



**Trakya Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi**

Cilt: 26 Sayı: 1 Haziran 2025

**TRAKYA
UNIVERSITY
JOURNAL OF
ENGINEERING
SCIENCES**

Volume: 26 Number: 1 June 2025

Trakya Univ J Eng Sci

<http://dergipark.gov.tr/tujes>
tujes@trakya.edu.tr

ISSN 2147-0308

Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Cilt: 26

Sayı: 1

Haziran

2025

Trakya University Journal of Engineering Sciences

Volume: 26

Number: 1

June

2025

Trakya Univ J Eng Sci

<http://dergipark.org.tr/tujes>
tujes@trakya.edu.tr

ISSN 2147-0308

Dergi Sahibi / Owner

Trakya Üniversitesi Rektörlüğü, Fen Bilimleri Enstitüsü Adına
On behalf of Trakya University Rectorship, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Doç. Dr. Filiz UMAROĞULLARI

Yayın Kurulu Üyeleri / Editorial Board Members

Baş Editör / Editor-in-Chief

Doç. Dr. Önder AYER Makine Mühendisliği Trakya Üniversitesi

Alan Editörleri / Co-Editors

Prof. Dr. Hacı Ali GÜLEÇ	Gıda Mühendisliği	Trakya Üniversitesi
Prof. Dr. Esmâ MIHLAYANLAR	Mimarlık	Trakya Üniversitesi
Prof. Dr. Gökhan KAÇAR	Genetik ve Biyomühendislik	Trakya Üniversitesi
Doç. Dr. Hasan Faik KARA	Mimarlık	Trakya Üniversitesi
Doç. Dr. Gürkan İRSEL	Makine Mühendisliği	Trakya Üniversitesi
Doç. Dr. Sezer ULUKAYA	Elektrik-Elektronik Müh.	Trakya Üniversitesi
Doç. Dr. Altan MESUT	Bilgisayar Mühendisliği	Trakya Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Selin ARABULAN	Mimarlık	Trakya Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Emir ÖZTÜRK	Bilgisayar Mühendisliği	Trakya Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KOÇYİĞİT	Elektrik-Elektronik Müh.	Trakya Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Pınar Aydan DEMİRHAN	Makine Mühendisliği	Trakya Üniversitesi

Dil Editörü / Language Editor

Doç. Dr. Aşlı ARABOĞLU Mütercim Tercümanlık Trakya Üniversitesi

Danışma Kurulu / Editorial Advisory Board

Prof. Dr. Hüseyin Erol AKATA	Makine Mühendisliği	İstanbul Aydın Üniversitesi
Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU	Makine Mühendisliği	Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Naci GENÇ	Elektrik-Elektronik Müh.	Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Prof. Dr. Özer GÖKTEPE	Tekstil Mühendisliği	Namık Kemal Üniversitesi
Prof. Dr. Türkan GÖKSAL ÖZBALTA	İnşaat Mühendisliği	Ege Üniversitesi
Prof. Dr. M. Bahattin TANYOLAÇ	Biyo-mühendislik	Ege Üniversitesi
Prof. Dr. Pelin ONSEKİZOĞLU BAĞCI	Gıda Mühendisliği	Trakya Üniversitesi
Prof. Dr. İsa CAVİDOĞLU	Gıda Mühendisliği	Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Prof. Dr. Yılmaz KALKAN	Elektrik-Elektronik Müh.	Adnan Menderes Üniversitesi
Prof. Dr. Orhan ARKOÇ	Jeoloji Mühendisliği	Kırklareli Üniversitesi
Prof. Dr. Sedat BİNGÖL	Makine Mühendisliği	Dicle Üniversitesi
Prof. Dr. Timur KAPROL	Mimarlık	Kırklareli Üniversitesi
Doç. Dr. Cemil ÖZYAZGAN	İnşaat Mühendisliği	Kırklareli Üniversitesi
Doç. Dr. Ümit HÜNER	Makine Mühendisliği	Kırklareli Üniversitesi
Doç. Dr. Hamza F. CARLAK	Elektrik-Elektronik Müh.	Akdeniz Üniversitesi
Doç. Dr. Aşlı Günay BULUTSUZ	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Mustafa ERGEN	Peyzaj Mimarlığı	Sakarya Uygulamalı Bil. Ün.
Assoc. Prof. Dr. Jiri SOBOTKA	Mechanical Engineering	Technical University of Liberec
Assoc. Prof. Dr. Regita BENDIKIENE	Mechanical Engineering	Kaunas University of Technology
Assist. Prof. Dr. Tomasz JACHOWICZ	Polymer Processing	Lublin University of Technology
Assist. Prof. Dr. Mirosław SZALA	Mechanical Engineering	Lublin University of Technology
Assist. Prof. Dr. Balazs BOKOR	Mechanical Engineering	Budapest Univ. of Tech. Econ.
Assist. Prof. Dr. Eldhose IYPE	Chemical Engineering	BITS Pilani

Dizgi / Design

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KOÇYİĞİT

İletişim Bilgisi / Contact Information

Address : Trakya Üniversitesi, Enstitüler Binası, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balkan Yerleşkesi, 22030, Edirne / TÜRKİYE
Web site : <http://dergipark.org.tr/tujes> E-mail : tujes@trakya.edu.tr
Tel : +90 284 2358230 Fax : +90 284 2358237

Baskı / Publisher

Trakya Üniversitesi Matbaa Tesisleri / Trakya University Publishing Centre

İçindekiler / Contents

Araştırma Makaleleri / Research Articles

Marmara Bölgesinde Elleçlenen Yüklerin Analizi ve Tahmin Edilmesi

Analysis and Forecasting of Cargo Handling in the Marmara Region

Elvan DENİZ..... 1-15

Fotovoltaik Sistemlerde Verimi Etkileyen Parametrelerin DeneySEL Olarak İncelenmesi

Experimental Investigation of Parameters Affecting Efficiency in Photovoltaic Systems

Hacer AKHAN, Enes İsmet EZİK ve Sefa EMİRALİ..... 17-32

Time Series Analysis and Forecasting of Turkey's Exports and Imports

Türkiye'nin İhracat ve İthalat Değerlerinin Zaman Serisi Analizi ve Tahmini

Elvan DENİZ..... 33-43

Fotovoltaik Panellerin Eğim Açısının ve Malzeme Çeşidinin Sistem Performansı Üzerine Etkisi

The Effect of Slope and Material Type of Photovoltaic Panels on System Performance

Hacer AKHAN, Emir EMİRALİOĞLU, Enis EŞER, Ulaş Kıvanç SEÇGİN, Kaan Berkay KARABIYIK ve Kani Başar YENİCİ 45-59

Marmara Bölgesinde Elleçlenen Yüklerin Analizi ve Tahmin Edilmesi

Elvan DENİZ^{1*} 

¹Çanakkale Onsekiz Mart University, Çan Higher Vocational School, Çanakkale, TÜRKİYE

Makale Künye Bilgisi: Deniz, E. (2025). Marmara Bölgesinde Elleçlenen Yüklerin Analizi ve Tahmin Edilmesi, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 26(1), 1-15.

Öne Çıkanlar	
➤ Elleçlenen yük miktarlarında 2012–2024 döneminde genel bir artış eğilimi gözlemlenmiş, bu artışın 2025–2029 döneminde de devam edeceği tahmin edilmiştir. ➤ Artan yük hacmine karşılık limanların kapasite artırımı, veri temelli lojistik planlama ve zamanında stratejik yatırımların yapılması gerektiği ifade edilmiştir. ➤ Uzun vadeli (parabolik) ve kısa vadeli (üstel düzeltme) modellerin birlikte kullanılması, karar vericilere dengeli ve esnek senaryolar sunma açısından önerilmiştir.	
Makale Bilgileri	Öz
Makale Tarihçesi: Geliş: 15 Mayıs 2025 Kabul: 29 Mayıs 2025	Liman lojistiği, deniz taşımacılığının kritik bir parçası olup, yüklerin limana girişinden çıkışına kadar olan tüm faaliyetleri kapsamaktadır. Uluslararası ticarete önemli merkezler olarak hizmet veren Marmara Bölgesi limanları, coğrafi konumları ve güçlü sanayi hinterlandı nedeniyle stratejik bir öneme sahiptir. Bu çalışma, resmi istatistiklere dayanarak 2012–2024 yılları arasında Marmara limanlarında elleçlenen yıllık yük miktarlarını (ton cinsinden) analiz etmektedir. Geçmiş verileri değerlendirmek ve 2025–2029 dönemi için tahminler üretmek amacıyla zaman serisi yöntemleri olan trend analizi, hareketli ortalama ve üstel düzeltme teknikleri Minitab 17 yazılımı uygulanmıştır. En uygun tahmin modelleri istatistiksel değerlendirme ile belirlenmiştir. Sonuçlar, yük hacimlerinde istikrarlı bir artış olduğunu göstermekte olup, bölgedeki liman altyapısının genişletilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu bulgular, Marmara Bölgesi'nde deniz lojistiğinin geleceğine yönelik lojistik planlama, altyapı geliştirme ve stratejik yatırım alanlarında görev alan politika yapıcılar ile paydaşlar için değerli bilgiler sunmakta; veriye dayalı karar alma süreçlerinin teşvik edilmesine katkı sağlamaktadır.
Anahtar Kelimeler: Zaman Serisi Analizi; Liman Lojistiği; Marmara Bölgesi Kapasite Artırımı; Talep Tahminleme.	

Analysis and Forecasting of Cargo Handling in the Marmara Region

Article Info	Abstract
Article History: Received: May 15, 2025 Accepted: May 29, 2025	Port logistics is a crucial part of maritime transportation, covering all activities from cargo entry to departure. Serving as major hubs in international trade, ports in the Marmara Region hold strategic importance due to their location and strong industrial hinterland. This study analyzes annual cargo handling volumes (in tons) at Marmara ports from 2012 to 2024 based on official statistics. Time series methods, including trend analysis, moving averages, and exponential smoothing, were applied Minitab 17 software to evaluate historical data and generate forecasts for the 2025–2029 period. The most suitable forecasting models were identified through statistical evaluation. The results indicate a consistent upward trend in cargo volumes, highlighting the need to expand port infrastructure in the region. These findings provide valuable input for policymakers and stakeholders in logistics planning, infrastructure development, and strategic investment, promoting data driven decision-making for the future of maritime logistics in the Marmara Region.
Keywords: Time Series Analysis; Port Logistics; Marmara Region; Capacity Expansion; Demand Forecasting.	

1. Giriş

1980’li yıllarda etkisini göstermeye başlayan küreselleşme süreci, 1990’lı yıllarda hız kazanarak dünya ekonomileri arasındaki karşılıklı etkileşimi önemli ölçüde artırmıştır. Üretim ve tüketim zincirlerinin uluslararası ölçekte yeniden yapılandırılması, denizyolu taşımacılığı ve dolayısıyla liman faaliyetlerinin stratejik önemini daha da artırmıştır. Artan ticaret hacmi, ülkeler arası mal akışının daha verimli ve hızlı şekilde yönetilmesini zorunlu kılarken, limanlar yalnızca birer yük aktarma merkezi değil, aynı zamanda ekonomik büyümenin temel dinamiklerinden biri haline gelmiştir (Rodrik, 2006; Krugman ve Obstfeld, 2009).

Bu bağlamda Türkiye, üç tarafının denizlerle çevrili olması ve Asya ile Avrupa kıtaları arasında doğal bir köprü görevi görmesi nedeniyle küresel denizyolu taşımacılığı açısından stratejik bir lojistik merkez olarak değerlendirilmektedir (UNCTAD, 2023). Bu stratejik konum, Türkiye’nin liman altyapısını dış ticaretin en kritik bileşenlerinden biri hâline getirmiştir. Nitekim Türkiye’nin toplam dış ticaretinin yaklaşık %88’inin denizyolu ile gerçekleştirildiği bildirilmektedir (UTİKAD, 2024).

Marmara Bölgesi, sanayi üretimi, hinterland kapasitesi ve mevcut liman altyapısıyla Türkiye’nin dış ticaretinde belirleyici bir role sahiptir. İstanbul, Kocaeli, Tekirdağ ve Yalova gibi illerde yer alan büyük ölçekli limanlar sayesinde Marmara Bölgesi, hem ulusal hem de uluslararası denizyolu taşımacılığı açısından yüksek yoğunlukta yük hareketliliğine sahne olmaktadır (Ekici ve Kabak, 2022). Bölgede ayrıca Bursa iline bağlı Gemlik ve Mudanya limanları, sanayi üretimiyle entegre yapıları ve çevresindeki organize sanayi bölgeleri ile dikkat çekmektedir. Özellikle Gemlik Limanı’nın, yakın çevresinde konumlanan Gemlik Serbest Bölgesi ile birlikte çalışması, dış ticaret işlemlerinin hızlı ve verimli bir biçimde yürütülmesini sağlamaktadır. Bu çerçevede Marmara’daki limanlar,

yalnızca fiziksel mal taşımacılığının değil; aynı zamanda sanayi üretimi, ihracat-ithalat dinamikleri ve lojistik etkinliğin de doğrudan göstergesidir (Grossman ve Helpman, 1991).

Son yıllarda küresel ticaret hacmindeki büyüme, özellikle Marmara gibi yüksek kapasiteli bölgelerde limanlara yönelik yatırım planlaması, altyapı geliştirme ve lojistik entegrasyon stratejilerinin daha veriye dayalı şekilde yürütülmesini gerektirmektedir (Acar ve Aydın, 2021). Bu doğrultuda, limanlarda elleçlenen yük miktarlarının düzenli analiz edilmesi ve gelecek yıllara ilişkin tahminlerin yapılması, karar vericilere stratejik bir perspektif sunmaktadır.

Bu çalışmada, Marmara Bölgesi limanlarında 2012–2024 yılları arasında elleçlenen yük miktarları kullanılarak, 2025–2029 dönemine yönelik tahminler oluşturulmuştur. Bu amaçla zaman serisi analiz yöntemlerinden trend analizi, hareketli ortalama ve üstel düzeltme (exponential smoothing) gibi yöntemler de uygulanmış; farklı modellerin tahmin performansları karşılaştırılmıştır. Trend analizi, zaman içerisindeki genel yönü belirlemeye yardımcı olurken; üstel düzeltme yöntemi, yakın dönem verilerine daha fazla ağırlık vererek kısa vadeli tahminlerde esneklik sağlamaktadır. Hareketli ortalama yöntemi ise serideki rastgele dalgalanmaların etkisini azaltarak genel eğilimi daha belirgin şekilde ortaya koymaktadır.

Tüm analizler Minitab 17 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, Marmara Bölgesi’nin dış ticaretteki yük trafiğine dair mevcut eğilimi ortaya koymakta ve bu eğilim doğrultusunda altyapı planlaması ve liman stratejilerinin şekillendirilmesine katkı sağlamaktadır.

1.1. Talep Tahminin Önemi

Limanlarda gelecek dönemlerde elleçlenecek yük miktarını tahmin etmek, stratejik ve operasyonel planlama açısından kritik bir ihtiyaçtır. Doğru tahminler sayesinde limanlar, ileride oluşacak yük

talebini karşılayacak kapasiteyi önceden planlayabilir ve böylece ne aşırı kapasiteyle atıl kalma ne de yetersiz kapasiteyle tıkanıklık yaşama durumuna düşer. Liman altyapısı ve ekipman yatırımları yüksek maliyetli ve uzun vadeli olduğundan, kapasite arzının gelecekteki talebe uygun şekilde tasarlanması gerekir. (Jugović, A., Hess, S., ve Poletan Jugović, T.) Aksi halde talep ve arz uyumsuzluğu ciddi sonuçlar doğurur: Tahmini olduğundan fazla kapasite planlanırsa kaynaklar atıl kalır, düşük kapasite planlanırsa yoğun talep karşılanamaz. Ayrıca tahminler, liman işletmesinin günlük operasyonlarını ve kaynak dağılımını planlamasında da rehberlik eder. Kısacası, liman talep tahmini, limanların hem stratejik (uzun vadeli kapasite ve yatırım) hem de taktik/operasyonel (kısa vadeli işletme planları) düzeyde sağlıklı kararlar alabilmelerinin temelini oluşturur. (Jugović, A., Hess, S., ve Poletan Jugović, T. (2011).)

1.2. Literatür Taraması

Türkiye'nin dış ticaretinde önemli bir rol üstlenen Marmara Bölgesi limanları üzerine yapılan akademik çalışmalar, hem elleçleme faaliyetlerinin analizi hem de geleceğe dönük tahmin modelleri açısından oldukça çeşitlenmiştir. Bu çalışmalar zamanla klasik ekonometrik modellerden yapay zekâ tabanlı yöntemlere doğru evrilmiştir.

Akten ve Koldemir (2011), Marmara Bölgesi limanlarının yük türlerine göre karakteristik yapılarını incelemiş ve özellikle İstanbul ile Kocaeli limanlarının konteyner taşımacılığında ön plana çıktığını belirtmiştir.

Oral ve arkadaşları (2012), Marmara Bölgesi limanlarında ekonometrik modellerin tahmin performansını incelemiş; çoklu regresyon analizlerinin kısa vadeli öngörülerde etkili olduğunu belirtmiştir. Esmer ve Karataş Çetin (2013), İstanbul ve İzmit limanlarında elleçlenen konteyner yükleri için ARIMA

modeli uygulamış ve yüksek tahmin doğruluğu elde etmiştir.

Nas (2014), İzmit Körfezi'ndeki limanlarda tehlikeli madde elleçleme süreçlerini analiz etmiş ve bu bölgenin kimyasal ve petrol ürünleri taşımacılığındaki stratejik rolüne dikkat çekmiştir.

Zorlu ve Kuleyin (2016), bölgedeki liman altyapı yatırımlarının yük akışı üzerindeki etkisini analiz ederek, özellikle derin su limanlarının büyük tonajlı gemiler açısından önem kazandığını ifade etmiştir. Kara ve Deniz (2016), İstanbul'daki üç büyük limanı (Haydarpaşa, Ambarlı, Zeytinburnu) karşılaştırmalı olarak incelemiş ve şehir içi liman yapılarının dönüşümünü analiz etmiştir.

Çancı ve Önce (2016), ARIMA ve Yapay Sinir Ağı (YSA) modellerini birleştirerek Marmara limanlarında hibrit tahmin modellemesi yapmış ve klasik modellere kıyasla daha başarılı sonuçlar elde etmiştir. Kuzu ve Önder (2017) ise, tarımsal ürünlerin elleçlenmesindeki mevsimsel desenleri analiz etmiş ve bu desenlerin liman planlamasında dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir.

Öztürk ve Çetin (2017), Tekirdağ ve Çanakkale limanlarında elleçlenen tarım ürünlerini incelemiş ve güney Marmara'nın tarım ihracatında artan rolüne işaret etmiştir. Şener ve Başer (2018), İzmit Körfezi'nde petrokimya tesislerine hizmet veren limanların sıvı yük kapasitelerini analiz etmiştir.

Akar ve Esmer (2017), döviz kuru dalgalanmalarının Marmara limanlarında özellikle konteyner bazlı yüklerde belirgin etkiler yarattığını göstermiştir. Aydın ve Ünlüyurt (2019), Tekirdağ limanlarında derin öğrenme modelleri ile dökme yük tahmini yapmış ve geleneksel modellere göre üstün performans elde etmiştir.

Saatçioğlu ve Karaca (2019), Marmara limanlarının kara ve demiryolu bağlantılarını analiz ederek

multimodal taşımacılığın yük akışına etkisini tartışmıştır. Keleş ve Koldemir (2020), İstanbul ve Kocaeli limanlarında YSA modelleri ile konteyner tahminleri üretmiş ve başarılı sonuçlara ulaşmıştır.

Özdemir ve Çetin (2020), Çanakkale Boğazı'ndan geçen yük gemilerinin Marmara limanlarına yönelmesini analiz etmiş ve trafik yoğunluklarının dönemsel olarak değiştiğini vurgulamıştır. Ergin ve Eker (2022), gri sistem teorisi ve bulanık mantığı birleştirerek İzmit Körfezi limanlarında tehlikeli madde yükleri için belirsizlik altı tahmin modelleri geliştirmiştir.

Kırılmaz ve Erol (2021), COVID-19 pandemisinin liman elleçleme faaliyetleri üzerindeki etkilerini analiz etmiş ve tedarik zincirindeki aksaklıkların Marmara limanlarına olan yansımalarını ortaya koymuştur. Kıyak ve Tümen (2022), büyük veri analitiği kullanarak yük hareketlerini gerçek zamanlı izleyebilen modeller geliştirmiştir.

Marmara Bölgesi limanlarının artan yük hacmi dikkate alındığında, klasik zaman serisi analizlerinin yanı sıra simülasyon temelli yaklaşımların da planlama süreçlerine entegre edilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, Tuncel, Yalçinkaya, Deniz ve Esmer. (2024) tarafından önerilen simülasyon çerçevesi, limanlardaki farklı vinç döngüleme stratejilerinin etkinliğini kıyaslayarak, karar vericilere operasyonel düzeyde destek sunmaktadır.

Yeşilbayrak ve Ertem (2023), dijital ikiz ve simülasyon teknolojileriyle Marmara limanlarındaki operasyonları modellemiş ve tahmin doğruluğunu artıran senaryolar üretmiştir.

Tuncel ve Deniz (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Ambarlı Limanı'nda yürütülen bir vaka analizi kapsamında, liman operasyonlarının operasyonel etkinliğini artırmaya yönelik bir simülasyon tabanlı karar destek yaklaşımı geliştirilmiştir. Çalışmada, gemi bekleme sürelerinin

azaltılması ve konteyner elleçleme maliyetlerinin düşürülmesi temel hedef olarak belirlenmiş; bu doğrultuda, süreç optimizasyonu için Tepki Yüzeyi Yöntemi (Response Surface Methodology, RSM) uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, RSM temelli modelin liman operasyonlarında performans iyileştirmesi sağladığını ve karar vericiler için etkili bir optimizasyon aracı sunduğunu ortaya koymaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Metot

Tahmin süreci, geçmiş ve güncel verilere dayanarak gelecekte ortaya çıkabilecek durumların veya değişkenlerin muhtemel sonuçlarını öngörmeye yönelik sistematik bir yaklaşımdır. İstatistiksel açıdan tahmin, doğrudan gözlemlenemeyen bir parametrenin değerinin, geçmiş verilerden türetilen örneklem bilgileri aracılığıyla hesaplanması sürecini ifade eder. Bu yöntemler sayesinde karar vericiler, belirsizlik ortamlarında daha etkili stratejik planlamalar yapabilmekte ve riskleri minimize etme fırsatı yakalayabilmektedir (Makridakis vd, 1998).

Bu bağlamda, liman faaliyetlerine ilişkin yük hacmi verilerinin analizi ve tahmini, özellikle ulaştırma, lojistik ve dış ticaret politikaları açısından büyük önem taşımaktadır. Zaman serisi analizleri, bu tür tahmin çalışmalarında sıklıkla başvurulan temel yöntemlerden biridir. Zaman serisi verileri; belirli bir zaman dilimi içinde meydana gelen eğilimler, mevsimsel etkiler, rastlantısal dalgalanmalar ve yapısal değişiklikler gibi bileşenler içerebilir. Bu analizlerin temel amacı, gözlemlenen örüntülerden yararlanarak gelecekteki yük hareketlerine dair tahminlerde bulunmak ve dışsal faktörlerin olası etkilerini değerlendirmektir.

Bu çalışmada, Marmara Bölgesi'nde yer alan limanlarda 2012–2024 yılları arasında elleçlenen toplam yük miktarlarına ilişkin yıllık veriler kullanılmıştır. Söz konusu veriler, Türkiye Liman İşletmecileri Derneği (TÜRKLİM) gibi resmi ve

güvenilir kaynaklardan derlenmiştir (TÜRKLİM, 2025). Verilerin yıllık düzeyde düzenlenmiş olması, zaman serisi analizlerinin uygulanabilirliğini artırmış ve tahmin modellerinin istatistiksel geçerliliğini sağlamıştır.

2.2. İstatistiksel Analizler

2.2.1. Trend Analizi

Trend analizi, zaman serisi verilerinin genel eğilim yönünü belirlemek için kullanılan bir yöntemdir (Makridakis vd., 1998). Trend analizi, zaman serilerindeki uzun vadeli değişim yönünü ortaya koymak amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Verilerdeki artış ya da azalış eğilimleri incelenerek, bu eğilimlerin gelecekte sürmesi ihtimali üzerinden tahminler yapılır. Yalnızca bireysel birimler (örneğin tek bir liman) için değil, aynı zamanda bölgesel veya ulusal düzeydeki makro değişkenlerin incelenmesinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem sayesinde, geçmiş verilere dayalı olarak belirlenen artış ya da azalış eğilimleri üzerinden geleceğe yönelik öngörüler geliştirmek mümkündür.

Liman yönetimi ve deniz taşımacılığı gibi alanlarda trend analizi, elleçlenen yük miktarlarının yıllar içindeki değişimlerinin değerlendirilmesinde stratejik bir araçtır. Örneğin, Türkiye genelindeki limanlarda son 10–20 yılda gözlemlenen yük artış trendi analiz edilerek, önümüzdeki dönemlerde toplam elleçleme kapasitesine yönelik senaryolar oluşturulabilir. Bu senaryolar genellikle kötümser, olasılık temelli (ortalama) ve iyimser varsayımlarla çeşitlendirilir (Makridakis vd., 1998).

Trend analizinin kullanım alanları sadece deniz taşımacılığı ile sınırlı kalmamakta; aynı zamanda enerji talebi tahminleri, nüfus projeksiyonları, ekonomik büyüme analizleri, satış ve gelir öngörülerini gibi pek çok alanda da uygulanmaktadır (Hyndman ve Athanasopoulos, 2018). Özellikle kamu politikalarının şekillendirilmesi, altyapı yatırımları ve uzun vadeli

lojistik planlamalarda bu yöntem karar vericiler için önemli bir girdi sunmaktadır (Stopford, 2009). Sonuç olarak, trend analizi liman yük istatistiklerinin uzun vadeli davranışını anlamamızı sağlar ve geleceğe yönelik en temel tahmin çizgisini çizer.

2.2.2. Basit Hareketli Ortalama

Basit Hareketli Ortalama (BHO), zaman serisi analizinde kullanılan temel bir tahmin yöntemidir ve belirli sayıda geçmiş gözlemin aritmetik ortalamasının alınmasıyla oluşturulur. Bu yöntem, veri setindeki kısa vadeli dalgalanmaları düzleştirerek genel eğilimleri ortaya koymayı amaçlar (Makridakis vd., 1998). Özellikle stok kontrolü, üretim planlaması ve talep tahmini gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Nahmias ve Olsen, 2015). BHO'nun temel avantajı, hesaplamasının kolay ve yorumlanabilir olmasıdır; ancak ani değişimlere duyarlı kalabilir (Hyndman ve Athanasopoulos, 2018). Yöntemin doğruluğu, seçilen gözlem sayısına (örneğin 3 dönemlik veya 5 dönemlik ortalama) bağlıdır. Hareketli ortalama penceresi arttıkça model, veri setindeki rastlantısal etkileri daha fazla düzleştirir ancak bu durum öngörülerin güncelliğini azaltabilir (Montgomery, Jennings ve Kulahci, 2015). Bu nedenle, kısa dönemli tahminler için daha düşük periyotlar tercih edilmektedir.

2.2.3. Basit Üstel Düzeltme

Basit Üstel Düzeltme (Single Exponential Smoothing) (Brown, 1959), zaman serilerinde kısa vadeli tahminler yapmak amacıyla geliştirilen ve son gözlemlere daha fazla ağırlık veren bir yöntemdir. Bu yöntem, geçmiş verilere üstel azalan ağırlıklar uygulayarak geleceğe yönelik tahminler üretir. Basit hareketli ortalamanın aksine, eski veriler tamamen dışlanmaz; ancak etkileri zamanla azalır (Hyndman ve Athanasopoulos, 2018). Tahmin, önceki tahminin ve mevcut gözlemin bir kombinasyonudur; bu da yöntemin esnekliğini ve veri değişimlerine duyarlılığını artırır (Makridakis vd., 1998). Düzeltme katsayısı (α), modelin yeni verilere ne kadar hızlı tepki verdiğini belirler. α değeri 1'e

yaklaştıkça tahminler yeni verilere daha çok duyarlı olur, 0'a yaklaştıkça ise daha durağan hale gelir (Gardner, 1985). Yöntem, trend veya mevsimsellik içermeyen verilerde özellikle başarılı sonuçlar vermektedir.

2.2.4. Çift Üstel Düzeltme

Çift Üstel Düzeltme (Double Exponential Smoothing), zaman serilerinde hem düzey (seviye) hem de trend bileşenini içeren veriler için kullanılan bir tahmin yöntemidir. Basit üstel düzeltmenin aksine, bu yöntemde hem mevcut değere hem de eğilim (trend) değişimine duyarlılık gösterilir (Brown, 1963). Çift üstel düzeltme, iki parametreye dayanır: düzey katsayısı (α) ve trend katsayısı (β). Bu parametreler sayesinde model, veri setindeki eğilimleri daha etkili şekilde takip edebilir (Hyndman ve Athanasopoulos, 2018). Özellikle doğrusal bir artış veya azalış içeren zaman serilerinde, bu yöntem tahmin doğruluğunu artırır (Makridakis, Wheelwright ve Hyndman, 1998). Her tahmin, önceki tahmin ve eğilim bileşeninin güncellenmesiyle elde edilir. Brown ve Holt'un geliştirdiği versiyonları uygulamada en çok tercih edilen varyantlardır (Gardner, 1985). Çift üstel düzeltme, kısa ve orta vadeli talep tahminlerinde sıklıkla kullanılmakta ve mevsimsellik içermeyen verilerde etkili sonuçlar vermektedir.

2.2.5. Talep Tahmininde Kullanılan Hata Ölçütleri

Talep tahmininde kullanılan hata ölçütleri, modelin doğruluğunu değerlendirmek ve alternatif tahmin yöntemlerini karşılaştırmak açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda en yaygın kullanılan hata ölçütlerinden biri Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error - MAPE) olup, tahmin hatalarının yüzde cinsinden ortalamasını ifade eder ve farklı ölçeklerdeki verilerin karşılaştırılmasına olanak tanır (Hyndman ve Koehler, 2006).

Bir diğer yaygın ölçüt olan Ortalama Mutlak Sapma (Mean Absolute Deviation – MAD), tahmin edilen

değerlerle gözlemlenen gerçek değerler arasındaki mutlak farkların ortalamasını alarak tahmin hatalarının ortalama düzeyini yansıtır. Ortalama Karesel Sapma (Mean Squared Deviation – MSD) ise tahmin hatalarının karelerinin ortalamasını alarak, büyük hatalara daha yüksek ceza vererek modelin istikrarını değerlendirmede kullanılır (Hyndman ve Athanasopoulos, 2018).

2.3. Model Varsayımları, Sınırlamalar ve Model Seçim Süreci

Bu çalışmada kullanılan zaman serisi analiz yöntemleri belirli istatistiksel varsayımlara dayanmaktadır. Öncelikle, veri setinin doğrusal regresyon analizlerine uygun olup olmadığını test etmek amacıyla normal dağılım varsayımı Anderson-Darling testi ile değerlendirilmiş ve p-değeri %5 anlamlılık düzeyinin üzerinde çıktığı için normal dağılım varsayımı kabul edilmiştir.

Zaman serisi modellerinin seçiminde temel kriterler; açıklayıcılık düzeyi (R^2 , R^2_{adj}), tahmin gücü (R^2_{pred}) ve hata ölçütleri (MAPE, MAD, MSD) olmuştur. Box-Jenkins (ARIMA) modeli veri setinin yapısı nedeniyle elenmiş, mevsimsellik içermeyen ve yıllık düzeydeki verilere daha uygun olan trend analizi (doğrusal, parabolik, üssel), hareketli ortalama ve üstel düzeltme yöntemleri tercih edilmiştir.

Her modelin tahmin gücü, hem istatistiksel anlamlılık hem de pratik geçerlilik açısından karşılaştırılmıştır. Modeller, mevsimsellik veya dışsal değişkenler içermediğinden yalnızca içsel örüntülere dayalı tahminler üretmiştir. Bu durum, çalışmanın temel sınırlamalarından biridir.

Model sınırlamaları arasında; dış ticaret politikaları, ekonomik krizler veya büyük yapısal kırılmalar gibi dışsal faktörlerin dikkate alınmaması sayılabilir. Ayrıca, veri seti yalnızca Marmara Bölgesi genelini kapsadığı için limanlar arası farklılıklar modelde yansıtılamamıştır. Bu bağlamda, elde edilen tahminler

mevcut örüntülerin devam edeceği varsayımıyla geçerlidir.

3. Araştırma Yöntemi

Bu çalışmanın temel amacı, Marmara Bölgesi limanlarında 2012–2024 yılları arasında elleçlenen yük miktarlarına ilişkin yapısal eğilimleri analiz ederek, bölgesel liman faaliyetlerinin geleceğine yönelik öngörüler sunmaktır. Marmara Bölgesi, Türkiye'nin sanayi ve dış ticaret açısından en yoğun hinterlanda sahip bölgesi olması nedeniyle, liman operasyonları bakımından stratejik bir konuma sahiptir. Bu kapsamda, elde edilen bulgular hem kamu kurumlarının altyapı ve yatırım planlamalarına yön verecek hem de özel sektör paydaşlarına stratejik karar alma süreçlerinde rehberlik edecek niteliktedir.

Analiz sürecinde, Türkiye Liman İşletmecileri Derneği (TÜRKLİM) gibi güvenilir kurumsal kaynaklardan elde edilen yıllık bazdaki toplam yük elleçleme verileri kullanılmıştır. Veri seti, zaman serisi analizlerinin uygulanmasına elverişli biçimde düzenlenmiş olup, örüntü analizi ve tahminleme amacıyla kullanılmıştır. Verilerin ön işleme sürecinde, eksik gözlem veya aykırı değer bulunmamış; dolayısıyla düzeltme veya veri temizliği işlemi gerekmemiştir.

Model seçimi aşamasında, zaman serisi yapısına uygunluğun belirlenmesine özen gösterilmiştir. Ön değerlendirmeler sonucunda Box-Jenkins (ARIMA) yaklaşımı incelenmiş; ancak serinin mevsimsellik içermemesi, gözlem sayısının sınırlı olması ve model varsayımlarına yeterince uygun olmaması nedeniyle tercih edilmemiştir. Bunun yerine, zaman serisinin genel eğilimini ve kısa vadeli dalgalanmaları açıklamada daha etkin olan yöntemlere odaklanılmıştır. Bu doğrultuda trend analizleri (doğrusal, parabolik, üssel), hareketli ortalama (3 ve 5 dönemlik) ve üstel düzeltme (basit ve çift) yöntemleri uygulanmıştır.

Model değerlendirme sürecinde, yalnızca açıklayıcılık (R^2 , R^2_{adj}) değil aynı zamanda tahmin edilebilirlik

(R^2_{pred}) ve hata ölçütleri (MAPE, MAD, MSD) de dikkate alınmıştır. Modellerin varsayımları, sınırları ve seçilme gerekçeleri detaylı biçimde Bölüm 2.3'te sunulmuştur.

4. Bulgular

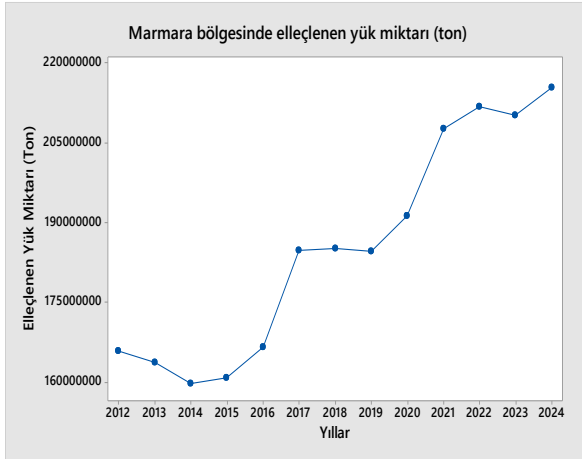
Tablo 1'de görüldüğü üzere, 2012 yılındaki yaklaşık 165,8 milyon ton seviyesinden 2024 yılında 215,3 milyon ton seviyesine bir artış gerçekleşmiştir. Bununla birlikte bazı yıllarda düşüşler veya dalgalanmalar dikkati çekmektedir (örneğin 2013–2014 arası düşüş, 2016'dan 2017'ye belirgin artış, 2022'den 2023'e küçük bir düşüş). Verilerin analizi öncesi normal dağılım gösterip göstermediği kontrollünün yapılması gerekmektedir.

Tablo 1. Marmara bölgesinde elleçlenen yük miktarı (ton)

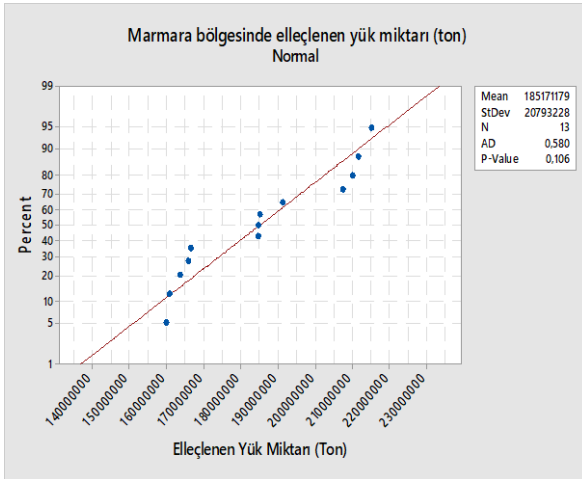
Yıllar	Elleçlenen Yük Miktarı (Ton)
2012	165.808.652
2013	163.739.271
2014	159.856.938
2015	160.810.595
2016	166.553.197
2017	184.699.191
2018	185.186.598
2019	184.661.739
2020	191.203.199
2021	207.554.085
2022	211.707.897
2023	210.169.062
2024	215.274.899

Şekil 1'de Marmara Bölgesi'nde elleçlenen yük miktarlarının yıllara göre dağılımını gösteren zaman serisi grafiği sunulmaktadır. Bu veri setinin normal dağılıma uygunluğunu değerlendirmek amacıyla, özellikle gözlem sayısının sınırlı olduğu durumlarda önerilen Anderson-Darling testi (AD) testi uygulanmış ve sonuçlar Şekil 2'de gösterilmiştir. AD testi

(Anderson & Darling, 1954), küçük örneklerde normal dağılım varsayımının test edilmesinde sıklıkla tercih edilen, güçlü ve duyarlı bir istatistiksel yöntemidir. Elde edilen sonuçlara göre, AD istatistik değeri 0,58, p-değeri ise 0,106 olarak hesaplanmıştır. P-değerinin, yaygın olarak kullanılan %5 anlamlılık düzeyinin ($\alpha = 0,05$) üzerinde olması nedeniyle, ilgili veri setinin istatistiksel olarak normal dağılıma uygunluk gösterdiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 1. Marmara bölgesinde elleçlenen yüklerin zaman serisi grafiği



Şekil 2. Marmara bölgesi'nde elleçlenen yük miktarının normal dağılıma uygunluk grafiği (Anderson-Darling testi)

4.1. Trend Analizleri

Bu çalışmada, zaman serisi verilerinin eğilim yapısını belirlemek amacıyla trend analizleri uygulanmıştır. Bu

kapsamda, veriye uygun farklı eğilim türlerini test edebilmek için üç farklı trend modeli dikkate alınmıştır: Doğrusal, parabolik ve üssel trend analizleri. Her bir model, serinin yapısal özelliklerine göre değerlendirilmiş ve uygunluk düzeyleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Trend analizlerinde kullanılan regresyon modellerindeki bağımsız değişken olarak zaman (yıl) alınmış ve 2012 yılı $t=0$ başlangıç noktası olacak şekilde kodlanmıştır (yani $t = \text{Yıl} - 2012$).

4.1.1. Doğrusal (Linear) Trend Analizi

Varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre, regresyon modeline ilişkin F-istatistiği 108,27 ve p-değeri = 0,00 olarak bulunmuştur. Bu durum, modelin genel olarak anlamlı olduğunu ve bağımlı değişkendeki (elleçlenen yük miktarı) değişimin büyük ölçüde bağımsız değişken (zaman-t) tarafından açıklandığını göstermektedir. Model özet istatistikleri incelendiğinde; açıklayıcılık oranını gösteren belirleme katsayısı (R^2) %90,78, düzeltilmiş belirleme katsayısı (R^2_{adj}) %89,94 ve tahmin edilebilirlik düzeyini gösteren tahmini R^2 (R^2_{pred}) %86,51 olarak elde edilmiştir. Bu değerler, modelin yüksek bir doğrulukla veri setini açıkladığını ortaya koymaktadır.

Regresyon katsayılarına göre model denklemi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$Y_t = 154.648.872 + 5.087.051 * t$$

Bu denklem doğrultusunda, yıllar ilerledikçe elleçlenen yük miktarının ortalama olarak her yıl yaklaşık 5.087.051 ton arttığı anlaşılmaktadır. Zaman değişkenine ait p-değeri 0,000 olup, istatistiksel olarak anlamlıdır.

4.1.2. Parabolik (Quadratic) Trend Analizi

Doğrusal model küçük sapmalarla birlikte genel artış eğilimini yakalasa da, veride 2012-2016 arasında nispeten yavaş artış/düşüş ve 2016 sonrası daha hızlı bir

artış trendi göze çarpmaktadır. Bu nedenle ikinci dereceden bir parabolik model de denenmiştir. Modelde zaman (t) ve zamanın karesi (t²) değişkenleri bağımsız değişkenler olarak kullanılmış, bağımlı değişken ise yıllık elleçlenen konteyner yük miktarı (ton) olarak tanımlanmıştır. Analiz sonucunda elde edilen ANOVA tablosuna göre model genel anlamda istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (F = 61,91; p < 0,001). Bu durum, zaman değişkeninin (doğrusal ve ikinci dereceden) birlikte modele anlamlı katkı sunduğunu göstermektedir.

Modelde R² %92,53, R²_adj değeri ise %91,03 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, kurulan regresyon modelinin toplam konteyner hacmindeki değişimin %91'inden fazlasını açıkladığını ve modelin yüksek bir uyum sergilediğini göstermektedir. Buna karşın, bireysel bağımsız değişkenlerin anlamlılığı incelendiğinde, zaman (t) değişkeni için p = 0,175 ve zamanın karesi (t²) için p = 0,157 olup istatistiksel anlamlılık düzeyinin üzerinde kalmaktadır. Bu sonuç, her iki değişkenin de tek başına modele anlamlı katkı sunmadığını, ancak birlikte değerlendirildiğinde modelin geneli açısından güçlü bir açıklama sağladıklarını göstermektedir. Elde edilen regresyon denklemi ise:

$$Y_t = 159.333.132 + 2.532.000 t + 212.921 t^2$$

4.1.3. Üssel (Exponential) Trend Analizi

Doğrusal ve parabolik analizlere ek olarak üçüncü trend analizi olan üssel trend analizinde model denenmiştir. ANOVA sonuçlarına göre, regresyon modeline ilişkin F-istatistiği 106,28 ve p-değeri = 0,00 olarak bulunmuştur ve model anlamlıdır. Regresyon katsayılarına göre model denklemi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$Y_t = 152011765 \cdot (1,02774)^{t+1}$$

Model özet istatistikleri incelendiğinde, R² %90,62, R²_adj değeri %89,77 ve R²_pred değeri %86,31 olarak elde edilmiştir.

4.1.4. Trend Analiz Sonuçları

Her üç model de istatistiksel olarak anlamlı ve güçlü sonuçlar üretmiş olmakla birlikte, Tablo 2'de görüldüğü üzere parabolik trend modeli, en yüksek (R²) ile diğer modellerden ayrılmaktadır. Bu durum, söz konusu modelin veri setindeki değişkenliği açıklama kapasitesinin daha yüksek olduğunu ve tahmin performansı açısından daha üstün bir model olduğunu göstermektedir.

Tablo 2. Trend analizi modellerine ait istatistiksel uyum göstergeleri

Trend Analiz Türü	R ²	R ² (Adjusted)	R ² (Predicted)	P Value
Doğrusal (Linear)	90,78%	89,94%	86,51%	0,000
Parabolik (Quadratic)	92,53%	91,03%	85,70%	0,000
Üssel (Exponential)	90,62%	89,77%	86,31%	0,000

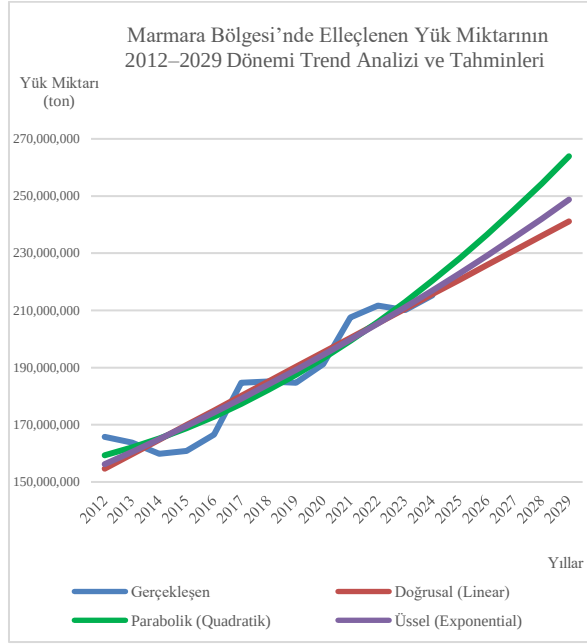
Doğrusal model, yorum kolaylığı açısından avantaj sağlamakta, Üssel model, sabit oranlı artışı başarıyla modellemekte, Parabolik model ise verinin farklı dönemlerindeki artış hızlarını en iyi yansıtan ve en yüksek R² sahip model olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 3. Trend analizi modellerine ait hata ölçütlerinin karşılaştırılması

Trend Analiz Türü	MAPE	MAD	MSD
Doğrusal (Linear)	2,88240	5,0929 x 10 ⁶	3,68068 x 10 ¹³
Parabolik (Quadratic)	2,74151	4,99463 x 10 ⁶	2,98251 x 10 ¹³
Üssel (Exponential)	2,82536	5,03898 x 10 ⁶	3,32212 x 10 ¹³

Trend analizi modellerine ilişkin istatistiksel uyum göstergelerine ek olarak, hata ölçütleri açısından da karşılaştırma yapılmıştır. Bu doğrultuda, MAPE, MAD ve MSD değerleri değerlendirilmiştir. Tablo 3'te

görüldüğü üzere, tüm hata ölçütleri bakımından en düşük değerlere sahip modelin parabolik trend modeli olduğu belirlenmiştir. Bu bulgu, parabolik modelin yalnızca istatistiksel uyum açısından değil, aynı zamanda tahmin performansı açısından da diğer modellere kıyasla daha başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Marmara bölgesi için trend modelleri ile yük miktarı tahminleri

Bu nedenle, ileri dönemlere yönelik tahminleme ve stratejik planlama süreçlerinde, parabolik modelin dikkate alınması, daha isabetli ve güvenilir öngörüler elde edilmesini sağlayacaktır. Modellere ait tahminler şekil 3'te gösterilmektedir.

4.2. Hareketli Ortalama

3 dönemlik hareketli ortalama yöntemi ile geleceğe yönelik tahminleme yapılmıştır. Uygulanan model, serideki kısa dönemli dalgalanmaları ortadan kaldırarak daha sade bir eğilim profili ortaya koymuştur. Regresyon katsayılarına göre model denklemi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$Y_t = 139420866 + 5623909 * t$$

Analiz sonucunda, 2025–2029 yıllarına yönelik olarak her yıl için sabit bir tahmin değeri olan 212.383.953 ton elde edilmiştir. Alt ve üst tahmin sınırları %95 güven aralığında 187,5 milyon ton ile 237,2 milyon ton arasında değişmektedir.

Modelin performansı; %5,46 MAPE, 10,63 milyon ton MAD ve $1,61 \times 10^{14}$ ton MSD hata ölçütleriyle değerlendirilmiş olup, modelin genel doğruluk seviyesi kabul edilebilir sınırlar içerisinde yer almaktadır.

3 dönemlik hareketli ortalama yöntemiyle yapılan analiz, kısa vadeli dalgalanmaları azaltarak veri setinde güçlü bir eğilim ortaya koymuştur. Modelin özet istatistikleri incelendiğinde, %97,11 R^2 , %96,79 R^2_{adj} ve %94,90 R^2_{pred} değeri ile oldukça yüksektir. Ayrıca, p-değeri = 0,00 modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, yöntemin liman yük tahminlerinde güvenilir ve etkili bir araç olduğunu göstermektedir.

Beş dönemlik hareketli ortalama yöntemi ve doğrusal regresyon modeli yardımıyla geleceğe yönelik tahminleme yapılmıştır. Uygulanan yöntem, veri setindeki kısa vadeli dalgalanmaları yumuşatarak daha sade ve genel eğilimi yansıtan bir profil ortaya koymuştur. Regresyon katsayılarına göre model denklemi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$Y_t = 132869896 + 5677599 * t$$

Analiz sonucunda, 2025–2029 yıllarına yönelik ortalama yıllık tahmin değeri 207.181.828 ton olarak elde edilmiştir. %95 güven aralığına göre bu tahminin alt sınırı 171,5 milyon ton, üst sınırı ise 242,9 milyon ton olarak belirlenmiştir.

Modelin performansı, %8,95 MAPE, 17,74 milyon ton MAD ve $3,31 \times 10^{14}$ ton MSD hata ölçütleriyle değerlendirilmiş olup, genel doğruluk seviyesi kabul edilebilir düzeydedir.

5 dönemlik hareketli ortalama yöntemiyle gerçekleştirilen analiz, serideki kısa vadeli dalgalanmaları en aza indirerek güçlü ve dengeli bir eğilim profili sunmuştur. Modelin özet istatistikleri incelendiğinde, %99,30 R^2 , %99,20 R^2_{adj} , %98,77 R^2_{pred} değeri ile oldukça yüksektir. Ayrıca, p-değeri = 0,00 modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, modelin hem mevcut veriyle uyumlu hem de geleceğe yönelik öngörülerde yüksek doğruluk sunduğunu göstermektedir.

Her iki modelin karşılaştırmalı değerlendirmesi sonucunda, 3 dönemlik hareketli ortalamının daha düşük hata değerleriyle daha yüksek bir doğruluk sağladığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, 5 dönemlik hareketli ortalama ile regresyon birleşimi daha geniş bir güven aralığı sunmakta ve potansiyel dalgalanmalara karşı daha kapsayıcı bir öngörü sağlamaktadır. Bu bağlamda, gelecekteki liman planlamaları ve yatırım kararları açısından her iki modelin de birbirini tamamlayıcı nitelikte değerlendirilmesi önerilmektedir.

4.3. Üstel Düzeltme

Son aşamada veri üzerinde üstel düzeltme yöntemleri uygulanmış, hem serinin düzleştirilmiş bir versiyonu elde edilmiş hem de Holt'un yöntemi ile ileriye yönelik tahminlemeler yapılmıştır.

4.3.1 Basit Üstel Düzeltme

Basit üstel düzeltme modeli yardımıyla geleceğe yönelik tahminleme yapılmıştır. Uygulanan model, zamanla artan yük miktarlarını temsil eden doğrusal bir eğilim ortaya koymuş ve veri seti üzerinde yüksek uyum sağlayarak genel eğilimi açıklamada başarılı bir performans sergilemiştir. Analiz sonucunda oluşturulan regresyon denklemi:

$$Y_t = 149.561.821 + 5.087.051 * t$$

Modelin özet istatistikleri incelendiğinde, %90,78 R^2 , %89,94 düzeltilmiş R^2 ve %86,51 R^2_{pred} değeri ile

oldukça yüksektir. Ayrıca, p-değeri = 0,00 modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ortaya koymaktadır. Ortalama sapma değeri ise yaklaşık 6,6 milyon ton ($S = 6.595.370$) olarak belirlenmiştir.

Basit üstel düzeltme modeli $\alpha=0,95$ sabitiyle uygulanmış, %2,78 MAPE değeri ile düşük düzeyde tahmin hatası vermiştir. Model, 2025–2029 yılları için yaklaşık 215 milyon birimlik sabit tahminler üretmiştir. Alt ve üst güven sınırları sırasıyla 202 milyon ve 228 milyon civarında olup, modelin durağan veri yapısına uygun çalıştığını göstermektedir. Trend içermeyen serilerde kısa vadeli öngörüler için yeterli olan bu yaklaşım, uzun vadeli planlamalarda sınırlı kalabilir.

4.3.2 Çift Üstel Düzeltme

Çift üstel düzeltme modeli yardımıyla geleceğe yönelik tahminleme yapılmıştır. Uygulanan model, zaman serisinin hem seviye hem de eğilim bileşenlerini dikkate alarak artan yük miktarlarını temsil eden bir eğilim profili oluşturmuş ve veri seti üzerinde yüksek doğrulukla genel eğilimi açıklamada başarılı bir performans sergilemiştir. Analiz sonucunda oluşturulan regresyon denklemi:

$$Y_t = 149.561.821 + 5.087.051 * t$$

Model özet istatistikleri incelendiğinde, %90,78 R^2 , %89,94 R^2_{adj} ve %86,51 R^2_{pred} değeri ile oldukça yüksektir. Ayrıca, p-değeri = 0,00 modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ortaya koymaktadır. Ortalama sapma değeri ise yaklaşık 6,6 milyon ton ($S = 6.595.370$) olarak belirlenmiştir.

Çift üstel düzeltme yöntemi $\alpha=0,1$ ve $\gamma=0,1$ düzeltme sabitleriyle uygulanmıştır. Düşük düzeydeki bu sabitler, modelin geçmiş verilere yüksek ağırlık verdiğini ve trend değişimlerine daha temkinli yaklaştığını göstermektedir. Elde edilen MAPE değeri %3,03 olup, modelin kabul edilebilir düzeyde tahmin doğruluğu sağladığını ortaya koymaktadır. MAD değeri 5,37 milyon ve MSD $4,15 \times 10^{13}$ olup, veri setinin

büyüklüğü göz önünde bulundurulduğunda bu hata düzeyleri makul sınırlar içerisinde. Model, 2025–2029 yılları arasında artan bir eğilim öngörmüş; tahminler 220,7 milyondan başlayarak 241,1 milyona kadar yükselmiştir. Bu artış, seride pozitif bir trendin varlığını desteklemekte olup, alt ve üst güven sınırlarının yıllar ilerledikçe açılması tahminlerdeki belirsizliğin zamanla arttığını göstermektedir. Bu doğrultuda model, trend içeren veri yapıları için uygun bir öngörü aracı olarak değerlendirilebilir ve orta vadeli planlamalarda kullanılabilir.

Yapılan analizler sonucunda, hem basit üstel düzeltme hem de çift üstel düzeltme yöntemlerine ait ANOVA çıktılarının aynı olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, her iki modelin de veri setiyle yüksek uyum sağladığını ve benzer düzeyde açıklayıcılığa sahip olduğunu göstermektedir.

5. Değerlendirme ve Sonuç

Bu çalışmada, Marmara Bölgesi limanlarında 2012–2024 yılları arasında elleçlenen yük miktarları incelenmiş ve 2025–2029 dönemi için çeşitli zaman serisi analiz yöntemleri kullanılarak tahminlerde bulunulmuştur. Trend analizleri (doğrusal, parabolik ve üssel), hareketli ortalamalar (3 dönemlik ve 5 dönemlik) ile üstel düzeltme yöntemleri (basit ve çift) bu kapsamda uygulanmıştır.

Tablo 4. Zaman serisi analiz modellerine ait istatistiksel uyum göstergeleri

Analiz Türü	R ²	R ² (Adj.)	R ² (Pred.)	P Value
Doğrusal (Linear)	90,78%	89,94%	86,51%	0,000
Parabolik (Quadratic)	92,53%	91,03%	85,70%	0,000
Üssel (Exponential)	90,62%	89,77%	86,31%	0,000
Hareketli Ortalama 3D	97,11%	96,79%	94,50%	0,000
Hareketli Ortalama 5D	99,30%	99,20%	98,77%	0,000
Basit Üstel Düzeltme	90,78%	89,94%	86,51%	0,000
Çift Üstel Düzeltme	90,78%	89,94%	86,51%	0,000

Gerçekleştirilen analizler sonucunda, tüm tahmin modellerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir ($p < 0,001$; %95 güven düzeyi). Modellerin açıklayıcılık düzeyleri ise %86 ile %99 arasında değişmekte olup, bu bulgular Tablo 4’de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, kullanılan yöntemlerin Marmara Bölgesi limanlarında elleçlenen yük miktarlarının tahmini açısından hem geçerli hem de güçlü öngörü kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 5. Zaman serisi analizi modellerine ait hata ölçütlerinin karşılaştırılması

Analiz Türü	MAPE	MAD	MSD
Doğrusal (Linear)	2,88240	$5,0929 \times 10^6$	$3,681 \times 10^{13}$
Parabolik (Quadratic)	2,74151	$4,9946 \times 10^6$	$2,983 \times 10^{13}$
Üssel (Exponential)	2,82536	$5,0390 \times 10^6$	$3,322 \times 10^{13}$
Hareketli Ortalama 3D	5,46401	$1,0632 \times 10^7$	$1,606 \times 10^{14}$
Hareketli Ortalama 5D	8,9469	$1,7741 \times 10^7$	$3,313 \times 10^{14}$
Basit Üstel Düzeltme	2,78	$5,274 \times 10^6$	$5,9248 \times 10^{13}$
Çift Üstel Düzeltme	3,03217	$5,3666 \times 10^6$	$4,1537 \times 10^{13}$

Analiz sonuçları, Marmara Bölgesi’nde yıllar itibarıyla artan bir yük elleçleme eğiliminin olduğunu ortaya koymuştur. Uygulanan trend analizleri arasında en yüksek açıklayıcılığa sahip modelin parabolik trend modeli olduğu belirlenmiş; bu model aynı zamanda en düşük MAPE, MAD ve MSD değerlerini sağlayarak tahmin performansı açısından da öne çıkmıştır. Bu bulgular Tablo 5’te ayrıntılı biçimde sunulmuştur.

Kısa vadeli öngörüler açısından değerlendirildiğinde, hareketli ortalama ve üstel düzeltme yöntemleri güçlü tahmin kabiliyeti sergilemiştir. Özellikle basit üstel düzeltme modeli, %2,78 MAPE değeri ile oldukça düşük bir hata oranına ulaşmış ve bu durum, modelin güvenilirliğini desteklemiştir.

Parabolik model, uzun vadeli eğilimlerin daha gerçekçi biçimde yansıtılması açısından altyapı planlaması, kapasite yönetimi ve stratejik yatırım kararlarında

öncelikli olarak değerlendirilebilir. Diğer yandan, basit üstel düzeltme yöntemi, kısa vadeli karar destek sistemleri için daha istikrarlı ve düşük hata payına sahip bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

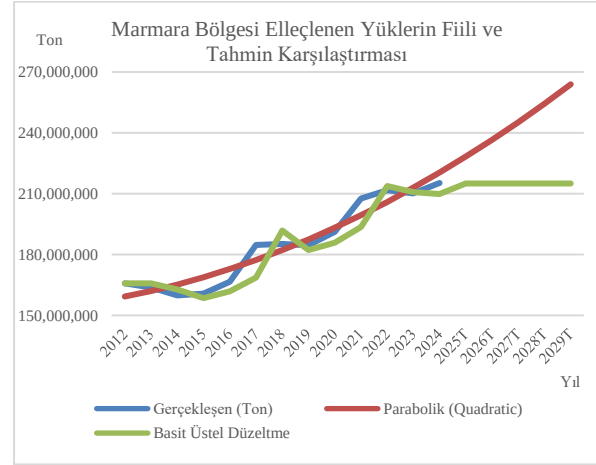
Diğer taraftan, her iki modelin birlikte kullanımı; karar vericilere hem iyimser hem de ihtiyatlı senaryolar oluşturma imkânı sunarak, daha dengeli ve esnek planlamalar yapılmasına katkı sağlayacaktır.

Tablo 6. Elleçlenen Yük Miktarı ile Tahmin Değerlerinin Yıllara Göre Karşılaştırılması

Yıllar	Elleçlenen Yük Miktarı (Ton)	Parabolik (Quadratic)	Basit Üstel Düzeltme
2012	165.808.652	159333132	165774654
2013	163.739.271	162078053	165823942
2014	159.856.938	165248816	162801715
2015	160.810.595	168845421	158532559
2016	166.553.197	172867868	161835115
2017	184.699.191	177316156	168675099
2018	185.186.598	182190286	191905837
2019	184.661.739	187490258	182164699
2020	191.203.199	193216072	185784753
2021	207.554.085	199367727	193640081
2022	211.707.897	205945225	213811744
2023	210.169.062	212948564	210761717
2024	215.274.899	220377745	209902523
2025		228232768	215022831
2026		236513632	215022831
2027		245220338	215022831
2028		254352886	215022831
2029		263911276	215022831

Elde edilen Tablo 6 ve diğer bulgular doğrultusunda, Marmara Bölgesi limanlarında önümüzdeki yıllarda yük elleçleme hacminin artış eğilimini sürdüreceği öngörülmektedir. Bu öngörü, Şekil 4'te sunulan grafikte de görsel olarak desteklenmekte olup; gerçek veriler ile parabolik trend ve basit üstel düzeltme modellerinin tahmin değerleri karşılaştırmalı şekilde gösterilmiştir. Bu doğrultuda, bölgedeki liman altyapısının kapasite artırımına yönelik planlamaların önceliklendirilmesi, lojistik süreçlerin veri temelli

yaklaşımlarla yönetilmesi ve stratejik yatırımların zamanında hayata geçirilmesi kritik önem taşımaktadır.



Şekil 4. Marmara Bölgesi'nde Elleçlenen Yük Miktarının Yıllara Göre Tahmini ve Trend Modelleri Karşılaştırması

Bu çalışma, karar vericilere ampirik temelli öngörüler sunarak, sürdürülebilir liman yönetimi ilkeleri doğrultusunda uzun vadeli altyapı planlarının geliştirilmesine ve ulusal düzeyde lojistik stratejilerin şekillendirilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir. Bu bağlamda, elde edilen analiz sonuçları, yalnızca bölgesel değil, aynı zamanda ülke genelinde liman politikalarının bütüncül bir perspektifle ele alınmasına zemin oluşturmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, bölge geneli yerine tekil limanlar bazında analizler yapılarak her limanın kendi dinamikleri doğrultusunda daha detaylı değerlendirmeler sunulabilir. Yalnızca yük miktarlarıyla sınırlı kalınmaksızın, operasyonel verilerin (bekleme süresi, elleçleme süresi vb.) entegre edilmesiyle liman performansı daha bütüncül biçimde analiz edilebilir.

Çıkar Çatışması: Yazarların beyan edilecek herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

ORCID

Elvan DENİZ, 0000-0002-4237-1358

Referanslar

- Acar, A. Z., & Aydın, G. (2021). Türkiye'de lojistik altyapı yatırımlarının bölgesel kalkınma üzerindeki etkileri. *Uluslararası Lojistik ve Ticaret Dergisi*, 9(2), 110–129.
- Anderson, T. W., & Darling, D. A. (1954). A test of goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association*, 49(268), 765–769.
- Akar, M., & Esmer, S. (2017). Döviz kuru dalgalanmalarının liman yük hacmi üzerindeki etkisi: Marmara bölgesi örneği. *Denizcilik Ekonomisi ve Politikaları Dergisi*, 9(1), 15–29.
- Akten, N., & Koldemir, B. (2011). Marmara Bölgesi limanlarının yük türlerine göre değerlendirilmesi. *İstanbul Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dergisi*, 3(1), 45–60.
- Aydın, M., & Ünlüyurt, T. (2019). Derin öğrenme tabanlı dökme yük tahmin modelleri: Tekirdağ Limanı örneği. 3. *Uluslararası Lojistik ve Tedarik Zinciri Kongresi Bildirileri*, 1(1), 45–52.
- Brown, R. G. (1959). *Statistical forecasting for inventory control*. McGraw-Hill.
- Brown, R. G. (1963). *Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series*. Prentice-Hall.
- Çancı, B., & Önce, S. (2016). Hibrit tahmin modelleri ile Marmara Bölgesi limanlarında yük tahmini. *İstatistik, Ekonomi ve Toplum Araştırmaları Dergisi*, 5(3), 67–83.
- Ergin, E., & Eker, S. (2022). Gri sistem teorisi ve bulanık mantık ile tehlikeli madde yük tahmini: İzmit Körfezi örneği. *Ulaştırma ve Lojistik Dergisi*, 8(2), 91–105.
- Esmer, S., & Karataş Çetin, Ç. (2013). Türkiye limanlarında elleçlenen konteyner yüklerinin ARIMA modeli ile tahmini. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, 200(2), 55–66.
- Gardner, E. S. (1985). Exponential smoothing: The state of the art. *Journal of Forecasting*, 4(1), 1–28. <https://doi.org/10.1002/for.3980040103>
- Grossman, G. M., & Helpman, E. (1991). *Innovation and Growth in the Global Economy*. MIT Press.
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and Practice* (2nd ed.). OTexts.
- Hyndman, R. J., & Koehler, A. B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22(4), 679–688.
- Jugović, A., Hess, S., & Poletan Jugović, T. (2011). Traffic demand forecasting for port services. *Promet-Traffic&Transportation*, 23(1), 59-69.
- Kara, M., & Deniz, M. (2016). İstanbul limanlarındaki yük hareketlerinin karşılaştırmalı analizi. *Kent ve Ulaşım Araştırmaları Dergisi*, 3(1), 41–58.
- Keleş, Y., & Koldemir, B. (2020). YSA ile Marmara limanlarında konteyner yük tahmini. *Yapay Zeka ve Lojistik Dergisi*, 2(1), 24–38.
- Kırılmaz, M., & Erol, Y. (2021). COVID-19'un Marmara limanlarında yük elleçleme faaliyetlerine etkisi. *Lojistik ve Pandemi Araştırmaları Dergisi*, 1(2), 12–30.
- Krugman, P. R., & Obstfeld, M. (2009). *International Economics: Theory and Policy* (8th ed.). Pearson Education.
- Kuzu, A., & Önder, S. (2017). Mevsimsellik analizleri ile liman planlaması: Marmara Bölgesi örneği. *Ziraat ve Tarım Ekonomisi Dergisi*, 6(2), 17–29.
- Makridakis, S., Wheelwright, S. C., & Hyndman, R. J. (1998). *Forecasting: Methods and Applications* (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Montgomery, D. C., Jennings, C. L., & Kulahci, M. (2015). *Introduction to time series analysis and forecasting*. John Wiley & Sons.

- Nahmias, S., & Olsen, T. L. (2015). *Production and operations analysis* (7th ed.). Waveland Press.
- Nas, S. (2014). Tehlikeli madde taşımacılığı ve liman güvenliği: İzmit Körfezi örneği. *Afet ve Risk Dergisi*, 2(1), 45–61.
- Önsel Ekici, Ş., & Kabak, Ö. (2022). Türkiye limanlarının çok kriterli karar verme yöntemleriyle değerlendirilmesi. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, 270, 33–42.
- Özdemir, M., & Çetin, H. (2020). Çanakkale Boğazı yük gemisi trafiği ve Marmara limanlarına etkisi. *Denizcilik ve Ulaştırma Araştırmaları Dergisi*, 6(2), 75–89.
- Öztürk, Y., & Çetin, D. (2017). Tekirdağ ve Çanakkale limanlarında tarım ürünleri taşımacılığı. *Tarım Ekonomisi ve Pazarlama Dergisi*, 9(1), 51–64.
- Rodrik, D. (2006). The social cost of foreign exchange reserves. *International Economic Journal*, 20(3), 253–266.
- Saatçioğlu, M., & Karaca, E. (2019). Marmara Bölgesi limanlarının art alan bağlantıları ve yük akışı üzerindeki etkileri. *Lojistik ve Ulaştırma Araştırmaları Dergisi*, 11(2), 23–38.
- Stopford, M. (2009). *Maritime Economics* (3rd ed.). Routledge.
- Şener, N., & Başer, M. (2018). İzmit Körfezi sıvı yük limanları kapasite analizi. *Enerji Lojistiği ve Petrokimya Dergisi*, 5(1), 19–33.
- Tuncel, G., & Deniz, E. (2024). Optimization of container terminal operations using response surface methodology. *International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)*, 23(4).
- Tuncel, G., Yalçınkaya, Ö., Deniz, E., & Esmer, S. (2024). Simulation Modeling Frameworks for Single-Cycling and Double-Cycling Strategies in Container Terminals. *Journal of ETA Maritime Science*, 12(3).
- Türkiye Liman İşletmecileri Derneği (TÜRKLİM). (2025). *Sektör İstatistikleri*. <https://www.turklim.org/sektor-istatistikleri/> (Erişim tarihi: 03 Mayıs 2025)
- UNCTAD. (2023). *Review of Maritime Transport 2023*. United Nations Conference on Trade and Development.
- UTİKAD. (2024). *Türkiye Lojistik Sektörü Raporu 2024*. Uluslararası Taşımacılık ve Lojistik Hizmet Üretenleri Derneği.
- Yeşilbayrak, S., & Ertem, M. A. (2023). Dijital ikiz ve simülasyon modelleri ile Marmara liman operasyonlarının modellenmesi. *Akıllı Lojistik ve Tedarik Zinciri Dergisi*, 4(1), 77–92.

Fotovoltaik Sistemlerde Verimi Etkileyen Parametrelerin DeneySEL Olarak İncelenmesi

Hacer AKHAN^{1*}, Enes İsmet EZİK¹ ve Sefa EMİRALİ¹

¹ Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Edirne, TÜRKİYE

Makale Künye Bilgisi: Akhan, H., Ezik, E.İ., Emirali, S. (2025). Fotovoltaik Sistemlerde Verimi Etkileyen Parametrelerin DeneySEL Olarak İncelenmesi, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 26(1), 17-32.

Öne Çıkanlar

- PV panel yüzeyine gelen güneş ışınımını artırmak için eğim açısı optimum değerinde olmalıdır.
- Güneşten faydalanma oranı, güneş ışınları PV panel yüzeyine dik açıyla geldiğinde maksimumdur.
- Güneş ışınımı arttıkça üretilen güç artar, buna karşılık sıcaklık arttıkça güç üretimi azalır.

Makale Bilgileri	Öz
Makale Tarihçesi: Geliş: 18 Mayıs 2025 Kabul: 3 Haziran 2025	Günümüzde, tükenmekte olan konvansiyonel kaynakların yerine sonsuz enerji talebini karşılayacak yeşil enerji arayışı hala devam etmektedir. Ancak son otuz yıldır güneş enerjisinin elektrik enerjisi üretimine katkısındaki istikrarlı büyüme, güneş enerjisini uygulanabilir bir seçenek olarak gündeme getirmektedir. Ancak, düşük dönüşüm verimliliği nedeniyle fotovoltaik (PV) sistemlerden elde edilen güç düşüktür. Bu nedenle, güneş PV sisteminin verimliliğini artıran faktörler üzerinde bazı kritik analizlerin yapılması gerekmektedir. Bir fotovoltaik panel tarafından üretilen çıkış gücü birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörlerden bazıları, fotovoltaik malzemesinin türü, alınan güneş ışınımının yoğunluğu, panel sıcaklığı, bulut ve diğer gölgeleme etkileri, invertör verimliliği, toz-kirlilik faktörü, panel oryantasyonu ve eğim açısı, hava koşulları, coğrafi konum, kablo kalınlığıdır. Çalışmada, fotovoltaik sistemlerinin performansını önemli ölçüde etkileyen güneş ışınımı, gölgeleme, eğim açısı faktörleri deneySEL olarak incelenmiştir.
Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi; Fotovoltaik; Enerji verimliliği; Elektrik üretimi.	

Experimental Investigation of Parameters Affecting Efficiency in Photovoltaic Systems

Article Info	Abstract
Article History: Received: May 18, 2025 Accepted: June 3, 2025	Today, the search for green energy to meet the never-ending demand for energy, rather than depleting conventional resources, is still ongoing. However, the steady increase in the contribution of solar energy to electricity generation over the last three decades has put solar energy on the agenda as a viable option. However, the power generated by photovoltaic (PV) systems is low due to low conversion efficiency. Therefore, some critical analyses need to be carried out on the factors that improve the efficiency of the photovoltaic system. The output power generated by a photovoltaic panel depends on many factors. Some of these factors are type of photovoltaic material, intensity of received solar radiation, panel temperature, clouds and other shading effects, inverter efficiency, dust pollution factor, panel orientation and tilt angle, weather conditions, geographical location, cable thickness. In the article, solar radiation, shading and tilt angle factors, which significantly affect the performance of photovoltaic systems, will be experimentally investigated.
Keywords: Solar energy; Photovoltaic; Energy efficiency; Electricity generation.	

1. Giriş

Dünya 2035 yılı toplam enerji arzında, mevcut politikalara göre 18 676 Mtep olması gerekirken, yeni politikalar senaryosuna göre, %8 azalma ile 17.197 Mtep olacağı tahmin edilmektedir. Dünya birincil enerji arzı 1990 yılında 8.779 Mtep olan toplam birincil enerji arzı geçen 20 yıl sonra %45 artarak 2010 yılında 12.730 Mtep olmuştur. Mevcut politikalara göre, 2035 yılında dünya birincil enerji arzı 2010 yılına göre, %47 artarak 18.676 Mtep'e, Yeni Politikalar Senaryosuna göre ise Dünya toplam birincil enerji arzı %35 artışla 17.197 Mtep'e yükseleceği tahmin edilmektedir (IEA, 2018).

Geleneksel yakıtların tükenme olasılığının yüksek olmasıyla birlikte artan enerji talebi ve çevrenin kirliliğine yönelik artan endişeler, araştırmacıları yenilenebilir enerjilerden yararlanmak için yeni çözümler geliştirmeye yöneltmiştir. Ayrıca, fosil yakıtların tüketimi, küresel ısınmayı artıran ve tüm yaşamı tehlikeye atan sera gazlarının salınımına neden olmaktadır. Tüm bu faktörler göz önünde bulundurulduğunda yenilenebilir enerjiler, yeterli ve aynı zamanda temiz enerji sağlayacak en iyi çözümlerden biridir. Mevcut yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgar, hidro, yakıt hücresi vb.dir. Bunlar arasında güneş enerjisi, artan talebi karşılamak için kirlilik içermeyen, umut verici ve güvenilir bir yeşil kaynaktır (Bushong, 2016; Muneer, 2003). Fotovoltaik (PV) sistem kullanılarak güneş ışınımından doğrudan güç elde edilebilir. PV sistem, fotovoltaik etki prensibini kullanarak güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürür. PV hücresine her ışık düştüğünde, fotondan gelen enerji yük taşıyıcılarına aktarılır. Daha sonra yük taşıyıcıları, bağlantı noktasındaki elektrik alanı nedeniyle pozitif yüklü deliklere ve negatif yüklü elektronlara ayrılır. Bu, bir yük bağlanarak devreye kapalı bir yol sağlanırsa akım akışıyla sonuçlanır (Photovoltaic Effect , 2010; Afzaal ve O'Brien, 2006).

Özellikle PV enerjisi sistemi kurmak büyük kapasiteli ve maliyetli bir yatırım ise, sistemi mümkün olduğunca verimli hale getirerek, yatırım getirilerini en üst düzeye çıkarmak önem kazanmaktadır. Fotovoltaik sistemin verimliliğini çevre veya hava koşulları, ekipman ve sistemin kurulumu, invertörün verimliliği, güneş ışınlarının atmosferde kat ettiği yolun uzunluğu ve havanın kirlilik boyutu, güneş ışınım yoğunluğu-yansıtılmış ışınların eklenmesi, güneş ışınlarının geliş açısı, PV hücre yapısında kullanılan malzemelerin cinsi ve niteliği, sıcaklık, güneşlenme süresi gibi faktörlerden etkilenebilmektedir. Sistem verimi artan sıcaklık ile azalmaktadır. PV sistemi ile elektrik üretmek için ihtiyaç duyulan kaynağın güneş ışınları olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, daha fazla güneş ışını daha yüksek sıcaklık anlamına gelir ve güneş ışığı miktarının gerekliliğine rağmen, sıcaklık PV panelin verimliliğini etkiler. Bir PV panelinin ideal sıcaklığı 300 K'dir. Sıcaklık 300 K'den fazlaysa, panel çıkışı her derece artışı için amorf hücreler için %0,25 ve kristalin için %0,4-%0,5 azalır. Güneş panelinin aşırı ısınmasını önlemek için pasif veya aktif soğutma sistemi kullanılarak bir soğutma sistemi kullanılır (Dubey vd., 2013; Moharram, 2013). Fotovoltaik etki, güneş ışınlarının doğrudan elektriğe dönüştürülmesidir ve panelin üzerine bir gölgeleme oluştuğunda çıkış gücü hemen etkilenebilmektedir. Gölgeleme, uçan kuş veya düşen yapraklar gibi geçici olabilir veya toz birikimi gibi zamanla artabilir (Dolara, 2013; Tanesab, 2016). Panelin düzenli olarak temizlenmesi ve ağaçlardan veya binalardan kalıcı gölgeleme olmadan kurulması çözüm olabilir (Dewi vd.,2016; Kumar vd., 2018). Diğer bir faktör kablo kalınlığıdır. Ev aletleri 220 V gerilimde çalışır iken, PV sistemi tarafından üretilen DC voltajı 12V-48V'dur, bu nedenle aynı watt için sistemde daha yüksek akım vardır ve bu nedenle direnç daha yüksek olur (Gan vd., 2014; Malamaki ve Demoulias, 2014).

Literatürde PV sistemlerde verimi etkileyen faktörler üzerine yapılmış çalışmalar yer almaktadır. 2011

yılında Kaldellis ve diğ. (Kaldellis, ve Fragos, 2011) karşılaştırmalı deneyler sonucunda güneş fotovoltaik panellerinin yüzeyinde toz birikmesi $0,4 \text{ mg/cm}^2$ 'ye ulaştığında, enerji %30 oranında azalır veya verimlilik saatte %1,5 oranında azalmıştır. Jiang ve diğ. (Jiang vd., 2011) deneyler sonucunda toz kirliliğinin güneş fotovoltaik modüllerinin enerji üretim verimliliği üzerinde önemli bir etkisi olduğunu tespit etmiştir. Verimlilikteki düşüş, toz çökeltme yoğunluğu ile doğrusaldır. 2014 yılında Sulaiman ve diğerleri (Sulaiman, 2014) toz birikiminin ve farklı partikül türlerinin güneş pillerinin genel performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Toz birikintilerinin elektrik güç çıkışını önemli ölçüde azaltabileceğini bulmuşlardır. Qasem ve diğerleri (Qasem vd., 2014) toz birikiminin fotovoltaik modüllerin spektral geçirgenliği üzerindeki etkisini incelemiş ve analiz etmiştir. Küçük toz partiküllerinin fotovoltaik modüllerin ışık geçirgenliğini büyük partiküllere göre daha fazla azalttığını bulmuşlardır. Oh ve diğ. (Oh vd., 2020) fotovoltaik paneller ile ortam havası arasındaki sıcaklık gradyanının toz birikimi üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Yazdani ve diğerleri (Yazdani ve Yaghoubi, 2022), PV modül kirliliği hasar tahmininin hata boyutunu ve tozun PV güç üretimi üzerindeki etkisini değerlendirmek için kısa devre akım ölçüm yöntemini ve deneysel modeli kullanmıştır. Sonuçlar, fotovoltaik modüllerin günlük ortalama güç kaybının deney sırasında kısa devre akım kaybından yaklaşık %9 daha fazla olduğunu ve bu değer toz yoğunluğunun artmasıyla arttığını göstermektedir. PV panel güç düşüşü doğrusal değildir ve üstel modeller, PV modül kirlilik verimliliği kayıplarını tahmin etmede doğrusal ve güç fonksiyonu ilişkilerinden daha iyidir.

Sharma ve diğ., maksimum güç, performans oranı, verimlilik ve daha fazla spesifik üretim ve gelişmiş sistem verimliliği elde etmek için bir binadaki farklı yük senaryolarına dayalı bir güneş PV sistemini analiz etmiştir. Sistem, sabit eğim ve değişken azimut açılara sahip bir laboratuvar yükü için test edilmiş ve

sistem sıfır azimut açısına sahip olduğunda, verimlilikte %1,7'lik bir artışla spesifik üretimin maksimum olduğu bulunmuştur (Sharma vd., 2018). Asgharzadeh ve diğ., modül yüksekliğinin, eğim açısının ve albedonun güneş PV dizilerinin enerji verimi ve iki yüzeyli kazancı üzerindeki etkisini analiz etmiştir. 21'lik bir zemin albedosu ile büyük bir dizideki merkez modülün enerji üretiminin %7'ye kadar düşebileceği bulunmuştur (Asgharzadeh vd., 2018). Yakubu ve diğ., iki yüzeyli PV modüllerinden enerji üretimini artırmak için albedo eğim açısı ve modülün yerden yüksekliği gibi faktörlerin ayarlanması gerektiğini belirlemiştir. Farklı iklim koşullarında tek yüzü modüllere kıyasla iki yüzü modüllerde yıllık enerji veriminde yaklaşık %3,7 ila %4,3 artış olduğu sonucuna varılmıştır (Yakubu vd., 2022). Asgharzadeh ve diğ., mümkün olan en yüksek albedo değerinde ve yeterli yükseklikte kurulan modüllerin daha yüksek verimliliğe sahip olduğunu keşfetmiştir (Asgharzadeh, 2017). Ghenai ve diğerleri, RSM kullanarak eğim açısı, yükseklik ve albedonun iki yüzeyli güneş PV sistemlerinin performansı üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Bulgular, iki yüzeyli PV enerji verimi ile albedo arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermiştir (Ghenai vd., 2021). Stein ve diğ., iki yüzeyli PV modül sisteminin aynı yönelimli özdeş modüllerden daha fazla enerji ürettiğini gözlemlemiştir (Stein vd., 2018). Al-Turjman ve diğ., yaşam döngüsü tasarrufu 788 \$/yıl, geri ödeme süresi 10,9 yıl, NPV ve Uluslararası Getiri Oranı (IRR) sırasıyla 11000 \$ ve %10 civarında olan ve CO₂ emisyonu içermeyen sürdürülebilir bir çevre sağlayan bir sistem önermiştir (Al-Turjman vd., 2020). Jang ve diğ., yansıtıcı malzemenin boyutunu, dikey kurulumu, sıcaklık uyumsuzluğu için modüllerin konumunu ve PM konsantrasyonunu değiştirerek iki yüzeyli bir PV modülünü ve iki yüzeyli bir PV sistemini denemek için üç test yatağı kullanmıştır. İki yüzeyli kazanç, PM10 konsantrasyonu 100 g/m³ değiştiğinde açık gökyüzü koşullarında %4 artmıştır. PM 10 konsantrasyonu

bulutlu koşullarda 100 g/m³ değiştiğinde, çift yüzeyli kazanç %0,9 düşmüştür (Jang ve Lee, 2020). Sreenath ve diğ., zemin yüzeyine yüksek albedo faktörüne sahip iki yüzeyli bir güneş PV modülü kurmanın enerji çıkışını en üst düzeye çıkarmak için uygun olduğunu belirlemiştir. En düşük 0,15 albedo faktörünün yıllık 164,5 MWh enerji sağlayacağı tahmin edilmektedir. En yüksek 0,85'lik bir albedo faktörünün yıllık 175,8 MWh enerji üreteceği tahmin edilmektedir (Sreenath, 2021). Sanchez ve diğ., açıklık yüksekliği, albedo, eğim ve azimut açısının iki yüzeyli PV enerji hesaplaması üzerindeki etkisini araştırmak için mevcut algoritmaları kullanmıştır (Sanchez vd., 2022). Birçok araştırmacı işletim ve tasarım parametrelerini optimize etmek için RSM kullanmıştır. Varun ve diğ., iki yüzeyli modüllerin dikey ve enlem montajındaki performansını incelemek için PVsyst'i kullanmış ve enlem eğimli iki yüzeyli bir panelin dikey olarak yönlendirilmiş bir N-S panelden 1000 kWp daha fazla ürettiğini belirlemiştir (Manikandan vd., 2020). Osmani ve diğ., güneş PV eğim açısı değişiminin PV ağının maliyet etkinliği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sonuçlar, Tripoli, Belfort ve Tantan için sırasıyla seviyelendirilmiş enerji maliyetinin %4,32, 3,73 ve 4,35 oranında azaldığını ve üretilen gücün %49,67, 50,36 ve 26,83 oranında arttığını, güç maliyetinin ise %4,43, 4,48 ve 4,47 oranında düştüğünü göstermiştir (Osmani vd., 2021). Kamalapur ve diğ. Hindistan'daki kırsal elektrifikasyonun özelliklerini ve güneş PV ev sistemlerinin fizibilitesini değerlendirmiştir (Kamalapur ve Udaykumar, 2011).

Yapılan çalışmada, Edirne iklim koşulları için PV panel verimini etkileyen parametreler deneysel olarak incelenmiştir. Saha çalışmalarında ölçülen veriler kullanılarak, sistemin hangi koşullarda daha yüksek verimle çalıştığı tespit edilmiş, optimum çalışma parametreleri belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen bulgular, Edirne ve benzer iklim özelliklerine sahip iklim bölgeleri için örnektir.

2. Teorik Bilgiler ve Deneysel Çalışmalar

Fotovoltaik sistemlerde verimi etkileyen parametreleri Edirne iklim koşulları için saha uygulamaları ile belirlenmesi ve performans analizi yapılması amacı ile teorik analiz, kontrollü veri alma, deneysel analiz ve sonuçların değerlendirilmesi aşamaları gerçekleştirilmiştir. Teorik analiz kapsamında güç ve verim hesaplamaları yapılmıştır. Kontrollü veri alma ve ölçme aşamasında Teorik analiz yapıldıktan sonra mevcut PV sistem üzerinde kontrollü ölçümler yapılmış, sistem özellikleri tespit edilmiştir. Ölçme işlemleri için çok fonksiyonlu ölçüm cihazları kullanılmıştır. Deneysel analizde Sistemden ölçülen gerçek veriler ile hesaplamalar yapılmış ve sistem performansı tespit edilmiştir. Deneysel analiz sonuçları değerlendirilmiş ve sistemde yapılabilecek iyileştirmeler önerilmiştir.

2.1. PV Panel Verimini Etkileyen Faktörler

Tablo 1'de PV panel verimini etkileyen iklim ve coğrafi konum, sistem özellikleri, çevresel ve meteorolojik koşullar yer almaktadır. Ayrıca, üretimdeki farklılıklar nedeniyle aynı tip fotovoltaik panellerin elektriksel özellikleri değişiklik gösterebilir. Modüller arasındaki bu farklar, performans kayıplarına neden olabilir.

Tablo 1. PV sistem verimini etkileyen faktörler

PV sistem verimini etkileyen faktörler	
Sistem Özellikleri	PV hücre malzemesi
	Şarj kontrolörünün I-V karakteristikleri üzerindeki etkileri
	İnvertör verimi
	Akü verimi
	PV panel eğim açısı, azimut açısı
	Kablo direnci
	PV panel sıcaklığı
	PV panelin yaşı ve degradasyon oranı
Coğrafi konum, çevresel ve meteorolojik koşullar	Gölgeleme faktörü
	Güneş ışıınımı ve güneşlenme süresinin etkisi
	Kirlilik faktörü
	Hava sıcaklığı, rüzgar hızı
	Kurulumun yapıldığı lokasyon

2.1.1. PV hücre malzemelerinin cinsi ve niteliği

PV hücre yapısını oluşturan silikon maddenin tek kristalli veya çok kristalli olmasına ya da hücrenin yapısında kullanılan maddenin özelliğine göre de verim değişmektedir. PV panel malzemelerinden Polikristallerde %13-16, monokristallerde %18-24 verimlilik ve ince filmlerde %7-13 verimlilik görülmektedir.

2.1.2.Şarj kontrolörünün I-V karakteristikleri üzerindeki etkileri

Şebekeden bağımsız sistem, panellerin aküye bağlanmasını gerektirir ve üretilen voltaj akünün standart voltajına ayarlanacaktır. Bu nedenle, akünün her zaman tam şarjlı durumda olması istenir; ancak bu akünün normal durumu değildir. Bataryayı maksimum voltaj oranında tutmak için, sistem verimliliğini artırmak amacıyla bir MPPT (Maksimum Güç Noktası İzleme) Şarj Kontrol Cihazı gereklidir. MPPT, PV panel voltajını her zaman maksimum güç noktasına yakın tutmaya çalışarak çok az güç kaybıyla DC'den DC'ye voltaj dönüştürücü olarak da işlev görür.

2.1.3. İnvertör veriminin etkisi

PV sistemi DC gerilim üretirken ev aletlerinin çoğu AC yüklerdir. Bu nedenle bir invertöre ihtiyaç vardır. İnvertör verimliliği %80-90 civarındadır. Şebekeye bağlı bir sistem için invertör doğrudan şebekeye bağlanır ve maksimum güç noktasını (MPP) takip etmesi ve DC akımını şebekenin AC akımına dönüştürmesi gerekir. Bu dönüşüm, şebeke ile aynı voltaj ve frekansta olması için senkronizasyon gerektirir. Aşırı ısınan invertör üretilen gücü azaltacaktır.

2.1.4. Akü veriminin etkisi

Şebekeden bağımsız sistem, bir PV sisteminin dalgalanan üretilen gücü nedeniyle yedek depolama gerektirir. Çünkü PV sisteminin güç üretimi büyük

ölçüde PV panellerine ne kadar ışınlım düştüğüne bağlıdır. Bir akünün ömrü PV panellerin ömrünün çok altındadır. Bu nedenle akü, PV sistemi daha pahalı hale getiren bir faktördür.

100 amperlik bir sulu akünün kullanım kapasitesi %50 seviyesindeyken, aynı kapasitedeki jel akünün kullanım kapasitesi %80'ler seviyesindedir (isosenerji.com/gunes-enerjisi). Akü kayıpları yaklaşık %10 civarındadır (Öztürk ve Dursun, 2011).

2.1.5. PV panel eğim açısı, azimut açısı

Bilimsel çalışmalar incelendiğinde (Duffie, vd., 2013; Wald, 2021; Grygiel vd., 2021; Winter vd., 1991; Cooper, 1969; Liu vd., 2024; Ruan vd., 2024; Vasilakopoulou, 2023; Barbón vd., 2022), fotovoltaik modülün verimliliğinin büyük ölçüde eğim açısına bağlı olduğu görülmektedir. Bazı çalışmalarda eğim açısı matematiksel ifadelerle temsil edilmektedir. Eğim açısının değeri, modülün türüne, iklim bölgesine, güneş radyasyonunun yoğunluğuna, hava koşullarına ve modülün kurulduğu coğrafi enleme bağlı olarak değişmektedir.

Yılın her günü için PV panelin optimum eğim açısı yerel olarak Denklem 1 ile hesaplanmaktadır (Senpınar, 2018).

$$Eğim\ Açısı\ (\alpha) = 90^\circ - \beta N \quad (1)$$

βN güneş yükseklik açısı Denklem 2, deklinasyon açısı δ Denklem 3 ile ifade edilmektedir. L kurulum yapılan sahanın enlem açısı, n 1 Ocak'tan itibaren gün sayısıdır (Senpınar, 2018).

$$\beta N = 90^\circ - L + \delta \quad (2)$$

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] \quad (3)$$

2.1.6. Kablo Direncinin Etkisi

Kablolar elektrik sisteminde enerji kayıplarının kaynaklarından biridir. PV sisteminde, kablolardan kaynaklanan kayıplar PV panelleri dizisindeki DC kayıpları ve bir invertörün çıkışındaki AC kayıplarıdır. Bir kablodaki gerilim düşüşü Denklem 4 ile hesaplanır (Dewi vd., 2018).

$$\Delta V = b \left(\rho_1 \frac{L}{S} \cos \varphi + \lambda L \sin \varphi \right) I_B \quad (4)$$

Burada V gerilim (3 faz için faz-faz gerilimi ve tek faz için faz-nötr gerilimi) ve ΔV gerilim düşüşü, b kablo uzunluk faktörü, L kablo uzunluğu, S mm cinsinden kablo kesiti, $\cos \varphi$ güç faktörü ve $\sin \varphi = \sin(\arccos(\cos \varphi))$, λ uzunluk birimi başına reaktans, I_B amper cinsinden akım ve ρ_1 belirli bir sıcaklık için ohm.mm²/m cinsinden özdirençtir. ρ_1 , Denklem 5 ile hesaplanır (Dewi vd., 2018).

$$\rho_1 = \rho_0 (1 + T_C (T_1 - T_0)) \quad (5)$$

Denklem 8'de ρ_0 , T_0 'daki direnç ($T_0 = 20^\circ\text{C}$); T_C , $^\circ\text{C}$ cinsinden derece başına sıcaklık katsayısıdır. T_1 ise kablo sıcaklığı (varsayılan değer 100°C 'dir). Kablo ısınması uygulamada kaçınılmazdır, ısı kablonun direncini artırır ve sonuçta enerji kayıplarına neden olur. Dirençli ısıtma nedeniyle bir kablodaki enerji kayıpları aşağıdaki Denklem 6 ile ifade edilir (Dewi vd., 2018).

$$E = a \times R \times I_B^2 \quad (6)$$

Burada E kablolardaki enerji kaybı (Watt), a hat katsayısı sayısıdır (tek fazlı devre için $a = 1$ ve 3 fazlı devre için $a = 3$). R, Denklem 7 ile ifade edilen dirençtir (Dewi vd., 2018).

$$R = b \times \rho_1 \times \frac{L}{S} \quad (7)$$

2.1.7. PV panel sıcaklığın etkisi

PV panel bir dizi güneş enerjisinden oluşur ve PV panel malzemesi bir yarı iletkenidir. Yarı iletken cihazlar,

soğuma sırasında yalıtkan, ısınma sırasında ise iletken olarak hareket edeceğinden sıcaklık değişimlerine karşı hassastır. Bununla birlikte, optimum güç çıkışı üretmek için sıcaklık standardı 300 K veya yaklaşık 25°C 'dir. Bir silikon PV panel aşırı ısındığında, daha fazla akım ve daha az voltaj üretir, voltaj düşüşü meydana gelir ve üretilen güç azalır. Maksimum nokta gücü, akım ve gerilim Denklem 8 ile hesaplanır (Dewi vd., 2018).

$$P_{mp} = I_{mp} \times V_{mp} = FF \times I_{SC} \times V_{OC} \quad (8)$$

Denklem 11'de, P_{mp} maksimum güç, I_{mp} maksimum akım, V maksimum gerilim, FF dolum faktörü, I_{SC} kısa devre akımı ve V_{OC} açık devre gerilimidir.

IV-Eğrisi akım (I) ve gerilim (V) ile tanımlanır. I ve V ideal bir diyot olarak PV panel modellemesi ile ilgilidir ve PV panel tarafından üretilen maksimum akım ve voltajdır. Her ikisi de çalışma noktasındaysa, üretilen güç sıfırdır. I ve V'yi birbirine bağlayan parametre FF olarak adlandırılır ve PV panel tarafından üretilen maksimum gücü belirler. Denklem 9, PV hücrenin verimini ifade etmektedir (Dubey vd., 2013).

$$\eta_{cell} = \eta_{T_{ref}} [1 - \beta_{ref} (T_{cell} - T_{ref})] \quad (9)$$

$$T_{cell} = T_{amb} + (0.0256 \times I) \quad (10)$$

$$\beta_{ref} = \frac{1}{T_0 - T_{ref}} \quad (11)$$

Burada η_{cell} uygulanan bir PV modülünün net verimliliği, $\eta_{T_{ref}}$ referans sıcaklıktaki T_{ref} PV modül verimliliği, β_{ref} sıcaklık katsayısı, T_{cell} mevcut PV panel sıcaklığı, T_{amb} ortam sıcaklığı, T_0 PV panel verimliliğinin sıfır olduğu en yüksek sıcaklıktır.

Aşırı ısınan güneş panellerinden kaynaklanan verimlilik ve çıkış düşüşü, PV panellerin ortam sıcaklığı 300K'ya kadar soğutulmasıyla aşılabılır. PV panelleri soğutma yöntemleri pasif ve aktif soğutma yöntemleridir. Pasif soğutma yöntemi, PV paneller üzerinde soğuk rüzgarın esmesine izin vermek veya farklı kaburga açılara sahip bir ısı emicinin kurulması

gibi güç tüketmeden PV panelleri doğal olarak soğutmaktır. Aktif soğutma yöntemi, PV panellerini soğutmak için ek cihazlar kullanılarak gerçekleştirilir, örneğin panellerin üzerine su akıtmak için bir pompa kullanmak gibi. Bu nedenle bu yöntem güç tüketir.

2.1.8. PV Panelin yaşı ve degradasyon oranı

Degradasyon, güneş panelinin zamanla elektrik üretme kapasitesinin azalmasıdır. Her yıl panelin verimliliği az da olsa düşer. Bu düşüş, yapısal yıpranma, UV ışınları, sıcaklık döngüleri, nem ve çevresel etkiler gibi nedenlerden kaynaklanır.

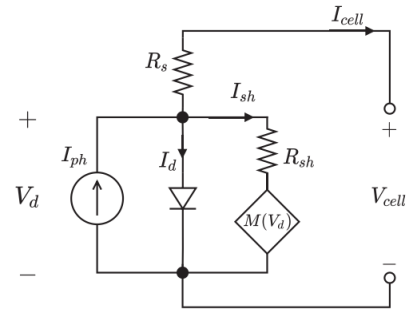
Ortalama degradasyon oranları, Monokristal ve PERC paneller için yılda yaklaşık %0.3 – %0.5, polikristal paneller için yılda yaklaşık %0.5 – %0.8, ince film paneller için yılda yaklaşık %1 – %1'dir.

2.1.9. Gölgeleme faktörü

PV sistemi kullanılarak elektrik üretimi hava koşullarından doğrudan etkilenir. Güneşli günlerde, üretilen güç maksimum olacaktır ve ani bulut gölgelemesi PV sistem verimliliğini ve çıktısını azaltacaktır. Gölgeleme faktörü, PV panellerine gelen güneş ışınımını engelleyen herhangi bir şeye genişletilir. Gölgeleme, zamanla sistemin verimliliğini azaltacak olan birikmiş tozdan kaynaklanabilir. Kısmi gölgeleme PV panellerin üretimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Gölge hücre, gölgesiz hücreler tarafından üretilen elektrik gücünü emer ve bu durum PV panellere zarar verebilecek sıcak noktalara neden olur.

Gölgeleme etkisi, güç kayıplarını değerlendirmek için Bishop Modeli ile modellenmiştir. Şekil 1'de yer alan Bishop modelinin devre şeması, Tek Diyotlu Model kullanılarak oluşturulan PV hücre modelini içerir. Tek Diyotlu Model, foto-indüklenmiş akım I_{ph} , yarı-iletken malzeme (Shockley diyot ile temsil edilir) ve R_s ve R_{sh} dirençleri ile gösterilen dönüşüm enerji kayıplarını

içerir. R_s bir hücre seri direnci ve R_{sh} hücre kısa devre direncidir.



Şekil 1. Bishop PV hücre modeli

Bishop modeline göre, ters çalışma modu I_{sh} ile gösterilen R_{sh} direncinden geçen akıma bağlıdır (Restrepo-Cuestas ve Montano, 2024). Bu nedenle, I_{sh} akımını diyot gerilimi (V_d) ve yarı iletken malzemenin kırılma (zener) gerilimi (V_{br}) arasındaki ilişkiyle ilişkilendiren a adlı bir omik faktör içerir. Ek olarak, m adında bir eğri uydurma faktörü içerir. PV hücre çıkış akımı (I_{cell}) Eşitlik (12)'de gösterildiği gibi hesaplanabilir, burada I_d diyot gerilimine bağlı olan diyottan geçen akımdır ($V_d = V_{cell} + I_{cell}R_s$); I_{sat} doyumluk akımını gösterir ve n idealite faktörüdür. Elektron yükü olarak $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ m² kg/s², K Boltzmann sabiti ve T Kelvin (K) cinsinden PV hücre sıcaklığını gösterir. I_d diyot gerilimi Denklem 13 ile, I_{sh} Denklem 14 ile ifade edilir (Restrepo-Cuestas ve Montano, 2024).

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (12)$$

$$I_d = I_{sat} \left[e^{\left[\frac{q(V_{cell} + I_{cell}R_s)}{nkT} \right]} - 1 \right] \quad (13)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{cell} + I_{cell}R_s}{R_{sh}} \left[1 + a \left(1 - \frac{V_{cell} + I_{cell}R_s}{V_{br}} \right)^{-m} \right] \quad (14)$$

Eşitlik 15, 16 ve 17, I_{cell} ile PV hücre voltajı (V_{cell}) arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığını, üstel bir fonksiyon ile ilişkilendirildiğini göstermektedir.

2.1.10. Güneş ışınlamı ve güneşlenme süresinin etkisi

Kurulum yapılan lokasyonun güneş enerjisi potansiyeline bağlı olarak güneş ışınlamı arttıkça verim artmaktadır. Güneşlenme süresi, bir bölgenin gün boyunca doğrudan güneş ışığı aldığı zaman dilimini ifade eder. Güneşlenme süresi arttıkça, panelin güneş enerjisi toplama kapasitesi artar.

2.1.11. Kirlilik faktörü

PV modüllerinin yüzeyinde toz birikmesi, PV dönüşüm verimliliğindeki düşüşün başlıca nedenlerinden biridir (Cabrera-Tobar vd., 2016). Partikül boyutu ve tozun kimyasal bileşimi PV modül performansını etkiler ve toz özelliğinin PV hücrelerinin performansı üzerindeki etkisi göz ardı edilemez (Piedra vd., 2018). Toz birikimi, PV modülünün yüzeyinden dağınık radyasyonun yansımaya, saçılmasına ve iletimine yol açarak PV paneline ulaşan güneş radyasyonu miktarını azaltır (Yao vd., 2022; Xu vd., 2020). Güneş radyasyonu PV modülünü ısıtladığında, bir kısmı elektrik enerjisine dönüştürülür ve diğer bir kısmı da ısıya dönüştürülerek PV modülünün sıcaklığının artmasına neden olur (Browne, 2016). Yüksek modül sıcaklıkları PV modül performansını önemli ölçüde düşürür (Zakharchenko vd., 2004; Zhang vd., 2012) ve tozun varlığı sıcaklığı daha da artırarak bu sorunu daha da kötüleştirir (Gostein vd., 2013; Dahliou, 2022).

2.1.12. Hava sıcaklığı, rüzgar hızı

Sıcaklık etkisi panellerin oluştuğu fotovoltaiik hücrelerin yarı iletken olmasından kaynaklanmaktadır. Sıcaklık yarı iletken malzemedeki akım geçişine doğrudan etki etmektedir. Düşük sıcaklık verimi olumsuz etkilemezken yüksek sıcaklıklar verimi olumsuz yönde etkilemektedir.

Rüzgar panel üzerindeki tozun birikiminde önemli rol oynar, Rüzgarın esme yönü ve hızı tozun panel üzerinde kalıp kalmayacağını belirler. Aynı zamanda

hızlı esen rüzgarlar sayesinde panel yüzey sıcaklığı da düşmektedir. Bu da panelin verimini artırmaktadır.

2.1.13. Kurulumun yapıldığı lokasyon

Güneş panelleri, doğrudan güneş ışığına bağlı olarak çalıştığından, panelin kurulduğu yerin konumu direkt verime etki eder. Enlem, yani dünyanın ekvatora olan uzaklığı, bir bölgenin güneş ışınlamını yıl içinde ne kadar dik aldığı ile ilgilidir. Ekvatora yakın bölgelerde güneş ışınlamı daha dik geldiği için enerji verimi daha yüksek olur. Yükseklik arttıkça atmosferin yoğunluğu azalır, bu da güneş ışınlamının daha az kırılması demektir. Aynı zamanda hava kirliliği ve nem oranı da düşer, bu da ışığın daha doğrudan panele ulaşmasını kolaylaştırır.

2.2. Deneysel Çalışmalar

Deneyler Edirne iklim koşullarında yapılmıştır. Edirne, 41°- 40° kuzey paraleli ve 26°- 34° doğu meridyeni arasında yer almaktadır (www.edirne.bel.tr, 2025) ve 6.098 km² yüzölçümüyle deniz seviyesinden yaklaşık 41 metre yüksektir. Şehir bulunduğu konum itibarıyla hem Akdeniz iklimi hem de Orta Avrupa'ya özgü olan karasal iklimin etkisi altında kalan bir geçiş bölgesidir. Yaz döneminde 30 °C'nin altına düşmeyen sıcaklıklarla, haziran ayında m² 'ye düşen en yüksek ışınlam değerlerine ulaşırken, temmuz ayında ise en uzun güneşlenme süresi görülmektedir.

PV sistem, Merkez/Edirne lokasyonuna şebekeden bağımsız olarak kurulmuştur. 24 V, 280 W gücünde polikristal PV panel, 30 A'lık şarj kontrol cihazı, 1200 W 24 V'luk invertör ve aküler sistem elemanlarını oluşturmaktadır. 12 V ve 100 Ah'lık 2 adet jel akü birbirine seri bağlanmıştır. Tablo 2'de PV panel teknik özellikleri yer almaktadır.

Tablo 2. PV panel teknik özellikleri

Özellik	Değer
Hücre Tipi	Polikristal
Hücre dizilişi	60 (60x1)

Boyutlar	1640x990x35 mm
Ağırlık	19 kg
Ön kaplama	3,2 mm temperli cam
Çerçeve malzemesi	Alaşımlı alüminyum
J-box	IP67
Kablo	4 mm ² (IEC)/12AWG(UL), 900 mm
Nominal Max. Güç	280 W
Optimum Çalışma Gerilimi	31,2 V
Optimum Çalışma Akımı	8,97 A
Açık Çevrim Gerilimi (Voc)	37,8 V
Kısa Çevrim Akımı (Isc)	9,50 A
Modül verimi	%19
Çalışma Sıcaklığı	-40°C~+85°C
Güç Toleransı	0 ~ 5 W

Test sahasında yapılan deneysel çalışmalarda PV panel eğim açısı 0°, 10°, 20°, 30° ve 40° eğim açılarında farklı hava koşullarında test edilmiştir. Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da farklı eğim açıları için güneşli, gölgeli ve karlı hava koşullarında çalıştırılan PV paneller görüntülenmiştir.



Şekil 2. Güneşli, gölgeli ve karlı hava koşullarında çalışan 40° eğim açılı PV panel



Şekil 3. Güneşli, gölgeli ve karlı hava koşullarında çalışan 30° eğim açılı PV panel



Şekil 4. Güneşli, gölgeli ve karlı hava koşullarında çalışan 20° eğim açılı PV panel



Şekil 5. Güneşli, gölgeli ve karlı hava koşullarında çalışan 10° eğim açılı PV panel

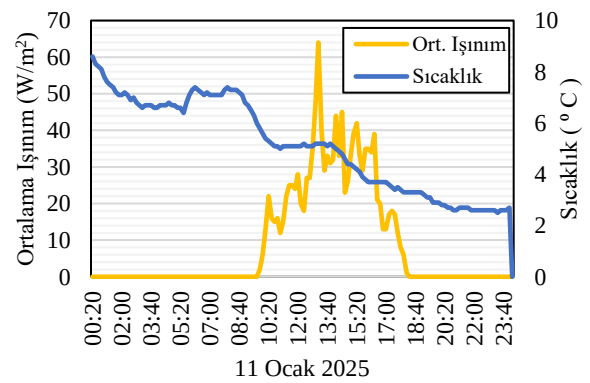


Şekil 6. Güneşli, gölgeli ve karlı hava koşullarında çalışan 0° eğim açılı PV panel

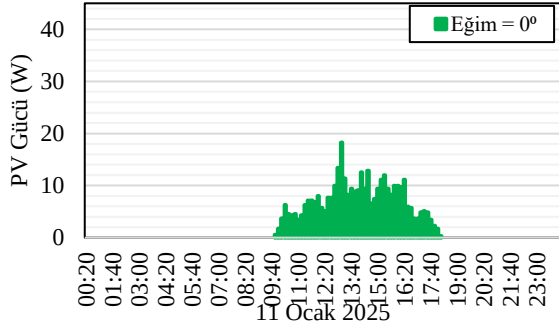
Deneysel çalışmalar boyunca, Trakya Üniversitesi meteoroloji istasyonu ile kurulum yapılan alandaki güneş ışınlamı, dış ortam sıcaklığı, rüzgar hızı ve yönü, dış ortam nem değeri 7 gün 24 saat her türlü hava koşulunda kesintisiz olarak ölçülmüştür.

3. Bulgular ve Tartışmalar

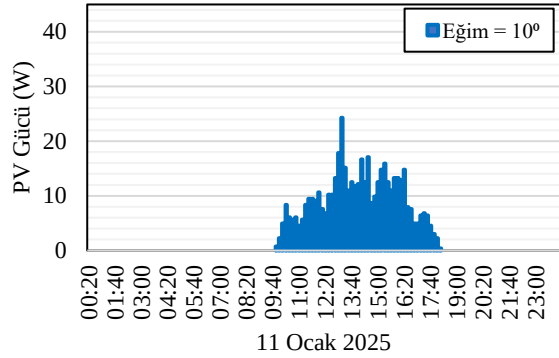
Şekil 7'de 11 Ocak 2025 için kurulum yapılan sahada ortalama güneş ışınlamı ve hava sıcaklığı değişimi verilmiştir. 11 Ocak 2025 için Şekil 8'de 0° eğim açılı, Şekil 9'da 10°, Şekil 10'da 20°, Şekil 11'te 30° ve Şekil 12'de 40° için PV panelin ürettiği elektrik gücü değişimi yer almaktadır.



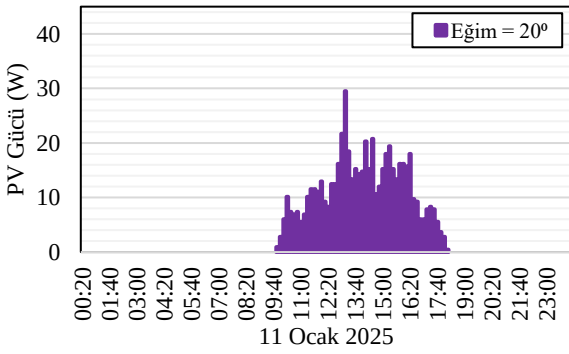
Şekil 7. 11 Ocak 2025 için kurulum yapılan sahada ortalama güneş ışınlamı ve hava sıcaklığı değişimi.



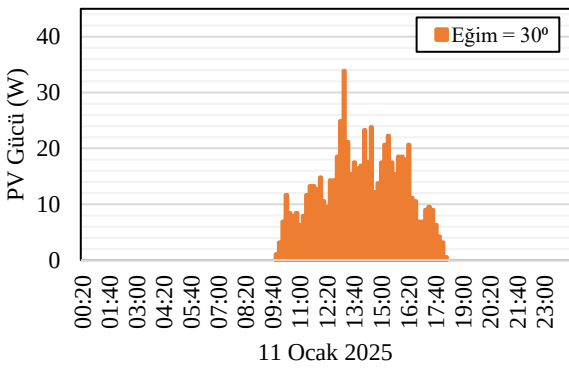
Şekil 8. 11 Ocak 2025 için 0° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü



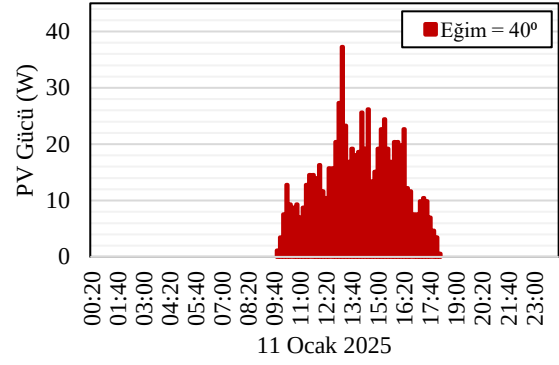
Şekil 9. 11 Ocak 2025 için 10° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü



Şekil 10. 11 Ocak 2025 için 20° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü

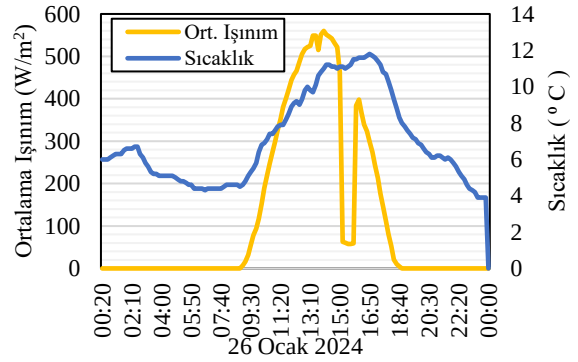


Şekil 11. 11 Ocak 2025 için 30° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü

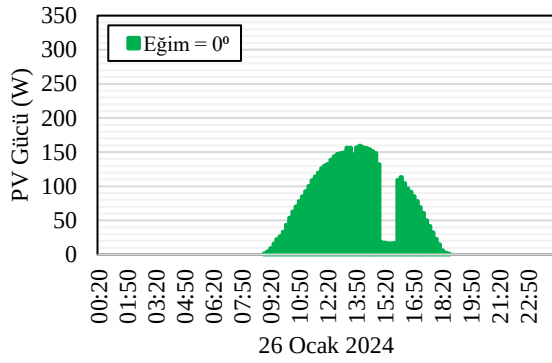


Şekil 12. 11 Ocak 2025 için 40° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü

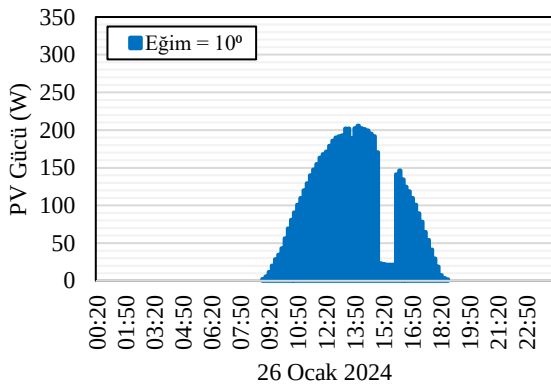
Şekil 13'te 26 Ocak 2025 için kurulum yapılan sahada ortalama güneş ışıınımı ve hava sıcaklığı değişimi verilmiştir. 26 Ocak 2025 için Şekil 14'te 0° eğim açılı, Şekil 15'te 10°, Şekil 16'da 20°, Şekil 17'de 30° ve Şekil 18'de 40° için PV panelin ürettiği elektrik gücü değişimi yer almaktadır. Öğleden sonra 15.00-15.40 aralığında panel gölge etkisinde kalmış ve üretilen güç yaklaşık olarak 6 kat azalmıştır. Gölgeleme faktörünün enerji üretimine etkisi büyüktür. Güneş ışıınımı arttıkça doğru orantılı olarak güç üretimi de artmaktadır.



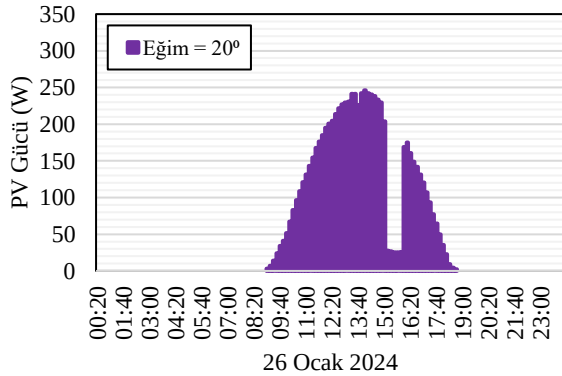
Şekil 13. 26 Ocak 2025 için kurulum yapılan sahada ortalama güneş ışıınımı ve hava sıcaklığı değişimi (Gölgeli ortam koşulunda)



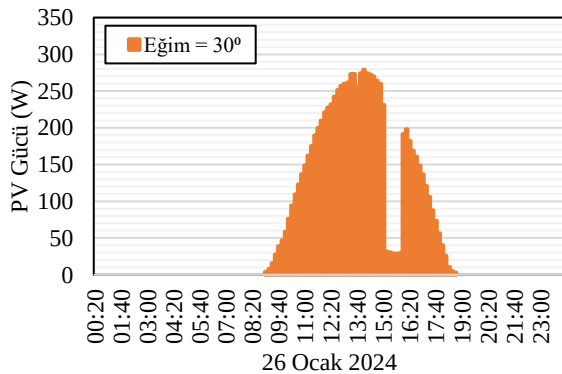
Şekil 14. 26 Ocak 2025 için 0° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü (Gölgeli ortam koşulunda)



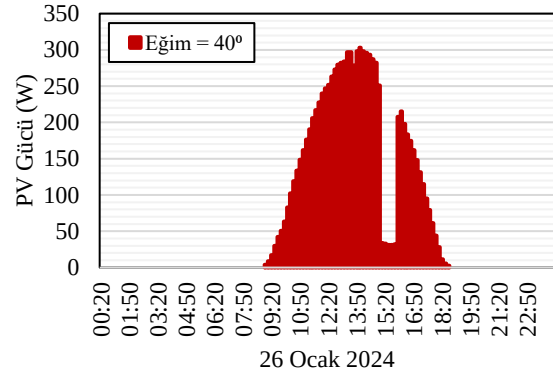
Şekil 15. 26 Ocak 2025 için 10° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü (Gölgeli ortam koşulunda)



Şekil 16. 26 Ocak 2025 için 20° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü (Gölgeli ortam koşulunda)



Şekil 17. 26 Ocak 2025 için 30° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü (Gölgeli ortam koşulunda)



Şekil 18. 26 Ocak 2025 için 40° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü (Gölgeli ortam koşulunda)

4. Sonuçlar

Geleneksel fosil yakıtların azalması ve küresel ısınmaya yol açan hava kirliliğinin artması konusunda hükümet ve insanların bilinçlenmesi nedeniyle PV sistemlerinin geliştirilmesi ve kurulması hızla artmaktadır. PV Sistemi, Edirne gibi yıl boyunca uzun süre güneş ışığı alan bir şehir için en iyi alternatiftir. Bununla birlikte, PV enerji santralinin çıktısı ve verimliliği hala minimum düzeydedir. Silikon bazlı güneş panelleri için en iyi verimlilik teorik olarak %29 iken gerçekte %27'den azdır. Bu düşük verimlilik, PV sistemine kurulan her bileşenin diğer kayıplardan sorumlu olması nedeniyle daha az verimli hale gelmektedir. Verimliliğe ve çıkış kayıplarına katkıda bulunanlar, PV panellerin ortam sıcaklığının ötesindeki yüzey sıcaklığı, toz gölgeleme ve cihazların verimliliğine yedek depolama için batarya, yani invertör, kablo direnci ve şarj kontrolörüdür. PV panellerin sabit eğim açısı, paneller tarafından üretilen elektrik miktarını doğrudan etkiler, bu nedenle PV yüzeyine gelen güneş ışınımını artırmak için eğim açısı optimum değerde olmalıdır. Verimlilik sorunlarına rağmen PV sistemler, güneş ışınımının sınırsız ve çevre dostu olması nedeniyle Edirne'de ve çevresindeki uzak bölgelerde bir enerji santrali için hala en iyi alternatiftir. Yapılan deneysel çalışmalara göre Aralık ve Ocak ayı Edirne iklim koşulları için en yüksek güç üretimi PV panel eğim açısı 40° için elde edilmiştir. Güneş ışınımı

arttıkça üretilen güç artmış, buna karşılık sıcaklık arttıkça güç azalmıştır. Gölgeleme etkisindeki panelde güç üretimi azalmaktadır.

Teşekkür

Trakya Üniversitesi Rektörlüğüne mali desteklerinden dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

Çıkar Çatışması: Yazarların beyan edilecek herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Veri Paylaşım Bildirimi: Veriler makul talepler üzerine paylaşılabılır.

Yazar Katkıları: Kavram: H.A., Tasarım: H.A., Uygulama: H.A., E.İ.E., S.E., Malzeme temini: TÜBAP, Veri toplama: H.A., Veri analizi/yorumlanması: H.A., E.İ.E., S.E., Yazım: H.A., Eleştirel değerlendirme: H.A.

Mali Destek: Bu çalışma, Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (TÜBAP) tarafından Öğrenci Bilimsel Araştırma Desteği ile finanse edilmiştir (Proje No: TÜBAP-2024/202).

ORCID

Hacer Akhan, 0000-0002-7896-6441

Enes İsmet Ezik, 0009-0002-2973-3251

Sefa Emirali, 0009-0009-4165-2121

Kaynaklar

Afzaal, M., O'Brien, P. (2006). Recent developments in II–VI and III–VI semiconductors and their applications in solar cells, J Mater Chem, 17.

Al-Turjman, F., Qadir, Z., Abujubbeh, M., Batunlu, C. (2020). Feasibility analysis of solar photovoltaic-wind hybrid energy system for household applications, Comput Electr Eng, 86. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106743>.

Asgharzadeh, A.. (2017). Analysis of the impact of installation parameters and system size on bifacial gain and energy yield of PV systems. In: Proceedings of the IEEE 44th photovoltaic specialist conference, 3333–8. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2017.8366690>.

Asgharzadeh, A., Marion, B., Deline, C., Hansen, C., Stein, J.S., Toor, F. (2018). A sensitivity study of the impact of installation parameters and system configuration on the performance of bifacial PV arrays, IEEE J Photovoltaics, 8(3), 798–805. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2819676>.

Barbón, A., Ghodbane, M., Bayón, L., Said, Z. (2022). A general algorithm for the optimization of photovoltaic modules layout on irregular rooftop shapes. Journal of Cleaner Production, 365, 132774. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132774>

Browne, M.C., Norton, B., McCormack, S.J. (2016). Heat retention of a photovoltaic/thermal collector with PCM, Sol Energy, 133, 533–48. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.024>.

Bushong, S. (2016). Advantages and disadvantages of a solar tracker system, Sol Power World 2016.

- Cabrera-Tobar A, Bullich-Massagué E, Aragüés-Penalba M, Gomis-Bellmunt O. (2016). Topologies for large scale photovoltaic power plants. *Renew Sustain Energy*, 59, 309–19. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.362>.
- Cooper, P. I. (1969). The absorption of radiation in solar stills, *Solar Energy*, 12 (3), 333–346. [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(69\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0038-092x(69)90047-4)
- Dahlioui, D., Laarabi, B., Barhdadi, A. (2022). Review on dew water effect on soiling of solar panels: towards its enhancement or mitigation, *Sustain Energy Technol Assessments*, 49, 101774. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101774>.
- Dewi, T., Risma, P., Oktarina, Y., Roseno, M.T., Yudha, H.M., Handayani, A.S., Wijanarko Y. (2016). A Survey on Solar Cell; The Role of Solar Cell in Robotics and Robotics Application in Solar Cell Industry in Proc Forum in Research, Science, and Technology FIRST C19-C22.
- Dewi, T., Risma, P., Oktarina Y. (2019). Review of Factors Affecting the Efficiency and Output of a PV System Applied in Tropical Climate, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 258, 012039.
- Dolara, A., Lazaroiu, G.C., Leva, S., Manzolini, G. (2013). Experimental investigation of partial shading scenarios on 2013.
- Dubey, S., Sarvaiya, J.N., Seshadri, B. (2013). Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world - A review, *Energy Procedia*, 33, 311– 321.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>
- Gan, C.K., Lee, Y.M., Pudjianto, D., Strbac, G. (2014). Role of losses in design of DC cable for solar PV applications, 2014 Australasian University Power Engineering Conference, AUPEC 2014 - Proceedings issue (October), 2–6.
- Ghenai, C., Ahmad, F.F., Rejeb, O., Hamid, A.K. (2021). Sensitivity analysis of design parameters and power gain correlations of bi-facial solar PV system using response surface methodology, *Sol Energy*, 223(April), 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.024>.
- Grygiel, P., Tarłowski, J., Prześniak-Welenc, M., Łapiński, M., Łubiński, J., Mielewczyk-Gryn, A. et al. (2021). Prototype design and development of low-load-roof photovoltaic modules for applications in on-grid systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 233, 111384. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111384>
- Gostein, M., Littmann, B., Caron, J.R., Dunn, L. Comparing PV power plant soiling measurements extracted from PV module irradiance and power measurements, *Conference Comparing PV power plant soiling measurements extracted from PV module irradiance and power measurements*. 3004-3009. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2013.6745094>.
- IEA - International Energy Agency. (2018). *Energy Efficiency 2018: Analysis and Outlook to 2040*. in: Market Report Series, IEA/OECD, Ingarao, G.
- Jang, J., Lee, K. (2020). Practical performance analysis of a bifacial PV module and system, *Energies*, 13(17), 4389. <https://doi.org/10.3390/en13174389>.
- Jiang, H., Lu, L., Sun, K. (2011). Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic

- (PV) modules. *Atmos. Environ*, 45 (25), 4299–4304.
- Kaldellis, J.K., Fragos, P. (2011). Ash deposition impact on the energy performance of photovoltaic generators, *J. Clean. Prod*, 19 (4), 311–317.
- Kamalapur, G.D., Udaykumar, R.Y., (2011). Rural electrification in India and feasibility of Photovoltaic Solar Home Systems, *Int J Electr Power Energy Syst*, 33(3),594–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.12.014>.
- Kumar, N.M., Sudhakar, K., Samykano, M., Sukumaran, S. (2018). Dust cleaning robots (DCR) for BIPV and BAPV solar power plants-A conceptual framework and research challenges, *Procedia Compututer Science*, 133, 746–754.
- Liu, R., Liu, Z., Xiong, W., Zhang, L., Zhao, C., Yin, Y. (2024). Performance simulation and optimization of building façade photovoltaic systems under different urban building layouts, *Energy*, 288, 129708. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129708>
- Malamaki, K.D., Demoulias, C.S. (2014). Analytical Calculation of the Electrical Energy Losses on Fixed-Mounted PV Plants, in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5-4, 1080-1089, doi:10.1109/TSTE.2014.2323694.
- Manikandan, S., Varun, M., Manikandan, S. (2020). Performance Evaluation of Bifacial and Monofacial modules in vertical and latitude mounting at South India using PVsyst, *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 912(4). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/912/4/042066>.
- Moharram, K.A., Abd-Elhady, M.S., Kandil, H.A., El-Sherif, H. (2013). Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling, *Ain Shams Engineering Journal*, 4 (4), 869–877.
- Muneer, T., Asif, M. (2003). Generation and transmission prospects for solar electricity: UK and global markets, *Energy Convers Manag*, 44, 35–52.
- Oh, S., Figgis, B.W., Rashkeev, S. (2020). Effects of thermophoresis on dust accumulation on solar panels, *Sol. Energy*, 211, 412–417.
- Osmani, K., Ramadan, M., Lemenand, T., Castanier, B., Haddad, A. (2021). Optimization of PV array tilt angle for minimum levelized cost of energy, *Comput Electr Eng*, 96, 107474. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107474>.
- Öztürk, A., Dursun, M. (2011). 2,10 ve 20 KVA'lık Fotovoltaik Sistem Tasarımı, 6th Int. Adv. Techn. Symp.(LAST'11), 16-18 May 2011, Elazığ.
- Photovoltaic Effect. *Mrsolar.com*. Retrieved 12 December 2010. (<https://www.scribd.com/document/251085129/Photovoltaics>).
- Piedra, P.G., Llanza, LR, Moosmüller, H. (2018). Optical losses of photovoltaic modules due to mineral dust deposition: experimental measurements and theoretical modeling. *Sol Energy*, 164, 160–73. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.030>.
- Qasem, H., Betts, T.R., Müllejans, H., AlBusairi, H., Gottschalg, R. (2014). Dust-induced shading on photovoltaic modules, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, 22, 218–226.
- Restrepo-Cuestas B.J., Montano J. (2024). Bishop model parameter estimation in Photovoltaic cells using metaheuristic optimization techniques, *Solar Energy*, 270,112410. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112410>
- Ruan, T., Wang, F., Topel, M., Laumert, B., Wang, W. (2024). A new optimal PV installation angle

- model in high-latitude cold regions based on historical weather big data, *Applied Energy*, 359, 122690.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122690>
- Sanchez, A., Zhang, Q., Martín, M., Vega, P. (2022). Towards a new renewable power system using energy storage: an economic and social analysis, *Energy Convers Manag*, 252.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115056>.
- Senpinar, A. (2018). Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions, Chapter 2.16 Optimization Of Slope Angles
<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-813734-5.00028-7>
- Sharma, S., Kurian, C.P., Paragond, L.S. (2018). Solar PV system design using PVsyst: a case study of an academic institute. In: *Proceedings of the 2018 international conference on control, power, communication and computing technologies, ICCPCCT 2018*, 123–8.
<https://doi.org/10.1109/ICCPCCT.2018.8574334>.
- Sreenath, S., Sudhakar, K., Yusop, A.F. (2021). Performance assessment of conceptual bifacial solar PV system in varying albedo conditions, *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 1078(1), 012033.
<https://doi.org/10.1088/1757-899x/1078/1/012033>.
- Stein, J.S., Riley, D., Lave, M., Hansen, C., Deline, C., Toor, F. (2018) . Outdoor field performance from bifacial photovoltaic modules and systems, In: *Proceedings of the 2017 IEEE 44th photovoltaic specialist conference (PVSC)*, 9, 3184.
<https://doi.org/10.1109/pvsc.2017.8366042>.
- Sulaiman, S.A., Singh, A.K., Mokhtar, M.M.M., Bou-Rabee, M.A. (2014). Influence of dirt accumulation on performance of PV panels, *Energy Proc*, 50, 50–56.
- Tanesab, J., Parlevliet, D., Whale, J., Urmee, T. (2016). Dust Effect and its Economic Analysis on PV Modules Deployed in a Temperate Climate Zone, *Energy Procedia*, 100(September), 65–68.
- Vasilakopoulou, K., Ulpiani, G., Khan, A., Synnefa, A., Santamouris, M. (2023). Cool roofs boost the energy production of photovoltaics: Investigating the impact of roof albedo on the energy performance of monofacial and bifacial photovoltaic modules, *Solar Energy*, 265, 111948.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111948>
- Wald, L. (2021). *Fundamentals of Solar Radiation*. CRC Press, 270.
<https://doi.org/10.1201/9781003155454>
- Winter, C.-J., Sizmann, R. L., Vant-Hull, L. L. (Eds.) (1991). *Solar Power Plants*. Springer Berlin Heidelberg, 425. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61245-9>
- www.edirne.bel.tr, 2025
- Xu Z, Qu H, Li X, zhao Y, li Y, Han Z. (2020). Theoretical model of optical transmission and reflection characteristics of dusty PV modules. *Sol Energy Mater Sol Cell*, 213, 110554.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110554>.
- Yakubu, R.O., Mensah, L.D., D. Quansah, M.S. Adaramola, Hammed, Y. (2022). Performance evaluation of bifacial solar PV modules under different climatic regions in Nigeria, *E3S Web Conf*. 2022; 354:02006.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235402006>.
- Yao, W., Han, X., Huang, Y., Zheng, Z., Wang, Y., Wang, X. (2022). Analysis of the influencing factors of the dust on the surface of photovoltaic panels and its weakening law to solar radiation — a case study of Tianjin, *Energy*, 256, 124669.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124669>.

Yazdani, H., Yaghoubi, M. (2022). Dust deposition effect on photovoltaic modules performance and optimization of cleaning period: a combined experimental numerical study, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 51, 101946.

Zakharchenko, R., Licea-Jimenez, L., Perez-Garcia, S.A., Vorobiev, P., DehesaCarrasco, U., P´erez-Robles, J.F. (2004). Photovoltaic solar panel for a hybrid PV/ thermal system, *Sol Energy Mater Sol Cell*, 82(1), 253–61. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.01.022>.

Zhang, X., Zhao, X., Smith, S., Xu, J., Yu, X. (2012). Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies, *Renewable Sustainable Energy Rev*, 16, 599–617. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.026>.

<https://www.isosenerji.com/gunes-enerjisi-sistemlerinde-jel-aku-secimi/>

Time Series Analysis and Forecasting of Turkey's Exports and Imports

Elvan DENİZ^{1*} 

¹Çanakkale Onsekiz Mart University, Çan Higher Vocational School, Çanakkale, TÜRKİYE

Cite this article as: Deniz, E. (2025) Time Series Analysis and Forecasting of Turkey's Export and Import Values, *Trakya University Journal of Engineering Sciences*, 26(1), 33-43.

Highlights

- The forecasted results for the years 2025 to 2027 suggest an upward trend in both export and import values.
- The import growth rate is forecasted to be higher than the export growth rate.
- An expansion in the foreign trade deficit may lead to greater external dependency in the Turkish economy.

Article Info	Abstract
Article History: Received: May 13, 2025 Accepted: May 29, 2025	With the increasing impact of globalization, foreign trade has become a strategic tool, particularly for developing countries, in fostering economic growth, encouraging technological advancement, and reducing external dependency. In this context, expanding the volume of foreign trade offers various opportunities for developing economies. Accordingly, a time series-based forecasting model was developed to generate projections for Turkey's foreign trade, focusing on export and import values, using official annual trade data from 2013 to 2024. Within the scope of this study, six different statistical analysis methods were applied using Minitab 17 software. The error metrics and resulting analytical outcomes enhance the understanding of structural patterns in Turkey's foreign trade and provide strategic foresight for investment-related decision-making. Therefore, the primary aim of this study is to emphasize the importance of time series analysis in economic decision-making processes and to offer a scientific contribution to macroeconomic planning strategies.
Keywords: Export; Import; Time Series Analysis; Foreign Trade Forecasting	

Türkiye'nin İhracat ve İthalat Değerlerinin Zaman Serisi Analizi ve Tahmini

Makale Bilgileri	Öz
Makale Tarihçesi: Geliş: 13 Mayıs 2025 Kabul: 29 Mayıs 2025	Küreselleşmenin etkisinin artmasıyla birlikte, dış ticaret özellikle gelişmekte olan ülkeler için ekonomik büyümeyi desteklemede, teknolojik gelişimi teşvik etmede ve dışa bağımlılığı azaltmada stratejik bir araç haline gelmiştir. Bu bağlamda, dış ticaret hacminin artırılması, gelişmekte olan ekonomiler için çeşitli fırsatlar sunmaktadır. Bu doğrultuda, Türkiye'nin dış ticaretine yönelik ihracat ve ithalat değerlerine odaklanan bir zaman serisi tabanlı tahmin modeli geliştirilmiştir; modelde 2013-2024 yıllarına ait resmi yıllık ticaret verileri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında Minitab 17 yazılımı aracılığıyla altı farklı istatistiksel analiz yöntemi uygulanmıştır. Hata ölçütleri ve elde edilen analiz sonuçları, Türkiye'nin dış ticaretindeki yapısal desenlerin anlaşılmasını geliştirmekte ve yatırıma yönelik karar alma süreçleri için stratejik öngörü sağlamaktadır. Bu nedenle çalışmanın temel amacı, ekonomik karar alma süreçlerinde zaman serisi analizinin önemini vurgulamak ve makroekonomik planlama stratejilerine bilimsel katkı sağlamaktır.
Anahtar Kelimeler: İhracat; İthalat; Zaman Serisi Analizi; Dış Ticaret Tahmini	

1. Introduction

The phenomenon of globalization, which began to show its influence in the 1980s, led to a significant increase in interactions among financial markets, especially during the 1990s. These developments accelerated the process of financial liberalization, resulting in more intensive capital flows between countries. The rise in capital mobility was also reflected in foreign trade data. Foreign trade fundamentally consists of exports and imports. While exports are affected by the exchange rate and the income level of the trading partner country, imports are generally associated with the exchange rate and the economic strength of the domestic country. In this regard, the direction and nature of the relationship between countries' income levels and the volume of foreign trade are noteworthy from an economic analysis perspective (Oğul, 2021). With the increasing effects of globalization, foreign trade has become a key component in national strategies for economic growth and development. Especially for developing countries, expanding the volume of foreign trade offers several opportunities, such as promoting technological advancement, increasing production capacity, and reducing financial dependency on external resources (Krugman and Obstfeld, 2009). As international integration has become more widespread, trade between nations has acquired a strategic role not only in terms of economic growth but also in fostering technological transformation and financial stability. In the case of developing economies, this indicates that outward-oriented trade policies contribute positively to multifaceted development goals.

In light of these developments, it can be stated that foreign trade not only facilitates the flow of goods and services but also contributes to the dissemination of knowledge, technology, and quality standards across countries. This interaction is particularly significant for developing economies, as it plays a vital role in enhancing competitiveness and ensuring sustainable

development. Export activities strengthen the ability of domestic firms to compete in global markets and contribute to increased investments and expanded employment opportunities through the inflow of foreign currency revenues. On the other hand, imports serve a critical function, especially in the procurement of intermediate and capital goods required during the production process (Grossman and Helpman, 1991). Nevertheless, excessive dependence on imports may lead to macroeconomic vulnerabilities such as rising current account deficits and increased external dependency (Rodrik, 2006). For this reason, maintaining a balanced relationship between exports and imports is of strategic importance for the sustainability of foreign trade policies. Accordingly, this study utilizes time series analysis methods to generate forecasts for Turkey's future export and import figures. Time series analysis enables the modeling of trends, seasonality, and cyclical fluctuations observed in economic indicators by examining structural patterns in historical data. In this regard, three fundamental techniques trend analysis, exponential smoothing, and moving average were employed to analyze time-dependent dependencies in trade data and to produce future-oriented forecasts.

Whereas trend analyses help identify the overall direction of the data over time, the exponential smoothing method provides flexibility in short-term forecasting by assigning more weight to recent observations. Moving averages, on the other hand, are used to smooth out fluctuations in the series by calculating the average of past data points, thereby revealing the underlying trend. The diversity of these techniques allows for a more comprehensive evaluation of forecasting performance. All these methods were applied using the Minitab 17 software in accordance with the structure of the data, and the results were compared in an effort to determine the most appropriate forecasting model.

1.1. Literature Review

Time series analyses are frequently employed to understand the dynamic structure of economic and financial data and to make forward-looking forecasts. To this end, the ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) model developed by Box and Jenkins (1970) enables the modeling of key structural components such as trend, seasonality, and stationarity in time series. This model has been widely used in economic forecasting studies. Furthermore, the ARCH (Engle, 1982) and GARCH (Bollerslev, 1986) models, developed to model volatility, have significantly contributed to the analysis of time series with changing variance structures.

In early studies specific to Turkey, Karagöz and Doğan (2005) applied the ARIMA model to monthly export data and found it to produce successful forecasts. Similarly, Erdoğan and Bozkurt (2009) analyzed periodic fluctuations in Turkey's foreign trade values using ARIMA. Özatay, Özmen, and Şahinbeyoğlu. (2007) examined the impact of exchange rate volatility on foreign trade within the framework of the J-curve hypothesis, concluding that the effect varies in the short and long term.

Aktaş (2010) focused on the relationship between foreign trade and macroeconomic indicators in Turkey and used the VAR (Vector Autoregressive) model to analyze the interactions between exports, imports, exchange rates, and the industrial production index. Similarly, Demirhan (2012) used the VECM (Vector Error Correction Model) to identify the long-term relationships affecting the trade deficit.

Bilgin (2012) emphasized the role of global demand conditions in Turkey's export forecasts and highlighted that the growth rates of major trading partners improved prediction accuracy. Aydın and Başar (2014) analyzed the volatility in Turkey's foreign trade data using the GARCH model and successfully modeled the

impact of the 2001 and 2008 crises. In the same year, Yurdakul (2014) applied Johansen cointegration tests to assess the long-run relationship between exports, imports, and economic growth, and confirmed the existence of long-term cointegration.

Aydın and Şentürk (2017) applied the ARIMA model to Turkey's foreign trade data, tested its sensitivity to seasonal effects, and reported strong forecasting performance. Akgül and Sayyan (2015) analyzed seasonality in trade data using the TRAMO-SEATS method and found that seasonal adjustment significantly improved forecast accuracy.

Moreover, machine learning-based approaches have recently been integrated into foreign trade forecasting in addition to traditional econometric models. Özmen and Sarier (2012) used Artificial Neural Network (ANN) models to predict Turkey's export data and reported superior performance compared to ARIMA. Kayakuş and Çelik (2018) employed support vector machines, decision trees, and deep learning techniques to analyze import data and demonstrated that hybrid modeling approaches enhanced predictive performance.

Kara and Duran (2020) analyzed the interactions among exchange rate, inflation, and foreign trade using a VAR model, revealing complex dynamic relationships among the variables. Uslu and Çelik (2021) compared Support Vector Regression (SVR) and ANN models, concluding that the SVR model performed better in export forecasting.

Recent studies have increasingly focused on the success of hybrid models. Erdil and Sarıkaya (2019) developed a hybrid model combining ARIMA and ANN and reported more accurate forecasts than conventional methods. Gültekin (2022) proposed a hybrid model based on ARIMA and LSTM (Long Short-Term Memory), showing that combining classical statistical techniques with deep learning

enhances forecasting accuracy. Kılıç and Yücel (2021) integrated wavelet transformation with deep learning algorithms and found that the models produced more robust results, especially during economic crises.

In conclusion, both traditional time series models (ARIMA, VAR, VECM, GARCH) and modern artificial intelligence-based approaches (ANN, SVR, LSTM) have been used in forecasting Turkey's foreign trade. In recent years, hybrid modeling methods have proven to be more successful in terms of predictive accuracy.

2. Method

2.1. The Collection of the Data

The forecasting process is an approach aimed at estimating the potential outcomes of future situations or variables based on historical and current data. Within a statistical framework, forecasting refers to the process of estimating the value of an unobservable parameter by utilizing sample data. These methods enable decision-makers to develop strategic plans for the future and to minimize the impact of uncertainties (Makridakis, Wheelwright and Hyndman, 1998).

Against this background, time series analysis commonly employed in economic and commercial decision-making processes stands out as one of the fundamental tools in forecasting studies. Time series data, which form the input of such analyses, may include components such as trends, seasonal variations, random fluctuations, and structural changes in variability over time. The primary objective of analyzing such data is to reveal the effects of unexpected events, evaluate the outcomes of known exogenous factors, and generate forecasts for future scenarios based on observed patterns (Jose, 2022).

In this scientific study, Turkey's official export and import data for the years 2013–2024 were utilized. The data were obtained from reliable institutional sources

such as the Ministry of Trade and the Turkish Statistical Institute (TÜİK). The fact that the data were organized on an annual basis enhanced the applicability of time series analysis.

2.2. Statistical Analysis

2.2.1. Trend Analysis

Trend analysis is a fundamental statistical tool used to determine the overall direction of data over time and is widely applied in economic forecasting (Makridakis et al., 1998). The trend analysis method is primarily categorized into linear and nonlinear forms. When data exhibit sudden increases or decreases, logarithmic trend models are generally preferred. In cases where there are sharp declines or significant reductions in the dataset, exponential trend analysis emerges as a more appropriate approach. On the other hand, if the dataset contains high levels of volatility, the moving average technique is employed to smooth out such fluctuations.

In linear trend analysis, it is assumed that there is a linear relationship between demand and forecast, and calculations are carried out based on this assumption. To improve the accuracy of the model, the method of least squares which aims to minimize the sum of the squared forecast errors is applied as the underlying estimation technique (Selçuk, 2019).

2.2.2. Moving Average

The primary objective of this method is to effectively reduce, to a certain extent, the influence of uncontrollable random factors on the data. A moving average forecast for a given period is typically obtained by calculating the arithmetic mean of the values from two or more preceding time intervals. The main challenge in this method lies in accurately determining the optimal value of n that provides the highest forecasting accuracy. Therefore, different n values are tested systematically, and the one that yields the lowest average deviation is selected (Kobu, 2017).

2.2.3. Single Exponential Smoothing

The simple exponential smoothing method is applied to time series that exhibit no clear trend or seasonal variation and generally fluctuate around a stable mean. Recognized as the most basic form among exponential smoothing techniques, this method smooths out random variations in the data series, providing a more structured pattern. Due to this characteristic, it stands out as a widely used and practical option among smoothing techniques (Palit and Popovic, 2006).

2.2.4. Double Exponential Smoothing

The double exponential smoothing method is a forecasting technique developed for time series data that exhibit a linear trend. This approach extends the classical single exponential smoothing by incorporating the trend component into the model. The method dynamically updates both the level and trend components for each data point, aiming to produce more accurate forward-looking forecasts (Hyndman and Athanasopoulos, 2018).

2.2.5. Error Metrics in Demand Forecasting

Evaluating the performance of forecasting models and maintaining control over the forecasting process are crucial for understanding the accuracy of the obtained predictions. Forecast errors, which represent the difference between actual demand and estimated, serve as a fundamental criterion in assessing the effectiveness of the applied method (Chase, Aquilano and Jacobs, 1998). To identify the magnitude of forecast errors, the following methods are commonly used: Mean Absolute Deviation (MAD), Mean Squared Deviation (MSD), and Mean Absolute Percentage Error (MAPE) (Şenbaş, 2020).

3. Research Methodology

The aim of this study is to contribute to the understanding of structural trends observed in Turkey's foreign trade and to provide forward-looking insights

for investors. For this purpose, seasonally adjusted import and export data were obtained from the official website of the Turkish Statistical Institute (TÜİK), and Table 1 was created accordingly. These data were subjected to time series analyses. The normality of the data distribution was tested. Although the Box-Jenkins method was initially considered for demand forecasting, the dataset was found to be unsuitable for this approach.

All analyses were performed using the Minitab 17 statistical software package. A total of six different analytical techniques were applied, including trend analyses (linear, quadratic, exponential), moving average, and both single and double exponential smoothing methods.

Table 1 : Calendar adjusted external trade (2013–2025)

Years	Exports (\$ Thousand)	Imports (\$ Thousand)
2013	162 060 942	261 434 182
2014	166 355 733	251 053 870
2015	150 161 933	212 647 581
2016	149 447 343	202 443 832
2017	164 058 517	238 224 882
2018	177 069 310	230 827 155
2019	180 904 116	210 616 676
2020	168 282 952	218 153 933
2021	225 763 927	272 075 444
2022	254 110 752	362 657 106
2023	255 665 441	359 716 169
2024	261 241 644	344 564 820

4. Results

In time series analysis, particularly in classical techniques such as trend analysis, moving averages, and exponential smoothing, the assumption of normality is not a necessary prerequisite. These methods primarily aim to decompose and model the underlying structural components of the series namely trend, seasonality, and irregular fluctuations rather than relying on the statistical distribution of the raw data. Consequently, the presence of abrupt increases and

decreases does not invalidate model construction; on the contrary, such volatility can offer valuable diagnostic information for model specification. In this regard, the irregular patterns observed in Figures 1 and 2, along with the failure to meet the normality assumption, justify the use of time series modeling over classical parametric approaches such as linear regression. Time series methods are inherently designed to accommodate temporal dependencies and dynamic behavior, thereby enabling more robust forecasting performance even in the presence of non-normal and volatile data structures.

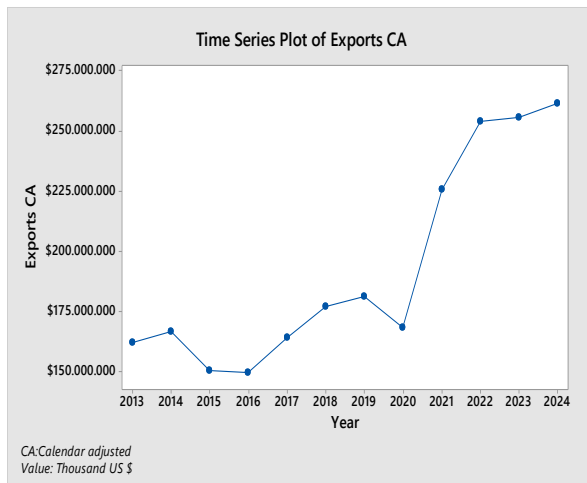


Figure 1. Time series plot of exports

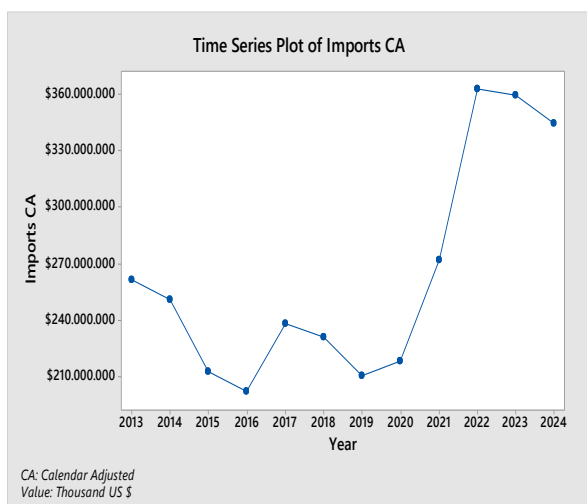


Figure 2. Time series plot of imports

4.1. Export Forecast Results

As the first forecasting method, linear trend analysis was applied. The model's forecast values were obtained from the analysis. The error metrics for this model were calculated as follows: MSD = $3.90784 \cdot 10^{14}$, MAD = $1.73783 \cdot 10^7$, and MAPE = 9.53877. The formula used in the computation is as follows:

$$Y_t = 124278978 + 10561216 \times t$$

Secondly, quadratic trend analysis was conducted. The forecast values of the model were derived, and the error metrics were calculated as: MSD = $1.66105 \cdot 10^{14}$, MAD = $0.97657 \cdot 10^7$, and MAPE = 4.97227. The corresponding equation is:

$$Y_t = 167391707 - 7915667 \times t + 1421299 \times t^2$$

Third, exponential trend analysis was performed. Forecast values were calculated, and the error metrics were found to be: MSD = $3.22699 \cdot 10^{14}$, MAD = $1.59386 \cdot 10^7$, and MAPE = 8.57257. The model formula is as follows:

$$Y_t = 134367893 \times 1.05371^t$$

Fourth, the simple exponential smoothing method was applied. Forecast values were generated, and the error metrics were: MSD = $4,24932 \cdot 10^{14}$, MAD = $1,37029 \cdot 10^7$, and MAPE = 6,82808. The smoothing constant was determined as $\alpha = 0.95$.

Fifth, the double exponential smoothing method was implemented. Forecast values were obtained, and the error metrics were as follows: MSD = $4,44396 \cdot 10^{14}$, MAD = $1,66508 \cdot 10^7$, and MAPE = 8,91226. The smoothing parameters were calculated as α (level) = 0.90 and γ (trend) = 0.10.

Finally, the moving average method was applied. Forecast values were computed, and the error metrics were: MSD = $10,3141 \cdot 10^{14}$, MAD = $2,58795 \cdot 10^7$, and MAPE = 11,8129.

4.2. Import Forecast Results

As the first forecasting method, linear trend analysis was performed. The forecast values of the model were obtained through the analysis. The error metrics of the analysis were calculated as follows: $MSD = 17.2918 \cdot 10^{14}$, $MAD = 3.6939 \cdot 10^7$, and $MAPE = 14.4628$. The equation used in the calculation is:

$$Y_t = 190742233 + 11224472 \times t$$

Secondly, quadratic trend analysis was conducted. The model's forecast values were determined. The corresponding error values were: $MSD = 6.58649 \cdot 10^{14}$, $MAD = 2.05282 \cdot 10^7$, and $MAPE = 7.60287$. The equation is given below:

$$Y_t = 284849456 - 29107194 \times t + 3102436 \times t^2$$

Third, exponential trend analysis was applied. The forecast values of the model were calculated, and the error metrics were: $MSD = 16.2517 \cdot 10^{14}$, $MAD = 3.53053 \cdot 10^7$, and $MAPE = 13.5444$. The model equation is as follows:

$$Y_t = 200385420 \times 1.0397^t$$

Fourth, the simple exponential smoothing method was implemented. The forecast values were obtained, and the error metrics were calculated as: $MSD = 13,4720 \cdot 10^{14}$, $MAD = 2,67298 \cdot 10^7$, and $MAPE = 9,93637$. The smoothing constant was found to be $\alpha = 0.95$.

Fifth, the double exponential smoothing method was used. The forecast values were derived, and the error metrics were: $MSD = 16,9231 \cdot 10^{14}$, $MAD = 3,42821 \cdot 10^7$, and $MAPE = 12,9833$. The smoothing parameters were α (level) = 0.90 and γ (trend) = 0.10.

Finally, the moving average method was applied. Forecast values were generated, and the error metrics were calculated as: $MSD = 13.4891$, $MAD = 2.6592$, and $MAPE = 9.86566$.

The analysis of import and export error rates is presented in Table 2 and 3. The table includes MSD, MAD, and MAPE values corresponding to the results of six different forecasting methods. When all error metrics are considered, it is observed that the quadratic trend analysis yields the lowest error values among the methods compared.

Table 2 : Results of error metrics for export data

Forecasting Methods Utilized	Exports		
	MAPE	MAD	MSD
Linear Trend Analysis	9.5388	$1.738 \cdot 10^7$	$3.908 \cdot 10^{14}$
Quadratic Trend Analysis	4.9723	$0.977 \cdot 10^7$	$1.661 \cdot 10^{14}$
Exponential Trend Analysis	8.5726	$1.594 \cdot 10^7$	$3.227 \cdot 10^{14}$
Single Exponential Smoothing	6.8281	$1.370 \cdot 10^7$	$4.249 \cdot 10^{14}$
Double Exponential Smoothing	8.9123	$1.665 \cdot 10^7$	$4.444 \cdot 10^{14}$
Moving Average	11.8129	$2.588 \cdot 10^7$	$10.31 \cdot 10^{14}$

Table 3 : Results of error metrics for import data

Forecasting Methods Utilized	Imports		
	MAPE	MAD	MSD
Linear Trend Analysis	14.463	$3.694 \cdot 10^7$	$17.292 \cdot 10^{14}$
Quadratic Trend Analysis	7.603	$2.0528 \cdot 10^7$	$6.587 \cdot 10^{14}$
Exponential Trend Analysis	13.544	$3.5305 \cdot 10^7$	$16.25 \cdot 10^{14}$
Single Exponential Smoothing	9.9364	$2.6730 \cdot 10^7$	$13.47 \cdot 10^{14}$
Double Exponential Smoothing	12.983	$3.4282 \cdot 10^7$	$16.92 \cdot 10^{14}$
Moving Average	9.8657	$2.659 \cdot 10^7$	$13.49 \cdot 10^{14}$

As shown in Figure 3 and 4, the forecast values that are closest to the actual import and export values are produced by the quadratic trend analysis model.

Figure 5 and 6 presents the forecast results of the quadratic trend analysis, which yielded the lowest error rates. In the graph, the blue line represents the actual values, the red line indicates the estimated from the analysis, and the green line shows the projected values for the next three years.

Following the Quadratic trend analysis, the single exponential smoothing method provided the second-best results. Compared to the quadratic trend analysis,

the MAPE difference for export data is 37.3%, and for import data, it is 30.7% in the Single Exponential Smoothing results.

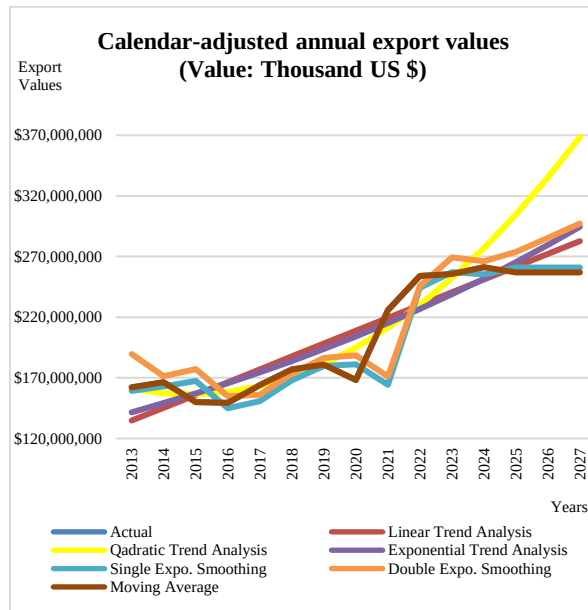


Figure 3. Calendar-adjusted annual export values

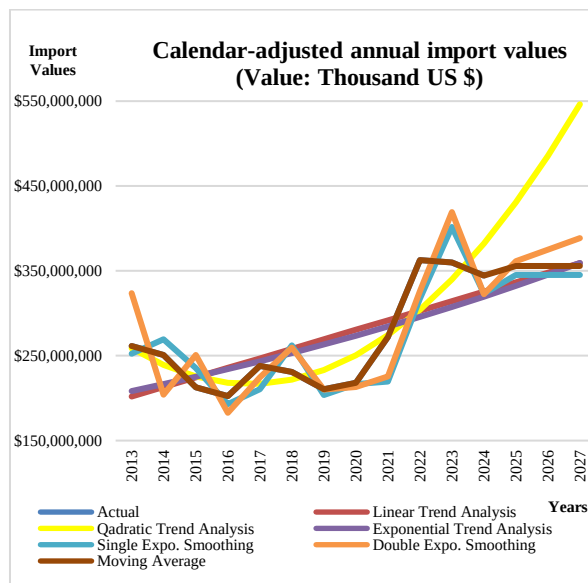


Figure 4. Calendar-adjusted annual import values

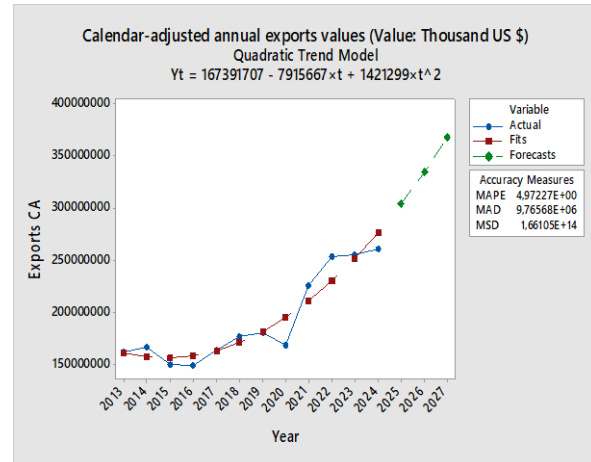


Figure 5. Forecast result of export based on quadratic trend analysis

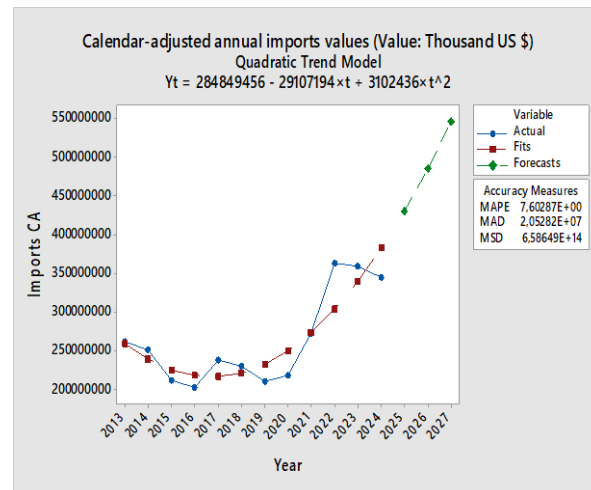


Figure 6. Forecast result of import based on quadratic trend analysis

5. Discussion and Conclusion

In this study, a comprehensive time series analysis was conducted to produce forward-looking projections of Turkey's foreign trade performance. The primary objective of the research is to evaluate the predictive capabilities of different statistical forecasting methods and to identify the model that provides the highest level of accuracy in estimating future trade volumes. For this purpose, annual foreign trade data for the period 2013–2024 were obtained from the Turkish Statistical Institute (TÜİK), forming the empirical basis of the analysis.

Using Minitab statistical software, six different time series forecasting methods were applied: linear trend analysis, quadratic (second-degree) trend analysis, exponential trend analysis, single exponential smoothing, double exponential smoothing, and the moving average method. These methods were applied to historical data to generate three-year forecasts for the period 2025–2027.

As a result of the analysis, the actual and estimated for exports and imports were systematically compared and presented in Table 4. This structured approach helped identify the most accurate forecasting method and provided a basis for making evidence-based economic and policy insights about the future of Turkey's foreign trade.

Table 4. Comparison between forecast results and actual values

Years	Exports		Imports	
	Actual	Quadratic Trend Analysis	Actual	Quadratic Trend Analysis
2013	\$162 060 942	\$160 897 338	\$261 434 182	\$258 844 697
2014	\$166 355 733	\$157 245 567	\$251 053 870	\$239 044 811
2015	\$150 161 933	\$156 436 394	\$212 647 581	\$225 449 796
2016	\$149 447 343	\$158 469 817	\$202 443 832	\$218 059 653
2017	\$164 058 517	\$163 345 839	\$238 224 882	\$216 874 382
2018	\$177 069 310	\$171 064 457	\$230 827 155	\$221 893 982
2019	\$180 904 116	\$181 625 674	\$210 616 676	\$233 118 455
2020	\$168 282 952	\$195 029 487	\$218 153 933	\$250 547 799
2021	\$225 763 927	\$211 275 899	\$272 075 444	\$274 182 015
2022	\$254 110 752	\$230 364 907	\$362 657 106	\$304 021 103
2023	\$255 665 441	\$252 296 514	\$359 716 169	\$340 065 063
2024	\$261 241 644	\$277 070 717	\$344 564 820	\$382 313 894
2025		\$304 687 519		\$430 767 597
2026		\$335 146 917		\$485 426 172
2027		\$368 448 914		\$546 289 619

Value: Thousand US \$

To determine which forecasting method provides more accurate results, it is essential to examine the associated error rates. Table 2 and 3 presents the MSD, MAD, and MAPE values, which are commonly used to evaluate

forecast accuracy across the applied analytical methods. When analyzing the percentage error rates (MAPE), the Quadratic Trend Analysis stands out as the most accurate method, with the lowest MAPE values of 4.973 for exports and 7.603 for imports.

In addition to the six forecasting methods applied, the Box-Jenkins approach was also tested. However, this method was found to be unsuitable for the dataset used in this study. Based on the results, it can be concluded that future forecasts made using the Quadratic Trend Analysis method are likely to yield more reliable outcomes.

In conclusion, when examining the forecast results for the period 2025–2027, both export and import values are projected to increase. Yet, a more detailed analysis reveals that the growth rate of imports is expected to exceed that of exports. This situation may negatively impact the foreign trade balance and contribute to an increase in the current account deficit. A widening trade deficit could, in turn, intensify Turkey's dependency on external economies. Encouraging the substitution of imported raw materials and intermediate goods with domestic alternatives could help reduce external dependency and lower production costs. Given these findings, it is important for the government to implement metrics that discourage excessive imports and promote exports.

Conflict of Interest: The authors declare that there is no conflict of interest to disclose.

ORCID

Elvan DENİZ, 0000-0002-4237-1358

References

- Aktaş, C. (2010). Determinants of foreign trade in Turkey: An analysis with VAR model. *Journal of the Faculty of Economics*, 60(2), 45–68.

- Akgül, Y., & Sayyan, M. (2015). Analysis of seasonal effects in Turkey's foreign trade data using the TRAMO-SEATS method. *Journal of Statisticians: Statistics and Actuarial Sciences*, 8(1), 22–36.
- Aydın, A., & Başar, S. (2014). Volatility analysis in Turkey's foreign trade using GARCH models. *Finance, Politics & Economic Reviews*, 51(591), 39–52.
- Aydın, A., & Şentürk, M. (2017). Forecasting Turkey's foreign trade with ARIMA models. *Anadolu University Journal of Social Sciences*, 17(3), 73–90.
- Bilgin, M. (2012). The impact of global demand conditions on Turkey's export forecasts. *International Journal of Economic Research*, 5(1), 105–117.
- Bollerslev, T. (1986). Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity. *Journal of Econometrics*, 31(3), 307–327. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(86\)90063-1](https://doi.org/10.1016/0304-4076(86)90063-1)
- Box, G. E. P., & Jenkins, G. M. (1970). *Time series analysis: Forecasting and control*. Holden-Day.
- Chase, R. B., Aquilano, N. J., & Jacobs, F. R. (1998). *Production and operations management: manufacturing and services*. 8th ed., New York: Irwin/McGraw-Hill.
- Demirhan, E. (2012). Foreign trade deficit and its determinants: A VECM approach. *Journal of Economic Sciences*, 4(2), 35–50.
- Erdil, E., & Sarıkaya, M. (2019). Comparison of ARIMA and ANN models in forecasting Turkey's export values. *Economic Approach*, 30(110), 35–58.
- Erdoğan, S., & Bozkurt, S. (2009). Analysis of Turkey's foreign trade data using the ARIMA model. *Zonguldak Karaelmas University Journal of Social Sciences*, 5(10), 23–35.
- Engle, R. F. (1982). Autoregressive conditional heteroskedasticity with estimates of the variance of United Kingdom inflation. *Econometrica*, 50(4), 987–1007. <https://doi.org/10.2307/1912773>
- Grossman, G. M., & Helpman, E. (1991). Trade, knowledge spillovers, and growth. *European economic review*, 35(2-3), 517-526.
- Gültekin, M. (2022). Foreign trade forecasting with an ARIMA-LSTM hybrid model. *Journal of Artificial Intelligence Applications*, 4(1), 12–25.
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: principles and practice*. OTexts.
- Jose, J. (2022). Introduction to time series analysis and its applications. *Christ University*, Bangalore.
- Kara, H., & Duran, M. (2020). The relationship between exchange rate, inflation, and foreign trade: The case of Turkey using VAR model. *Journal of Public Finance*, 179, 49–68.
- Karagöz, K., & Doğan, S. (2005). Export forecasting using ARIMA models: The case of Turkey. Süleyman Demirel University *Journal of Economics and Administrative Sciences*, 10(2), 131–144.
- Kayakuş, H., & Çelik, S. (2018). A comparison of machine learning methods for import forecasting in Turkey. *Journal of Statistics and Applied Sciences*, 1(1), 55–69.
- Kılıç, E., & Yücel, A. (2021). Import forecasting with deep learning and wavelet transformation: The case of Turkey. *Journal of Artificial Intelligence and Data Science*, 3(2), 85–100.
- Kobu, B. (2017). *Production management* 18th ed., Beta Publishing.
- Krugman, P. R., & Obstfeld, M. (2009). *International economics: Theory and policy*. 8th ed., Harlow: Pearson Education.

- Makridakis, S., Wheelwright, S. C., & Hyndman, R. J. (1998). *Forecasting Methods and Applications*. 3rd ed., New York: Wiley.
- Oğul, B. (2021). The relationship between current deficit and economic growth in Turkey: Toda-Yamamoto causality analysis. *Journal of International Trade and Economic Researches*, 5(2), 77–82.
- Özmen, Y., & Sarier, A. (2012). Forecasting Turkey's exports using artificial neural networks. *Istanbul Commerce University Journal of Science*, 11(22), 55–68.
- Özatay, F., Özmen, E., & Şahinbeyoğlu, G. (2007). *Exchange rate volatility and foreign trade: An application on Turkey* (Working Paper No. 07/08). Central Bank of the Republic of Turkey.
- Palit, A. K., & Popovic, D. (2006). *Computational intelligence in time series forecasting: theory and engineering applications*. 1st ed., Springer Science & Business Media.
- Rodrik, D. (2006). *Industrial development: Stylized facts and policies* (Working Paper No. 380). Harvard University, John F. Kennedy School of Government.
- Selçuk, S. (2019). *Implementation of demand forecasting and economic order quantity models in an enterprise* (Unpublished master's thesis). Istanbul Kültür University, Institute of Graduate Education, Department of Business Administration.
- Şenbaş, T. (2020). *Implementation of demand forecasting in the logistics industry* (Unpublished master's thesis). Istanbul Arel University, Institute of Graduate Education, Department of Business Administration.
- Turkish Statistical Institute. (2025). *Foreign trade statistics, March 2025*. <https://data.tuik.gov.tr/Search/Search?text=d%C4%B1%C5%9F%20ticaret%20istatistikleri>
- Uslu, A., & Çelik, E. (2021). Comparison of SVR and ANN models in forecasting Turkey's exports. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2(1), 34–50.
- Yurdakul, F. (2014). The relationship between export, import, and economic growth: *The case of Turkey*. *Ege Academic Review*, 14(1), 57–70.

Fotovoltaik Panellerin Eğim Açısının ve Malzeme Çeşidinin Sistem Performansı Üzerine Etkisi

Hacer AKHAN^{1*}, Emir EMİRALİOĞLU¹, Enis EŞER¹, Ulaş Kıvanç SEÇGİN¹,
Kaan Berkay KARABIYIK¹ ve Kani Başar YENİCİ¹

¹ Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Edirne, TÜRKİYE

Makale Künye Bilgisi: Akhan, H., Emiralioğlu, E., Eşer E., Seçgin, U.K., Karabıyık K.B. ve Yenici K.B. (2025). Fotovoltaik Panellerin Eğim Açısının ve Malzeme Çeşidinin Sistem Performansı Üzerine Etkisi, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 26(1), 45-59.

Öne Çıkanlar

- Enlem açısı, PV panel optimum eğim açısını etkileyen parametrelerden biridir.
- Monokristal PV panelin enerji üretimi polikristal PV panele göre daha fazladır.
- Güneş ışınları PV panel yüzeyine dik açıyla geldiğinde performans maksimumdur.

Makale Bilgileri	Öz
Makale Tarihçesi: Geliş: 27 Mayıs 2025 Kabul: 23 Haziran 2025	Enerji yönetimi, enerjiyi tasarruflu kullanmanın yanında enerjiyi üretirken kayıpları en düşük oranda tutup mümkün olan en yüksek enerjiyi faydalı enerjiye dönüştürmeyi amaçlar. Bu doğrultuda enerji üretim sistemlerinin verimi etkileyen parametreler dikkate alınarak tasarlanıp işletilmesi, faydalı enerjinin artırılması açısından önem kazanır. Eğim açısı ve fotovoltaik panellerde kullanılan malzeme çeşidi, fotovoltaik sistem enerji üretimini ve verimini etkileyen parametrelerdir. Güneş ışınları PV panel yüzeyine dik açıyla geldiğinde performans maksimumdur. Bu nedenle, eğim açısının doğru ayarlanması, yıllık enerji üretiminin maksimuma ulaşabilmesi için oldukça önemlidir. Bu çalışmada, Edirne iklim koşulları için fotovoltaik panel eğim açısının, monokristal ve polikristal malzeme çeşitlerinin sistem performansı üzerine etkisi ayrıntılı ve kapsamlı olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar yapılırken her bir PV panel eş zamanlı olarak aynı ortam ve işletme koşullarında çalıştırılmıştır. PV paneller 0°, 10°, 20°, 30° ve 40° eğim açılarında çalıştırılmıştır. Ayrıca her bir panel için RETScreen yazılımı kullanılarak nümerik analiz yapılmıştır. Edirne ili 2025 yılı mayıs ayı için en yüksek güç üretimi fotovoltaik panel eğim açısı 20° olduğunda sağlanmıştır. Monokristal PV panelin enerji üretimi polikristal PV panele göre daha fazladır.
Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik; Enerji verimliliği; Eğim açısı; Monokristal- polikristal malzeme.	

The Effect of Slope and Material Type of Photovoltaic Panels on System Performance

Article Info	Abstract
Article History: Received: May 27, 2025 Accepted: June 24, 2025	In addition to economical energy use, energy management aims to minimise losses during energy production and convert as much energy as possible into useful energy. In this respect, designing and operating energy generation systems that consider parameters affecting efficiency is important for increasing useful energy. The slope and the type of material used in photovoltaic panels affect the energy production and efficiency of the photovoltaic system. The PV panel's performance is at its maximum when the sun's rays are at right angles to its surface. Therefore, correctly adjusting the slope is crucial for maximising annual energy production. This study investigates in detail and comprehensively the effects of photovoltaic panel slope and material type (monocrystalline or polycrystalline) on system performance in Edirne climate conditions. During the experimental studies, each PV panel was operated under the same ambient and operating conditions simultaneously. The PV panels were operated at the slope of 0°, 10°, 20°, 30° and 40°. A numerical analysis was also performed on each panel using RETScreen software. The maximum power generation for May 2025 in Edirne province was attained when the photovoltaic panel slope was set at 20°. Monocrystalline PV panels produce more energy than polycrystalline PV panels.
Keywords: Photovoltaics; Energy efficiency; Slope; Monocrystalline- polycrystalline material.	

1. Giriş

Dünya nüfusunun artması beraberinde enerji sorununu da getirmektedir. Geleneksel enerji piyasası uzun yıllar boyunca petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtlara bağımlı olmuştur. Bu yöntemler sera gazı emisyonlarına, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi çevresel sorunlara ve aynı zamanda, fosil yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalar, jeopolitik gerilimlere de neden olmaktadır. Artan enerji ihtiyacının fosil yakıtlardan karşılanması çevre kirliliğinin azaltılması ve sürdürülebilirliğin sağlanması için enerji üretim yöntemlerin de dünyanın değişime gitmesi gerekmektedir (International Energy Agency, 2018). Bu süreçteki arayış ülkeleri yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmektedir. Güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına alternatifler fosil yakıtlara göre daha çevreci ve sürdürülebilir olması nedeniyle günümüzde ilgi artırmıştır (tr.wikipedia.org, 2025). Yenilenebilir Enerji, sürekli devam eden doğal süreçlerdeki enerji akısından elde edilen enerjidir. Bir başka deyişle; enerji kaynağından alınan enerjiye eşit oranda veya kaynağın tükenme hızından daha hızlı bir şekilde kendini yenileyebilmesi olarak da tanımlanabilir. Bu kaynaklara güneş, rüzgar, hidroelektrik ve jeotermal enerji örnek verilebilir. Ülkemiz, güneş enerjisi bakımından yüksek potansiyele sahiptir (Şen, 2008). Yenilenebilir enerji kaynakları, yenilenemez enerji kaynaklarının tersine karbon salınımı yapmadan enerji üretme avantajına sahiptir. Böylece çevre dostudur, iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynar ve küresel sıcaklık artısını önlemeye yardımcı olur. Yenilenebilir enerji kaynakları, sadece çevresel sürdürülebilirliği desteklemekle kalmaz, aynı zamanda ekonomik kalkınmaya da büyük katkılar sağlar. Güneş, rüzgar, hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal enerji gibi kaynaklar, enerji güvenliğini artırarak ithalata bağımlılığı azaltır, istihdam yaratır ve enerji maliyetlerini düşürerek uzun vadede ekonomik istikrarı desteklemektedir (International Energy Agency, 2018).

Yenilenebilir enerji yerel kaynaklara dayandığı için enerji arz güvenliğini artırır, ülkeleri dışa bağımlılıktan kurtararak ekonomik istikrar sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin maliyetleri geçmiş zamanlara göre hızla düşmekte ve gittikçe erişimi daha kolay bir hale gelmiştir (aydem.com.tr, 2025). Güneş panelleri ve rüzgar türbinleri gibi sistemler artık daha uygun fiyatlarla kurulabilmekte ve uzun vadede ekonomik tasarruf sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji sektörü, mühendislik, üretim, kurulum ve bakım gibi pek çok alanda istihdam olanakları sunmaktadır. Özellikle enerji depolama sistemleri ve akıllı şebekeler gibi gelişmeler, enerji sektörünün daha verimli hale gelmesini sağlamaktadır (International Energy Agency, 2018).

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi, potansiyeli en yüksek enerji kaynaklarından biridir. Güneş enerjisinin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına oranla maliyet azlığı, çevreye zararı olmaması, yakıt ihtiyacı bulunmaması, hızlı ve basit şekilde sistemlerinin kurulabilmesi gibi sebeplerden dolayı güneş enerjisinin kullanımını yoğunlaştırmıştır. Güneş enerjisi tükenmezliğin belirgin özelliğiyle büyük bir yenilenebilir ve çevre dostu enerji kaynağı olarak şu anda sürdürülebilir kalkınma için potansiyel çözümler sunmaktadır. Güneş enerjisi; potansiyeli, kullanım kolaylığı, yenilenebilirliği ve çevre dostu olmasından dolayı kolay biçimde yaygınlaşabilir (International Energy Agency, 2018).

Güneş enerjisi, fotovoltaik (PV) paneller aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılır. PV sistemler, sürdürülebilir enerji üretiminin temel taşlarından biri haline gelmiştir (International Energy Agency, 2018).

Yıllar boyunca birçok araştırmacı, dünyanın farklı bölgelerinde optimum eğim açısını belirlemeye yönelik çalışmalar gerçekleştirmiştir. Literatürde PV panel eğim açısı üzerine yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır (piagrid.com). Qu ve diğerleri

çalışmalarında faz değiştiren malzemeler kullanılarak PV panellerinin soğutulmasının maksimum çıkış güçlerini, maksimum verimliliklerini ve dolum faktörlerini artırdığını göstermektedir. PV sisteminin eğim açısı 15° ila 60° aralığında çalışmışlardır. Yapılan çalışmada, eğim açısı arttıkça PV panel sıcaklığı azalmış ve faz değişim malzemesinin soğutma etkisi artmıştır (Qu vd., 2024). Bilgili ve Dağtekin'in 2016 yılında yaptığı çalışmada, fotovoltaik (PV) panellerin farklı eğim açılarında (15°-30°-45°-60°) ürettikleri enerji miktarı belirli periyotlarla gözlemlenmiş ve anlık, günlük, aylık ölçümlerle analiz edilmiştir. Araştırmada, farklı açılardaki panellerin aylık enerji üretim verileri karşılaştırılarak eğim açısının enerji verimliliği üzerindeki etkisi yüzde olarak hesaplanmıştır. Sonuçlara göre, paneller yıl boyunca 15° eğimle yerleştirildiğinde, yılın ilk ve son dört ayında diğer açılara göre yaklaşık %7-10 oranında enerji kaybı yaşanmıştır. Ancak, bu eğim açısına sahip paneller yılın ortasındaki dört aylık dönemde diğer açılara kıyasla daha verimli çalışmıştır (Bilgili ve Dağtekin, 2017). Arslan tez çalışmasında, güneş enerjisinden elektrik elde etmek için fotovoltaik (PV) panellerin eğim açılarının belirlenmesi amaçlanmıştır (Arslan, 2023). Geliş ve diğerleri yaptığı çalışmada yapay bir ışık kaynağı kullanılarak 120 W gücündeki bir fotovoltaik panelin performansı incelenmiştir. Fotovoltaik panel ile yapay ışık kaynağı arasındaki mesafenin (0.8 m, 1.4 m, 2 m) ve açının (0°, 20°, 40°) değişimi dikkate alınarak deneysel analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ışık kaynağı ile panel arasındaki mesafe arttıkça üretilen gücün azaldığını, ayrıca iki bileşen arasındaki açının büyümesiyle enerji üretiminde düşüş yaşandığını göstermektedir (Geliş ve Akyürek, 2020).

Khahro ve diğerleri, Pakistan'ın Sindh bölgesinde güneş enerjisi kaynaklarını değerlendirerek optimum eğim açısını belirlemiş ve yayılı güneş radyasyonunu tahmin etmiştir (Khahro, 2015). Navntoft, İspanya'daki Plataforma Solar de Almera'da yatay ve eğimli

yüzeylerde dört yıl boyunca yapılan güneş radyasyonu ölçümlerini analiz etmiştir. Yaz ve kış aylarında eğimli veya yatay ışının aylık ortalama oranlarının sırasıyla 0.95 ve 1.25 olduğu bulunmuştur (Navntoft, 2012). Chang, Tayvan'daki yedi farklı şehir için PV modüllerinin optimum eğim açısını tahmin etmek amacıyla, doğrusal olmayan zamanla değişen evrimsel parçacık sürü optimizasyon yöntemini kullanmıştır. Bu çalışma, modüllerden maksimum elektrik enerjisi elde etmeyi amaçlamaktadır (Chang, 2010). Mondol ve diğerleri, Kuzey İrlanda'daki mevsimsel ve günlük güneş radyasyonu değişkenliğini ve PV üretiminin konut elektrik faturalarındaki potansiyel tasarruflara etkisini incelemiştir. Gerçek zamanlı fiyat tarifeleri için yıllık bazda en yüksek tasarrufu sağlayan açının hafifçe batıya (190°) yönelmiş olduğu sonucuna varmışlardır (Mondol vd., 2008). Liu ve Jordan, tarafından gerçekleştirilen şebekeye bağlı bir PV sisteminin teknoloji-ekonomi optimizasyonuna yönelik çalışmada, elektrik tarifeleri kullanılarak panellerin en uygun eğim açısı hesaplanmıştır (Liu ve Jordan, 1960). Salari ve Javaran, sabit optimum eğim açısı kullanıldığında yatay yüzeye kıyasla %23'lük bir güneş ışıınımı artışı sağlandığını belirtmiştir. (Salari ve Javaran, 2017). Tian vd. yaptıkları çalışmada, fotovoltaik korumalı levhanın öncelikle süspansiyon bölgesinde hava konveksiyonuyla artan ısı dağılımı nedeniyle, geleneksel yalıtım levhalarına göre üstün azaltma etkileri sergilediğini göstermektedir. Çalışma alanında, fotovoltaik korumalı levha, ortalama olarak güneşli yamaç sıcaklıklarını 3 °C'den fazla ve çözülme derinliğini, açıkta kalan alt zemine kıyasla 1 m'den fazla düşürmektedir. Fotovoltaik korumalı levhanın süspansiyon yüksekliği, bu bölgede güneşli-gölgeli yamaç etkisini etkili bir şekilde azaltmak için 5,3 cm'den az olmamalıdır. Özetle, Permafrost alt zemin mühendisliğinde gölgeli-güneşli yamaç etkilerini azaltmak ve karbon salınımını azaltmak için bir referans sağlamaktadır (Tian vd., 2024). Shanmugan ve diğerleri, yaptıkları çalışmada güneş PV sistemlerinin

güneş, damıtma cihazlarıyla entegrasyonunu inceler ve güneş, PV sistemlerinde termal ve elektrik enerjisi kullanımını birbirinden ayırır. İnceleme, su kıtlığı ve sürdürülebilir enerji üretimi gibi kritik sorunların ele alınmasında güneş, fotovoltaik entegrasyonunun oynadığı önemli rolün altını çizerek, ülkenin büyümesine katkıda bulundu (Shanmugan, 2024). Nagengast ve diğerleri, belirli test yatağı yapılandırmasına dayanarak, PV panelleri altındaki yeşil veya siyah çatı seçiminin PV performansı üzerinde çok az etkisi oldu. Yeşil çatı-PV ile siyah çatı-PV montajları arasındaki güç, üretiminin büyüklüğündeki fark küçüktü (%0,5) ve Pittsburgh'da yıllık 9\$/60 panel kaybına ve Phoenix'te yıllık yaklaşık 8\$/60 panel faydasına denk gelmektedir. Sonuçlar ayrıca, sürekli olarak 25 °C'nin (77 °F) üzerindeki sahaların büyük olasılıkla yeşil çatı-PV kombinasyonundan küçük, olumlu bir etki göreceğini göstermektedir. Bina yöneticileri ve tasarımcılar bu sıcaklık ve güç, çıkışı etkileşimini çatı kararlarında küçük bir ekonomik faktör olarak değerlendirmelidir (Nagengast vd., 2013). Barbón vd., fotovoltaik sistemlerde modüllerin yerleşimi ve eğim açısının enerji üretimi üzerindeki etkisini incelemiştir. Güney yönelimli ($\gamma = 0^\circ$) sistemlerde, optimum eğim açısına (β) göre sapmalar küçük olduğunda enerji kaybı sınırlı kalırken, β açısındaki artışla birlikte kayıpların arttığı belirlenmiştir. Yapılan analizlere göre, 21–23° sapmada %5, 31–33° sapmada %10, 37–40° sapmada %15 ve 43–47° sapmada %20 oranında enerji kaybı meydana gelmektedir (Barbón vd., 2022).

Bu çalışmada, Edirne iklim koşulları için polikristal ve monokristal silikon malzemenin ve farklı eğim açılarının PV sistem performansı üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Enerji Sahasında yapılan saha çalışmalarında ölçülen veriler kullanılarak, hangi panelin daha yüksek performansla çalıştığı tespit edilip, optimum eğim açısı belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar yapılırken her bir

PV panel eş zamanlı olarak aynı ortam ve işletme koşullarında çalıştırılmıştır. Ayrıca her bir PV panel RETScreen yazılımında simüle edilip analiz edilmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen bulgular, Edirne ve benzer iklim özelliklerine sahip iklim bölgeleri için önemlidir.

2. Teorik Bilgiler ve Deneysel Çalışmalar

2.1. Teorik Hesaplama Yöntemi

PV panellerin çıkış gücü hava koşullarından, güneş ışıınımından ve panel sıcaklığından oldukça etkilenir. PV panelin elektrik üretim değeri, PV üzerindeki güneş ışıınımına ve ortam sıcaklığına bağlı olarak standart test koşullarında elde edilenden farklılık gösterir ve enerji girişi PV panel üzerindeki güneş ışıınımına bağlı olarak değişir. Çalışma gerilimi V_{PV} (volt) ve akımı I_{PV} (amper) olan PV panelin çıkış gücü P_{PV} (Watt), Eşitlik 1 ile ifade edilir. N_{PV} , PV panel sayısıdır (Kuczyński ve Chliszcz, 2023).

$$P_{PV} = V_{PV} \cdot I_{PV} \cdot N_{PV} \quad (1)$$

PV panel verimliliği (η_{PV}) Eşitlik 4 ile ifade edilir. PV panelin enerji verimliliği hesaplamaları için gerekli denklemler aşağıda verilmiştir. $\dot{E}_{giriş}$ PV panele enerji giriş değeri (Birim zamandaki enerji (gücü) (kW)), G ortalama güneş ışıınımı ve A_{PV} toplam panel yüzey alanına göre Eşitlik (2) ile hesaplanır (Kuczyński ve Chliszcz, 2023).

$$\dot{E}_{giriş} = A \times G \quad (2)$$

A PV panelin yüzey alanı [m^2], G güneş ışıınım değeri [W/m^2] olarak tanımlanır. Bu durumda, $\dot{E}_{çıkış}$ PV panelin net enerji çıkışı, Eşitlik (3) ile hesaplanır (Kuczyński ve Chliszcz, 2023).

$$\dot{E}_{çıkış} = P_{max} \quad (3)$$

$$P_{mak} = I_{SC} \times V_{OC} \times FF \quad (4)$$

FF (fill factor) dolum faktörüdür. Yani en yüksek çıkış gücünün, V_{OC} açık devre gerilimi ile I_{SC} kısa devre elektrik akımı çarpımına oranı doluluk faktörünü verir. Dolum faktörü genellikle bir fotovoltaik modülün elektrik üretim kalitesini belirtmek için kullanılır (Kuczynski ve Chliszcz, 2023).

$$FF = \frac{I_{mak} \times V_{mak}}{I_{SC} \times V_{OC}} \quad (5)$$

2.2. Nümerik Hesaplama Yöntemi

PV sistemi, RETScreen yazılımında simüle edilip analiz edilmiştir. RETScreen, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji projelerinin teknik ve ekonomik analizini gerçekleştirmek için geliştirilen kapsamlı ve ücretsiz bir yazılımdır. Kanada Doğal Kaynaklar Bakanlığı (Natural Resources Canada) tarafından geliştirilmiş olan bu program, dünya genelinde birçok akademik ve mühendislik projesinde kullanılmaktadır.

Özellikle fotovoltaik (PV) güneş enerjisi sistemleri için RETScreen; sistem tasarımı, enerji üretim tahmini, maliyet analizi, karbon salımı hesaplaması ve geri ödeme süresi gibi kritik değerlendirmeleri yapma imkânı sunmaktadır. Kullanıcılar panel tipi, panel verimi, eğim açısı, sistem kayıpları, inverter özellikleri gibi parametreleri girerek, yıllık üretim ve sistem performansını detaylı biçimde inceleyebilir.

RETScreen'in en büyük avantajlarından biri, içinde bulunan NASA'ya ait geniş iklim verisi tabanı sayesinde, sistemin kurulacağı bölgenin yıllık güneşlenme süresi, sıcaklık, rüzgâr hızı gibi çevresel etkenleri otomatik olarak hesaba katabilmesidir. Böylece yapılan analizler daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlar vermektedir.

2.3. PV panel eğim açısının ve malzeme çeşidinin performansa etkisi

Bilimsel çalışmalar incelendiğinde (Duffie, vd., 2013; Wald, 2021; Grygiel vd., 2021; Winter vd., 1991; Cooper, 1969; Liu vd., 2024; Ruan vd., 2024;

Vasilakopoulou, 2023; Barbón vd., 2022), fotovoltaik modülün verimliliğinin büyük ölçüde eğim açısına bağlı olduğu görülmektedir. Çalışmalarda eğim açısı matematiksel ifadelerle temsil edilmektedir. PV panelin yıllık optimum eğim açısı α yerel olarak Denklem 6 ile hesaplanır (Senpınar, 2018).

$$\text{Eğim Açısı } (\alpha) = 90^\circ - \beta N \quad (6)$$

βN güneş yükseklik açısı Denklem 7, deklinasyon açısı δ Denklem 8 ile ifade edilir (Senpınar, 2018). L kurulum yapılan sahanın enlem açısı, n 1 Ocak'tan itibaren gün sayısıdır.

$$\beta N = 90^\circ - L + \delta \quad (7)$$

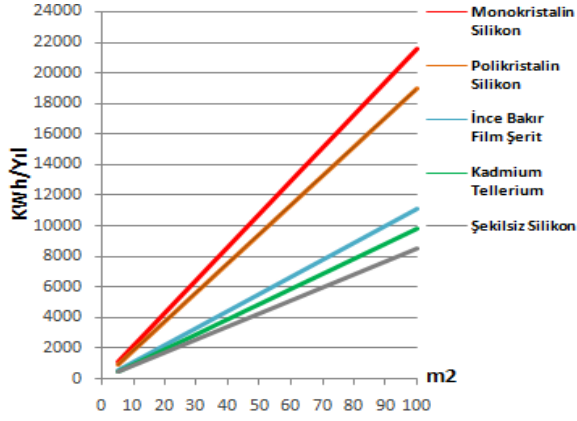
$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] \quad (8)$$

Çizelge 1'de kullanım sezonuna göre optimum eğim açısı hesaplama yöntemi yer almaktadır. Enleme ilave edilen veya enlemden çıkartılan sayısal değerlerin nedeni Zenit açısıdır. Zenit açısı, kış mevsiminde büyümekte, yaz mevsiminde ise küçülmektedir.

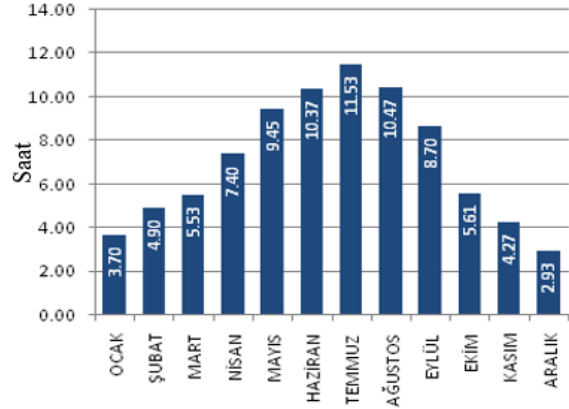
Çizelge 1. Kullanım sezonuna göre optimum eğim açısı

Kullanım sezonu	Optimum Eğim
Tüm yıl	$\alpha = \text{Enlem} \times 0,9$
7 aylık kış mevsimi	$\alpha = \text{Enlem} + 15^\circ$
Kış mevsiminde en soğuk üç ay	$\alpha = \text{Enlem} + 25^\circ$
Yaz mevsimi	$\alpha = \text{Enlem} - 25^\circ$

PV hücre yapısını oluşturan silikon maddenin tek kristalli veya çok kristalli olmasına ya da hücrenin yapısında kullanılan maddenin özelliğine göre de verim değişmektedir. PV panel malzemelerinden Polikristallerde %13-16, monokristallerde %18-24 verimlilik ve ince filmlerde %7-13 verimlilik görülmektedir.



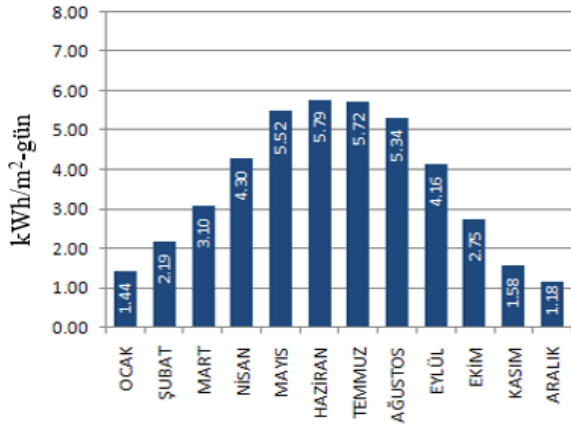
Şekil 1. Edirne/Merkez için PV tipi-alan-üretilebilecek enerji (<https://gepa.enerji.gov.tr/pages/22.aspx>,2025)



Şekil 3. Edirne/Merkez için Güneşlenme Süreleri (Saat) (<https://gepa.enerji.gov.tr/pages/22.aspx>,2025)

2.4.Kurulum yapılan lokasyonun özelliği

Edirne, 41°- 40° kuzey paraleli ve 26°- 34° doğu meridyeni arasında yer almaktadır. Edirne, 6.098 km² yüzölçümüyle deniz seviyesinden yaklaşık 41 metre yüksektir. Şehir bulunduğu konum itibarıyla hem Akdeniz iklimi hem de Orta Avrupa'ya özgü olan kara Şekil 2'de Edirne/Merkez için global radyasyon değerleri ve Şekil 3'te Edirne/Merkez için güneşlenme süreleri yer almaktadır.



Şekil 2. Edirne/Merkez için global radyasyon değerleri (kWh/m²-gün) (<https://gepa.enerji.gov.tr/pages/22.aspx>,2025)

2.5. Deney Düzenegi

Çizelge 2'de PV sistem elemanları ve özellikleri yer almaktadır. Sistemde 1 adet polikristal silikon ,2 adet monokristal silikon PV panel kullanılmıştır. Şekil 4'te PV sistem fotoğrafı ve Şekil 5'te PV sistem şematik gösterimi görülmektedir. Panellerin tek başına ürettiği enerjiyi belirleyebilmek için her bir PV panel ayrı ayrı MPPT şarj kontrol cihazına bağlanmıştır. MPPT şarj kontrol cihazı verileri uzaktan erişim ile kayıt altına alınmıştır.

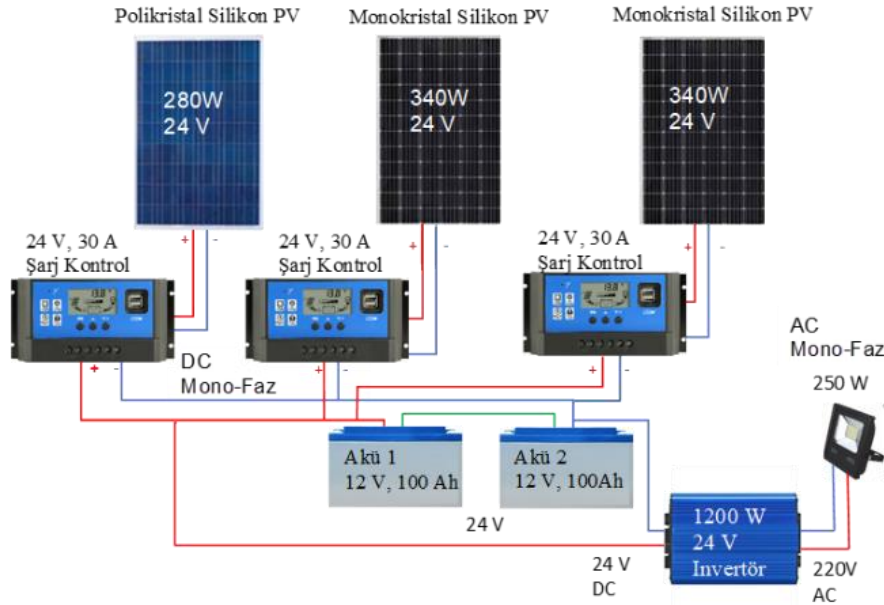
Elektrik PV panelde doğru akım (DC) olarak üretilir. İnverterde ise AC akıma dönüştürülür. PV panellerin etiket değerleri nominal özellikleri 1000 kW ve 25 °C standart test koşulları altında belirlenir. Çizelge 3'te PV panellerin teknik özellikleri yer almaktadır.

Çizelge 2. PV sistem elemanları ve özellikleri

Sistem Elemanı	Özellik
Fotovoltaik sistem	
Polikristal PV panel	280 W, 24 V
Monokristal PV paneller	340W, 24 V
Solar şarj kontrol cihazı MPPT	30 A
Diğer ekipmanlar	
Akü	100 ah, 12 V
İnverter	1200 W, 24 V
AC led projektörler	250 W
Uzaktan veri ulaşım modülü	
Ölçme sistemi	
Eğim açısı ayarlanabilir taşıyıcı karkas yapı	



Şekil 4. PV sistem fotoğrafı



Şekil 5. PV sistem şematik gösterimi

Çizelge 3. PV panellerin teknik özellikleri

Özellik	Değer	
Hücre Tipi	Polikristal	Monokristal
Hücre dizilişi	60 (60x1)	60 (60x1)
Boyutlar	1640x990x35 mm	1660x1001x35 mm
Ağırlık	19 kg	19 kg
Ön kaplama	3,2 mm temperli cam	3,2 mm temperli cam
Çerçeve malzemesi	Alaşımlı alüminyum	Alaşımlı alüminyum
J-box	IP67	IP67
Kablo	4 mm ² (IEC)/12AWG(UL)	4mm ² (IEC)/12AWG(UL)
Nominal Max. Güç	280 W	340 W
Optimum Çalışma Gerilimi	31,2 V	34,98 V
Optimum Çalışma Akımı	8,97 A	9,72
Açık Çevrim Gerilimi (Voc)	37,8 V	42,56 V
Kısa Çevrim Akımı (Isc)	9,50 A	9,99 A
Modül verimi	%19	%23
Çalışma Sıcaklığı	-40°C~+85°C	-40°C~+85°C

3. Bulgular ve Tartışmalar

3.1. RETScreen Analizi

Bu çalışmada, güneş paneli türlerinin farklı eğim açılarına göre performans karşılaştırması yapılmıştır. Analiz kapsamında iki farklı panel tipi kullanılmıştır: Polikristal (Poli-Si) ve Monokristal (Mono-Si) paneller. Poli-Si panel 280 W güç ve %19 verim değerine sahipken, Mono-Si panel 340 W güç ve %24 verim değerine sahiptir.

Çizelge 4'te RETScreen analizi PV panel özellikleri yer almaktadır. Her iki panel için eğim açısı 0° ile 40° arasında artan şekilde değerlendirilmiştir. Bu veri seti, RETScreen programında kullanılarak farklı açıların enerji üretimi üzerindeki etkisi incelenmiş ve optimum eğim açıları belirlenmiştir.

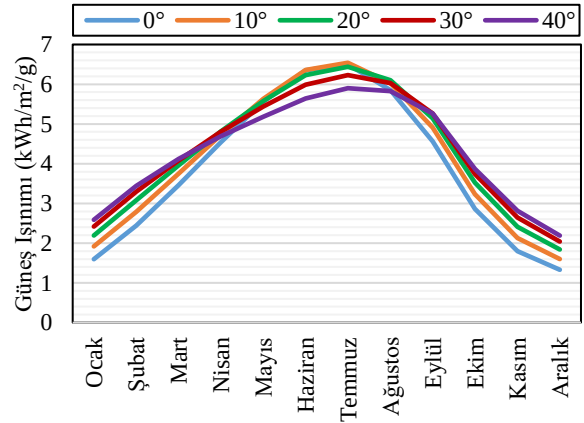
Çizelge 5 ve Şekil 6'da nümerik analizde kullanılan yatay ve eğimli düzleme gelen aylık ortalama güneş ışınlamı RETScreen NASA verileri yer almaktadır.

Çizelge 4. RETScreen analizi PV panel özellikleri

Panel	Güç (W)	Verim (%)	Açı (°)
Poli-Si	280	19	0
			10
			20
			30
			40
Mono-Si	340	24	0
			10
			20
			30
			40

Çizelge 5. Yatay ve eğimli düzleme gelen aylık ortalama güneş ışınlamı RETScreen NASA verileri

Ay	Güneş Işınımı (kWh/m ² /g)				
	0°	10°	20°	30°	40°
Ocak	1.6	1.92	2.19	2.42	2.59
Şubat	2.44	2.79	3.08	3.3	3.44
Mart	3.46	3.75	3.96	4.08	4.12
Nisan	4.54	4.72	4.81	4.8	4.69
Mayıs	5.56	5.63	5.58	5.44	5.18
Haziran	6.35	6.36	6.23	5.99	5.64
Temmuz	6.5	6.54	6.44	6.23	5.9
Ağustos	5.85	6.03	6.1	6.03	5.83
Eylül	4.56	4.91	5.14	5.26	5.26
Ekim	2.86	3.23	3.52	3.74	3.87
Kasım	1.8	2.13	2.41	2.64	2.81
Aralık	1.33	1.6	1.84	2.04	2.19
Yıllık Ortalama	3.91	4.14	4.28	4.34	4.3



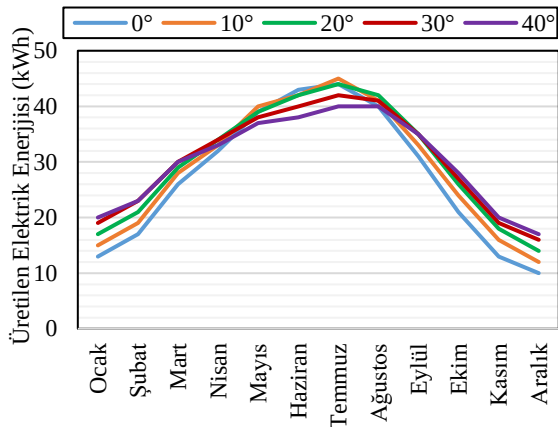
Şekil 6. Yatay ve eğimli düzleme gelen aylık ortalama güneş ışınlamı RETScreen NASA verileri

Çizelge 6'da RETScreen analiz sonuçları görülmektedir. Her bir analiz için monokristal malzemeden üretilen PV panelin enerji üretimi polikristal silikon PV panele göre daha fazladır.

Çizelge 6. RETScreen analiz sonuçları

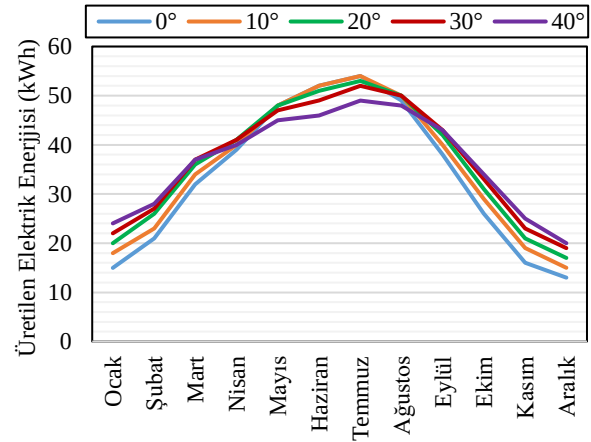
Ay	Şebekeye Verilen Elektrik(kWh) Polikristal Silikon Malzeme					Şebekeye Verilen Elektrik(kWh) Monokristal Silikon Malzeme				
	0°	10°	20°	30°	40°	0°	10°	20°	30°	40°
Ocak	13	15	17	19	20	15	18	20	22	24
Şubat	17	19	21	23	23	21	23	26	27	28
Mart	26	28	29	30	30	32	34	36	37	37
Nisan	32	33	34	34	33	39	40	41	41	40
Mayıs	39	40	39	38	37	48	48	48	47	45
Haziran	43	42	42	40	38	52	52	51	49	46
Temmuz	44	45	44	42	40	54	54	53	52	49
Ağustos	40	41	42	41	40	49	50	50	50	48
Eylül	31	33	35	35	35	38	40	42	43	43
Ekim	21	24	26	27	28	26	29	31	33	34
Kasım	13	16	18	19	20	16	19	21	23	25
Aralık	10	12	14	16	17	13	15	17	19	20
Yıllık toplam	330	348	359	364	361	401	423	437	442	439

Şekil 7’de polikristal silikon malzemeli ve Şekil 8’de monokristal silikon malzemeli PV panelin farklı eğim açılarındaki ürettiği elektrik gücünün aylara göre değişimi yer almaktadır. Kış aylarında güneş ışınları eğik açı ile, yaz aylarında ise daha dik açı ile gelmektedir. Ayrıca PV panelden üretilen en yüksek güç, güneş ışınları panele 90° açı ile geldiğinde sağlanmaktadır. Dolayısıyla güneşin geliş açısının PV panel yüzeyine dik gelmesi için kış aylarında eğim açısının büyük, yaz aylarında ise eğim açısının küçük olması üretilen enerjiyi arttırmaktadır.



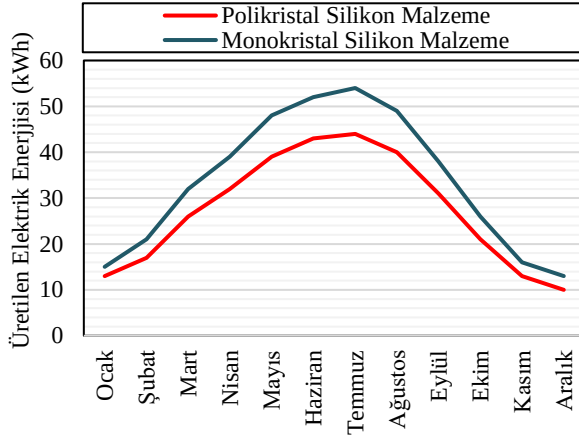
Şekil 7. RETScreen analizinde Polikristal silikon malzemeli PV panelin farklı eğim açılarındaki ürettiği elektrik gücü

Analiz sonuçlarına göre kış ayları için 40° eğim açısında, yaz ayları için 20° eğim açısında daha yüksek güç üretimi sağlanmıştır.

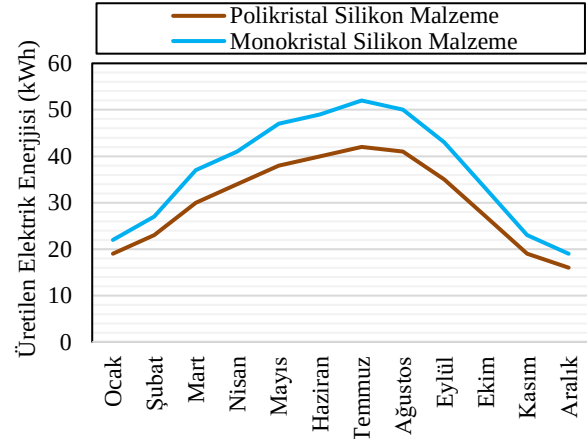


Şekil 8. RETScreen analizinde monokristal silikon malzemeli PV panelin farklı eğim açılarındaki ürettiği elektrik gücü

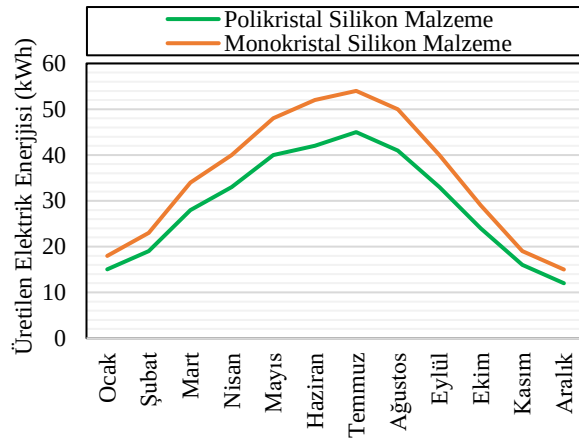
Şekil 9’da 0°, Şekil 10’da 10°, Şekil 11’de 20°, Şekil 12’de 30° ve Şekil 13’te 40° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik enerjisi kıyaslaması yer almaktadır.



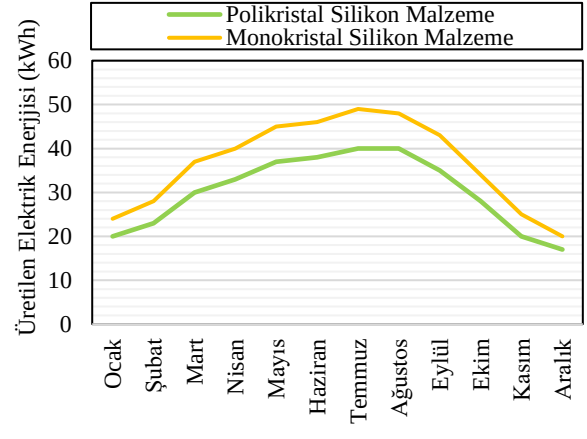
Şekil 9. RETScreen analizinde 0° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik enerjisi kıyaslaması



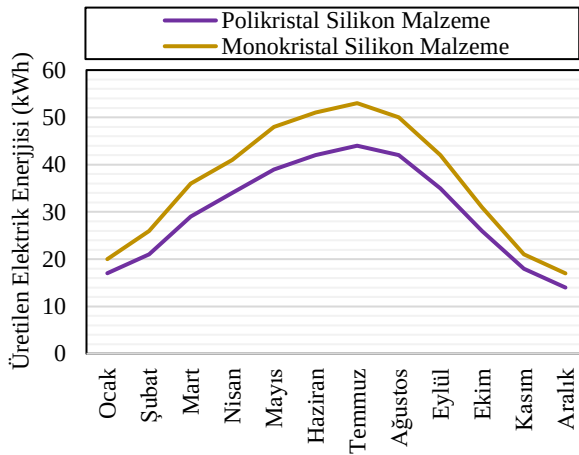
Şekil 12. RETScreen analizinde 30° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik enerjisi kıyaslaması



Şekil 10. RETScreen analizinde 10° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik enerjisi kıyaslaması



Şekil 13. RETScreen analizinde 40° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik enerjisi kıyaslaması



Şekil 11. RETScreen analizinde 20° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik enerjisi kıyaslaması

3.2. Deneysel Analiz

PV sistemlerde malzemenin enerji üretim performansına etkisi görebilmek için polikristal silikon malzemeli PV panelin eğim açısı ile monokristal silikon malzemeli panelin birinin eğim açısı aynı değere ayarlanmıştır. Aynı koşullar altında eğim açısının performansa etkisinin inceleyebilmek için ise diğer monokristal silikon PV panel farklı eğim açılarında çalıştırılmıştır. Şekil 14'te aynı eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV paneller ve Şekil 15'te farklı eğim açılı monokristal silikon malzemeli PV paneller görülmektedir.



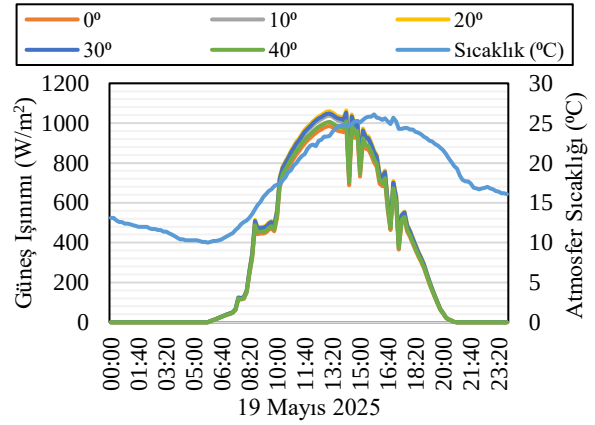
Şekil 14. Aynı eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV paneller



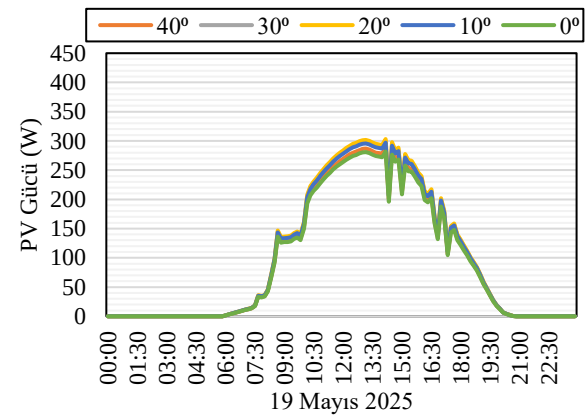
Şekil 15. Farklı eğim açılı monokristal silikon malzemeli PV paneller

Trakya Üniversitesi meteoroloji istasyonu ile kurulum yapılan alandaki güneş ışınlamı, dış ortam sıcaklığı, rüzgar hızı ve yönü, dış ortam nem değeri 7 gün 24 saat her türlü hava koşulunda kesintisiz olarak ölçülmüştür. Şekil 16'da 19 Mayıs 2025 için kurulum yapılan sahada ortalama güneş ışınlamı ve hava sıcaklığı değişimi verilmiştir. Şekil 17'de polikristal silikon malzemeli, Şekil 18'de monokristal silikon malzemeli PV panelin farklı eğim açılarındaki ürettiği elektrik güç yer almaktadır. Diyagramlardan görüldüğü gibi monokristal PV panelin performansı daha yüksektir.

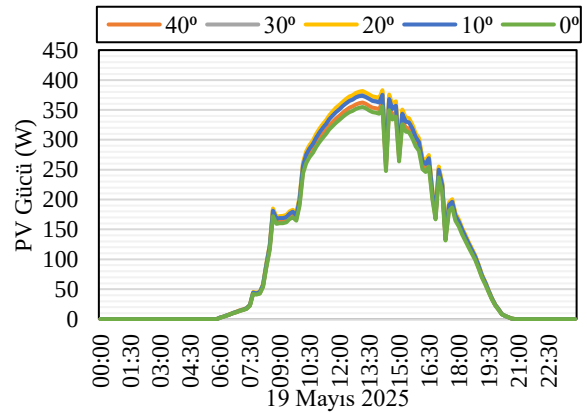
19 Mayıs 2025 için Şekil 19'da 0° eğim açılı, Şekil 20'de 10°, Şekil 21'de 20°, Şekil 22'de 30° ve Şekil 23'te 40° için PV panelin ürettiği elektrik güç değişimi görülmektedir. Diyagramlardan görüldüğü gibi ölçüm yapılan tarihte panelin optimum eğim açısı 20°'dir.



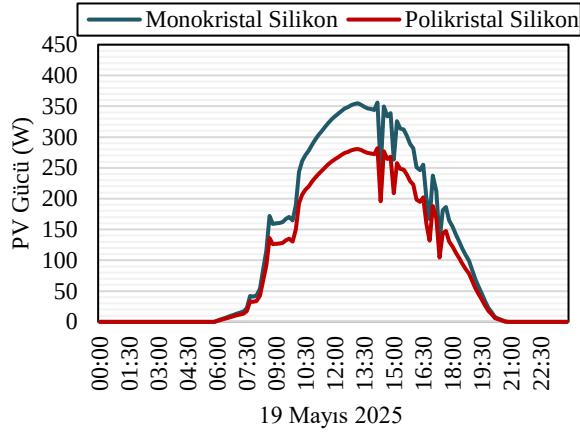
Şekil 16. 19 Mayıs 2025 için kurulum yapılan sahada ortalama güneş ışınlamı ve hava sıcaklığı değişimi.



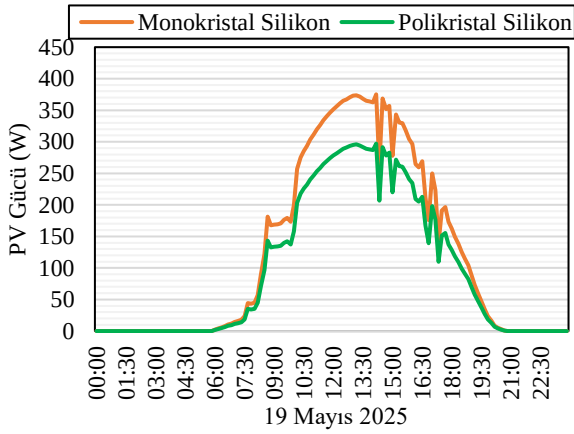
Şekil 17. 19 Mayıs 2025 için polikristal silikon malzemeli PV panelin farklı eğim açılarındaki ürettiği elektrik gücü



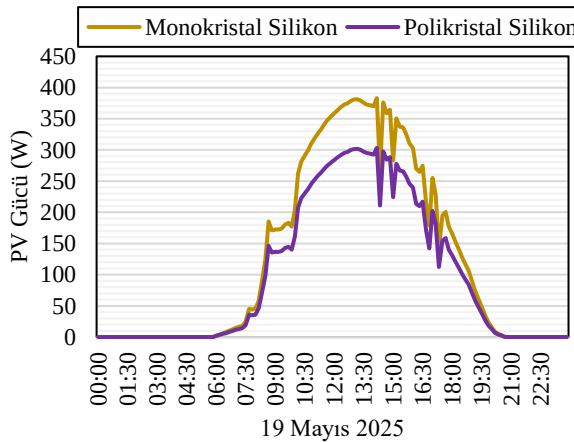
Şekil 18. 19 Mayıs 2025 için monokristal silikon malzemeli PV panelin farklı eğim açılarındaki ürettiği elektrik gücü



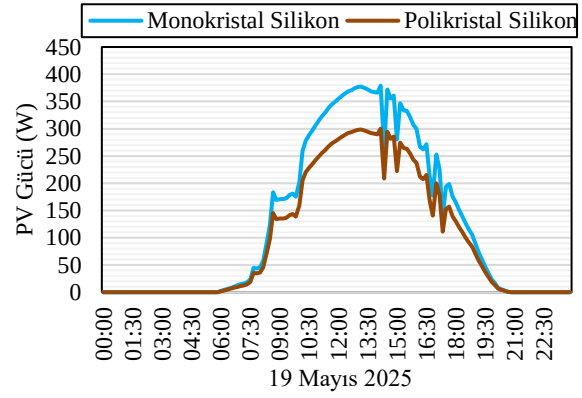
Şekil 19. 19 Mayıs 2025 için 0° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik gücü



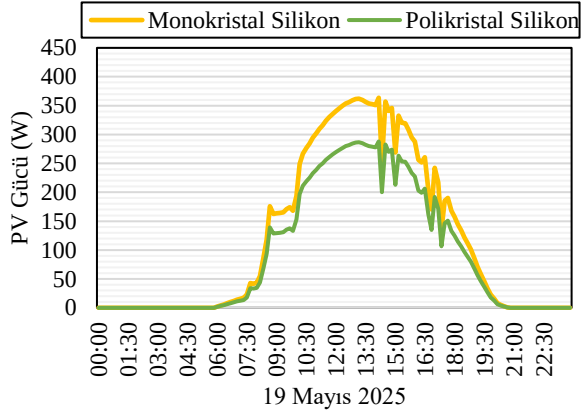
Şekil 20. 19 Mayıs 2025 için 10° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik gücü



Şekil 21. 19 Mayıs 2025 için 20° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik gücü



Şekil 22. 19 Mayıs 2025 için 30° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik gücü



Şekil 23. 19 Mayıs 2025 için 40° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik gücü

4. Sonuçlar

PV sistemler Edirne gibi yıl boyunca uzun süre güneş ışığı alan bir şehir için en iyi alternatiftir. Bu çalışmada Edirne iklim koşulları için polikristal ve monokristal silikon malzemenin ve farklı eğim açılarının PV sistem performansı üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. RETScreen analiz sonuçlarına göre kış ayları için çalışılan eğim açıları değerlendirildiğinde 40° eğim açısında, yaz ayları için ortalama 20° eğim açısında daha yüksek güç üretimi sağlanmıştır. Yapılan deneysel analizlere göre ise Edirne iklim koşulları için 2025 yılı Mayıs ayında en yüksek güç üretimi PV panel eğim açısı 20° için elde edilmiştir. Monokristal malzemeden üretilen PV panelin enerji üretimi

polikristal silikon PV panele göre daha fazladır. Deneysel analiz ile nümerik analiz sonuçları uyumludur.

Teşekkür

Trakya Üniversitesi Rektörlüğüne mali desteklerinden dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

Çıkar Çatışması: Yazarların beyan edilecek herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Veri Paylaşım Bildirimi: Veriler makul talepler üzerine paylaşılabılır.

Yazar Katkıları: Kavram: H.A., Tasarım: H.A., Uygulama: H.A., E.E., E.E., U.K.S., K.B.K., K.B.Y., Malzeme temini: TÜBAP, Veri toplama: H.A., Veri analizi/yorumlanması: H.A., E.E., E.E., U.K.S., K.B.K., K.B.Y., Yazım: H.A., Eleştirel değerlendirme: H.A.

Mali Destek: Bu çalışma, Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (TÜBAP) tarafından Öğrenci Bilimsel Araştırma Desteği ile finanse edilmiştir (Proje No: TÜBAP-2025/50).

ORCID

Hacer Akhan, 0000-0002-7896-6441

Emir Emiralioğlu, 0009-0008-4016-1673

Enis Eşer, 0009-0007-3526-4187

Ulaş Kıvanç Seçgin, 0009-0001-7249-6522

Kaan Berkay Karabıyık, 0009-0007-7848-5940

Kani Başar Yenici, 0009-0000-0999-3617

Kaynaklar

Arslan M. (2023). Fotovoltaik Sistemlerde Optimum Eğim ve Yönlendirme Açılarının Belirlenmesi, T.C Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 147.

Afzaal, M., O'Brien, P. (2006). Recent developments in II–VI and III–VI semiconductors and their applications in solar cells, J Mater Chem, 17.

Barbón, A., Ghodbane, M., Bayón, L., Said, Z. (2022). A general algorithm for the optimization of photovoltaic modules layout on irregular rooftop shapes. Journal of Cleaner Production, 365, 132774.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132774>

Bilgili, M. E., Dağtekin, M. (2017). “Fotovoltaik Piller ile Elektrik Üretiminde Uygun Eğim Açısının ve Yıllık Oluşan Enerji Farkının Belirlenmesi”, Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi (GBAD), 156-167.

Chang, Y.P. (2010). Optimal the tilt angles for photovoltaic modules in Taiwan, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 32-9, 956-964.

Cooper, P. I. (1969). The absorption of radiation in solar stills, Solar Energy, 12 (3), 333–346. [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(69\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0038-092x(69)90047-4)

Duffie, J. A., Beckman, W. A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>

Geliş K., Akyürek E.F., Yoladı M., (2020). Panel Konumu ve Açısının Fotovoltaik Panel Karakteristiği Üzerine Etkisi, Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10(3), 1899-1908.

Grygiel, P., Tarłowski, J., Przeźniak-Welenc, M., Łapiński, M., Łubiński, J., Mielewczyk-Gryń, A. et

- al. (2021). Prototype design and development of low-load-roof photovoltaic modules for applications in on-grid systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 233, 111384. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111384>
- IEA - International Energy Agency, (2018). *Energy Efficiency 2018: Analysis and Outlooks to 2040*. in: Market Report Series. IEA/OECD.
- Khahro, S.F. (2015). Evaluation of solar energy resources by establishing empirical models for diffuse solar radiation on tilted surface and analysis for optimum tilt angle for a prospective location in southern region of Sindh, Pakistan, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, 1073-1080.
- Kuczynski, W., Chliszcz, K. (2023). Energy and exergy analysis of photovoltaic panels in northern Poland, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 174, 113138.
- Liu, R., Liu, Z., Xiong, W., Zhang, L., Zhao, C., Yin, Y. (2024). Performance simulation and optimization of building façade photovoltaic systems under different urban building layouts, *Energy*, 288, 129708. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129708>
- Liu, Y.H.B., Jordan, C.R. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, 4- 3, 1-19.
- Mondol, D.J., Yohanis G.Y., Norton B. (2008). Solar, Solar radiation modelling for the simulation of photovoltaic systems, 33- 5, 1109-1120
- Nagengast A., Hendrickson C., Matthews H. S. (2013). Variations in photovoltaic performance due to climate and low-slope roof choice, *Energy and Buildings*,
- Navntoft, L.C. (2012). UV solar radiation on a tilted and horizontal plane: Analysis and comparison of 4 years of measurements, *Solar Energy*, 86-1, 307-318.
- Qu H., Du Z., Kong Q. (2024). Experimental study on the effect of tilt angle on the output parameters of a photovoltaic-phase change material (PV-PCM) system under wind conditions, *Journal Of The Energy Storage*, 102, 114263. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114263>
- Ruan, T., Wang, F., Topel, M., Laumert, B., Wang, W. (2024). A new optimal PV installation angle model in high-latitude cold regions based on historical weather big data, *Applied Energy*, 359, 122690. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122690>
- Salari, M., Javaran, E. (2017). Optimising the tilt angle for solar surfaces using different solar irradiation models in Yazd, 323-331.
- Şen, Z. (2008). Solar energy in progress and future research trends. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(4), 367-416
- Senpınar, A. (2018). Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions, Chapter 2.16 Optimization Of Slope Angles <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-813734-5.00028-7>
- Shanmugan, S., Hammoodii, K. A., Eswarlal, T., Selvaraju, P., Bendoukha, S., Nabil Barhoumi, N., Mansour, M., Refaey, H.A., Rao, M.C., Mourad, A.H., Fujii, M., Elsheikhb, A. (2024). A technical appraisal of solar photovoltaic-integrated single slope single basin solar still for simultaneous energy and water generation, *Case Studies in Thermal Engineering*, 54, 104032 <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104032>

Tian R., Li X., Zhang Y., Zhang L., Yue Z., Li X., (2024). Mitigation of shady-sunny slopes effect on subgrade by photovoltaic sheltered boards in permafrost regions, Applied Thermal Engineering, 248,123087.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123087>

Vasilakopoulou, K., Ulpiani, G., Khan, A., Synnefa, A., Santamouris, M. (2023). Cool roofs boost the energy production of photovoltaics: Investigating the impact of roof albedo on the energy performance of monofacial and bifacial photovoltaic modules, Solar Energy, 265, 111948.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111948>

Winter, C.-J., Sizmann, R. L., Vant-Hull, L. L. (Eds.) (1991). Solar Power Plants. Springer Berlin Heidelberg, 425. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61245-9>

<https://gepa.enerji.gov.tr/pages/22.aspx>,2025, Mayıs 2025.

https://tr.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCrkiye%27de_g%C3%BCne%C5%9F_enerjisi, Mayıs 2025.

<https://www.aydemperakende.com.tr/blog/fotovoltaik-sistem-nedir>, Mayıs 2025.

<https://www.piagrid.com/rehber/gunes-paneli-acisi-ve-yonu>, Mayıs 2025