi ve üretim miktarı serileri üzerinde fark alma işlemi uygulandıktan sonra elde edilmiştir. İlk grafik elektrik tüketimi, ikinci grafik doğalgaz tüketimi, üçüncü grafik ise üretim miktarını göstermektedir.

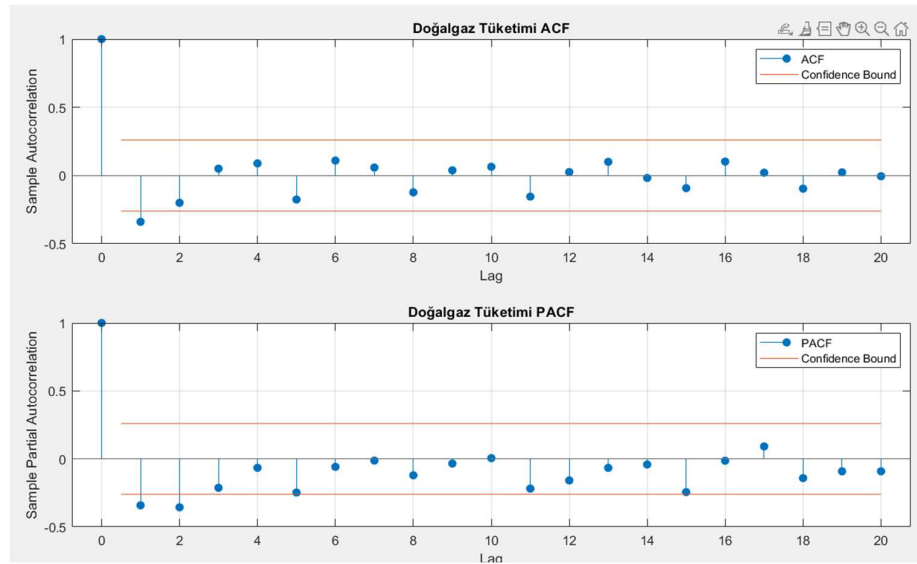
Şekil 4.5'te yer alan fark alma işlemi sonrası serilerin ortalaması sıfır etrafında dalgalanmakta olup, bu durum serilerin daha durağan hale geldiğini göstermektedir. Belirgin bir trend etkisi kaybolmuş olup, dalgalanmalar belirli bir seviyede sabitlenmiştir. Fark alma işlemi sonrası seriler durağan hale gelmiştir. Bu aşamadan sonra, ARIMA modeli kurularak tahminleme işlemine geçilebilir. ARIMA modelinin parametrelerini

belirlemek için Otokorelasyon Fonksiyonu (ACF) ve Kısmi Otokorelasyon Fonksiyonu (PACF) grafiklerinden yararlanılmıştır. ACF ve PACF grafiklerinin amacı, ARIMA modelindeki p (otomatik regresyon), d (fark alma derecesi) ve q (hareketli ortalama) parametrelerini doğru şekilde belirlemektir.

Fark alma işlemi sonrasında $d = 1$ olarak belirlenmiştir. p ve q Parametreleri ise ACF ve PACF grafiklerinden seçilecektir.



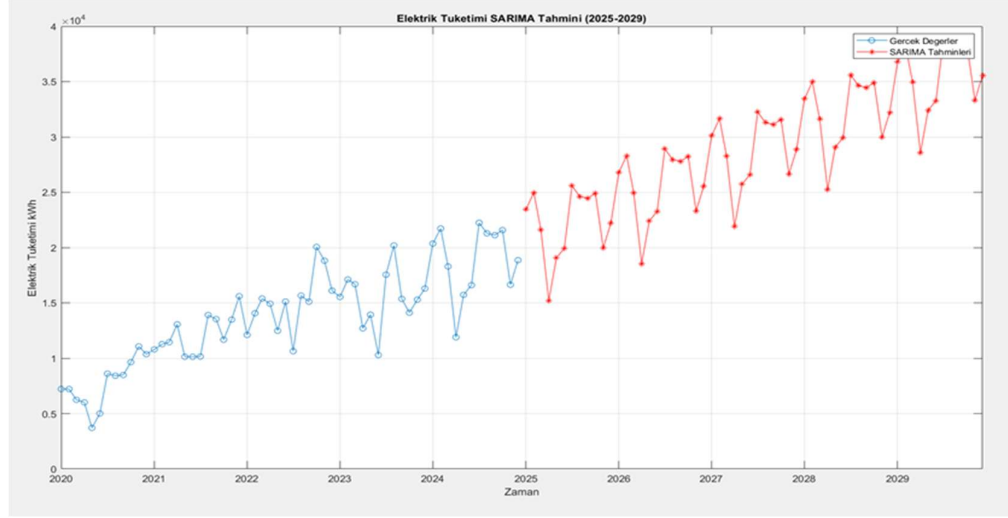
Şekil 4. 6. Elektrik tüketimi için ACF ve PACF grafikleri.



Şekil 4. 7 Doğalgaz tüketimi için ACF ve PACF grafikleri.

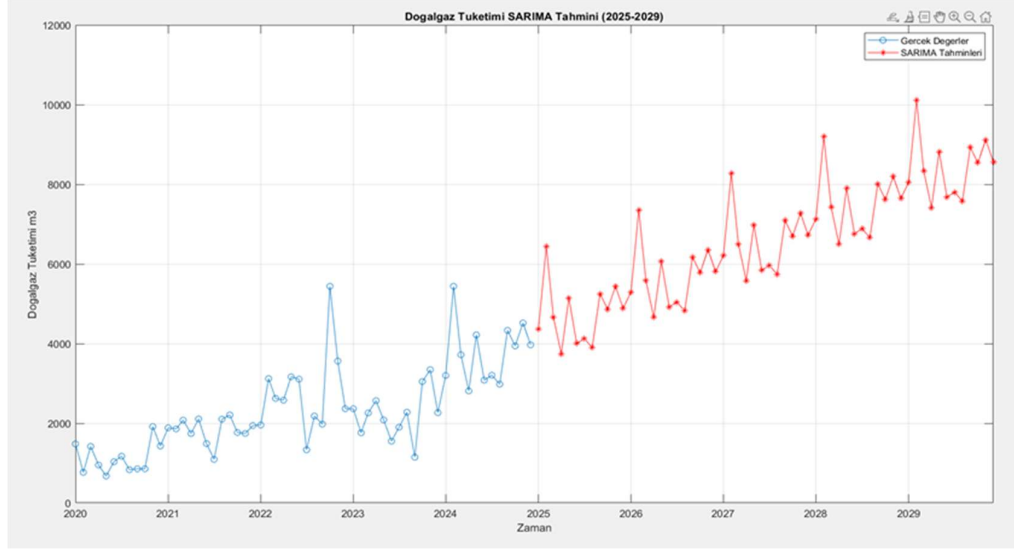
ARIMA modelinin parametrelerinin belirlenmesinde ACF (Otokorelasyon Fonksiyonu) ve PACF (Kısmi Otokorelasyon Fonksiyonu) grafiklerinden yararlanılmıştır. ACF grafiği, zaman serisinin belirli gecikmelerdeki (lags) kendisiyle olan korelasyonunu göstererek özellikle hareketli ortalama (MA) bileşeninin belirlenmesinde kullanılmıştır. Diğer yandan, PACF grafiği, her bir gecikmenin seriye yaptığı bağımsız etkiyi ölçerek otoregresif (AR) terimlerin seçilmesine yardımcı olmuştur. Şekil 4.6 ve 4.7’de bulunan grafiklerde turuncu çizgilerle gösterilen güven aralıklarının dışına çıkan noktalar, istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiş ve modelin yapılandırılmasında bu gecikmelere öncelik verilmiştir. Bu analizler sonucunda modelin p (AR) ve q (MA) parametreleri uygun şekilde belirlenmiş ve serinin istatistiksel özelliklerini en iyi temsil edecek yapı oluşturulmuştur. ARIMA modelinin parametrelerini belirlemek için Otokorelasyon Fonksiyonu (ACF) ve Kısmi Otokorelasyon Fonksiyonu (PACF) grafiklerinden yararlanılmıştır. ACF ve PACF grafiklerinin amacı, ARIMA modelindeki p (otomatik regresyon), d (fark alma derecesi) ve q (hareketli ortalama) parametrelerini doğru şekilde belirlemektir. Fark alma işlemi sonrasında $d = 1$ olarak belirlenmiştir. p ve q Parametreleri ise ACF ve PACF grafiklerinden seçilmiştir. Parametre seçiminde, serilerin istatistiksel özelliklerine uygunluk temel alınarak ACF (Autocorrelation Function) ve PACF (Partial Autocorrelation Function) grafiklerinden elde edilen bulgular dikkate alınmıştır. Otoregresif parametre olan p , PACF grafiğinde ilk anlamlı kesilmenin gözlemlendiği gecikme değerine göre belirlenmiştir. Hareketli ortalama parametresi olan q ise ACF grafiğinde ilk anlamlı kesilmenin görüldüğü gecikmeye karşılık gelmektedir. Serilerin durağan olmaması nedeniyle, her iki seri için de birinci dereceden fark alma işlemi uygulanarak $d=1$ olarak seçilmiş ve böylece zaman serileri durağan hale getirilmiştir. Bu yöntemle elde edilen parametre kombinasyonu, modelin yapısını en uygun şekilde tanımlayarak daha doğru tahminler yapılmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Her iki zaman serisinde de durağanlık sağlamak amacıyla ilk fark alma işlemi ($d=1$) uygulanmış ve yıllık mevsimsellik etkilerini modele dahil etmek için 12 aylık dönem dikkate alınmıştır. ACF ve PACF grafik analizleri sonucunda hem elektrik hem de doğalgaz tüketimi serileri için birinci dereceden gecikme (lag 1) yeterli bulunmuştur. Elektrik tüketimi serisine uygulanan SARIMA modeli, SARIMA (1,1,1)(0,1,0) [12] şeklinde belirlenmiştir. Bu modelde, seriyi durağan hale getirmek için birinci dereceden fark alma işlemi uygulanmış ($d=1$), PACF grafiğinde lag 1’de

gözlemlenen anlamlı kesilme nedeniyle otoregresif terim ($p=1$) ve ACF grafiğinde yine lag 1’de tespit edilen anlamlı kesilme nedeniyle hareketli ortalama terimi ($q=1$) kullanılmıştır. Mevsimsel bileşen olarak yıllık tekrar eden örüntüleri temsil etmek üzere mevsimsel fark alma işlemi ($D=1$) ve 12 aylık dönem dikkate alınmıştır. Doğalgaz tüketimi için de benzer şekilde SARIMA (1,1,1)(0,1,0) [12] modeli uygun bulunmuştur. Serinin durağan hale gelmesi için birinci fark alınmış ($d=1$), PACF grafiğinde lag 1’de belirgin bir kesilme otoregresif terimi olarak ($p=1$), ACF grafiğinde aynı noktadaki anlamlı değer ise hareketli ortalama terimi olarak ($q=1$) modele dahil edilmiştir. Mevsimsellik etkisini temsil etmek üzere 12 aylık periyotla birlikte mevsimsel fark alma işlemi ($D=1$) uygulanmıştır. Model, serilerin durağanlık düzeylerinin sağlanmasının ardından ACF ve PACF grafik analizlerinden elde edilen bulgular, mevsimsel örüntülerin varlığı ve literatürde önerilen Box-Jenkins metodolojisine dayalı yapılandırma ilkeleri doğrultusunda SARIMA (1,1,1)(0,1,0) [12] olarak belirlenmiştir. Bu süreçte, otoregresif ve hareketli ortalama terimleri ilgili grafiklerdeki anlamlı kesilmeler dikkate alınarak seçilmiş; mevsimsel fark alma ve 12 periyotlu yapı ise serilerin yıllık döngüsel özelliklerini temsil etmek amacıyla uygulanmıştır. Böylelikle modelin hem kısa dönemli bağımlılıkları hem de mevsimsel bileşenleri kapsayacak şekilde bütüncül bir yapı göstermesi hedeflenmiştir. Şekil 4.8 incelendiğinde, elektrik tüketiminin düzenli ve artan bir eğilim gösterdiği gözlemlenmektedir. 2020 yılından itibaren veri seti boyunca gözlenen büyüme, tahmin dönemi olan 2025–2029 arasında da devam etmektedir. Zaman serisi grafiğinde yer yer dalgalanmalar görülse de genel trend yukarı yönlüdür. Bu dalgalanmalar, üretim yoğunluğundaki dönemsel değişimlere veya işletmenin faaliyet takvimine bağlı olabilir. 2025 yılıyla başlayan tahmin değerleri, 2029 yılına kadar kWh düzeyinde belirgin bir artış göstermektedir. Bu da işletmenin enerji ihtiyacının gelecekte daha yüksek olacağını göstermektedir.



Şekil 4. 8. Elektrik tüketimi için SARIMA tahmini.

Yükselen elektrik tüketimi, işletmenin enerji maliyetlerinin önümüzdeki yıllarda oransal olarak artacağına işaret etmektedir. Bu durum, alternatif enerji kaynaklarının değerlendirilmesini stratejik bir gereklilik haline getirmektedir. Bu bağlamda, güneş enerjisi sistemi kurulumu, tahmin edilen tüketim verileri doğrultusunda panel kapasitesi, invertör boyutu ve varsa enerji depolama sistemlerinin gereksinimlerinin hesaplanmasında temel bir girdi niteliği taşımaktadır. Ayrıca, mevcut elektrik tarifeleri ve devlet teşvik mekanizmaları dikkate alınarak, güneş enerjisi sisteminin sağlayacağı tasarrufun yatırım geri ödeme süresi (amortisman süresi) analiz edilebilir. Bu analiz, yatırım kararının ekonomik fizibilitesini değerlendirmek ve uzun vadeli enerji planlaması yapmak açısından kritik öneme sahiptir. Şekil 4.9'a göre, 2020 yılından itibaren doğalgaz tüketiminde düzenli bir artış gözlemlenmekte olup, yapılan tahminler bu artış eğiliminin 2025 sonrası dönemde de devam edeceğini ortaya koymaktadır. Özellikle üretim faaliyetlerinin yoğunluğu, mevsimsel ısınma ve soğutma gereksinimleri ile proses kaynaklı değişkenlikler, tüketimdeki dalgalanmaların temel nedenleri arasında yer alabilir. Tahmin edilen dönem boyunca bu dalgalanmaların da süreceği öngörülmektedir. Doğalgaz tüketimindeki bu yükseliş, işletmenin toplam enerji giderleri içerisinde önemli bir pay oluşturabileceğinden, enerji yönetimi açısından stratejik bir değerlendirme gerektirir. Bu nedenle, sadece elektrik tüketimine odaklanmak yerine, doğalgaz ve elektrik tüketiminin birlikte analiz edilmesi, bütüncül ve çok boyutlu bir enerji yönetimi anlayışının benimsenmesini gerekli kılmaktadır. Bu yaklaşım, hem enerji verimliliği politikalarının etkinliğini artıracak hem de maliyetlerin optimize edilmesine katkı sağlayacaktır.



Şekil 4. 9. Doğalgaz tüketimi için SARIMA tahmini.

Güneş paneli yatırımı, doğrudan doğalgaz tüketimini azaltmasa da, elektrikle çalışan ısıtma, soğutma ve proses ekipmanlarının enerji ihtiyacını karşılayarak dolaylı yoldan doğalgaz bağımlılığını azaltma potansiyeli sunmaktadır. Bu durum, özellikle elektrik tüketimi üzerinden yürütülen proseslerde yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu açısından önemli bir fırsat yaratacaktır. Ancak doğalgaz tüketiminin denge altına alınması ya da azaltılması için yalnızca elektrik üretimi yeterli olmayabilir. Bu nedenle, ısı geri kazanım sistemleri, yalıtım iyileştirmeleri ve kojenerasyon/trijenerasyon sistemleri gibi çok yönlü enerji verimliliği çözümleri de fizibilite çalışmasına entegre edilmelidir. Özellikle kojenerasyon ve trijenerasyon sistemleri, aynı anda hem elektrik hem de ısı üretimi sağlayarak toplam sistem verimliliğini ciddi oranda artırmakta ve işletmelerin enerji giderlerini optimize etme noktasında etkili bir çözüm sunmaktadır.

4.4. 325 KWP ÇATI UYGULAMALI FOTOVOLTAİK GES YATIRIM FİZİBİLİTE ÇALIŞMASI

Günümüzde, artan enerji talebi ve fosil yakıtların çevresel etkileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini her geçen gün artırmaktadır. Bu bağlamda, fotovoltaik güneş enerjisi sistemleri, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu fizibilite çalışması, Düzce'deki tesisin çatısına kurulması planlanan, 325 kWp kurulu güce sahip fotovoltaik güneş enerjisi santraline yönelik yatırım hesaplamasını temel almaktadır.

Yapılan analizler, güneş enerjisi sistemlerinin, artan enerji maliyetleri ve çevresel kaygılar doğrultusunda alternatif bir enerji kaynağı olarak ne kadar elverişli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, fizibilite çalışması hem teknik uygulama hem de yatırım kararları açısından stratejik bir rehber sunmayı amaçlamaktadır.



Şekil 4. 10. Fabrika Google Earth görüntüsü.

Fabrika konum bilgileri;

- 40.787893° K
- 31.145048° D
- Yükseklik: 161 m

Şekil 4.11'deki yerleşim 500 W Multi Busbar (MBB) - Half Cut Güneş Paneli + 100/50 kW inverter için tasarlanmıştır.



Şekil 4. 11. Google Earth fabrika güneş paneli yerleşim görüntüsü.

Çizelge 4. 6. Güneş enerjisi sistemi temel teknik özellikleri.

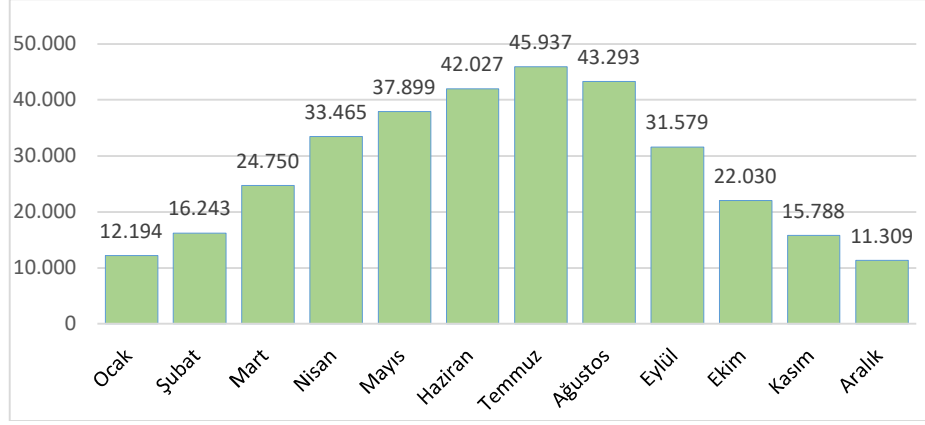
Panel Gücü	500 W Multi Busbar Half-cut
Panel Sayısı	650
İnvertor Gücü	100 kW/50 kW
İnvertor Sayısı	2-1 Adet
Kurulu Güç	325 kWp / 250 kWe
Çatı Tipi	Sandviç Panel

Çizelge 4. 7. Güneş enerjisi yıllık tahmini toplam üretim kWh.

Yıllık Tahmini Toplam Üretim kWh	
Ocak	12.194
Şubat	16.243
Mart	24.750
Nisan	33.465
Mayıs	37.899
Haziran	42.027
Temmuz	45.937
Ağustos	43.293
Eylül	31.579
Ekim	22.030
Kasım	15.788
Aralık	11.309
TOPLAM	336.515

Çizelge 4. 8. Fotovoltaik sistem yıllık üretim hesaplamalarında kullanılan temel parametreler.

Provided inputs:	
PV technology:	Crystalline silicon
PV installed [kWp]:	325
System loss [%]:	12
Slope angle [$^{\circ}$]:	6
Yearly PV energy production [kWh]:	336515
Yearly in-plane irradiation [kWh/m ²]:	1344,29
Angle of incidence [%]:	-3,75
Spectral effects [%]:	0,82
Temperature and low irradiance [%]:	-9,81
Total loss [%]:	-22,98



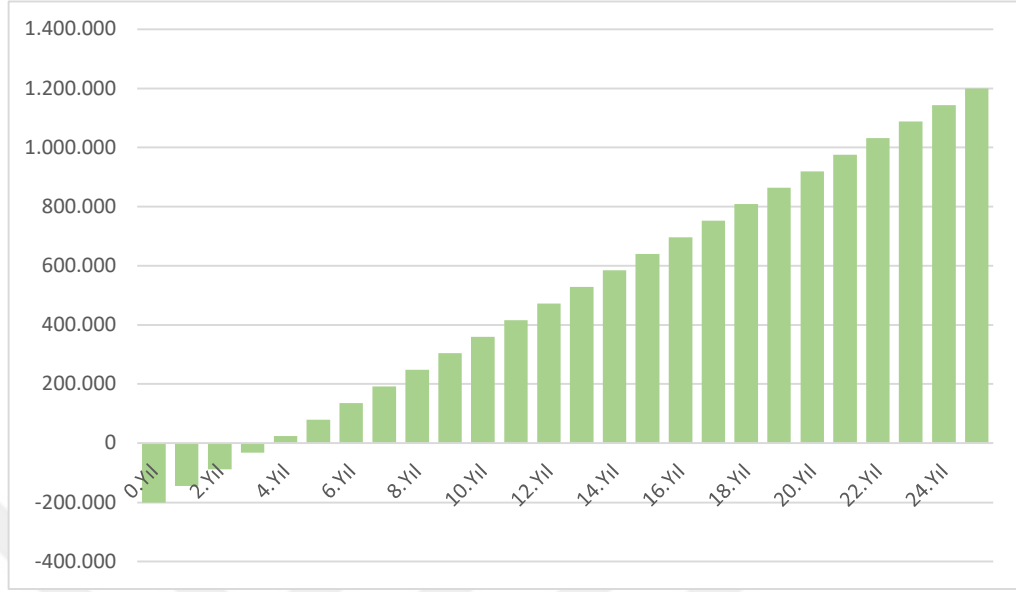
Şekil 4. 12. Yıllık Tahmini Toplam Üretim.

Şekil 4.12'ye göre, güneş enerjisi sistemi için 12 aylık dönem boyunca elde edilen simülasyon verileri incelendiğinde, sistemin beklenen toplam yıllık elektrik üretiminin 336.515 kWh olduğu belirlenmiştir. Bu analiz, sistemin aylık bazda üretim performanslarını kapsayan detaylı veriler üzerinden yapılmış olup, yıllık üretim kapasitesi açısından projenin enerji ihtiyacını karşılama potansiyelini ortaya koymaktadır. İncelenen bu veriler, güneş enerjisi sisteminin teknik fizibilitesini değerlendirmek ve yatırım kararını desteklemek açısından temel girdi niteliği taşımaktadır.

Çizelge 4. 9. Güneş enerjisi sistemi temel teknik ve ekonomik parametreleri.

Toplam Üretim Kapasitesi (kWh/ YIL)	336.515
Kurulu Güç (kW)	325
Yıllık Sistem Degradasyon	1%
Elektrik Birim Fiyat (\$)	0,102
Yatırım Bedeli (\$)	\$ 169.000

Çizelge 4.9'a göre, yatırım maliyeti 169.000 USD olarak belirlenmiştir. Elektrik birim bedeli ve dağıtım bedeli toplamı olarak 0,102 USD/kWh alınmış ve elektrik fiyatının her yıl %10 artış göstereceği varsayılmıştır. Kümülatif nakit akışı analizleri sonucunda, yatırımın yaklaşık 4 yıl 11 ayda amorti olacağı öngörülmektedir. Bu durum, enerji maliyetlerinde düşüş ve fazla enerjinin şebekeye satılması gibi stratejilerle desteklenebilir.



Şekil 4. 13. 2025 yılı için sistem kazanç grafiği-325 kWp.

Şekil 4.13, yatırımın finansal geri dönüş sürecini ve kümülatif nakit akışının nasıl geliştiğini yaklaşık olarak göstermektedir. Gerçek projede ilave maliyetler, teşvikler veya diğer finansal parametreler de göz önünde bulundurulabilir ve maliyetler teşvikler vasıtasıyla minimize edilebilir.

Bu çalışmada, güneş enerjisi sistemine ilişkin fizibilite analizleri, detaylı proje teklif dokümanları ve teknik raporlar temel alınarak gerçekleştirilmiştir. İncelemeler kapsamında sistem tasarımı, kurulum koşulları, üretim tahminleri ve performans analizleri gibi teknik kriterler değerlendirilmiş; yatırım maliyeti, geri ödeme süresi (ROI) ve Net Bugünkü Değer (NPV) gibi ekonomik göstergeler hesaplanmıştır. Analitik hesaplamalar ve görsel analizler, PVSyst yazılımı, Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) ve Google Earth gibi dijital araçlardan yararlanılarak yapılmıştır. Bu yöntemle, güneş enerjisi sisteminin teknik uygunluğu ile ekonomik fizibilitesi de kapsamlı bir biçimde ortaya konulmaktadır. Ekonomik analiz kapsamında yapılan varsayımlar doğrultusunda, güneş enerjisi sisteminin üretim verimliliğinde her yıl %1 oranında azalma olacağı öngörülmüştür. Bu durum, panel performansındaki doğal düşüşü ve çevresel etkenleri dikkate alarak sistemin uzun vadeli üretim kapasitesinin daha gerçekçi tahmin edilmesini sağlamaktadır. Elektrik birim fiyatı için ise ilk yıl 0,102 USD/kWh olarak belirlenmiş, bunu takiben her yıl için %10 oranında fiyat artışı varsayılmıştır. Bu varsayım, enerji piyasasındaki enflasyonist eğilimler ve artan maliyetler göz önüne alınarak yapılmıştır. Güneş enerjisi sistemi için öngörülen toplam

yatırım maliyeti 169.000 USD olarak hesaplanmıştır. Bu maliyet; panel, inverter, montaj, mühendislik ve işletmeye alma gibi tüm bileşenleri içermektedir. Söz konusu ekonomik veriler, geri ödeme süresi ve net bugünkü değer (NPV) gibi fizibilite göstergelerinin hesaplanmasında temel alınmıştır.

Amortisman: Bu örnek hesaplama göre yatırım, 5. yıl sonunda (yaklaşık 4 yıl 11 ay) kümülatif nakit akışının pozitif hale gelmesiyle geri ödenmeye başlamaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, kimya üretim tesisinin enerji tüketim yapısı, geleceğe yönelik tüketim tahminleri ve yenilenebilir enerji entegrasyonu açısından güneş enerjisi santrali fizibilitesi detaylı olarak incelenmiştir. Araştırmanın temel amacı, tesisin enerji verimliliğini artırmaya yönelik stratejileri belirlemek ve mevcut enerji yönetimi uygulamalarını değerlendirmektir. Yapılan analizler, tesisin elektrik ve doğalgaz tüketiminde reaktörlerin önemli bir paya sahip olduğunu, enerji tüketiminde zamanla artış eğilimi gözlemlendiğini ortaya koymuştur.

ARIMA modellemesi ile elde edilen tahmin sonuçları, gelecek dönemlerde enerji tüketiminin artacağına işaret ederek, mevcut maliyet yapısının uzun vadede sürdürülebilir olmayacağını göstermiştir. Bu bulgular, enerji maliyetlerinin düşürülmesi ve çevresel etkilerin azaltılması amacıyla yenilenebilir enerji yatırımlarının, özellikle 325 kWp kapasiteli fotovoltaik sistemlerin, ekonomik ve çevresel açıdan cazip bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır. Araştırmanın sonuçları doğrultusunda, tesisin enerji yönetimi stratejisinde reaktörlerin enerji verimliliğinin artırılması, proses optimizasyonu, ısı geri kazanım sistemlerinin entegrasyonu ve fotovoltaik sistem uygulamasının değerlendirilmesi önerilmektedir. Bu öneriler, hem enerji maliyetlerinde önemli azalmalar sağlayacak hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunacaktır. Gelecekte yapılacak duyarlılık analizleri ve farklı senaryoların değerlendirilmesi, model sonuçlarının güvenilirliğini artırarak, önerilerin daha kapsamlı uygulanmasına olanak tanıyacaktır. Güneş enerjisi santralleri (GES), fosil yakıtlara dayalı elektrik üretiminin yerine geçtiğinde doğrudan sera gazı emisyonlarını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlar. Türkiye'nin mevcut elektrik üretiminde fosil yakıtların payı %55'in üzerindedir ve şebeke temelli elektrik tüketiminde her 1 kWh enerji, ortalama 0,408 kg CO₂ emisyonuna yol açmaktadır (IEA, 2023; IPCC, 2021). Bu bağlamda, GES ile sağlanan her 1 kWh'lik elektrik üretimi, aynı miktarda karbon salımını önlemektedir. Bu bilgiye dayanarak, bu çalışmada analiz edilen sistemin yıllık üretim kapasitesi olan 336.515 kWh üzerinden yapılan hesaplamada, sistemin yılda yaklaşık 137,3 ton CO₂

salımını engellediği tespit edilmiştir. Bu emisyon azaltımı, çevresel etki açısından dikkate değerdir. Örneğin, ABD evre Koruma Ajansı (EPA) verilerine göre bir aracın yıllık ortalama karbon salımı yaklaşık 4,6 ton CO₂ düzeyindedir (EPA, 2022). Buna göre, sistemin sağladığı karbon azaltımı yaklaşık 30 aracın yıllık emisyonuna eşdeğerdir. Ayrıca, bir olgun ağacın yılda ortalama 25 kg CO₂ absorbe ettiği kabul edilirse, bu sistemin etkisi yaklaşık 5.492 ağacın yıllık karbon yutma kapasitesine denk gelmektedir (FAO, 2021).



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kimya üretim tesisinin enerji tüketim dinamikleri, zaman serisi tahminleri ve yenilenebilir enerji entegrasyonunun (özellikle 325 kWp kapasiteli çatıda uygulamalı fotovoltaik güneş enerjisi santrali) fizibilitesi kapsamlı olarak incelenmiştir. Elde edilen veriler ve yapılan analizler, tesisin enerji verimliliği, maliyet yapısı ve geleceğe yönelik enerji stratejileri konusunda önemli bulgular sunmaktadır. Güneş enerjisi santrali fizibilite çalışması kapsamında, sistemin teknik özellikleri ve üretim hesaplamaları (çizelge 4.6, çizelge 4.7, çizelge 4.8, çizelge 4.9 ve şekil 4.13) detaylı olarak değerlendirilmiştir. Kurulu gücü 325 kWp olan sistemin, yıllık yaklaşık 336.515 kWh elektrik üretmesi öngörülmektedir. Hesaplamalarda her yıl %1 oranında performans degradasyonu varsayılmış, böylece üretim verimliliğinde zamanla meydana gelecek azalma dikkate alınmıştır. Ayrıca, sistemin %12 oranında toplam sistem kaybına sahip olduğu kabul edilmiş; panel eğim açısı 6° olarak belirlenmiş ve kristal silikon panel teknolojisi kullanımı ile diğer teknik kayıplar da analiz kapsamında değerlendirilmiştir. Güneş enerjisi santrali kurulumu, tesisin artan elektrik tüketimi ihtiyacını karşılamak için önemli bir alternatif sunmaktadır. Tahmin edilen üretim değerleri, sistemin kurulması durumunda hem elektrik ihtiyacının önemli bir kısmının karşılanabileceğini hem de uzun vadede işletmeye ek gelir sağlayacak bir tasarruf potansiyelinin olduğunu göstermektedir. Ayrıca, mevcut şebeke tarifeleri ve olası devlet teşvikleri dikkate alındığında, yatırımın geri ödeme süresi ekonomik olarak cazip bulunmuştur. Elde edilen veriler, tesisin enerji tüketiminde reaktörlerin diğer ekipmanlara göre baskın bir paya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, enerji verimliliği iyileştirme çalışmalarında özellikle reaktörlerde izole, ısı geri kazanım ve proses optimizasyonu gibi önlemlerin uygulanmasının önemini göstermektedir. ARIMA modeli ile yapılan tahminler, gelecekteki enerji tüketiminde artış öngörmektedir. Modelin hata ölçütleri (RMSE, MAE, MAPE) üzerinden değerlendirildiğinde, tahminlerin istatistiksel olarak anlamlı olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, modelleme sürecinde karşılaşılan varyans problemi, tersinirlik uyarıları ve mevsimsellik etkilerinin bazı belirsizlikler içerdiği de tespit edilmiştir. Bu nedenle, ileriye dönük duyarlılık analizleri ve alternatif senaryoların değerlendirilmesi önerilmektedir.

Artan enerji talebi ve yükselen maliyetler göz önünde bulundurulduğunda, güneş enerjisi santrali kurulumu; enerji verimliliği, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik getiriler açısından önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Yapılan ekonomik hesaplamalar; panel üretim kapasitesi, sistem kayıpları, elektrik fiyat artışları ve yatırım maliyeti parametrelerini entegre ederek, yatırımın yaklaşık 4 yıl 11 ayda kendini amorti edeceğini göstermektedir. Bu durum, tesisin enerji maliyetlerinde önemli bir azalma sağlayarak, uzun vadede işletmeye ek ekonomik fayda sunacaktır. Analizlerde kullanılan varsayımlar — örneğin üretim verimliliğindeki degradasyon oranı, elektrik fiyatlarındaki artış ve döviz kuru gibi ekonomik parametreler — belirli ölçüde belirsizlik içermektedir. Bu nedenle, sistem performansının ve yatırım geri dönüşlerinin daha sağlıklı değerlendirilebilmesi için duyarlılık analizlerinin yapılması gerekmektedir. Ayrıca, elektrik fiyatlarında farklı artış oranları veya sistem verimliliğinde yaşanabilecek farklı düşüş oranları gibi çeşitli senaryolarla hesaplamalar yeniden gözden geçirilmeli; buna ek olarak, tesisin mevcut enerji yönetimi stratejileri ve yenilenebilir enerji entegrasyonu kapsamında detaylı bir risk analizi gerçekleştirilmelidir. Sonuç olarak, çalışma; enerji tüketimi analizleri, ARIMA modellemesi ile yapılan tüketim tahminleri ve güneş enerjisi santrali fizibilite analizleri doğrultusunda, tesisin enerji yönetiminde verimliliğin artırılabilirliğini ve yenilenebilir enerji yatırımlarının hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli faydalar sağlayacağını ortaya koymaktadır. Bu bulgular, benzer enerji yoğun üretim tesislerinde uygulanabilecek stratejilerin geliştirilmesine yönelik rehber sunarken, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik konularında literatüre de katkı sağlamaktadır. Alternatif enerji ve verimlilik uygulamaları kapsamında yalnızca güneş enerjisi yatırımı değil, aynı zamanda enerji tüketimini azaltacak tamamlayıcı verimlilik projeleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle yalıtım iyileştirmeleri, proses optimizasyonları ve atık ısı geri kazanımı gibi uygulamalar, enerji talebini düşürerek güneş enerjisi yatırımının geri ödeme süresini kısaltabilir. Ayrıca, işletmenin doğalgaz tüketiminde gözlemlenen artış dikkate alındığında, ısıtma ve soğutma süreçlerinde enerji verimliliğini artırmaya yönelik çözümler geliştirilmelidir. Bu bağlamda, kojenerasyon ve trijenerasyon sistemleri gibi entegre enerji çözümleri de değerlendirilerek hem elektrik hem de ısısının eşzamanlı üretimiyle sistemin genel verimliliği artırılabilir. Yapılan SARIMA tahmin analizleri, 2025–2029 döneminde hem elektrik hem de doğalgaz tüketiminde belirgin bir artış yaşanacağını ortaya koymuştur. Bu durum, işletmenin ilerleyen yıllarda daha yüksek enerji maliyetleriyle karşılaşabileceğini göstermektedir. Güneş enerjisi yatırımı, elektrik tüketiminin önemli bir kısmını karşılayarak maliyetleri

azaltma ve karbon emisyonlarını düşürme potansiyeli taşımaktadır. Ancak sürdürülebilir enerji yönetimi yaklaşımı doğrultusunda, yalnızca elektrik değil, doğalgaz tüketiminin de optimizasyonu hedeflenmeli; bu kapsamda enerji verimliliği ve entegre ısı yönetimi çözümleri bütüncül olarak ele alınmalıdır. Bu stratejik yaklaşım hem ekonomik hem de çevresel açıdan işletmenin uzun vadeli enerji sürdürülebilirliğine önemli katkılar sağlayacaktır.



6. KAYNAKLAR

- ABD Enerji Bilgi İdaresi (EIA). "Manufacturing Energy Consumption Survey (MECS)" Raporu.
- Abdoli, S., Kara, S., & Kornfeld, B. (2017). Application of dynamic value stream mapping in warehousing context. *Modern Applied Science*, 11(1), 1913-1852.
- Abosedra, S., Dah, A., & Ghosh, S. (2011). Demand for electricity in Lebanon. *Energy*, 36(5), 2765–2772.
- Akkurt, F., & Taşdemir, B. (2021). Muhtelif altyapı ürünleri üreten bir döküm fabrikasının enerji etüdü. *Ekev Akademi Dergisi*, 11(1), 512–525.
- Al-Musaylh, M. S., Deo, R., Adamowski, J., & Li, Y. (2018). Short-term electricity demand forecasting with MARS, SVR and ARIMA models using aggregated demand data in Queensland, Australia.
- Al-Rabbaie, A., Jaradat, M., Khosravi, A., & Nahavandi, S. (2020). A review on deep learning models for forecasting electricity consumption. *Energies*, 13(3), 488.
- Aydemir, E., Karaatlı, M., Yılmaz, G., & Aksoy, S. (2014). 112 Acil Çağrı Merkezine gelen çağrı sayılarını belirleyebilmek için bir yapay sinir ağları tahminleme modeli geliştirilmesi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, *Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 20(5), 145–149.
- Box, G. E. P., & Jenkins, G. M. (1976). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden-Day.
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control (5th ed.)*. Wiley.
- Busert, T., & Fay, A. (2019). Extended value stream mapping method: Harmonizing information flows for the control of production processes. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 54-59.
- Chandar, K. S. (2024). Forecasting electricity consumption: A comparative analysis of

ARIMA and artificial neural network. In 2024 3rd International *Conference on Automation, Computing and Renewable Systems (ICACRS)* (pp. 1–6). IEEE.

Dickey, D. A., & Fuller, W. A. (1979). Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American Statistical Association*, 74(366), 427-431.

Dünya Bankası. (2024). World Development Indicators (WDI): GDP deflator (base year varies by country).

EİE (2011). Enerji Etütleri Uygulama Rehberi. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, Ankara.

Ener, S., Topçu, M. A., Karanfil Celep, G., Çeltek, S. A., & Rüsen, A. (2018). Üniversite kampüs binaları için enerji etüdü: Örnek çalışma. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(2), 83–92.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu [EPDK]. (2022). Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2023). Türkiye Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı İzleme Raporu.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2021). Türkiye Enerji İstatistikleri Raporu.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı [ETKB]. (2022). Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve mevzuat.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022). Türkiye Enerji İstatistikleri Raporu.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). Birincil ve Nihai Enerji Yoğunluğu Raporu.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). Enerji verimliliği ölçme ve değerlendirme. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). Türkiye'nin enerji verimliliği ve enerji yoğunluğu raporu.

- EPA (2022). Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle. United States Environmental Protection Agency.
- FAO (2021). State of the World's Forests 2021. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2020). Food Processing Energy Use.
- Gujarati, D. N. (2011). Econometrics by Example. Palgrave Macmillan.
- Gürkan, H., & Kaya, A. (2018). Sanayi işletmelerinde enerji verimliliği uygulamaları. *Enerji Dergisi*, 23(2), 45-60.
- Helleno, A. L., Pimentel, C. A., Ferro, R., Santos, P. F., Oliveira, M. C., & Simon, A. T. (2015). Integrating value stream mapping and discrete events simulation as decision making tools in operation management. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80, 1059-1066.
- Hirth, L., Ueckerdt, F., & Edenhofer, O. (2015). Integration costs revisited – An economic framework for wind and solar variability. *Renewable Energy*, 74, 925–939.
- Huang, Z., Kim, J., Sadri, A., Dowey, S., & Dargusch, M. S. (2019). Industry 4.0: Development of a multi-agent system for dynamic value stream mapping in SMEs. *Journal of Manufacturing Systems*, 52, 1-12.
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and Practice* (2nd ed.).
- IEA (2023). Electricity Market Report 2023. International Energy Agency.
- IEA (2023). Energy Efficiency 2023: Analysis and Outlooks. International Energy Agency.
- IEA (2023). World Energy Outlook 2023. International Energy Agency.
- Ilic, I., Görgülü, B., & Cevik, M. (2020). Augmented out-of-sample comparison method for time series forecasting techniques. In *Canadian Conference on Artificial Intelligence* (pp. 272–278). Springer.

- International Energy Agency (IEA). (2020). Energy Efficiency Report.
- International Energy Agency (IEA). (2021). World Energy Outlook 2021.
- International Energy Agency (IEA). (2022). Energy Efficiency Indicators: Highlights.
- International Energy Agency (IEA). (2023). World Energy Balances: Final Energy Intensity Data.
- International Energy Agency [IEA]. (2020). Renewables 2020: Analysis and forecast to 2025.
- International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA). (2020). World Motor Vehicle Production.
- IPCC (2021). Sixth Assessment Report, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Sixth Assessment Report.
- Jasti, N. V. K., & Kodali, R. (2015). Lean production: literature review and trends. *International Journal of Production Research*, 53(3), 867-885.
- Makridakis, S., Wheelwright, S. C., & Hyndman, R. J. (1998). *Forecasting: Methods and Applications* (3rd ed.). Wiley.
- Odyssee-Mure (2021). Energy Efficiency Indicators in Europe.
- OECD. (2024). National Accounts at a Glance: GDP deflator, base year 2015.
- OECD. (2024). Understanding National Accounts: GDP deflators.
- Reşat, H. G. (2020). Sürdürülebilir enerji yönetimi için yapay sinir ağları ve ARIMA metotları kullanılarak melez tahmin modelinin tasarlanması ve geliştirilmesi: Tütün endüstrisinde vaka çalışması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(3), 1129–1140.

- Serrano, A. L. M., Rodrigues, G. A. P., Martins, P. H. dos S., Saiki, G. M., Filho, G. P. R., Gonçalves, V. P., & Albuquerque, R. de O. (2024). *Statistical comparison of time series models for forecasting Brazilian monthly energy demand using economic, industrial, and climatic exogenous variables*. *Applied Sciences*, 14(2), 1–20.
- Smil, V. (2017). *Energy and Civilization: A History*. MIT Press.
- Suganthi, L., & Samuel, A. A. (2012). Energy models for demand forecasting—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1223-1240.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021). Sektörlere göre nihai enerji tüketimi. Çevresel Göstergeler.
- Taner, T. (2017). A lime production of the fluidized bed boiler's energy and exergy analyse. *Journal of Thermal Engineering*, 3(3), 1271-1274.
- Tunçkaya, Y. (2020). Bir termik enerji santralinde ana buhar sıcaklığı parametresinin YSA ve ARIMA yöntemleriyle modellenmesi ve kestirim performanslarının araştırılması. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, (Sayı belirtilmemiş), 237–249.
- TÜİK. (2024, Nisan 30). Sanayi sektörü nihai enerji tüketim istatistikleri, 2023 (Yayın No: 53806). Türkiye İstatistik Kurumu.
- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2019). *International Energy Outlook 2019*.
- Uluslararası Enerji Ajansı (IEA). *World Energy Balances*.
- Uluslararası Enerji Ajansı. (2023). *World energy outlook*
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2015). *Paris Agreement*.
- Uzun, A., & Değirmen, M. (2018). Endüstriyel işletmelerde enerji verimliliği ve enerji yönetimi. *Uluslararası Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 4(2), 83-97.
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance.

Climate Research, 30(1), 79-82.

World Steel Association (WSA). (2021). *Steel Statistical Yearbook*.

Yılmaz, M., & Kaya, M. (2019). Güneş enerjisi sistemlerinin sanayi tesislerindeki uygulanabilirliği: Ekonomik ve çevresel analiz. *Yenilenebilir Enerji Araştırmaları Dergisi*, 6(2), 89–104.

Çomaklı, K., & Yüksel, B. (2006). *Türkiye'nin enerji görünümü ve enerji politikaları. Tesisat Mühendisliği Dergisi*, (93), 38-48.

Özsan, İ. B. (2024). Bir süt işleme tesisinin enerji etüdü [Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi]. ProQuest Dissertations & Theses Global. (Yayın No. 31577596).

Ürgev, H. (2020). Organize Sanayi Bölgelerinde Enerji Yoğunluğunun Azaltılmasına Yönelik Uygulamalar. *Enerji Politikaları ve Yönetimi Dergisi*, 3(1), 1-12.

Şahin, U., Yıldız, A., & Korkmaz, F. (2021). Türkiye’de yenilenebilir enerji yatırımlarının sürdürülebilirlik performansı üzerine etkisi. *Sürdürülebilir Enerji ve Çevre Dergisi*, 9(1), 14-27.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Bera Osman KAYA

Yabancı Dili :İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2025
Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2022
Lise	Anadolu Lisesi	Arsal Anadolu Lisesi-Düzce	2018

TEZDEN ÇIKAN YAYIN

Kaya, B. O., & Düzdar, İ. (2025). Energy intensity in the chemical industry: Comparison with factory applications and a sustainability perspective. In Proceedings of the *UBAK 2025 – International Congress on Scientific Research* (pp. 660–668). Düzce University. ISBN 979-8-89695-034-9.