

VERİMLİLİK DERGİSİ



T.C. SANAYİ VE
TEKNOLOJİ BAKANLIĞI



Cilt: 59 | Sayı: 4

Productivity Dynamics in Türkiye's Waste Management and Resource Recovery Sector: An Analysis Using Törnqvist Productivity Index (2009-2023)

Fatih Cemil Özbüğday

Kaynakların Etkin Kullanımında Dijital Dönüşümün Rolü

Hüseyin Şentürk

Analysis of Medical Imaging Devices in Türkiye Using the Malmquist Productivity Index

Yavuz Selim Küçük

Türkiye Tarım Sektöründe Toplam Faktör Verimliliği (TFV): 1961-2021 Döneminin Malmquist TFV Endeksiyle Analizi

Mehmet Ali Cevheri, Nihat Küçük

Measuring the Performance of Airport Operations in Türkiye with The MPSI Based MABAC Method

Nalan Gülten Akın

Avrupa Ülkelerinin Yeşil Büyüme Performanslarının CRITIC-MEREC Tabanlı WASPAS Yöntemi ile Değerlendirilmesi

Emel Gelmez, Hande Eren

Öğrenci Memnuniyetini ve Kaynak Etkinliğini Esas Alan Bir Sınav Planlama Modeli: Matematiksel Modelleme ve Uygulamalı Bir Karar Destek Sistemi Tasarımı

Eren Çelik, Ezgi Kıran, Asya Aybala Özdiş, Banu İçmen Erdem

Geliştirilmiş Entropi Temelli Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Enflasyon Muhasebesi Uygulamasının İşletme Performansına Etkisinin Değerlendirilmesi: Ana Metal Sanayi Sektörü Üzerine Bir Uygulama

Feyzi Yaşar

The Efficiency of Health Systems in European Union (EU) Countries with Undesirable Output: A DEA-Slack-Based Model Approach

Gözde Yeşilaydın, Bilal Saraç

The Impacts of Firms' Research and Development Capacities on Innovation Development

Saim Aydın, Erdiç Koç

Türkiye'deki Devlet Üniversitelerinde Yazılım Tedarik Kararları: GAHP ve Duyarlılık Analizi Uygulaması

Mustafa Kaya

Analysis of Bed Utilization Efficiency of Intensive Care Units with Pabon Lasso Model

Ferda Işıkelik, Derya Engin

OECD Ülkelerinde Yeşil Ticari Açıklığın Çevresel Sürdürülebilirlik Üzerine Etkisi: Malzeme Ayak İzine Dayalı Kanıtlar

Gizem Mukiyen Avcı

Investigating the Impact of Innovation and Intellectual Capital on Firm Performance Using Structural Equation Modeling

Nilüfer Yücedağ Erdiç

Türk Savunma ve Havacılık Sanayisinde Üretim Faktörlerinin Analizi

Fethi Aslan

From Stress to Support: How Technostress Inhibitors Drive Task Productivity in Public Institutions

Esra Şahan, Hatice Gökçe Demirel

JOURNAL OF PRODUCTIVITY



T.C. SANAYİ VE
TEKNOLOJİ BAKANLIĞI



VERİMLİLİK DERGİSİ

Journal of Productivity

T.C. SANAYİ VE TEKNOLOJİ BAKANLIĞI

Stratejik Araştırmalar ve Verimlilik
Genel Müdürlüğü'nün Yayınıdır

ISSN: 1013-1388 e-ISSN: 2757-6973

YIL: 2025 Sayı: 4

Yayın Türü
Yerel-Sürel / Türkçe-İngilizce

Sahibi
T.C. SANAYİ VE TEKNOLOJİ BAKANLIĞI
STRATEJİK ARAŞTIRMALAR VE VERİMLİLİK GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
adına
Genel Müdür
Abdullah BAŞAR

Editör
Doç. Dr. Önder BELGİN

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü
Doç. Dr. Önder BELGİN

Grafik Tasarım ve Uygulama
Fulya KOÇ - Şeniz KOBAL

Dil Editörleri
Aytunç AYHAN
Şirin Müge KAVUNCU

Yönetim Yeri
T.C. SANAYİ VE TEKNOLOJİ BAKANLIĞI
STRATEJİK ARAŞTIRMALAR VE VERİMLİLİK GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
Adres: Mustafa Kemal Mahallesi Dumlupınar Bulvarı
(Eskişehir Yolu 7. Km) 2151. Cadde No: 154/A
Çankaya 06510 ANKARA
Tel: 0 312 201 65 02
verimlilikdergisi@sanayi.gov.tr
https://dergipark.org.tr/pub/verimlilik

Baskı Yeri
Elma Teknik Basım Matbaacılık
Adres: İvedik OSB Matbaacılar Sitesi 1516/1 Sk. No: 35
Yenimahalle 06378 ANKARA
Tel: 0 312 229 92 65 - Fax: 0 312 231 67 06 elma@elmateknikbasim.com.tr

Baskı Tarihi
08.10.2025

YAYIN KURULU / EDITORIAL BOARD

Doç. Dr. Önder BELGİN - Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
Doç. Dr. M. Hürol METE - Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
Dr. Alp Eren YURTSEVEN - Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Kurumu
Dr. Cangül TOSUN - Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
Dr. Kağan KARADEMİR - Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
Dr. Murat MAHMUTOĞLU - Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
Dr. Sinan BORLUK - Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
Dr. Yücel ÖZKARA - Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı

DANIŞMA KURULU / ADVISORY BOARD

Prof. Dr. Adil BAYKASOĞLU - Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Ali SINAĞ - Ankara Üniversitesi
Prof. Dr. Birdoğan BAKI - Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Cengiz KAHRAMAN - İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Hasan Murat ERTUĞRUL - Anadolu Üniversitesi
Prof. Dr. Halit KESKİN - Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. İskender PEKER - Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. İsmail EROL - Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN - Yükseköğretim Denetleme Kurulu
Prof. Dr. Mine ÖMÜRGÖNÜLŞEN - Hacettepe Üniversitesi
Prof. Dr. Muammer ZERENLER - Selçuk Üniversitesi
Prof. Dr. Mustafa Zihni TUNCA - Süleyman Demirel Üniversitesi
Prof. Dr. Necati ARAS - Boğaziçi Üniversitesi
Prof. Dr. Özlem ATAY - Ankara Üniversitesi
Prof. Dr. Ramazan AKTAŞ - TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Prof. Dr. Selçuk PERÇİN - Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Serpil EROL - Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Süphan NASIR - İstanbul Üniversitesi
Prof. Dr. Türkay DERELİ - Hasan Kalyoncu Üniversitesi
Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ - Başkent Üniversitesi
Doç. Dr. Dursun BALKAN - Türk Hava Kurumu Üniversitesi
Dr. Cihan YALÇIN - SRG Mühendislik Danışmanlık Ltd. Şti.

Verimlilik Dergisi'nde yayımlanan yazılarda belirtilen görüşler yazarlarına aittir. Dergide yayımlanan yazılardan, Verimlilik Dergisi'nin adı ve sayısı anılarak alıntı yapılabilir.

Verimlilikle ilgili tüm disiplinlerden gelecek makalelere açık olan Verimlilik Dergisi, 2004 yılından itibaren "Hakemli Dergi" statüsü ile yayımlanmaya başlamıştır. **Verimlilik Dergisi, 2008 yılından bu yana TÜBİTAK TR Dizin Sosyal ve Beşeri Bilimler Veri Tabanı'nda taranmaktadır.** Verimlilik Dergisi'nde yayınlanması istenen çalışmalara ilişkin süreç yönetimi, TÜBİTAK ULAKBİM DergiPark aracılığıyla yürütülmektedir.

Yazarlar, Verimlilik Dergisi'nde yayımlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptirler ve çalışmaları **CC BY-NC 4.0** lisansı altında yayımlanmaktadır.
The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the **CC BY-NC 4.0** license.



İÇİNDEKİLER

CONTENTS

743

756

Productivity Dynamics in Türkiye's Waste Management and Resource Recovery Sector: An Analysis Using Törnqvist Productivity Index (2009-2023)

Türkiye'nin Atık Yönetimi ve Kaynak Geri Kazanımı Sektöründe Verimlilik Dinamikleri: Törnqvist Verimlilik Endeksi Kullanılarak Bir Analiz (2009-2023)

Fatih Cemil Özbüğday

757

768

Kaynakların Etkin Kullanımında Dijital Dönüşümün Rolü

The Role of Digital Transformation in the Efficient Use of Resources

Hüseyin Şentürk

769

786

Analysis of Medical Imaging Devices in Türkiye Using the Malmquist Productivity Index

Malmquist Verimlilik İndeksi ile Türkiye'deki Tıbbi Görüntüleme Cihazlarının Analizi

Yavuz Selim Küçük

787

802

Türkiye Tarım Sektöründe Toplam Faktör Verimliliği (TFV): 1961-2021 Döneminin Malmquist TFV Endeksiyle Analizi

Total Factor Productivity (TFP) in the Turkish Agricultural Sector: Analysis of the 1961–2021 Period with the Malmquist TFP Index

Mehmet Ali Cevheri, Nihat Küçük

803

826

Measuring the Performance of Airport Operations in Türkiye with The MPSI Based MABAC Method

Türkiye'deki Havalimanları İşletmelerinin Performanslarının MPSI Tabanlı MABAC Yöntemi ile Ölçülmesi

Nalan Gülten Akın

827

852

Avrupa Ülkelerinin Yeşil Büyüme Performanslarının CRITIC-MEREC Tabanlı WASPAS Yöntemi ile Değerlendirilmesi

Evaluation of Green Growth Performance of European Countries with CRITIC-MEREC Based WASPAS Method

Emel Gelmez, Hande Eren

853

870

Öğrenci Memnuniyetini ve Kaynak Etkinliğini Esas Alan Bir Sınav Planlama Modeli: Matematiksel Modelleme ve Uygulamalı Bir Karar Destek Sistemi Tasarımı

Student Satisfaction and Resource Efficiency-Oriented Exam Scheduling Model: Mathematical Modelling and an Applied Decision Support System Design

Eren Çelik, Ezgi Kıran, Asya Aybala Özdil, Banu İçmen Erdem

871

892

Geliştirilmiş Entropi Temelli Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Enflasyon Muhasebesi Uygulamasının İşletme Performansına Etkisinin Değerlendirilmesi: Ana Metal Sanayi Sektörü Üzerine Bir Uygulama

Evaluation of the Effect of Inflation Accounting on Business Performance with An Improved Entropy-Based Gray Relational Analysis Method: An Application on Basic Metal Industry Sector

Feyzi Yaşar

893

908

The Efficiency of Health Systems in European Union (EU) Countries with Undesirable Output: A DEA-Slack-Based Model Approach

Avrupa Birliği (AB) Ülkelerinin Sağlık Sistemlerinin İstenmeyen Çıktıyla Etkinliği: Aylak Tabanlı Veri Zarflama Analizi Yaklaşımı

Gözde Yeşilaydın, Bilal Saraç

909

924

The Impacts of Firms' Research and Development Capacities on Innovation Development

Firmaların Araştırma ve Geliştirme Kapasitelerinin İnovasyon Geliştirme Üzerindeki Etkileri

Saim Aydın, Erdinç Koç

925

942

Türkiye'deki Devlet Üniversitelerinde Yazılım Tedarik Kararları: GAHP ve Duyarlılık Analizi Uygulaması

Software Supply Decisions in State Universities in Türkiye: An Application of GAHP and Sensitivity Analysis

Mustafa Kaya

943

954

Analysis of Bed Utilization Efficiency of Intensive Care Units with Pabon Lasso Model

Yoğun Bakım Ünitelerinin Yatak Kullanım Etkinliğinin Pabon Lasso Modeli ile Analizi

Ferda Işıkcılık, Derya Engin

955

970

OECD Ülkelerinde Yeşil Ticari Açıklığın Çevresel Sürdürülebilirlik Üzerine Etkisi: Malzeme Ayak İzine Dayalı Kanıtlar

The Impact of Green Trade Openness on Environmental Sustainability in OECD Countries: Evidence Based on Material Footprint

Gizem Mukiyen Avcı

971

984

Investigating the Impact of Innovation and Intellectual Capital on Firm Performance Using Structural Equation Modeling

İnovasyon Ve Entelektüel Sermayenin Firma Performansına Etkisinin Yapısal Eşitlik Modellemesi Yoluyla Araştırılması

Nilüfer Yücedağ Erdinç

985

1002

Türk Savunma ve Havacılık Sanayisinde Üretim Faktörlerinin Analizi

Analysis of Production Factors in Turkish Defense and Aerospace Industry

Fethi Aslan

1003

1018

From Stress to Support: How Technostress Inhibitors Drive Task Productivity in Public Institutions

Stresten Desteğe: Kamu Kurumlarında Teknostres İnhibitörlerinin Görev Üretkenliğe Etkisi

Esra Şahan, Hatice Gökçe Demirel

Productivity Dynamics in Türkiye's Waste Management and Resource Recovery Sector: An Analysis Using Törnqvist Productivity Index (2009-2023)

Fatih Cemil Özbuğday¹ 

Purpose: This study aims to conduct the first comprehensive efficiency analysis of Türkiye's Waste Management and Resource Recovery sector at the industry level. It examines productivity variations across different firm sizes to inform policy development for Türkiye's circular economy transition.

Methodology: The study employs the Törnqvist Productivity Index to measure total factor productivity changes from 2009 to 2023. It analyzes industry-level data from the Turkish Statistical Institute for micro, small, medium, and large firms within the E38 sector.

Findings: Medium-sized firms demonstrate superior productivity performance with positive average TFP growth (0.0242), while large, micro, and small firms experience productivity declines (-0.0123, -0.0197, and -0.0228, respectively), which suggests an optimal balance of scale economies and managerial flexibility in medium-sized operations.

Originality: This research presents the first comprehensive efficiency analysis of Türkiye's Waste Management and Resource Recovery sector. It offers insights into productivity dynamics across different firm sizes and provides evidence-based recommendations for enhancing sector efficiency in an emerging economy context.

Keywords: Productivity, Waste Management, Circular Economy, Firm Size, Törnqvist Index.

JEL Codes: Q53, L25, O47, Q56, D24.

Türkiye'nin Atık Yönetimi ve Kaynak Geri Kazanımı Sektöründe Verimlilik Dinamikleri: Törnqvist Verimlilik Endeksi Kullanılarak Bir Analiz (2009-2023)

Amaç: Bu çalışma, Türkiye'nin Atık Yönetimi ve Kaynak Geri Kazanımı sektörünün endüstri düzeyinde ilk kapsamlı verimlilik analizini gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Farklı firma büyüklükleri arasındaki üretkenlik farklılıklarını inceleyerek Türkiye'nin döngüsel ekonomi geçişine yönelik politika geliştirmeye katkı sağlamaktadır.

Yöntem: Çalışma, 2009'dan 2023'e kadar toplam faktör verimliliği değişimlerini ölçmek için Törnqvist Verimlilik Endeksi'ni kullanmaktadır. E38 sektöründeki mikro, küçük, orta ve büyük ölçekli firmalar için Türkiye İstatistik Kurumu'ndan elde edilen endüstri düzeyindeki verileri analiz etmektedir.

Bulgular: Orta ölçekli firmalar pozitif ortalama TFP büyümesi (0,0242) ile üstün verimlilik performansı gösterirken, büyük, mikro ve küçük firmalar verimlilik düşüşleri yaşamaktadır (sırasıyla -0,0123, -0,0197 ve -0,0228). Bu durum, orta ölçekli işletmelerde ölçek ekonomileri ile yönetsel esneklik arasında optimal bir denge olduğunu göstermektedir.

Özgünlük: Bu araştırma, Türkiye'nin Atık Yönetimi ve Kaynak Geri Kazanımı sektörünün ilk kapsamlı verimlilik analizini sunmaktadır. Farklı firma büyüklükleri arasındaki üretkenlik dinamikleri hakkında içgörüler sunarak gelişmekte olan bir ekonomi bağlamında sektör verimliliğini artırmaya yönelik kanıta dayalı öneriler sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Verimlilik, Atık Yönetimi, Döngüsel Ekonomi, Firma Büyüklüğü, Törnqvist Endeksi.

JEL Kodları: Q53, L25, O47, Q56, D24.

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Political Sciences, Department of Economics, Ankara, Türkiye

Corresponding Author: Fatih Cemil Özbuğday, fcozbugday@aybu.edu.tr

DOI: 10.51551/verimlilik.1688156

Research Article | Submitted: 10.03.2025 | Accepted: 27.05.2025

Cite: Özbuğday, F.C. (2025). "Productivity Dynamics in Türkiye's Waste Management and Resource Recovery Sector: An Analysis Using Törnqvist Productivity Index (2009-2023)", *Verimlilik Dergisi*, 59(4), 743-756.

1. INTRODUCTION

The circular economy has become central to global strategies aimed at reducing environmental impacts, optimizing resource utilization, and fostering economic growth. For instance, research suggests that a transition to circular economy practices could generate up to \$4.5 trillion in additional economic output by 2030 (World Economic Forum, 2024). In this evolving paradigm, sustainable production and consumption models that minimize waste and maximize resource recovery are paramount. Waste management is a critical component of this approach, diverting waste from landfills, reintroducing materials into production cycles, and decreasing dependency on virgin resources. The scale of the challenge indicates its importance: about 2.01 billion tonnes of municipal solid waste are generated worldwide each year, a figure projected to rise to 3.40 billion tonnes by 2050 (Kaza et al., 2018: 3). These waste-management practices contribute directly to key Sustainable Development Goals, notably SDG 12 (Responsible Consumption and Production) and SDG 13 (Climate Action).

Within this context, firms classified under NACE Code E38—*Waste Collection, Treatment, and Disposal Activities; Materials Recovery*—comprise what can be termed the Waste Management and Resource Recovery sector. This sector not only performs traditional waste management functions (such as collection, treatment, and disposal) but also embraces circular economy principles through materials recovery and resource reintegration. As economies move toward more sustainable practices, this sector has emerged as a fundamental pillar in achieving environmental protection, economic growth, and regulatory compliance (Bui et al., 2022).

The sector also plays a critical role in addressing environmental sustainability challenges. Waste recycling and resource recovery firms mitigate the negative externalities of industrial and consumer activities by reducing pollution, cutting greenhouse gas (GHG) emissions, and lowering reliance on finite natural resources. For example, the decay of organic waste in landfills contributes about 5% of global GHG emissions (United Nations Environment Programme, 2025)—a problem that effective waste management can help to curb. Without efficient waste management, economies face heightened risks of landfill overflow, plastic pollution, and hazardous waste accumulation, all of which contribute to ecological crises. Indeed, it is estimated that roughly one-third of global waste is mismanaged through open dumping or burning (Kaza et al., 2018), and each year, more than 8 million tonnes of plastic waste end up in the oceans (UNEP, 2017), which wreaks havoc on marine ecosystems. By processing and repurposing waste, firms in this sector actively prevent such environmental degradation and bolster global efforts to combat climate change.

Beyond environmental benefits, the waste management sector has significant economic implications. Globally, the waste management industry was valued at around \$330 billion in 2017 and is expected to reach about \$530 billion by 2025 (AMCS, 2025). The recycling industry also generates substantial employment opportunities; the United Nations estimates that recycling activities employ about 12 million people in just Brazil, China, and the United States alone (UNEP, 2025). At the national level, this sector can contribute appreciably to economies. For instance, in Spain, the recycling industry generated a turnover of approximately €3.1 billion in 2020. Moreover, metal waste accounts for over 60% of all recycled materials in Spain, with paper/cardboard contributing around 20% and wood/glass/plastic the remaining 20% (Parte and Alberca, 2024). These figures illustrate the economic potential of resource recovery, wherein industries benefit from cost savings on raw materials while nations reduce dependency on imported resources. In a broader European context, the European Commission has projected that increasing resource productivity by just 2% would create two million new jobs in the EU by 2030 (The Parliament Magazine, 2015), which highlights the wider socio-economic benefits of the circular economy transition.

From a policy perspective, waste management firms are crucial in helping countries meet ambitious regulatory targets. For example, the European Union's Waste Framework Directive has set progressive recycling objectives—requiring at least 55% of municipal waste to be recycled by 2025, 60% by 2030, and 65% by 2035. These targets reflect a strong commitment to a circular economy. Failure to meet such goals could result in economic penalties, environmental damage, and increased resource scarcity, which indicates the strategic importance of the waste management sector. This policy momentum is echoed globally; for instance, the United Nations Agenda 2030 calls for substantially reducing waste generation by 2030 (SDG 12.5), and many countries are implementing measures like extended producer responsibility to boost recycling and resource recovery. The alignment of industry practices with these policies is vital for achieving national and international sustainability objectives.

In brief, the Waste Management and Resource Recovery sector is far more than a logistical necessity; it is an essential component of a sustainable, circular, and economically viable future. Measuring the efficiency of this sector is therefore crucial for identifying opportunities to reduce environmental impacts, achieve cost savings, and enhance resource utilization. For example, Amaral et al. (2022) report an average inefficiency level of nearly 35% in solid waste management in Portugal, translating into a potential annual cost savings

of over €96 million. This case demonstrates the significant economic and environmental gains that can be realized by improving efficiency in the waste management sector.

A robust body of literature has explored the environmental and operational efficiency of waste management and recycling activities across various contexts. Prior studies have evaluated efficiency in multiple settings, including dedicated recycling firms (e.g., Marques et al., 2012), urban waste management systems (e.g., Díaz-Villavicencio et al., 2017; Molinos-Senante et al., 2023), and municipal solid-waste recycling programs (e.g., Amaral et al., 2022; Expósito and Velasco, 2018). Research has also targeted specific waste streams and processes, such as metal recycling (e.g., Raz and Souza, 2018) and waste-to-energy gas management (e.g., Yang and Li, 2018). Comparative analyses at broader scales have examined regional performance in waste management (e.g., Argentiero et al., 2023; Romano et al., 2022).

Several studies have further investigated the determinants of efficiency in this sector, encompassing economic, business, social, and environmental factors. Researchers have highlighted that notable inefficiencies persist in both developed economies (e.g., Gardiner and Hajek, 2020; Ríos and Picazo-Tadeo, 2021) and emerging economies (e.g., Bui et al., 2022), which implies that even well-resourced systems have room for improvement. Various socioeconomic variables, such as income levels, population density, and education, have been examined to explain efficiency differentials, yet the empirical evidence remains mixed (Parte and Alberca, 2024), indicating the need for further investigation. Efficiency performance also varies widely at regional and municipal scales. Yang and Li (2018), for instance, report an unfavorable evolutionary trend over time in waste management efficiency across Chinese regions, while Expósito and Velasco (2018) find that only a few regions in Spain achieve full efficiency in solid waste reduction and recycling activities. Similarly, Ferraro et al. (2023) and Molinos-Senante et al. (2023) document significant efficiency shortfalls in certain municipalities. Business-level analyses echo these findings, with studies on waste and recycling firms revealing notable inefficiencies in their operations (e.g., Li et al., 2019; Marques et al., 2012). Methodologically, both parametric and nonparametric frontier approaches have been employed in this field; notably, a recent review by Mergoni and De Witte (2022) highlights the widespread use of nonparametric methods to evaluate environmental performance.

This study contributes to the growing body of research that employs nonparametric methods to assess efficiency by focusing specifically on Türkiye's Waste Management and Resource Recovery Sector at the industry level. Despite the critical importance of this sector for sustainable development and environmental management, no comprehensive efficiency analysis has yet been undertaken in Türkiye.

Türkiye's Twelfth Development Plan (2024–2028; Presidency of Strategy and Budget, 2023) outlines a comprehensive framework for transitioning toward a circular economy, placing a particular emphasis on sustainable production, consumption, and waste management practices. Central to this plan is the development of a National Circular Economy Action Plan, which seeks to adapt production processes and product designs to fully embrace circular principles. Complementing this strategic framework are initiatives designed to promote sustainable consumption patterns and ambitious waste management projects, such as the Zero Waste Project. Under this initiative, educational programs will be launched to raise public awareness, and the waste recovery rate is targeted to increase from 35% in 2023 to 42.5% by 2028—a goal that has garnered global recognition, including by the United Nations.

In addition to these demand-side reforms, the development plan prioritizes substantial technical and infrastructure advancements. A comprehensive database covering all aspects of waste management will be established, alongside the formulation of technical standards for recovered secondary products. Support measures will be implemented for transfer station projects in financially constrained local administrations and for the development of recovery and disposal facilities for municipal solid waste. Specific sectoral actions include the separate collection of industrial waste at its source, the creation of battery recycling systems, and the incorporation of forest products into the circular economy framework. Furthermore, legislative and policy measures will be strengthened to align raw material procurement, production, consumption, and waste management processes with international standards, with additional reinforcement provided by green public procurement strategies and improved incentive legislation. Environmental protection remains a core focus, with targeted efforts to mitigate the harmful impacts of waste on human health and ecosystems, prevent marine debris, and promote environmental labeling to boost the competitiveness of eco-friendly products and services.

Understanding the total productivity of Türkiye's Waste Management and Resource Recovery Sector is essential in this context. Given the ambitious targets and extensive reforms outlined in the development plan, a detailed assessment of industry-level productivity can provide crucial insights into how efficiently firms convert inputs into valuable outputs. Such an analysis not only reveals overall operational performance but also identifies specific areas where policy interventions may be necessary. Moreover, considering the diversity in firm sizes within the sector, it is important to recognize that productivity levels may vary

significantly among small, micro, medium, and large enterprises. While medium and large firms often benefit from economies of scale, greater access to advanced technologies, and more robust financial resources, small and micro firms may face substantial challenges, such as financial constraints and limited capacity for technological innovation, that can hinder efficiency improvements. Consequently, an industry-level productivity analysis that accounts for firm size differences is vital, as it enables policymakers and industry stakeholders to design targeted support measures that address the unique needs of each firm category, thereby ensuring that the strategic objectives of Türkiye's circular economy and waste management initiatives are met effectively.

In this analysis, we evaluate productivity changes in Türkiye's E38 sector—Waste Collection, Treatment, and Disposal Activities; Materials Recovery—using industry-level data to determine how efficiently firms convert inputs into economic outputs. Key inputs are defined as the number of employees, personnel costs, and total purchases of goods and services, while outputs are measured by value added at factor cost and turnover. Data sourced from the Turkish Statistical Institute underwent trend-based imputation for missing values and was adjusted to real terms using the annual producer price index. Employing the robust Törnqvist index method to measure total factor productivity (TFP) change from 2009 to 2023, our findings reveal significant disparities across firm sizes: medium-sized firms exhibit the highest productivity, whereas large, micro, and small firms have experienced productivity declines.

2. DATA AND METHODOLOGY

2.1. Data and Variables

In this analysis, we examine productivity changes in the Turkish sector E38 – Waste Collection, Treatment, and Disposal Activities; Materials Recovery—using industry-level data to assess how efficiently firms transform inputs into economic outputs over time. Given the central role of labor, operational costs, and material inputs in this sector, our study defines inputs as the number of employees, personnel costs, and total purchases of goods and services. The number of employees is a key measure of labor input, which reflects the human resources engaged in waste management and recycling processes. Personnel costs, which include wages, salaries, and associated social security expenses, capture the financial commitment to labor and provide insight into the cost structure of firms. Total purchases of goods and services represent intermediate inputs, such as equipment, fuel, and outsourced services, that are essential for the collection, transportation, and processing of waste materials.

On the output side, the analysis employs value added at factor cost and turnover as indicators of economic performance. Value added at factor cost, computed by subtracting intermediate costs from total output, serves as a fundamental measure of efficiency by representing the net economic contribution of firms. Turnover, or total revenue, reflects the financial success of firms in the waste management and recycling market by accounting for sales generated from waste collection services, treatment processes, and recovered materials. Together, these output indicators provide a comprehensive perspective on the sector's ability to generate economic value from waste recovery and disposal activities.

The data used in this study is sourced from the Turkish Statistical Institute (TurkStat, 2024). The dataset is derived from the Annual Industry and Service Statistics Survey conducted by the Institute. This survey compiles data from various administrative records—including the Annual Industry and Service Statistics, Foreign Trade Statistics, Research and Development Activities Statistics, Entrepreneurship and Business Demography Statistics, as well as the patent application and registration records from the Turkish Patent and Trademark Office—with the exception of investment variables covered by the Annual Industry and Service Statistics.

In addition, the analysis incorporates the classification of Small and Medium-sized Enterprises (SMEs) as defined by recent legislative changes implemented in 2023. Under these revised thresholds, micro enterprises are characterized as firms employing fewer than 10 workers annually with an annual net sales turnover or balance sheet total not exceeding 10 million Turkish Lira; small enterprises are defined as those employing fewer than 50 workers and with annual net sales or balance sheet totals not exceeding 100 million Turkish Lira; and medium-sized enterprises are those employing fewer than 250 workers with annual net sales or balance sheet totals not exceeding 500 million Turkish Lira.

The scope of the data is determined by the sectoral coverage of the Annual Industry and Service Statistics, which is based on the NACE Rev.2 classification system used within the European Community. The data encompasses annual observations from 2009 to 2023. For clarity, key definitions are provided in Table 1.

Table 1. Definitions of the input and output variables

<i>Variables</i>	<i>Definitions</i>
<i>Inputs</i>	
Number of Employees	The total number of individuals employed under an employment contract for an employer who receives remuneration in the form of salary, wage, commission, bonus, piece-rate payment, or in-kind compensation.
Personnel Cost (in Turkish Lira)	The total of gross payments to personnel and social security expenses.
Total Purchases of Goods and Services (in Turkish Lira)	The value of all goods and services acquired during the accounting period for consumption or resale in the production process, excluding the consumption of capital goods recorded as fixed capital consumption.
<i>Outputs</i>	
Turnover (in Turkish Lira)	The aggregate value of invoiced sales of goods and services by the observation unit during the reference period.
Value Added at Factor Cost (in Turkish Lira)	The net output generated by firms, calculated after adjustments for operating subsidies and indirect taxes.

Source: TurkStat (2024)

However, some missing observations in this dataset arise due to legal restrictions on data disclosure, specifically Law No. 5429 on Official Statistics in Türkiye. According to this regulation, data for any cell in the dataset are withheld if the number of enterprises in that category is fewer than three. Additionally, even when the number of enterprises is three or more, the data remains undisclosed if one or two firms dominate the sector. Consequently, some missing values exist in firm-size disaggregated data.

To address these missing values while maintaining data integrity, a trend-based imputation approach was applied, ensuring that missing values followed observed temporal patterns. Given the time-series nature of the data, different imputation methods were employed based on the statistical properties of each variable.

Firstly, for variables exhibiting a linear trend, missing values were estimated using a simple linear regression model in Equation 1.

$$X_t = \alpha + \beta t + \varepsilon_t \quad (1)$$

where X_t represents the variable of interest at time t , α is the intercept, β captures the trend slope and ε_t is the error term. Missing values were predicted based on the estimated regression coefficients. For variables following a quadratic trend, a second-degree polynomial regression was applied, as shown in Equation 2.

$$X_t = \alpha + \beta t + \gamma t^2 + \varepsilon_t \quad (2)$$

where γ captures the acceleration or deceleration of growth. This method was particularly relevant for variables displaying non-constant growth rates over time. For variables exhibiting exponential trends, a log-transformation was used before applying linear regression, as expressed in Equation 3.

$$\ln(X_t) = \alpha + \beta t + \varepsilon_t \quad (3)$$

where predicted values were exponentiated to retrieve the original scale, as described in Equation 4.

$$\hat{X}_t = e^{\hat{\alpha} + \hat{\beta}t} \quad (4)$$

ensuring that the estimated values maintained an exponential growth pattern.

A key principle guiding the imputation process was the preservation of summation constraints inherent in the dataset's aggregation structure. Specifically, for each economic variable, the industry total is the sum of its constituent firm categories: micro, small, medium, and large firms—as given in Equation 5.

$$X_t^{\text{total}} = X_t^{\text{micro}} + X_t^{\text{small}} + X_t^{\text{medium}} + X_t^{\text{large}} \quad (5)$$

When missing values were imputed for one or more firm categories, the estimates were adjusted proportionally to ensure that the summation constraint held. If only one firm category was missing in a given period, its value was derived using Equation 6.

$$X_t^{\text{missing}} = X_t^{\text{total}} - \sum X_t^{\text{observed}} \quad (6)$$

For multiple missing firm categories, an allocation rule based on historical shares was applied, as shown in Equation 7.

$$X_t^{\text{missing},i} = X_t^{\text{total}} \times \frac{\bar{X}^i}{\sum \bar{X}^i} \quad (7)$$

where $\bar{X}^i$ represents the historical mean share of the firm category i relative to the total. Finally, to prevent abrupt fluctuations in imputed values, smoothing techniques such as moving averages were applied according to Equation 8.

$$\tilde{X}_t = \frac{1}{k} \sum_{i=t-k}^{t+k} X_i \quad (8)$$

where k represents the smoothing window size. This helped maintain continuity in variables exhibiting gradual trends. Additionally, non-negativity constraints were enforced to ensure that variables such as employment and production value were not assigned implausible negative values, as given in Equation 9.

$$X_t = \max(0, \hat{X}_t) \quad (9)$$

Outliers arising from imputation were systematically reviewed, and extreme values were Winsorized using Equation 10.

$$X_t = \min(\max(X_t, P_1), P_{99}) \quad (10)$$

where P_1 and P_{99} denote the 1st and 99th percentiles, which ensures that imputed values remained within a plausible range.

After imputing the missing observations, nominal values were adjusted to real terms using the producer price index calculated at the end of each year. Consequently, all subsequent analyses were conducted using real values of the variables.

2.2. Descriptive Statistics

After imputing missing observations and adjusting the variables for real terms, we present the descriptive statistics for the Turkish waste collection, treatment, disposal, and materials recovery sector (E38) in Table 2. The analysis is conducted separately for firms of different sizes, including micro, small, medium, and large enterprises, as well as for the total industry and SMEs as an aggregate category. The key variables examined include the number of employees, personnel costs, total purchases of goods and services, turnover, and value-added at factor cost.

The distribution of employment across firm sizes reflects expected patterns, with larger firms employing significantly more workers on average. Over 2009–2023, micro firms, on average, employed 3,285 individuals, while small and medium firms employed approximately 6,488 and 10,019 workers, respectively. Large firms, by contrast, had an average workforce of 32,359 employees. The standard deviation for large firms is also considerably high, which indicates substantial variation in employment levels within this category. This suggests that while some large firms operate with a relatively lean workforce, others employ a significantly higher number of workers, which reflects differences in operational scale and business models.

Personnel costs similarly increase with firm size, which highlights economies of scale and the labor intensity of operations in this sector. Across the total industry from 2009 to 2023, micro firms incurred an average personnel cost of 543.8 million Turkish Lira (TL) in 2023 prices, while large firms allocated 10.14 billion TL to labor expenses. The variability in personnel costs, as measured by the standard deviation, was again highest among large firms, which suggests greater diversity in compensation structures and employment strategies.

The analysis of total purchases of goods and services, which serves as a proxy for input expenditures, reveals that over the 2009–2023 period, micro firms spent approximately 6.44 billion TL in 2023 prices on average, whereas large firms allocated 36.56 billion TL to purchasing goods and services. SMEs as a collective entity recorded the highest average spending in this category, at 64.52 billion TL, which shows their significant role in the sector's supply chain and production processes.

Turnover, which reflects total revenue, followed a similar pattern, increasing with firm size. Over the 2009–2023 period, micro firms generated an average turnover of 6.54 billion TL, while large firms achieved 54.35 billion TL in 2023 prices. The total industry turnover stood at 118 billion TL, indicating that large firms continued to dominate overall revenue generation despite SMEs contributing a substantial share. This highlights the strong market position of large firms, which likely benefited from broader market reach and higher capital investment levels.

Value-added at factor cost, which measures the economic contribution of firms after accounting for input costs, further illustrates the differences across firm sizes. Over the 2009–2023 period, micro firms contributed approximately 509 million TL in value-added, compared to 15.4 billion TL in 2023 prices for

large firms. SMEs, taken together, generated 8.45 billion TL in value-added, accounting for a significant proportion of the total industry's 24.59 billion TL. This indicates that while large firms held a dominant position in absolute financial metrics, SMEs collectively played a crucial role in generating economic value within the sector.

Another notable finding is the high degree of variation in financial performance across large firms throughout the 2009–2023 period. The standard deviations for turnover, personnel costs, and purchases were considerably higher in this category, which shows the heterogeneous nature of large enterprises in the industry. In contrast, micro and small firms exhibited lower variability, which suggests that their operational and financial structures were more uniform.

Overall, these findings indicate the crucial role of SMEs in the waste collection and recycling sector, particularly in employment generation and total input purchases. However, large firms continued to lead in turnover and value-added.

2.3. Methodology

After presenting the descriptive statistics about inputs and outputs, we introduce the Törnqvist Productivity Index. The Törnqvist index method is widely recognized as a robust price-based index number approach for measuring total factor productivity (TFP) change (Törnqvist, 1936). Its primary advantage lies in providing a second-order approximation of the underlying production technology, which enhances its precision in capturing the nuances of production behavior over short periods (Rehman and Nunziante, 2023; See and Coelli, 2014). This capability is particularly valuable when analyzing productivity changes on an annual basis or when the magnitude of change is relatively small, which offers a more accurate representation than first-order methods such as the Laspeyres index (Coelli, 2002: 171).

A notable strength of the Törnqvist index is its use of dynamic weighting. In contrast to fixed-weight indices that rely solely on base-year weights, the Törnqvist method employs average cost shares as weights for the input quantity index and average revenue shares as weights for the output quantity index. This approach enables the index to effectively capture shifts in the relative importance of inputs, such as capital and labor, and thereby reflect substitution effects between these factors (Rehman and Nunziante, 2023). This flexibility is particularly advantageous in sectors characterized by labor-intensive technologies, where the role of human capital is paramount in the production process.

The method's applicability is further enhanced in contexts where comprehensive panel data are unavailable. Studies focusing on single firms or utilities have demonstrated the efficacy of the Törnqvist index in measuring productivity changes. For instance, its application in analyses of Tenaga Nasional Berhad in Malaysia (See and Coelli, 2014) and in productivity assessments of airline companies (See and Abdul Rashid, 2023) underscores its practical utility. Although the method does not facilitate the decomposition of TFP change into distinct components such as technical change and efficiency change (Rungsuriyawiboon and Coelli, 2006: 269), its superior approximation capabilities render it a favorable alternative to other index methods like the Laspeyres and Fisher indices (Marques, 2011; Bergamini et al., 2010). Empirical research over the decades has further solidified the standing of the Törnqvist index in productivity analysis.

The calculation of the Törnqvist Productivity Index is based on weighted geometric means of input and output quantity indices. The index is defined as the ratio of the Törnqvist Output Quantity Index to the Törnqvist Input Quantity Index. For a given period s (base period) and t (comparison period), the Törnqvist Input and Output Indices are calculated as in Equation 11 and Equation 12, respectively.

$$\text{Törnqvist Input Quantity Index: } Q_{st}^I = \prod_{n=1}^N \left[\frac{X_{nt}}{X_{ns}} \right]^{\frac{\omega_{ns} + \omega_{nt}}{2}} \quad (11)$$

where X_{nt} and X_{ns} represent the quantities of input n at times t and s . ω_{ns} and ω_{nt} are the cost shares of input n at times s and t . The exponent $\frac{\omega_{ns} + \omega_{nt}}{2}$ ensures that the index is weighted by the average cost share of each input.

$$\text{Törnqvist Output Quantity Index: } Q_{st}^O = \prod_{j=1}^M \left[\frac{Y_{jt}}{Y_{js}} \right]^{\frac{\gamma_{js} + \gamma_{jt}}{2}} \quad (12)$$

where Y_{jt} and Y_{js} represent the quantities of output j at times t and s . γ_{js} and γ_{jt} are the revenue shares of output j at times s and t . The exponent $\frac{\gamma_{js} + \gamma_{jt}}{2}$ ensures that the index is weighted by the average revenue share of each output. Using these indices, the Törnqvist Total Factor Productivity (TFP) Index is calculated as in Equation 13.

Table 2. Descriptive statistics

<i>Scale</i>	<i>Variable</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Dev.</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Median</i>
Total	Number of Employees	51,313.20	12,159.08	37,099.00	70,204.00	45,703.00
	Personnel Cost (in million Turkish Lira)	16,693.36	6,078.91	8,657.97	27,683.14	15,176.31
	Total Purchases of Goods and Services (in million Turkish Lira)	98,352.98	31,319.80	31,700.85	137,582.77	99,380.59
	Turnover (in million Turkish Lira)	118,022.66	32,843.45	46,228.26	167,396.01	129,022.31
	Value Added at Factor Cost (in million Turkish Lira)	24,590.19	6,121.04	13,932.94	36,503.88	23,980.29
Micro	Number of Employees	3,285.02	1,771.54	768.00	6,221.00	3,082.00
	Personnel Cost (in million Turkish Lira)	543.77	264.16	162.18	965.37	543.77
	Total Purchases of Goods and Services (in million Turkish Lira)	6,440.59	2,875.97	1,974.41	11,362.94	6,319.87
	Turnover (in million Turkish Lira)	6,539.20	2,886.75	2,010.40	11,310.96	6,373.21
	Value Added at Factor Cost (in million Turkish Lira)	508.93	223.80	199.55	905.28	508.93
Small	Number of Employees	6,487.59	2,167.64	2,849.00	9,779.86	6,492.00
	Personnel Cost (in million Turkish Lira)	1,506.36	497.96	603.21	2,279.73	1,509.09
	Total Purchases of Goods and Services (in million Turkish Lira)	23,427.26	11,353.38	8,577.63	44,185.82	20,612.03
	Turnover (in million Turkish Lira)	24,487.40	11,737.81	9,475.89	47,775.47	22,767.46
	Value Added at Factor Cost (in million Turkish Lira)	2,944.93	1,099.95	843.45	4,552.95	2,855.33
Medium	Number of Employees	10,018.73	2,081.88	5,715.00	14,134.00	10,647.00
	Personnel Cost (in million Turkish Lira)	2,978.12	799.11	1,502.08	4,595.22	2,998.69
	Total Purchases of Goods and Services (in million Turkish Lira)	34,323.18	15,131.94	8,069.72	60,419.02	31,966.49
	Turnover (in million Turkish Lira)	37,788.94	15,556.01	10,170.74	62,784.62	36,057.36
	Value Added at Factor Cost (in million Turkish Lira)	5,299.75	1,597.54	2,195.70	7,669.80	5,532.41
SMEs	Number of Employees	19,935.85	5,477.82	9,332.00	27,962.77	20,964.00
	Personnel Cost (in million Turkish Lira)	4,751.27	985.19	3,270.63	6,161.78	4,750.29
	Total Purchases of Goods and Services (in million Turkish Lira)	64,520.75	26,801.15	24,106.01	101,990.23	58,898.39
	Turnover (in million Turkish Lira)	70,210.74	26,631.22	30,763.49	105,953.19	65,198.03
	Value Added at Factor Cost (in million Turkish Lira)	8,449.63	2,296.13	4,963.95	11,711.21	8,447.32
Large	Number of Employees	32,358.90	12,023.44	15,847.00	48,764.00	33,383.00
	Personnel Cost (in million Turkish Lira)	10,140.23	1,861.90	7,135.16	12,990.12	10,142.12
	Total Purchases of Goods and Services (in million Turkish Lira)	36,559.82	9,552.10	19,890.51	57,215.31	37,876.33
	Turnover (in million Turkish Lira)	54,354.91	12,792.66	32,913.90	79,828.46	54,393.94
	Value Added at Factor Cost (in million Turkish Lira)	15,438.63	2,636.24	11,585.06	19,790.88	15,227.98

$$TFP_{st} = \frac{Q_{st}^O}{Q_{st}^I} \quad (13)$$

Expanding the formula in Equation 14, we get the ratio that represents the change in productivity between periods s and t , capturing changes in output relative to input usage.

$$TFP_{st} = \frac{\prod_{j=1}^M \left[\frac{Y_{jt}}{Y_{js}} \right]^{\frac{\gamma_{js} + \gamma_{jt}}{2}}}{\prod_{n=1}^N \left[\frac{X_{nt}}{X_{ns}} \right]^{\frac{\omega_{ns} + \omega_{nt}}{2}}} \quad (14)$$

Thus, the Törnqvist Productivity Index relies on weighted geometric means of input and output indices. In its original multiplicative form, the Törnqvist Input Quantity Index is computed as the geometric mean of input ratios weighted by the average cost shares, while the Törnqvist Output Quantity Index follows a similar approach using output revenue shares. The productivity index is then obtained as the ratio of these two indices. However, this multiplicative framework can be cumbersome in empirical applications due to numerical instability arising from potential underflow or overflow in product-based computations. To address these challenges, a logarithmic transformation is commonly applied, which converts products into sums and simplifies calculations. By taking the natural logarithm of both sides, the Törnqvist Productivity Index can be rewritten as the difference between the log-transformed output and input indices. This transformation ensures computational stability and aligns with standard economic models, where productivity growth is typically expressed as the difference between output and input growth rates. Additionally, the log-difference approach provides a direct measure of relative changes in productivity, making it more interpretable for economic analysis.

Taking the natural logarithm of both sides as in Equation 15.

$$\ln TFP_{st} = \ln Q_{st}^O - \ln Q_{st}^I \quad (15)$$

Expanding each term as in Equation 16 and Equation 17.

$$\ln Q_{st}^O = \sum_{j=1}^M \frac{\gamma_{js} + \gamma_{jt}}{2} \cdot \ln \left(\frac{Y_{jt}}{Y_{js}} \right) \quad (16)$$

$$\ln Q_{st}^I = \sum_{n=1}^N \frac{\omega_{ns} + \omega_{nt}}{2} \cdot \ln \left(\frac{X_{nt}}{X_{ns}} \right) \quad (17)$$

Thus, the log-differenced TFP index as displayed in Equation 18.

$$\ln TFP_{st} = \sum_{j=1}^M \frac{\gamma_{js} + \gamma_{jt}}{2} \cdot \ln \left(\frac{Y_{jt}}{Y_{js}} \right) - \sum_{n=1}^N \frac{\omega_{ns} + \omega_{nt}}{2} \cdot \ln \left(\frac{X_{nt}}{X_{ns}} \right) \quad (18)$$

Given the log transformation, the Törnqvist Productivity Index (TFP Change) between periods s and t is computed in Equation 19 as:

$$\Delta \ln TFP_t = \Delta \ln Q_t^O - \Delta \ln Q_t^I \quad (19)$$

Equation 20, Equation 21, and Equation 22 display the content of this index.

$$\Delta \ln Q_t^O = \sum_{j=1}^M S_{j,t} \cdot (\ln Y_{j,t} - \ln Y_{j,t-1}) \quad (20)$$

$$\Delta \ln Q_t^I = \sum_{n=1}^N W_{n,t} \cdot (\ln X_{n,t} - \ln X_{n,t-1}) \quad (21)$$

$$\Delta \ln TFP_t = \sum_{j=1}^M S_{j,t} \cdot (\ln Y_{j,t} - \ln Y_{j,t-1}) - \sum_{n=1}^N W_{n,t} \cdot (\ln X_{n,t} - \ln X_{n,t-1}) \quad (22)$$

where $S_{j,t}$ and $W_{n,t}$ are the average revenue and cost shares across two periods. Output growth minus input growth gives the TFP change.

3. RESULTS

Figure 1 presents the annual changes in Total Factor Productivity (TFP) for different firm sizes—micro, small, medium, and large—within the Turkish waste collection, treatment, disposal, and materials recovery sector (E38) over the period 2009–2023. The TFP change, which is calculated using the Törnqvist Productivity Index, captures the efficiency improvements or declines in transforming inputs into outputs over time. A positive TFP change indicates an increase in productivity, while a negative change suggests a decline in efficiency relative to the previous year. The dotted horizontal line at zero serves as a reference point, distinguishing years of positive efficiency growth from years of decline.

Over the observed period, all firm types exhibit fluctuations in TFP growth, which reflects periods of efficiency gains and downturns. The most volatile trends are observed for micro firms, which experience frequent and sharp deviations from the zero line. Thus, smaller firms are more sensitive to external shocks,

regulatory changes, or shifts in market conditions. Large and medium-sized firms, while also experiencing fluctuations, tend to exhibit more stabilized patterns over time, with relatively smaller deviations from the mean compared to micro firms. Small firms demonstrate a mix of volatility and occasional stability, aligning closer to medium-sized firms in certain periods.

A notable trend is the occurrence of sharp declines in TFP change across all firm types around economic downturns (e.g., post-2009 financial crisis, the mid-2010s, and the pandemic period around 2020). The early 2010s and 2020s appear to be particularly challenging for firm productivity, likely due to macroeconomic instability, rising costs, and disruptions in waste management and recycling activities. However, periods of recovery are also visible, as seen in post-recession rebounds, particularly in later years.



Figure 1. Törnqvist Productivity Index changes over time

Table 3 presents the average TFP change, calculated using the Törnqvist Productivity Index, for different firm sizes in the Turkish waste collection, treatment, disposal, and materials recovery sector (E38) over the period 2009–2023. The results highlight a notable divergence in productivity performance across different firm sizes. Medium-sized firms demonstrate the highest average TFP change (0.0242), which indicates consistent efficiency improvements over the observed period. This suggests that these firms may have benefited from a balance of economies of scale and flexibility, which allows them to adapt to industry changes more efficiently than their counterparts. In contrast, large, micro, and small firms all exhibit negative average TFP change, which implies a decline in efficiency over the years. Among these, large firms (-0.0123) experience a relatively moderate decline. Micro (-0.0197) and small firms (-0.0228) show the most significant declines in TFP change, which indicates that these enterprises faced persistent productivity challenges throughout 2009–2023. These results are also visualized in Figure 2.

Table 3. Average total factor productivity changes over 2009-2023

Sector	Average Total Factor Productivity Change over 2009-2023
Medium	0.0242
Large	-0.0123
Micro	-0.0197
Small	-0.0228

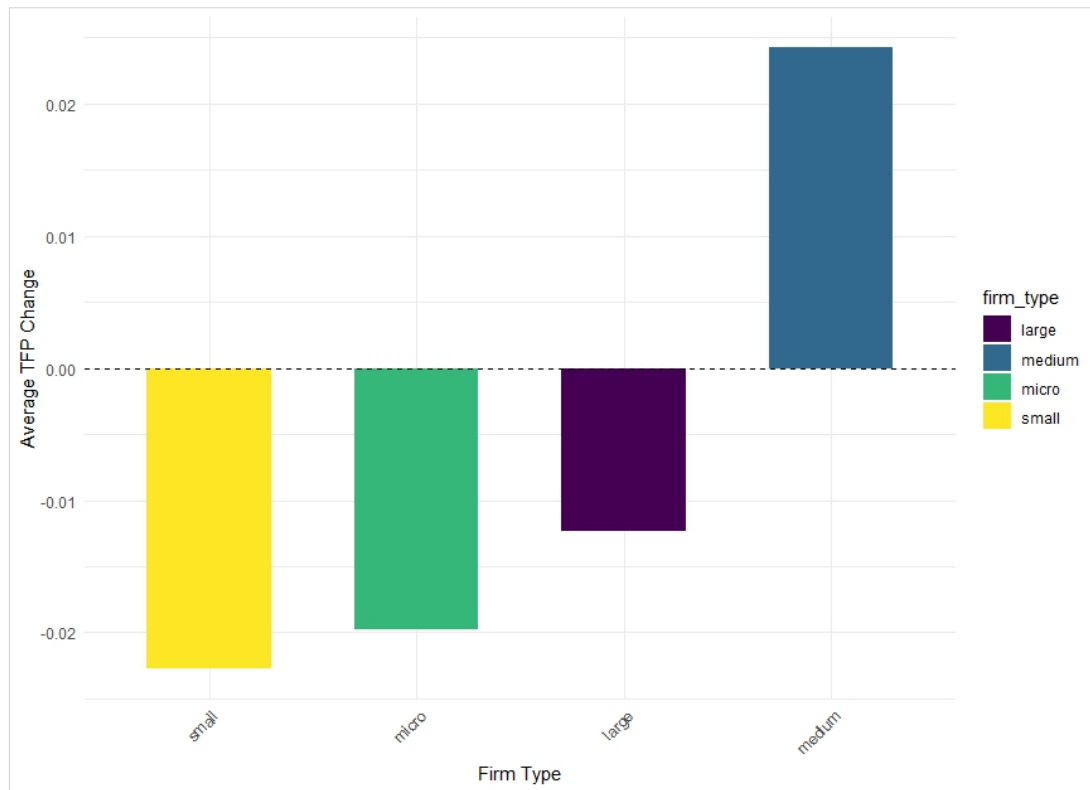


Figure 2. Average Törnqvist Productivity Index change by firm type

4. DISCUSSION and CONCLUSION

This study contributes to the literature by presenting the first comprehensive efficiency analysis of Türkiye's Waste Management and Resource Recovery sector at an industry-wide level. To the best of our knowledge, no prior research has evaluated this sector's efficiency in Türkiye, despite its crucial role in the country's sustainable development and environmental management. By examining an emerging-economy context at a national scale, our analysis fills an important gap in the literature and offers new insights into the performance of Türkiye's waste management sector.

Our analysis of total factor productivity changes in Türkiye's E38 sector for the period 2009–2023 reveals marked disparities in efficiency trends across different firm sizes. Medium-sized firms consistently emerge as the most productive segment. These firms appear to benefit from an optimal balance between scale economies and managerial flexibility, which enables them to adapt more efficiently to market conditions and regulatory changes. In contrast, large, micro, and small firms have experienced productivity declines. Large firms may face bureaucratic inertia and complex operational structures that hinder rapid adjustments, while micro and small firms often encounter resource constraints and limited access to advanced technologies, which restricts their ability to achieve scale and realize efficiency improvements.

Our size-specific results confirm earlier evidence on productivity in waste management and recycling activities. The persistent underperformance of micro and small enterprises mirrors the efficiency gaps documented for emerging-economy recyclers by Bui et al. (2022), and it echoes the broader cross-country pattern in which the labor productivity of smaller firms is typically one-half that of their larger peers (McKinsey Global Institute, 2024). What sets Türkiye apart is the markedly positive TFP growth of medium-sized enterprises—a size class that, in many OECD industries, tends to lag behind large firms (OECD, 2024: 51). In short, our findings extend the literature by showing that the productivity leader in an emerging circular-economy sector need not be the largest corporation but rather the firm size that balances technological capability with adaptable governance structures.

The heterogeneity observed in productivity dynamics within the sector has important policy implications. First, targeted support for micro and small firms is essential. In the short term, improving their access to financing through low-interest loans or grants could alleviate immediate resource constraints. Additionally, capacity-building initiatives, such as specialized training programs and technical assistance, could empower these smaller operators to adopt modern technologies and best practices. For example, experience from several European countries suggests that tailored financial support and technical training

for small waste management enterprises have led to measurable improvements in operational efficiency and productivity (OECD, 2016: 241; Cialani and Mortazavi, 2020).

Large firms, on the other hand, could benefit from efficiency-driven strategies such as process optimization and digital transformation. Short-term interventions might include the implementation of digital management systems and advanced analytics to streamline operations. In the longer term, policies should encourage these firms to invest in automation, Internet of Things (IoT) technologies, and other forms of digital infrastructure that can reduce operational inefficiencies and enhance decision-making (e.g., Cheah et al., 2022; Muirova et al., 2022).

Ensuring the continued growth of medium-sized firms—the sector’s most efficient segment—should remain a strategic priority. These firms not only drive overall sector productivity but also serve as models of best practices. In the long term, a robust framework that promotes the scaling of best practices can reinforce the role of medium-sized enterprises as the backbone of the sector.

In summary, this study not only highlights significant productivity disparities across different firm sizes in Türkiye’s Waste Management and Resource Recovery sector but also underscores the need for targeted policy interventions. By supporting micro and small firms with enhanced financing and capacity-building measures, encouraging large firms to embrace digital transformation and process optimization, and promoting the sustained growth of medium-sized enterprises, policymakers can foster an environment in which the entire sector becomes more efficient, competitive, and aligned with national and global sustainability objectives.

Building on these insights, several avenues merit exploration. First, firm-level or panel micro-data would allow the decomposition of TFP change into technical progress, scale effects, and pure efficiency, thereby revealing whether medium-sized firms improve primarily through innovation, learning-by-doing, or resource reallocation. Second, future studies should test causal links between digital-process adoption (e.g., IoT-enabled fleet routing, AI-based sorting) and productivity, given recent evidence of efficiency gains from such technologies in waste services (Cheah et al., 2022). Third, integrating environmental outputs (avoided CO₂-eq., recycled tonnage) into a joint productivity/eco-efficiency framework would clarify whether economic gains coincide with environmental gains. Finally, cross-country comparisons covering other upper-middle-income economies would test the generalizability of the “medium-firm advantage.”

Conflict of Interest

No potential conflict of interest was declared by the authors.

Funding

Any specific grant has not been received from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Compliance with Ethical Standards

It was declared by the author that the tools and methods used in the study do not require the permission of the Ethics Committee.

Ethical Statement

It was declared by the author that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.



The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.

REFERENCES

- Amaral, C., Pedro, M.I., Ferreira, D.C. and Marques, R.C. (2022). "Performance and Its Determinants in the Portuguese Municipal Solid Waste Utilities", *Waste Management*, 139, 70-84. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.020>
- AMCS. (2025). "Global Waste and Recycling Market Trends", <https://www.amcsgroup.com/blogs/global-waste-and-recycling-market-trends/> (Accessed: 07.03.2025)
- Argentiero, A., Chiarini, B. and Marzano, E. (2023). "Do Social Capital and the Quality of Institutions Affect Waste Recycling?", *Waste Management*, 155, 240-251. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.11.005>
- Bergamini, E., Gitto, S. and Mancuso, P. (2010). "Restructuring the Alitalia Business Model", *Journal of Air Transport Management*, 16(1), 16-19. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2009.05.003>
- Bui, T.D., Tseng, J.W., Tseng, M.L. and Lim, M.K. (2022). "Opportunities and Challenges for Solid Waste Reuse and recycling in Emerging Economies: A Hybrid Analysis", *Resources, Conservation and Recycling*, 177, 105968. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105968>
- Cheah, C.G., Chia, W.Y., Lai, S.F., Chew, K.W., Chia, S.R. and Show, P.L. (2022). "Innovation Designs of Industry 4.0 Based Solid Waste Management: Machinery and Digital Circular Economy", *Environmental Research*, 213, 113619. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113619>
- Cialani, C. and Mortazavi, R. (2020). "The Cost of Urban Waste Management: An Empirical Analysis of Recycling Patterns in Italy", *Frontiers in Sustainable Cities*, 2, 8. <https://doi.org/10.3389/frsc.2020.00008>
- Coelli, T. (2002). "A Comparison of Alternative Productivity Growth Measures with Application to Electricity Generation", *Efficiency in the Public Sector* (Editor: K.J. Fox), Springer US, Boston, 169-200. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3592-5_7
- Díaz-Villavicencio, G., Didonet, S.R. and Dodd, A. (2017). "Influencing Factors of Eco-Efficient Urban Waste Management: Evidence from Spanish Municipalities", *Journal of Cleaner Production*, 164, 1486-1496. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.064>
- Expósito, A. and Velasco, F. (2018). "Municipal Solid-Waste Recycling Market and the European 2020 Horizon Strategy: A Regional Efficiency Analysis in Spain", *Journal of Cleaner Production*, 172, 938-948. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.221>
- Ferraro, A., Garofalo, A. and Marchesano, K. (2023). "Measuring Differences in Efficiency in Waste Collection and Disposal Services from the EU Targets in Campania Municipalities", *Environmental and Ecological Statistics*, 30(1), 81-101. <https://doi.org/10.1007/s10651-022-00554-3>
- Gardiner, R. and Hajek, P. (2020). "Municipal Waste Generation, R&D Intensity, and Economic Growth Nexus—A Case of EU Regions", *Waste Management*, 114, 124-135. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.038>
- Kaza, S., Yao, L.C., Bhada-Tata, P. and Van Woerden, F. (2018). "What A Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050", World Bank, Washington. <http://hdl.handle.net/10986/30317>
- Li, Y., Zeng, B., Wu, T. and Hao, H. (2019). "Effects of Urban Environmental Policies on Improving Firm Efficiency: Evidence from Chinese New Energy Vehicle Firms", *Journal of Cleaner Production*, 215, 600-610. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.099>
- Maiurova, A., Kurniawan, T.A., Kustikova, M., Bykovskaia, E., Othman, M.H.D., Singh, D. and Goh, H.H. (2022). "Promoting Digital Transformation in Waste Collection Service and Waste Recycling in Moscow (Russia): Applying A Circular Economy Paradigm to Mitigate Climate Change Impacts on the Environment", *Journal of Cleaner Production*, 354, 131604. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131604>
- Marques, R.C. (2011). "Together or Separately? The Efficiency and Market Structure of Portuguese Airports", *Journal of Air Transport Management*, 17(2), 136-139. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2010.05.005>
- Marques, R.C., da Cruz, N.F. and Carvalho, P. (2012). "Assessing and Exploring (In) Efficiency in Portuguese Recycling Systems Using Non-Parametric Methods", *Resources, Conservation and Recycling*, 67, 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.07.005>
- McKinsey Global Institute. (2024). "A Microscope on Small Businesses: Spotting Opportunities to Boost Productivity", <https://www.mckinsey.com/mgi/our-research/a-microscope-on-small-businesses-spotting-opportunities-to-boost-productivity>, (Accessed: 07.05.2025)
- Mergoni, A. and De Witte, K. (2022). "Policy Evaluation and Efficiency: A Systematic Literature Review", *International Transactions in Operational Research*, 29(3), 1337-1359. <https://doi.org/10.1111/itor.13012>
- Molinos-Senante, M., Maziotis, A., Sala-Garrido, R. and Mocholi-Arce, M. (2023). "The Eco-Efficiency of Municipalities in the Recycling of Solid Waste: A Stochastic Semi-Parametric Envelopment of Data Approach", *Waste Management & Research*, 41(5), 1036-1045. <https://doi.org/10.1177/0734242X221142223>
- OECD. (2016). "Extended Producer Responsibility: Updated Guidance for Efficient Waste Management", OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264256385-en>

- OECD. (2024). "OECD Compendium of Productivity Indicators 2024", OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/b96cd88a-en>
- Parte, L. and Alberca, P. (2024). "Circular Economy and Business Models: Managing Efficiency in Waste Recycling Firms", *Business & Society*, 63(6), 1426-1461. <https://doi.org/10.1177/00076503231205798>
- Presidency of Strategy and Budget. (2023). "The Twelfth Development Plan (2024–2028)", https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2024/06/Twelfth-Development-Plan_2024-2028.pdf, (Accessed: 07.03.2025)
- Raz, G. and Souza, G. C. (2018). "Recycling as a strategic supply source", *Production and Operations Management*, 27(5), 902-916. <https://doi.org/10.1111/poms.12851>
- Rehman, N.U. and Nunziante, G. (2023). "The Effect of the Digital Economy on Total Factor Productivity in European Regions", *Telecommunications Policy*, 47(10), 102650. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2023.102650>
- Rios, A. M. and Picazo-Tadeo, A. J. (2021). "Measuring environmental performance in the treatment of municipal solid waste: The case of the European Union-28", *Ecological Indicators*, 123, 107328. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107328>
- Romano, G., Lombardi, G.V., Rapposelli, A. and Gastaldi, M. (2022). "The Factors Affecting Italian Provinces' Separate Waste-Collection Rates: An Empirical Investigation", *Waste Management*, 139, 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.037>
- Rungsuriyawiboon, S. and Coelli, T. (2006). "Regulatory Reform and Economic Performance in US Electricity Generation", *Performance Measurement and Regulation of Network Utilities* (Editör: T. Coelli, D. Lawrence), Edward Elgar Publishing, Cheltenham, 267-296.
- See, K.F. and Coelli, T. (2014). "Total Factor Productivity Analysis of A Single Vertically Integrated Electricity Utility in Malaysia Using A Törnqvist Index Method", *Utilities Policy*, 28, 62-72. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2013.11.001>
- See, K.F. and Rashid, A.A. (2016). "Total Factor Productivity Analysis of Malaysia Airlines: Lessons from the Past and Directions for the Future", *Research in Transportation Economics*, 56, 42-49. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2016.07.004>
- The Parliament Magazine. (2015). "EU Circular Economy Could Create Two Million Jobs by 2030", <https://www.theparliamentmagazine.eu/news/article/eu-circular-economy-could-create-two-million-jobs-by-2030>, (Accessed: 07.03.2025)
- Törnqvist, L. (1936). "The Bank of Finland's Consumption Price Index", *Bank of Finland Monthly Bulletin*, 10, 1-8.
- TurkStat. (2024). "Small and Medium Enterprise Statistics, 2023", <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Kucuk-ve-Orta-Buyuklukteki-Girisim-Istatistikleri-2023-53543&dil=1>, (Accessed: 07.03.2025)
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2017). "UN Declares War on Ocean Plastic", <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/un-declares-war-ocean-plastic>, (Accessed: 07.03.2025)
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2023). "Solid Waste Management", <https://www.unep.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/cities/solid-waste-management>, (Accessed: 07.03.2025)
- World Economic Forum. (2024). "Making the \$4.5 Trillion Circular Economy Opportunity A Reality", <https://www.weforum.org/impact/helping-the-circular-economy-become-a-reality/>, (Accessed: 07.03.2025).
- Yang, W. and Li, L. (2018). "Efficiency evaluation of industrial waste gas control in China: A study based on data envelopment analysis (DEA) model", *Journal of Cleaner Production*, 179, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.277>

Kaynakların Etkin Kullanımında Dijital Dönüşümün Rolü

Hüseyin Şentürk¹ 

ÖZET

Amaç: Bu çalışma, 2008-2022 döneminde Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde kaynak verimliliğini artırmada dijitalleşme, araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) faaliyetleri ve çevresel vergilerin rolünü ampirik olarak incelemeyi amaçlamaktadır.

Yöntem: Çalışma, belirlenen dönemdeki verileri kullanarak Panel ARDL (AutoRegressive Distributed Lag) modeli ile ampirik analizler gerçekleştirmiştir. Bu yöntem, değişkenler arasındaki hem kısa hem de uzun dönemli dinamik ilişkileri tespit etmeye olanak tanımıştır.

Bulgular: Elde edilen bulgular, uzun dönemde dijitalleşmenin her iki boyutu (İnsan Sermayesi Endeksi ve Çevrimiçi Hizmetler Endeksi), Ar-Ge harcamaları ve çevresel vergilerin kaynak verimliliği üzerinde pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Kısa dönemde ise, özellikle İnsan Sermayesi Endeksi ve Ar-Ge harcamalarının marjinal etkileri negatif veya anlamsız bulunmuş; çevresel vergilerin kısa dönemde kaynak verimliliğine negatif etkisi, geçiş süreçlerindeki başlangıç zorlukları ve adaptasyon maliyetleri ile açıklanmıştır.

Özgünlük: Bu çalışma, AB üye ülkelerindeki kaynak verimliliği literatürüne, dijitalleşmenin iki farklı boyutunu (insan sermayesi ve çevrimiçi hizmetler) ve çevresel vergileri eş zamanlı olarak Panel ARDL modeli ile ele alarak önemli bir katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kaynak Verimliliği, Dijitalleşme, Panel ARDL.

JEL Kodları: O13, C33, C40.

The Role of Digital Transformation in the Efficient Use of Resources

ABSTRACT

Purpose: This study aims to empirically examine the role of digitalization, research and development (R&D) activities and environmental taxes in improving resource efficiency in European Union (EU) states over the period 2008-2022.

Methodology: The study conducts empirical analyses with the Panel ARDL (AutoRegressive Distributed Lag) model using data from the specified period. This methodology allowed to identify both short-run and long-run dynamic relationships between variables.

Findings: The findings show that in the long run, both dimensions of digitalization (Human Capital Index and Online Services Index), R&D expenditures and environmental taxes have a positive and statistically significant effect on resource productivity. In the short-run, the marginal effects of the Human Capital Index and R&D expenditures were found to be negative or insignificant, while the negative effect of environmental taxes on resource productivity in the short-run was explained by the initial difficulties in transition processes and adaptation costs.

Originality: This study makes an important contribution to the literature on resource productivity in EU member states by simultaneously addressing two different dimensions of digitalization (human capital and online services) and environmental taxes with a Panel ARDL model.

Keywords: Resource Efficiency, Digitalization, Panel ARDL.

JEL Codes: O13, C33, C40.

¹ Türkiye İstatistik Kurumu, Ankara, Türkiye

Sorumlu Yazar-Corresponding Author: Hüseyin Şentürk, huseyinsenturk@tuik.gov.tr

DOI: 10.51551/verimlilik.1711925

Araştırma Makalesi / Research Article | Geliş / Submitted: 02.06.2025 | Kabul / Accepted: 28.07.2025

Atıf/Cite: Şentürk, H. (2025). "Kaynakların Etkin Kullanımında Dijital Dönüşümün Rolü", *Verimlilik Dergisi*, 59(4), 757-768.

EXTENDED ABSTRACT

Resource efficiency is emerging as a key element in achieving sustainable development goals. Especially in regions such as the European Union (EU) that prioritize environmental sustainability, striking a balance between economic growth and the efficient use of natural resources is a critical policy area. Digitalization, research and development (R&D) activities, and environmental taxes are increasingly important tools for achieving this balance. Digital technologies hold the potential to optimize production and consumption processes, while R&D investments encourage the development of innovative, environmentally friendly solutions. Environmental taxes, on the other hand, aim to reduce environmental externalities through market-based mechanisms.

This study aims to examine the effects of digitization, R&D expenditures, and environmental taxes on resource efficiency in EU member countries using panel data from 2008 to 2022. Digitalization is examined in two dimensions: The Human Capital Index and the Online Services Index. The primary objective of the study is to reveal the long- and short-term effects of these factors on resource efficiency and to provide guiding findings for sustainable development policies.

The Panel ARDL (Autoregressive Distributed Lag) model was used in the empirical analysis. This method allows for the analysis of both short-term and long-term relationships and tests for cointegration between variables. The dependent variable was resource efficiency (the ratio of real GDP to natural resource consumption), while the independent variables were digitalization indicators, the share of R&D expenditures in GDP, and the ratio of environmental taxes to GDP. The error correction model (ECM) was also used to assess the system's speed of convergence to equilibrium.

Long-term analysis results show that both dimensions of digitalization, R&D expenditure and environmental taxes, have positive and statistically significant effects on resource efficiency. The Human Capital Index increases the capacity of individuals and institutions to optimize energy and material consumption through the effective use of digital tools. The Online Services Index improves resource use by increasing transparency and efficiency in public services. R&D expenditures support the development of environmentally friendly technologies and production processes, while environmental taxes encourage companies to adopt more sustainable behaviors in line with the "polluter pays" principle.

In the short term, however, the effects of some variables have been found to be limited or negative. In particular, digitalization and R&D expenditures can negatively affect resource efficiency in the short term due to learning curves, infrastructure costs, and delayed benefits. The short-term negative effect of environmental taxes can be explained by the difficulties companies face in adapting to new tax burdens.

Long-term findings are consistent with similar studies in the literature and confirm that digitization, innovation, and environmental taxation policies are effective tools for increasing resource efficiency. Short-term findings, on the other hand, indicate that transition processes need to be carefully managed. Digital infrastructure investments and R&D projects may initially incur additional costs; however, over time, the returns on these investments are quite high in terms of resource efficiency. The short-term negative effects of environmental taxes can be mitigated with transition support.

In conclusion, this study comprehensively analyzes the effects of digitalization, R&D, and environmental taxes on resource efficiency, offering strategic recommendations for sustainable development policies. Increasing investments in these areas will provide both economic and environmental benefits for policymakers.

1. GİRİŞ

Günümüzün küresel ekonomik ve çevresel sorunları, sınırlı doğal kaynakların sürdürülebilir şekilde yönetilmesi ile ilgili acil bir öncelik yaratmaktadır. Bu çerçevede, kaynak etkinliği kavramı, hem ekonomik gelişmenin sürdürülmesi hem de ekolojik dengenin sağlanması açısından kritik bir öneme sahiptir. Kaynak verimliliği, basitçe, birim ekonomik çıktı için harcanan kaynak miktarını azaltmayı veya başka bir şekilde ifade etmek gerekirse, doğadan elde edilen madde başına üretilen çıktı ile ölçülen ekonomik faaliyetlerin çevresel etkisini azaltma yeteneğini belirtir. Artan nüfus, yükselen tüketim alışkanlıkları ve sınırlı doğal kaynaklar ışığında, kaynak verimliliğini artırmak, sadece ekonomik rekabet için değil, aynı zamanda iklim değişikliği, biyoçeşitlilik kaybı ve kaynak kıtlığı gibi küresel çevre sorunlarıyla başa çıkmak için de zorunlu bir stratejidir. Bu karmaşık dinamik içinde, teknolojik gelişmelerin, yenilikçi yöntemlerin ve rasyonel politika araçlarının kaynak verimliliği üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde kavramak, sürdürülebilir bir gelecek oluşturma açısından önemli bir adımdır.

Küresel düzlemde, özellikle Avrupa Birliği gibi gelişmiş ekonomilerde, kaynak eksikliği ve çevresel tehditler, sürdürülebilir üretim ve tüketim yöntemlerine geçişi zorunlu hale getirmektedir. Doğal kaynakların fazla kullanımı ve atık üretimi, yalnızca ekolojik dengenin bozulmasına neden olmakla kalmaz, aynı zamanda uzun vadede ekonomik istikrarı da tehdit eder. Bu sebeple, ulusal ve uluslararası seviyedeki politikalar, kaynak etkinliğini artırmaya yönelik yenilikleri ve yatırımları desteklemeyi amaçlamaktadır. Bu çerçevede, dijital teknolojilerin hızla yaygınlaşması, araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) faaliyetlerine artan yatırımlar ve çevresel vergiler gibi piyasa odaklı araçlar, bu dönüşümün temel unsurları olarak öne çıkmaktadır. Modern ekonomilerde kaynakların verimliliğini etkileyen unsurlar arasında teknolojik ilerlemeler, Ar-Ge yatırımları, dijital dönüşüm süreçleri ve çevresel politika araçları önemli bir yer tutmaktadır (Stahel, 2019: 62-63; Zhang ve diğerleri, 2021).

Son dönemde meydana gelen dijital devrim, dünya ekonomisini ve sosyal hayatı derinlemesine değiştirmiş, bununla birlikte kaynak verimliliği imkanını da büyük ölçüde yükseltmiştir. Dijitalleşme, Endüstri 4.0, nesnelerin interneti, yapay zekâ ve büyük veri analizi gibi teknolojiler, üretim süreçlerini daha akıllı, esnek ve optimize ederek madde ve enerji israfını azaltma imkânları sunmaktadır (Schwab, 2024: 29). Dijitalleşme, ekonomik süreçlerin iyileştirilmesi, kaynak yönetiminin takibi ve etkinliğin yükseltilmesi alanında çarpıcı değişimlere neden olmuştur (Lange ve diğerleri, 2020). E-devlet uygulamaları, dijital altyapı yatırımları ve insan kaynağının dijital yetkinliklerle güçlendirilmesi, hem kaynakların verimli kullanımını artırmakta hem de sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada önemli işlevler üstlenmektedir (Birleşmiş Milletler, 2022: 165-168).

Bu çalışmada dijitalleşmenin kaynak verimliliği üzerindeki etkisini analiz etmek amacıyla Birleşmiş Milletler E-Devlet Gelişim Endeksi (EGDI) kapsamındaki iki ana göstergeye odaklanılmıştır:

- İnsan Sermayesi Endeksi (ISE),
- Çevrimiçi Hizmetler Endeksi (CHE).

ISE, bir toplumun dijital aletleri kullanma ve bunlardan yararlanma becerisini, eğitim ve okuryazarlık seviyeleri aracılığıyla gösterirken, CHE, hükümetlerin dijital teknolojileri e-yönetim ve kamu katılımını artırma düzeyini analiz eder. Yüksek dijital okuryazarlık ve yeterlilik, kaynakların daha bilinçli ve etkili kullanılmasına yardımcı olurken; gelişmiş çevrimiçi hizmetler, kamu hizmetlerinde verimliliği ve şeffaflığı artırarak kaynak israfını engelleyebilir (Gil-Garcia ve diğerleri, 2018). Dijitalleşmenin bu yönleri, akıllı enerji yönetimi, döngüsel ekonomi uygulamaları ve optimize edilmiş tedarik zincirleri gibi yöntemler ile kaynak verimliliğini artırma kapasitesine sahiptir.

Araştırma ve geliştirme çalışmaları, ekonomik gelişimin ve çevresel etkinliğin artırılmasının önemli motorlarından biridir (Popp, 2002; Griliches, 2007: 363). Kaynak verimliliği açısından Ar-Ge, yeni maddelerin bulunması/kullanılması, enerji verimli teknolojilerin tasarlanması, atık yönetimi ve geri dönüşüm süreçlerinin geliştirilmesi gibi konularda devrim niteliğinde yenilikler teşvik eder. Bu çalışmada Ar-Ge'nin önemi, Ar-Ge harcamalarının gayri safi yurtiçi hasıla (GSYH) içindeki oranı ile analiz edilmiştir. Ar-Ge yatırımları, daha az kaynakla daha fazla değer elde etmeyi sağlayan teknolojik ve süreç yeniliklerini mümkün kılar; bu da üretim süreçlerinin optimizasyonunu, ürün kullanım ömrünün uzatılmasını ve kaynak geri kazanımını artırmayı destekler (Jaffe ve diğerleri, 2005). Kamusal ve özel sektör araştırma-geliştirme işbirlikleri, çevre performansını iyileştiren yeşil teknolojilerin geliştirilmesi ve pazara sunulması için uygun bir zemin oluşturarak, doğal kaynaklar üzerindeki yükü azaltır ve ekonomik büyümeyi sürdürülebilir hale getirir (Johnstone ve Labonne, J, 2009).

Sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada politika yapımcıların başvurduğu önemli araçlardan biri çevresel vergilerdir. Bu vergiler, çevresel dışsallıkların maliyetlerini içselleştirerek "kirleten öder" ilkesini hayata geçirir ve işletmeler ile tüketicileri daha çevre dostu hareketler sergilemeye teşvik etmeyi hedefler (Goulder, 1995; Pigou, 2017: 193-196). Bu çalışmada, çevresel vergilerin kaynak kullanım verimliliği üzerindeki olası

etkisi, çevresel vergi gelirlerinin GSYH'ye oranı göstergesi ile incelenmiştir. Çevresel vergiler, enerji kullanımı, su tüketimi ya da atık üretimi gibi çevresel etkileri taşıyan işlemleri fiyatlandırarak, kaynakların daha etkin bir biçimde kullanılmasını destekler. Karbon ve enerji vergileri, enerji yoğun endüstrileri daha az enerji tüketen teknolojilere yönlendirirken, atık vergileri ise atık oluşumunu azaltma ve geri dönüşüm oranlarını artırma konusunda teşvik sağlar (OECD, 2011: 50, 237).

Bu çalışmada, Avrupa Birliği (AB) üye ülkelerine ait 2008-2022 dönemine ait panel veriler kullanılarak, dijitalleşmenin (İnsan Sermayesi Endeksi ve Çevrimiçi Hizmetler Endeksi), araştırma ve geliştirmenin (Ar-Ge harcamalarının GSYH'ye oranı) ve çevresel vergilerin (çevresel vergi gelirlerinin GSYH'ye oranı) kaynak verimliliği (doğadan çıkarılan madde başına üretilen çıktı) üzerindeki uzun ve kısa dönemli etkileri değişkenler arasındaki dinamik ilişkileri ve uzun dönemli nedensellik bağlarını tespit etmede kullanılabilecek Panel Otoregresif Dağıtılmış Gecikme (Panel ARDL) modeli ile incelenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde dijitalleşme, Ar-Ge ve çevresel vergilerin kaynak verimliliği üzerindeki etkilerine dair literatür tartışılmıştır. Üçüncü bölümde veri seti ve Panel ARDL yöntemi açıklanmış, dördüncü bölümde analiz bulguları sunulmuştur. Beşinci bölümde ise bu bulgular ışığında genel değerlendirmeler yapılmış ve politika önerileri geliştirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kaynak verimliliği, ekonomik büyüme ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki dengenin sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Kaynak verimliliği, ekonomik üretimin gerçekleştirilmesi için harcanan doğal kaynakların miktarını en aza indirme yeteneği olarak tanımlanmaktadır (Fischer-Kowalski ve diğerleri, 2011). Literatürde, kaynak verimliliğinin çoğunlukla yurtiçi madde kullanımı (DMC) başına ekonomik çıktı ya da doğal kaynak tüketim yoğunluğu gibi göstergelerle değerlendirildiği gözlemlenmektedir (Eurostat, 2001: 37). Bu kavram, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada temel bir rol üstlenmekte ve doğal kaynakların azalması ile çevresel tahribat gibi küresel sorunların çözümü için bir yol sunmaktadır. Fischer-Kowalski (2011), çalışmasında kaynakların verimli kullanılmasının artırılması sadece teknolojik gelişmelerle değil, aynı zamanda üretim ve tüketim alışkanlıklarındaki yapısal değişikliklerle de sağlanabildiğini ortaya koymuştur. Krausmann ve diğerleri (2009), global madde akışları üzerine gerçekleştirdikleri detaylı incelemede, kaynak verimliliğinin zaman içerisinde gelişimini araştırmışlardır. Çalışma, 1900-2005 yılları arasında dünya genelinde kaynak tüketiminin ekonomik büyümeye göre daha hızlı bir şekilde arttığını ve mutlak ayrışmanın yalnızca belirli dönemlerde yaşandığını göstermiştir. Bu sonuçlar, kaynak verimliliğinin artırılmasında sistematik yöntemlerin gerekliliğini ön plana çıkarmaktadır. Daly (1997), ekolojik ekonomi çerçevesinde kaynak verimliliğini değerlendirerek, "boş dünya" ekonomisinden "dolu dünya" ekonomisine geçişte kaynak etkinliğinin önemini belirtmiştir. Yazara göre, kaynakların daha verimli kullanılması, ekonomik refah ile çevresel bozulma arasındaki ilişkiyi koparmak için gereken fakat tek başına yeterli olmayan bir gerekliliktir.

Son yıllarda dijital teknolojilerin kaynak verimliliği üzerindeki etkisi araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmektedir. Endüstri 4.0, nesnelerin interneti, yapay zeka ve büyük veri gibi dijital teknolojiler, üretim süreçlerinde iyileştirme, enerji tasarrufu ve atıkları azaltma olanakları sağlamaktadır (Ghobakhloo, 2020). Akıllı sensörler ve izleme sistemleri, enerji ve su harcamalarını anlık olarak gözlemleyerek verimsizlikleri belirleme ve düzeltme fırsatı sağlamaktadır (D'Adamo ve diğerleri, 2022). Dijitalleşme, tedarik zinciri yönetimini daha etkin ve şeffaf hale getirip, madde israfını ve nakliyeden kaynaklanan emisyonları azaltabilmektedir (Kamble ve diğerleri, 2019). Ayrıca, paylaşım ekonomileri ve dijital platformlar, atıl kaynakların daha verimli kullanılmasına katkıda bulunarak döngüsel ekonomi ilkelerini desteklemektedir (Frenken ve Schor, 2017). Hilty ve Aebischer (2015), bilgi ve iletişim teknolojilerinin çevresel etkilerini birincil, ikincil ve üçüncül etkiler şeklinde sınıflandırmışlardır. Birinci derece etkiler, bilgi ve iletişim teknolojilerinin çevresel maliyetlerini doğrudan, ikinci derece etkiler verimlilik artışlarını, üçüncü derece etkiler ise uzun vadeli yapısal değişimleri ifade eder. Yazarlar, ikinci derece etkilerin kaynak verimliliğini artırma potansiyelinin yüksek olduğunu ifade ederken, üçüncü derece etkilerin bu kazanımları zayıflatılabileceğini vurgulamışlardır. Lange ve diğerleri (2020), enerji tüketimi üzerindeki dijitalleşmenin etkilerini meta-analiz tekniğiyle araştırmışlardır. 57 çalışmayı içeren analiz, bilgi ve iletişim teknolojilerinin enerji tasarrufu sağlama kapasitesinin yüksek olduğunu ancak bu kapasitenin sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. Araştırma, dijital teknolojilerin kaynak verimliliğine etkisinin sektör ve coğrafi açıdan farklılıklar sergilediğini göstermiştir. Mondejar ve diğerleri (2021), dijital ekonominin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini OECD ülkeleri açısından incelemişlerdir. Panel veri analizi bulguları, dijital altyapı yatırımlarının kısa dönemli kaynak kullanımını artırdığını, fakat uzun dönemli verimlilik artışları sağladığını ortaya koymaktadır. Yazarlar, dijital dönüşümün kaynak etkinliğine olumlu etkilerinin sağlanabilmesi için uygun politika yapılarının şart olduğunu belirtmişlerdir. Araştırma ve geliştirme aktivitelerinin kaynak verimliliği üzerinde olumlu bir etkisi olduğu literatürde genel olarak kabul edilmektedir. İnovasyon, yeni üretim yöntemlerinin, enerji tasarruflu makinelerin ve çevreye duyarlı malzemelerin ilerlemesini sağlarken, birim çıktı başına harcanan kaynak miktarını düşürür (Aghion ve Howitt, 1992). Ampirik araştırmalar, Ar-Ge

yatırımlarının, hem enerji verimliliği (Johnstone ve diğerleri, 2012) hem de genel kaynak verimliliği (Griliches, 1990) üzerinde olumlu ve önemli bir etki yarattığını göstermektedir. Özellikle, çevresel performansını geliştiren Ar-Ge çalışmaları olan yeşil inovasyonlar, kaynak tüketimini optimize etme ve atık üretimini azaltma kapasitesine sahiptir (Herman, 2023). Ar-Ge yatırımları, uzun vadede sanayi süreçlerinin dönüşümünü sağlayarak, bir ülkenin çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında önemli bir işlev üstlenir. Popp (2002), çevreye yönelik yeniliklerle ilgili öncü araştırmasında, Ar-Ge yatırımlarının ekolojik teknolojilerin geliştirilmesindeki önemli rolünü belirtmiştir. Yazar, patent bilgilerini kullanarak çevresel yasaların Ar-Ge desteklerini artırdığını ve bunun da kaynak verimli teknolojilerin gelişimine yardımcı olduğunu ortaya koymuştur. Aghion ve Howitt (2009), içsel büyüme teorisi kapsamında Ar-Ge'nin kaynak verimliliğine etkilerini modellemişlerdir. Yazarlar, teknolojik gelişimin kaynak kullanımını en verimli hale getirdiğini ve bu süreçte Ar-Ge yatırımlarının önemli bir rol üstlendiğini teorik olarak kanıtlamışlardır. Model sonuçları, Ar-Ge yoğunluğu fazla olan ekonomilerde kaynak verimliliğinin daha çabuk ilerleyeceğini tahmin etmektedir. Hao ve diğerleri (2021), G7 ülkelerinde yeşil büyüme ile Ar-Ge, yenilenebilir enerji ve beşeri sermaye arasındaki bağlantıları araştırmışlardır. Panel ARDL analizi bulguları, Ar-Ge harcamalarının kaynak verimliliği üzerinde uzun vadede olumlu bir etki yarattığını, ancak bu etkinin ülkelerin gelişmişlik aşamasına bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Araştırma, Ar-Ge'nin kaynak verimliliği üzerindeki etkisinde eşik değerlerin bulunduğunu göstermiştir.

Çevresel vergiler, piyasa temelli bir politika aracı olarak, çevresel dışsallıkların maliyetlerini içselleştirerek ekonomik aktörleri daha çevre dostu davranışlar sergilemeye teşvik etmeyi amaçlar (Pigou, 2017: 193-196). Pigoucu vergiler olarak adlandırılan bu araçlar, kirliliğin ve kaynak kullanımının maliyetini yükselterek, şirketleri ve tüketicileri daha etkin kaynak kullanmaya yönlendirir (Goulder, 1995). Literatürde, karbon vergileri, enerji vergileri, atık vergileri ve su vergileri gibi farklı çevresel vergi türlerinin, kaynak verimliliği ve çevresel performans üzerinde olumlu etkiler yarattığı ifade edilmektedir (Convery, 2009; Sterner ve Coria, 2013: 73-82). Çevresel vergilerin hayata geçirilmesi, şirketlerin maliyet yapılarını değiştirip, daha az kaynak kullanarak ve daha az kirli teknolojilere yatırım yapmalarını teşvik edebilir. Bu vergilerden elde edilen gelirler, yeşil yeniliklere veya kaynak etkinliğini artıracak projelere yönlendirilerek "çifte kazanç" etkisi sağlayabilir (Freire-Gonzalez ve Ho 2018: 1). Baumol ve Oates (1988:14-36), çevresel vergilerin piyasa başarısızlıklarını düzeltmedeki önemini ayrıntılı bir şekilde açıklayarak, en uygun vergi seviyelerinin tespitine yönelik teorik bir yapı sunmuşlardır. Yazarlar, çevresel vergilerin kaynak kullanımını içselleştirdiğini ve bu durumun piyasa mekanizmalarının kaynak verimliliğini yükselttiğini ileri sürmüşlerdir. Bosquet (2000), çevresel vergi reformlarının ekonomik etkilerini Avrupa ülkelerinde araştırmıştır. Araştırma, çevresel vergilerin kaynak kullanımını azalttığını ve çifte kazanç hipotezi çerçevesinde istihdama olumlu etkiler sağladığını ortaya koymaktadır. Yazar, çevresel vergilerin etkinliğinin vergi düzenlemesine ve tamamlayıcı politikaların varlığına bağlı olduğunu belirtmiştir. Lin ve Li (2022), çevre vergilerinin temiz enerji üretiminde Çin örneği üzerinden etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlar, çevresel vergilerin yenilenebilir enerji yatırımlarını desteklediğini ve dolaylı yoldan kaynak verimliliğinin artmasına yardımcı olduğunu göstermektedir. Araştırma, çevresel vergilerin etkinliğinde gelir seviyesinin önemli bir aracı rol üstlendiğini göstermektedir.

3. VERİ ve YÖNTEM

3.1 Veri

Dijitalleşmenin kaynak verimliliği üzerinde etkisinin araştırılması amacıyla 2008-2022 dönemi için veri mevcudiyetine göre Avrupa Birliği'ne üye olan Avusturya, Belçika, Çekya, Danimarka, Estonya, Finlandiya, Fransa, Almanya, Yunanistan, Macaristan, İrlanda, İtalya, Letonya, Litvanya, Lüksemburg, Hollanda, Polonya, Portekiz, Slovakya, Slovenya, İspanya ve İsveç ile Norveç, Türkiye ve Birleşik Krallık verileri kullanılmıştır. Veriler OECD ve Birleşmiş Milletler veri tabanlarından elde edilmiştir. Bu amaçla kaynak verimliliği göstergesi olarak kullanılan maddelerin birim ton başına Euro cinsinden gayrisafi yurtiçi hasıla verileri kullanılmıştır. Kullanılan madde miktarları kabaca doğadan çıkarılan maddelerin ağırlıkları ile ithal edilen maddelerin ağırlıklarından ihraç edilen maddelerin ağırlıklarının çıkarılması ile hesaplanmıştır. Doğadan çıkarılan maddeler ise

- Biyokütle
- Metal cevherleri
- Metal dışı mineraller
- Fosil enerji maddeleri

olmak üzere dört ana grupta toplanmıştır. Bu maddelere ilişkin ağırlıkların toplamının gayrisafi yurtiçi hasılaya bölünmesi ile kaynak verimliliği göstergesi (KAYNAK) hesaplanmıştır. Çalışmada dijitalleşmeye ilişkin iki gösterge kullanılmıştır.

- İnsan sermayesi endeksi (ISE, Birleşmiş Milletler tarafından 0 ile 1 aralığında oluşturulan e-devletin insani boyutlarını yansıtan bir endekstir. Bu endeks dijital devlet sistemlerinin insanları tarafından ne

ölçüde kullanılabildiğini göstermektedir. Bir başka söylemle insani sermaye endeksi bir ülkede yaşayan bireylerin e-devlet olanaklarına katılmaya ve bunlardan faydalanmaya hazır olup olmadıklarını belirtmektedir.

- Çevrimiçi hizmetler endeksi (CHE), ISE'ye benzer şekilde 0 ile 1 aralığında devletlerin kamu katılımını geliştirmek için teknolojiye ne ölçüde yararlandığını belirtmektedir.

Kaynak verimliliği üzerinde etkisi olduğu düşünülen araştırma ve geliştirme faaliyetlerine ilişkin araştırma geliştirme harcamalarının GSYH içindeki payı (ARAS_GELIS) yüzde olarak kullanılırken, çevresel politikaların bir aracı olarak çevresel vergilerin GSYH'ye oranı (VERGI) yine yüzde olarak kullanılmıştır. Burada çevresel vergi gelirleri, çevre ile ilişkili olan enerji vergileri, ulaştırma vergileri, kirlilik ve kaynak vergilerinin toplamı olarak alınmıştır. Kullanılan veriler ülkelere ve zamana göre ele alındığından panel yapıdadır, genel olarak kullanılan veri setine ilişkin özet istatistikler aşağıdaki tabloda yer almaktadır.

Tablo 1. Özet istatistikler

	KAYNAK	ISE	CHE	ARAS_GELIS	VERGI
Ortalama	2,67	0,91	0,73	1,80	2,54
Std. Sapma	1,10	0,06	0,17	0,83	0,68
Basıklık	-0,33	-0,10	-0,69	-0,87	0,25
Çarpıklık	0,69	-0,63	-0,43	0,50	0,67
Aralık	4,67	0,28	0,71	3,25	3,78
En Küçük	0,96	0,71	0,29	0,45	0,86
En Büyük	5,64	0,99	1,00	3,71	4,64

3.2 Yöntem

Panel veri analizinde, birimler arasındaki yatay kesit bağımlılığı önemli bir sorundur. Klasik panel veri modelleri (sabit etkiler, rastgele etkiler) genellikle hata terimlerinin birimler arasında bağımsız olduğunu varsayar. Ancak, küreselleşme, ortak şoklar veya gözlemlenmeyen ortak faktörler nedeniyle bu varsayım çoğu zaman ihlal edilir. Yatay kesit bağımlılığı mevcut olduğunda, standart tahmin ediciler tutarsız ve etkin olmayan hale gelebilir, bu da yanlış çıkarımlara yol açar.

Pesaran'ın CD testi (2004), panel veri modellerinde hata terimlerinin yatay kesit bağımlılığını değerlendirmek için tasarlanmıştır. Bu test, özellikle N büyük ve T nispeten küçük olduğunda iyi performans gösterir. Testin temel yaklaşımı, her bir birimin hata terimlerinin diğer birimlerin hata terimleriyle korelasyonlu olup olmadığını incelemektir.

Pesaran CD testi, hata terimlerinin belirli bir ortak faktör yapısına sahip olduğunu varsaymaz, ancak birimler arası zayıf veya güçlü korelasyonlara izin verir. Testin temel varsayımı, regresyon denklemlerinin doğru bir şekilde belirlenmiş olması ve regresyon artıklarının elde edilmesiyle ilgilidir.

H_0 : Panelde yatay kesit bağımsızlığı yoktur.

H_a : Panelde yatay kesit bağımlılığı vardır.

CD testi, her bir birim çifti arasındaki hata terimi korelasyonlarının ortalamasına dayanır. Eğer birimler arasında yatay kesit bağımlılığı varsa, bu korelasyonların ortalaması sıfırdan anlamlı şekilde farklı olacaktır. Test için geliştirilen test istatistiği Eşitlik 1'de verilmiştir.

$$CD = \sqrt{\frac{2T}{N(N-1)}} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \tilde{\rho}_{ij} \quad (1)$$

olarak ifade edilir. Burada $\tilde{\rho}_{ij}$ terimi i . ve j . birimlerin artık hata terimleri arasındaki örneklem korelasyon katsayısıdır.

Yatay kesit bağımlılık durumu aynı zamanda serilerin durağan olup olmadıklarının belirlenmesinde kullanılacak uygun testi belirlemek için gereklidir. Panel birim kök testlerini yatay kesit bağımsızlığını baz alan birinci jenerasyon testleri ile yatay kesit bağımlılığını temel alan ikinci jenerasyon testleri olarak ele almak mümkündür (Hurlin ve Mignon, 2007: 2-3).

Yatay kesit bağımlılığını dikkate alan Pesaran (2007) CIPS testi Im ve diğerleri (2003) testinin yatay kesit bağımlılığına dayanıklı hale getirilmiş bir uzantısıdır. Testin temel amacı, panel verilerindeki değişkenlerin birim kök içerip içermediğini, yani durağan olup olmadığını, birimler arası bağımlılık mevcutken belirlemektir. CIPS testi, her bir birimin genişletilmiş Dickey Fuller (1979) regresyonuna, panelin yatay kesit ortalamalarının ve bunların gecikmelerinin eklenmesiyle yatay kesit bağımlılığını dikkate alır. Burada tüm panel birimlerinde birim kök vardır boş hipotezine karşı panel birimlerin en az bir kısmında birim kök yoktur alternatif hipotezi test edilmektedir. Eşitlik 2'de belirtildiği üzere test için geliştirilen test istatistiği verilmiştir.

$$\Delta y_{it} = \alpha_i + \beta_i y_{i,t-1} + \gamma_i \bar{y}_{t-1} + \delta_i \Delta \bar{y}_t + \sum_{j=1}^{p_i} \phi_{ij} \Delta y_{i,t-j} + \sum_{j=0}^{p_i} \psi_{ij} \Delta \bar{y}_{t-j} + e_{it} \quad (2)$$

CADF regresyonunun tahmin edilmesi ile başlar. CIPS test istatistiği ise bu CADF t-istatistiklerinin ortalaması, $CIPS = N^{-1} \sum_{i=1}^N t_i(N, T)$, olarak hesaplanır.

Bu çalışmada, değişkenler arasındaki uzun dönemli ilişkileri incelemek amacıyla Pesaran ve diğerleri (1999) tarafından geliştirilen havuzlanmış ortalama grup (PMG) tahmin edicisi kullanılmıştır. PMG modeli, panel veri analizinde uzun dönemli ilişkilerin homojen, kısa dönemli dinamiklerin ise heterojen olduğunu varsayan bir hata düzeltme modelidir. Bu model, özellikle durağan olmayan panel verileriyle çalışırken, eşbütünleşme ilişkilerini analiz etmek için kullanılır. PMG, uzun dönem katsayılarının tüm paneller için aynı olduğunu kısıtlar, ancak kısa dönem katsayıları ve hata düzeltme hızı parametrelerinin paneller arasında farklılık göstermesine izin verir. Bu, modelin hem heterojenliği hem de homojenliği aynı anda ele almasını sağlar.

PMG tahmin edicisi, gecikmesi dağıtılmış otoregresif (ARDL) modelinin bir hata düzeltme formunda tahmin edilmesiyle elde edilir. Genel bir ARDL ($p, q1, \dots, qk$) modeli Eşitlik 3'te gösterildiği şekilde ifade edilebilir.

$$Y_{it} = \sum_{j=1}^p \lambda_{ij} Y_{i,t-j} + \sum_{j=0}^{q-1} \delta'_{ij} X_{i,t-j} + \mu_i + \epsilon_{it} \quad (3)$$

Bu gösterimde μ_i , birimlerin sabit etkilerini belirtirken λ_{ij} ve δ_{ij} kısa dönem katsayılarını belirtmektedir. Belirtilen ARDL modeli, hata düzeltme modeline dönüştürülebilir. Hata düzeltme modeli, uzun ve kısa dönemli etkileri Eşitlik 4'te belirtildiği üzere daha açık bir şekilde ayrıştırılabilir.

$$\Delta Y_{it} = \phi_i (Y_{i,t-1} - \theta'_i X_{i,t-1}) + \sum_{j=1}^{p-1} \lambda^*_{ij} \Delta Y_{i,t-j} + \sum_{j=0}^{q-1} \delta^{*'}_{ij} \Delta X_{i,t-j} + \mu_i + \epsilon_{it} \quad (4)$$

Belirtilen hata düzeltme modelinde ϕ_i hata düzeltme katsayısını temsil etmektedir. Bu değer in istatistiksel olarak anlamlı bir biçimde negatif olması uzun dönem dengeye doğru bir yakınsama olduğunu göstermektedir. θ'_i terimi uzun dönem katsayı vektörünü gösterirken, λ^*_{ij} ifadesi kısa dönemli katsayıları ifade etmektedir.

PMG modelini tahmin etmek için en çok olabilirlik (ML) yöntemini kullanılır. Bu, modelin tüm parametrelerini (kısa dönem katsayıları, hata düzeltme katsayısı, uzun dönem katsayıları ve hata varyansları) olabilirlik fonksiyonunu maksimize ederek elde etmeye dayanır. Burada her bir birim için koşullu olabilirlik fonksiyonu oluşturur ve çarpılarak panelin toplam olabilirlik fonksiyonu elde edilir. Sonrası logaritmik dönüşüm yapılarak log-olabilirlik fonksiyonu elde edilir. Optimizasyon yöntemleri ile bu fonksiyonu en yüksek değere ulaştıran parametreler, tahmin edilen parametreler olarak nitelendirilir.

4. BULGULAR

Bu çalışmada dijitalleşme, araştırma ve geliştirme faaliyetleri ile çevresel vergilerin kaynak verimliliği üzerindeki etkisi Panel ARDL modeli ile analiz edilmiştir. Bu amaçla öncelikle çalışmada kullanılan serilerin durağanlık durumu araştırılmıştır. Serilerin durağanlık durumlarının araştırılmasında kullanılacak uygun teste karar verebilmek amacıyla Pesaran (2004) CD testi uygulanarak birinci veya ikinci nesil panel birim kök testlerinden hangisinin kullanılacağı tespit edilmiştir.

Pesaran (2004) CD test sonuçlarına göre test istatistiği yaklaşık 0 olasılık değeri ile 9.28 olarak hesaplanmıştır. Buna göre panelde yatay kesit bağımsızlığı yoktur boş hipotezi %99 güven düzeyinde reddedilerek panelde yatay kesit bağımlılığının olduğu sonucuna varılmıştır. Yatay kesit bağımlılık durumunda kullanılabilecek ikinci nesil panel birim kök testleri arasında Pesaran (2007) CIPS testi sabitli ve sabitli-trendli modeller için uygulanmıştır.

Tablo 2. Panel birim kök testi sonuçları

	<i>Sabitli Model Test İstatistiği</i>	<i>Sabitli-Trendli Model Test İstatistiği</i>
KAYNAK	-1,96	-2,61
D_KAYNAK	-2,70***	-2,33
İSE	-2,79***	-2,96**
CHE	-2,26**	-2,26
ARAS_GELIS	-1,23	-1,80
D_ARAS_GELIS	-1,97	-2,84**
VERGI	-1,62	-2,42
D_VERGI	-2,60***	-3,61***

Not: ***, %99 güven düzeyinde; **, %95 güven düzeyinde ve *, %90 güven düzeyinde anlamlıdır.

Pesaran (2007) CIPS test sonuçlarına göre KAYNAK, ARAS_GELIS ve VERGI değişkenlerinin düzeyde durağan olmadıkları söylenebilir. Bu nedenle bu değişkenlerin birinci farkları alınarak (sırasıyla

D_KAYNAK, D_ARAS_GELIS ve D_VERGI) seriler testler yinelenmiş ve bu serilerin birinci seviye entegre oldukları görülmüştür. Diğer taraftan ISE ve CHE değişkenlerinin düzeyde durağan oldukları, I(0), görülmüştür. Modelin bağımlı değişkeni olan KAYNAK değişkeninin I(1), açıklayıcı değişkenlerin ise I(0) ve I(1) olmalarından kaynaklı Panel ARDL modelinin kullanımının uygun olduğu görülerek havuzlanmış ortalama grup modeli tahmin edilmiştir.

Tablo 3. Panel ARDL model sonuçları

<i>D_KAYNAK</i>	<i>Katsayı</i>	<i>p-değeri</i>
<i>Uzun Dönem</i>		
ISE	1,77	0,00
CHE	2,13	0,00
ARAS_GELIS	0,68	0,00
VERGI	0,25	0,00
<i>Kısa Dönem</i>		
Hata düzeltme	-1,64	0,02
ISE	-4,40	0,19
CHE	-2,99	0,01
D_ARAS_GELIS	-0,99	0,08
D_VERGI	-0,79	0,05
Sabit	1,83	0,58

Tabloya göre, incelenen tüm değişkenlerin uzun dönemde kaynak verimliliği üzerinde istatistiksel olarak anlamlı ve pozitif bir etkisi olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, dijitalleşme, araştırma ve geliştirme ile çevresel vergilerin Avrupa Birliği ülkelerinde kaynak verimliliğini uzun vadede artırdığını göstermektedir.

İnsan Sermayesi Endeksi katsayısı 2,13 ve yaklaşık 0 olasılık değeri ile oldukça anlamlıdır. Bu, uzun dönemde insan sermayesi endeksindeki 1 birimlik artışın, kaynak verimliliğini yaklaşık 2,13 birim artırdığını göstermektedir. Bu bulgu, eğitim ve dijital okuryazarlık seviyesinin artmasının, bireylerin ve kurumların dijital teknolojileri daha etkin kullanarak kaynakları daha verimli yönetmelerine olanak tanıdığı şeklinde yorumlanabilir. Yüksek insan sermayesi, inovasyonun ve adaptasyonun önünü açarak kaynakların daha akılcı kullanımına yol açmaktadır. Çevrimiçi Hizmetler Endeksi katsayısı 1,77 yaklaşık 0 olasılık değeri ile yine yüksek derecede anlamlıdır. Bu durum, hükümetlerin dijitalleşme ve çevrimiçi hizmetler sunma çabalarının kaynak verimliliğini uzun vadede önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Çevrimiçi hizmetlerin yaygınlaşması, bürokratik süreçleri azaltarak, veri tabanlı karar almayı kolaylaştırarak ve kaynak tahsisinde şeffaflığı artırarak genel verimliliğe katkı sağlamaktadır. Araştırma ve geliştirme harcamaları katsayısı 0.68 ve yaklaşık 0 olasılık değeri ile anlamlıdır. Bu sonuç, GSYH içindeki Ar-Ge harcamalarının payındaki %1'lik bir artışın, uzun dönemde kaynak verimliliğini %0.68 oranında artırdığını göstermektedir. Bu bulgu, Ar-Ge'nin yeni, daha verimli üretim tekniklerinin ve çevre dostu teknolojilerin geliştirilmesine olanak sağlayarak kaynakların daha etkin kullanılmasına yol açtığı literatürdeki beklentilerle uyumludur. Çevresel vergi gelirleri katsayısı 0.25 ve yaklaşık 0 olasılık değeri ile anlamlı bulunmuştur. Bu, çevresel vergi gelirlerinin GSYH'ye oranındaki %1'lik bir artışın, uzun dönemde kaynak verimliliğini %0.25 oranında artırdığına işaret etmektedir. Bu sonuç, çevresel vergilerin kirleten öder prensibi doğrultusunda, firmaları ve tüketicileri kaynakları daha verimli kullanmaya ve daha az çevresel etki yaratmaya teşvik ettiği argümanını desteklemektedir.

Kısa dönem dinamikleri ve hata düzeltme terimi, değişkenler arasındaki kısa vadeli ayarlamaları ve uzun dönem dengesine ne kadar hızlı yaklaşıldığını göstermektedir. Hata düzeltme terimi istatistiksel olarak anlamlı ve negatif bir işarete sahiptir. Bu, uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisinin varlığını doğrulamaktadır. Katsayının değeri, kısa dönemdeki herhangi bir dengesizliğin, her dönemde yaklaşık %164 oranında düzeltilerek uzun dönem dengesine doğru yaklaşıldığını göstermektedir. Bu yüksek düzeltme hızı, modeldeki değişkenlerin uzun dönem dengesine oldukça hızlı bir şekilde geri döndüğüne işaret etmektedir.

Kısa dönemde İnsan Sermayesi Endeksi anlamlı ve negatiftir. Bu, kısa dönemde insan sermayesi endeksindeki artışın kaynak verimliliğini düşürücü bir etki yaratabileceğini göstermektedir. Bu durum, dijitalleşmenin ilk aşamalarında ortaya çıkan öğrenme eğrileri, altyapı yatırımlarının kısa vadeli maliyetleri veya teknoloji adaptasyon süreçlerinde yaşanan geçici verimsizlikler ile açıklanabilir. Kısa dönemde Çevrimiçi Hizmetler Endeksi istatistiksel olarak anlamsızdır. Bu, kısa dönemde çevrimiçi hizmetler endeksinin kaynak verimliliği üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Uzun dönemdeki pozitif etki göz önüne alındığında, çevrimiçi hizmetlerin faydalarının kısa vadede tam olarak hissedilmediği veya belirli bir gecikmeyle ortaya çıktığı düşünülebilir. Kısa dönemde araştırma ve geliştirme etkisi anlamlı ve negatiftir. Bu sonuç, Ar-Ge harcamalarındaki kısa dönemli artışların kaynak verimliliğinde geçici bir düşüşe yol açabileceğini ima edebilir. Ar-Ge yatırımlarının getirilerinin genellikle uzun vadede ortaya çıktığı ve kısa dönemde maliyet, deneme-yanılma süreçleri veya başlangıçtaki

verimsizlikler nedeniyle negatif bir etki yaratabileceği düşünülebilir. Kısa dönemde çevresel vergi etkisi anlamlı ve negatiftir. Bu, çevresel vergi gelirlerindeki kısa dönemli artışların kaynak verimliliğini geçici olarak düşürücü bir etki yaratabileceğini göstermektedir. Bu durum, firmaların vergi yüküne uyum sağlama sürecinde yaşanan başlangıç maliyetleri veya üretim süreçlerinde hızlı adaptasyon zorluklarından kaynaklanabilir. Ancak uzun dönemde bu vergilerin pozitif etkisi ön plana çıkmaktadır.

Elde edilen bulgular, dijitalleşme, Ar-Ge ve çevresel vergilerin kaynak verimliliği üzerindeki etkilerinin uzun ve kısa dönemde farklılık gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Uzun dönemde, tüm bu faktörlerin kaynak verimliliğini anlamlı ve pozitif yönde etkilemesi, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada bu alanlara yapılacak yatırımların ve politikaların önemini vurgulamaktadır. Özellikle insan sermayesinin ve e-devlet hizmetlerinin kaynak verimliliğine doğrudan ve güçlü katkıları, dijital dönüşümün sadece ekonomik büyümeyi değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği de desteklediğini göstermektedir. Ar-Ge ve çevresel vergilerin de pozitif etkileri, inovasyon ve piyasa tabanlı araçların çevresel performansı artırmadaki rolünü pekiştirmektedir.

Kısa dönemde ise özellikle dijitalleşmenin bazı boyutları ve Ar-Ge harcamaları için gözlemlenen negatif veya anlamsız etkiler, teknolojik adaptasyon süreçlerinin ve yenilikçi yatırımların başlangıç maliyetleri veya gecikmeli faydaları ile açıklanabilir. Bu durum, politika yapıcılarının bu süreçleri destekleyici ve geçiş dönemindeki zorlukları hafifletici tedbirler almasının önemine işaret etmektedir. Örneğin, dijitalleşme ve Ar-Ge yatırımları için teşvikler veya adaptasyon süreçlerine yönelik eğitim programları, kısa dönemdeki olumsuz etkileri minimize edebilir ve uzun dönemdeki pozitif faydaların daha hızlı ortaya çıkmasına yardımcı olabilir. Çevresel vergilerin kısa dönemdeki negatif etkisi de, firmalara ve sektörlerle uyum sağlamaları için yeterli zaman ve destek sağlanması gerektiğini düşündürmektedir.

Genel olarak, bu ampirik bulgular, Avrupa Birliği ülkelerinin kaynak verimliliğini artırma hedefinde, dijitalleşmeyi hızlandırma, Ar-Ge'ye daha fazla yatırım yapma ve çevresel vergi uygulamalarını sürdürülebilir bir şekilde genişletme yönündeki çabalarının uzun vadede olumlu sonuçlar doğuracağını göstermektedir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışma, Avrupa Birliği (AB) üye ülkelerinde kaynak verimliliğini artırmada dijitalleşme, araştırma ve geliştirme faaliyetleri ve çevresel vergilerin rolünü, 2008-2022 dönemi verilerini kullanarak Panel ARDL modeli ile ampirik olarak incelemiştir. Elde edilen bulgular, bu faktörlerin kaynak verimliliği üzerinde hem uzun hem de kısa dönemde önemli ve genellikle beklenen yönlerde etkiler yarattığını ortaya koymuştur. Çalışma, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada bu kritik alanlara yapılacak yatırımların ve politikaların önemini vurgulamaktadır.

Ampirik analiz sonuçları, uzun dönemde dijitalleşmenin her iki boyutu (İnsan Sermayesi Endeksi ve Çevrimiçi Hizmetler Endeksi), Ar-Ge harcamaları ve çevresel vergilerin kaynak verimliliği üzerinde pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, çalışmanın temel hipotezlerini desteklemekte ve literatürdeki benzer sonuçlarla örtüşmektedir (Jaffe ve diğerleri, 2005; Schwab, 2024).

Dijitalleşme, özellikle İnsan Sermayesi Endeksi (ile ölçülen dijital okuryazarlık ve yetkinliğin, kaynak verimliliğini güçlü bir şekilde artırdığı bulunmuştur. Bu, bireylerin ve kurumların dijital araçları etkin kullanarak enerji ve malzeme tüketimini optimize etme, atıkları azaltma ve döngüsel ekonomi prensiplerini uygulama kapasitelerini geliştirdiğini doğrulamaktadır (Gil-Garcia ve diğerleri, 2018). Çevrimiçi Hizmetler Endeksi ile temsil edilen e-devlet hizmetlerinin yaygınlığı da uzun dönemde kaynak verimliliğine önemli katkı sağlamıştır. Bu durum, kamu hizmetlerinde artan şeffaflık, verimlilik ve bürokratik süreçlerin azaltılmasının genel kaynak kullanımını optimize ettiğini göstermektedir.

Araştırma ve geliştirme harcamalarının GSYH içindeki payının artması, uzun dönemde kaynak verimliliğini pozitif yönde etkilemiştir. Bu sonuç, Ar-Ge'nin yeni, daha çevre dostu teknolojilerin, enerji verimli üretim süreçlerinin ve kaynak geri kazanım tekniklerinin geliştirilmesi yoluyla kaynakların daha etkin kullanılmasına yol açtığı yönündeki beklentilerle uyumludur (Popp; 2002; Jaffe ve diğerleri, 2005; Griliches, 2007). Özellikle yeşil inovasyonlara yapılan yatırımlar, daha az kaynak yoğun ürünlerin ve hizmetlerin ortaya çıkışını tetikleyerek çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir (Ren ve diğerleri, 2020).

Çevresel vergilerin GSYH'ye oranının uzun dönemde kaynak verimliliğini artırması, bu piyasa tabanlı aracın "kirleten öder" prensibi doğrultusunda firmaları ve tüketicileri daha çevre dostu davranışlara yönlendirmede etkili olduğunu kanıtlamaktadır (Goulder, 1995; Pigou, 2017). Vergiler aracılığıyla çevresel dışsallıkların maliyetlerinin içselleştirilmesi, üretim süreçlerinde kaynak verimliliğini artırıcı inovasyonları teşvik etmekte ve kaynak yoğun faaliyetlerden uzaklaşmayı sağlamaktadır (OECD, 2011).

Kısa dönem dinamikleri incelendiğinde, bazı değişkenler için farklı paternler gözlemlenmiştir. Hata düzeltme teriminin negatif ve anlamlı olması, değişkenler arasında uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisinin varlığını teyit etmekte ve sistemin dengeden sapmalar durumunda hızla uzun dönem dengesine geri döndüğünü göstermektedir. Ancak, kısa dönemde özellikle İnsan Sermayesi Endeksi ve Ar-Ge harcamalarının marjinal anlamda negatif veya anlamsız etkileri dikkat çekicidir. Bu durum, dijital dönüşüm ve inovasyon süreçlerinin başlangıç maliyetlerini, öğrenme eğrilerini veya faydaların belirli bir gecikmeyle ortaya çıkmasını yansıtabilir. Örneğin, yeni dijital altyapıların kurulumu veya Ar-Ge projelerinin ilk aşamaları, kısa vadede ek kaynak tüketimi veya verimsizliklere yol açabilir. Benzer şekilde, çevresel vergilerin kısa dönemde kaynak verimliliğine negatif etkisi, firmaların yeni vergi yüklerine uyum sağlama sürecinde yaşanan başlangıç zorlukları veya adaptasyon maliyetleri ile açıklanabilir. Bu bulgular, politika yapıcılarının geçiş süreçlerinde oluşabilecek zorlukları hafifletici tedbirler almasının önemine işaret etmektedir.

Fon Desteği / Funding

Bu çalışmada herhangi bir resmi, ticari ya da kâr amacı gütmeyen organizasyondan fon desteği alınmamıştır.

Any specific grant has not been received from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Etik Standartlara Uygunluk / Compliance with Ethical Standards

Yazar tarafından, çalışmada kullanılan araç ve yöntemlerin Etik Kurul izni gerektirmediği beyan edilmiştir.

It was declared by the author that the tools and methods used in the study do not require the permission of the Ethics Committee.

Etik Beyanı / Ethical Statement

Yazar tarafından bu çalışmada bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan edilmiştir.

It was declared by the author that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.



Yazarlar, Verimlilik Dergisi'nde yayımlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptirler ve çalışmaları CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayımlanmaktadır.

The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.

KAYNAKÇA

- Aghion, P. ve Howitt, P. (1992). "A Model of Growth through Creative Destruction", *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 60(2), 323-351. <http://dx.doi.org/10.2307/2951599>
- Aghion, P. ve Howitt, P.W. (2009). "The Economics of Growth", MIT Press Cambridge, MA.
- Baumol, W.J. ve Oates, W.E. (1988). "The theory of Environmental Policy", Cambridge University Press. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781139173513>
- Birleşmiş Milletler. (2022). "UN E-Government Survey 2022: The Future of Digital Government", United Nations Department of Economic and Social Affairs.
- Bosquet, B. (2000). "Environmental Tax Reform: Does It Work? A Survey of the Empirical Evidence", *Ecological Economics*, 34(1), 19-32. [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009\(00\)00173-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00173-7)
- Convery, F.J. (2009). "Origins and Development of the EU ETS", *Environmental and Resource Economics*, 43, 391-412. <https://doi.org/10.1007/s10640-009-9275-7>
- D'Adamo, I., Gastaldi, M. ve Morone, P. (2022). "Economic Sustainable Development Goals: Assessments and Perspectives in Europe", *Journal of Cleaner Production*, 354, 131730. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131730>
- Daly, H.E. (1997). "Beyond Growth: The Economics of Sustainable Development", Beacon Press.
- Dickey, D. A., & Fuller, W. A. (1979). Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American statistical association*, 74(366a), 427-431. <http://dx.doi.org/10.2307/2286348>
- Eurostat. (2001). "Economy-wide Material Flow Accounts and Derived Indicators: A Methodological Guide", Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Fischer-Kowalski, M. (2011). "Analyzing Sustainability Transitions as A Shift between Socio-Metabolic Regimes", *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.04.004>
- Fischer-Kowalski, M., Swilling, M., Weisz, H. ve Williams, E. (2011). "Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth", United Nations Environment Programme (UNEP).
- Freire-González, J. ve Ho, M.S. (2018). "Environmental Fiscal Reform and the Double Dividend: Evidence from A Dynamic General Equilibrium Model", *Sustainability*, 10(2), 501. <http://dx.doi.org/10.3390/su10020501>
- Frenken, K. ve Schor, J.B. (2017). "Putting the Sharing Economy into Perspective", *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 23, 3-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eist.2017.01.003>
- Ghobakhloo, M. (2020). "Industry 4.0, Digitization, and Opportunities for Sustainability", *Journal of Cleaner Production*, 256, 120427. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
- Gil-Garcia, J.R., Dawes, S.S. ve Pardo, T.A. (2018). "Digital Government and Public Management Research: Finding the Crossroads", *Public Management Review*, 20(5), 633-646. <http://dx.doi.org/10.1080/14719037.2017.1327181>
- Goulder, L.H. (1995). "Environmental Taxation and the Double Dividend: A Reader's Guide", *International Tax and Public Finance*, 2, 157-183. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00877495>
- Griliches, Z. (1990). "The Search for R&D Spillovers", *The Scandinavian Journal of Economics*, 92(1), 29-45. <http://dx.doi.org/10.2307/3440244>
- Griliches, Z. (2007). "R&D and Productivity: The Econometric Evidence", University of Chicago Press. <http://dx.doi.org/10.7208/chicago/9780226308906.001.0001>
- Hao, L.N., Umar, M., Khan, Z. ve Ali, W. (2021). "Green Growth and Low Carbon Emission in G7 Countries: How Critical the Network of Environmental Taxes, Renewable Energy and Human Capital Is?", *Science of the Total Environment*, 752, 141853. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141853>
- Herman, K.S. (2023). "Green Growth and Innovation in the Global South: A Systematic Literature Review", *Innovation and Development*, 13(1), 43-69. <http://dx.doi.org/10.1080/2157930X.2021.1909821>
- Hilty, L.M. ve Aebischer, B. (2015). "ICT for Sustainability: An Emerging Research Field", *ICT Innovations for Sustainability*, 3-36. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_1
- Hurlin, C. ve Mignon, V. (2004). "Second Generation Panel Unit Root Tests", Thema Cnrs, University of Paris X, memo.
- Im, K.S., Pesaran, M.H. ve Shin, Y. (2003). "Testing for Unit Roots in Heterogeneous Panels", *Journal of Econometrics*, 115(1), 53-74. [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-4076\(03\)00092-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-4076(03)00092-7)
- Jaffe, A.B., Newell, R.G. ve Stavins, R.N. (2005). "A Tale of Two Market Failures: Technology and Environmental Policy", *Ecological Economics*, 54(2-3), 164-174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.12.027>
- Johnstone, N. ve Labonne, J. (2009). "Why Do Manufacturing Facilities Introduce Environmental Management Systems? Improving and/or Signaling Performance", *Ecological Economics*, 68(3), 719-730. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.06.003>

- Johnstone, N., Hascic, I., Poirier, J., Hemar, M. ve Michel, C. (2012). "Environmental Policy Stringency and Technological Innovation: Evidence from Survey Data and Patent Counts", *Applied Economics*, 44(17), 2157-2170. <http://dx.doi.org/10.1080/00036846.2011.560110>
- Kamble, S.S., Gunasekaran, A. ve Gawankar, S.A. (2019). "Sustainable Industry 4.0 Framework: A Systematic Literature Review Identifying the Current Trends and Future Perspectives", *Process Safety and Environmental Protection*, 122, 41-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>
- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K.H., Haberl, H. ve Fischer-Kowalski, M. (2009). "Growth in Global Materials Use, GDP and Population during the 20th Century", *Ecological Economics*, 68(10), 2696-2705. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.007>
- Lange, S., Pohl, J. ve Santarius, T. (2020). "Digitalization and Energy Consumption. Does ICT Reduce Energy Demand?", *Ecological Economics*, 176, 106760. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106760>
- Lin, B. ve Li, M. (2022). "Understanding the Investment of Renewable Energy Firms in the Face of Economic Policy Uncertainty—Micro-Evidence from Listed Companies in China", *China Economic Review*, 75, 101845. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chieco.2022.101845>
- Mondejar, M.E., Avtar, R., Diaz, H.L.B., Dubey, R.K., Esteban, J., Gómez-Morales, A. ve Garcia-Segura, S. (2021). "Digitalization to Achieve Sustainable Development Goals: Steps towards A Smart Green Planet", *Science of The Total Environment*, 794, 148539. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148539>
- OECD. (2011). "Environmental Taxes: A Guide for Policy Makers", OECD Publishing.
- Pesaran, M.H. (2004). "General Diagnostic Tests for Cross Section Dependence in Panels", *Cambridge Working Papers. Economics*, 1240(1), 1. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.572504>
- Pesaran, M.H. (2007). "A Simple Panel Unit Root Test in the Presence of Cross-Section Dependence", *Journal of Applied Econometrics*, 22(2), 265-312. <http://dx.doi.org/10.1002/jae.951>
- Pesaran, M.H., Shin, Y. ve Smith, R.P. (1999). "Pooled Mean Group Estimation of Dynamic Heterogeneous Panels", *Journal of the American Statistical Association*, 94(446), 621-634. <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1999.10474156>
- Pigou, A. (2017). "The Economics of Welfare", Routledge. <http://dx.doi.org/10.4324/9781351304368>
- Popp, D. (2002). "Induced Innovation and Energy Prices", *American Economic Review*, 92(1), 160-180. <http://dx.doi.org/10.1257/000282802760015658>
- Schwab, K. (2024). "The Fourth Industrial Revolution: What It Means, How to Respond. *Handbook of Research on Strategic Leadership in the Fourth Industrial Revolution*", (Editörler: Z. Simsek, C. Heavey, B.C. Fox), Edward Elgar Publishing.
- Stahel, W.R. (2019). "The Circular Economy: A User's Guide", Routledge. <http://dx.doi.org/10.4324/9780429259203>
- Sterner, T. ve Coria, J. (2013). "Policy Instruments for Environmental and Natural Resource Management", Routledge. <http://dx.doi.org/10.4324/9781936331833>
- Zhang, D., Mohsin, M., Rasheed, A.K., Chang, Y. ve Taghizadeh-Hesary, F. (2021). "Public Spending and Green Economic Growth in BRI Region: Mediating Role of Green Finance", *Energy Policy*, 153, 112256. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112256>

Analysis of Medical Imaging Devices in Türkiye Using the Malmquist Productivity Index

Yavuz Selim Küçük¹ 

ABSTRACT

Purpose: The aim of this study is to analyze the total factor productivity (TFP) of medical imaging devices in 12 regions of Türkiye for the period 2013–2022 using the Malmquist Productivity Index and to determine whether there are statistically significant differences in the TFP indicators of these devices by region and year.

Methodology: Secondary data from the Ministry of Health's Health Statistics Yearbooks were analyzed using DEAP software with constant returns to scale (CRS) input-oriented Malmquist Productivity Index. Descriptive statistics of the data and correlations between variables were calculated with the SPSS 21.0 program, and the Mann-Whitney U test was applied to statistically test regional and temporal differences.

Findings: CT, MRI, and Doppler USG devices showed higher productivity, while ECHO and mammography exhibited lower levels. Productivity was higher in northern and western regions and lower in the south and east, with no consistent improvement observed from 2013 to 2022.

Originality: This study contributes to the literature by analyzing the TFP of medical imaging devices in 12 regions of Türkiye using the Malmquist Index, and introduces a novel approach by combining it with the Mann-Whitney U test to assess regional and temporal differences.

Keywords: Malmquist Productivity Index, Data Envelopment Analysis, Medical Imaging Devices.

JEL Codes: D24, C61, I18, L88.

Malmquist Verimlilik İndeksi ile Türkiye'deki Tıbbi Görüntüleme Cihazlarının Analizi

ÖZET

Amaç: Bu çalışmanın amacı, Malmquist Verimlilik İndeksi ile Türkiye'deki 12 bölgede 2013–2022 dönemine ait tıbbi görüntüleme cihazlarının toplam faktör verimliliğini (TFP) analiz etmek ve Türkiye'deki tıbbi görüntüleme cihazlarının toplam faktör verimlilik göstergelerinde bölgelere ve yıllara göre istatistiksel bir fark olup olmadığını belirlemektir.

Yöntem: Sağlık Bakanlığı Sağlık İstatistikleri Yıllıklarından (2013-2022) ikincil veriler, ölçeğe göre sabit getiri (CRS) girdi odaklı Malmquist Verimlilik Endeksi ile DEAP yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Verilerin tanımlayıcı istatistikleri ve değişkenler arası korelasyonlar SPSS 21.0 programı ile hesaplanmış, bölgesel ve zamansal farkların istatistiksel olarak test edilmesi amacıyla Mann-Whitney U testi uygulanmıştır.

Bulgular: BT, MR ve Doppler USG cihazları daha yüksek verimlilik gösterirken, EKO ve mamografi daha düşük verimlilik göstermektedir. Verimlilik kuzey ve batı bölgelerinde daha yüksek, güney ve doğuda ise daha düşük verimlilik göstergesine sahip ve 2013'ten 2022'ye kadar istikrarlı bir iyileşme gözlemlenmemiştir.

Özgünlük: Bu çalışma, Türkiye'nin 12 bölgesinde (2013-2022) tıbbi görüntüleme cihazlarının TFP'sini Malmquist İndeksi kullanarak analiz ederek literatüre katkıda bulunmak ve bölgesel ve zamansal farklılıkları değerlendirmek için Mann-Whitney U testi ile birleştirerek yeni bir yaklaşım ortaya koymaktır.

Anahtar Kelimeler: Malmquist Verimlilik İndeksi, Veri Zarflama Analizi, Tıbbi Görüntüleme Cihazları.

JEL Kodları: D24, C61, I18, L88.

¹ Samsun University, Humanities and Social Sciences Faculty, Department of Health Management, Samsun, Türkiye

Corresponding Author: Yavuz Selim Küçük, yavuzselim.kucuk@samsun.edu.tr

DOI: 10.51551/verimlilik.1710968

Research Article | Submitted: 31.05.2025 | Accepted: 28.07.2025

Cite: Küçük, Y.S. (2025). "Analysis of Medical Imaging Devices in Türkiye Using the Malmquist Productivity Index", *Verimlilik Dergisi*, 59(4), 769-786.

1. INTRODUCTION

Developed and developing countries alike face significant challenges in delivering effective healthcare services with limited resources. The goal of health policies is to maximize the positive impact on public health while ensuring cost-effectiveness (World Health Organization, 2011: 10).

With economic growth, rising healthcare expenditures and the accessibility of factors used in the production of healthcare services have become prominent issues for policymakers. Globally, there are notable inequalities in access to healthcare services and medical technologies. One potential way to reduce costs and improve equity without changing existing systems is to focus on the efficient use of medical technologies (İlgün et al., 2021)

Radiology departments, where medical technology is heavily used, play a central role in diagnosing and treating many diseases and directly affect the functioning of other clinical units. Malfunctions in these departments can delay diagnostic processes and adversely affect patient outcomes. The efficient use of high-capital radiological devices such as Computed Tomography (CT) and Magnetic Resonance Imaging (MRI) is critically important for the financial performance of hospitals (Visintin et al., 2024).

Comprehensive research is needed to enable decision-makers to evaluate the efficiency of health technologies and medical devices. One of the most important resources that meet this need in Türkiye is the Health Statistics Yearbook published by the Ministry of Health. According to 2022 data, the number of MRI (11.4) and CT (15.6) devices per million people in Türkiye is below the OECD (MRI: 18.2; CT: 28.4) and EU (MRI: 17.5; CT: 26.1) averages, placing Türkiye 30th out of 41 countries. A similar trend is observed in mammography devices. However, the number of MRI (207) and CT (295) imaging procedures per 1,000 people is about twice the OECD and EU averages, placing Türkiye first among 41 countries in this metric. On the other hand, the number of physicians authorized to request examinations with medical imaging devices is 228 per 100,000 people in Türkiye, compared to 372 in OECD countries and 402 in EU countries—placing Türkiye last in this category (Republic of Türkiye Ministry of Health, 2024). Health statistics for the years 2013–2021 are largely consistent with the 2022 data. This indicates that medical imaging devices (MRI, CT, mammography) are used more intensively in Türkiye compared to OECD and EU countries. Existing studies in the literature also support this view (İlgün et al., 2021; Nak and Sağbaş, 2020; Yüksel, 2023).

Contemporary healthcare systems are increasingly struggling to meet rising service demands with limited resources. Health technologies play a critical role in this context; in particular, high-investment medical imaging devices have a direct impact on both the quality and cost of healthcare services. Although the number of medical imaging devices per one million people in Türkiye is lower than the OECD and EU country averages, the frequency of use per device is significantly higher. This indicates a notable imbalance in the healthcare system, suggesting that the limited number of devices leads to their intensive utilization in response to growing demand. However, whether this intensity translates into efficiency and effectiveness has not yet been comprehensively investigated. This gap necessitates an assessment of both the cost-effectiveness of device utilization within the healthcare system and the existence of regional disparities. In Türkiye, there is a scarcity of comprehensive analyses that measure the total factor productivity (TFP) of medical imaging devices and evaluate how this productivity has evolved over time. This study measures the productivity of medical imaging devices in 12 regions of Türkiye between 2013 and 2022 using the Malmquist Productivity Index and evaluates whether productivity differs significantly across regions and years using the Mann-Whitney U test. In the literature, there is a notable lack of long-term, region-based studies that combine the Malmquist index with statistical testing. In this respect, the study fills an empirical gap and offers an original contribution to policy-making by informing rational resource allocation, device investment planning, and efficiency-based management decisions. Based on health statistics from the past decade, the relatively intensive use of medical imaging devices in Türkiye compared to other countries forms the basis of the research question: Do the total factor productivity indicators of medical imaging devices in Türkiye differ by region and year over the past ten years?

In this context, the structure of the study is as follows: First, a literature review was conducted on efficiency analyses using the Malmquist efficiency index method in hospital services, non-communicable diseases, and primary health care. Then, the literature on data envelopment analyses performed on medical imaging devices without the Malmquist efficiency index method was reviewed. Subsequently, the methodological framework was outlined by explaining the research method, data collection tool, data analysis, and limitations. In the next section, the findings are presented in detail through analyses of secondary data obtained from the Ministry of Health's annual statistics, and the hypotheses developed in line with the research objective are tested. Finally, the findings obtained through national and international literature are discussed, and recommendations for policy and decision-makers and implications that may contribute to future studies are shared.

2. LITERATURE REVIEW

The literature review shows that the Malmquist Index and Data Envelopment Analysis (DEA) are widely used in the field of healthcare services.

Several studies have analyzed hospital efficiency using the Data Envelopment Analysis (DEA)-based Malmquist Productivity Index, with various input and output variables across different countries and time periods. For instance, in Ethiopia, Adugna et al. (2024) evaluated the efficiency of health facilities implementing performance-based financing (PBF) compared to those that did not, using three years of data (2019–2021). The output variables included the number of deliveries, antenatal care visits, fully vaccinated children, and outpatient visits, while the input variables were clinical personnel, non-clinical personnel, and allocated budget. In Norway, Lindaas et al. (2024) investigated the relationship between public and private hospital models and overall hospital performance over a nine-year period (2011–2019). Output variables included inpatient admissions through emergency services, elective inpatient care, day care treatments, and outpatient visits, while input variables were total operating costs and capital expenditures. In Serbia, Medarevic and Vukovic (2021) assessed productivity and the impact of environmental factors on hospital efficiency over five years (2015–2019). Outputs included the number of inpatients weighted by Diagnosis Related Group (DRG) coefficients and the number of outpatients, with inputs being the total number of beds, total number of non-physician healthcare staff, and total number of physicians. In China, Gong et al. (2024) analyzed the efficiency of medical and health resource allocation over a five-year period (2016–2020), using outputs such as the number of visits and hospital admissions per 10,000 population and bed utilization rate, while inputs included the number of beds, number of non-physician health workers, and number of physicians. Similarly, Li et al. (2021) measured technical efficiency over six years (2012–2017), with outputs including outpatient visits, inpatient admissions, and healthcare revenue, and inputs including total assets, active beds, and number of healthcare technical staff. Another study by Li et al. (2024) evaluated productivity dynamics over a decade (2010–2019) to inform evidence-based policy-making, using diagnostic examinations and discharged inpatients as outputs, and active beds, number of physicians, nurses, and other staff as inputs. Sun et al. (2023) analyzed how healthcare service efficiency evolved over thirteen years (2009–2021), with outputs such as number of consultations, bed occupancy rate, healthcare revenue, and mortality from infectious diseases, and inputs including number of health personnel, number of beds, and the share of health expenditure in GDP. Finally, Xu et al. (2024) conducted a 26-year analysis (1997–2022) to measure healthcare system efficiency, production technology heterogeneity, and productivity, using the number of treated patients and hospital admissions as outputs, and number of healthcare personnel, number of institutions, bed count, and public healthcare expenditures as inputs.

In the field of non-communicable diseases (NCDs), several studies have applied the DEA-Malmquist productivity model to assess the efficiency and productivity of health expenditures and systems. For instance, Arhin and Asante-Darko (2023) evaluated the efficiency and productivity of NCD-related spending in 34 Sub-Saharan African countries over a five-year period (2015–2019). The output variables included NCD-related mortality per 100,000 population, disability-adjusted life years (DALYs) due to NCDs per 100,000 population, and indicators of healthcare service coverage, financial protection, and equity in access to medical services for NCDs. Input variables comprised per capita NCD expenditure and the number of healthcare workers per 10,000 population. Similarly, Singh et al. (2021) investigated the productive efficiency of national health systems in the ASEAN region (Brunei, Cambodia, Indonesia, Laos, Malaysia, Myanmar, Philippines, Singapore, Thailand, and Vietnam) in the context of rising mortality rates from NCDs, as highlighted in the Sustainable Development Goals. This study covered a ten-year period (2007–2016), using output variables such as life expectancy at birth and NCD-related mortality rate, and input variables including per capita health expenditure, number of physicians, adult health literacy rate, per capita GDP, out-of-pocket health expenditure per capita, and the proportion of population living in rural areas.

Several studies have utilized the DEA-Malmquist productivity model to evaluate efficiency in the field of primary healthcare services. For example, Soares and Lopes (2024) assessed potential fluctuations in the total factor productivity of municipal primary healthcare services in Brazil over a five-year period (2015–2019). Output variables included the percentage of primary care coverage, vaccination coverage, primary care-related hospital admissions per 1,000 people, and the percentage of live births from mothers with at least seven antenatal visits. Input variables included the number of primary care physicians, nurses, and facilities per 100,000 population. In Greece, Trakakis et al. (2021) aimed to evaluate the primary healthcare system by analyzing data from health centers over a three-year period (2016–2018). The outputs included the number of nursing procedures, micro-surgeries, dental treatments, chronic disease cases, emergency and regular cases, referrals, transcriptions, bio-pathological and laboratory tests, as well as vaccinations for adults and for children/adolescents. Inputs consisted of the number of administrators, physicians,

nursing staff, and non-medical personnel. Huang et al. (2024) conducted a nine-year (2012–2020) study in China to evaluate the efficiency of primary healthcare services and analyze their spatial distribution. Output variables were the number of visits and admissions to primary healthcare institutions, while input variables included the number of healthcare facilities, health personnel, and available beds. Zeng et al. (2024) assessed the efficiency of primary healthcare systems in China over a ten-year period (2009–2018), aiming to identify and improve the factors affecting efficiency. Outputs included the number of outpatient and inpatient visits, the proportion of outpatient and inpatient services provided at primary care institutions, and per-visit costs for both outpatient and inpatient services. Inputs comprised the number of doctors, nurses, and available beds. In another Chinese study, Zhou et al. (2023) analyzed trends in primary healthcare efficiency over eleven years (2009–2019), examining urban-rural differences and related factors. Output variables included the number of outpatient and emergency visits, and the number of discharged patients, while inputs included the number of institutions, available beds, and health technicians.

In a study conducted in 11 sample cities of Henan Province, China, Data Envelopment Analysis (DEA) was applied to evaluate the equity and efficiency of magnetic resonance imaging (MRI) services, with the aim of providing evidence-based information to support provincial-level decision-making and to optimize the configuration and utilization of MRI services. The analysis used 2017 data, with output variables including the annual number of MRI patients and annual MRI revenue, and input variables including the number of healthcare personnel, number of MRI machines, and annual operating costs (Huang et al., 2023). A study conducted in Italy applied Data Envelopment Analysis (DEA) to assess the efficiency of radiology departments in public hospitals. The analysis used 2019 data from 47 public hospitals, with output variables including the number of MRI scans, radiographic scans, and CT scans, and input variables including the number of radiologists, radiologic technologists, nurses, MRI machines, radiography machines, and CT machines (Visintin et al., 2024). In a study comparing the efficiency of medical device utilization across 81 provinces in Türkiye, Data Envelopment Analysis (DEA) was applied using output variables such as the number of imaging procedures performed with MRI, CT, ultrasound (US), Doppler US, and echocardiography (ECHO) per 1,000 outpatient visits, and input variables such as the number of MRI, CT, US, Doppler US, and ECHO devices per 100,000 population (İlgün et al., 2022). Another study compared the efficiency of medical imaging devices in Turkish hospitals for the year 2021, using DEA with output variables including the annual number of imaging procedures performed, and input variables such as the number of physicians and imaging devices (Yüksel, 2023). Unlike other studies, these four studies employed DEA to analyze data from a single year, without applying the Malmquist productivity index. Additionally, another study investigating the efficiency of the regional distribution of medical imaging devices in Türkiye used data from Nomenclature of Territorial Units for Statistics (NUTS) Level 1 regions to compare the number of medical imaging devices and imaging procedures across regions (Nak and Sağbaş, 2020).

The literature review reveals that while numerous efficiency analyses using the DEA-Malmquist model have been conducted in the fields of hospital services, non-communicable diseases (NCDs), and primary healthcare services, studies focusing on medical imaging devices (such as MRI, CT, etc.) have primarily employed input-oriented Data Envelopment Analysis (DEA) based on single-year data, rather than the Malmquist productivity approach. To date, no study—neither in Türkiye nor internationally—has been identified that evaluates the total factor productivity of medical imaging devices using the Malmquist Productivity Index. In this respect, the present study aims to fill a significant gap in the national literature. Specifically, it seeks to conduct such an analysis using data from the past decade in Türkiye.

3. METHOD

Data Envelopment Analysis (DEA) is a mathematical method commonly used to evaluate the efficiency of homogeneous Decision-Making Units (DMUs), initially developed by A. Charnes and colleagues under the assumption of constant returns to scale (CRS). It was later expanded by Banker and colleagues to incorporate variable returns to scale (VRS) (Xu et al., 2024).

Although DEA models utilize cross-sectional or time-series data, they are limited in capturing dynamic shifts in the efficiency of decision-making units (DMUs). The Malmquist Productivity Index addresses this limitation by enabling year-to-year assessments of changes in total factor productivity (TFP) through frontier analysis. Used in conjunction with DEA, the Malmquist Index facilitates both a static evaluation of efficiency in individual years and a dynamic analysis of productivity trends over time, offering a more comprehensive insight into performance changes (Zhou et al., 2023).

The Malmquist index measures the direction (increase/decrease) and magnitude of productivity change by comparing the performance of decision-making units across different time periods (Färe et al., 1994). In this respect, it is a dynamic rather than a static analytical tool. The Malmquist Productivity Index decomposes changes in total factor productivity into two main components: efficiency change and

technological change. Efficiency change reflects how close a decision-making unit is to the production frontier, while technological change indicates whether the frontier itself has shifted over time, thereby capturing technological progress. This decomposition allows for a detailed understanding of whether productivity change is driven by improvements in efficiency or by technological advancements (Coelli et al., 2005). The Malmquist method is particularly suitable for systems with multiple inputs and outputs, such as healthcare services, and is widely used in such contexts (Hollingsworth, 2008).

Malmquist productivity indices are essential for tracking efficiency changes over time, relying on the assumption of a production function that accurately reflects the prevailing technological context. DEA models are instrumental in identifying the position of this production frontier (Xu et al., 2024).

$$M_0 = \frac{D_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})}{D_0^t(x_0^t, y_0^t)} * \sqrt{\frac{D_0^t(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})}{D_0^t(x_0^t, y_0^t)}} * \sqrt{\frac{D_0^{t+1}(x_0^t, y_0^t)}{D_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})}} \quad (1)$$

In Equation 1, x_0^t , x_0^{t+1} represent the inputs in the t region in periods t and $t+1$, respectively; y_0^t , y_0^{t+1} represent the outputs in the t region in periods t and $t+1$, respectively (Zhou et al., 2023).

$D_0^t(x_0^t, y_0^t)$ shows the technical efficiency of the DMU for period t , while $D_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})$ shows the technical efficiency of the DMU for period $t+1$. $D_0^t(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})$ and $D_0^{t+1}(x_0^t, y_0^t)$ express the dynamic change in technical efficiency from time t to time $t+1$. It is calculated by replacing the data (input-output) of the DMU in period t with the data (input-output) in period $t+1$ (Xu et al., 2024).

In other words, $D_0^t(x_0^t, y_0^t)$ and $D_0^t(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})$ represent the distance functions in the t period and $t+1$ period, respectively. If the calculated TFPCH index takes the value >1 , it is thought that TFPCH increases from t to $t+1$ period; if it is <1 , it is thought that TFPCH decreases during the same period (Zhou et al., 2023).

3.1. Data Collection Tool

The primary data source for this study is the Health Statistics Yearbook published annually by the Ministry of Health. The Decision-Making Units (DMUs) in the analysis were defined as 12 regional groups based on The Nomenclature of Territorial Units for Statistics (NUTS) Level 1 classification: West Marmara, Istanbul, East Marmara, Aegean, Mediterranean, West Anatolia, Central Anatolia, West Black Sea, East Black Sea, Northeast Anatolia, Central East Anatolia, and Southeast Anatolia. The main objective of this study is to analyze the total factor productivity (TFP) of medical imaging devices in these 12 regions of Türkiye between 2013 and 2022 using the Malmquist Productivity Index, and to determine whether there are statistically significant differences in TFP indicators by region and year. The research hypotheses developed in line with the study's objective are as follows:

H1.1: There is a statistically significant difference in the average total factor productivity of medical imaging devices between high-productivity and low-productivity regions in Türkiye.

H1.2: There is a statistically significant difference in the average total factor productivity of medical imaging devices between high-productivity and low-productivity years in Türkiye.

To test the developed research hypotheses, this study utilized secondary data. The secondary data obtained from the Annual Statistics of the Ministry of Health include a wide range of parameters, such as the number of medical imaging devices (MRI, CT, mammography, ultrasonography, Doppler, and echocardiography), the number of procedures performed by these devices, and the total number of physicians, dentists, and nurses. In this study, the selection of appropriate input and output variables is of critical importance for the analysis of the efficiency of medical imaging devices.

A review of the existing literature shows that input variables in such analyses typically include the number of relevant medical imaging devices and the number of healthcare professionals operating these devices (e.g., physicians, radiologists, and technicians), while the output variable is generally the total number of imaging procedures performed. This approach provides a meaningful foundation for quantitatively representing healthcare service production processes and enables the measurement of efficiency levels based on output per unit (Huang et al., 2023; Ilgün et al., 2022; Visintin et al., 2024; Yüksel, 2023).

Based on this information from the literature, for the DEA-Malmquist productivity index analysis, the output variable was defined as the number of imaging procedures per 1,000 outpatient visits, while the input variables were defined as the number of physicians per 100,000 population and the number of medical imaging devices per 1,000,000 population. However, it is considered necessary that there be a statistically significant relationship—at the 5% significance level within a 95% confidence interval—between the input and output variables used in the Malmquist productivity index, which is a non-parametric analysis. The Spearman's rho correlation coefficients, which assess the correlation between non-parametric variables, are presented in Table 1.

Table 1. Spearman's Rho correlation coefficients between variables

<i>Device Type</i>	<i>Significant Correlation Between Device Count and Imaging Volume</i>	<i>Significant Correlation Between Physician Count and Imaging Volume</i>
MRI	r=0.498*	r=0.615*
CT	r=0.283*	r=0.464*
USG	r=-0.092	r=-0.466*
Doppler USG	r=0.675*	r=0.448*
ECHO	r=0.474*	r=0.381*
Mammography	r=0.756*	r=0.611*

Note: * means correlation is significant at the 0.01 level

The SPSS 21.0 package program used in the study calculated the relationship coefficients between the variables. When Table 1 was examined, it was seen that there was no statistically significant relationship only between the number of ultrasound (USG) devices per 1,000,000 people and the number of ultrasound (USG) imaging requested for every 1,000 examinations (p:0.319). It was seen that there was a statistically significant relationship between the other variables at a significance level of 1% and a confidence interval of 99% (p<0.002). While the variables with a statistically significant relationship between the variables were used within the scope of inputs and outputs in the Malmquist efficiency index, the variables with no statistically significant relationship between the variables were excluded from the relevant analysis. Therefore, the inputs and outputs to be used in the Malmquist efficiency index are shown in Table 2.

Table 2. Inputs and outputs for the Malmquist Productivity Index – DEA model

<i>Device</i>	<i>Input</i>	<i>Output</i>
MRI	MRI devices, Physicians	MRI scans
CT	CT devices, Physicians	CT scans
Doppler USG	Doppler USG devices, Physicians	Doppler USG scans
ECHO	ECHO devices, Physicians	ECHO scans
Mammography	Mammography devices, Physicians	Mammography scans

3.2. Data Analysis

The Malmquist Productivity Index evaluates changes in technical efficiency by calculating technological progress and productivity change over time. The model shows the dynamic trend in total factor productivity change (TFPCH) by comparing outputs across different time periods for Decision-Making Units (DMUs). In Equation 2, technical efficiency (EFFCH) itself consists of pure technical efficiency (PECH) and scale efficiency (SECH). In Equation 3, the TFPCH in this model is composed of technical efficiency change (EFFCH) and technological change (TECHCH) (Gong et al., 2024; Zhou et al., 2023). The relationships among the components are as follows:

$$EFFCH = PECH \times SECH \quad (2)$$

$$TFPCH = EFFCH \times TECHCH \quad (3)$$

If any of these productivity changes are greater than 1, this indicates positive growth or improvement. A value equal to 1 indicates stagnation or no change, while a value less than 1 shows decline or deterioration in productivity.

DEA was first introduced by Charnes et al., (1978) influenced by Farrell (1957), under the assumption of constant returns to scale (CRS) (Charnes et al., 1978; Farrell, 1957). In this model, it is assumed that if a DMU increases its inputs proportionally, the increase in outputs will be at the same rate. Later, Banker et al. developed the variable returns to scale (VRS) model, which allows for output increases to be either more or less than the input increases, thus capturing increasing or decreasing returns to scale (Banker et al., 1984). The CRS model reflects total efficiency resulting from both scale efficiency and pure technical efficiency due to administrative performance. On the other hand, the VRS model represents only pure technical efficiency, excluding the scale component. The productivity scores obtained in DEA depend on whether the CRS or VRS model is adopted. Another factor influencing DEA productivity scores is whether the analysis is input-oriented or output-oriented. In other words, the criteria for DEA to be considered efficient or inefficient include whether it is input-oriented or output-oriented. If a DMU can increase its outputs without increasing any inputs, it is considered output-oriented. If a DMU can reduce its inputs without reducing any outputs, it is considered input-oriented (Charnes et al., 1981).

For this study, the input-oriented CRS model was selected. The choice of an input-oriented approach is based on the fact that most DEA studies in healthcare use input-oriented models, since management in healthcare generally has more control over inputs than outputs (Chern and Wan, 2000; İlgün et al., 2022;

Ozcan, 2008). The CRS model was preferred because it allows for comparing regions (based on NUTS Level 1) not only in terms of size but also in terms of pure technical efficiency due to managerial performance.

Microsoft Office, SPSS 21.0, and DEAP 2.1 software were used for data entry and analysis. The number of medical imaging devices, the number of scans performed by these devices, and the total number of physicians in Türkiye from 2013 to 2022 (as published in the Health Statistics Yearbooks) were compiled in Microsoft Excel. Then, the input-oriented CRS model in the DEAP software was used to calculate the total factor productivity of medical imaging devices using the Malmquist Productivity Index. Descriptive findings and correlation coefficients between variables were calculated using SPSS 21.0. The Mann-Whitney U test was used to determine whether there were statistically significant differences in the average TFP values of medical imaging devices across different regions and years in Türkiye.

3.3. Limitations

The Malmquist Productivity Index method used in this study is a powerful tool for analyzing changes in productivity over time; however, it has certain limitations. One of the primary constraints is its inability to distinguish the source of technological progress. In other words, it cannot determine whether the observed technological change coefficient stems from internal innovation or external factors. This may introduce ambiguity in the interpretation of the results.

Furthermore, the data used in this study were entirely derived from secondary sources. The data were obtained from publicly available official statistics (Ministry of Health), and their accuracy and completeness could not be independently verified by the researcher. This may introduce implicit measurement errors in the outputs analyzed (e.g., number of imaging procedures) and the input variables (e.g., number of devices, number of healthcare personnel).

The study relied solely on quantitative outputs (e.g., total number of imaging procedures). However, using only volume-based outputs in efficiency analyses may not adequately reflect service quality. Indicators related to quality—such as the effectiveness of device usage, diagnostic accuracy, or repeat scan rates—were excluded from the analysis. As such, the findings reflect only the productivity dimension and do not encompass clinical effectiveness or patient outcomes.

In addition, there are notable disparities among regions in Türkiye regarding healthcare infrastructure, distribution of specialist personnel, and access to services. Structural inequalities observed between metropolitan and rural areas may result in some regions having a relative advantage. These external disparities could introduce bias into regional comparisons within the model.

The impact of the COVID-19 pandemic on the delivery of healthcare services is briefly addressed in the findings section. Data from the pandemic period may deviate from typical productivity trends. Although this effect is briefly acknowledged, its influence on the analysis has not been examined in detail, which may limit the temporal validity of the results.

Finally, the input and output variables used in the study were selected in accordance with established practices in the literature. Despite this, all of the aforementioned limitations suggest that the findings should be interpreted within specific contextual boundaries. Caution should be exercised when generalizing the results, and these constraints should be carefully considered in their interpretation.

4. RESULTS

Descriptive findings related to medical imaging devices and the total number of physicians for 12 regions (as defined by NUTS-1) from 2013 to 2022, as published in the Ministry of Health's Health Statistics Yearbooks, are presented in Table 3.

Table 3. Descriptive statistics for medical imaging devices

<i>Variables</i>	<i>n</i>	<i>Mean</i>	<i>SD</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
MRI devices	120	10.41	1.51	7.50	13.80
MRI scans	120	30.20	5.20	20.70	46.50
CT devices	120	14.54	1.87	11.00	18.20
CT scans	120	40.78	12.99	20.50	77.90
Doppler USG devices	120	61.44	19.77	27.20	126.40
Doppler USG scans	120	32.44	10.19	10.90	60.20
ECHO devices	120	28.13	6.28	13.60	46.50
ECHO scans	120	17.23	1.95	12.30	21.60
Mammography devices	120	11.12	2.09	6.90	14.90
Mammography scans	120	4.23	1.62	1.20	7.40
Total number of physicians	120	184.14	41.39	121.00	346.00

As shown in Table 3, when examining the average number of devices per 1,000,000 population, Doppler ultrasound devices were found to be the most prevalent, while MRI machines were the least common. This finding is thought to be related to the cost differences among the devices. Similarly, when evaluating the average number of imaging procedures requested per 1,000 outpatient visits, CT scans had the highest frequency, whereas mammography had the lowest. The relatively low number of mammography procedures—despite their critical role in the early detection of breast cancer in women—highlights an important issue for policymakers in the context of preventive healthcare services.

Table 4. Malmquist Productivity Index indicators for MRI devices by region and year (2013–2022)

<i>Region / Year</i>	<i>pech</i>	<i>sech</i>	<i>Effch</i>	<i>techch</i>	<i>tfpch</i>
West Marmara	1.005	1.000	1.005	1.035	1.040
Istanbul	0.991	0.990	0.981	1.040	1.021
East Marmara	1.013	0.992	1.005	1.033	1.039
Aegean	1.025	0.977	1.001	1.034	1.035
Mediterranean	1.006	0.987	0.993	1.034	1.027
West Anatolia	1.006	0.993	0.999	1.025	1.024
Central Anatolia	1.018	0.995	1.013	1.035	1.048
West Black Sea	1.016	0.974	0.990	1.035	1.025
East Black Sea	0.997	0.984	0.982	1.040	1.021
Northeast Anatolia	1.000	1.000	1.000	1.035	1.035
Central East Anatolia	0.990	0.979	0.969	1.027	0.996
Southeast Anatolia	1.000	0.966	0.966	1.035	1.000
Average	1.006	0.986	0.992	1.034	1.026
Türkiye 2013-2014	1.006	0.975	0.981	1.094	1.073
Türkiye 2014-2015	1.037	0.947	0.982	1.038	1.019
Türkiye 2015-2016	1.003	1.075	1.079	0.937	1.011
Türkiye 2016-2017	1.029	1.001	1.031	1.012	1.043
Türkiye 2017-2018	1.007	1.041	1.048	0.975	1.022
Türkiye 2018-2019	1.046	0.997	1.043	0.985	1.027
Türkiye 2019-2020	0.991	0.982	0.973	1.094	1.065
Türkiye 2020-2021	0.960	0.986	0.946	1.087	1.029
Türkiye 2021-2022	0.975	0.884	0.862	1.099	0.947

Table 4 presents the average MR device values and annual Malmquist index changes for 12 NUTS regions in Türkiye from 2013 to 2022. According to Table 4; across Türkiye between 2013 and 2022, the average technical efficiency (EFFCH) for MRI devices—comprised of pure efficiency (PECH) and scale efficiency (SECH)—was 0.992, indicating 0.8% inefficiency. When technical efficiency is considered alongside technological change (TECHCH), the region with the lowest total factor productivity (TFPCH) is Central East Anatolia (0.996), indicating a 0.4% productivity loss. The region with the highest TFPCH is Central Anatolia (1.048), reflecting a 4.8% productivity increase. Although the Eastern Anatolia region exhibited a high level of technological progress (techch: 1.027), the overall change in total factor productivity remained low, which can be attributed to a decrease in technical efficiency (effch: 0.969). This may be explained by the fact that physicians in this region request fewer MRI scans compared to those in other regions, or that the number of physicians per 100,000 population is lower in this region than in others. The year with the lowest productivity is 2022 compared to 2021 (TFPCH: 0.947), while the year with the highest productivity is 2014 compared to 2013 (TFPCH: 1.073). The decrease in physicians' MRI scan requests in 2022 compared to the previous year can be attributed to the post-COVID-19 normalization process, which led to a reduction in MRI diagnostic requests. On average, the 12 regions had a 2.6% increase in productivity (mean TFPCH: 1.026). Only one region and one year had a TFPCH value below 1, indicating a decline, while the others had stable or improved productivity.

Table 5 presents the average CT device values for the 12 NUTS regions from 2013 to 2022, along with Türkiye's annual Malmquist productivity changes. According to Table 5; between 2013 and 2022, the technical efficiency (effch) of CT devices in Türkiye—comprising pure efficiency (pech) and scale efficiency (sech)—increased annually by an average of 2.1% (1.021). When combined with technological change (techch), total factor productivity (tfpch) was lowest in Southeastern Anatolia (0.999) and highest in the Aegean Region (1.076). Although the Southeastern Anatolia region exhibited a high level of technological progress (techch: 1.013), the low change in total factor productivity can be attributed to a decrease in technical efficiency (effch: 0.987). This may be explained by physicians in this region requesting fewer CT scans compared to those in other regions, or by a lower number of physicians per 100,000 population in this region relative to others. At the yearly level, the sharpest decline occurred in 2022 (0.817), while the most significant increase was in 2020 (1.720). The excessive use of CT scans—considered the gold standard

test for diagnosing COVID-19—in 2020, the year the pandemic began, can explain the high efficiency level of 72% observed for CT devices in that year. The decrease in physicians' CT scan requests in 2022 compared to the previous year can be attributed to the post-COVID-19 normalization process, which led to a reduction in CT diagnostic requests. On average, the *tfpch* across the 12 NUTS regions was 1.044. While 11 regions and 7 years recorded productivity scores of 1 or above, one region and two years fell below this threshold.

Table 5. Malmquist Productivity Index indicators for CT devices by region and year (2013–2022)

<i>Region / Year</i>	<i>pech</i>	<i>sech</i>	<i>Effch</i>	<i>techch</i>	<i>tfpch</i>
West Marmara	1.011	1.046	1.058	1.011	1.070
Istanbul	0.985	1.023	1.007	1.034	1.041
East Marmara	1.000	1.019	1.019	1.033	1.053
Aegean	1.031	1.009	1.040	1.035	1.076
Mediterranean	1.014	1.010	1.025	1.012	1.037
West Anatolia	1.008	1.014	1.022	1.035	1.058
Central Anatolia	1.003	1.022	1.025	1.032	1.058
West Black Sea	1.022	1.012	1.035	1.022	1.058
East Black Sea	1.017	1.012	1.028	1.024	1.053
Northeast Anatolia	0.995	1.006	1.001	1.011	1.012
Central East Anatolia	1.001	1.000	1.001	1.018	1.018
Southeast Anatolia	1.000	0.987	0.987	1.013	0.999
Average	1.007	1.013	1.021	1.023	1.044
Türkiye 2013-2014	1.008	1.016	1.025	1.073	1.100
Türkiye 2014-2015	1.026	1.065	1.093	0.938	1.025
Türkiye 2015-2016	0.998	1.019	1.017	0.994	1.011
Türkiye 2016-2017	1.027	1.029	1.056	0.992	1.048
Türkiye 2017-2018	0.990	0.985	0.976	1.061	1.035
Türkiye 2018-2019	1.014	1.015	1.030	0.974	1.003
Türkiye 2019-2020	0.965	1.018	0.982	1.752	1.720
Türkiye 2020-2021	1.017	0.940	0.956	0.887	0.848
Türkiye 2021-2022	1.022	1.036	1.059	0.771	0.817

Table 6. Malmquist Productivity Index Indicators for Doppler USG devices by region and year (2013–2022)

<i>Region / Year</i>	<i>pech</i>	<i>sech</i>	<i>effch</i>	<i>techch</i>	<i>tfpch</i>
West Marmara	1.019	1.066	1.086	0.981	1.066
Istanbul	1.038	0.985	1.022	0.996	1.019
East Marmara	1.009	0.998	1.007	0.974	0.981
Aegean	1.016	1.029	1.045	0.954	0.996
Mediterranean	1.007	1.016	1.023	0.976	0.998
West Anatolia	1.059	1.012	1.071	0.964	1.032
Central Anatolia	0.993	1.068	1.061	1.011	1.072
West Black Sea	0.986	1.017	1.003	0.968	0.971
East Black Sea	1.014	1.047	1.062	0.991	1.052
Northeast Anatolia	0.979	1.031	1.010	0.999	1.009
Central East Anatolia	1.000	0.997	0.997	0.978	0.975
Southeast Anatolia	1.000	1.002	1.002	0.980	0.982
Average	1.010	1.022	1.032	0.981	1.012
Türkiye 2013-2014	0.976	1.087	1.061	0.976	1.036
Türkiye 2014-2015	1.033	1.009	1.042	0.926	0.965
Türkiye 2015-2016	0.964	1.054	1.016	1.073	1.090
Türkiye 2016-2017	0.999	1.030	1.029	1.095	1.127
Türkiye 2017-2018	1.029	0.999	1.028	0.937	0.964
Türkiye 2018-2019	1.093	1.039	1.136	1.033	1.174
Türkiye 2019-2020	0.908	0.946	0.859	1.132	0.973
Türkiye 2020-2021	1.063	0.999	1.063	0.842	0.895
Türkiye 2021-2022	1.033	1.042	1.076	0.857	0.923

Table 6 presents the average doppler ultrasound (USG) device values for the 12 NUTS regions from 2013 to 2022, along with Türkiye's annual Malmquist productivity changes. According to Table 6; between 2013 and 2022, the technical efficiency (*effch*) of doppler USG devices in Türkiye, derived from pure efficiency (*pech*) and scale efficiency (*sech*), showed an average annual improvement of 3.2% (1.032). When combined with

technological change (techch), the lowest total factor productivity (tfpch) was observed in the Western Black Sea Region (0.971), while the highest was in Central Anatolia (1.072). Although the Western Black Sea region exhibited a high level of technical efficiency (effch: 1.003), the low change in total factor productivity can be attributed to a decline in technological progress (techch: 0.968). This may be explained by the Doppler ultrasonography devices in this region being of lower technological quality compared to those in other regions, or by the number of Doppler ultrasonography devices per 1,000,000 population being lower than in other regions. The sharpest annual decline occurred in 2021 compared to 2020 (0.895), and the greatest increase was recorded in 2019 relative to 2018 (1.174). The decrease in physicians' Doppler ultrasonography (USG) requests in 2021 compared to the previous year can be attributed to the postponement of elective procedures during the COVID-19 pandemic, as healthcare services primarily focused on the diagnosis and treatment of coronavirus cases, leading to a decline in Doppler USG diagnostic requests. On average, the tfpch index across the 12 NUTS regions was 1.012, indicating a 1.2% productivity gain. Six regions and five years recorded tfpch values below 1, whereas the remaining six regions and four years achieved scores equal to or above 1.

Table 7. Malmquist Productivity Index indicators for ECHO devices by region and year (2013–2022)

<i>Region / Year</i>	<i>pech</i>	<i>sech</i>	<i>effch</i>	<i>techch</i>	<i>tfpch</i>
West Marmara	0.996	1.004	1.000	0.973	0.973
Istanbul	0.987	1.013	1.000	0.977	0.977
East Marmara	0.996	1.013	1.010	0.984	0.993
Aegean	1.033	0.978	1.011	0.953	0.963
Mediterranean	1.000	0.996	0.996	0.974	0.971
West Anatolia	0.987	1.035	1.021	0.953	0.973
Central Anatolia	1.011	1.001	1.012	0.975	0.986
West Black Sea	1.012	0.988	1.000	0.980	0.980
East Black Sea	1.008	1.000	1.008	0.992	1.000
Northeast Anatolia	0.977	0.992	0.969	0.973	0.943
Central East Anatolia	0.986	1.000	0.986	0.970	0.957
Southeast Anatolia	1.000	1.000	1.000	0.973	0.973
Average	0.999	1.001	1.001	0.973	0.974
Türkiye 2013-2014	1.003	0.984	0.987	1.051	1.037
Türkiye 2014-2015	1.046	1.046	1.094	0.892	0.976
Türkiye 2015-2016	0.971	1.009	0.980	0.974	0.954
Türkiye 2016-2017	0.949	1.011	0.960	1.072	1.029
Türkiye 2017-2018	1.017	1.018	1.034	0.954	0.987
Türkiye 2018-2019	1.071	0.990	1.061	0.926	0.982
Türkiye 2019-2020	1.028	0.995	1.023	0.875	0.895
Türkiye 2020-2021	0.970	0.989	0.959	1.039	0.996
Türkiye 2021-2022	0.948	0.974	0.923	0.994	0.917

Table 7 presents the average echocardiography (ECHO) device values for the 12 NUTS regions from 2013 to 2022, along with Türkiye's annual Malmquist productivity changes. According to Table 7; from 2013 to 2022, the technical efficiency (effch) of ECHO devices in Türkiye, comprising pure technical efficiency (pech) and scale efficiency (sech), increased marginally by 0.1% (1.001) on average. When combined with technological change (techch), total factor productivity (tfpch) was lowest in Northeastern Anatolia (0.943) and highest in the Eastern Black Sea Region (1.000), indicating stable productivity. Considering that all 12 regions in the NUTS (Nomenclature of Territorial Units for Statistics) classification exhibited low levels of technological progress (techch < 1.000), the low total factor productivity change observed in the Northeastern Anatolia region can be attributed to a decline in technical efficiency (effch: 0.969). This may be explained by the lower number of echocardiography (ECHO) requests made by physicians in this region compared to those in other regions, or by the lower number of physicians per 100,000 population in this region relative to others. The sharpest annual decline occurred in 2020 compared to 2019 (0.895), while the highest increase was in 2014 relative to 2013 (1.037). The decrease in physicians' echocardiography (ECHO) requests in 2020 compared to the previous year can be attributed to the postponement of elective procedures during the COVID-19 pandemic, as healthcare services focused primarily on the diagnosis and treatment of coronavirus cases, leading to a reduction in ECHO diagnostic requests. On average, the tfpch across 12 NUTS regions indicated a 2.6% decline (0.974). Among the regions, 11 recorded tfpch values below 1, and only one showed no change (1.000). Similarly, 7 of the 9 years observed had tfpch values below 1, while only 2 years showed productivity stability or growth.

Table 8 presents the average mammography device values for the 12 NUTS regions from 2013 to 2022, along with Türkiye's annual Malmquist productivity changes. According to Table 8; between 2013 and 2022, the technical efficiency (effch) of mammography devices in Türkiye—comprising pure efficiency (pech) and scale efficiency (sech)—remained stable at 1.000. When combined with technological change (techch), total factor

productivity (tfpch) was lowest in the Mediterranean Region (0.943) and highest in Western Anatolia (0.999), though still below the baseline. Considering that all 12 regions exhibited low levels of technological progress (techch < 1.000), the low total factor productivity change in the Mediterranean region can be attributed to a decline in technical efficiency (effch: 0.982). This may be due to the mammography devices in this region being of lower technological quality compared to those in other regions, or to a lower number of mammography devices per 1,000,000 population in the region. The greatest decline occurred in 2015 compared to 2014 (0.717), while the highest improvement was observed in 2021 relative to 2020 (1.192). All 12 NUTS regions recorded tfpch values below 1, indicating a general decline. Across the 9-year period, 5 years showed values below 1, and 4 years had tfpch values equal to or above 1. On average, total factor productivity declined by 3.3% (0.967) across all regions.

Table 8. Malmquist Productivity Index indicators for mammography devices by region and year (2013–2022)

<i>Region / Year</i>	<i>pech</i>	<i>sech</i>	<i>effch</i>	<i>techch</i>	<i>tfpch</i>
West Marmara	0.998	1.005	1.003	0.961	0.964
Istanbul	1.000	1.001	1.001	0.971	0.972
East Marmara	1.000	1.000	1.000	0.966	0.966
Aegean	1.000	1.009	1.009	0.967	0.976
Mediterranean	0.993	0.988	0.982	0.960	0.943
West Anatolia	1.000	1.017	1.017	0.982	0.999
Central Anatolia	0.993	0.971	0.964	0.979	0.944
West Black Sea	1.005	1.014	1.018	0.960	0.977
East Black Sea	0.999	1.010	1.009	0.957	0.966
Northeast Anatolia	1.000	0.970	0.970	0.977	0.948
Central East Anatolia	1.005	1.023	1.028	0.970	0.997
Southeast Anatolia	1.000	0.998	0.998	0.961	0.959
Average	0.999	1.000	1.000	0.968	0.967
Türkiye 2013-2014	0.963	0.956	0.920	1.140	1.049
Türkiye 2014-2015	1.048	1.069	1.121	0.729	0.817
Türkiye 2015-2016	0.975	0.984	0.960	0.933	0.895
Türkiye 2016-2017	0.972	0.912	0.887	1.092	0.968
Türkiye 2017-2018	1.009	0.990	0.999	0.958	0.956
Türkiye 2018-2019	1.019	0.992	1.011	0.991	1.002
Türkiye 2019-2020	1.010	1.104	1.116	0.751	0.838
Türkiye 2020-2021	0.990	0.942	0.933	1.279	1.192
Türkiye 2021-2022	1.011	1.071	1.082	0.964	1.043

Table 9. Total Factor Productivity (tfpch) indicators of medical imaging devices by region and year

<i>Region / Year</i>	<i>CT</i>	<i>MR</i>	<i>Doppler USG</i>	<i>ECHO</i>	<i>Mammography</i>	<i>Avr.</i>
West Marmara	1.070	1.040	1.066	0.973	0.964	1.023
Central Anatolia	1.058	1.048	1.072	0.986	0.944	1.022
East Black Sea	1.053	1.021	1.052	1.000	0.966	1.018
West Anatolia	1.058	1.024	1.032	0.973	0.999	1.017
Aegean	1.076	1.035	0.996	0.963	0.976	1.009
Istanbul	1.041	1.021	1.019	0.977	0.972	1.006
East Marmara	1.053	1.039	0.981	0.993	0.966	1.006
East Black Sea	1.058	1.025	0.971	0.980	0.977	1.002
Mediterranean	1.037	1.027	0.998	0.971	0.943	0.995
Northeast Anatolia	1.012	1.035	1.009	0.943	0.948	0.989
Central East Anatolia	1.018	0.996	0.975	0.957	0.997	0.989
Southeast Anatolia	0.999	1.000	0.982	0.973	0.959	0.983
Average	1.044	1.026	1.012	0.974	0.967	1.005
Türkiye 2019-2020	1.720	1.065	0.973	0.895	0.838	1.098
Türkiye 2013-2014	1.100	1.073	1.036	1.037	1.049	1.059
Türkiye 2016-2017	1.048	1.043	1.127	1.029	0.968	1.043
Türkiye 2018-2019	1.003	1.027	1.174	0.982	1.002	1.038
Türkiye 2017-2018	1.035	1.022	0.964	0.987	0.956	0.993
Türkiye 2015-2016	1.011	1.011	1.090	0.954	0.895	0.992
Türkiye 2020-2021	0.848	1.029	0.895	0.996	1.192	0.992
Türkiye 2014-2015	1.025	1.019	0.965	0.976	0.817	0.960
Türkiye 2021-2022	0.817	0.947	0.923	0.917	1.043	0.929

Table 9 presents the total factor productivity (tfpch) indicators based on the average values for 12 NUTS regions and annual changes for Türkiye between 2013 and 2022. According to Table 9; Between 2013 and 2022, the average annual total factor productivity (tfpch) values of medical imaging devices across Türkiye and its NUTS regions, ranked from highest to lowest, were as follows: CT (4.4% productivity gain; 1.044), MRI (2.6% gain; 1.026), Doppler USG (1.2% gain; 1.012), ECHO (2.6% productivity decline; 0.974), and mammography (3.3% decline; 0.967). The 3.3% productivity decline observed in mammography devices—critical for early detection of breast cancer in women—along with the 2.6% decline in ECHO devices—vital for diagnosing and monitoring heart conditions and early detection of heart attacks—warrants the attention of policymakers and decision-makers.

Due to the insufficient sample size ($n < 30$) to test the research hypotheses, the non-parametric Mann-Whitney U test was employed to compare regions and years based on the total factor productivity (tfpch) averages of medical imaging devices categorized as low (tfpch < 1) and high (tfpch > 1).

Table 10. Findings on the comparative analysis of total factor productivity of medical imaging devices in Türkiye's nuts regions

12 NUTS regions in Türkiye		<i>n</i>	Mean Rank	Sum of Ranks	<i>Z</i>	<i>p</i>
MRI device	Low**	1	1.0	1.0	-1.599	0.110
	High***	11	7.0	77.0		
CT device	Low**	1	1.0	1.0	-1.607	0.108
	High***	11	7.0	77.0		
Doppler USG device	Low**	6	3.5	21.0	-2.882	0.004*
	High***	6	9.5	57.0		
ECHO device	Low**	11	6.0	66.0	-1.605	0.109
	High***	1	12.0	12.0		
Mammography device	Low**	12	6.5	78.0	null	null
	High***	0	0.0	0.0		
The average of medical imaging devices	Low**	4	2.5	10	-2.717	0.007*
	High***	8	8.5	68		

Note: *, $p < 0.05$; **, tfpch < 1; ***, tfpch > 1

According to Table 10, no comparison could be made for mammography devices, as their total factor productivity (tfpch) values were below 1 in all 12 NUTS regions. For MRI, CT, and ECHO devices, no statistically significant difference was found between regions with high and low tfpch values ($p > 0.05$). In contrast, a statistically significant difference was observed for Doppler USG devices based on tfpch performance ($p = 0.004$). Similarly, a significant difference was found in the average total factor productivity of medical imaging devices across the 12 regions depending on whether tfpch was below or above 1 ($p = 0.007$). Thus, the research hypothesis (H1.1) was accepted. According to Table 9, the regions with average tfpch values above 1 for medical imaging devices were West Marmara, Central Anatolia, Eastern Black Sea, West Anatolia, Aegean, Istanbul, East Marmara, and West Black Sea. On the other hand, the Mediterranean, Northeastern Anatolia, Central Eastern Anatolia, and Southeastern Anatolia regions showed average tfpch values below 1. The consistently low productivity levels (tfpch < 1) of medical imaging devices in Türkiye's southern and eastern regions warrant the attention of professional healthcare managers.

Table 11. Comparative findings on the total factor productivity of medical imaging devices in Türkiye (2014–2022)

The period 2014–2022 in Türkiye		<i>n</i>	Mean Rank	Sum of Ranks	<i>Z</i>	<i>p</i>
MRI device	Low**	1	1.0	1,0	-1,549	0,121
	High***	8	5.5	44,0		
CT device	Low**	2	1.5	3,0	-2,049	0,040*
	High***	7	6.0	42,0		
Doppler USG device	Low**	5	3.0	15,0	-2,449	0,014*
	High***	4	7.5	30,0		
ECHO device	Low**	7	4.0	28,0	-2,049	0,040*
	High***	2	8.5	17,0		
Mammography device	Low**	5	3.0	15,0	-2,449	0,014*
	High***	4	7.5	30,0		
The average of medical imaging devices	Low**	5	3.0	15	-2,449	0,014*
	High***	4	7.5	30		

Note: *, $p < 0.05$; **, tfpch < 1; ***, tfpch > 1

According to Table 11, no statistically significant difference was found in the total factor productivity (TFP) of MRI devices in Türkiye between years with high and low productivity levels from 2014 to 2022 ($p > 0.05$). In contrast, statistically significant differences were observed for CT, Doppler USG, ECHO, and mammography devices based on whether their TFP values were above or below 1 ($p < 0.05$). A significant difference was also found between years with high and low average TFP values of all medical imaging devices in Türkiye ($p = 0.014$). Therefore, the research hypothesis (H1.2) was accepted. Based on Table 9, the years in which the average TFP of medical imaging devices exceeded 1 were 2014, 2017, 2019, and 2020, whereas 2015, 2016, 2018, 2021, and 2022 were characterized by TFP values below 1. The fluctuation in productivity—initially high, followed by a period of decline—suggests a lack of consistent performance, which merits the attention of policymakers and decision-makers. Notably, in 2020, the onset of the COVID-19 pandemic, the CT device was widely used as the gold standard diagnostic tool, which likely contributed to the spike in TFP. However, the decline in productivity observed in the subsequent two years (2021 and 2022) indicates a concerning trend in the post-pandemic period that should be addressed by healthcare authorities.

5. DISCUSSION

The literature review was conducted within the scope of monitoring the regional and temporal variations in the efficiency levels of national healthcare systems, in line with the research question addressed in this study.

In a study conducted in Ethiopia covering the years 2019–2021, health facilities implementing performance-based financing (PBF) were found to have lower Total Factor Productivity (TFP) indices compared to those that did not implement PBF (Adugna et al., 2024). The annual TFP indices for each health facility reported in the study by Adugna et al. (2024) showed a decline in TFP in the second year, followed by an increase in the third year. This pattern is similar to the findings of the present study, which observed initially low and subsequently higher productivity indicators in the TFP indices of medical imaging devices throughout the 2013–2022 period.

A study conducted in Norway identified a relationship between various factors—such as realized budgets, staffing levels, and hospital structure—and efficiency (Lindaas et al., 2024). In the study by Lindaas et al. (2024), the performance of hospitals between 2011 and 2019 was evaluated using the Malmquist Productivity Index, revealing an average annual increase of 0.27%. Similarly, in the present study, the average annual increase in the TFP indices of medical imaging devices across all healthcare institutions in Türkiye between 2013 and 2022 was found to be 0.5% across 12 regions. Both studies exhibit a comparable trend in that the TFP indices remained above 1 over a ten-year period, indicating increasing productivity.

In a study conducted on Serbian hospitals, 28 out of 39 hospitals showed improvement in Total Factor Productivity (TFP) between 2015 and 2019 (Medarevic and Vukovic, 2021). The study by Medarevic and Vukovic (2021) found that the number of hospitals with a Malmquist index above 1 was highest in the pre-pandemic year 2018–2019. This is similar to the findings of the present study, in which the average Total Factor Productivity of medical imaging devices in the pre-pandemic year 2018–2019 was also above 1 (1.038).

In a study conducted across 34 Sub-Saharan African countries between 2015 and 2019, the efficiency of healthcare services for non-communicable diseases was found to have declined by an average of 3.2% (tfpch: 0.968) over the period (Arhin and Asante-Darko, 2023). The study by Arhin and Asante-Darko (2023) also revealed that Total Factor Productivity Change (tfpch) recorded growth only in 2018, with the performance of all components fluctuating inconsistently over the years. This pattern aligns with the findings of the present study, which similarly observed inconsistent changes in productivity over time.

A study conducted in Brazil revealed a decline in Total Factor Productivity (TFP) in the primary healthcare sector between 2015 and 2019 (Soares and Lopes, 2024). In the study by Soares and Lopes (2024), 75% of Brazilian municipalities experienced stagnation or a decrease in TFP in primary healthcare services. In contrast, the present study found that only 33% of the 12 regions in Türkiye experienced stagnation or a decline in the TFP of medical imaging devices over a ten-year period, indicating a dissimilar pattern.

In a study evaluating the period between 2016 and 2018 in Greece, the Total Factor Productivity (TFP) of all 155 primary healthcare centers was estimated using an input-oriented Malmquist Productivity Index under Data Envelopment Analysis (DEA). Subsequently, Spearman's rank correlation coefficients were calculated for four different models constructed with varying inputs and outputs. The Spearman's rank correlation tests demonstrated statistically significant correlations among the different model specifications, supporting internal validity (Trakakis et al., 2021). In the present study, the Mann–Whitney U test, a non-parametric method, was used to assess whether there were statistically significant differences in TFP indices across 12 regions and over the years 2013–2022. Both studies are similar in that they employed

statistical methods to examine whether there were relationships or differences in TFP indices, thus showing a methodological resemblance.

A study conducted in China's Hainan Province found that the allocation efficiency of medical and health resources was generally low and exhibited a declining trend from 2016 to 2020 (Gong et al., 2024). Furthermore, the study by Gong et al. (2024) reported that although economically developed areas with large populations in Hainan were relatively more efficient than other regions, there were significant regional disparities. This finding aligns with the results of the present study, which also confirmed the hypothesis that regional differences exist in Total Factor Productivity.

A study conducted on healthcare institutions in China found that the regional allocation of efficiency was unbalanced and that there were significant differences in the scale of healthcare institutions across the country between 2012 and 2017 (Li et al., 2021), which is consistent with the findings of the present study.

In a study analyzing regional healthcare service delivery across 31 provinces in China from 2010 to 2019, it was shown that following the implementation of the new healthcare reform in 2009, regional health inputs and outputs in all provinces exhibited varying degrees of growth (Li et al., 2024). The study by Li et al. (2024) also indicated that the allocation of healthcare resources in some regions required further optimization. This finding is similar to the results of the present study, which confirmed the hypothesis that regional differences exist.

In a study analyzing the healthcare system reform across 31 provinces in China from 2009 to 2021, it was found that the average level of healthcare efficiency exhibited a fluctuating upward trend (Sun et al., 2023). The study by Sun et al. (2023) also identified regional disparities in healthcare efficiency within China, which aligns with the findings of the present study supporting the hypothesis of regional differences.

A study conducted across 31 provinces in China covering the period from 1997 to 2022 reported an average efficiency score of 0.7672 for the healthcare system, indicating a moderate level of efficiency (Xu et al., 2024). The Kruskal–Wallis analysis used by Xu et al. (2024) revealed significant variations in efficiency, productivity growth, and production technology among healthcare systems in Eastern, Central, Western, and Northeastern China. This is comparable to the present study, where the non-parametric Mann–Whitney U test demonstrated statistically significant differences in efficiency trends—both increasing and decreasing—across regions and years.

A study conducted across 31 provinces in China from 2012 to 2020 demonstrated a decline in the efficiency level of the primary healthcare system (Huang et al., 2024). Huang et al. (2024) found that efficiency in more developed regions was significantly higher than in less developed areas. This finding is supported by the present study, where more developed regions such as Western Marmara, Eastern Marmara, Istanbul, and Aegean exhibited higher efficiency levels compared to less developed regions like Northeast, Central East, and Southeast.

A study conducted in a municipality in southwestern China following healthcare reform revealed a slight decline in the efficiency of primary healthcare systems across the municipality between 2009 and 2018. Factors influencing the efficiency of primary healthcare systems included the urbanization rate of the region/city, per capita financial expenditure in primary healthcare institutions, and the number of nurses per 1,000 inhabitants (Zeng et al., 2024). In the present study, one of the inputs was the total number of physicians per 100,000 people. Both studies similarly highlight the presence of professional healthcare workers as a key input affecting efficiency.

Another study found that the average technical efficiency of urban primary healthcare institutions was lower than that of rural ones between 2009 and 2019 (Zhou et al., 2023). This finding contradicts the results of the present study, where more urbanized regions such as Western Marmara, Eastern Marmara, Istanbul, and Aegean exhibited higher efficiency levels compared to more rural regions like Northeast, Central East, and Southeast.

In a study comparing the efficiency of medical device utilization across 81 provinces in Türkiye, 22 provinces were found to be efficient, while 59 were inefficient (İlgün et al., 2022). The finding that Istanbul was among the efficient provinces in both the study conducted by İlgün et al. (2022) and the present study demonstrates consistency. However, there is a contradiction in that, while İlgün et al. (2022) identified 10 provinces from the Mediterranean, Southeastern, and Eastern Anatolia regions as efficient, the present study found that all provinces in these regions exhibited low total factor productivity ($tfpch < 1$). Similarly, the current study identified 8 provinces in the Western Marmara and Western Anatolia regions as having high total factor productivity ($tfpch > 1$), which contradicts the findings of İlgün et al. (2022), where all of these provinces were found to be inefficient.

In another study comparing the efficiency of medical imaging devices in Turkish hospitals for the year 2021, the lowest efficiency was observed in Doppler ultrasound devices in university hospitals, with an efficiency rate of 54%. In addition, the efficiency rate of CT and Doppler ultrasound devices in private hospitals was reported as 57%, while mammography devices were found to be fully efficient (100%) across all sectors (Yüksel, 2023). In contrast to these findings, the present study identified CT, MRI, and Doppler ultrasound as highly efficient devices, whereas ECHO and mammography were found to have lower efficiency, thereby contradicting the results reported by Yüksel (2023).

In a study conducted using 2017 data from 11 cities sampled from Henan Province in China, the efficiency indicator was found to be only 0.732, with the pure technical and scale efficiency scores of four cities in the sample falling below 1. This indicates lower MRI efficiency and an overall inefficiency in MRI utilization (Huang et al., 2023). In contrast, the average Total Factor Productivity Change (TFPCH) indicator for MRI devices in the present study was 1.026 over the period from 2013 to 2022, which contradicts the findings reported by Huang et al. (2023).

The study conducted in Italy showed that the use of newer equipment led to a decrease in productivity, and that the presence of a more senior chief radiology technician and customer satisfaction survey systems did not translate into improved productivity (Visintin et al., 2024). In contrast, the present study found technological change (techch) indicators of 1.034 for MRI devices and 1.023 for CT devices, suggesting an increase in productivity, thereby contradicting the findings of Visintin et al. (2024).

6. CONCLUSION

When evaluating the total factor productivity (TFP) indicators of medical imaging devices across regions and years, CT, MRI, and Doppler ultrasonography were found to exhibit high productivity, whereas echocardiography (ECHO) and mammography demonstrated low productivity. Cardiovascular diseases and neoplasms are known to be the leading causes of death in recent years. The consistently low productivity of ECHO devices—which play a critical role in the diagnosis and follow-up of circulatory system and various heart diseases, as well as in the early detection of myocardial infarction—over the past decade is a noteworthy finding. Similarly, the low productivity of mammography devices over the last 10 years, despite their vital role in the early diagnosis of breast cancer, particularly among women, is brought to the attention of policymakers and decision-makers.

Regions in northern and western Türkiye were found to have higher average TFP indicators for medical imaging devices, while southern and eastern regions showed lower productivity levels. Moreover, the TFP indicators for medical imaging devices did not consistently demonstrate high productivity between 2013 and 2022.

It was observed that there was a statistically significant difference between the 12 regions in the NUTS according to the low and high total factor efficiency average of medical imaging devices. Likewise, there was a statistically significant difference across Türkiye between 2013 and 2022 in terms of whether the average TFP of medical imaging devices was high or low.

REFERENCES

- Aduugna, M., Dinsa, G. and Khuzwayo, N. (2024). "Can Performance-Based Financing Improve Efficiency of Health Centers in Ethiopia? A Malmquist Productivity Index Analysis", *BMC Health Services Research*, 24(1), 8, Article 696. <https://doi.org/10.1186/s12913-024-11127-4>
- Arhin, K. and Asante-Darko, D. (2023). "Performance Evaluation of National Healthcare Systems in the Prevention and Treatment of Non-Communicable Diseases in Sub-Saharan Africa", *PLoS One*, 18(11). <https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294653>
- Banker, R.D., Charnes, A. and Cooper, W.W. (1984). "Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis", *Management Science*, 30(9), 1078-1092.
- Charnes, A., Cooper, W.W. and Rhodes, E. (1978). "Measuring the efficiency of decision making units", *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
- Charnes, A., Cooper, W. W. and Rhodes, E. (1981). "Evaluating Program and Managerial Efficiency: An Application of Data Envelopment Analysis to Program Follow Through", *Management Science*, 27(6), 668-697.
- Chern, J-Y. and Wan, T.T. (2000). "The Impact of the Prospective Payment System on the Technical Efficiency of Hospitals", *Journal of Medical Systems*, 24, 159-172.
- Coelli, T.J., Rao, D.S.P., O'donnell, C. J. and Battese, G. E. (2005). "An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis", Springer Science & Business Media.
- Färe, R., Grosskopf, S., Norris, M. and Zhang, Z. (1994). "Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries", *The American Economic Review*, 84(1), 66-83.
- Farrell, M.J. (1957). "The Measurement of Productive Efficiency", *Royal Statistical Society Journal Series A: General*, 120(3), 253-281. <https://doi.org/10.2307/2343100>
- Gong, Y. H., Ma, D. and Feng, W. (2024). Study on the allocation efficiency of medical and health resources in Hainan Province: Based on the super-efficiency SBM-Malmquist model. *PLoS One*, 19(2), 12, Article e0294774. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294774>
- Hollingsworth, B. (2008). "The Measurement of Efficiency and Productivity of Health Care Delivery". *Health Economics*, 17(10), 1107-1128.
- Huang, R., Li, W., Shi, B. G., Su, H., Hao, J., Zhao, C. J. and Chai, J. H. (2024). "Evaluating China's Primary Healthcare Services' Efficiency and Spatial Correlation: A Three-Stage DEA-Malmquist Model", *Frontiers in Public Health*, 12, 16, Article 1366327. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1366327>
- Huang, X., Wei, Y., Sun, H., Huang, J., Chen, Y. and Cheng, J. (2023). "Assessment of Equity and Efficiency of Magnetic Resonance Imaging Services in Henan Province, China", *Cost Effectiveness and Resource Allocation*, 21, 32. <https://doi.org/10.1186/s12962-023-00440-0>
- İlgün, G., Sönmez, S. and Koca, G. (2021). "An Evaluation on Medical Device Usage Status: A Study on Turkey and European Union Countries", *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, (60), 381-398. <https://doi.org/10.18070/erciyesiibd.874217>
- İlgün, G., Sönmez, S., Konca, M. and Çakmak, C. (2022). "Evaluation of Factors Affecting the Efficiency of Medical Imaging Devices in Turkey: Two-Stage Data Envelopment Analysis", *Manisa Celal Bayar University Health Sciences Institute Journal*, 9(4), 492-500. <https://doi.org/10.34087/cbusbed.994765>
- Li, M., Guo, J.M. and Dong, S.P. (2024). "The Regional Total Factor Productivity Changes of Healthcare Delivery in China: A Bootstrap Malmquist Data Envelopment Analysis", *Inquiry-The Journal of Health Care Organization Provision and Financing*, 61. <https://doi.org/10.1177/00469580241266373>
- Li, Z., Zhang, W., Kong, A., Ding, Z., Wei, H. and Guo, Y. (2021). "Configuration Analysis of Influencing Factors of Technical Efficiency Based on DEA and fsQCA: Evidence from China's Medical and Health Institutions", *Risk Management and Healthcare Policy*, 14, 49-65. <https://doi.org/10.2147/RMHP.S282178>
- Lindaas, N.A., Anthun, K.S. and Magnussen, J. (2024). "New Public Management and Hospital Efficiency: The Case of Norwegian Public Hospital Trusts", *BMC Health Services Research*, 24, 36. <https://doi.org/10.1186/s12913-023-10479-7>
- Medarevic, A. and Vukovic, D. (2021). "Efficiency and Productivity of Public Hospitals in Serbia Using DEA-Malmquist Model and Tobit Regression Model, 2015-2019", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(23), 22, 12475. <https://doi.org/10.3390/ijerph182312475>
- Nak, H. and Sağbaş, İ. (2020). "Analysis of Regional Distribution of Medical Imaging Devices within Health Expenditures", *Journal of Public Finance Studies*, 63, 77-92. <https://doi.org/10.26650/mcd2020-822594>
- Ozcan, Y.A. (2008). "Health Care Benchmarking and Performance Evaluation". Springer.
- Republic of Turkey Ministry of Health. (2024). "Ministry of Health of Turkey Health Statistics Yearbook 2022", <https://dosyasb.saglik.gov.tr/Eklenti/48055/0/siy2022eng050420241pdf.pdf>, (Accessed:11.08.2025).

- Singh, S., Bala, M.M., Kumar, N. and Janor, H. (2021). "Application of DEA-Based Malmquist Productivity Index on Health Care System Efficiency of ASEAN Countries", *International Journal of Health Planning and Management*, 36(4), 1236-1250. <https://doi.org/10.1002/hpm.3169>
- Soares, T.C. and Lopes, L.S. (2024). "Decreasing Productivity in the Primary Healthcare: A Study of the Brazilian Case", *The Journal of Developing Areas*, 58(4), 43-60. <https://doi.org/10.1353/jda.2024.a931315>
- Sun, M., Ye, Y., Zhang, G., Shang, X. and Xue, Y. (2023). "Healthcare Services Efficiency and Its Intrinsic Drivers in China: Based on the Three-Stage Super-Efficiency SBM Model", *BMC Health Services Research*, 23, 1-17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s12913-023-09820-x>
- Trakakis, A., Nektarios, M., Tziaferi, S. and Prezerakos, P. (2021). "Total Productivity Change of Health Centers in Greece in 2016-2018: A Malmquist Index Data Envelopment Analysis Application for the Primary Health System of Greece", *Cost Effectiveness and Resource Allocation*, 19, 72. <https://doi.org/10.1186/s12962-021-00326-z>
- Visintin, F., Aloini, D., Gitto, S., Vannelli, S. and Di Feo, D. (2024). "Efficiency in Radiology Departments: A Two-Stage Analysis", *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 36(2), 481-502. <https://doi.org/10.1007/s10696-023-09499-6>
- World Health Organization. (2011). "Health Technology Assessment of Medical Devices", World Health Organization.
- Xu, X., Yasmeen, R. and Shah, W.U.H. (2024). "Efficiency Evaluation, Regional Technological Heterogeneity and Determinant of Total Factor Productivity Change in China's Healthcare System", *Scientific Reports*, 14(1), 19606. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-024-70736-5>
- Yüksel, O. (2023). "Efficiency of Medical Imaging Techniques in Hospitals by Sector", *Munzur University Journal of Social Sciences*, 12(2), 133-152.
- Zeng, Z., Yu, X., Tao, W., Feng, W. and Zhang, W. (2024). "Efficiency Evaluation and Promoter Identification of Primary Health Care System in China: An Enhanced DEA-Tobit Approach", *BMC Health Services Research*, 24, 1-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s12913-024-11244-0>
- Zhou, J.X., Peng, R., Chang, Y.J., Liu, Z.J., Gao, S.H., Zhao, C.J., Li, Y.X., Feng, Q.M. and Qin, X.J. (2023). "Analyzing the Efficiency of Chinese Primary Healthcare Institutions Using the Malmquist-DEA Approach: Evidence from Urban and Rural Areas", *Frontiers in Public Health*, 11, 1073552. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1073552>

Türkiye Tarım Sektöründe Toplam Faktör Verimliliği (TFV): 1961-2021 Döneminin Malmquist TFV Endeksiyle Analizi

Mehmet Ali Cevheri¹ , Nihat Küçük² 

ÖZET

Amaç: Bu çalışma, Türkiye tarım sektörünün 1961–2021 dönemindeki toplam faktör verimliliğini (TFV) ölçmek, teknik etkinlik değişimi (TEC) ile teknolojik değişim (TC) gibi TFV bileşenlerinin zaman içinde gösterdiği performansı etkileyen faktörleri analiz etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Yöntem: Araştırmada Veri Zarflama Analizi (VZA) ile Malmquist TFV Endeksi hesaplanmış; Sabit Getiriler Altında Ölçek (CRS) ve Değişken Getiriler Altında Ölçek (VRS) varsayımlarına göre girdi ve çıktı odaklı analizler gerçekleştirilmiştir.

Bulgular: Türkiye'nin 1961-2021 dönemi tarımsal verimliliği, girdi odaklı teknik verimlilikte düşüş (TEC, 1,010'dan 0,959'a) ve çıktı odaklı verimlilikte artış (TEC, 0.990'dan 1,040'a) göstermiştir. Teknolojik değişim (TC), karışık etkilerle son dönemde girdi odaklı olarak 1,060'a yükselmiş, çıktı odaklı olarak da 0,949'a gerilemiştir. Malmquist toplam faktör verimliliği (MTFV) endeksi yaklaşık 1 civarında sabit kalmış ve nispeten sınırlı bir iyileşme göstermiştir. Bu durum, teknoloji kullanımının artırılması, tarımsal yayım ve danışmanlık hizmetlerinin geliştirilmesi ve girdi verimliliğinin artırılması gibi kapsayıcı politikaların uygulanarak tarımsal büyümenin sürdürülmesi gerektiğini göstermektedir.

Özgünlük: Çalışma, Türkiye tarım sektörünün 61 yıllık uzun dönemini kapsayan ilk Malmquist TFV analizlerinden biri olması ve 61 yıllık dönemi 10'ar yıllık periyodlarla değerlendirmesi bakımından özgün bir katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Toplam Faktör Verimliliği, Malmquist Endeksi, Türkiye Tarım Sektörü, 1961-2021 Dönemi.

JEL Kodları: Q10, Q16, Q18, O47, C61.

Total Factor Productivity (TFP) in the Turkish Agricultural Sector: Analysis of the 1961–2021 Period with the Malmquist TFP Index

ABSTRACT

Purpose: This study was conducted to measure the Total Factor Productivity (TFP) of the Turkish agricultural sector over the period of 1961–2021 and to analyze the factors influencing the performance of TFP components, such as technical efficiency change (TEC) and technological change (TC), over time.

Methodology: The Malmquist TFP Index was calculated through Data Envelopment Analysis (DEA). Input- and output-oriented analyses were conducted under the assumptions of Constant Returns to Scale (CRS) and Variable Returns to Scale (VRS).

Findings: Turkey's agricultural productivity from 1961 to 2021 showed a decline in input-oriented technical efficiency (TEC, from 1.010 to 0.959) and an increase in output-oriented productivity (TEC, from 0.990 to 1.040). Technological change (TC) increased to 1.060 in the input-oriented analysis in the last period with mixed effects, while it decreased to 0.949 in the output-oriented analysis. The Malmquist total factor productivity (TFP) index remained stable around 1, indicating relatively limited improvement. This suggests that agricultural growth should be sustained through comprehensive policies, such as increasing technology adoption, enhancing agricultural extension and consultancy services, and improving input efficiency.

Originality: The study provides an original contribution by being one of the first Malmquist TFP analyses covering a 61-year period of the Turkish agricultural sector and by evaluating this period in 10-year intervals.

Keywords: Total Factor Productivity, Malmquist Index, Turkish Agricultural Sector, 1961–2021 Period.

JEL Codes: Q10, Q16, Q18, O47, C61.

* Bu çalışma, Mehmet Ali Cevheri tarafından Harran Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nde Doç. Dr. Nihat Küçük danışmanlığında yürütülen "Tarım Sektöründe Toplam Faktör Verimliliği (TFV) ve Kamu Politikaları: Türkiye ve Hollanda'nın Malmquist TFV Endeksi ile Karşılaştırmalı Analizi (1961–2021)" başlıklı Doktora Tezi'nden türetilmiştir.

¹ Harran Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Maliye Anabilim Dalı, Şanlıurfa, Türkiye,

² Harran Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İktisat Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

Sorumlu Yazar-Corresponding Author: Nihat Küçük, nihatk@harran.edu.tr

DOI: 10.51551/verimlilik.1711741

Araştırma Makalesi / Research Article | Geliş / Submitted: 01.06.2025 | Kabul / Accepted: 30.06.2025

Atıf/Cite: Cevheri, M.A. ve Küçük, N. (2025). "Türkiye Tarım Sektöründe Toplam Faktör Verimliliği (TFV): 1961-2021 Döneminin Malmquist TFV Endeksiyle Analizi", *Verimlilik Dergisi*, 59(4), 787-802.

EXTENDED ABSTRACT

Agricultural productivity is a cornerstone of economic performance, particularly in countries where agriculture plays a significant role in economic and social structures. Total Factor Productivity (TFP) measures the efficiency with which inputs such as land, labor, and capital are transformed into outputs, reflecting the ability to produce more with fewer resources. In Turkey, the agricultural sector remains vital despite challenges like limited arable land, climate dependency, and rapid urbanization. This study analyzes the Total Factor Productivity (TFP) of the Turkish agricultural sector over the 1961–2021 period using the Malmquist TFP Index, providing insights into whether long-term performance is more sensitive to technical efficiency change or technological change.

The global agricultural sector faces increasing pressure to enhance productivity due to rising food demand, land scarcity, and the impacts of climate change. In Turkey, agriculture is critical for food security, rural development, and economic stability, requiring higher output with limited resources. The primary way to achieve this is by increasing Total Factor Productivity. However, Turkey's long-term productivity performance has not been sufficiently explored. This study aims to fill this gap by examining TFP trends over a 61-year period. The key research questions are: (1) How has TFP evolved in Turkish agriculture? (2) How have technical efficiency and technological change influenced Turkey's TFP performance? (3) What policy measures can be taken to sustain agricultural productivity growth in Turkey?

The study utilizes secondary data from the U.S. Department of Agriculture Economic Research Service (USDA ERS) for the 1961–2021 period, covering total output, land, labor, and capital. Data Envelopment Analysis (DEA) and the Malmquist TFP Index are employed to measure TFP, with analyses conducted under Constant Returns to Scale (CRS) and Variable Returns to Scale (VRS) assumptions, using input- and output-oriented approaches. The Malmquist TFP Index decomposes productivity into Technical Efficiency Change (TEC) and Technological Change (TC).

In the input-oriented analysis for Turkey over the 1961–2021 period, under CRS, the average TEC is 0.991, TC is 1.007, and the Malmquist TFP Index (MTFP) is 0.997. Under VRS, the averages are TEC 0.996, TC 1.002, and MTFP 0.998. In the output-oriented analysis, both CRS and VRS yield an average TEC of 1.011. The TC value of 0.994 indicates limited technological progress. The MTFP value of 1.004 suggests that production performance has been sustained with slight improvement (Table 2). Analysis of 10-year averages for the 1961–2021 period shows that under CRS, input-oriented TEC declined from 1.010 to 0.959, indicating reduced efficiency in input utilization, while output-oriented TEC increased from 0.990 to 1.040, reflecting improved output generation. Technological Change (TC) showed mixed effects: input-oriented TC rose to 1.060 in 2011–2021, while output-oriented TC fell to 0.949 (Tables 3-4).

This study analyzes Turkey's agricultural productivity over the 1961–2021 period using the Malmquist TFP (MTFP) Index. Technical Efficiency Change (TEC) and Technological Change (TC) were examined under Constant Returns to Scale (CRS) and Variable Returns to Scale (VRS) using input- and output-oriented models. The findings reveal that agricultural productivity varies across periods. Input-Oriented Analysis: TEC declined from 1.010 to 0.959, indicating efficiency loss, while TC rose to 1.060 in recent periods, reflecting increased technological progress. Output-Oriented Analysis: TEC increased from 0.990 to 1.040, showing improvement, while TC fell to 0.949, indicating limited technological progress. MTFP: It remained stable around 1, suggesting limited overall improvement. Period-specific findings indicate variability. The study shows that productivity growth primarily stems from the efficient use of existing resources, while technological progress remains inconsistent. These findings highlight the need for comprehensive strategies to ensure sustainable agricultural growth in Turkey. Policy recommendations emphasize increasing R&D investments, promoting technology adoption, highlighting the importance of education, and focusing on structural reforms such as land consolidation and improved access to finance. The study's limitation lies in its national focus, excluding regional variations. Future research should explore regional TFP disparities and environmental factors to inform targeted policies.

1. GİRİŞ

Verimlilik, tarım sektörünün ekonomik performansının temel göstergelerinden biridir. Toplam Faktör Verimliliği (TFV) büyümesi, "daha az girdiyle daha fazla üretim" yeteneğini yansıtmaktadır ve belirli bir girdi seti (arazi, sermaye, iş gücü) ile daha fazla üretim yapmak veya aynı miktarda çıktıyı daha az girdi kullanarak elde etmeyi ifade etmektedir (Bureau ve Anton, 2022). Tarım sektörü, özellikle nüfusunun önemli bir kesiminin tarım ve tarıma dayalı sanayi ile iştigal ettiği ülkelerde, ekonomik kalkınmanın temel taşlarından biri olarak kalmaya devam etmektedir (Rahman ve Salim, 2013). Küresel ölçekte tarıma elverişli arazilerin kıtlığı ve kalitesi, artan dünya nüfusunun beslenmesindeki en büyük kısıtlayıcı faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, tarımsal üretimdeki artışın, sürdürülebilir bir verimlilik artışıyla sağlanması hayati öneme sahiptir (Dünya Bankası, 2011: 6-110). 21. yüzyılın başından itibaren tarımsal verimlilik artışında bir yavaşlama gözlemlenmiştir. Bunun başlıca nedenleri arasında hızlı kentleşme nedeniyle arazi tahsisindeki rekabet ve iklim değişikliği yer almaktadır (Popp ve diğerleri, 2013). Tarıma elverişli arazi genişlemesinin sınırlı olması göz önünde bulundurulduğunda, tarımsal ürün ve gıda arzındaki artışın, hâlihazırda ekilebilir araziler gibi mevcut üretim faktörlerinin verimliliğinin artırılması yoluyla sağlanması gerekmektedir (Coomes ve diğerleri, 2019).

Tarım sektöründeki verimlilik artışı, tarım sektörü çıktısının, nüfusun hızlı yükselmesiyle ortaya çıkan ve başta temel besin maddeleri olmak üzere, diğer sektörlerin girdi taleplerini de karşılayacak nispette artırılabilmesi için kritik bir faktördür. Diğer üretim sektörlerinde olduğu gibi, tarım sektöründe de kaynakların optimal kullanımı, aslında kıt olan bu kaynakların en yüksek verimlilik ve etkililikle kullanılmasını gerektirir. Tarımsal üretimin artırılması, gıda güvencesinin sağlanması, diğer endüstriler için hammadde temini ve tarım sektöründeki atıl işgücünün sanayi ve hizmet sektörlerine aktarılması bakımından da kritik öneme sahiptir. Bu süreç, tarım sektöründeki verimliliği etkileyen faktörlerin belirlenmesini ve bu faktörleri iyileştirmeye yönelik etkili politika ve stratejilerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Besharat ve Amirahmadi, 2011).

Toplam faktör verimliliği göstergelerinin gelişimini izlemek, bir ekonominin büyümesini, arz yapısını ve rekabet gücünün gelişimini analiz etmek açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda yapılan çalışmalarda, tarım ürünleri arzının en önemli belirleyicilerinden bazılarının verimlilikle ilgili faktörler olduğu, tarım sektörünün gelişimini teşvik edecek destekleyici politikaların, teknik değişimi teşvik etmeye ve etkinlik artışlarını desteklemeye odaklanması gerektiği ortaya konulmuştur. Bu tespitler, özellikle tarım sektörü açısından kritik öneme sahiptir. Zira bu sektörün verimliliği, gıda güvenliği ve fiyatlar üzerinde doğrudan etkilidir ve yoksul bölgelerde tarımsal verimlilik artışı, kırsal gelirleri artırmak ve yoksulluğu azaltmak için kritik bir role de sahiptir. Bunun yanı sıra, tarımsal verimlilik artışı, doğal kaynak kullanımını ve üretim faktörlerinin diğer ekonomik sektörlere yeniden tahsis edilmesini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenlerle, daha gerçekçi verilerin elde edilmesi ve uluslararası düzeyde uygun karşılaştırmalar yapılması, özellikle tarımsal verimlilik artışının düşük veya durağan olduğu bölgelerde, bu alanı geliştirmeye yönelik daha etkin politikaların geliştirilmesi gerekmektedir (Le Clech ve Fillat-Castejón, 2020).

TFV kavramı ortaya atıldıktan sonra, ilk akademik araştırmalar çoğunlukla çeşitli endüstrilerin TFV'sini ölçmek ve çeşitli endüstrilerdeki ekonomik büyümenin niteliğini keşfetmek için farklı yöntemler kullanmıştır. Uzun vadede, verimlilik artışları, mevcut toprak, sermaye ve iş gücü ile yeterli ve besleyici gıda temin etme yeteneğinin ana belirleyicisidir (Bureau ve Anton, 2022). Son elli yıldır, tarımda verimlilik artışı yoğun araştırmalara konu olmuştur. Araştırmacılar, bu süreçte verimlilik artışını etkileyen faktörlerinin yanı sıra, ulusal ve bölgesel verimlilik değişimlerini araştırmışlardır (Coelli ve Rao, 2005). Tarımsal verimlilik artışının gıda güvencesinin yanı sıra, çevresel etkilerle ilişkilendirilmesi ve tarımsal sürdürülebilirlik ile dayanıklılıkla olan dinamik etkileşiminin daha iyi anlaşılması için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır (Coomes ve diğerleri, 2019).

Tarım sektörü, özellikle gelişmekte olan ülkelerde ekonomik, sosyal ve stratejik öneme sahiptir. Ancak, bu sektörün geleceği yalnızca üretim artışına değil, aynı zamanda toprak, işgücü ve sermaye gibi üretim girdilerinin ne denli verimli kullanıldığına da bağlıdır. Türkiye'de tarım sektörü, sınırlı kaynaklara ve önemli ölçüde iklim koşullarına bağımlıdır. Türk tarımının bu yapısal durumu, kaynakların verimli kullanılmasını ve üretim aşamalarında verimliliğin artırılmasını zorunlu hale getirmektedir. Buna karşılık, Türkiye tarım sektörüyle ilgili verimlilik performansının teknik etkinliğe mi (kaynak kullanımında etkinlik), yoksa teknolojik değişime mi daha duyarlı olduğuna dair uzun dönemi kapsayan çalışmalar yetersizdir.

Bu çalışmada, 1961-2021 yılları arasındaki 61 yıllık uzun dönemde Türkiye'nin tarım sektörüne ilişkin TFV, Veri Zarflama Analizi (VZA) yöntemi kullanılarak hesaplanan Malmquist TFV Endeksi ile incelenmiştir. Türkiye tarımının verimlilik performansının izlediği seyir ve eğilimler, 10'ar yıllık periyodlarla değerlendirilmiş ve politika yapıcılara verimlilik artışını destekleyici politika önerileri geliştirilmesi için bilimsel bir perspektif sunulmuştur.

Çalışmada önce araştırma konusuna dair literatür örnekleri incelenmiş, analizlerde kullanılan veri seti, kaynağı ve yöntem açıklandıktan sonra elde edilen bulgular verilmiş, akabinde tartışmalarla birlikte değerlendirilen sonuç bölümünde uygun görülen politika önerileri de sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çalışma konusuna dair literatür incelendiğinde ağırlıklı olarak tarım sektörü olmak üzere, diğer sektörlerin verimlilik performanslarının da küresel, ulusal, bölgesel temelde ve bazen işletmeler düzeyinde TFV endeksiyle incelendiği, bazı çalışmalarda TFV ile iktisadi büyüme arasındaki ilişkinin araştırıldığı görülmektedir;

Yaman ve diğerleri (2024)'nin Türkiye'nin 81 ilinde tarım sektöründeki TFV düzeylerini inceledikleri çalışmada, 2009-2019 dönemine ait veriler Malmquist TFV (MTFV) endeksiyle analiz edilmiştir. Araştırma bulgularına göre, MTFV endeks değerleri 0,952 ile 1,186 arasında değişmekte ve tarımsal verimlilik, 75 ilde artış gösterirken 6 ilde azalış kaydetmiştir. Çalışma, teknolojik değişimin Türkiye genelinde tarımsal verimlilik düzeylerini etkileyen en kritik unsur olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, teknolojinin tüm illerde tarımsal verimlilik artışında belirleyici bir rol oynadığını güçlü bir şekilde doğrulamaktadır. Araştırmanın bulguları, Türkiye'de tarım sektörünü daha üretken hale getirecek teknolojilerin geliştirilmesi ve uygulanmasının yanı sıra teknolojiye yönelik altyapı yatırımlarının, araştırma-geliştirme faaliyetlerinin ve bilgi yayılımının teşvik edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca, bölgesel teşvik sisteminin yeniden yapılandırılabilceğini ve iller ile işletmelerin performans ve verimliliklerine dayalı bir teşvik modeline geçilebileceğini işaret etmektedir. Bu kapsamda, verimliliği yüksek olan bölgeler ve işletmelerin ödüllendirilmesi, sektörel kalkınmaya yönelik daha stratejik ve etkin politikaların önünü açabilecektir.

Koç ve diğerleri (2023)'nin 32 gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeyi kapsayan kapsamlı araştırmasında, tarımsal Toplam Faktör Verimliliği'ni etkileyen faktörler, panel veri analizi yöntemiyle derinlemesine incelenmiştir. 2002-2016 dönemini kapsayan veriler, ABD Tarım Bakanlığı Ekonomik Araştırma Servisi (USDA ERS), Dünya Bankası (WB), Penn World Table ve Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) gibi uluslararası kurum ve kuruluşlardan derlenmiştir. Araştırma sonuçları, gelişmekte olan ülkelerde beşeri sermayenin yüksek seviyelere ulaşmasının tarımsal TFV'yi önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Ayrıca, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde sabit sermaye yatırımlarındaki artışların ve ekilebilir arazi genişlemelerinin TFV üzerinde güçlü ve olumlu etkileri olduğunu göstermektedir. Öte yandan, tarımsal istihdam oranındaki yükselişin, her iki ülke grubunda da TFV üzerinde olumsuz bir baskı oluşturduğu dikkat çekici bir bulgu olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma, tarımsal verimliliğin sürdürülebilir artışında stratejik yatırımların ve politikaların önemini bir kez daha ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, hükümetlerin brüt sabit sermaye oluşumunu artırmaya yönelik politikalar uygulaması önerilmektedir. Bunu yapmanın bir yolu, ekonomik istikrarı sağlayacak gerekli altyapıyı sağlayarak ve yatırım seviyelerini artırmak için verimli kaynak tahsisini teşvik eden politikalar geliştirerek, özel sektörü tarımsal faaliyet alanlarına yatırım yapmaya teşvik etmektir. Bu bulgular, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler için tarımsal üretimde sürdürülebilir bir artış teşvik etmek için önemli politika çıkarımları sunmaktadır.

Giang ve diğerleri (2019), Vietnam'da tarım sektöründe faaliyet gösteren 420 işletmenin verimlilik düzeylerini ve buna etki eden faktörleri analiz etmek amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, TFV Endeksi kullanılmış ve verimlilik sabit (FE) ve rastgele etkiler (RE) modelleri aracılığıyla hesaplanmıştır. Çalışmada TFV belirleyicileri olarak, işletme büyüklüğü ve faaliyet süresi, devlet ve yabancı mülkiyet payı, ihracat faaliyetleri, işletmelerin internet ve banka kredilerine erişimi gibi faktörler dikkate alınmıştır. Araştırma bulgularına göre, tarım sektöründeki işletmelerin %74,6'sının küçük ölçekli (<10-200 çalışan) olduğu tespit edilmiştir. Büyük ölçekli işletmelerin (>300 çalışan) oranı %10,6 olarak belirlenmiş ve bu işletmelerin TFV üzerinde anlamlı ve pozitif bir etkiye sahip olduğu görülmüştür (%38,8, p<0,01). Buna karşılık, hem küçük hem de mikro ölçekli işletmelerin (<10 ve <200 çalışan) TFV değerlerinin orta ölçekli işletmelere (<200-300 çalışan) kıyasla belirgin bir şekilde negatif olduğu tespit edilmiştir (sırasıyla -%71,3 ve -%32,1, p<0,01). Yabancı mülkiyet oranının, ortalamada %3,8 ile sınırlı olmasına rağmen TFV üzerinde kayda değer bir pozitif etkiye sahip olduğu ortaya çıkmıştır (%55,0, p<0,01). Buna karşılık, devlet mülkiyetinin oranı %30,7 iken TFV üzerinde negatif bir etki göstermiştir (-%7,5). İhracat faaliyetlerinin TFV üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi görülmemiştir (%2,6). Bu durum, tarımsal ihracat yapan işletmelerin toplam işletmeler içersindeki düşük oranı (%4,5) ile ilişkilendirilmiştir. Araştırmada ayrıca, işletmelerin %73'ünün banka kredisi kullandığı ve yalnızca %18,2'sinin internete erişim sağladığı belirlenmiştir. Buna rağmen, her iki faktör de TFV üzerinde anlamlı bir etki yaratmıştır (%18,5, p<0,01 ve %3,4, p<0,05). Hausman testi sonuçları, TFV tahmininde sabit etkiler modelinin, rastgele etkiler modeline kıyasla daha uygun olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, küçük ölçekli tarımsal işletmelerin verimliliğinin artırılmasına yönelik reformların gerekliliğini vurgulamaktadır. Ayrıca, yabancı yatırımların teşvik edilmesi, banka kredilerinin etkin kullanımı ve internet erişiminin artırılması gibi stratejilerin TFV üzerinde olumlu etkiler sağlayacağı önerilmektedir. Elde edilen bulgular, tarımsal işletmelerdeki verimlilik

artışının, ülkenin sürdürülebilir ekonomik büyümesine katkı sağlamayı hedefleyen politika yapıcılar için önemli bir gösterge olduğunu göstermektedir.

Karaman ve Özalp (2017), Türkiye’de tarım sektörüne ilişkin 2003-2014 dönemi verilerini, teknolojik değişim, teknik etkinlik ve TFV farklılıklarını bölgeler temelinde incelemek amacıyla Malmquist TFV Endeksi ile analiz etmişlerdir. Bu dönemde, tarımsal üretim değeri en yüksek düzeyine TR3 bölgesinde ulaşmıştır. Bunun temel nedeni, TR3 bölgesinin bitkisel ve hayvansal üretimde kullanılan girdiler açısından ilk sırada yer almasıdır. Bölgeye sağlanan desteklerin bu gelişmede önemli bir rol oynadığı değerlendirilmektedir. Araştırma, ulusal düzeyde TFV’nin yıllık ortalama %1 oranında büyüdüğünü ortaya koymaktadır. Başka bir ifadeyle, kullanılan girdilerin çıktı üzerindeki yıllık artış oranı %1 olarak belirlenmiştir. Bu artışta, etkinlik değişimindeki %0,8’lik iyileşme ve teknolojik değişimdeki %0,1’lik artışın belirleyici bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, üretim süreçlerindeki verimlilik artışının, etkinlik düzeyindeki iyileşmeler ve teknolojik ilerlemelerle desteklendiğini göstermektedir. TFV, 2011 yılında zirveye ulaşmış, ancak bu tarihten itibaren düşüş eğilimine girmiştir. Bölgesel düzeyde incelendiğinde, TFV’de yıllık ortalama %10,7’lik büyüme oranıyla TR1 bölgesi dikkat çekici bir performans sergilemiştir. Diğer bölgeler arasında TRA ve TR9 bölgeleri de sırasıyla %5,1 ve %2,7’lik büyüme oranlarıyla güçlü bir performans göstermiştir. Buna karşılık, TFV’de en belirgin düşüş, %5,4 ile TRC bölgesinde gerçekleşmiştir. Bu bulgular, Türkiye tarım sektörünün bölgesel farklılıklarını ve dinamiklerini ortaya koymaktadır.

Moreira ve Bravo-Ureta (2016), Şili’deki tarımsal işletmeler düzeyinde TFV’deki değişimi ölçmek ve bu değişimi bileşenlerine ayırmak amacıyla, 2005-2010 dönemine ait, 477 çiftlikten ve 1426 gözlemden oluşan dengesiz bir panel veri setini kullanmıştır. TFV değişimi, stokastik üretim sınırları ve translog fonksiyonel formu aracılığıyla analiz edilmiştir. Ekonometrik analiz sonuçları, çalışmaya konu olan çiftliklerde azalan ölçeğe göre getiri gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Bu bulgu, çiftlik büyüklüğünün artmasıyla birlikte üretim maliyetlerinin de arttığını ve çiftlik büyümesinin temel motivasyonunun maliyetleri düşürmekten ziyade, gelir artırma arayışından kaynaklandığını işaret etmektedir. Çalışmanın temel bulguları, teknik etkinlik iyileştirmeleri yoluyla sağlanan verimlilik artışlarının sınırlı olduğunu göstermektedir. Örneklemdeki ortalama TEC %91,0 olarak hesaplanmış, ortalama teknolojik değişim (TC) oranı ise %1,90 gibi yüksek bir seviyede bulunmuştur. Bu sonuç, araştırma ve geliştirme faaliyetlerine yapılan yatırımların artırılması ve ileri teknolojilerin benimsenmesinin TFV büyümesi üzerinde olumlu ve belirgin bir etki yaratacağını göstermektedir. Son olarak, bulgular çiftlik büyüklüğü ile incelenen süt çiftliklerinde verimlilik büyümesi arasında anlamlı bir ilişki olmadığını ortaya koymaktadır. Daha büyük ölçekli çiftlikler, istikrarlı kârlar elde etmeye devam ettikleri takdirde, daha küçük işletmeleri bünyelerine katarak kârlılıklarını daha da artırma potansiyeline sahip olacaklardır. Bu durum, daha az sayıda ancak daha büyük süt işletmelerine yönelik yapısal dönüşüm sürecini teşvik etmeye devam edecektir. Teknik etkinlik değişimi, verimlilik artışında önemli bir rol oynamakta ve bu rol özellikle küçük ölçekli işletmelerde görece daha büyük bir öneme sahip görülmektedir. Verimlilik artışı, yalnızca olumlu teknolojik ilerlemeler veya yönetim uygulamalarının iyileştirilmesi (pozitif teknik etkinlik değişimi) yoluyla değil, aynı zamanda optimal bir girdi bileşimine doğru ilerleyerek de sağlanabilmektedir.

Keizer ve Emvalomatis (2014), Hollanda’daki büyük ve yoğun süt çiftliklerinin daha küçük ölçekli çiftliklere kıyasla daha hızlı bir verimlilik artışı yaşayıp yaşamadığını araştırdıkları çalışmalarında, uzun vadede hangi tür çiftliklerin daha fazla gelişme potansiyeline sahip olduğunu VZA yöntemiyle incelemişlerdir. Araştırmanın sonuçları, tüm çiftlik grupları için verimlilik artışının neredeyse tamamen teknolojik ilerleme ile yönlendirildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, teknolojik ilerleme oranının büyük ve yoğun süt çiftlikleri için daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, son dönemdeki teknolojik yeniliklerin bu tür çiftlikler açısından daha faydalı ve etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca sonuçlar, küçük kapsamlı ve küçük yoğun çiftlikler için sırasıyla %0,8 ve %0,4’lük yıllık TFV büyüme oranına sahip olduğunu göstermektedir. Büyük kapsamlı ve büyük yoğun çiftlikler sırasıyla %1,4 ve %2,0 ile önemli ölçüde daha yüksek yıllık TFV büyüme oranına sahiptir. TFV büyüme oranlarındaki farklar, çiftçilik yoğunluğuna göre değil, çiftlik büyüklüğü boyutunda farklı sınıflar dikkate alındığında çok daha büyüktür. Dört süt çiftliği sınıfının tümü için teknolojik değişim bileşeni, TFV büyümesine en çok katkıda bulunan faktör olarak bulunmuştur. Teknolojik değişim daha büyük çiftlikler için daha hızlıdır ve bu da bu tür çiftliklerin son teknolojik yeniliklerden daha fazla yararlandığını göstermektedir. Bu çalışmanın bulguları, daha büyük çiftliklerin Hollanda süt ürünleri sektöründeki gelişme olasılığının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni, büyük işletmelerin zamanla daha hızlı verimlilik artışı sağlamaları ve bu nedenle büyük ve küçük çiftlikler arasındaki verimlilik farkının genişlemesidir.

Mollavelioğlu ve Ceylan (2010), 1962–2006 dönemi itibarıyla Avrupa Birliği’ne üye 17 ülke ile AB üyelik sürecindeki Türkiye’nin tarımsal TFV açısından yakınsama eğilimi gösterip göstermediğini araştırmışlardır. Araştırma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, tarım sektörünün Malmquist TFV endeksi hesaplanmıştır. İkinci aşamada ise, bu endeks değerleri kullanılarak ülkelerin tarımsal TFV açısından yakınsama gösterip göstermediği araştırılmıştır. Bu çalışma, hem örneklem grubunun genel davranışını değerlendiren sigma-yakınsama yöntemiyle hem de örneklem içi dinamikleri ayırtırmayı mümkün kılan

Nahar-Inder testiyle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, incelenen ülkelerin sigma-yakınsama davranışı sergilemediğini ortaya koymaktadır. Ancak Nahar-Inder testine göre, Bulgaristan, İspanya ve Danimarka hariç diğer 15 ülkenin, tarımsal TFV açısından ortalamaya doğru yakınsama eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir.

Avcı ve Kaya (2008), Türkiye ile geçiş ekonomileri olarak adlandırılan ülkelerin tarım sektöründeki performanslarını 1992-2004 dönemi verileri ışığında mukayeseli olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada, VZA ve Malmquist Verimlilik Endeksi yöntemleri kullanılarak teknik etkinlik, TFV ve bu bileşenlerdeki değişimler incelenmiş ve karşılaştırmalı sonuçlar sunulmuştur. Çalışmanın bulgularına göre, 1992-2004 döneminde geçiş ekonomilerinin Malmquist verimlilik endeksi 0,655 olarak belirlenirken, Türkiye'nin Malmquist verimlilik endeksi bu değerden oldukça üzerinde, 0,826 olarak hesaplanmıştır. Geçiş ekonomilerinde Malmquist verimlilik endeksindeki ortalama değişim 1,016, teknolojik değişim 1,007 ve TFV değişimi 1,023 seviyelerindedir. Türkiye, Malmquist verimlilik endeksindeki değişim açısından geçiş ekonomileriyle aynı seviyede kalmasına rağmen, teknolojik değişim değeri 0,99 ile ortalamanın altında kalmıştır. Ölçek etkinliğinde gözlemlenen 1,016'lık pozitif katkı sayesinde Türkiye'nin TFV değişimi 1,006 olarak hesaplanmış olsa da, bu değer yine de geçiş ekonomilerinin ortalamasının gerisindedir. Türk tarım sektörü, teknolojik ilerlemenin sınırlı kalmasına rağmen, ölçek etkinliğinde elde edilen kayda değer iyileşmeler sayesinde TFV'de anlamlı bir artış göstermiştir. Bu başarı, üretimin hem mikro hem de makro düzeyde ideal ölçeklerde gerçekleştirilmesiyle sağlanan stratejik uyumun bir yansıması olarak değerlendirilmektedir.

Vergil ve Abasız (2008), Türkiye ekonomisinin 1968-2006 dönemine ait yıllık verilerini inceleyerek, TFV ile ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi derinlemesine analiz etmişlerdir. En Küçük Kareler, Regresyon Tahmin ve Büyümenin Kaynaklarına Ayırıştırılması yöntemlerini kullandıkları çalışmada, TFV'nin ekonomik büyümeye olumlu ve anlamlı bir katkı sağladığı sonucuna ulaşmışlardır. Araştırma bulgularına göre, ekonomik büyümenin yaklaşık %30'u TFV artışlarından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, farklı modellemelerden elde edilen sonuçlar, büyümenin itici gücünün ağırlıklı olarak fiziki sermaye birikimi olduğunu ve diğer üretim faktörlerine kıyasla daha belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, modelden elde edilen TFV seviyeleri, Türkiye ekonomisindeki yapısal dönüşümlerin etkilerini yansıtmaktadır. TFV'nin büyümeye katkısı, ekonomik kriz dönemlerinde yaşanan keskin düşüşler haricinde, genel olarak pozitif bir seyir izlemiştir. Çalışmada ulaşılan sonuçlar, büyümenin itici gücü olarak tespit edilen fiziki sermaye birikiminin, verimli yatırımlarla birlikte desteklenmesi ve bu yatırımların istihdamı artırıcı nitelikte olmasına dikkat edilmesi yönündedir.

Coelli ve Rao (2005), 1980-2000 döneminde 93 ülkenin tarımsal verimlilik artışını analiz etmek amacıyla, Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü'nden (FAO) sağlanan verileri kullanarak VZA yöntemini uygulamıştır. Sonuçlar, TFV'de yıllık %2,1'lik bir büyümeyi göstermektedir; yıl bazında verimlilik değişimi %0,9 iken, teknik değişim %1,2'dir. Ülke performansı açısından, en dikkat çekici performansı, çalışma döneminde TFV'de ortalama yıllık %6,0'lık bir büyüme ile Çin kaydetmiştir. Çin, %4,4 teknik etkinlik büyümesi ve %1,5 teknolojik değişim büyümesi nedeniyle TFV'de ortalama %6,0 büyüme göstermiştir. Türkiye, %0,5 teknik etkinlik ve %0,4 teknolojik değişim büyümesi ile TFV'de ortalama %0,9'luk bir artış sağlarken, Hollanda ise %0,0 teknik etkinlik büyümesi ve %2,2 teknolojik değişim artışı ile TFV'de ortalama %2,2'lik bir büyüme elde etmiştir. Güçlü performansa sahip diğer ülkeler arasında Kamboçya, Nijerya ve Cezayir dikkat çekmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nin TFV büyüme oranı %2,6 iken Hindistan'ın TFV büyüme oranı yalnızca %1,4'tür. Küresel ölçekteki bölgelerin performansına bakıldığında, Asya %2,9'luk yıllık TFV büyümesiyle en büyük performansı gösteren bölgedir. Afrika, TFV'de yalnızca %0,6'lık büyümeye en zayıf performans gösteren bölge gibi görünmektedir. Emeğin bol olduğu ve tarımın yoğun emek gerektirdiği ülkelerde emek payları yüksek seyretmektedir; Hindistan ve Endonezya'nın sırasıyla %44,5 ve %42,2'lik gölge emek payları bu durumu yansıtmaktadır. Arazinin sınırlayıcı bir faktör olarak ön plana çıktığı ülkelerde ise bölge payları daha yüksek düzeylere ulaşmaktadır; örneğin, Hollanda'da arazi payı %27,7, Japonya ve İsrail'de ise sırasıyla %56,4 ve %47,2 olarak tespit edilmiştir. Türkiye'de tarımda TFV hesaplamasında kullanılan girdilerin oranları, sırasıyla arazi %10,4, traktör %0,21 ve iş gücü %37,7 olarak belirlenirken, Hollanda'da bu oranlar sırasıyla %27,7, %0,52 ve %43,8'dir.

Araştırmaya dair yapılan literatür incelemesinde uzun dönemli analizlerin eksik olduğu görülmektedir. Bu çalışmanın, Türkiye tarım sektörünün 1961-2021 dönemini kapsayan 61 yıllık uzun bir süreçte toplam faktör verimliliğini (TFV) Malmquist TFV Endeksi ile analiz ederek literatürdeki önemli bir boşluğu doldurduğu ve literatüre özgün bir katkı sağladığı değerlendirilmektedir.

3. YÖNTEM

Çalışmada kullanılan 1961-1921 dönemi (toplam çıktı, arazi, işgücü ve sermaye) ikincil veri seti, ABD Tarım Bakanlığı Ekonomik Araştırmalar Servisi (U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service - USDA ERS)'nden elde edilmiştir (USDA ERS, 2024). Araştırmada Malmquist Toplam Faktör Verimliliği (MTFV) Endeksi, Veri Zarflama Analizi (VZA) yöntemi ile ölçülmüştür.

3.1. MTFV Yöntemi

MTFV, bir işletmenin, sektörün veya ekonominin zaman içinde kaynak kullanımında ne kadar verimli olabildiğini ölçmek için kullanılan parametrik olmayan bir yöntemdir. MTFV, yalnızca verimlilik düzeyindeki değişimleri değil, aynı zamanda teknolojik ilerlemelerin etkilerini de dikkate alan bir yöntemdir. İsveç'li ekonomist Sten Malmquist (1953) tarafından geliştirilen bu endeks, daha sonra VZA yöntemine entegre edilerek günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır (Brzezicki, 2025). Caves, Christensen ve Diewert (1982), Malmquist endeksini modern anlamda yorumlamış ve özellikle VZA ve Stokastik Sınır Analizi (SSA) yöntemleriyle hesaplanabilecek hale getirmiştir (Caves ve diğerleri, 1982).

MTFV, farklı dönemler arasındaki üretim fonksiyonlarının karşılaştırılması fikrine dayanmaktadır. Buradaki temel fikir, bir sektörün veya işletmenin belirli bir dönemde ne kadar verimli olduğunu ve bu verimliliğin zaman içinde nasıl değiştiğini anlamaktır. MTFV, işletmenin ya da sektörün girdi bazlı (input-oriented) veya çıktı bazlı (output-oriented) ölçümleri üzerinden analiz edilmesini sağlamakta ve özellikle birden fazla girdi ve çıktının olduğu durumlarda etkili bir çözüm sunmaktadır. MTFV genellikle iki temel bileşene ayrılır; (1) Teknik Verimlilik Değişimi (Technical Efficiency Change - TEC): Girdilerin daha verimli kullanılıp kullanılmadığını gösterir. (2) Teknolojik Değişim (Technological Change - TC): Üretim sınırlarının teknolojik yeniliklerle nasıl değiştiğini açıklar. Bu bilgiler ışığında MTFV endeksi, bir işletmenin veya sektörün verimliliğini, girdi ve çıktı kullanarak ölçer. Bu endeks, verimliliği, belirli bir dönemdeki girdi miktarına oranlanan çıktı miktarı ile ifade etmektedir.

3.2. VZA Yöntemi

MTFV, VZA yöntemi ile hesaplanır. VZA, bir işletmenin verimliliğini, girdi ve çıktı kullanarak ölçmektedir. MTFV endeksini hesaplamak için aşağıdaki adımlar izlenir; (1. Adım): Girdi ve Çıktı Verileri Toplanır: İşletmenin veya sektörün belirli bir dönemdeki girdi ve çıktı verileri toplanır. Girdi verileri, sermaye, emek, enerji gibi kaynaklar olabilirken, çıktı verileri, üretim miktarı, satış gelirleri gibi ölçümler olabilmektedir. (2. Adım): VZA Yöntemi ile Verimlilik Ölçülür: VZA, çok girdili ve çok çıktılı karar birimlerinin (Decision Making Units - DMUs) göreceli etkinliğini değerlendirmek için kullanılan parametrik olmayan bir yöntemdir. Bu yöntem, ilk olarak Charnes, Cooper ve Rhodes (1978) tarafından geliştirilmiş olup, işletmelerin ya da karar birimlerinin verimlilik sınırını (efficiency frontier) belirler. VZA, matematiksel programlama teknikleri kullanarak her birim için bir etkinlik skoru hesaplamakta ve bu skoru en iyi performans gösteren birimlerle karşılaştırmaktadır.

VZA'da birimler, belirli bir üretim sürecine dayalı olarak girdi (input) ve çıktı (output) kullanımları üzerinden değerlendirilir. Amaç, bir birimin minimum girdiyi kullanarak maksimum çıktıyı üretilip üretilmediğini belirlemektir. VZA, etkinlik analizini iki şekilde gerçekleştirir; (1) Girdi Kaynaklı (Input-Oriented) Yaklaşım: Sabit çıktıyı koruyarak girdi miktarını azaltmayı hedeflemekte ve genelde karar verici birimin çıktıdan ziyade girdi üzerinde kontrolünün olduğunu göstermektedir. (2) Çıktı Kaynaklı (Output-Oriented) Yaklaşım: Sabit girdilerle çıktıyı artırmayı amaçlar, ki bu yaklaşımdan DMU'lar optimum girdi bileşenini kontrol etmekten ziyade elde edilecek çıktı üzerinde kontrolü olduğu durumda kendini göstermektedir.

Bu iki yaklaşım, farklı işletme stratejilerine bağlı olarak seçilebilir. VZA'nın temel modeli, Charnes-Cooper-Rhodes (CCR) modeli olarak bilinir ve bu model Sabit Getiriler Altında Ölçek (Constant Returns to Scale - CRS) varsayımına dayanmaktadır. Daha gelişmiş bir model olan Banker-Charnes-Cooper (BCC) modeli ise Değişken Getiriler Altında Ölçek (Variable Returns to Scale - VRS) varsayımını kullanmaktadır (Banker, Charnes ve Cooper, 1984).

3.2.1. CCR Modeli

Sabit Getiriler Altında Ölçek (Constant Returns to Scale - CRS) varsayımı, birimlerin girdilerindeki herhangi bir oransal değişikliğin (örneğin, %10 artış) çıktılarında aynı oranda değişikliğe yol açacağını ifade etmektedir. Bu, üretim sürecinde ölçek etkilerinin olmadığı durumlarda geçerli bir varsayımdır.

Matematiksel olarak: $F(ax) = a \cdot F(x)$

Burada a girdilerdeki ölçek değişim oranını ifa ederken $F(x)$ girdi seti x 'in üretim fonksiyonu ile çıktıya dönüşümüdür. CRS varsayımının gerekliliği ve mantığı şu şekilde ifade edilebilir:

- Ölçek Etkilerinden Arınmış Etkinlik Analizi: CRS, birimin sadece teknik etkinliğini ölçmeye odaklanır. Ölçek ekonomilerinden kaynaklanan avantajları ya da dezavantajları dikkate almaz. Bu, ölçek etkilerinin olmadığı veya ihmal edilebileceği durumlarda birimin üretim sürecini izole ederek saf bir etkinlik ölçümü yapılmasını sağlar.
- Homojenlik Varsayımı: CRS, analiz edilen birimlerin birbirine benzer üretim süreçlerine sahip olduğu varsayımına dayanır. Örneğin, aynı sektörde faaliyet gösteren küçük ölçekli birimler ile büyük ölçekli birimler arasında ölçek farklılıklarından kaynaklanan avantaj veya dezavantajların olmadığı varsayılır.

- Basitlik: CRS modeli, diğer VZA modellerine kıyasla daha az karmaşıktır ve ölçek getirilerinin etkisini dışarıda bırakarak hesaplama sürecini sadeleştirir. Özellikle ölçek etkilerinin net olarak bilinmediği durumlarda CRS tercih edilebilir. Bu ifade, ölçek büyüklüğünden bağımsız olarak üretim sürecinde sabit oranlı bir dönüşümün olduğunu varsaymaktadır.

CRS varsayımı, birimlerin teknik etkinliklerini ölçmeyi ve bu etkinliklerin girdilere oranla ne kadar iyi dönüştürüldüğünü anlamayı amaçlamaktadır. Teknik etkinlik, iki faktöre bağlıdır: (1) Girdi ve çıktı kullanımı arasındaki denge (teknik etkinlik). (2) Ölçek büyüklüğünün optimal olup olmadığı (ölçek etkinliği). CRS modeli yalnızca birinci faktöre odaklanır. Ölçek etkinliği üzerinde çalışmayı gerektiren durumlar için daha gelişmiş modeller (örneğin BCC modeli) kullanılır.

CRS varsayımının, belirli sektörlerde veya endüstrilerde homojen girdilerle çalışırken uygundur. Elektrik üretiminde belirli bir teknolojiyle çalışan santraller ve standart üretim süreçlerine sahip tarım işletmeleri gibi durumlar, örnek olarak verilebilir.

Çoğu sektörde ölçek büyüklüğüne bağlı olarak üretim maliyetleri ve çıktı verimliliği değişir. CRS, bu farklılıkları göz ardı etmektedir. Çok farklı ölçeklerde çalışan birimler analiz ediliyorsa, CRS bu farklılıkları dengeleyemez. Örneğin, küçük ölçekli bir işletme ile büyük ölçekli bir işletme CRS altında benzer sonuçlar alabilmektedir, ancak gerçek dünyada farklı avantaj ve dezavantajlara sahiptirler. CRS modeli, bir birimin ölçeğinin optimal olup olmadığını veya ölçeğinin küçültülmesi ya da büyütülmesi gerektiğini söyleyemez. Zikredilen bu hususlar CRS varsayımının kısıtlarını oluşturmaktadır.

Bir DMU'nun etkinliğini ölçmek için aşağıdaki doğrusal programlama problemi çözülür (Eşitlik 1-4):

$$\text{Ençokla (maximize): } \theta = \sum_{r=1}^s u_r y_{rs} \quad (1)$$

Kısıtlar (constraints):

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rk} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} \leq 0, \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$u_r, v_i \geq 0, \forall r = 1, 2, \dots, s, \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

Burada θ , birimin ağırlığını; y_{rj} , j birimindeki r çıktı miktarını; x_{ij} , j birimindeki i girdi miktarını; u_r , r çıktısının ağırlığını ve v_i , i girdisinin ağırlığını ifade etmektedir.

CRS varsayımı, özellikle ölçek etkilerinin önemsiz olduğu veya analiz edilen birimlerin homojen özelliklere sahip olduğu durumlarda güçlü bir araçtır. Ancak, analiz edilen birimler arasında ölçek farklılıkları belirgin ise veya ölçek getirilerinin önemli olduğu düşünülüyorsa, CRS yerine BCC gibi değişken getiriler modeli kullanılmalıdır. Ayrıca CCR model hem girdi yönlü hem de çıktı yönlü olarak ifade edilmektedir. Girdi yönlü CCR modeli, belirli bir çıktı seviyesine ulaşmak için girdileri en az seviyeye getirmeye (minimize) çalışır (Eşitlik 5-8):

$$\text{Ençokla (maximize): } \theta \quad (5)$$

Kısıtlar (constraints):

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq \theta x_{io}, \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq y_{ro}, \forall r = 1, 2, \dots, s \quad (7)$$

$$\lambda_j \geq 0, \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

Burada θ , verimlilik skorunu; x_{ij} , j birimindeki i girdi miktarını; y_{rj} , j birimindeki r çıktı miktarını ve λ_j , ağırlık değişkenini ifade etmektedir. Bu model, her birim için en iyi ağırlık setini bulmaya çalışır ve girdileri minimize ederken çıktı seviyelerini korur. Öte yandan çıktı yönlü CCR modeli, belirli bir girdi seviyesini kullanarak çıktı miktarını maksimize etmeye çalışır (Eşitlik 9-12):

$$\text{Ençokla (maximize): } \phi \quad (9)$$

Kısıtlar (constraints):

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq \theta x_{io}, \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq \phi y_{ro}, \forall r = 1, 2, \dots, s \quad (11)$$

$$\lambda_j \geq 0, \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

Burada: ϕ , verimlilik skorunu; x_{ij} , j birimindeki i girdi miktarını; y_{rj} , j birimindeki r çıktı miktarını; λ_j , ağırlık değişkenini ifade etmektedir.

Bu model, her birim için en iyi ağırlık setini bulmaya çalışır ve çıktıları maksimize ederken girdi seviyelerini korur. Bu bağlamda CCR modelinin hem girdi yönlü hem de çıktı yönlü formülasyonları, verimliliği ölçmek için kullanılan güçlü araçlardır. Girdi yönlü model, belirli bir çıktı seviyesine ulaşmak için girdileri en azlamaya (minimize) etmeye çalışırken, çıktı yönlü model, belirli bir girdi seviyesini kullanarak çıktıları en çoklamaya (maksimize) etmeye çalışır. Bu modeller, birimlerin verimliliklerini analiz etmek ve karşılaştırmak için önemli araçlar sunmaktadır.

3.2.2. BCC Modeli

BCC modeli, CRS modeline bir ölçek değişkeni (λ) ekler. Matematiksel formülasyonu şu şekilde gösterilir (Eşitlik 13-15):

$$\text{Ençokla (maximize): } \theta_k = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rk}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ik}} \quad (13)$$

Kısıtlar (constraints):

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1, \lambda_i \geq 0 \quad (15)$$

BCC modeli, ölçek etkilerini ortadan kaldırarak birimlerin verimliliklerini sadece teknik açıdan değerlendirir. Bu model, işletmelerin farklı ölçeklerde faaliyet gösterdiği durumları dikkate alır ve bu nedenle, ölçek etkinliği analizi için uygundur. BCC modeli, CCR modeline benzer, ancak ek bir ölçek değişkeni içerir. BCC modeli aynı zamanda girdi ve çıktı yönlü olarak da kurgulanabilir. Girdi Yönlü BCC Modeli Eşitlik 16-21'de verilmiştir.

$$\text{Ençokla (maximize): } \theta - \varepsilon (\sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+) \quad (16)$$

Kısıtlar (constraints):

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = \theta x_{io}, \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{ro}, \forall r = 1, 2, \dots, s \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (19)$$

$$\lambda_j \geq 0, \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

$$s_i^- \geq 0, s_i^+ \geq 0 \quad (21)$$

Burada: θ , verimlilik skorunu; x_{ij} , j birimindeki i girdi miktarını; y_{rj} , j birimindeki r çıktı miktarını; λ_j , ağırlık değişkenini, s_i^- , girdi fazlalık değişkenini, s_i^+ , çıktı eksiklik değişkenini, ε , pozitif küçük bir sabiti temsil etmektedir. Bu modelde, $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ kısıtı, ölçek değişkenliğini temsil eder ve değişken ölçekli getirileri dikkate alır.

Çıktı Yönlü BCC Modeli ise Eşitlik 22-27'deki gibidir.

$$\text{Ençokla (maximize): } \phi - \varepsilon (\sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+) \quad (22)$$

Kısıtlar (constraints):

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = x_{io}, \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = \phi y_{ro}, \forall r = 1, 2, \dots, s \quad (24)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (25)$$

$$\lambda_j \geq 0, \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (26)$$

$$s_i^- \geq 0, s_i^+ \geq 0 \quad (27)$$

Burada: ϕ , verimlilik skorunu (çıktı yönlü) ifade etmektedir. Diğerleri de girdi yönlü modeldeki gibidir.

BCC modelinin kendine özgü bazı özellikleri bulunmaktadır. Bunlar: (1) Değişken Ölçekli Getiriler (VRS): BCC modeli, birimlerin farklı ölçeklerde faaliyet gösterdiği durumları dikkate alır. Bu nedenle, model ölçek etkinliğini analiz etmek için uygundur. (2) Girdi Fazlalıkları ve Çıktı Eksiklikleri: Model, girdi fazlalıkları ve çıktı eksikliklerini hesaba katarak verimliliği ölçer. (3) Ağırlık Değişkenleri: Ağırlık değişkenleri (λ_j), her birimin performansını en iyi şekilde temsil eden değerleri bulmak için kullanılır. Tüm bu özellikler bakımından BCC modeli, işletmelerin veya birimlerin göreceli verimliliklerini değişken ölçekli getiriler varsayımı altında değerlendiren bir VZA modelidir. Bu model, girdi ve çıktı verilerini kullanarak verimliliği

ölçer ve ölçek değişkenliğini dikkate alır. Bu sayede, işletmelerin veya birimlerin verimlilikleri ve ölçek etkinlikleri daha doğru bir şekilde analiz edilebilir.

3.2.3. MTFV Endeksi

VZA ile hesaplanan verimlilik endeksleri kullanılarak, MTFV endeksi hesaplanır. Bu endeks, bir işletmenin veya sektörün verimliliğinin zaman içindeki değişimini gösterir. Bu endeks, teknik verimlilik değişimi ve teknolojik değişim bileşenlerini içerir. Malmquist endeksi, iki farklı zaman dilimindeki (t ve t+1) girdi ve çıktı verilerini kullanarak aşağıdaki şekilde hesaplanır (Eşitlik 28):

$$M_t^{t+1} = \left(\frac{D_t^0(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_t^0(x_t, y_t)} \times \frac{D_{t+1}^0(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_{t+1}^0(x_t, y_t)} \right)^{1/2} \quad (28)$$

Burada: M_t^{t+1} , t döneminden t+1 dönemine geçişteki Malmquist endeksini; $D_t^0(x_t, y_t)$, t dönemindeki girdi ve çıktılar kullanılarak hesaplanan verimliliği; $D_{t+1}^0(x_{t+1}, y_{t+1})$: t+1 dönemindeki girdi ve çıktılar kullanılarak hesaplanan verimliliği temsil etmektedir.

Bu endeks, iki bileşenden oluşur:

1. Teknik Verimlilik Değişimi (Technical Efficiency Change, TEC): Bir karar biriminin mevcut kaynaklarla teknik etkinliğini nasıl geliştirdiğini veya kötüleştiğini ifade eder. Bu bileşen, girdileri ne kadar iyi bir şekilde çıktılarına dönüştürdüğünü ölçer. Matematiksel olarak, iki dönem arasındaki göreceli etkinlik (veya verimlilik) skorlarının oranı olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır (Eşitlik 29):

$$TEC = \frac{D_{t+1}^0(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_t^0(x_t, y_t)} \quad (29)$$

2. Teknolojik Değişim (Technical Change, TC) (Eşitlik 30):

$$TC = \left(\frac{D_t^0(x_{t+1}, y_{t+1}) \times D_{t+1}^0(x_t, y_t)}{D_{t+1}^0(x_{t+1}, y_{t+1}) \times D_t^0(x_t, y_t)} \right)^{1/2} \quad (30)$$

Sonuç olarak MTFV endeksi şu şekilde ifade edilir (Eşitlik 31):

$$M_t^{t+1} = TEC \times TC = \frac{D_{t+1}^0(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_t^0(x_t, y_t)} \times \left(\frac{D_t^0(x_{t+1}, y_{t+1}) \times D_{t+1}^0(x_t, y_t)}{D_{t+1}^0(x_{t+1}, y_{t+1}) \times D_t^0(x_t, y_t)} \right)^{1/2} \quad (31)$$

Bu formüller, MTFV endeksinin bileşenlerini ve genel yapısını göstermektedir. Endeksin değeri 1'den büyükse, verimlilik artışı; 1'den küçükse, verimlilik düşüşü ve 1'e eşitse, verimlilikte bir değişim olmadığı anlamına gelmektedir. Benzer şekilde TEC birden büyükse teknik etkinlik artmış, bire eşit ise teknik etkinlikte değişim meydana gelmemiş ve birden küçükse teknik etkinlik azalmış anlamı taşımaktadır. Aynı kural TC'ye de uygulanmaktadır. VZA yöntemi ve MTFV endeksi, işletmelerin ve sektörlerin verimliliğini değerlendirmek için güçlü araçlardır. Bu yöntemler, girdi ve çıktı verilerini kullanarak verimlilik analizi yapmakta ve zaman içindeki değişimleri göstermektedir. Bu sayede, sektörlerin veya işletmelerin verimliliklerini iyileştirmek için stratejik kararlar alınabilmektedir.

4. BULGULAR

Bu araştırmada, toplam tarımsal üretim değeri (Total Output), arazi kullanımı (Land), işgücü (Labor) ve sermaye (Capital) göstergeleri açısından yol gösterici bulgular elde edilmiştir. Türkiye'nin tarımsal üretim performansına ilişkin elde edilen istatistikler (Tablo 1) de verilmiştir.

Tablo 1. Türkiye için betimleyici istatistikler

Değişkenler	Ortalama	Standart Sapma	Jarque-Bera	p-değeri
Toplam Çıktı (Total Output)	40755649,560	16150319,540	3,533	0,171
Arazi (Land)	32596,070	1997,460	6,912	0,032
İşgücü (Labor)	7301,040	1406,950	6,461	0,040
Sermaye (Capital)	66245,100	27038,190	5,567	0,062

İncelenen dönemde toplam çıktı ve sermaye dağılımları normalliğe daha yakın olup, toplam çıktı ve sermaye göstergelerinde görece daha istikrarlı bir yapı söz konusudur. Ancak bu istikrar, üretim düzeyinin (toplam çıktının) yeterli olduğu anlamına gelmemektedir (Tablo 1).

Tablo 2. Türkiye için CRS ve VRS ölçekleri ve girdi ve çıktı kaynaklı TEC, TC ve Malmquist endeks ölçümleri

Ölçümler	Girdi-Kaynaklı				Çıktı-Kaynaklı			
	CRS		VRS		CRS		VRS	
	Std.		Std.		Std.		Std.	
	Ortalama	Sapma	Ortalama	Sapma	Ortalama	Sapma	Ortalama	Sapma
TEC	0,991	0,044	0,996	0,023	1,011	0,045	1,011	0,044
TC	1,007	0,039	1,002	0,017	0,994	0,038	0,994	0,038
MTFV	0,997	0,037	0,998	0,020	1,004	0,037	1,004	0,036

4.1. TEC, TC ve Malmquist Endeksinin Değerlendirilmesi**4.1.1. Girdi-Kaynaklı Analiz**

Türkiye'nin girdi-kaynaklı CRS ölçümüne göre teknik etkinlik değişimi (TEC) ortalaması 0,991, teknolojik değişim (TC) ortalaması 1,007 ve MTFV endeks değeri 0,997 olarak hesaplanmıştır (Tablo 2). Bu durum, Türkiye'nin genel olarak teknik etkinlikte nispeten önemsiz bir kayıp yaşadığını, ancak tarım sektörü teknolojik gelişiminde olumlu bir ilerleme kaydettiğini göstermektedir.

VRS ölçümünde ise TEC 0,996'ya yükselmiş ve teknik etkinliğin değişken getiri varsayımı altında daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu da tarım işletmelerinin ölçek etkinliklerine daha duyarlı olduğunu göstermektedir ve özellikle 2000 yıllardan sonra emek-yoğun işletme yönetiminden sermaye-yoğun işletme yönetimine geçişi (kaymayı) de işaret etmektedir (Tablo 2).

4.1.2. Çıktı-Kaynaklı Analiz

Çıktı kaynaklı analizde CRS ve VRS ölçümleri TEC için 1,011 olarak bulunmuştur. Bu değerler, çıktı kaynaklı analizde teknik verimlilik kaybı yaşanmadığını, hatta bu alanda bir gelişim kaydedildiğini ortaya koymaktadır.

TC değerleri ise girdi-kaynaklı analize kıyasla daha düşüktür (0,994), bu da çıktı odaklı teknolojik ilerlemenin daha sınırlı kaldığını göstermektedir. MTFV endeksi açısından ise çıktı kaynaklı sonuçlar (1,004), Türkiye'nin üretim performansını genel anlamda sürdürebildiğini, hatta hafif bir ilerleme gösterdiğini işaret etmektedir (Tablo 2).

Türkiye için 1961-2021 yılları arası 10'ar yıllık periyotlarla CRS ve VRS ölçeklerinde girdi ve çıktı kaynaklı TEC, TC ve MTFV endeks ölçümleri için yapılan detaylı hesaplamalar, Tablo 3 ve Tablo 4'de sunulmaktadır.

Tablo 3. Türkiye için 10'ar yıllık priyotlarla CRS ölçeği ve girdi ve çıktı kaynaklı TEC, TC ve Malmquist endeks ölçümleri

Yıl Dilimleri	Girdi-Kaynaklı			Çıktı-Kaynaklı		
	TEC	TC	MTFV	TEC	TC	MTFV
	Ortalama	Ortalama	Ortalama (Std.	Ortalama	Ortalama	Ortalama
	(Std. Sapma)	(Std. Sapma)	Sapma)	(Std. Sapma)	(Std. Sapma)	(Std. Sapma)
1961-1970	1,010 (0,037)	0,986 (0,021)	0,997 (0,030)	0,990 (0,037)	1,010 (0,022)	1,000 (0,030)
1971-1980	0,983 (0,038)	1,010 (0,009)	0,993 (0,044)	1,020 (0,041)	0,991 (0,009)	1,010 (0,046)
1981-1990	1,020 (0,045)	0,969 (0,026)	0,991 (0,043)	0,979 (0,044)	1,030 (0,028)	1,010 (0,044)
1991-2000	0,996 (0,038)	0,987 (0,019)	0,983 (0,044)	1,010 (0,038)	1,010 (0,019)	1,020 (0,043)
2001-2010	0,973 (0,039)	1,040 (0,030)	1,010 (0,031)	1,030 (0,042)	0,964 (0,028)	0,992 (0,031)
2011-2021	0,959 (0,039)	1,060 (0,037)	1,010 (0,026)	1,040 (0,042)	0,949 (0,034)	0,990 (0,025)

CRS ölçeği baz alınarak hesaplanan 10'ar yıllık periyotlara ilişkin bulgular aşağıda açıklanmaktadır (Tablo 3).

4.2. Dönemsel CRS Ölçeği ve Girdi-Çıktı Kaynaklı TEC, TC ve MTFV Endekslerinin Değerlendirilmesi

1961-1970 döneminde, girdi kaynaklı TEC ortalaması 1,010 ve çıktı kaynaklı TEC ortalaması 0,990 olarak belirlenmiştir. Bu durum, Türkiye'nin girdi verimliliğinde küçük bir artış olduğunu ancak çıktılar açısından nispeten düşük performans sergilediğini göstermektedir. TC oranlarının girdi ve çıktı kaynaklı olarak birbirine zıt olması dikkat çekicidir; girdi kaynaklı TC 0,986 iken, çıktı kaynaklı TC 1,010'dur. Bu farklılıkların, teknolojik uygulamalarda uyumsuzluk ve heterojenlik olduğu anlamına gelebileceği değerlendirilmektedir. Genel olarak, MTFV endeksi her iki yöntem için de 1 civarındadır, bu da verimlilikte belirgin bir değişiklik

olmadığını göstermektedir. Bu bağlamda 1961-1970 dönemi verileri, Türkiye'nin üretim verimliliğinde sınırlı ancak yönü belirgin bir dönüşüm süreci içerisinde olduğunu göstermektedir. Teknolojik uyumsuzluklar ve çıktı etkinliğindeki düşüklük, sürdürülebilir bir verimlilik artışı için bütüncül ve çok katmanlı politikalara ihtiyaç olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

1971-1980 döneminde, girdi kaynaklı TEC 0,983 iken, çıktı kaynaklı TEC 1,020'dir. Bu veriler, girdi verimliliğinde azalma, ancak çıktı verimliliğinde artış olduğunu ortaya koymaktadır. Bu dönemde girdi kaynaklı TC 1,010 ve çıktı kaynaklı TC 0,991 olarak belirlenmiştir. Teknolojik değişim oranlarındaki bu zıtlığın, teknolojik yeniliklerin farklı etkilerine işaret edebileceği değerlendirilmektedir. MTFV endeksleri girdi kaynaklı olarak 0,993 ve çıktı kaynaklı olarak 1,010'dur, bu da genel verimlilik artışının sınırlı olduğunu göstermektedir.

1981-1990 döneminde, girdi kaynaklı TEC 1,020 iken, çıktı kaynaklı TEC 0,979'dur. Bu, girdi verimliliğinde bir artış, ancak çıktı verimliliğinde bir azalış olduğunu göstermektedir. Girdi kaynaklı TC 0,969 ve çıktı kaynaklı TC 1,030 olarak belirlenmiştir. Bu dönem, teknolojik değişimlerin, girdi ve çıktı verimliliğine farklı etkileri olduğunu ortaya koymaktadır. MTFV endeksleri, girdi kaynaklı olarak 0,991 ve çıktı kaynaklı olarak 1,010'dur, bu da genel verimlilikte hafif bir artış işaret etmektedir.

1991-2000 döneminde, girdi kaynaklı TEC 0,996 ve çıktı kaynaklı TEC 1,010'dur. Bu, girdi verimliliğinde bir azalma, ancak çıktı verimliliğinde bir artış olduğunu göstermektedir. Girdi kaynaklı TC 0,987 ve çıktı kaynaklı TC 1,010 olarak belirlenmiştir. Teknolojik değişimlerin etkisi genel olarak pozitifdir. MTFV endeksleri, girdi kaynaklı olarak 0,983 ve çıktı kaynaklı olarak 1,020'dir, bu da verimlilikte genel bir iyileşme olduğunu göstermektedir.

2001-2010 döneminde, girdi kaynaklı TEC 0,973 ve çıktı kaynaklı TEC 1,030'dur. Bu durum, girdi verimliliğinde bir azalma, ancak çıktı verimliliğinde belirgin bir artış olduğunu göstermektedir. Girdi kaynaklı TC 1,040 ve çıktı kaynaklı TC 0,964 olarak belirlenmiştir. Bu dönemde teknolojik değişimlerin etkisi karmaşıktır. MTFV endeksleri, girdi kaynaklı olarak 1,010 ve çıktı kaynaklı olarak 0,992'dir, bu da genel verimlilikte sınırlı bir değişiklik olduğunu göstermektedir.

2011-2021 döneminde, girdi kaynaklı TEC 0,959 ve çıktı kaynaklı TEC 1,040'tır. Girdi verimliliğinde belirgin bir azalma, ancak çıktı verimliliğinde belirgin bir artış olduğunu göstermektedir. Girdi kaynaklı TC 1,060 ve çıktı kaynaklı TC 0,949 olarak hesaplanmıştır. Teknolojik değişimlerin etkisi yine farklılık göstermektedir. MTFV endeksleri, girdi kaynaklı olarak 1,010 ve çıktı kaynaklı olarak 0,990'dır, bu da genel verimlilikte hafif bir iyileşme olduğunu göstermektedir.

Tablo 4. Türkiye için 10'ar yıllık priyotlarla VRS ölçeği ve girdi ve çıktı kaynaklı TEC, TC ve MTFV endeks ölçümleri

Yıl Dilimleri	Girdi-Kaynaklı			Çıktı-Kaynaklı		
	TEC Ortalama (Std. Sapma)	TC Ortalama (Std. Sapma)	MTFV Ortalama (Std. Sapma)	TEC Ortalama (Std. Sapma)	TC Ortalama (Std. Sapma)	MTFV Ortalama (Std. Sapma)
1961-1970	1,000 (0,020)	1,000 (0,012)	1,000 (0,012)	1,000 (0,037)	0,999 (0,022)	0,999 (0,030)
1971-1980	0,982 (0,023)	1,020 (0,006)	0,999 (0,025)	1,020 (0,041)	0,984 (0,010)	1,010 (0,046)
1981-1990	1,010 (0,031)	0,991 (0,020)	0,997 (0,027)	0,983 (0,044)	1,030 (0,031)	1,010 (0,045)
1991-2000	0,996 (0,025)	0,991 (0,016)	0,987 (0,028)	1,010 (0,037)	1,020 (0,024)	1,020 (0,043)
2001-2010	0,999 (0,017)	1,000 (0,015)	1,000 (0,011)	1,010 (0,041)	0,984 (0,043)	0,991 (0,020)
2011-2021	0,994 (0,017)	1,010 (0,017)	1,000 (0,008)	1,040 (0,045)	0,952 (0,038)	0,993 (0,025)

VRS ölçeği baz alınarak hesaplanan 10'ar yıllık periyotlara ilişkin bulgular şu şekildedir (Tablo 4);

4.3. Dönemsel VRS Ölçeği ve Girdi-Çıktı Kaynaklı TEC, TC ve MTFV Endekslerin Değerlendirilmesi

1961-1970 döneminde hem girdi hem de çıktı kaynaklı TEC, TC ve MTFV endekslerinin ortalamaları 1 civarındadır. Bu durum, anılan dönemde verimlilik değişimlerinin çok sınırlı olduğunu ve teknolojik değişimlerin etkisinin nötr olduğunu göstermektedir.

1971-1980 döneminde, girdi kaynaklı TEC 0,982 iken, çıktı kaynaklı TEC 1,020'dir. Bu durum, girdi verimliliğinde azalış, ancak çıktı verimliliğinde artış olduğunu göstermektedir. Girdi kaynaklı TC 1,020 ve

çıktı kaynaklı TC 0,984 olarak ölçülmüştür. MTFV endeksleri, girdi kaynaklı olarak 0,999 ve çıktı kaynaklı olarak 1,010 olarak bulunmuştur, bu durum da genel verimlilikte sınırlı bir artış olduğunu göstermektedir.

1981-1990 döneminde, girdi kaynaklı TEC 1,010 ve çıktı kaynaklı TEC 0,983 olarak ölçülmüştür. Bu dönemde girdi verimliliğinde artış, ancak çıktı verimliliğinde düşüş olduğu görülmektedir. Girdi kaynaklı TC 0,991 ve çıktı kaynaklı TC 1,030 olarak belirlenmiştir. Bu zaman aralığında, teknolojik değişimlerin farklı etkileri dikkat çekmektedir. MTFV endeksleri, girdi kaynaklı olarak 0,997 ve çıktı kaynaklı olarak 1,010 olarak hesaplanmıştır, bu da genel verimlilikte hafif bir artışa işaret etmektedir.

1991-2000 döneminde, girdi kaynaklı TEC 0,996 ve çıktı kaynaklı TEC 1,010'dur. Bu durum, girdi verimliliğinde azalış, ancak çıktı verimliliğinde artış olduğunu göstermektedir. Girdi kaynaklı TC 0,991 ve çıktı kaynaklı TC 1,020 olarak belirlenmiştir. Bu periyotta teknolojik değişimlerin etkisi genel olarak pozitifdir. MTFV endeksleri, girdi kaynaklı olarak 0,987 ve çıktı kaynaklı olarak 1,020'dir, bu da verimlilikte genel bir iyileşme olduğunu işaret etmektedir.

2001-2010 döneminde, girdi kaynaklı TEC 0,999 ve çıktı kaynaklı TEC 1,010 olarak bulunmuştur. Bu dönemde, girdi verimliliğinde sınırlı bir değişim meydana gelirken, çıktı verimliliğinde belirgin bir artış olmuştur. Girdi kaynaklı TC 1,000 ve çıktı kaynaklı TC 0,984 olarak belirlenmiştir. MTFV endeksleri, girdi kaynaklı olarak 1,000 ve çıktı kaynaklı olarak 0,991 olarak ölçülmüştür, bu da genel verimlilikte sınırlı bir değişiklik olduğunu göstermektedir.

2011-2021 döneminde, girdi kaynaklı TEC 0,994 ve çıktı kaynaklı TEC 1,040 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, girdi verimliliğinde sınırlı bir düşüş, ancak çıktı verimliliğinde belirgin bir artış olduğunu göstermektedir. Girdi kaynaklı TC 1,010 ve çıktı kaynaklı TC 0,952 olarak belirlenmiştir. MTFV endeksleri, girdi kaynaklı olarak 1,000 ve çıktı kaynaklı olarak 0,993 olarak ölçülmüştür, bu durum da genel verimlilikte sınırlı bir iyileşme olduğunu ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, Türkiye'nin 1961-2021 dönemi tarımsal verimlilik performansı, toplam üretim değeri, arazi kullanımı, işgücü ve sermaye göstergeleri üzerinden analiz edilmiştir. Çalışmada, Teknik Etkinlik Değişimi (TEC), Teknolojik Değişim (TC) ve Malmquist Toplam Faktör Verimliliği (MTFV) endeksleri Sabit Getiri Ölçeği (CRS) ve Değişken Getiri Ölçeği (VRS) altında incelenerek, tarımsal verimliliğin zaman içerisindeki gelişimi değerlendirilmiştir. Sabit ve değişken getiri varsayımları altında, hem girdi hem de çıktı yönlü modellerle yapılan analizler, sektörün verimlilik dinamiklerine ilişkin önemli bulgulara ulaşılmasını sağlamıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Türkiye'nin tarımsal verimliliği yıllar boyunca farklı dönemlerde girdi ve çıktı verimliliği açısından değişiklikler göstermektedir. Özellikle çıktı yönlü analizlerde teknik etkinliğin genel olarak istikrarlı ya da hafif artış eğiliminde olduğu, buna karşın teknolojik değişimin katkısının dönemsel olarak istikrarsız seyrettiği görülmektedir. Bu durum, tarımsal verimlilikteki artışların çoğunlukla mevcut kaynakların daha etkin kullanımından kaynaklandığını, teknolojik ilerlemenin ise sınırlı kaldığını göstermektedir. CRS ve VRS ölçeklerinde yapılan analizler, girdi ve çıktı kaynaklı verimlilik değişikliklerinin dönemlere göre farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Genel olarak, teknolojik değişimlerin etkisi hem pozitif hem de negatif olabilmektedir, bu da destekleyici politikaların ve teknolojik yeniliklerin dikkatlice değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

1961-2021 Döneminde Türkiye'nin tarımsal verimliliği, girdi odaklı teknik etkinlikte düşüş (TEC, 1,010'dan 0,959'a) ve çıktı odaklı etkinlikte (TEC, 0,990'dan 1,040'a) artış göstermiştir. Teknolojik değişim (TC) karışık etkiler göstermiş; son dönemde girdi odaklı TC 1,060'a yükselirken, çıktı odaklı TC 0,949'a düşmüştür. Toplam faktör verimliliği (MTFV) genelde sabit kalarak sınırlı bir iyileşme göstermiştir. Bu çalışma, Türkiye'nin tarımsal verimliliğinin, önceki çalışmalarla hem benzerlikler hem de farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Avcı ve Kaya (2008), Türkiye'nin 1992-2004 döneminde geçiş ekonomilerinden daha yüksek MTFV (0,826) sergilediğini, ancak teknolojik değişimde (0,990) geride kaldığını belirtmiştir. Bu çalışmada, son dönemde (2011-2021) girdi odaklı TC'nin 1,060'a yükselmesi, teknolojik ilerlemenin arttığını, ancak çıktı odaklı TC'nin 0,949'a düşmesi, bu ilerlemenin çıktılar üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Karaman ve Özalp (2017), 2003-2014 döneminde TFV'nin yıllık %1 büyüdüğünü, etkinlik değişiminin (%0,8) ve teknolojik değişimin (%0,1) katkı sağladığını bulmuştur. Bu çalışmada, MTFV'nin 1 civarında sabit kalması, benzer bir istikrarı yansıtırken, çıktı odaklı TEC'nin artışı (1,040), bölgesel farklılıkların etkisini desteklemektedir. Elde edilen bulgular, teknoloji adaptasyonu ve eğitim odaklı politikaların, özellikle küçük çiftliklerin girdi verimliliğini artırmak için kritik olduğunu göstermektedir. Yaman ve diğerleri (2024), teknolojik değişimin önemini vurgulamıştır, bu çalışma da çıktı odaklı verimlilik artışını desteklemektedir. Koç ve diğerleri (2023), insan sermayesinin TFV'yi artırdığını belirtirken, bu çalışmadaki işgücü değişkenliği, tarımsal istihdamın olumsuz etkisini yansıtmaktadır.

Verimlilik artışını destekleyici politikalar, kaynak tahsisini, yeni teknolojilerin benimsenmesini ve tarım sektörünün genel rekabetçiliğini etkileyebilmektedir. Ancak, bu politikaların TFV'yi artırmadaki etkinliğinin,

kurumsal kalite, gelişmişlik düzeyi ve tarım sektörünün yapısal özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak farklılık gösterdiği de bilinmektedir. Araştırmaya konu edilen 61 yıllık süreçte, tarımsal reformlar, kamu politikaları, ekonomik dönüşümler ve yatırım seviyesindeki istikrarsız sürecin TFV dinamiklerini şekillendirdiği anlaşılmaktadır. Çıktı yönlü teknik etkinlik son dönemlerde artış eğilimine sahipken, girdi yönlü analizler özellikle işgücü ve arazi kullanımında kısıtları işaret etmektedir. Sabit sermaye yatırımları, makineleşme ve eğitim gibi faktörlerin verimlilik üzerindeki etkisi, dönemler bazında dalgalanma göstermektedir.

Türkiye tarım sektöründe sürdürülebilir verimlilik artışının sağlanabilmesi, teknik etkinlik kadar teknolojik gelişmenin desteklenmesini de gerektirmektedir. Araştırmada elde edilen bulgular, özellikle son 20 yılda teknolojik gelişmelerin etkisinin azaldığını, buna karşılık teknik etkinliğin çıktı yönlü ölçümlerde artış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ulaşılan sonuçlar, tarımsal verimlilik artışının tek boyutlu politikalarla değil, yapısal reformlar içeren, teknoloji, eğitim ve danışmanlık destek bileşenlerinden müteşekkil kurumsal bir yapının inşasıyla mümkün olabileceğini göstermektedir. Bu neticelere bağlı olarak aşağıdaki önerilerin sunulmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir; (1) Ar-Ge yatırımları, teknoloji transferi ve inovasyon destekleri yükseltilmelidir. (2) Bölgelerin koşullarına uygun, farklılaştırılmış tarımsal destek politikaları uygulanmalıdır. (3) Tarımsal işletmelerin eğitim, yayım ve danışmanlık desteğine erişimi artırılmalıdır. (4) Uzun dönemli mukayeseli verimlilik araştırmalarının yapılabilmesi için ulusal ölçekte tarımsal veri toplama mekanizması güçlendirilmelidir. (5) Arazi toplulaştırılması ve çiftçilerin finansmana erişiminin kolaylaştırılması gibi yapısal reformlar tamamlanmalı ve tarımsal yatırım teşvikleriyle desteklenmelidir. Öz bir ifadeyle; Türkiye'nin tarımsal verimliliğini artırmak için teknolojiye yapılan yatırımların artırılması ve modern tarım tekniklerinin daha yaygın bir şekilde uygulanması gerekmektedir.

Çalışmanın sadece Türkiye geneline yönelik olması nedeniyle; bölgesel farklılıklara bağlı olarak ortaya konulabilecek muhtemel sonuçlara ulaşılammış olması, çalışmanın başlıca kısıtını oluşturmaktadır. Türkiye geneli ile coğrafi bölgeler düzeylerine dair sonuçları mukayeseli olarak ortaya koyabilecek uzun dönemli çalışmaların yapılması literatüre katkı sağlayacaktır.

Yazar Katkıları / Author Contributions

Mehmet Ali Cevheri: Literatür Taraması, Kavramsallaştırma, Veri Derleme, Makale Yazımı-rijinal taslak

Nihat Küçük: Metodoloji, Analiz, Modelleme, Makale Yazımı-inceleme ve düzenleme

Mehmet Ali Cevheri: Literature Review, Conceptualization, Data Curation, Writing-original draft

Nihat Küçük: Methodology, Analysis, Modelling, Writing-review and editing

Çatışma Beyanı / Conflict of Interest

Yazarlar tarafından herhangi bir potansiyel çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No potential conflict of interest was declared by the authors.

Fon Desteği / Funding

Bu çalışmada herhangi bir resmi, ticari ya da kâr amacı gütmeyen organizasyondan fon desteği alınmamıştır.

Any specific grant has not been received from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Etik Standartlara Uygunluk / Compliance with Ethical Standards

Yazarlar tarafından, çalışmada kullanılan araç ve yöntemlerin Etik Kurul izni gerektirmediği beyan edilmiştir.

It was declared by the authors that the tools and methods used in the study do not require the permission of the Ethics Committee.

Etik Beyanı / Ethical Statement

Yazarlar tarafından bu çalışmada bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan edilmiştir.

It was declared by the authors that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.



Yazarlar, Verimlilik Dergisi'nde yayımlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptirler ve çalışmaları CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayımlanmaktadır.

The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.

KAYNAKÇA

- Avcı, M.A. ve Kaya, A.A. (2008). "Geçiş Ekonomileri ve Türk Tarım Sektöründe Etkinlik ve Toplam Faktör verimliliği Analizi (1992-2004)", *Ege Academic Review*, 8(2), 843-860.
- Banker, R.D., Charnes, A. ve Cooper, W.W. (1984). "Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis", *Management Science*, (30) 9, 1078-1092.
- Besharat, A. ve Amirahmadi, M. (2011). "The study of factors affecting productivity in the agriculture sector of Iran", *African Journal of Agricultural Research*, 6(18), 4340-4348.
- Brzezicki, Ł. (2025). "Origin and Evolution of Malmquist Productivity Index: Review of the Literature", *Central European Economic Journal*, 12(59), 102-119. <https://doi.org/10.2478/ceej-2025-0007>
- Bureau, J. ve Antón, J. (2022), "Agricultural Total Factor Productivity and the environment: A guide to emerging best practices in measurement", *OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers*, No. 177, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/6fe2f9e0-en>
- Caves, D.W., Christensen, L.R. ve Diewert, W.E. (1982). "The Economic Theory of Index Numbers and the Measurement of Input, Output, and Productivity", *Econometrica*, 50, 1393-1414. <https://doi.org/10.2307/1913388>
- Charnes, A., Cooper, W.W. ve Rhodes, E. (1978) "Measuring the Efficiency of Decision Making Units", *European Journal of Operational Research*, 2, 429-444. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
- Coelli, T.J. ve Rao, D.P. (2005). "Total Factor Productivity Growth in Agriculture: A Malmquist Index Analysis of 93 Countries 1980-2000", *Agricultural Economics*, 32, 115-134.
- Coomes, O.T., Barham, B.L., MacDonald, G.K., Ramankutty, N. ve Chavas J.P. (2019). "Leveraging Agricultural Total Factor Productivity Growth for Productive, Sustainable and Resilient Farming Systems", *Nature Sustainability*, 2(1), 22-28. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0200-3>
- Dünya Bankası. (2011). "Climate-Smart Agriculture: Increased Productivity and Food Security, Enhanced Resilience and Reduced Carbon Emissions for Sustainable Development (English)". Working Paper, Report Number: 76238, World Bank, Washington DC. <http://documents.worldbank.org/curated/en/501551468163165831> (Erişim Tarihi: 04.12.2024).
- Giang, M.H., Xuan, T.D., Trung, B.H. ve Que, M.T. (2019). "Total Factor Productivity of Agricultural Firms in Vietnam and Its Relevant Determinants", *Economies*, 7(1), 4. <https://doi.org/10.3390/economies7010004>
- Karaman, S. ve Özalp, A. (2017). "Türkiye Tarım Sektörü Bölgesel Toplam Faktör Verimliliğinin Malmquist Endeks ile Belirlenmesi", *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University*, 34(1), 209-217. <https://doi.org/10.13002/jafag4200>
- Keizer, T.H. ve Emvalomatis, G. (2014). "Differences in TFP Growth among Groups of Dairy Farms in the Netherlands", *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 70, 33-38. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2014.03.001>
- Koç, A., Özdamar, Ö. ve Uysal, P. (2023). "What Explains Total Factor Productivity in Agriculture: An Empirical Investigation Using Panel Data Analysis", *Mediterranean Journal of Economics, Agriculture, Environment and Food (New Medit)*, 2023(2). <https://doi.org/10.30682/nm2302f>
- Le Clech, N.A. ve Fillat-Castejon, C. (2020). "New Estimates of Total Factor Productivity, Technical and Efficiency Changes for the Global Agricultural Economy", *Spanish Journal of Agricultural Research*, 18(2), e0104. <https://doi.org/10.5424/sjar/2020182-15224>
- Mollavelioğlu, M.Ş. ve Ceylan, R. (2010). "Türkiye ve AB Ülkelerinde Tarımsal Toplam Faktör Verimliliği ve Yakınsama Analizi", *Akdeniz İİBF Dergisi*, 10(20), 86-103.
- Moreira, V.H. ve Bravo-Ureta, B.E. (2016). "Total Factor Productivity Change in Dairy Farming: Empirical Evidence from Southern Chile", *Journal of Dairy Science*, 99(10), 8356-8364. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11055>
- Popp, J., Petó, K. ve Nagy, J. (2013). "Pesticide Productivity and Food Security: A Review", *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 243-255. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0105-x>
- Rahman, S. ve Salim, R. (2013). "Six Decades of Total Factor Productivity Change and Sources of Growth in Bangladesh Agriculture (1948-2008)", *Journal of Agricultural Economics*, 64(2), 275-294. <https://doi.org/10.1111/1477-9552.12009>
- USDA ERS (2024). "U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service", International Agricultural Productivity. <https://www.ers.usda.gov/data-products/international-agricultural-productivity> (Erişim Tarihi: 28.08.2024).
- Vergil, H. ve Abasız, T. (2008). "Toplam Faktör Verimliliği, Hesaplanması ve Büyüme İlişkisi: Collins Bosworth Varyans Ayırıştırması", *Kocaeli Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 16, 160-188.
- Yaman, H., Sungur, O. ve Dulupçu M.A. (2024), "Measuring the Agricultural Total Factor Productivity of Provinces in Turkey Using Malmquist Index", *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 67, 191-196. <https://doi.org/10.18070/erciyesiibd.1345345>

Measuring the Performance of Airport Operations in Türkiye with The MPSI Based MABAC Method

Nalan Gülten Akın¹ 

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this study is to evaluate the air transportation performances of airports in Türkiye with the MPSI-based MABAC method, using data between 2015 and 2024.

Methodology: MPSI (Modified Preference Selection Index Method) based MABAC (Multi Attributive Border Approximation Area Comparison) method was used in the study. The MPSI method was applied to determine objective criterion weights, and the MABAC method was applied to rank airports according to their performance and compare their performances.

Findings: As a result of the analysis, the airport with the highest performance in the period covered by the study is Istanbul Airport. Sabiha Gökçen Airport is in second place. In third place is Ankara Esenboğa between 2015 and 2018, İzmir Adnan Menderes in 2020, and Antalya Airport in other periods. The airports with the lowest performance were Çanakkale Gökçeada Airport in 2015, 2016, 2019, 2022 and 2024, Siirt Airport in 2018, and Balıkesir Merkez Airport in 2017, 2020, 2021 and 2023.

Originality: In the literature review, no study was found in which the MPSI and MABAC methods used in the current study were used together in measuring the performance of airports in Türkiye and around the world.

Keywords: Performance Management, Airports, MPSI, MABAC.

JEL Codes: L23, L93, C02.

Türkiye'deki Havalimanları İşletmelerinin Performanslarının MPSI Tabanlı MABAC Yöntemi İle Ölçülmesi

ÖZET

Amaç: Bu çalışmanın amacı, Türkiye'deki havalimanlarının 2015-2024 yılları arasındaki verileri kullanarak, hava taşımacılık performanslarının MPSI tabanlı MABAC yöntemi ile değerlendirilmesidir.

Yöntem: Çalışmada MPSI (Değiştirilmiş Tercih Seçim İndeksi) tabanlı MABAC (Çok Nitelikli Sınır Yakınlık Alanı Kıyaslaması) yöntemi kullanılmıştır. MPSI yöntemi objektif kriter ağırlıklarının belirlenmesi, MABAC yöntemi de havalimanlarının performanslarına göre sıralanması ve performanslarının karşılaştırılması amacı ile uygulanmıştır.

Bulgular: Analizler sonucunda, çalışmanın kapsadığı dönemde en yüksek performansa sahip havalimanı İstanbul Havalimanı'dır. İkinci sırada Sabiha Gökçen Havalimanı yer almaktadır. Üçüncü sırada, 2015-2018 yılları arasında Ankara Esenboğa, 2020 yılında İzmir Adnan Menderes, diğer dönemlerde ise Antalya Havalimanı görülmektedir. En düşük performansa sahip havalimanları 2015, 2016, 2019, 2022 ve 2024 yıllarında Çanakkale Gökçeada Havalimanı, 2018 yılında Siirt Havalimanı, 2017, 2020, 2021 ve 2023 yıllarında da Balıkesir Merkez Havalimanı olmuştur.

Özgünlük: Yapılan literatür taramasında, Türkiye'deki ve dünyadaki havalimanlarının performanslarının ölçülmesinde, mevcut çalışmada kullanılan MPSI ve MABAC yöntemlerinin birlikte kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Anahtar Kelimeler: Performans Yönetimi, Havalimanları, MPSI, MABAC.

JEL Kodları: L23, L93, C02.

¹ Yozgat Bozok University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Business Administration, Yozgat, Türkiye

Corresponding Author: Nalan Gülten Akın, nalan.akin@bozok.edu.tr

DOI: 10.51551/verimlilik.1647363

Research Article | Submitted: 26.02.2025 | Accepted: 28.07.2025

Cite: Akın, N.G. (2025). "Measuring the Performance of Airport Operations in Türkiye with The MPSI Based MABAC Method", *Verimlilik Dergisi*, 59(4), 803-826.

1. INTRODUCTION

Air transportation is defined as “The airborne movement of people, load (cargo) and mail aerial displacement by an aircraft, in a way that provides space and time benefits.” In addition to flights made for profit purposes, flights made for personal purposes also fall within the scope of this definition (Gerede, 2015). The aviation industry continues to develop with increasing momentum day by day. The most important reason for this is that air transportation is fast and reliable. The increase in demand in air transportation has led to an increase in airport investments. With airport investments, the number of domestic flight destinations has increased. Additionally, with the addition of new destinations to the international flight network, the Turkish aviation sector has shown a significant development. There are currently 57 airports in Türkiye (SHGM, 2023).

Airport investments are very costly investments. The investment cost for vehicles used for air transportation is also quite high and the carrying capacity of these vehicles is limited. Therefore, effective and efficient operation of airports is very important for the aviation industry.

This study aims to measure the performance of airports in Türkiye using total movements traffic, commercial movements traffic, passenger traffic, freight traffic and cargo traffic criteria. For this purpose, analyzes were carried out using the MPSI-based MABAC method.

Unlike other multi-criteria decision-making techniques, the MPSI method does not require determining the relative weights of the criteria. For this reason, it is preferred in cases where it is difficult to determine relative criterion weights. Instead of relative criterion weights values, preference index values are usually calculated. The preference index value is determined for each alternative. It is based on the variation between normalized values and mean values for each criterion using Euclidean distance. Thus, criterion weights can be determined objectively (Gligorić et al., 2022).

The MABAC method is a method that has a simple calculation process and reliable results can be obtained. It also has a number of advantages, such as easy integration with other decision-making methods and taking into account the potential value of profit and loss (Wang et al., 2024).

The number of studies using these methods in the literature is quite limited. No study has been found in which both methods were used integrately. For this reason, in this study, MPSI was preferred as the criterion weighting method and MABAC was preferred as the method of ranking airports according to their performance. In addition, these methods are used for the first time in evaluating the performance of airports. In the literature, it can be seen that Data Envelopment Analysis (DEA) is mainly used by researchers to evaluate the performance of airports in Türkiye. DEA is a method based on linear programming and used to evaluate the effectiveness of similar decision-making units. For this reason, DEA is used to compare production units that use similar inputs and produce similar outputs by considering inputs and outputs together. It also prolongs the solution process for large-sized problems. By applying the MPSI-based MABAC method, evaluation can be made by taking only inputs, only outputs, or inputs and outputs together as decision criteria, and solutions for large-scale problems can be easily obtained. For this reason, MPSI and MABAC methods were used in this study as an advantageous alternative to existing methods. Therefore, this study is expected to contribute to the literature.

In this context, within the scope of the study, firstly, general information about the subject and aims of the study is given in the introduction section. In the second section, the literature research, the literature on the performance measurement of airports and studies conducted using MPSI and MABAC methods was examined in detail, and information was given about previous studies on the subject. The third section includes the application steps of MPSI and MABAC methods. In the findings section; the purpose, scope, method, population and data collection process of the research are explained. To determine the performance of airports, analyzes were made with the MPSI based MABAC method and the findings were presented in detail. Finally, a general evaluation was made regarding the results achieved and suggestions were developed.

2. LITERATURE REVIEW

In this section, information is given about the performance measurement of airports and the studies carried out using MPSI and MABAC methods.

2.1. Literature Review on Airport Performance Measurement

Oum et al. (2005) evaluated the performance of 10 major airlines in North America during the period 1990-2001. For this purpose, indicators such as revenue, number of employees, average cost per employee, average stage length, weight load factor, passenger revenue, freight revenue and incidental revenue were

used. Airlines' gross total factor productivity, cost competitiveness and average yields were measured and compared.

Ömürbek et al. (2013) divided 40 airports affiliated with the General Directorate of State Airports Authority in Türkiye into large, medium-sized and small airports according to flight traffic and passenger traffic and measured their efficiency with data envelopment analysis (DEA). As a result of the study, information was given about airports that can be reference for ineffective airports. Among the major airports, Atatürk and Antalya airports are effective, while Muğla Dalaman Airport is an ineffective airport. Among the medium-sized airports, Samsun Çarşamba, Kayseri, Van Ferit Melen and Malatya airports are effective airports. Among the small airports, Balıkesir Körfez, Adıyaman, Sinop and Amasya Merzifon airports are effective airports. There is no ineffective airport in medium-sized and small airports.

Using data from 2013-2014, Avcı and Aktaş (2015) investigated the activity in domestic and international flights, which shows the current performance of airports in Türkiye in summer and winter. For this purpose, operational data regarding the number of personnel, terminal area, number of passengers, load voltage and the total aircraft network are used. Analyzes were carried out using the data envelopment analysis (DEA) method. As a result of the study, the airport with the highest efficiency in the summer period of 2013 was determined as Atatürk Airport, the airport with the lowest efficiency as Esenboğa Airport, the airport with the highest efficiency in the summer period of 2014 as Atatürk Airport, the airport with the lowest efficiency as Erzurum Airport, the airport with the highest efficiency as Nevşehir Airport and the airport with the lowest efficiency as Şanlıurfa Airport. The airport with the highest efficiency in the winter period of 2013 was determined as Atatürk Airport, the airport with the lowest efficiency was Elazığ Airport, the airport with the highest efficiency in the winter period of 2014 was determined as Atatürk Airport, the airport with the lowest efficiency as Şanlıurfa Airport, the airport with the highest efficiency as Denizli Airport and the airport with the lowest efficiency as Kayseri Airport.

Kiracı and Bakır (2019) examined the financial performance of 13 airline companies (Air Canada, Air France, Air New Zealand, Alaska Air, China Eastern, China Southern, Delta Air, Lufthansa, Qantas Airways, Republic Airways, Singapore Airlines, Skywest and United Continental) with 10 million-150 million passengers in terms of the number of passengers carried, before and after the global financial crisis, using data for the period 2005-2012. The decision criteria were determined as seat miles offered, cost per seat mile offered, revenue per seat mile offered, paid passenger miles and revenue per passenger mile. The CRITIC method was used to determine the importance levels of the criteria used in the study, and the EDAS method was used to rank the airline companies according to their financial performance. As a result of the study, it was seen that the financial performance of all airline companies except China Eastern was higher before the global financial crisis, and that airline companies were also affected by the global financial crisis in the years after the crisis. In addition, it was determined that 2010 was the year in which the negative effects of the financial crisis were felt the most for airline companies.

Mercan and Atalay (2021) evaluated the performances of airports operating in Türkiye with clustering and TOPSIS methods, using the criteria of the number of domestic and international aircraft, the number of domestic and international passengers, the number of domestic and international commercial aircraft, and the amount of domestic and international cargo. In the study, airports were first divided into nine clusters using the hierarchical clustering method according to the criteria. Criteria weights were determined by taking expert opinion. The performances of the obtained clusters were evaluated with the TOPSIS method. As a result of the study, in terms of criteria, the effective airports are Istanbul Airport in Cluster 5, Istanbul Sabiha Gökçen Airport in Cluster 9, Antalya Airport in Cluster 6, Istanbul Atatürk Airport in Cluster 8, Ankara Esenboğa and İzmir Adnan Menderes Airport in Cluster 7; Airports in Cluster 4, Cluster 3 and Cluster 2 were determined as less efficient airports, and airports in Cluster 1 were determined as ineffective airports. In addition, intra-cluster performance values and airport rankings were made for each cluster.

Kaya et al. (2022) analyzed the efficiency of 39 international airports in Türkiye with an integrated method consisting of super-efficient data envelopment analysis (DEA) and eigenvector centrality analysis. Additionally, the Simar-Wilson bootstrapping approach was used to identify important factors affecting efficiency. As a result of the study, it was seen that the most effective airports were Istanbul Atatürk, Adana and Diyarbakır airports, which were closed in 2019.

In his study, Aydın (2023) proposed a hybrid efficiency analysis approach consisting of the integration of principal component analysis (PCA), categorical data envelopment analysis (DEA) and Simar-Wilson methods for airport efficiency analysis. It carried out an application with the data of the airports in Türkiye for the period 2013-2021. According to the results of the efficiency analysis, the airport that used its resources most effectively among large-scale airports was Atatürk Airport, while after the opening of Istanbul Airport, it became Sabiha Gökçen Airport. Uşak Airport is the only active small-scale airport. In addition, as a result of the application of the Simar-Wilson method used for the analysis of environmental

impacts, it was stated that the GDP (Gross Domestic Product) values of the provinces where the airports are located do not have a statistically significant effect on the activities of the airports, on the other hand, although it has a small effect, the increase in the population of the provinces positively affects the airport performance and is statistically significant.

2.2. MPSI Method Literature Review

Gligorić et al. (2022) proposed a new method based on the hybrid MPSI-MARA decision-making model for support system selection in an underground mine. The proposed model was tested on a hypothetical sample and a comparative analysis was conducted. As a result of the study, it was seen that the model is a very useful and effective tool to solve different multi-criteria decision-making problems.

In his study, Yılmaz (2023) analyzed the financial data of multi-branch deposit banks in Türkiye with the MPSI-MARA integrated ranking model. Seven different financial ratios were used as performance criteria to carry out the analysis. The MPSI method was preferred for weighting the selected criteria, and the MARA method was preferred for ranking the banks according to their performance.

Akbulut and Aydın (2024) analyzed the multidimensional sustainability performances of deposit banks operating in the Turkish banking sector. For this purpose, a new approach consisting of MSD and MPSI methods for determining criterion weights and RAWEC methodologies for ranking has been developed. Additionally, sensitivity analyzes and benchmarking analyzes were conducted to test the proposed model.

2.3. MABAC Method Literature Review

Chatterjee et al (2018) applied hybrid D-ANP-MABAC methods for risk management in construction projects. They developed the extended MABAC method in D numbers to rank and select the best alternative risk response strategy. He also conducted sensitivity analysis of the resulting ranking of the hybrid D-ANP-MABAC model to check the feasibility of the proposed approach.

Božanić, Jovo and Tešić (2018) conducted a study based on fuzzification of the MABAC method in order to select the most suitable location for bridge construction.

In his study, Ulutaş (2019) proposed a multi-criteria decision-making model in which Entropy and MABAC methods were used together to determine the most suitable marketing manager for a furniture workshop.

In their work, Wang et al. (2020) introduced the q-step orthopair fuzzy MABAC model by taking into account some basic theories of the traditional MABAC model and the q-step orthopair fuzzy set.

Altın (2021) used the MABAC method to measure the financial performance of companies traded on Borsa Istanbul that declared profits in the 2020-9 balance sheet period. Market value / Book value, price / earnings, market value and net profit were taken as decision criteria.

Mandal and Seikh (2023) introduced a hybrid multi-attribute group decision-making method based on the entropy method, deviation-based method and MABAC method to select the most effective plastic waste management process. In this model, entropy and deviation-based methods were used to calculate the decision experts and attribute weights, respectively. They also used the MABAC method to evaluate the priority order of plastic waste management options.

Ran (2023) a new method for performance evaluation of sustainable microfinance group loans is proposed. A numerical example is given in the study and some comparisons are made to show the advantages of the SVNN-MABAC method.

Öksüzkaya and Atan (2023) used ENTROPİ-MABAC methods to rank development and investment banks operating in the Turkish Banking system according to their financial performance in the 2016-2021 period.

In their study, Apan and Tiyek (2023) evaluated Türkiye's macroeconomic performance for the 2008-2021 period with the integrated CRITIC-based MABAC approach, using criteria such as economic growth, investment rate, export rate, import rate, current account balance rate, unemployment rate, inflation rate and interest rate.

Yavuz and Sönmez (2023) ranked the financial performance of the companies in the BIST Corporate Governance Index using the data between 2019 and 2021 using the CRITIC-MABAC and ENTROPY-MABAC methods.

As seen from the literature research, Data Envelopment Analysis (DEA) is mainly used by researchers to evaluate the performance of airports in Türkiye. DEA is a method based on linear programming and used to evaluate the effectiveness of similar decision-making units. For this reason, DEA is used to compare production units that use similar inputs and produce similar outputs by considering inputs and outputs together. It also prolongs the solution process for large-sized problems. By applying the MPSI-based

MABAC method, evaluation can be made by taking only inputs, only outputs, or inputs and outputs together as decision criteria, and solutions for large-sized problems can be easily obtained. For this reason, MPSI and MABAC methods were used in this study as an advantageous alternative to existing methods. This situation is expected to contribute to the literature.

3. METHODOLOGY

MPSI method based MABAC method was used in the study. The MPSI method was applied to determine objective criterion weights, and the MABAC method was applied to rank airports according to their performance and compare their performances.

3.1. MPSI Method

The basis of the MPSI (Modified PSI) method is based on the PSI (Preference selection index) method. The PSI method was first developed by Maniya and Bhatt in 2010 to solve the material selection problem among multi-criteria decision-making problems (Maniya and Bhatt, 2010). In their study, Gligorić et al. (2022) improved the MPSI method by making some changes to the PSI method. With the MPSI method, weight coefficients can be easily determined to calculate the objective weights of the criteria. MPSI is a very useful and flexible method for solving multi-criteria decision-making problems.

The MPSI method is based on the change in preference value for each criterion. This change is expressed using Euclidean distance. Shows the distance between the normalized value and the average value for each criterion. The implementation steps of MPSI are listed below (Gligorić et al., 2022):

Step 1: A decision matrix expressed as $X = [x_{ij}]_{m \times n}$ is created, where m represents the number of alternatives and n represents the number of criteria. The x_{ij} values in the matrix are i . alternative j . shows its performance in terms of criteria.

Step 2: The initial values in the decision matrix are expressed as values between [0, 1] by performing a linear normalization process according to the optimum goal. The new matrix is called the normalized matrix and is denoted as $[r_{ij}]_{m \times n}$. If the optimum goal is benefit, Equation 1 is applied, if it is cost, normalized values (r_{ij}) are calculated by applying Equation 2.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}} \quad (1)$$

$$r_{ij} = \frac{\min x_{ij}}{x_{ij}} \quad (2)$$

Step 3: The average (v_j) of the normalized values of criterion j based on the alternatives is calculated by applying Equation 3.

$$v_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_{ij} \quad (3)$$

Step 4: Preference variation value (p_j) is calculated using Equation 4.

$$p_j = \sum_{i=1}^m (r_{ij} - v_j)^2 \quad (4)$$

Step 5: Criterion weights (w_j) are determined by dividing the j . preference variation value by the total variation value. Equation 5 shows how to do the calculation.

$$w_j = \frac{p_j}{\sum_{j=1}^n p_j} \quad (5)$$

3.2. MABAC Method

MABAC (Multi Attributive Border Approximation Area Comparison) method, which is among the multi-criteria decision-making methods, is based on calculating the distances of the decision criteria taken into consideration in the evaluation of alternatives to the border proximity area. The method is a multi-criteria decision-making method developed by Pamučar and Čirović (2015). The application process of the MABAC method consists of six steps, detailed below (Pamućar and Čirović, 2015).

Step 1: In the MABAC method, first the decision matrix $X = [x_{ij}]_{m \times n}$ is created.

Step 2: In this step, necessary calculations are made to normalize the values in the decision matrix. The linear constant method is used for this purpose. According to the linear constant method, if the criterion objective is benefit, Equation 6 is applied, and if it is cost, Equation 7 is applied and the necessary calculations are made. Where n_{ij} represents the normalized value of the i . alternative in terms of j . criteria:

$$n_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{jmin}}{X_{jmax} - X_{jmin}} \quad (6)$$

$$n_{ij} = \frac{X_{jmax} - X_{ij}}{X_{jmax} - X_{jmin}} \quad (7)$$

Step 3: Criterion weight being w_j , i . alternative j . In terms of the criterion, the weighted normalized value V_{ij} is calculated using Equation 8 and the weighted normalized decision matrix is obtained.

$$V_{ij} = w_j(n_{ij} + 1) \quad (8)$$

Step 4: j . If the boundary proximity value of the criterion is expressed as g_j , the boundary proximity values for each criterion are determined using Equation 9 and the boundary proximity area matrix is created.

$$g_j = \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m V_{ij}} \quad (9)$$

Step 5: Equation 10 is applied to calculate the distances of the values in the weighted normalized decision matrix from the border proximity field matrix values.

$$Q_{ij} = V_{ij} - g_j \quad (10)$$

Here, Q_{ij} indicates the distance of the alternative to the border proximity area in terms of criterion j .

Step 6: In this step, the sum of the distances (S_i) of the alternatives from the border proximity area is calculated using Equation 11.

$$S_i = \sum_{j=1}^n Q_{ij} \quad (11)$$

The largest value obtained as a result of this calculation indicates the best alternative in the decision problem.

4. FINDINGS

The operation of airports within the borders of Türkiye is carried out by General Directorate of State Airports Authority (DHMI). Among the airports, Aydın Çıldır, Gazipaşa Alanya, Zafer and Zonguldak Çaycuma airports are operated by a private company under the supervision of DHMI, Istanbul Sabiha Gökçen Airport is operated by a private company under the supervision of the Presidency of Defense Industries, and Eskişehir Hasan Polatkan Airport is operated by Eskişehir Technical University.

In this study, the air transportation performances of 55 airport operators in Türkiye between January 2015 and August 2024 were analyzed. For this purpose, data for the years in question were obtained from the comparative statistics of airports published by the General Directorate of State Airports Authority of Republic of Türkiye Ministry of Transport and Infrastructure (DHMI, 2024). Since the data for 2024 covers an eight-month period, the data for all years were converted to monthly average values. Çukurova Airport was opened in August 2024 and Rize-Artvin Airport was opened in May 2022 which is included in the DHMI report. Therefore, these airports were excluded from the analysis due to lack of data covering the study period. In addition, with the opening of Istanbul Airport in 2019, both domestic and international terminals of Istanbul Atatürk Airport were closed to scheduled passenger traffic. However, general aviation and cargo terminals with private flights continue their operations. For this reason, data from Istanbul Atatürk and Istanbul Airports were used together.

Recognition codes determined for airports are used in aviation. These codes are used in two different ways: IATA (International Air Transport Association) codes and ICAO (International Civil Aviation Organization) codes. ICAO codes were used in this study. Airport codes are included in Table 1.

Table 1. Airports and ICAO codes in Türkiye

<i>Airports</i>	<i>ICAO Code</i>	<i>Airports</i>	<i>ICAO Code</i>
İstanbul - İstanbul Atatürk	LTFM	Hakkari Yüksekova S. Eyyubi	LTCW
İstanbul Sabiha Gökçen	LTFJ	Hatay	LTDA
Ankara Esenboğa	LTAC	İğdır Şehit Bülent Aydın	LTCT
İzmir Adnan Menderes	LTBJ	Isparta Süleyman Demirel	LTFC
Antalya	LTAI	Kahramanmaraş	LTCN
Gazipaşa Alanya	LTFG	Kapadokya	LTAZ
Muğla Dalaman	LTBS	Kars Harakani	LTCF
Muğla Milas-Bodrum	LTFE	Kastamonu	LTAL
Adana	LTAf	Kayseri	LTAU
Trabzon	LTCG	Kocaeli Cengiz Topel	LTBQ
Erzurum	LTCE	Konya	LTAN
Gaziantep	LTAJ	Malatya	LTAT
Adıyaman	LTCP	Mardin Prof. Dr. Aziz Sançar	LTCR
Ağrı Ahmed-i Hani	LTCO	Muş Sultan Alparslan	LTCK
Amasya Merzifon	LTAP	Ordu-Giresun	LTCB
Aydın Çıldır	LTBD	Samsun Çarşamba	LTfH
Balıkesir Koca Seyit	LTfD	Siirt	LTCL
Balıkesir Merkez	LTBF	Sinop	LTCM
Batman	LTCJ	Sivas Nuri Demirağ	LTAR
Bingöl	LTCU	Şanlıurfa Gap	LTCS
Bursa Yenişehir	LTBR	Şırnak Şerafettin Elçi	LTCV
Çanakkale	LTBH	Tekirdağ Çorlu Atatürk	LTBU
Çanakkale Gökçeada	LTFK	Tokat	LTAW
Denizli Çardak	LTAY	Uşak	LTBQ
Diyarbakır	LTCC	Van Ferit Melen	LTCI
Elazığ	LTCA	Zafer	LTBZ
Erzincan Yıldırım Akbulut	LTCD	Zonguldak Çaycuma	LTAS
Eskişehir Hasan Polatkan	LTBY		

Ten different performance criteria were used to conduct analysis in the study. Since the aim is to maximize the number of passengers, freight and cargo carried, the direction of all criteria has been determined as benefit. Performance criteria are shown in Table 2.

Table 2. Performance indicators and codes

<i>Performance Criteria</i>	<i>Domestic</i>	<i>International</i>
Total movements traffic	C1	C2
Commercial movements traffic	C3	C4
Passenger traffic	C5	C6
Freight traffic (tons)	C7	C8
Cargo traffic (tons)	C9	C10

4.1. MPSI Method Application

The MPSI method was applied to determine the criterion weights required to solve the decision problem with the MABAC method. The MPSI method is based on a number of numerical calculations. By using Euclidean distance, criterion weights can be determined objectively by taking into account the variation between normalized values and average values for each criterion. Thus, uncertainty regarding the subjective judgments of decision makers is eliminated.

The study covers the years 2015-2024. The steps to apply the MPSI method are shown using 2015 data. Calculations were also made for other years.

MPSI method application started with the creation of the decision matrix. In the decision matrix expressed as $X = [x_{ij}]_{m \times n}$. There are (m) shows the airports, that is the alternatives, and (n) shows the decision criteria. The decision matrix is shown in Table 3.

After the decision matrix is created, the normalized decision matrix is prepared in the second step. For this purpose, since all criteria are beneficial, the necessary calculations were made using Equation 1. Thus, the unit difference between the criteria is eliminated. Table 4 shows the normalized decision matrix.

Table 3. Decision matrix (2015)

<i>Airports</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>	<i>C6</i>	<i>C7</i>	<i>C8</i>	<i>C9</i>	<i>C10</i>
LTFM	11997	26735	11073	26173	1611156	3499854	18554	127673	3647	62248
LTFJ	11366	6897	10760	6309	1543804	798591	11303	16148	513	3726
LTAC	6904	1313	6320	1011	880190	129263	6879	2540	937	369
LTBJ	5513	1736	5035	1596	795454	219.388	7237	3981	1790	263
LTAI	4246	10314	3798	9674	575530	1738587	5351	23640	443	206
LTFG	278	310	249	286	33649	42519	302	591	0	0
LTBS	1193	1612	759	1496	102443	262730	951	3551	6	0
LTFE	1799	1067	1365	826	192426	130730	1667	1804	13	13
LTAf	3229	657	2599	544	381849	60627	3211	971	433	62
LTCG	1921	195	1844	76	270760	9473	2363	203	154	0
LTCE	712	19	572	8	89091	1002	741	25	31	3
LTAJ	1350	118	1204	107	178010	16259	1577	292	134	0
LTCP	142	1	129	0	15956	13	136	0	5	0
LTCO	153	1	117	117	17644	17644	173	173	2	0
LTAP	95	3	89	2	11865	319	96	7	1	0
LTBD	1360	0	2	2	319	319	7	7	1	0
LTFD	666	10	255	7	25982	811	177	18	0	0
LTBF	13	13	0	0	24	24	0	0	0	0
LTCJ	134	0	113	0	16424	29	153	1	13	1
LTCU	101	2	89	89	11322	11322	113	113	1	0
LTBR	542	29	112	16	13246	2380	124	58	0	1
LTBH	377	6	132	0	13969	41	76	1	0	0
LTFK	10	10	0	0	41	41	1	1	0	0
LTAY	516	7	322	4	42240	631	329	14	28	0
LTCC	1180	12	1119	8	173760	1257	1378	32	60	5
LTCA	570	22	515	18	77444	2403	669	60	10	1
LTCd	220	1	180	0	24604	50	233	1	4	0
LTBY	381	42	2	35	199	4128	2	97	4	0
LTCW	16	16	15	15	1740	1740	18	18	0	0
LTDA	592	208	532	200	74151	23495	700	396	6	0
LTCT	129	1	115	115	17675	17675	202	202	2	0
LTFC	1858	89	56	73	6428	13686	53	199	1	0
LTCN	197	0	159	159	19064	19064	168	168	6	0
LTAZ	302	9	233	2	29926	296	303	5	1	0
LTCF	267	1	225	225	35672	35672	357	357	4	0
LTAL	69	0	62	62	6913	6913	49	49	1	0
LTAU	1083	171	1027	153	146399	17947	1399	431	51	0
LTBQ	70	3	30	0	3469	9	28	0	0	0
LTAN	660	67	602	53	81447	7690	660	177	20	0
LTAT	581	9	413	6	63061	894	560	23	32	3
LTCR	366	1	324	0	47362	30	438	1	6	1
LTCK	206	1	183	1	28392	97	271	2	4	0
LTCB	151	1	132	1	18448	130	152	3	0	0
LTFH	1357	68	944	42	136602	6168	1140	157	54	1
LTCL	92	92	76	76	5563	5563	51	51	1	1
LTCM	89	1	60	0	7658	43	75	1	1	1
LTAR	350	5	311	3	43722	523	367	12	6	6
LTCS	465	15	401	11	56426	1727	425	40	6	6
LTCV	217	1	152	0	22783	6	234	0	3	3
LTBU	2075	167	84	43	8143	4386	51	200	0	53
LTAW	98	98	68	68	4680	4680	35	35	0	53
LTBQ	149	1	13	13	918	918	6	6	53	53
LTCI	927	11	711	2	115205	322	1026	7	25	25
LTBZ	67	18	57	15	5881	1942	46	47	0	0
LTAS	15	19	15	18	1942	2303	47	50	0	0

Table 4. Normalized decision matrix

<i>Airports</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>
LTFM	1	1	1	1	1
LTFJ	0.947449951	0.257982769	0.971732406	0.241069694	0.958196477
LTAC	0.575528974	0.049118498	0.570740482	0.038634576	0.546309681
LTBJ	0.459557649	0.064950002	0.454682291	0.060992578	0.493716029
LTAI	0.353915725	0.385784998	0.342981644	0.369620245	0.357215753
LTFG	0.023145640	0.011601666	0.022465061	0.010927465	0.02088521
LTBS	0.099410939	0.060293128	0.068554183	0.05715905	0.063583639
LTFE	0.149988191	0.039913845	0.123230453	0.031553375	0.119433649
LTAf	0.269196571	0.024581068	0.23470532	0.020766005	0.237002953
LTcG	0.160157824	0.007278315	0.16651991	0.002900618	0.16805324
LTcE	0.059329805	0.000695102	0.051620721	0.000289743	0.055296215
LTAJ	0.112539769	0.004413745	0.108765513	0.00408188	0.110486037
LTcP	0.011809000	3.42876E-05	0.011627644	3.18399E-06	0.009903706
LTcO	0.012725934	4.67558E-05	0.010536377	0.004457591	0.010950884
LTAP	0.007932869	9.66286E-05	0.008067854	7.64158E-05	0.007364174
LTBD	0.113331666	3.11705E-06	0.000180624	7.64158E-05	0.000198098
LTfD	0.055509246	0.00038028	0.023006931	0.000251535	0.01612636
LTbF	0.001083649	0.00048626	2.2578E-05	9.55198E-06	1.47927E-05
LTcJ	0.011156032	1.55853E-05	0.010205234	1.2736E-05	0.010193664
LTcU	0.008446908	5.9224E-05	0.008067854	0.003413241	0.007027252
LTBR	0.045200684	0.001087851	0.0101375	0.000595407	0.008221684
LTbH	0.031411940	0.000227545	0.011943736	9.55198E-06	0.008670172
LTfK	0.000819684	0.000367812	2.2578E-05	9.55198E-06	2.52924E-05
LTAY	0.042991706	0.000252481	0.029110504	0.000156016	0.026217303
LTcC	0.098368969	0.000461324	0.101096536	0.000292927	0.107847714
LTcA	0.047486072	0.000804199	0.046518104	0.000694111	0.0480674
LTcD	0.018303950	4.98728E-05	0.016256124	1.2736E-05	0.015270919
LTbY	0.031731477	0.001583462	0.000210728	0.001330909	0.000123566
LTcW	0.001361508	0.000610942	0.001377255	0.000582671	0.001079763
LTDA	0.049368566	0.007789512	0.048023300	0.0076384	0.046023267
LTcT	0.010760083	4.05217E-05	0.010423487	0.004409831	0.01097059
LTfC	0.154906292	0.003341479	0.005095091	0.00279873	0.003989837
LTcN	0.016407563	6.2341E-06	0.014382154	0.006084611	0.011832497
LTAZ	0.025139277	0.000333525	0.021012546	8.27838E-05	0.01857393
LTcF	0.022263438	4.67558E-05	0.020312629	0.008593598	0.022140468
LTAL	0.005786410	3.11705E-06	0.005599332	0.002368891	0.004290915
LTAU	0.090248545	0.006408658	0.092772798	0.00583626	0.090865757
LTbQ	0.005855875	0.000105980	0.002664198	3.18399E-06	0.002152957
LTAN	0.055022993	0.002512344	0.054397808	0.0020091	0.050552158
LTAT	0.048423846	0.000333525	0.037283722	0.00022288	0.039140011
LTcR	0.030488059	4.05217E-05	0.02923092	6.36799E-06	0.02939649
LTcK	0.017199461	4.98728E-05	0.016512008	2.54719E-05	0.017622077
LTcB	0.012545326	2.49364E-05	0.011921158	2.54719E-05	0.011449956
LTfH	0.113095486	0.002543514	0.085284445	0.001601549	0.084785185
LTcL	0.007682796	0.003447459	0.006863697	0.002903802	0.003452645
LTcM	0.007377152	2.49364E-05	0.005388604	9.55198E-06	0.004753005
LTAR	0.029133497	0.000202608	0.02804934	0.000124176	0.027137139
LTcS	0.038761305	0.000542367	0.036169876	0.000407551	0.035021902
LTcV	0.018046930	3.74046E-05	0.013689764	3.18399E-06	0.014140778
LTbU	0.173001848	0.006249688	0.007571139	0.001636573	0.005053824
LTAW	0.008175996	0.003668770	0.006096047	0.002579035	0.002905005
LTbQ	0.012455022	2.18194E-05	0.001143949	0.000483967	0.000569829
LTcI	0.077265591	0.000420802	0.064249321	7.64158E-05	0.071504297
LTbZ	0.005578016	0.000657698	0.005185403	0.000569935	0.003650071
LTAS	0.001236472	0.000698220	0.001347151	0.000668639	0.001205346

Table 4. (Continued)

<i>Airports</i>	<i>C6</i>	<i>C7</i>	<i>C8</i>	<i>C9</i>	<i>C10</i>
LTFM	1	1	1	1	1
LTFJ	0.228178288	0.609192772	0.126477316	0.140589778	0.059861996
LTAC	0.036933848	0.370754554	0.019891555	0.256902351	0.00593158
LTBJ	0.06268492	0.390040119	0.031182644	0.490793666	0.004232146
LTAI	0.496759734	0.288392456	0.185163157	0.121367928	0.003309332
LTFG	0.01214872	0.016262591	0.004631376	3.2859E-05	1.92508E-06
LTBS	0.075068959	0.051261134	0.027813318	0.001596451	4.62529E-06
LTFE	0.037352936	0.089865124	0.014130924	0.00347851	0.000203792
LTAf	0.01732265	0.173055944	0.007605274	0.118861067	0.000988037
LTcG	0.002706756	0.127361141	0.001587968	0.042360277	5.6532E-06
LTcE	0.000286179	0.039930531	0.000198817	0.008492689	4.14628E-05
LTAJ	0.004645527	0.085015665	0.002286825	0.036656858	1.19213E-06
LTcP	3.64301E-06	0.007310032	1.42356E-06	0.001331659	6.50139E-06
LTcO	0.005041234	0.009343862	0.001357897	0.000503237	2.45689E-06
LTAP	9.11943E-05	0.0051503	5.44843E-05	0.000226906	1.10779E-06
LTBD	9.11943E-05	0.000374913	5.44843E-05	0.000226905	1.10779E-06
LTfD	0.000231795	0.009530757	0.00014203	1.32076E-05	6.44817E-08
LTBF	6.80981E-06	7.6039E-06	1.10504E-06	1.32076E-05	6.44817E-08
LTcJ	8.33368E-06	0.008226987	5.82348E-06	0.003491695	1.70471E-05
LTcU	0.003234992	0.006110916	0.00088807	0.000326442	1.59375E-06
LTBR	0.000680028	0.006706957	0.000453849	6.58323E-05	9.03638E-06
LTBH	1.16433E-05	0.004092254	5.46318E-06	6.2519E-05	3.05228E-07
LTfK	1.16433E-05	3.75928E-05	5.46318E-06	6.2519E-05	3.05228E-07
LTAY	0.000180412	0.017739975	0.000105837	0.007745683	1.9735E-07
LTcC	0.000359229	0.074263299	0.000248865	0.016433905	8.02332E-05
LTcA	0.000686695	0.036051519	0.000472303	0.002791327	1.36277E-05
LTcD	1.41434E-05	0.012540508	7.91737E-06	0.00100035	4.88388E-06
LTBY	0.001179478	0.000108709	0.000756731	0.001000349	4.55277E-07
LTcW	0.000497068	0.000981042	0.00014257	4.40329E-05	2.14976E-07
LTDA	0.006713208	0.037747363	0.003100032	0.001694868	5.57801E-08
LTcT	0.005050306	0.010878313	0.001580892	0.000635793	3.10405E-06
LTfC	0.003910353	0.002847599	0.001557628	0.000170625	8.3302E-07
LTcN	0.005447084	0.009056364	0.001316117	0.001523306	7.43704E-06
LTAZ	8.45035E-05	0.016313241	4.27336E-05	0.000303569	1.48208E-06
LTcF	0.010192353	0.019258855	0.002798794	0.001116682	5.45183E-06
LTAL	0.00197532	0.002661086	0.000386723	0.000148643	7.25699E-07
LTAU	0.005127856	0.075426494	0.003376465	0.013992099	1.2748E-06
LTBQ	2.45248E-06	0.001532632	1.15203E-06	5.0591E-05	2.46994E-07
LTAN	0.002197091	0.035562678	0.001384987	0.005567664	1.1156E-08
LTAT	0.000255368	0.030180187	0.000178948	0.008718178	4.25636E-05
LTcR	8.61941E-06	0.023618193	5.97752E-06	0.001696605	8.28312E-06
LTcK	2.76916E-05	0.014595164	1.72074E-05	0.001061269	5.1813E-06
LTcB	3.72396E-05	0.008185868	1.99187E-05	3.59439E-05	1.75484E-07
LTfH	0.001762478	0.061457823	0.001230279	0.014868279	1.49803E-05
LTcL	0.001589423	0.002749633	0.000399591	0.000255697	1.49803E-05
LTcM	1.231E-05	0.004016511	6.28494E-06	0.00016626	9.74054E-06
LTAR	0.000149411	0.019760187	9.51155E-05	0.001772126	0.000103822
LTcS	0.000493306	0.022924868	0.000315507	0.001767716	0.000103564
LTcV	1.69055E-06	0.012618357	3.68128E-07	0.000697443	4.08605E-05
LTBU	0.001253147	0.002771003	0.001564776	4.19535E-05	0.000857741
LTAW	0.001337318	0.001876595	0.000272716	6.85515E-06	0.000857741
LTBQ	0.00026232	0.000344529	5.00687E-05	0.014640684	0.000857741
LTcI	9.20515E-05	0.055285703	5.67303E-05	0.006826933	0.000399963
LTBZ	0.00055488	0.002489857	0.000370919	9.1402E-05	5.35489E-06
LTAS	0.000657908	0.00255234	0.000393745	9.1402E-05	5.35489E-06

In the third step of the MPSI method, the average of the normalized criterion values is calculated using Equation 3. Calculation results for all periods in which the study was conducted are given in Table 5.

Table 5. Average of normalized criterion values

Years	C1	C2	C3	C4	C5
2015	0.105202149	0.035504237	0.091546473	0.034566359	0.091284756
2016	0.109574346	0.032790539	0.090839222	0.031179487	0.092309184
2017	0.116063131	0.033762423	0.096512782	0.032781243	0.094502357
2018	0.111720020	0.036033030	0.092544536	0.035113601	0.091184368
2019	0.112947198	0.037528420	0.085851000	0.036873807	0.084516119
2020	0.124735967	0.033387323	0.080183812	0.032579887	0.077378662
2021	0.120447368	0.037283682	0.079837415	0.036793594	0.077339582
2022	0.113201563	0.038883976	0.084995818	0.038777888	0.088692305
2023	0.110566802	0.038120703	0.085920593	0.037970613	0.091595553
2024	0.119884001	0.038526727	0.090413826	0.038437623	0.088004397
Years	C6	C7	C8	C9	C10
2015	0.037011159	0.071207649	0.026294494	0.042443905	0.019601266
2016	0.032006618	0.076077824	0.023840607	0.046181122	0.019650044
2017	0.034161767	0.078475952	0.023801501	0.047711660	0.019611193
2018	0.036092219	0.082908728	0.024152725	0.018678594	0.018729947
2019	0.038426683	0.082395889	0.024466316	0.049115499	0.019034137
2020	0.036366862	0.089338450	0.021329259	0.045813989	0.018840231
2021	0.040944014	0.080062812	0.022465734	0.040103676	0.018818354
2022	0.038731486	0.068826952	0.024064862	0.041204952	0.018860593
2023	0.038470724	0.072059658	0.024398736	0.042548601	0.018846504
2024	0.039180110	0.07290725	0.024219761	0.042684736	0.018745492

After normalized values and the average of normalized values are determined, preference variation values are calculated in the fourth step. For this, Equation 4 is applied. Preference variation values calculated over the years in terms of decision criteria are shown in Table 6.

Table 6. Preference variation value

Years	C1	C2	C3	C4	C5
2015	2.233139065	1.158923499	2.297542887	1.139365631	2.295206233
2016	2.281570553	1.075180349	2.218400757	1.06532519	2.289151107
2017	2.449674817	1.125960679	2.455904429	1.117636982	2.351324127
2018	2.340384038	1.188189675	2.249332339	1.179486964	2.1824074
2019	2.124276212	1.234074237	1.965066812	1.228773431	1.910977668
2020	1.985387423	1.101744747	1.666587647	1.107157335	1.571356825
2021	1.947109828	1.224268842	1.662320933	1.233903982	1.58524195
2022	1.80735126	1.257995341	1.933508039	1.2730766	2.100805042
2023	1.782203481	1.24749192	1.934894393	1.260789573	2.19675739
2024	1.931395172	1.252381247	2.104052732	1.267440633	1.993314425
Years	C6	C7	C8	C9	C10
2015	1.23659917	1.557607979	1.01472922	1.260801037	0.982519395
2016	1.083978525	1.673831661	0.993471433	1.333828129	0.982824111
2017	1.169833363	1.715564561	0.994589233	1.325734356	0.982599608
2018	1.235303471	1.846964335	0.997831929	0.980937714	0.981349968
2019	1.317924412	1.86552035	1.000277426	1.378946143	0.981133832
2020	1.217277907	2.139631156	0.982771575	1.344744085	0.981237168
2021	1.4519694	1.857229038	0.987922208	1.272637872	0.981261337
2022	1.303441412	1.460570255	0.99677782	1.252169085	0.981129608
2023	1.297835092	1.530604844	0.999824722	1.294614445	0.981354482
2024	1.313125001	1.488487288	0.997510797	1.359216698	0.981372105

In the last step of the MPSI method, at first the sum of preference variation values is calculated. Then, the weights of the decision criteria are determined using Equation 5. The total of preference variation values are shown in Table 7, and the criterion weights are shown in Table 8.

Table 7. Total preference variation value

Years	Values
2015	15.17643412
2016	14.99756182
2017	15.68882216
2018	15.18218783
2019	15.00697052
2020	14.09789587
2021	14.20386539
2022	14.36682446
2023	14.52637034
2024	14.68829610

Table 8. Criterion weights

Years	C1	C2	C3	C4	C5
2015	0.147145176	0.07636336	0.151388849	0.07507466	0.151234883
2016	0.152129431	0.071690343	0.147917427	0.071033225	0.152634884
2017	0.15614141	0.071768337	0.156538484	0.071237788	0.149872572
2018	0.154153279	0.078262085	0.148156008	0.077688867	0.143747886
2019	0.141552634	0.082233402	0.130943604	0.081880179	0.127339336
2020	0.140828634	0.078149588	0.118215347	0.078533516	0.11146038
2021	0.137083095	0.086192653	0.117032997	0.086870999	0.111606377
2022	0.12580033	0.087562519	0.134581448	0.088612247	0.146226123
2023	0.12268746	0.085877744	0.133198751	0.086793159	0.151225484
2024	0.131492119	0.085263889	0.14324689	0.086289153	0.135707669
Years	C6	C7	C8	C9	C10
2015	0.081481536	0.102633331	0.066862164	0.083076237	0.064739806
2016	0.072276983	0.111606919	0.066242196	0.088936332	0.065532259
2017	0.074564767	0.109349481	0.063394768	0.084501841	0.062630553
2018	0.081365313	0.121653371	0.065723856	0.064611091	0.064638244
2019	0.087820817	0.124310256	0.066654187	0.091887043	0.065378541
2020	0.086344652	0.151769539	0.069710515	0.095386155	0.069601675
2021	0.10222354	0.130755184	0.069553053	0.089597996	0.069084106
2022	0.090725784	0.101662706	0.069380525	0.087156984	0.068291334
2023	0.089343385	0.105367329	0.068828255	0.089121674	0.067556758
2024	0.08939941	0.101338323	0.067911948	0.092537398	0.066813203

4.2. MABAC Method Application

In this part of the study, the MABAC method was applied to evaluate the performances of airports in Türkiye both by years and according to the performances of other airports. In the first step of the application, the decision matrix is created. Since the decision matrix is given in the application part of the MPSI method, it will not be shown again here. In the second step of the MABAC method, the normalized decision matrix was prepared. The normalized decision matrix prepared with the values related to the calculations made using Equation 6 is included in Table 9.

Table 9. Normalized decision matrix

<i>Airports</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>
LTFM	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
LTFJ	0.947406841	0.257980456	0.971731768	0.241067278	0.958195859
LTAC	0.575180756	0.049115534	0.570730789	0.038631515	0.54630297
LTBJ	0.459114294	0.064947088	0.454669978	0.060989588	0.493708539
LTAI	0.353385706	0.385783084	0.34296681	0.369618238	0.357206244
LTFG	0.022344271	0.011598585	0.022442989	0.010924316	0.020870726
LTBS	0.098672136	0.060290198	0.068533153	0.057156048	0.063569787
LTFE	0.149290879	0.039910852	0.123210657	0.031550291	0.119420623
LTAf	0.268597052	0.024578028	0.234688041	0.020762887	0.236991666
LTcG	0.159468854	0.007275221	0.166501091	0.002897443	0.168040933
LTcE	0.05855812	0.000691988	0.051599308	0.00028656	0.05528224
LTAJ	0.111811735	0.004410642	0.10874539	0.004078709	0.110472878
LTcP	0.010998331	3.11706E-05	0.011605329	0.000000000	0.00988906
LTcO	0.011916018	4.36389E-05	0.010514036	0.004454421	0.010936253
LTAP	0.007119021	9.35118E-05	0.008045458	7.32321E-05	0.00734949
LTBD	0.112604283	0.000000000	0.000158049	7.32321E-05	0.000183308
LTfD	0.054734427	0.000377164	0.022984872	0.000248352	0.016111806
LTbF	0.000264182	0.000483144	0.000000000	6.36801E-06	0.000000000
LTcJ	0.010344828	1.24682E-05	0.010182886	9.55201E-06	0.010179022
LTcU	0.007633482	5.61071E-05	0.008045458	0.003410068	0.007012563
LTbR	0.044417408	0.001084737	0.01011515	0.000592225	0.008207013
LTbH	0.030617353	0.000224428	0.011921427	6.36801E-06	0.008655507
LTfK	0.000000000	0.000364696	0.000000000	6.36801E-06	1.04999E-05
LTAY	0.042206618	0.000249365	0.029088583	0.000152832	0.026202898
LTcC	0.09762931	0.000458208	0.10107624	0.000289744	0.107834516
LTcA	0.046704672	0.000801085	0.046496576	0.000690929	0.048053318
LTcD	0.01749861	4.67559E-05	0.016233913	9.55201E-06	0.015256352
LTbY	0.030937152	0.00158035	0.000188154	0.001327729	0.000108774
LTcW	0.000542269	0.000607827	0.001354708	0.000579489	0.001064986
LTdA	0.04858871	0.007786419	0.048001806	0.007635241	0.046009155
LTcT	0.009948554	3.74047E-05	0.010401144	0.004406661	0.01095596
LTfC	0.154213014	0.003338373	0.005072627	0.002795555	0.003975103
LTcN	0.015600667	3.11706E-06	0.014359901	0.006081447	0.011817879
LTAZ	0.024339544	0.000330408	0.020990442	7.96001E-05	0.018559412
LTcF	0.021461346	4.36389E-05	0.02029051	0.008590442	0.022126003
LTAL	0.004970801	0.000000000	0.00557688	0.002365715	0.004276185
LTAU	0.089502225	0.006405561	0.092752314	0.005833095	0.090852308
LTbQ	0.005040323	0.000102863	0.00264168	0.000000000	0.002138196
LTAN	0.054247775	0.002509234	0.054376458	0.002005922	0.050538113
LTAT	0.047643215	0.000330408	0.037261985	0.000219696	0.039125797
LTcR	0.029692714	3.74047E-05	0.029209001	3.184E-06	0.029382132
LTcK	0.016393215	4.67559E-05	0.016489802	2.2288E-05	0.017607545
LTcB	0.011735261	2.18194E-05	0.011898848	2.2288E-05	0.011435333
LTfH	0.112367909	0.002540405	0.085263792	0.00159837	0.084771646
LTcL	0.006868743	0.003444353	0.006841273	0.002900627	0.003437903
LTcM	0.006562848	2.18194E-05	0.005366147	6.36801E-06	0.004738283
LTAR	0.028337041	0.000199492	0.028027395	0.000120992	0.027122748
LTcS	0.037972747	0.000539252	0.036148115	0.000404368	0.035007627
LTcV	0.017241379	3.42877E-05	0.013667495	0.000000000	0.014126194
LTbU	0.172323415	0.006246591	0.007548732	0.001633394	0.005039106
LTAW	0.007362347	0.003665664	0.006073606	0.002575859	0.002890255
LTbQ	0.011644883	1.87024E-05	0.001121397	0.000480785	0.000555044
LTcI	0.076508621	0.000417686	0.064228193	7.32321E-05	0.071490562
LTbZ	0.004762236	0.000654583	0.005162941	0.000566753	0.003635332
LTAS	0.00041713	0.000695105	0.001324603	0.000665457	0.001190571

Table 9. (Continued)

Airports	C6	C7	C8	C9	C10
LTFM	1.000000000	1.0000000	1.000000000	1.000000000	1.000000000
LTFJ	0.228176983	0.6091898	0.126476995	0.140583887	0.059861985
LTAC	0.036932219	0.370749769	0.019891194	0.256897257	0.005931569
LTBJ	0.062683335	0.390035481	0.031182287	0.490790176	0.004232135
LTAI	0.496758883	0.288387045	0.185162857	0.121361905	0.003309321
LTFG	0.01214705	0.016255111	0.004631009	2.60041E-05	1.91393E-06
LTBS	0.075067396	0.05125392	0.02781296	0.001589607	4.61413E-06
LTFE	0.037351309	0.089858204	0.014130561	0.003471679	0.000203781
LTAf	0.017320989	0.173049656	0.007604908	0.118855027	0.000988026
LTcG	0.00270507	0.127354506	0.001587601	0.042353712	5.64205E-06
LTCE	0.000284489	0.039923231	0.000198449	0.008485892	4.14516E-05
LTAJ	0.004643844	0.085008708	0.002286458	0.036650254	1.18098E-06
LTCP	1.95247E-06	0.007302484	1.05543E-06	0.001324813	6.49024E-06
LTcO	0.005039552	0.009336329	0.00135753	0.000496385	2.44573E-06
LTAP	8.95039E-05	0.005142736	5.41162E-05	0.000220052	1.09664E-06
LTBD	8.95039E-05	0.000367312	5.41162E-05	0.000220052	1.09664E-06
LTfD	0.000230105	0.009523225	0.000141662	6.35249E-06	5.33257E-08
LTBF	5.11927E-06	0.000000000	7.36909E-07	6.35248E-06	5.33257E-08
LTCJ	6.64315E-06	0.008219445	5.45535E-06	0.003484864	1.70359E-05
LTcU	0.003233307	0.006103358	0.000887702	0.000319589	1.58259E-06
LTBR	0.000678339	0.006699404	0.000453481	5.89776E-05	9.02522E-06
LTBH	9.95281E-06	0.004084681	5.09505E-06	5.56642E-05	2.94072E-07
LTfK	9.95281E-06	2.99891E-05	5.09505E-06	5.56642E-05	2.94072E-07
LTAY	0.000178722	0.017732506	0.000105469	0.007738881	1.86194E-07
LTCC	0.000357539	0.07425626	0.000248497	0.016427162	8.0222E-05
LTCA	0.000685006	0.036044189	0.000471935	0.002784491	1.36166E-05
LTCD	1.24529E-05	0.012532999	7.54924E-06	0.000993501	4.87272E-06
LTBY	0.001177789	0.000101106	0.000756363	0.000993501	4.44121E-07
LTCW	0.000495379	0.000973446	0.000142202	3.7178E-05	2.0382E-07
LTDA	0.006711529	0.037740046	0.003099665	0.001688024	4.46241E-08
LTCT	0.005048624	0.010870792	0.001580525	0.000628942	3.09289E-06
LTfC	0.003908669	0.002840017	0.00155726	0.000163771	8.21864E-07
LTcN	0.005445403	0.009048829	0.001315749	0.001516462	7.42589E-06
LTAZ	8.28131E-05	0.016305761	4.23654E-05	0.000296716	1.47092E-06
LTcF	0.01019068	0.019251398	0.002798426	0.001109834	5.44068E-06
LTAL	0.001973633	0.002653502	0.000386355	0.000141788	7.14543E-07
LTAU	0.005126175	0.075419463	0.003376098	0.01398534	1.26364E-06
LTBQ	7.61938E-07	0.00152504	7.83905E-07	4.37362E-05	2.35838E-07
LTAN	0.002195405	0.035555344	0.00138462	0.005560847	0.000000000
LTAT	0.000253678	0.030172812	0.00017858	0.008711383	4.25525E-05
LTcR	6.92887E-06	0.023610769	5.60939E-06	0.001689761	8.27196E-06
LTCK	2.60011E-05	0.014587671	1.68393E-05	0.001054421	5.17014E-06
LTcB	3.55492E-05	0.008178326	1.95506E-05	2.90889E-05	1.64328E-07
LTfH	0.001760791	0.061450686	0.001229911	0.014861526	1.49691E-05
LTCL	0.001587735	0.00274205	0.000399223	0.000248844	1.49691E-05
LTcM	1.06195E-05	0.004008938	5.91682E-06	0.000159406	9.72938E-06
LTAR	0.000147721	0.019752733	9.47474E-05	0.001765283	0.000103811
LTCS	0.000491617	0.022917439	0.000315139	0.001760872	0.000103552
LTcV	0.000000000	0.012610849	0.000000000	0.000690593	4.08493E-05
LTBU	0.001251459	0.00276342	0.001564409	3.50986E-05	0.00085773
LTAW	0.001335629	0.001869006	0.000272348	0.000000000	0.000857729
LTBQ	0.00026063	0.000336928	4.97006E-05	0.014633929	0.000857729
LTcI	9.03611E-05	0.055278519	5.63622E-05	0.006820124	0.000399952
LTBZ	0.000553191	0.002482272	0.000370551	8.45475E-05	5.34373E-06
LTAS	0.000656219	0.002544756	0.000393377	8.45475E-05	5.34373E-06

In the third step of the MABAC method, the weighted normalized decision matrix is prepared. In the calculations made using Equation 8, the weights obtained by applying the MPSI method were used. The weighted normalized decision matrix is shown in Table 10.

Table 10. Weighted normalized decision matrix

<i>Airports</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>
LTFM	0.294290351	0.152726720	0.302777697	0.150149320	0.302469765
LTFJ	0.286551522	0.096063614	0.298498202	0.093172704	0.296147521
LTAC	0.231780249	0.080113987	0.237791126	0.077974908	0.233854948
LTBJ	0.214701629	0.081322938	0.220220813	0.079653433	0.225900836
LTAI	0.199144178	0.105823052	0.203310199	0.102823623	0.205256927
LTFG	0.150433027	0.077249067	0.154786467	0.075894799	0.154391265
LTBS	0.161664304	0.080967322	0.161764004	0.079365631	0.160848852
LTFE	0.169112608	0.079411087	0.170041568	0.077443287	0.169295447
LTAf	0.186667936	0.078240221	0.186918001	0.076633427	0.18707629
LTcG	0.170610248	0.07691892	0.176595257	0.075292185	0.176648533
LTcE	0.155761721	0.076416202	0.159200408	0.075096173	0.159595486
LTAJ	0.163597733	0.076700171	0.167851688	0.075380868	0.167942235
LTcP	0.148763527	0.07636574	0.153145766	0.07507466	0.152730454
LTcO	0.14889856	0.076366692	0.152980556	0.075409074	0.152888826
LTAP	0.148192705	0.076370501	0.152606841	0.075080158	0.152346382
LTBD	0.163714353	0.07636336	0.151412775	0.075080158	0.151262605
LTfD	0.155199083	0.076392161	0.154868502	0.075093305	0.15367155
LTBF	0.147184049	0.076400254	0.151388849	0.075075138	0.151234883
LTcJ	0.148667367	0.076364312	0.152930424	0.075075377	0.152774306
LTcU	0.148268406	0.076367644	0.152606841	0.07533067	0.152295427
LTBR	0.153680983	0.076446194	0.15292017	0.075119121	0.152476069
LTBH	0.151650371	0.076380498	0.15319362	0.075075138	0.152543897
LTfK	0.147145176	0.076391209	0.151388849	0.075075138	0.151236471
LTAY	0.153355676	0.076382402	0.155792536	0.075086134	0.155197675
LTcC	0.161510858	0.07639835	0.166690664	0.075096412	0.167543223
LTcA	0.154017543	0.076424533	0.158427912	0.075126531	0.158502221
LTcD	0.149720012	0.07636693	0.153846482	0.075075377	0.153542175
LTBY	0.151697428	0.076484041	0.151417333	0.075174339	0.151251333
LTcW	0.147224968	0.076409775	0.151593936	0.075118165	0.151395946
LTDA	0.15429477	0.076957957	0.158655787	0.075647873	0.158193072
LTcT	0.148609057	0.076366216	0.152963466	0.075405489	0.152891806
LTfC	0.169836877	0.076618289	0.152156788	0.075284535	0.151836057
LTcN	0.149440739	0.076363598	0.153562777	0.075531223	0.153022158
LTAZ	0.150726622	0.076388591	0.154566567	0.075080636	0.154041713
LTcF	0.150303109	0.076366692	0.154460605	0.075719584	0.154581106
LTAL	0.147876605	0.07636336	0.152233126	0.075252265	0.151881591
LTAU	0.160314996	0.07685251	0.165430515	0.075512578	0.164974921
LTBQ	0.147886835	0.076371215	0.151788769	0.075074660	0.151558253
LTAN	0.155127474	0.076554973	0.159620838	0.075225254	0.158878008
LTAT	0.154155645	0.076388591	0.157029898	0.075091154	0.157152068
LTcR	0.151514315	0.076366216	0.155810766	0.075074899	0.155678486
LTcK	0.149557358	0.07636693	0.153885221	0.075076333	0.153897758
LTcB	0.148871963	0.076365026	0.153190202	0.075076333	0.152964304
LTfH	0.163679571	0.076557354	0.164296836	0.075194657	0.164055313
LTcL	0.148155878	0.076626382	0.152424541	0.075292424	0.151754814
LTcM	0.148110867	0.076365026	0.152201223	0.075075138	0.151951476
LTAR	0.151314835	0.076378594	0.155631884	0.075083743	0.155336788
LTcS	0.152732682	0.076404539	0.156861270	0.075105018	0.156529257
LTcV	0.149682162	0.076365978	0.153457955	0.075074660	0.153371256
LTBU	0.172501735	0.076840370	0.152531642	0.075197286	0.151996971
LTAW	0.148228510	0.076643282	0.152308325	0.075268042	0.151671990
LTBQ	0.148858664	0.076364788	0.151558616	0.075110755	0.151318825
LTcI	0.158403050	0.076395256	0.161112281	0.075080158	0.162046749
LTBZ	0.147845916	0.076413346	0.152170460	0.075117209	0.151784672
LTAS	0.147206554	0.076416440	0.151589379	0.075124619	0.151414938

Table 10. (Continued)

<i>Airports</i>	<i>C6</i>	<i>C7</i>	<i>C8</i>	<i>C9</i>	<i>C10</i>
LTFM	0.162963073	0.205266661	0.133724327	0.166152474	0.129479611
LTFJ	0.100073748	0.165156509	0.075318689	0.094755417	0.068615259
LTAC	0.084490830	0.140684614	0.068192132	0.104418294	0.065123814
LTBJ	0.086589071	0.142663971	0.068947079	0.123849238	0.065013793
LTAI	0.121958214	0.132231453	0.079242553	0.093158527	0.064954050
LTFG	0.082471297	0.104301647	0.067171803	0.083078397	0.064739930
LTBS	0.087598143	0.107893691	0.068721798	0.083208296	0.064740104
LTFE	0.084524979	0.111855777	0.067806963	0.083364651	0.064752998
LTAf	0.082892877	0.120393993	0.067370644	0.092950265	0.064803770
LTcG	0.081701950	0.115704148	0.066968314	0.086594824	0.064740171
LTCE	0.081504717	0.106730785	0.066875432	0.083781213	0.064742489
LTAJ	0.081859924	0.111358057	0.067015041	0.086121002	0.064739882
LTCP	0.081481696	0.103382809	0.066862234	0.083186297	0.064740226
LTcO	0.081892167	0.103591549	0.066952931	0.083117475	0.064739964
LTAP	0.081488829	0.103161147	0.066865782	0.083094518	0.064739877
LTBD	0.081488829	0.102671029	0.066865782	0.083094518	0.064739877
LTfD	0.081500286	0.103610731	0.066871635	0.083076765	0.064739809
LTBF	0.081481954	0.102633331	0.066862213	0.083076765	0.064739809
LTCJ	0.081482078	0.103476920	0.066862528	0.083365746	0.064740909
LTcU	0.081744991	0.103259739	0.066921517	0.083102787	0.064739908
LTBR	0.081536809	0.103320913	0.066892484	0.083081137	0.064740390
LTBH	0.081482347	0.103052555	0.066862504	0.083080861	0.064739825
LTfK	0.081482347	0.102636408	0.066862504	0.083080861	0.064739825
LTAy	0.081496099	0.104453277	0.066869215	0.083719154	0.064739818
LTCC	0.081510669	0.110254498	0.066878779	0.084440944	0.064744999
LTCA	0.081537352	0.106332666	0.066893718	0.083307562	0.064740687
LTCD	0.081482551	0.103919634	0.066862668	0.083158773	0.064740121
LTBY	0.081577505	0.102643707	0.066912736	0.083158773	0.064739834
LTCW	0.081521901	0.102733239	0.066871671	0.083079326	0.064739819
LTDA	0.082028402	0.106506717	0.067069414	0.083216472	0.064739809
LTCT	0.081892906	0.103749036	0.066967841	0.083128487	0.064740006
LTfC	0.081800021	0.102924811	0.066966285	0.083089842	0.064739859
LTcN	0.081925236	0.103562042	0.066950137	0.083202219	0.064740286
LTAZ	0.081488284	0.104306845	0.066864996	0.083100887	0.064739901
LTcF	0.082311889	0.104609166	0.067049272	0.083168438	0.064740158
LTAL	0.081642351	0.102905668	0.066887996	0.083088016	0.064739852
LTAU	0.081899225	0.110373881	0.067087897	0.084238086	0.064739887
LTBQ	0.081481599	0.10278985	0.066862216	0.08307987	0.064739821
LTAN	0.081660421	0.106282494	0.066954742	0.083538211	0.064739806
LTAT	0.081502207	0.105730067	0.066874104	0.083799946	0.064742561
LTcR	0.081482101	0.105056582	0.066862539	0.083216616	0.064740341
LTCK	0.081483655	0.104130512	0.066863289	0.083163834	0.064740140
LTcB	0.081484433	0.103472699	0.066863471	0.083078654	0.064739816
LTfH	0.081625008	0.108940219	0.066944398	0.084310877	0.064740775
LTCL	0.081610908	0.102914756	0.066888856	0.083096910	0.064740775
LTcM	0.081482402	0.103044781	0.066862559	0.083089480	0.064740436
LTAR	0.081493573	0.104660619	0.066868499	0.083222890	0.064746526
LTCS	0.081521594	0.104985424	0.066883234	0.083222524	0.064746510
LTcV	0.081481536	0.103927624	0.066862164	0.083133609	0.064742450
LTBU	0.081583507	0.102916950	0.066966763	0.083079153	0.064795335
LTAW	0.081590366	0.102825153	0.066880373	0.083076237	0.064795335
LTBQ	0.081502773	0.102667911	0.066865487	0.084291969	0.064795335
LTcI	0.081488899	0.108306749	0.066865932	0.083642827	0.064765698
LTBZ	0.081526611	0.102888094	0.066886939	0.083083261	0.064740152
LTAS	0.081535006	0.102894507	0.066888466	0.083083261	0.064740152

In this step, boundary proximity values for the criteria are determined using Equation 9. Table 11 shows the border closeness values of the criteria calculated over the years.

Table 11. Border proximity values

Years	C1	C2	C3	C4	C5
2015	0.160509926	0.07854819	0.163141872	0.077162865	0.16293023
2016	0.166578186	0.073589613	0.159345805	0.072806194	0.164593485
2017	0.171807453	0.073713469	0.169328049	0.073103156	0.161892203
2018	0.169136781	0.080527599	0.159836438	0.079871246	0.154931438
2019	0.155649551	0.084710743	0.140589888	0.08429633	0.136585852
2020	0.156505954	0.080251356	0.126471885	0.080579557	0.118992937
2021	0.151838591	0.088773942	0.12517074	0.089424633	0.119136556
2022	0.138523735	0.090305216	0.14443799	0.091369889	0.15734006
2023	0.134774984	0.088508243	0.143070141	0.08943122	0.163080253
2024	0.145572966	0.087907062	0.154373941	0.088948166	0.14600062
Years	C6	C7	C8	C9	C10
2015	0.08389628	0.108943058	0.068232025	0.085969575	0.065651892
2016	0.074130653	0.11892992	0.067448809	0.092317377	0.066458505
2017	0.076594183	0.116760472	0.064546444	0.087844129	0.063513493
2018	0.083702532	0.13034863	0.066939107	0.065462953	0.065493526
2019	0.090501377	0.13311602	0.067905834	0.095616254	0.066263317
2020	0.088854863	0.163379396	0.07081233	0.098973005	0.070530337
2021	0.10551914	0.139738608	0.070727996	0.09250751	0.070004344
2022	0.093528541	0.107737908	0.070657921	0.090092205	0.069203962
2023	0.092082706	0.111957322	0.070116651	0.092220381	0.068458486
2024	0.092194692	0.107784876	0.069172361	0.095735106	0.067698283

In the fifth step of the MABAC method, the distance of the alternatives to the border proximity area is calculated. Equation 10 is applied to calculate the distances of the values in the weighted normalized decision matrix from the border proximity field matrix values.

In the last step of the MABAC method, the sum of the distances of the alternatives from the border proximity area is calculated by applying Equation 11. According to the calculation results, a ranking of the alternatives is obtained from the largest value to the smallest value. The alternative with the largest value represents the best alternative in the decision problem. The ranking of the alternatives according to their distance from the border proximity area is shown in table 13.

Table 12. Distance of alternatives to the border proximity area

<i>Airports</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>
LTFM	0.133780425	0.074178530	0.139635825	0.072986455	0.139539535
LTFJ	0.126041596	0.017515425	0.135356330	0.016009839	0.133217291
LTAC	0.071270323	0.001565797	0.074649254	0.000812043	0.070924718
LTBJ	0.054191703	0.002774748	0.057078941	0.002490567	0.062970606
LTAI	0.038634252	0.027274863	0.040168327	0.025660758	0.042326697
LTFG	-0.010076899	-0.001299123	-0.008355405	-0.001268066	-0.008538966
LTBS	0.001154378	0.002419132	-0.001377868	0.002202766	-0.002081378
LTFE	0.008602682	0.000862897	0.006899696	0.000280422	0.006365216
LTAf	0.026158010	-0.000307969	0.023776129	-0.000529439	0.024146059
LTCG	0.010100322	-0.001629269	0.013453385	-0.001870681	0.013718303
LTCE	-0.004748205	-0.002131987	-0.003941464	-0.002066692	-0.003334744
LTAJ	0.003087807	-0.001848018	0.004709816	-0.001781998	0.005012005
LTCP	-0.011746399	-0.002182449	-0.009996106	-0.002088205	-0.010199777
LTCO	-0.011611366	-0.002181497	-0.010161315	-0.001753791	-0.010041404
LTAP	-0.012317221	-0.002177689	-0.010535031	-0.002082707	-0.010583848
LTBD	0.003204427	-0.002184830	-0.011729096	-0.002082707	-0.011667625
LTFD	-0.005310843	-0.002156028	-0.008273370	-0.002069560	-0.009258680
LTBF	-0.013325877	-0.002147935	-0.011753023	-0.002087727	-0.011695347
LTCJ	-0.011842559	-0.002183878	-0.010211448	-0.002087488	-0.010155924
LTCU	-0.012241520	-0.002180545	-0.010535031	-0.001832196	-0.010634803
LTBR	-0.006828943	-0.002101996	-0.010221702	-0.002043744	-0.010454161
LTBH	-0.008859555	-0.002167692	-0.009948252	-0.002087727	-0.010386333
LTFK	-0.013364750	-0.002156980	-0.011753023	-0.002087727	-0.011693759
LTAY	-0.007154250	-0.002165787	-0.007349336	-0.002076731	-0.007732555
LTCC	0.001000932	-0.002149839	0.003548792	-0.002066453	0.004612993
LTCA	-0.006492383	-0.002123656	-0.004713960	-0.002036334	-0.004428010
LTCd	-0.010789914	-0.002181259	-0.009295390	-0.002087488	-0.009388055
LTBY	-0.008812498	-0.002064149	-0.011724539	-0.001988526	-0.011678897
LTCW	-0.013284958	-0.002138414	-0.011547936	-0.002044700	-0.011534284
LTDA	-0.006215156	-0.001590233	-0.004486085	-0.001514992	-0.004737158
LTCT	-0.011900869	-0.002181973	-0.010178406	-0.001757377	-0.010038424
LTFC	0.009326951	-0.001929900	-0.010985084	-0.001878330	-0.011094173
LTCN	-0.011069187	-0.002184592	-0.009579094	-0.001631643	-0.009908072
LTAZ	-0.009783304	-0.002159599	-0.008575304	-0.002082229	-0.008888517
LTCF	-0.010206817	-0.002181497	-0.008681266	-0.001443281	-0.008349124
LTAL	-0.012633321	-0.002184830	-0.010908746	-0.001910600	-0.011048639
LTAU	-0.000194930	-0.001695680	0.002288643	-0.001650288	0.002044691
LTBQ	-0.012623091	-0.002176975	-0.011353102	-0.002088205	-0.011371978
LTAN	-0.005382452	-0.001993216	-0.003521034	-0.001937611	-0.004052222
LTAT	-0.006354281	-0.002159599	-0.006111974	-0.002071712	-0.005778162
LTCR	-0.008995611	-0.002181973	-0.007331106	-0.002087966	-0.007251744
LTCK	-0.010952568	-0.002181259	-0.009256651	-0.002086532	-0.009032472
LTCB	-0.011637963	-0.002183164	-0.009951670	-0.002086532	-0.009965926
LTFH	0.003169645	-0.001990836	0.001154964	-0.001968208	0.001125083
LTCL	-0.012354048	-0.001921807	-0.010717331	-0.001870442	-0.011175417
LTCM	-0.012399059	-0.002183164	-0.010940648	-0.002087727	-0.010978754
LTAR	-0.009195091	-0.002169596	-0.007509988	-0.002079122	-0.007593442
LTCS	-0.007777244	-0.002143651	-0.006280602	-0.002057847	-0.006400973
LTCV	-0.010827764	-0.002182211	-0.009683917	-0.002088205	-0.009558974
LTBU	0.011991809	-0.001707819	-0.010610229	-0.001965579	-0.010933259
LTAW	-0.012281416	-0.001904907	-0.010833547	-0.001894824	-0.011258240
LTBQ	-0.011651262	-0.002183402	-0.011583256	-0.002052111	-0.011611405
LTCI	-0.002106876	-0.002152934	-0.002029591	-0.002082707	-0.000883481
LTBZ	-0.012664010	-0.002134844	-0.010971412	-0.002045657	-0.011145558
LTAS	-0.013303372	-0.002131749	-0.011552493	-0.002038246	-0.011515292

Table 12. (Continued)

<i>Airports</i>	<i>C6</i>	<i>C7</i>	<i>C8</i>	<i>C9</i>	<i>C10</i>
LTFM	0.079066793	0.096323603	0.065492302	0.080182899	0.063827720
LTFJ	0.016177468	0.056213451	0.007086664	0.008785842	0.002963367
LTAC	0.000594551	0.031741556	-3.98933E-05	0.018448719	-0.000528077
LTBJ	0.002692791	0.033720913	0.000715054	0.037879663	-0.000638098
LTAI	0.038061934	0.023288396	0.011010528	0.007188952	-0.000697841
LTFG	-0.001424983	-0.004641411	-0.001060222	-0.002891178	-0.000911962
LTBS	0.003701864	-0.001049367	0.000489773	-0.002761280	-0.000911787
LTFE	0.000628699	0.002912719	-0.000425062	-0.002604924	-0.000898893
LTAf	-0.001003402	0.011450935	-0.000861381	0.006980690	-0.000848121
LTCG	-0.002194330	0.006761090	-0.001263711	0.000625249	-0.000911721
LTCE	-0.002391563	-0.002212273	-0.001356593	-0.002188362	-0.000909402
LTAJ	-0.002036356	0.002415000	-0.001216984	0.000151427	-0.000912010
LTCP	-0.002414584	-0.005560249	-0.001369791	-0.002783278	-0.000911666
LTCO	-0.002004113	-0.005351509	-0.001279094	-0.002852101	-0.000911928
LTAP	-0.002407450	-0.005781911	-0.001366243	-0.002875057	-0.000912015
LTBD	-0.002407450	-0.006272029	-0.001366243	-0.002875057	-0.000912015
LTfD	-0.002395994	-0.005332327	-0.001360390	-0.002892811	-0.000912083
LTBF	-0.002414326	-0.006309727	-0.001369812	-0.002892811	-0.000912083
LTCJ	-0.002414202	-0.005466138	-0.001369497	-0.002603829	-0.000910983
LTCU	-0.002151288	-0.005683319	-0.001310508	-0.002866788	-0.000911984
LTBR	-0.002359471	-0.005622145	-0.001339541	-0.002888439	-0.000911502
LTBH	-0.002413932	-0.005890503	-0.001369521	-0.002888714	-0.000912067
LTFK	-0.002413932	-0.006306649	-0.001369521	-0.002888714	-0.000912067
LTAY	-0.002400181	-0.004489781	-0.001362810	-0.002250421	-0.000912074
LTCC	-0.002385610	0.001311440	-0.001353247	-0.001528632	-0.000906892
LTCA	-0.002358928	-0.002610392	-0.001338307	-0.002662013	-0.000911205
LTCD	-0.002413728	-0.005023424	-0.001369357	-0.002810802	-0.000911771
LTBY	-0.002318775	-0.006299350	-0.001319290	-0.002810802	-0.000912057
LTCW	-0.002374379	-0.006209819	-0.001360354	-0.002890250	-0.000912073
LTDA	-0.001867877	-0.002436341	-0.001162611	-0.002753104	-0.000912083
LTCT	-0.002003374	-0.005194022	-0.001264184	-0.002841088	-0.000911886
LTFC	-0.002096259	-0.006018247	-0.001265740	-0.002879733	-0.000912033
LTCN	-0.001971043	-0.005381016	-0.001281888	-0.002767356	-0.000911605
LTAZ	-0.002407995	-0.004636213	-0.001367029	-0.002868688	-0.000911991
LTCF	-0.001584391	-0.004333892	-0.001182753	-0.002801138	-0.000911734
LTAL	-0.002253928	-0.006037389	-0.001344029	-0.002881559	-0.000912040
LTAU	-0.001997055	0.001430823	-0.001144128	-0.001731489	-0.000912004
LTBQ	-0.002414681	-0.006153207	-0.001369809	-0.002889705	-0.000912071
LTAN	-0.002235858	-0.002660564	-0.001277283	-0.002431364	-0.000912086
LTAT	-0.002394073	-0.003212991	-0.001357921	-0.002169629	-0.000909331
LTCR	-0.002414179	-0.003886475	-0.001369487	-0.002752959	-0.000911551
LTCK	-0.002412625	-0.004812546	-0.001368736	-0.002805741	-0.000911751
LTCB	-0.002411847	-0.005470358	-0.001368554	-0.002890922	-0.000912075
LTFH	-0.002271271	-2.83867E-06	-0.001287627	-0.001658699	-0.000911117
LTCL	-0.002285372	-0.006028301	-0.001343169	-0.002872665	-0.000911117
LTCM	-0.002413878	-0.005898277	-0.001369466	-0.002880096	-0.000911456
LTAR	-0.002402707	-0.004282438	-0.001363527	-0.002746685	-0.000905365
LTCS	-0.002374685	-0.003957634	-0.001348791	-0.002747052	-0.000905382
LTCV	-0.002414743	-0.005015434	-0.001369862	-0.002835967	-0.000909441
LTBU	-0.002312772	-0.006026108	-0.001265262	-0.002890423	-0.000856557
LTAW	-0.002305914	-0.006117905	-0.001351652	-0.002893338	-0.000856557
LTBQ	-0.002393507	-0.006275147	-0.001366539	-0.001677607	-0.000856557
LTCI	-0.002407380	-0.000636309	-0.001366093	-0.002326748	-0.000886193
LTBZ	-0.002369668	-0.006054963	-0.001345086	-0.002886315	-0.000911740
LTAS	-0.002361273	-0.006048550	-0.001343560	-0.002886315	-0.000911740

Table 13. Ranking of alternatives according to their distance from the border proximity area

<i>Airports</i>	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
LTFM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LTFJ	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
LTAC	3	3	3	3	4	4	5	5	4	4
LTBJ	4	4	4	5	5	3	4	4	5	5
LTAI	5	5	5	4	3	5	3	3	3	3
LTFG	28	31	28	26	28	35	30	29	29	29
LTBS	10	13	10	9	9	9	9	9	9	9
LTFE	8	8	8	8	8	10	8	8	8	7
LTAf	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
LTCG	7	7	7	7	7	7	7	7	7	8
LTCE	15	15	15	15	20	21	21	19	17	17
LTAJ	9	9	9	10	10	8	10	10	10	10
LTCP	41	43	39	41	42	43	44	42	35	39
LTCo	37	39	38	39	38	39	38	39	40	41
LTAP	44	49	41	46	47	47	48	47	48	48
LTBD	24	24	25	24	24	17	16	15	15	14
LTfD	26	18	17	16	16	19	17	17	18	16
LTBF	54	54	55	53	54	55	55	54	55	54
LTCJ	40	33	31	28	30	30	29	31	28	28
LTCU	43	44	44	42	45	44	43	45	45	46
LTBR	31	32	32	36	33	27	25	24	27	24
LTBH	36	36	35	37	37	38	37	36	39	40
LTfK	55	55	54	54	55	54	54	55	54	55
LTAY	23	27	24	29	27	29	34	30	32	33
LTCC	11	11	12	12	12	13	13	13	12	13
LTCA	19	20	22	22	22	20	27	25	20	23
LTCD	33	35	33	33	34	37	36	37	36	36
LTBY	42	42	43	45	43	42	42	43	46	45
LTCW	53	52	45	43	44	45	45	44	43	44
LTDA	18	19	20	17	19	18	19	18	41	43
LTCT	38	40	40	40	41	41	40	38	37	35
LTfC	20	21	21	20	18	15	15	16	21	20
LTCN	34	38	37	38	40	40	39	40	38	42
LTAZ	30	30	42	30	23	25	20	21	23	18
LTCF	29	28	29	31	31	31	32	32	30	32
LTAL	49	45	47	48	51	50	49	50	50	51
LTAU	12	12	11	11	11	12	11	11	11	11
LTBQ	51	51	49	47	49	48	47	52	53	53
LTAN	16	17	18	18	21	23	23	23	24	25
LTAT	21	22	23	23	25	24	24	26	25	26
LTCR	25	26	27	27	29	28	28	28	26	27
LTCK	32	34	34	34	35	34	35	35	33	34
LTCB	39	23	19	19	17	22	22	22	16	19
LTfH	13	10	16	13	14	14	14	14	14	15
LTCL	45	41	50	55	53	49	50	51	51	50
LTCM	48	48	46	44	46	46	46	48	49	49
LTAR	27	29	30	32	32	32	31	34	34	37
LTCS	22	25	26	25	26	26	26	27	22	22
LTCV	35	37	36	35	36	33	33	33	31	30
LTBU	17	16	14	21	15	16	18	20	19	21
LTAW	47	46	52	52	48	51	53	46	47	47
LTBQ	46	47	51	50	39	36	41	41	44	31
LTCI	14	14	13	14	13	11	12	12	13	12
LTBZ	50	50	48	49	50	52	51	49	42	38
LTAS	52	53	53	51	52	53	52	53	52	52

5. CONCLUSION and EVALUATION

In this study, the MPSI based MABAC method was used to evaluate the air transportation performances of airports in Türkiye. Data from 55 airports were analyzed covering the years 2015-2024. In order to carry

out the analysis, a total of ten decision criteria were determined by considering total movements traffic, commercial movements traffic, passenger traffic, freight traffic and cargo traffic at both domestic and international. The weights of the decision criteria were determined objectively using the MPSI method. Accordingly, the most important criteria are domestic commercial aircraft traffic in 2015, 2017 and 2024; domestic passenger traffic in 2016, 2022 and 2023; total aircraft traffic on domestic lines in 2018, 2019 and 2021; in 2020, it was determined as domestic freight traffic. In all years, least important criterion is seen as international cargo traffic. Afterwards, the air transportation performance analysis of the airports was made by using the criterion weights in the MABAC method and the airports were ranked according to their performance.

According to the findings obtained as a result of the study, Istanbul Airport is the airport with the highest performance in the period covered by the study. The airport with the second highest performance is Istanbul Sabiha Gökçen Airport. While Ankara Esenboğa Airport was the third airport with the highest performance in the 2015-2018 period, it was replaced by Antalya Airport in the 2021-2024 period. The airports with the lowest performance are Balıkesir Merkez Airport and Çanakkale Gökçeada Airport.

While Aydın Çıldır Airport was ranked 24th in 2015, it rose to 14th place by 2024. Similarly, while Balıkesir Koca Seyit Airport ranked 26th in 2015, its performance increased and it ranked 16th in 2024; while Batman Airport ranked 40th in 2015, it ranked 28th in 2024; while Kapadokya Airport ranked 30th in 2015, it ranked 18th in 2024; while Ordu-Giresun Airport ranked 39th in 2015, it ranked 19th in 2024. Uşak Airport ranked 46th in 2015 and ranked 31st in 2024. Information about airports whose performance has decreased over the years is as follows: While Denizli Çardak Airport was ranked 23rd in 2015, it will rank 33rd in 2024; while Kahramanmaraş Airport was ranked 34th in 2015, it will rank 42nd in 2024. and while Konya Airport was ranked 16th in 2015, it fell to 25th place in 2024. It can be said that there are no significant differences in the rankings of other airports according to their performance over the years.

In the study, unlike other studies in the literature, the air transportation performance of airports in Türkiye was evaluated. For this reason, it differs from studies conducted with the DEA method. In studies using the DEA method, the amount of output that airports can produce with their inputs, that is, their efficiency, is analyzed. This situation requires airports to be classified according to their scale in order to make an accurate comparison, based on the assumption that airports using similar inputs should produce similar outputs. On the other hand, the importance levels of the decision criteria used are not taken into account. In this study, air transportation varieties were taken as decision criteria and objective weights were determined for each criterion using ten-year data. Using the weights obtained, airports were ranked according to their performance. In almost all of the studies in the literature and in this study, Istanbul Airport ranks first.

It can be said that this study is similar to the study conducted by Mercan and Atalay (2021) in terms of application. Mercan and Atalay analyzed the airports, which have very different characteristics in terms of location and function and have different capacities, by clustering them with the hierarchical clustering method. Expert opinion was sought to determine the criterion weights. Afterwards, researchers ranked the airports using the TOPSIS method. As a result of the study, the airport with the highest performance was determined as Istanbul Airport, and the airport with the lowest performance was determined as Çanakkale Gökçeada Airport. In this study, largely the same results were obtained as in the study of Mercan and Atalay.

Interest in air transportation is increasing day by day because it is fast and safe. The findings obtained as a result of the study can be used for passenger, freight and cargo transportation planning at existing airports. It can ensure a balanced distribution at regionally located airports. It can also be an indicator for the location selection of new airports.

In future studies, the results obtained can be compared with the results of this study by using different decision criteria (paid passenger, offered seat - kilometer, paid passenger - kilometer, passenger occupancy rate, number of landings, supplied cargo ton - kilometer, paid cargo ton - kilometer, cargo occupancy rate, supplied ton - kilometer, paid ton - kilometer, general occupancy rate, block hour, aircraft usage, traffic revenue, operating expenses, non-operational expenses), weight determination and ranking methods.

Author Contributions

Literature review, Conceptualization, Methodology, Data Curation, Modelling, Analysis, Writing-original draft, Writing-review and editing.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest was declared by the author.

Funding

Any specific grant has not been received from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Compliance with Ethical Standards

It was declared by the author that the tools and methods used in the study do not require the permission of the Ethics Committee.

Ethical Statement

It was declared by the author(s) that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.



Yazarlar, Verimlilik Dergisi'nde yayımlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptirler ve çalışmaları CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayımlanmaktadır.

The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.

REFERENCES

- Akbulut, O.Y. and Aydın, Y. (2024). "A Hybrid Multidimensional Performance Measurement Model Using the MSD-MPSIRAWEC Model for Turkish Banks", *Journal of Mehmet Akif Ersoy University Economics and Administrative Sciences Faculty*, 11(3), 1157-1183. <https://doi.org/10.30798/makuiibf.1464469>
- Altın, H. (2021). "Borsa İstanbul'da İşlem Gören Şirketlerin Finansal Performanslarının MABAC Yöntemiyle Analizi", *Uluslararası Ekonomi, İşletme ve Politika Dergisi*, 5 (2), 211-234. <https://doi.org/10.55026/jobaf.1187106>
- Apan, M. and Tiyek, R. (2023). "Makroekonomik Performans ve Entegre CRITIC Tabanlı MABAC Karar Verme Yaklaşımı: Türkiye Ekonomisinin 2008-2021 Dönem Verisinden Kanıtlar", *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 14(100), 44-65. <https://doi.org/10.21076/vizyoner.1314956>
- Avcı, T. and Aktaş, M. (2015). "Türkiye'de Faaliyet Gösteren Havalimanlarının Performanslarının Değerlendirilmesi", *Uluslararası Alanya İşletme Fakültesi Dergisi*, 7(3), 67-77.
- Aydın, U. (2023). "Havalimanı Performans Analizi için TBA, Kategorik VZA ve Simar-Wilson Yöntemlerinden Oluşan Entegre Bir Yaklaşım: Türkiye Uygulaması", *Hava Taşımacılığı Yönetimi: Teori ve Uygulama*, Editors: Kiracı, K. and Tanrıverdi, G., Detay Yayıncılık, Ankara, 142-158.
- Božanić, D., Jovo, K. and Tešić, D. (2018). "Selecting Location for Construction of Single-Span Bailey Bridge by Applying Fuzzy MABAC Method", *The 2nd International Conference on Management, Engineering and Environment (ICMNEE 2018)*, Obrenovac, Serbia, 407-416.
- Chatterjee, K., Zavadskas, E.K., Tamošaitienė, J., Adhikary, K. and Kar, S. (2018). "A Hybrid MCDM Technique for Risk Management in Construction Projects", *Symmetry*, 10(2), 46. <https://doi.org/10.3390/sym10020046>
- Directorate General of Civil Aviation. (SHGM). (2023). "Faaliyet Raporu", <https://web.shgm.gov.tr>, (Accessed: 01.10.2024)
- General Directorate of State Airports Authority (DHMI). (2024). "Havalimanları Karşılaştırmalı İstatistikleri", <https://www.dhmi.gov.tr/Sayfalar/Istatistikler.aspx>, (Accessed: 06.10.2024)
- Gerede, E. (2015). "Hava Yolu Taşımacılığı ve Ekonomik Düzenlemeler Teori ve Türkiye Uygulaması", Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü Yayınları, Yayın no: HUD/T01, Ankara.
- Gligorić, M., Gligorić, Z., Lutovac, S., Negovanović, M. and Langović, Z. (2022). "Novel Hybrid MPSI-MARA Decision-Making Model for Support System Selection in an Underground Mine", *Systems*, 10, 248. <https://doi.org/10.3390/systems10060248>
- Kaya, G., Aydın, U., Karadayı, M.A., Ülengin, F., Ülengin, B. and İçken, A. (2022). "Integrated Methodology for Evaluating the Efficiency of Airports: A Case Study in Turkey", *Transport Policy*, 127, 31. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.08.010>
- Kiracı, K. ve Bakır, M. (2019). "Critik Temelli Edas Yöntemi ile Havayolu İşletmelerinde Performans Ölçümü Uygulaması" Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 35, 157. <https://doi.org/10.30794/pausbed.421992>
- Mandal, U. and Seikh, M.R. (2023). "Interval-Valued Spherical Fuzzy MABAC Method Based on Dombi Aggregation Operators with Unknown Attribute Weights to Select Plastic Waste Management Process", *Applied Soft Computing*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110516>
- Maniya, K. and Bhatt, M.G (2010). "A Selection of Material Using a Novel Type Decision-Making Method: Preference Selection Index Method", *Materials & Design*, 31(4), 1785-1789. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.020>
- Mercan, T. and Atalay, M. (2021). "Türkiye'deki Havalimanlarının Performanslarının Kümeleme ve TOPSIS Yöntemleriyle Değerlendirilmesi", *Adıyaman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 14(37), 676-711. <https://doi.org/10.14520/adyusbd.796021>
- Oum, T.H., Fu, X. and Yu, C. (2005). "New Evidences on Airline Efficiency and Yields: A Comparative Analysis of Major North American Air Carriers and Its Implications", *Transport Policy*, 12, 153-164.
- Öksüz, M. and Atan, M. (2023). "Türkiye'de Kalkınma ve Yatırım Bankalarının Finansal Etkinliği 2016-2021 Döneminde CRITIC Yöntemi ile Ağırlıklandırılarak MABAC Yöntemi ile Sıralanması", 10(1), 14-32. <https://doi.org/10.55026/jobaf.1187106>
- Ömürbek, N., Demirgüzbuz, M.Ö. and Tunca, M.Z. (2013). "Hizmet Sektöründe Performans Ölçümünde Veri Zarflama Analizinin Kullanımı: Havalimanları Üzerine Bir Uygulama", *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 4(9), 21-43.
- Pamuçar, D. and Čirović, G. (2015). "The Selection of Transport and Handling Resources in Logistics Centers Using Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison (MABAC)", *Expert Systems with Applications*, 42(6), 3016-3028. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.057>
- Ran, H. (2023). "MABAC Method for Multiple Attribute Group Decision Making Under Single-Valued Neutrosophic Sets and Applications to Performance Evaluation of Sustainable Microfinance Groups Lending", *PLoS ONE*, 18(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280239>

- Ulutaş, A. (2019). "Entropi ve MABAC Yöntemleri ile Personel Seçimi", *OPUS Uluslararası Toplum Araştırmaları Dergisi*, 13(19), 1552-1573.
- Wang, H., Feng, L., Ullah, K. and Garg, H. (2024). "A Novel CE-PT-MABAC Method for T-Spherical Uncertain Linguistic Multiple Attribute Group Decision-Making", *Complex & Intelligent Systems*, 10, 2951–2982. <https://doi.org/10.1007/s40747-023-01303-0>
- Wang, J., Wei, G., Wei, C. and Wei, Y. (2020). "MABAC Method for Multiple Attribute Group Decision Making Under Qrunc Orthopair Fuzzy Environment", *Defence Technology*, 16(1), 208-216.
- Yavuz, S. and Sönmez, A.R. (2023). "CRITIC-MABAC ve ENTROPİ-MABAC Yöntemleri İle Finansal Performans Değerlendirmesi: BIST Kuramsal Yönetim Endeksi Üzerine Bir Araştırma", *Sosyal Bilimler EKEVAKADEMİ Dergisi*, 94, 278-300. <https://doi.org/10.17753/sosekev.1215740>
- Yılmaz, N. (2023). "Financial Performance Analysis of Multi-Branch Banks with Integrated MPSI-MARA Model: The Case of Türkiye", *Ekonomi ve Finansal Araştırmalar Dergisi*, 5(2): 168-188. <https://doi.org/10.56668/jeft.1384058>

Avrupa Ülkelerinin Yeşil Büyüme Performanslarının CRITIC-MEREC Tabanlı WASPAS Yöntemi ile Değerlendirilmesi

Emel Gelmez¹ , Hande Eren² 

ÖZET

Amaç: Bu çalışmanın amacı Yeşil Büyüme İndeksi'nde (2023) [YBI (2023)] yer alan Avrupa ülkelerinin yeşil büyüme performanslarının belirlenmesidir.

Yöntem: Ülkelerin yeşil büyüme performanslarının belirlenmesinde Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) tekniklerinden yararlanılmıştır. Bu kapsamda çalışmada kullanılan kriterler CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) ve MEREC (Method based on the Removal Effects of Criteria) yöntemleri ile ağırlıklandırılmıştır. Söz konusu yöntemlerden elde edilen kriter ağırlıkları ortak ağırlıklandırma yöntemi ile birleştirilmiş olup nihai kriter ağırlıkları belirlenmiştir. Bu ağırlıklar WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) yönteminde kullanılarak ülkeler yeşil büyüme performansları açısından sıralanmıştır.

Bulgular: Çalışmada ortak ağırlıklandırma yöntemi ile elde edilen sonuçlar doğrultusunda en yüksek önem derecesine sahip kriter doğal sermayenin korunması olurken önem derecesi en düşük kriter ise sosyal katılım kriteri olarak tespit edilmiştir. WASPAS yöntemi ile yapılan değerlendirme sonucunda ise yeşil büyüme açısından en iyi performansı gösteren ülkeler sırasıyla İsviçre, Avusturya ve Almanya olurken; Karadağ, Malta ve İzlanda son sırada yer alan ülkeler olarak belirlenmiştir.

Özgünlük: Literatürde, CRITIC ve MEREC yöntemlerinden elde edilen ağırlıkların ortak ağırlıklandırma yöntemiyle entegre edildiği herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bununla birlikte CRITIC, MEREC ve WASPAS yöntemlerinin bir arada kullanılarak ülkelerin yeşil büyüme performanslarını analiz eden herhangi bir çalışmanın literatürde yer almadığı görülmüştür. Bu yönleriyle çalışma, alana özgün bir katkı sunmayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Yeşil Büyüme, Çok Kriterli Karar Verme, CRITIC Yöntemi, MEREC Yöntemi, WASPAS Yöntemi.

JEL Kodları: O44, Q01, C6.

Evaluation of Green Growth Performance of European Countries with CRITIC-MEREC Based WASPAS Method

ABSTRACT

Purpose: The aim of this study is to determine the green growth performances of European countries included in the Green Growth Index (2023) [GGI (2023)].

Methodology: Multi-Criteria Decision Making (MCDM) techniques were used to determine the green growth performance of countries. In this context, the criteria used in the study were weighted with CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) and MEREC (Method based on the Removal Effects of Criteria) methods. The criteria weights obtained from these methods were combined with the common weighting method and the final criteria weights were determined. These weights were used in the WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) method and countries were ranked in terms of their green growth performance.

Findings: In the study, according to the results obtained with the common weighting method, the criterion with the highest importance level was the protection of natural capital, while the criterion with the lowest importance level was determined as the social participation criterion. As a result of the evaluation made with the WASPAS method, the countries with the best performance in terms of green growth were Switzerland, Austria and Germany, respectively; Montenegro, Malta and Iceland were determined as the countries in the last place.

Originality: In the literature, no study has been found in which the weights obtained from CRITIC and MEREC methods are integrated with a common weighting method. However, it has been observed that there is no study in the literature that analyzes the green growth performance of countries using CRITIC, MEREC and WASPAS methods together. In these aspects, the study aims to make an original contribution to the field.

Keywords: Green Growth, Multi-Criteria Decision Making, CRITIC Method, MEREC Method, WASPAS Method.

JEL Codes: O44, Q01, C6.

¹ Selçuk Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Konya, Türkiye

² Kapadokya Üniversitesi, Bilgisayar ve Bilişim Teknolojileri Fakültesi, Bilgi Güvenliği Teknolojisi Bölümü, Nevşehir, Türkiye

Sorumlu Yazar-Corresponding Author: Emel Gelmez, emelgelmez@selcuk.edu.tr

DOI: 10.51551/verimlilik.1703921

Araştırma Makalesi / Research Article | Geliş / Submitted: 21.05.2025 | Kabul / Accepted: 17.07.2025

Atıf/Cite: Gelmez, E. ve Eren, H. (2025). "Avrupa Ülkelerinin Yeşil Büyüme Performanslarının CRITIC-MEREC Tabanlı WASPAS Yöntemi ile Değerlendirilmesi", *Verimlilik Dergisi*, 59(4), 827-852.

EXTENDED ABSTRACT

This study aims to evaluate the green growth performance of European countries listed in the Green Growth Index (GGI) in 2023 using Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods. When the relevant literature is examined, it is seen that there are a limited number of studies using MCDM methods in determining the green growth performance of countries (Doskočil, 2022; Mughees and Ayaz, 2022; Altıntaş, 2022; Eşiyok et al., 2023; Pamucar et al., 2024). In the literature, no study has been found on combining the criteria weights obtained by CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) and MEREC (Method based on the Removal Effects of Criteria) methods with a common weighting method. In addition, it has been observed that there is no study in the literature evaluating the green growth performances of countries using the CRITIC, MEREC and WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) methods together. It is thought that the study will make an original contribution to the literature in these aspects.

According to the analysis results made with the CRITIC method, the criterion with the highest importance level was the protection of natural capital, while the criterion with the lowest importance level was determined as efficient and sustainable resource use. According to the results obtained with the MEREC method, the criterion with the highest importance level was determined as efficient and sustainable resource use, while the criterion with the lowest importance level was determined as social participation.

In order to obtain more consistent and reliable objective weights, the criterion weights calculated with the CRITIC and MEREC methods were combined with the common weighting method. In this context, the criterion with the highest importance level was the protection of natural capital, while the criterion with the lowest importance level was the social participation criterion. The criterion weights obtained with the mentioned method were used in the WASPAS method and European countries were ranked in terms of their green growth performances. As a result of the evaluation, the countries with the best performance in terms of green growth were Switzerland, Austria and Germany, respectively. The high ranking of these countries can be associated with their strong policies in the field of environmental sustainability, the importance they attach to energy efficiency, and their strategic approaches focused on green economy. When evaluated based on the current criteria, it was observed that Switzerland received the highest values in the efficient and sustainable use of resources and social participation, while Germany received the highest values in the green economic opportunities criterion. Austria was found to have high values in all criteria in general. According to the results obtained from the WASPAS method, Montenegro, Malta, and Iceland were determined to be the countries in the last place. It is noteworthy that Montenegro performed poorly in the efficient and sustainable use of resources and social participation criteria, Malta in the green economic opportunities criteria, and Iceland in the protection of natural capital criteria. Based on these explanations, it can be said that developed countries can implement environmental sustainability policies more effectively, while developing countries lag behind in this regard due to structural and institutional deficiencies. The findings obtained are parallel to some studies in the literature. For example, in this study, the protection of natural capital criterion had the highest weight with the common weighting method, while in the study of Altıntaş (2022), the green economic opportunities criterion was determined to be the criterion with the highest importance level. In the analyses conducted by Mughees and Ayaz (2022), Altıntaş (2022), Eşiyok et al. (2023) and Pamucar et al. (2024), Germany stands out in terms of green growth performance. However, a notable difference from the current study is that Switzerland and Austria are also among the best performing countries. Although the findings on these countries in the literature are limited, Ireland, Greece and Estonia were identified as the best countries in terms of green growth performance in the study conducted by Doskočil (2022). It is thought that this situation may be due to the different criteria sets and weighting methods used in the study. In future studies, the green growth performances of different country groups can be analyzed. In this context, similarities and differences with the studies in the literature can be revealed by using various weighting techniques and alternative MCDM methods. In addition, more comprehensive evaluations can be made by subjecting the countries included in the GGI to cluster analysis in terms of green growth performance.

1. GİRİŞ

Sanayi Devrimi ve sonrasında yaşanan teknolojik gelişmeler, kaynak kullanımında ve enerji talebinde önemli bir artışa yol açmıştır. Bu enerji talebi büyük ölçüde fosil yakıtlarla karşılanmış; mevcut ekonomik büyüme modelleri ise çevresel kaynakları sınırsız varsayarak çevre üzerinde ciddi olumsuz etkilerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. 1970'li yıllara gelindiğinde yaşanan petrol krizi, uluslararası düzeyde mevcut sistemin sorgulanmasına yol açmış ve çevreye duyarlı bir ekonomik büyüme modelinin gerekliliği gündeme gelmiştir. Bu gelişmelerin ardından, çevreye saygılı ve doğal kaynakların sürdürülebilir bir biçimde kullanımını esas alan büyüme modelleri üzerine çalışmalar başlatılmış ve bu çabalar sonucunda "sürdürülebilir kalkınma" kavramı ortaya çıkmıştır. 2000'li yıllara gelindiğinde ise sürdürülebilir kalkınma hedefine ulaşmak için kullanılan stratejilerden biri olarak "yeşil büyüme" kavramı öne çıkmıştır (Karadaş ve Işık, 2019). Son yıllarda dikkat çeken bir gelişme gösteren yeşil büyüme kavramı, çeşitli araştırmalarda yoğun ilgi görmektedir (Alrasheedi ve diğerleri, 2021). Bu kavram, ekonomik büyümenin koordine edilmesi ve çevresel bozulmayla etkin bir şekilde mücadele edilmesi amacıyla, ilk kez 2005 yılında Birleşmiş Milletler Asya ve Pasifik Ekonomik ve Sosyal Komisyonu (UNESCAP) tarafından gündeme getirilmiştir (Guo ve diğerleri, 2018).

Sürdürülebilir kalkınma çerçevesinde, çevresel bozulma göz önünde bulundurularak, ekolojik denge ile ekonomik büyüme birbirinden ayrılmaksızın ele alınmakta; doğal kaynakların etkin kullanımıyla bugünkü ihtiyaçların karşılanması sağlanmakta ve gelecekte ortaya çıkabilecek ihtiyaçların da karşılanabilmesine imkân tanınmaktadır (Yücel ve Terzioğlu, 2023). Bu bağlamda sürdürülebilir kalkınma, daha genel bir kavram ve ulaşılması gereken bir hedef olarak değerlendirilirken; yeşil büyüme, bu hedefe ulaşmak için kullanılan araçlardan biri olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, yeşil büyümeyi sürdürülebilir kalkınmanın yerine geçen bir kavram olarak tanımlamak doğru değildir. Yeşil büyüme, sürdürülebilirliğin ekonomik sistemin doğru işlemesiyle sağlanabileceği yaklaşımına dayanmaktadır. Bu anlayış, çevresel yatırımları ön plana çıkararak ekonomik kalkınmanın gerçekleşmesini amaçlamakta ve böylece sürdürülebilirliği teşvik etmektedir (Arlı Yılmaz, 2014: 9).

Yeşil büyüme; ekonomik büyüme ile ekolojik dengeyi, değişen iklim koşulları ve çevresel faktörler doğrultusunda sağlamayı amaçlayan ve gelecek nesillerin de bugünkü koşullara sahip olmasını hedefleyen bir politika anlayışıdır (Ağaoğlu, 2023). Bu kavram, büyüme süreçlerinin yavaşlatılmadan; kaynakların daha verimli, temiz ve dayanıklı hale getirilmesini öngörmektedir (Hallegatte ve diğerleri, 2012: 3).

Ekonomik Kalkınma İşbirliği Örgütü (OECD (2011)) tarafından yeşil büyüme, insan ihtiyaçlarını karşılayan doğal varlıklara zarar vermeden ekonomik büyümenin sürdürülebilir bir şekilde devam etmesi olarak tanımlanmıştır (Şeker ve Çetin, 2015). Ayrıca yeşil büyüme; "ekonomik büyüme ve kalkınmanın gerçekleştirilirken çevre üzerindeki olumsuz etkilerin en aza indirilmek suretiyle kaynakların verimli ve etkin bir şekilde kullanılması" olarak ifade edilebilmektedir (Zuhal ve Cantürk, 2022: 286).

Yeşil Büyüme İndeksi (YBİ), verimli ve sürdürülebilir kaynak kullanımı, doğal sermayenin korunması, yeşil ekonomik fırsatlar ve sosyal katılım olmak üzere dört kriterden oluşan bileşik bir indekstir. İndeks ilk olarak 2019 yılında Küresel Yeşil Büyüme Enstitüsü tarafından yayınlanmıştır. 2023 yılında yayınlanan YBİ'de 16 gösterge kategorisi ve toplam 48 gösterge yer almakta olup 157 ülke değerlendirmeye alınmıştır (GGGI, 2023). Aşağıdaki Tablo 1'de Yeşil Büyüme İndeksi için kavramsal bir çerçeve sunulmuştur (GGGI, 2023).

Tablo 1. Yeşil Büyüme İndeksi için kavramsal çerçeve

<i>Kriterler</i>	
<i>Verimli ve sürdürülebilir kaynak kullanımı</i>	<i>Yeşil ekonomik fırsatlar</i>
Verimli ve sürdürülebilir enerji	Yeşil yatırım
Verimli ve sürdürülebilir su kullanımı	Yeşil ticaret
Sürdürülebilir arazi kullanımı	Yeşil istihdam
Malzeme kullanım verimliliği	Yeşil inovasyon
<i>Sosyal katılım</i>	<i>Doğal sermayenin korunması</i>
Temel hizmetlere ve kaynaklara erişim	Çevresel kalite
Cinsiyet dengesi	Sera gazı (GHG) emisyonları azaltımı
Sosyal eşitlik	Biyolojik çeşitlilik ve ekosistem koruma
Sosyal koruma	Kültürel ve sosyal değer

Kaynak: GGGI (2023).

Günümüzde, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerdeki ana eğilim, yeşil büyümenin ulusal kalkınma planlarına dâhil edilmesi yönündedir (Streimikiene, 2024). Nitekim, yeşil büyümenin çevresel sürdürülebilirliği ekonomik büyüme ve toplumsal kalkınma hedefleriyle uyumlu hale getirebildiği ifade edilmektedir (Işık, 2025). Ayrıca, yeşil büyüme ve yeşil ekonomi yaklaşımları, ülkeler için sürdürülebilir kalkınmaya doğrudan ulaşma imkânı sunmaktadır (Özaslan, 2023). Bu çalışma kapsamında ise, konunun

öneminden hareketle ülkelerin yeşil büyüme performansları, Tablo 1'de belirtilen ve YBI'den elde edilen dört kritere ilişkin veriler kullanılarak ÇKKV yöntemleri aracılığıyla değerlendirilmiştir.

Karar süreçlerinde optimum çözümün seçimi kritik bir öneme sahiptir (Akram ve diğerleri, 2023). ÇKKV yöntemleri çok sayıda kriter ve alternatif arasından seçim yapılması durumunda karar verme süreci için gerekli araçları sağlamaktadır (Shanmugasundar ve diğerleri, 2022). Bu bağlamda ÇKKV analizinin temel amacı, önceden belirlenmiş bir dizi karar kriteri bağlamında mevcut alternatiflerin değerlendirilmesi ve sıralanmasıdır (Krishnan ve diğerleri, 2021). ÇKKV problemlerinde kriterlerin ağırlığı sonuçları önemli ölçüde etkileyen önemli bir unsurdur. Kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesinde çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (AHP (Analytical Hierarchy Process), DEMATEL (The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory), CRITIC, Entropi ve Standart Sapma) (Lukić, 2023: 40). Bu çalışma bağlamında MEREC yönteminin, kolay anlaşılabilir sağlam bir matematiksel alt yapısının bulunmasının yanı sıra hesaplamalar için özel programlar gerektirmemesi (Ayçin ve Arsu, 2021) ve CRITIC yönteminin ise en yaygın olarak kullanılan nesnel yöntemlerden biri (Žižović ve diğerleri, 2020) olması nedeniyle kriterlerin ağırlıklandırılmasında bu yöntemlerden faydalanılmıştır. Alternatiflerin değerlendirilmesinde ise farklı ağırlık senaryoları altında yapılan duyarlılık analizleri ile karar alternatiflerinin sıralama tutarlılığını değerlendirme imkânı sunan (Chakraborty ve Zavadskas, 2014) WASPAS yönteminden yararlanılmıştır.

Analizde Avrupa ülkelerinin seçilmesinin nedeni ise, bu ülkelerin yüksek veri erişilebilirliği ve güvenilirliği ile benzer sosyoekonomik özellikler taşımaları olarak gösterilebilir. Buna ek olarak, Avrupa ülkeleri teknolojik yenilikleriyle yeşil büyümenin sürdürülmesi bağlamında önemli bir örnek teşkil etmektedir (Nosheen ve diğerleri, 2021). İlgili literatür incelendiğinde ÇKKV yöntemlerinden yararlanılarak ülkelerin yeşil büyüme performanslarının belirlendiği ve değerlendirildiği sınırlı sayıda çalışma olduğu görülmektedir (Doskočil, 2022; Mughees ve Ayaz, 2022; Altıntaş, 2022; Eşiyok ve diğerleri, 2023; Pamucar ve diğerleri, 2024). Literatürde, CRITIC ve MEREC yöntemleriyle elde edilen kriter ağırlıklarının ortak bir ağırlıklandırma yöntemiyle birleştirilmesine yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca, CRITIC, MEREC ve WASPAS yöntemlerinin birlikte kullanılarak ülkelerin yeşil büyüme performanslarının değerlendirildiği bir çalışmaya literatürde yer verilmediği görülmüştür. Bu yönleriyle çalışmanın literatüre özgün bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Çalışma kapsamında öncelikle yeşil büyüme performansı ile ilgili literatür incelenmiş ve ardından CRITIC, MEREC ve WASPAS yöntemleri kullanılarak yapılmış bazı çalışmalara yer verilmiştir. Akabinde araştırmanın metodolojisi açıklanmış; son olarak bulgular analiz edilerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Literatürde ülkelerin yeşil büyüme performanslarının belirlenmesinde ÇKKV tekniklerinden yararlanılarak gerçekleştirilmiş güncel bazı çalışmalar ve CRITIC, MEREC ve WASPAS yöntemleri ile yapılmış güncel bazı çalışmalar aşağıda Tablo 2'de özetlenmiştir.

İlgili literatür incelendiğinde, yeşil büyüme performanslarının belirlenmesinde farklı ülke grupları ve çok sayıda ÇKKV yönteminin kullanıldığı görülmektedir. Örneğin, Doskočil (2022) AB üyesi ülkeleri AHP yöntemiyle değerlendirirken, Mughees ve Ayaz (2022) AHP ve TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemlerini bir arada kullanarak OECD ülkeleri arasında Almanya, Kanada ve Japonya'nın yeşil büyüme performansları açısından öne çıktığını tespit etmiştir. Altıntaş (2022), G7 ülkelerini Entropi tabanlı ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Realite) yöntemiyle analiz ederken; Eşiyok ve diğerleri (2023), Entropi, CRITIC ve EDAS (Evaluation based on Distance from Average Solution) yöntemlerini bir arada kullanarak G7 ülkeleri ve Türkiye'yi analiz etmiş ve Almanya'nın en yüksek performansa sahip ülke olduğunu tespit etmiştir. Benzer şekilde, Pamucar ve diğerleri (2024), G7 ülkelerinin performansını WENSLO (Weights by Envelope and Slope) ve ALWAS (Aczel-Alsina Weighted Assessment) yöntemleriyle değerlendirmiştir. Bu çalışmalar, önemli bulgular sunmalarıyla birlikte genellikle G7 veya OECD ülkelerine odaklanmakta ve çoğunlukla tek bir ağırlıklandırma yöntemiyle sınırlı kalmaktadır. Bu çalışmada ise yöntemsel çeşitlilik açısından literatüre özgün bir katkı sunulmaktadır. Öncelikle, CRITIC ve MEREC gibi iki farklı nesnel ağırlıklandırma yönteminin sonuçları ortak bir ağırlıklandırma yöntemiyle birleştirilmiş; böylece kriter önem dereceleri daha bütüncül bir biçimde elde edilmiştir. Ayrıca, ortak ağırlıklandırma yöntemi ile elde edilen ağırlıklar WASPAS yöntemine entegre edilerek Avrupa ülkelerinin yeşil büyüme performansları analiz edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda İsviçre, Avusturya ve Almanya en yüksek performansa sahip ülkeler olarak belirlenirken; Karadağ, Malta ve İzlanda ise son sıralarda yer almıştır. Bu durum, gelişmiş ülkelerin çevresel sürdürülebilirlik politikalarını daha etkin biçimde uygulayabildiğini, gelişmekte olan ülkelerin ise bu alanda geride kaldığını göstermektedir.

Yukarıdaki açıklamalardan hareketle literatürde, CRITIC ve MEREC yöntemleriyle elde edilen kriter ağırlıklarının entegre edilerek ortak bir ağırlıklandırma çerçevesinde birleştirildiği özgün bir uygulamaya rastlanmamıştır. Ayrıca, CRITIC, MEREC ve WASPAS yöntemlerinin birlikte kullanılarak ülkelerin yeşil

büyüme performanslarının analiz edildiği bir çalışmanın mevcut olmadığı gözlemlenmektedir. Bu bağlamda, söz konusu yöntemlerin kombinasyonuna dayanan bu çalışma hem metodolojik yenilik hem de uygulama alanı açısından literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

Tablo 2. Literatür incelemesi

Yazar/Yazarlar	Uygulama Alanı
<i>Yeşil Büyüme Performansı ile ilgili ÇKKV yöntemleri ile yapılmış güncel bazı çalışmalar</i>	
Doskočil (2022)	Bu çalışmada Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde karmaşık ve sistematik olarak değerlendirilen yeşil büyüme için yeni ve uygun bir yaklaşım önerilmiştir. Analizler kapsamında OECD Yeşil Büyüme (2022) veri tabanından yararlanılmıştır. Çalışmada dört kriter kullanılmış olup AHP yönteminden yararlanılmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçların güvenilirliğini test etmek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda İrlanda en yüksek performansa sahip ülke iken Yunanistan ve Estonya sırasıyla İrlanda'yı takip etmektedir.
Mughees ve Ayaz (2022)	Bu çalışmada, OECD göstergeleri kullanılarak dünyanın en büyük 10 ekonomisinin yeşil büyüme performansı analiz edilmiştir. Çalışmada kriterlerin ağırlıklandırılmasında AHP, ülkelerin sıralanmasında ise TOPSIS yöntemlerinden yararlanılmıştır. TOPSIS yöntemi ile elde edilen sonuçlara göre Almanya yeşil büyüme performansı açısından en iyi ülke olarak belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise Almanya'nın yenilenebilir enerji üretimi analiz edilmiş; güneş enerjisinin toplam üretim üzerindeki etkisi negatif bulunmuştur. Sonuçlar, politika yapıcılar için yol gösterici öneriler sunmakta ve gelecekteki araştırmalar için yönetsel geliştirmelere olanak tanımaktadır.
Altıntaş (2022)	Bu çalışmada 2019 yılı için YBI'den yararlanılarak G7 ülkelerinin yeşil büyüme performansları değerlendirilmiştir. Entropi tabanlı ELECTRE yönteminden yararlanılarak analizler yürütülmüştür. Yapılan analizler sonucunda ülkelerin nihai sıralaması Almanya, Fransa-İngiltere-Japonya, İtalya-Kanada ve ABD olarak belirlenmiştir.
Eşiyok ve diğerleri (2023)	Bu çalışma kapsamında G7 ülkeleri ve Türkiye'nin yeşil büyüme performanslarının belirlenmesinde YBI'den yararlanılmıştır. 2010-2020 yıllarına ait ülkelerin performans sıralamalarının yapılması için Entropi ve CRITIC ağırlıklandırma yöntemlerinden yararlanılmıştır. Alternatiflerin sıralanmasında ise EDAS yönteminden yararlanılmıştır. Bununla birlikte performans sıralamalarını etkileyen kriter ağırlıklarının önemini belirlenmesi amacıyla duyarlılık analizinden yararlanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda Almanya'nın en iyi performansa sahip ülke olduğu tespit edilmiştir.
Pamucar ve diğerleri (2024)	Bu çalışmada ülkelerin yeşil büyüme performanslarını belirlemek amacıyla WENSLO ve ALWAS yöntemlerinden yararlanılmıştır. G7 ülkeleri bağlamında yürütülen bu çalışmada 10 kriterin ağırlıklandırılmasında WENSLO; G7 ülkelerinin sıralanmasında ise ALWAS yönteminden yararlanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda Kanada ilk sırada yer alırken ülkelerin İngiltere, Almanya, Fransa, İtalya, Japonya ve ABD şeklinde sıralandığı görülmektedir.
<i>CRITIC, MEREC ve WASPAS yöntemleri ile yapılmış güncel bazı çalışmalar</i>	
Adalı ve Işık (2017)	Bu çalışmada fason üretici seçiminin yapılması amacıyla; dört alternatif ve yedi kriter kullanılmıştır. Kriterlerin ağırlıklandırılmasında CRITIC yönteminden alternatiflerin sıralanmasında ise MAUT (Multi-Attribute Utility Theory) yönteminden yararlanılmıştır. Yapılan analiz sonucunda bir tekstil işletmesi için fason üretici alternatifleri A3, A4, A1, A2 şeklinde sıralanmıştır.
Karakış (2021)	Bu çalışmada bir tekstil işletmesinde makine seçimi için CRITIC ve MAUT yöntemlerinden yararlanılmıştır. Çalışmada öncelikle, kriterlerin ağırlıkları CRITIC yöntemi ile belirlenmiş; ardından MAUT yöntemi kullanılarak alternatif makineler değerlendirilmiştir. Değerlendirme sürecinde 4'ü nitel, 3'ü nicel olmak üzere toplam 7 kriter esas alınmış ve bu kriterlere göre 4 farklı makine karşılaştırılmıştır. MAUT yöntemi ile yapılan analiz sonucunda en uygun alternatifin M2 makinesi olduğu belirlenmiştir. Alternatifler, en iyiden en kötüye doğru M2, M1, M4 ve M3 şeklinde sıralanmıştır.
Goswami ve diğerleri (2022)	Bu çalışmada MEREC-PIV (Proximity Indexed Value) yöntemlerinden yararlanılarak beş alternatif yenilenebilir enerji kaynağı altı kritere göre sıralanmıştır. Kriterler MEREC yöntemi ile ağırlıklandırılmış, alternatifler PIV yöntemi ile sıralanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, enerji kaynakları önem derecelerine göre sırasıyla hidroelektrik enerjisi, rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, jeotermal enerji ve biyokütle enerjisi olarak belirlenmiştir.
Shanmugasundar ve diğerleri (2022)	Bu çalışmada, yedi kriter dikkate alınarak 12 alternatif arasından en uygun spreyci boyama robotu seçilmiştir. Kriterlerin ağırlıklandırılmasında MEREC yöntemi kullanılmış, alternatiflerin sıralanmasında ise CODAS (Combination Distance-Based Assessment), COPRAS (Complex Proportional Assessment), CoCoSo (Combined Compromise Solution), MABAC (Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison) ve VIKOR (Višekriterijumsko Kompromisno Rangiranje) yöntemlerinden yararlanılmıştır. Analizler sonucunda, HY1010A-143 modeli, uygulanan beş tekniğin dördü tarafından spreyci boyama uygulamaları için en uygun robot olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. (Devamı)

<i>Yazar/Yazarlar</i>	<i>Uygulama Alanı</i>
Yenilmez ve Ertuğrul (2023)	Bu çalışmada en uygun laptop seçimi amacıyla objektif ağırlıklandırma yöntemlerinden MEREC yöntemi ile kriterler ağırlıklandırılmış olup WASPAS yöntemi ile alternatifler sıralanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda en önemli kriter sabit disk kapasitesi olarak belirlenirken, en uygun laptop A2 olarak tespit edilmiştir.
Lukić (2023)	Bu çalışmada Sırbistan ekonomisi, MEREC-WASPAS yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz kapsamında 13 kriter belirlenmiş ve 2010-2021 dönemine ait verilere göre ekonomik performans sıralaması yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda Sırbistan'ın 2012 yılında en iyi performansa sahip olduğu belirlenmiştir.
Keleş (2023)	Bu çalışmada ÇKKV yöntemlerinden yararlanılarak forklift seçimi yapılmıştır. Alternatiflerin değerlendirilmesinde ARAS (Additive Ratio Assessment), CODAS, COPRAS, CoCoSo, ELECTRE, MABAC, EDAS, VIKOR, TOPSIS, SAW (Simple Additive Weight), WASPAS, PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation), MOORA (Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis), MOOSRA (Multi-Objective Optimization on the basis of Simple Ratio Analysis), MAIRCA (Multi Attributive Ideal-Real Comparative Analysis), OCRA (Operational Competitiveness Ratings Analysis), PIV, GRA (Grey Relational Analysis), ROV (Range of Value), MARCOS (Measurement of Alternatives and Ranking according to Compromise Solution), PSI (Preference Selection Index) olmak üzere 21 farklı ÇKKV yönteminden yararlanılmıştır. Çalışma kapsamında belirlenen altı kriter MEREC yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Yöntemlerden elde edilen sıralamalar, Borda ve Copeland yöntemleri kullanılarak entegre edilmiştir.
Kara ve diğerleri (2024)	Bu çalışmada Türk Üniversitelerinin 2023 yılı akademik performanslarının belirlenmesinde ÇKKV tekniklerinden yararlanılmıştır. Veriler Times Higher Education (2023) tarafından yayınlanan 61 üniversitenin 2023 raporundan elde edilmiştir. Öğretim, araştırma, atıflar, endüstriyel gelir ve uluslararası görünüm olmak üzere toplam beş kriter, MEREC yöntemi ile ağırlıklandırılmış; üniversitelerin performans sıralaması ise WEDBA (Weighted Euclidean Distance-Based Approach) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz bulgularına göre, en yüksek performansa sahip ilk üç üniversite sırasıyla Çankaya Üniversitesi, Fırat Üniversitesi ve Bahçeşehir Üniversitesi olarak tespit edilmiştir.
Işık ve diğerleri (2024)	Bu çalışmada İstanbul Menkul Kıymetler Borsası'nda (İMKB) yer alan yiyecek içecek sektöründe faaliyet gösteren 27 işletme finansal performansları açısından sıralanmıştır. Çalışma kapsamında belirlenen beş kriter CRITIC ve DEMATEL yöntemleri ile ağırlıklandırılmıştır. İşletmelerin performansları EDAS, WASPAS ve TOPSIS yöntemleri ile sıralanmış olup yapılan analizler sonucunda en iyi performansa sahip işletmelerin CCOLA ve TBORG olduğu tespit edilmiştir.
Akdamar ve diğerleri (2024)	Bu çalışmada ÇKKV yöntemlerinden yararlanılarak dünya çapında en fazla limana sahip 20 ülkenin deniz ticareti performansları karşılaştırılmıştır. Belirlenen altı kriter CRITIC yöntemiyle ağırlıklandırılmış; ülkelerin performans sıralaması ise VIKOR yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. 2018-2022 yıllarına ait sıralamalar bağımsız olarak oluşturulmuş olup bu yıllara ilişkin sonuçların birleştirilmesinde ise Borda sayım yönteminden yararlanılarak nihai sıralama elde edilmiştir. Yapılan analiz sonucuna göre Japonya en yüksek performansa; Avustralya en düşük performansa sahip ülke olarak belirlenmiştir.
Ecer ve diğerleri (2024a)	Bu çalışmada, bankaların dijital dönüşüm performansı ÇKKV yöntemleri aracılığıyla değerlendirilmiştir. Kriterlerin ağırlıklandırılmasında SWARA (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis); bankaların sıralanmasında WASPAS yönteminden yararlanılmıştır. Bankaların sıralanmasında 11 kriter kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda en yüksek performansa sahip olan üç banka sırasıyla İş Bankası, Garanti BBVA ve Yapı Kredi olarak tespit edilmiştir.
Ecer ve diğerleri (2024b)	Bu çalışmada G7 ülkelerinin Bilgi İletişim Teknolojileri (BİT) düzeyleri CRITIC-MEREC ağırlıklandırma yöntemlerinden elde edilen ağırlıklar birleştirilerek CoCoSo yöntemi ile sıralanmıştır. Yapılan analizler sonucunda en iyi performansa sahip ülke ABD iken son sırada İtalya yer almıştır.
Akpınar (2025)	Bu çalışmada Lojistik 4.0 bağlamında lojistik hizmet sağlayıcılarının değerlendirilmesi ve en uygun hizmet sağlayıcının belirlenmesinde ÇKKV yöntemlerinden yararlanılmıştır. Çalışma kapsamında belirlenen 10 kriter CRITIC yöntemi ile ağırlıklandırılmış; beş alternatif ise WASPAS yöntemiyle sıralanmıştır. Yapılan analiz sonucunda Şirket 5'in en iyi alternatif olduğu tespit edilmiştir.

Kaynak: İlgili literatürden yararlanılarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

3. ARAŞTIRMANIN METODOLOJİSİ

Karmaşık karar problemlerinin analitik çözümünde, birden fazla yöntemin entegrasyonu hem nesnellik hem de sonuçların güvenilirliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışmada CRITIC, MEREC ve

WASPAS yöntemlerinin birlikte kullanılması hem nesnel kriter ağırlıklarının belirlenmesi hem de sıralama sonuçlarının güvenilirliğinin test edilmesi amacıyla tercih edilmiştir. Kriterlerin ağırlıklandırılmasında kullanılan CRITIC yöntemi, kriterler arasındaki korelasyon düzeylerini dikkate alarak istatistiksel temelli nesnel ağırlıklar üretmesi ve ÇKKV literatüründe en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olması nedeniyle tercih edilmiştir (Puška ve diğerleri, 2022). Ancak tek bir nesnel yöntemle elde edilen ağırlıkların sınırlı bir bakış açısı sunabileceği göz önünde bulundurularak, CRITIC yöntemine ek olarak MEREC yönteminden de yararlanılmıştır. MEREC yöntemi, her bir kriterin karar sürecine olan katkısını, söz konusu kriter analizden çıkarıldığında toplam performans değerinde meydana gelen değişiklik üzerinden değerlendirerek, kriter ağırlıklarını objektif bir biçimde belirlemeye olanak tanımaktadır (Raj ve diğerleri, 2024). Bu iki yöntemin birlikte kullanılması ağırlıklandırma sürecinde araştırmaya metodolojik çeşitlilik sağlamıştır. ÇKKV problemlerinde daha dengeli ve güvenilir sonuçlar elde edebilmek amacıyla, farklı objektif ağırlıklandırma yöntemlerinden elde edilen sonuçlar birleştirilerek ortak ağırlıklar oluşturulabilmektedir. Bu doğrultuda çalışmada kullanılan CRITIC ve MEREC yöntemlerinden elde edilen kriter ağırlıkları, Zavadskas ve Podvezko'nun (2016) ileri sürdüğü ortak ağırlıklandırma yöntemi ile birleştirilerek nihai kriter ağırlıkları belirlenmiştir. Alternatiflerin değerlendirilmesinde tercih edilen WASPAS yöntemi ise kendi içinde iki modeli entegre ederek, karar verme süreçlerinde daha yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağlamasıyla öne çıkmaktadır. Ayrıca, kendi içinde duyarlılık analizine imkân tanınması nedeniyle sıralama sonuçlarının tutarlılığını ve kararlılığını artmakta; bu nedenle karar vericiler tarafından tercih edilmektedir (Chakraborty ve Zavadskas, 2014).

3.1. CRITIC Yöntemi

CRITIC yöntemi Diakoulaki ve diğerleri tarafından 1995 yılında önerilmiştir. Yöntem endeks ağırlıklarını endekslerin bilgilerine ve aralarındaki korelasyona göre atamakta, bu da onu nesnel ağırlıklandırma yöntemlerinin içinde önemli ölçüde üstün kılmaktadır (Wu ve diğerleri, 2020). CRITIC yöntemi, daha nesnel ağırlıklar üretmek için veri varyasyonlarından ve kriterler arasındaki çatışma veya korelasyon düzeyinden gelen bilgileri kullanmaktadır (Gunawan ve diğerleri, 2024). CRITIC yönteminde, her kriter için seçenekler arasında ölçülen değerlerin bir üyelik fonksiyonu biçiminde ifade edilen bir dizi varyasyonu mevcuttur. Kullanılan kriterler için oluşturulan bileşenlerin her biri, standart sapma gibi istatistiksel parametrelere sahiptir (Naik ve diğerleri, 2021). CRITIC yönteminin işlem adımları aşağıdaki gibidir (Diakoulaki ve diğerleri, 1995):

Adım 1. Karar matrisinin oluşturulması: Yöntemin ilk aşamasında karar probleminin başlangıç karar matrisi X , Eşitlik 1'de belirtildiği şekilde oluşturulmaktadır.

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Adım 2. Karar matrisinin normalize edilmesi: Fayda kriteri için Eşitlik 2 ve maliyet kriteri için Eşitlik 3 kullanılarak; karar matrisinin x_{ij} elemanları normalizasyondan sonra r_{ij} 'ye dönüştürülmektedir.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (3)$$

Adım 3. Korelasyon matrisinin oluşturulması: CRITIC yönteminin üçüncü adımında korelasyon matrisi Eşitlik 4'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$p_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)(r_{ik} - \bar{r}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)^2 \sum_{i=1}^m (r_{ik} - \bar{r}_k)^2}} \quad (j, k = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

Adım 4. Bilgi miktarı değerlerinin hesaplanması: σ_j , kriter j 'nin standart sapma değeridir. c_j değerleri ise Eşitlik (5) ile hesaplanmaktadır.

$$c_j = \sigma_j \sum_{k=1}^n (1 - p_{jk}) \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

Adım 5. Kriter ağırlıklarının hesaplanması: Son adımda hesaplanan her bir j kriterinin c_j değeri, tüm kriter değerlerinin toplamına oranlanır. CRITIC yöntemi ile elde edilen ağırlıklar Eşitlik 6'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$w_j = \frac{c_j}{\sum_{k=1}^n (c_k)} \quad (j, k = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

3.2. MEREC Yöntemi

MEREC yöntemi Keshavarz-Ghorabae ve diğerleri tarafından 2021 yılında ileri sürülen bir nesnel ağırlıklandırma yöntemidir. MEREC yöntemi doğası gereği esnek bir yöntem olarak bilinmektedir. Yöntem, Entropi ve CRITIC gibi ağırlıklandırma yaklaşımlarıyla karşılaştırılmış olup bu karşılaştırma sonucunda güçlü bir yöntem olduğu ve nesnel kriter ağırlıklarını hesaplamak için etkili bir şekilde kullanılabileceği ortaya çıkmıştır (Das ve Das, 2023). MEREC yönteminde kriter ağırlıkları belirlenirken, ağırlığı hesaplanan kriter devre dışı bırakılarak toplam kriter ağırlığında ortaya çıkan değişikliğe bakılmaktadır. Bu özelliği ile MEREC yöntemi diğer objektif ağırlıklandırma yöntemlerinden farklılaşmaktadır (Keshavarz-Ghorabae ve diğerleri, 2021). MEREC yöntemi altı adımdan meydana gelmektedir (Keshavarz-Ghorabae ve diğerleri, 2021: 8):

Adım 1. Karar matrisinin oluşturulması: Karar matrisi $X = [x_{ij}]_{m \times n}$ Eşitlik 7’de gösterildiği gibi oluşturulmaktadır.

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{21} & \cdots & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

x_{ij} , i . alternatifin, j . kriterdeki değerini ifade etmektedir.

Adım 2. Karar matrisinin normalize edilmesi: Karar matrisinin normalizasyonu Eşitlik 8 ile hesaplanmaktadır.

$$n_{ij} = \begin{cases} \frac{\min_k x_{kj}}{x_{ij}}, & j \in B \\ \frac{x_{ij}}{\max_k x_{kj}}, & j \in C \end{cases} \quad (8)$$

Eşitlik 8’de B fayda yönlü kriterleri, C ise maliyet yönlü kriterleri ifade etmektedir.

Adım 3. Alternatiflerin genel performans değerlerinin (S_i) hesaplanması: Bu adımda alternatiflerin genel performanslarını elde etmek için eşit kriter ağırlıklarına sahip logaritmik bir ölçüt kullanılır. S_i değerleri Eşitlik 9’da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$S_i = \ln \left(1 + \left(\frac{1}{m} \sum_j |\ln(n_{ij}^x)| \right) \right) \quad (9)$$

Adım 4. Alternatiflerin performans niceliğindeki değişimlerinin hesaplanması (S'_{ij}): MEREC yönteminin bu adımında, önceki adıma benzer şekilde logaritmik bir ölçüt kullanılmaktadır. Alternatiflere ait performans değerleri ise her bir kriterin ilgili sütundan ayrı ayrı çıkarılmasına dayalı olarak hesaplanmaktadır. S'_{ij} değerleri Eşitlik 10’da gösterildiği gibidir.

$$S'_{ij} = \ln \left(1 + \left(\frac{1}{m} \sum_{k, k \neq j} |\ln(n_{ik}^x)| \right) \right) \quad (10)$$

Adım 5. Mutlak sapmaların toplamının hesaplanması (E_j): Yöntemin beşinci adımında mutlak sapmaların toplamı Eşitlik 11’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$E_j = \sum_i |S'_{ij} - S_i| \quad (11)$$

Adım 6. Kriter ağırlıklarının hesaplanması: Yöntemin son adımında ise kriter ağırlıkları Eşitlik 12 ile elde edilmektedir.

$$w_j = \frac{E_j}{\sum_k E_k} \quad (12)$$

3.3. Ortak Ağırlıklandırma Yöntemi

ÇKKV yöntemlerinde analizler için daha doğru ve güvenilir bir model kurabilmek amacıyla ortak ağırlıklandırma yapılabilmektedir. Zavadskas ve Podvezko (2016), ileri sürdükleri ortak ağırlıklandırma yöntemi ile kriterler için daha uygun ve güvenilir, objektif ağırlıklar elde etmişlerdir. Bu doğrultuda CRITIC ve MEREC yöntemlerinden elde edilen kriter ağırlıkları Eşitlik 13 ile birleştirilerek her bir kriter için objektif ağırlıklar hesaplanmıştır.

$$w_{j, ortak} = \frac{w_{j, critic} w_{j, merec}}{\sum_{j=1}^m w_{j, critic} w_{j, merec}} \quad (13)$$

3.4. WASPAS Yöntemi

WASPAS yöntemi, Chakraborty ve Zavadskas (2014) tarafından ileri sürülen ÇKKV yöntemlerinden biridir. WASPAS yöntemi literatürde karmaşık karar verme durumlarında oldukça etkili bir yöntem olarak bilinmektedir (Mohammadi ve diğerleri, 2022). Bu yöntem Ağırlıklı Toplam Modeli (Weighted Sum Model) ve Ağırlıklı Çarpım Modeli (Weighted Product Model) olmak üzere iki modeli birleştirmektedir. Bu özelliği ile karar verme süreçlerinde daha yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağlamasıyla öne çıkmaktadır. Özellikle yöntemin yüksek doğruluk düzeyinde tahminler üretebilme yetisi hem uygulama etkinliğini hem de akademik literatürdeki değerini artırmaktadır (Rao ve Sujatha, 2023). WASPAS yöntemi altı adımdan meydana gelmektedir. Bu adımlar (Chakraborty ve Zavadskas, 2014):

Adım 1. Karar matrisinin oluşturulması: WASPAS yönteminin işlem adımlarına karar matrisinin oluşturulması ile başlanmaktadır. Karar matrisi $X = [x_{ij}]_{m \times n}$ Eşitlik 14'te gösterildiği gibi oluşturulmaktadır.

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{21} & \cdots & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

x_{ij} , i . alternatifin, j . kriterdeki değerini göstermektedir.

Adım 2. Normalize edilmiş karar matrisinin oluşturulması: Bu adımda, oluşturulan karar matrisi için doğrusal normalizasyon işlemi yapılmaktadır. Fayda kriterleri için Eşitlik 15 ve maliyet kriterleri için ise Eşitlik 16 ile normalizasyon işlemi gerçekleştirilmektedir.

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}} \quad (15)$$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}} \quad (16)$$

Adım 3. Ağırlıklı Toplam Yöntemine (WSM) dayalı i . alternatifin toplam nispi öneminin hesaplanması: Adım 3'te Eşitlik 17 ile WSM yöntemine göre toplam nispi önem hesaplanmaktadır.

$$Q_i^{(1)} = \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} \cdot w_j \quad (17)$$

Adım 4. Ağırlıklı Ürün Yöntemine (WPM) dayalı i . alternatifin toplam nispi öneminin hesaplanması: WASPAS yönteminin 4. adımında ise WPM yöntemine göre toplam göreceli önemlilik değerleri hesaplanmaktadır (Eşitlik 18).

$$Q_i^{(2)} = \prod_{j=1}^n (\bar{x}_{ij})^{w_j} \quad (18)$$

Adım 5. Toplamsal ve çarpımsal metodların ağırlıklandırılmış ortak genel kriter değerinin hesaplanması: Adım 5'te Eşitlik 19 ile toplamsal ve çarpımsal yöntemlerin ağırlıklı ortak genelleştirilmiş kriter değerleri hesaplanmaktadır.

$$Q_i = 0.5Q_i^{(1)} + 0.5Q_i^{(2)} = 0.5 \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} \cdot w_j + 0.5 \prod_{j=1}^n (\bar{x}_{ij})^{w_j} \quad (19)$$

Adım 6. Alternatiflerin genel toplam göreceli öneminin hesaplanması: WASPAS yönteminde alternatifler sıralanırken yöntemin doğruluğunun ve etkinliğinin artırılması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda Eşitlik 20, alternatiflerin toplam göreceli önemini belirlemek için kullanılmaktadır.

$$Q_i = \lambda Q_i^{(1)} + (1-\lambda)Q_i^{(2)} = \lambda \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} \cdot w_j + (1-\lambda) \prod_{j=1}^n (\bar{x}_{ij})^{w_j} \quad (\lambda = 0, 0.1, \dots, 1) \quad (20)$$

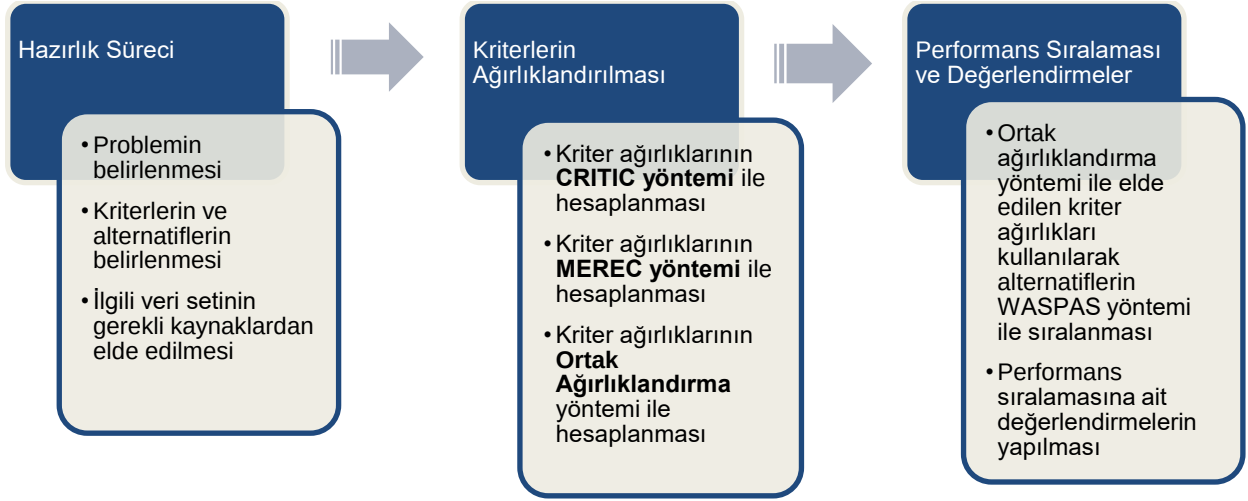
Kullanılan alternatifler Q değerine göre derecelendirilir. $\lambda=0$ olduğu durumda WASPAS yöntemi WPM'ye dönüştürülürken, $\lambda=1$ olduğunda ise WSM yöntemine dönüştürülmektedir.

4. ARAŞTIRMANIN BULGULARI

Çalışmada Avrupa ülkelerinin yeşil büyüme performanslarını değerlendirmek amacıyla ÇKKV yöntemlerinden faydalanılmıştır. Şekil 1'de çalışmanın uygulama sürecine ait adımlar görülmektedir.

4.1. CRITIC Yönteminin Uygulanması

Çalışmada öncelikle, YBİ'de yer alan dört temel kriter ve 39 Avrupa ülkesine ait değerler kullanılarak bir karar matrisi oluşturulmuş olup söz konusu karar matrisi Tablo 3'te gösterildiği gibidir.



Şekil 1. Çalışmanın uygulama süreci (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur)

Tablo 3. Karar matrisi

Ülkeler	Verimli ve Sürdürülebilir Kaynak Kullanımı	Doğal Sermayenin Koruması	Yeşil Ekonomik Fırsatlar	Sosyal Katılım
Almanya	66,99	82,65	62,63	92,67
Arnavutluk	66,01	82,32	38,31	79,35
Avusturya	80,24	80,43	53,46	93,83
Belarus	62,63	72,91	57,48	88,25
Belçika	51,98	76,65	45,78	91,52
Birleşik Krallık	67,89	78,52	51,45	91,47
Bosna Hersek	68,86	65,33	51,44	72,56
Bulgaristan	53,32	80,31	40,34	82,79
Çekya	70,80	81,53	53,89	86,93
Danimarka	78,23	71,30	58,76	91,22
Estonya	63,51	75,18	44,86	87,02
Finlandiya	68,39	72,23	54,70	92,15
Fransa	67,23	78,69	44,52	92,75
Hırvatistan	63,93	83,79	35,39	83,32
Hollanda	57,72	71,04	53,55	93,39
İrlanda	59,47	58,31	32,73	88,63
İspanya	60,10	76,18	41,40	92,18
İsveç	76,31	78,17	50,59	94,69
İsviçre	84,90	79,97	56,62	94,01
İtalya	65,90	80,29	47,04	87,32
İzlanda	55,66	44,37	36,22	88,16
Karadağ	31,07	66,46	32,01	71,03
Letonya	72,92	76,22	35,05	84,69
Litvanya	68,60	72,48	42,14	84,62
Lüksemburg	71,39	75,32	35,78	88,40
Macaristan	65,45	80,80	46,95	83,06
Makedonya	59,01	74,97	45,08	73,25
Malta	45,11	63,04	24,33	82,36
Moldova	61,10	66,99	29,20	82,78
Norveç	61,51	69,76	46,77	93,06
Polonya	59,60	75,58	43,57	88,15
Portekiz	64,63	78,44	41,85	91,20
Romanya	62,05	77,24	39,31	84,65
Rusya	53,06	57,54	47,55	78,14
Sırbistan	61,33	69,44	38,75	77,07
Slovakya	72,09	84,03	43,11	82,72
Slovenya	61,63	78,77	49,10	86,30
Ukrayna	56,05	65,95	39,47	74,45
Yunanistan	64,35	76,80	29,10	85,76

Karar matrisi oluşturulduktan sonra CRITIC yönteminin işlem adımları uygulanmış olup bu kısımda sadece nihai kriter ağırlıklarına yer verilmiştir. CRITIC yöntemine ait çözüm aşamaları ise Ekler bölümünde Tablo

A1–A3 aralığında verilmiştir. Yöntemden elde edilen kriter ağırlıkları Eşitlik 6 ile hesaplanarak Tablo 4'teki değerler elde edilmiştir.

Tablo 4. CRITIC yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları

	<i>Verimli ve Sürdürülebilir Kaynak Kullanımı</i>	<i>Doğal Sermayenin Korunması</i>	<i>Yeşil Ekonomik Fırsatlar</i>	<i>Sosyal Katılım</i>
w_j	0,2056	0,3200	0,2088	0,2656

CRITIC yöntemi ile yapılan analiz sonuçlarına göre en yüksek önem derecesine sahip kriter doğal sermayenin korunması kriteri olurken önem derecesi en düşük kriter ise verimli ve sürdürülebilir kaynak kullanımı olarak tespit edilmiştir.

4.2. MEREC Yönteminin Uygulanması

MEREC yönteminin uygulama aşamasında öncelikle Tablo 3'teki karar matrisinden faydalanılmış olup sırasıyla yönetime ait işlem adımları uygulanarak kriter ağırlıkları elde edilmiştir. MEREC yöntemine ait çözüm aşamaları ise Ekler bölümünde Tablo A4–A7 aralığında verilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen kriter ağırlıkları Tablo 5'te gösterildiği gibidir.

Tablo 5. MEREC yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları

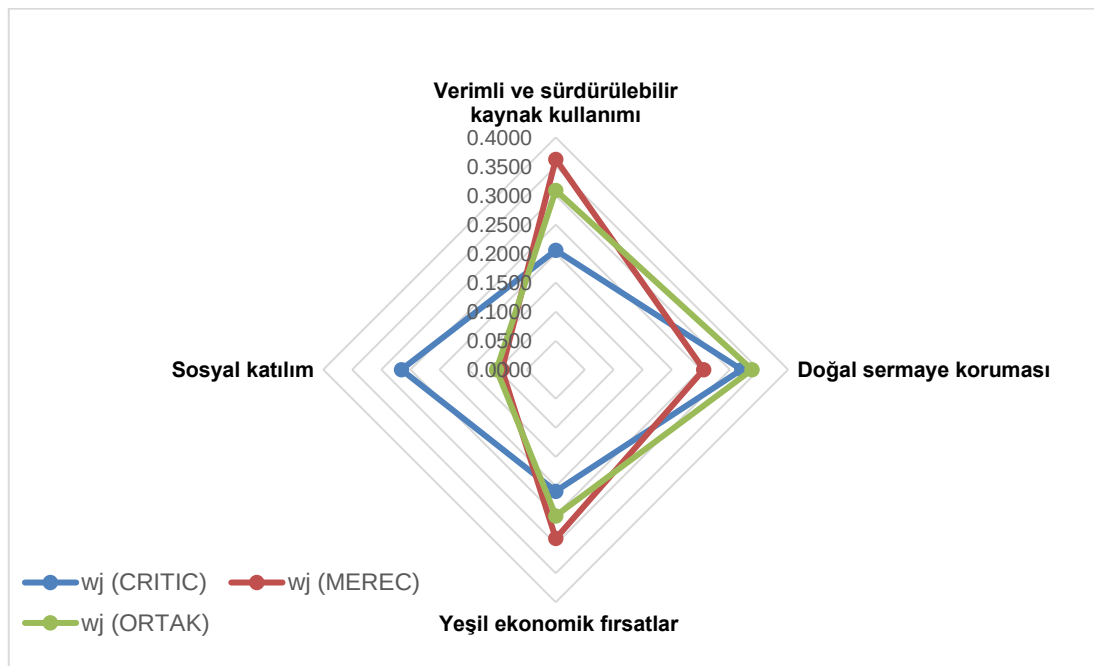
	<i>Verimli ve Sürdürülebilir Kaynak Kullanımı</i>	<i>Doğal Sermayenin Korunması</i>	<i>Yeşil Ekonomik Fırsatlar</i>	<i>Sosyal Katılım</i>
w_j	0,3623	0,2548	0,2903	0,0926

MEREC yöntemi ile elde edilen sonuçlara göre en yüksek önem derecesine sahip kriter verimli ve sürdürülebilir kaynak kullanımı olurken en düşük önem derecesine sahip kriter ise sosyal katılım olarak belirlenmiştir.

Daha tutarlı ve güvenilir objektif ağırlıkların elde edilebilmesi amacıyla CRITIC ve MEREC yöntemi ile hesaplanan kriter ağırlıkları Eşitlik 13 yardımıyla birleştirilmiştir. Ortak ağırlıklandırma yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları Tablo 6'da gösterildiği gibidir. Bu kapsamda önem derecesi en yüksek kriter doğal sermayenin korunması olurken önem derecesi en düşük kriter sosyal katılım kriteri olmuştur.

Tablo 6. Ortak ağırlıklandırma yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları

	<i>Verimli ve Sürdürülebilir Kaynak Kullanımı</i>	<i>Doğal Sermayenin Korunması</i>	<i>Yeşil Ekonomik Fırsatlar</i>	<i>Sosyal Katılım</i>
w_j	0,3088	0,3380	0,2513	0,1019



Şekil 2. Radar grafiği ile kriter ağırlıklarının karşılaştırılması

Şekil 2’de ise CRITIC, MEREC ve ortak ağırlıklandırma yöntemlerinden elde edilen kriter ağırlıklarının karşılaştırıldığı radar grafiği yer almaktadır. Söz konusu grafik, tüm yöntemlerin sonuçlarının tek bir görsel üzerinde bir araya getirilerek bütüncül bir karşılaştırmanın yapılmasına olanak tanımaktadır.

4.3. WASPAS Yönteminin Uygulanması

Ortak ağırlıklandırma yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak WASPAS yöntemi ile Avrupa ülkeleri yeşil büyüme performansları açısından sıralanmıştır. Yöntemin işlem adımları sırasıyla uygulanmış olup son adıma ait sıralama sonuçları Tablo 7’de gösterildiği gibidir. WASPAS yöntemine ait çözüm aşamaları ise Ekler bölümünde Tablo A8–A11 aralığında verilmiştir.

Tablo 7. Alternatiflerin genel toplam görelî öneminin hesaplanması

Ülkeler	$\lambda=0$	$\lambda=0,1$	$\lambda=0,2$	$\lambda=0,3$	$\lambda=0,4$	$\lambda=0,5$	$\lambda=0,6$	$\lambda=0,7$	$\lambda=0,8$	$\lambda=0,9$	$\lambda=0,10$	Sıralama
Almanya	0,9222	0,9227	0,9232	0,9237	0,9242	0,9247	0,9252	0,9257	0,9261	0,9266	0,9271	3
Arnavutluk	0,7976	0,7988	0,8001	0,8014	0,8027	0,8039	0,8052	0,8065	0,8078	0,8090	0,8103	18
Avusturya	0,9297	0,9298	0,9299	0,9300	0,9301	0,9303	0,9304	0,9305	0,9306	0,9307	0,9309	2
Belarus	0,8431	0,8435	0,8438	0,8442	0,8445	0,8449	0,8452	0,8456	0,8460	0,8463	0,8467	10
Belçika	0,7674	0,7686	0,7698	0,7710	0,7722	0,7734	0,7747	0,7759	0,7771	0,7783	0,7795	29
Birleşik Krallık	0,8651	0,8654	0,8656	0,8659	0,8661	0,8664	0,8666	0,8669	0,8671	0,8674	0,8676	7
Bosna Hersek	0,7975	0,7975	0,7975	0,7975	0,7976	0,7976	0,7976	0,7976	0,7977	0,7977	0,7977	20
Bulgaristan	0,7534	0,7548	0,7563	0,7577	0,7592	0,7606	0,7621	0,7636	0,7650	0,7665	0,7679	30
Çekya	0,8933	0,8935	0,8937	0,8939	0,8941	0,8943	0,8945	0,8947	0,8949	0,8950	0,8952	6
Danimarka	0,9043	0,9044	0,9045	0,9046	0,9047	0,9048	0,9049	0,9050	0,9051	0,9052	0,9053	4
Estonya	0,8027	0,8032	0,8036	0,8040	0,8045	0,8049	0,8053	0,8058	0,8062	0,8066	0,8070	17
Finlandiya	0,8567	0,8568	0,8569	0,8570	0,8572	0,8573	0,8574	0,8575	0,8577	0,8578	0,8579	9
Fransa	0,8335	0,8341	0,8347	0,8353	0,8359	0,8365	0,8371	0,8377	0,8383	0,8389	0,8395	13
Hırvatistan	0,7827	0,7845	0,7864	0,7882	0,7901	0,7919	0,7938	0,7957	0,7975	0,7994	0,8012	23
Hollanda	0,8052	0,8058	0,8064	0,8069	0,8075	0,8081	0,8087	0,8093	0,8099	0,8105	0,8111	16
İrlanda	0,6681	0,6691	0,6700	0,6710	0,6719	0,6729	0,6738	0,6747	0,6757	0,6766	0,6776	36
İspanya	0,7815	0,7823	0,7832	0,7841	0,7850	0,7859	0,7868	0,7877	0,7886	0,7894	0,7903	26
İsveç	0,8949	0,8951	0,8953	0,8955	0,8957	0,8959	0,8961	0,8963	0,8965	0,8967	0,8969	5
İsviçre	0,9581	0,9582	0,9582	0,9583	0,9584	0,9585	0,9585	0,9586	0,9587	0,9588	0,9588	1
İtalya	0,8405	0,8409	0,8414	0,8419	0,8424	0,8429	0,8434	0,8439	0,8444	0,8449	0,8454	11
İzlanda	0,6119	0,6129	0,6138	0,6147	0,6156	0,6165	0,6175	0,6184	0,6193	0,6202	0,6211	37
Karadağ	0,5556	0,5586	0,5615	0,5645	0,5674	0,5704	0,5734	0,5763	0,5793	0,5822	0,5852	39
Letonya	0,7888	0,7903	0,7918	0,7933	0,7947	0,7962	0,7977	0,7992	0,8006	0,8021	0,8036	21
Litvanya	0,7970	0,7975	0,7979	0,7983	0,7987	0,7991	0,7995	0,8000	0,8004	0,8008	0,8012	19
Lüksemburg	0,7880	0,7894	0,7907	0,7920	0,7934	0,7947	0,7960	0,7973	0,7987	0,8000	0,8013	22
Macaristan	0,8358	0,8363	0,8368	0,8373	0,8378	0,8383	0,8388	0,8393	0,8398	0,8403	0,8408	12
Makedonya	0,7713	0,7718	0,7722	0,7727	0,7731	0,7736	0,7741	0,7745	0,7750	0,7754	0,7759	28
Malta	0,5803	0,5826	0,5850	0,5874	0,5897	0,5921	0,5944	0,5968	0,5992	0,6015	0,6039	38
Moldova	0,6814	0,6830	0,6847	0,6863	0,6880	0,6897	0,6913	0,6930	0,6946	0,6963	0,6979	35
Norveç	0,7885	0,7889	0,7893	0,7896	0,7900	0,7903	0,7907	0,7911	0,7914	0,7918	0,7921	24
Polonya	0,7838	0,7845	0,7852	0,7858	0,7865	0,7871	0,7878	0,7885	0,7891	0,7898	0,7905	25
Portekiz	0,8084	0,8093	0,8101	0,8109	0,8117	0,8125	0,8134	0,8142	0,8150	0,8158	0,8167	15
Romanya	0,7759	0,7768	0,7777	0,7787	0,7796	0,7805	0,7815	0,7824	0,7833	0,7843	0,7852	27
Rusya	0,6963	0,6966	0,6969	0,6972	0,6975	0,6978	0,6981	0,6984	0,6987	0,6990	0,6993	34
Sırbistan	0,7360	0,7365	0,7370	0,7374	0,7379	0,7384	0,7389	0,7394	0,7398	0,7403	0,7408	32
Slovakya	0,8537	0,8546	0,8554	0,8563	0,8571	0,8580	0,8588	0,8597	0,8605	0,8614	0,8622	8
Slovenya	0,8258	0,8263	0,8268	0,8273	0,8278	0,8283	0,8289	0,8294	0,8299	0,8304	0,8309	14
Ukrayna	0,7042	0,7046	0,7049	0,7053	0,7056	0,7059	0,7063	0,7066	0,7069	0,7073	0,7076	33
Yunanistan	0,7271	0,7296	0,7321	0,7346	0,7371	0,7396	0,7421	0,7445	0,7470	0,7495	0,7520	31

WASPAS yönteminden elde edilen sonuçlara göre yeşil büyüme performansı açısından en iyi ülkeler sırasıyla İsviçre, Avusturya ve Almanya olurken; Karadağ, Malta ve İzlanda ise son sırada yer alan ülkeler olarak tespit edilmiştir.

5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Özellikle ekonomik büyümenin çevresel hassasiyetler gözetilerek sağlanması, hem enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasına hem de gelecek nesillere daha temiz bir çevre bırakılmasına katkı sunmaktadır (Altıntaş, 2022). Bu bağlamda, yeşil büyüme stratejilerinin planlanması ve hayata geçirilmesinde ÇKKV yöntemleri etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Söz konusu yöntemler, karar alma süreçlerine sistematik ve nesnel bir yaklaşım kazandırarak, yeşil büyüme hedeflerine daha dengeli ve tutarlı bir şekilde ulaşılmasına yardımcı olmaktadır.

Çalışmada, 2023 yılında yayınlanan YBİ kriterleri önce CRITIC, ardından MEREC yöntemiyle ağırlıklandırılmış olup iki yöntemin ağırlıkları ortak ağırlıklandırma yöntemiyle birleştirilmiştir. Ortak ağırlıklandırma yöntemi ile önem derecesi en yüksek kriter doğal sermayenin korunması olurken önem derecesi en düşük kriter ise sosyal katılım kriteri olarak tespit edilmiştir. Söz konusu yöntem ile elde edilen kriter ağırlıkları WASPAS yönteminde kullanılmış olup Avrupa ülkeleri yeşil büyüme performansları açısından sıralanmıştır. Yapılan değerlendirme sonucunda yeşil büyüme açısından en iyi performans gösteren ülkeler sırasıyla İsviçre, Avusturya ve Almanya olmuştur. Bu ülkelerin üst sıralarda yer alması, çevresel sürdürülebilirlik alanındaki güçlü politikaları, enerji verimliliğine verdikleri önem ve yeşil ekonomi odaklı stratejik yaklaşımlarıyla ilişkilendirilebilir. Mevcut kriterler üzerinden değerlendirildiğinde İsviçre'nin verimli ve sürdürülebilir kaynak kullanımı ve sosyal katılım, Almanya'nın yeşil ekonomik fırsatlar kriterinde en yüksek değerleri aldığı görülmüştür. Avusturya'nın ise genel olarak tüm kriterlerde yüksek değerler aldığı tespit edilmiştir. WASPAS yönteminden elde edilen sonuçlara göre Karadağ, Malta ve İzlanda son sırada yer alan ülkeler olarak tespit edilmiştir. Karadağ'ın verimli ve sürdürülebilir kaynak kullanımı ve sosyal katılım; Malta'nın yeşil ekonomik fırsatlar, İzlanda'nın ise doğal sermayenin korunması kriterlerinde düşük performans sergilediği dikkat çekmektedir. Bu açıklamalardan hareketle, gelişmiş ülkelerin çevresel sürdürülebilirlik politikalarını daha etkin biçimde uygulayabildiği, gelişmekte olan ülkelerin ise yapısal ve kurumsal eksiklikler nedeniyle bu noktada geride kaldığı söylenebilir.

Elde edilen bulgular, literatürdeki bazı çalışmalarla benzerlikler taşıırken, bazılarıyla ise farklılık göstermektedir. Örneğin, bu çalışmada ortak ağırlıklandırma yöntemiyle doğal sermayenin korunması kriteri en yüksek ağırlığa sahip olurken, Altıntaş (2022)'in çalışmasında yeşil ekonomik fırsatlar kriteri önem derecesi en yüksek kriter olarak tespit edilmiştir. Mughees ve Ayaz (2022), Altıntaş (2022), Eşiyok ve diğerleri (2023) ve Pamucar ve diğerleri (2024) tarafından yapılan analizlerde Almanya, yeşil büyüme performansı açısından öne çıkmaktadır. Ancak mevcut çalışmanın öne çıkan bir farklılığı, İsviçre ve Avusturya'nın da en iyi performans gösteren ülkeler arasında yer almasıdır. Literatürde bu ülkelere ilişkin bulgular sınırlı olmakla birlikte, Doskočil (2022) tarafından yapılan çalışmada İrlanda, Yunanistan ve Estonya yeşil büyüme performansı açısından en iyi ülkeler olarak tespit edilmiştir. Bu durumun, çalışmada kullanılan kriter seti ve ağırlıklandırma yöntemlerinin farklı olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Çalışmanın bulguları ışığında, yeşil büyüme performansları açısından son sırada yer alan Karadağ, Malta, İzlanda gibi ülkelerde, yenilenebilir enerji yatırımları ve çevre teknolojilerine yönelik inovasyon süreçlerinin desteklenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, hükümetlerin iyi planlanmış ve hedef odaklı mali politika araçlarıyla özel sektörün bu dönüşüm sürecine etkin biçimde uyum sağlamasını desteklemesi gerekmektedir (Saqib ve diğerleri, 2024). Aynı zamanda yeşil büyüme performansı açısından üst sıralarda yer alan ülkeleri öne çıkaran politika tercihleri ve uygulamalar belirlenerek, düşük performans gösteren ülkeler için yol gösterici stratejiler geliştirilmelidir.

Gelecek araştırmalarda, farklı ülke gruplarının yeşil büyüme performansları analiz edilebilir. Bu bağlamda, çeşitli ağırlıklandırma teknikleri ve alternatif ÇKKV yöntemleri kullanılarak literatürdeki çalışmalarla benzerlikler ve farklılıklar ortaya konulabilir. Ayrıca, YBİ'de yer alan ülkeler, yeşil büyüme performansları açısından kümeleme analizine tabi tutularak daha kapsamlı değerlendirmeler yapılabilir.

Yazar Katkıları /Author Contributions

Emel Gelmez: Literatür Taraması, Kavramsallaştırma, Makale Yazımı-orijinal taslak, Makale Yazımı-inceleme ve düzenleme *Hande Eren:* Metodoloji, Veri Derleme, Analiz, Makale Yazımı-orijinal taslak, Makale Yazımı-inceleme ve düzenleme

Emel Gelmez: Literature Review, Conceptualization, Writing-original draft, Writing-review and editing *Hande Eren:* Methodology, Data Curation, Analysis, Writing-original draft, Writing-review and editing

Çatışma Beyanı /Conflict of Interest

Yazarlar tarafından herhangi bir potansiyel çıkar çatışması beyan edilmemiştir.
No potential conflict of interest was declared by the authors.

Fon Desteği / Funding

Bu alışmada herhangi bir resmi, ticari ya da kâr amacı gütmeyen organizasyondan fon desteği alınmamıştır.

This study received no funding from any governmental, commercial or non-profit organisation.

Etik Standartlara Uygunluk / Compliance with Ethical Standards

Yazarlar tarafından, alışmada kullanılan araç ve yöntemlerin Etik Kurul izni gerektirmediği beyan edilmiştir.

It was declared by the authors that the tools and methods used in the study do not require the permission of the Ethics Committee.

Etik Beyanı / Ethical Statement

Yazarlar tarafından bu alışmada bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm alışmaların kaynakada belirtildiği beyan edilmiştir.

It was declared by the authors that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.



Yazarlar, Verimlilik Dergisi'nde yayımlanan alışmalarının telif hakkına sahiptirler ve alışmaları CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayımlanmaktadır.

The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.

KAYNAKÇA

- Adalı, E.A. ve Işık, A.T. (2017). "CRITIC and MAUT Methods for the Contract Manufacturer Selection Problem", *European Journal of Multidisciplinary Studies*, 2(5), 93-101.
- Ağaoğlu, N. (2023). "Sürdürülebilir Kalkınma Bağlamında Büyümeme ve Yeşil Büyüme", *Academic Review of Humanities and Social Sciences*, 6(2), 83-105. <https://doi.org/10.54186/arhuss.1204495>
- Akdamar, E., Akgül, E.F., Gögebakan, M. ve Işık, E. (2024). "Temporal Analysis of Factors Influencing Countries' Maritime Trade Performance with CRITIC-based VIKOR Method", *Journal of ETA Maritime Science*, 12(2), 213-223. <https://doi.org/10.4274/jems.2024.55798>
- Akpınar, M.E. (2025). "Analysis of Logistics 4.0 Service Provider Alternatives with CRITIC-Based WASPAS Method", *Verimlilik Dergisi*, Productivity for Logistics (Special Issue), 77-88. <https://doi.org/10.51551/verimlilik.1523739>
- Akram, M., Ramzan, N. ve Deveci, M. (2023). "Linguistic Pythagorean fuzzy CRITIC-EDAS Method for Multiple-Attribute Group Decision Analysis", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 119, 105777. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105777>
- Alrasheedi, M., Mardani, A., Mishra, A.R., Streimikiene, D., Liao, H. ve Al-nefae, A.H. (2021). "Evaluating the Green Growth Indicators to Achieve Sustainable Development: A Novel Extended Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Combined Compromise Solution Approach", *Sustainable Development*, 29(1), 120-142. <https://doi.org/10.1002/sd.2136>
- Altıntaş, F.F. (2022). "G7 Ülkelerinin Yeşil Büyüme Performanslarının Analizi: Entropi Tabanlı ELECTRE Yöntemi ile Bir Uygulama", *Atlas Journal*, 8(46), 2502-2519. <https://dx.doi.org/10.31568/atlas.815>
- Arlı Yılmaz, S. (2014). "Yeşil İşler ve Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Alanındaki Potansiyeli", Uzmanlık Tezi, Yayın No:2887, Kalkınma Bakanlığı, Sosyal Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Ayçin, E. ve Arsu, T. (2021). "Sosyal Gelişme Endeksine Göre Ülkelerin Değerlendirilmesi: MEREC ve MARCOS Yöntemleri ile Bir Uygulama", *İzmir Yönetim Dergisi*, 2(2), 75-88. <https://doi.org/10.56203/iyd.1084310>
- Chakraborty, S. ve Zavadskas, E. K. (2014). "Applications of WASPAS Method in Manufacturing Decision Making", *Informatica*, 25(1), 1-20. <https://doi.org/10.15388/Informatica.2014.01>
- Das, C.R. ve Das, S. (2023). "Acceptability of MEREC Criteria Compared to Existing Weighted WQI Models to Assess Coastal Groundwater Quality in Eastern India", *Journal of Coastal Conservation*, 27, 44. <https://doi.org/10.1007/s11852-023-00975-7>
- Diakoulaki, D., Mavrotas, G. ve Papayannakis, L. (1995). "Determining Objective Weights in Multiple Criteria Problems: The CRITIC Method", *Computers & Operations Research*, 22(7), 763-770. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(94\)00059-H](https://doi.org/10.1016/0305-0548(94)00059-H)
- Doskočil, R. (2022). "The Multicriteria Assessment of the Green Growth in the Context of the European Union's Green Deal", *Amfiteatru Economic*, 24(61), 739-757. <https://doi.org/d0.24818/EA/2022/61/739>
- Ecer, F. ve Güneş, E. (2024b). "G7 Ülkelerinin Bilgi İletişim Teknoloji Düzeylerini Belirleme: MEREC-CRITIC Entegre Ağırlıklı CoCoSo Metodolojisi", *Journal of Mehmet Akif Ersoy University Economics and Administrative Sciences Faculty*, 11(1), 219-242. <https://doi.org/10.30798/makuiibf.1281607>
- Ecer, F., Gunes, E. ve Zavadskas, E.K. (2024a). "Focusing on Identifying the Digital Transformation Performance of Banks in the Technology Age through A Multi-Criteria Methodology", *Transformations in Business & Economic*, 23(1(61)), 127-153.
- Eşiyok, S., Ariş, E. ve Antmen, F. (2023). "Ranking and Evaluation of G7 Countries and Turkey by GGGI Indicators Using ENTROPY, CRITIC and EDAS Methods", *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(3), 647-660. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1377228>
- Global Green Growth Institute (GGGI). "Green Growth Index 2023", https://gggi.org/wp-content/uploads/2024/06/2023-Global-Green-Growth-Index-Technical-Report_FIN.pdf, (Erişim Tarihi: 26.01.2025).
- Goswami, S. S., Mohanty, S.K. ve Behera, D.K. (2022). "Selection of a Green Renewable Energy Source in India with the Help of MEREC Integrated PIV MCDM Tool", *Materials Today: Proceedings*, 52, 1153-1160. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.019>
- Gunawan, R.D. (2024). "Combination of SMART and CRITIC Methods in Decision Support Systems for Determination of Superior Products", *Journal of Information Technology, Software Engineering and Computer Science*, 2(4), 160-170. <https://doi.org/10.58602/itsecs.v2i4.158>
- Guo, L., Qu, Y., Wu, C. ve Gui, S. (2018). "Evaluating Green Growth Practices: Empirical Evidence from China", *Sustainable Development*, 26(3), 302-319. <https://doi.org/10.1002/sd.1716>
- Hallegatte, S., Heal, G., Fay, M. ve Treguer, D. (2012). "From growth to Green Growth-A Framework", National Bureau of Economic Research, <https://www.nber.org/papers/w17841>, (Erişim Tarihi: 28.01.2025).

- Işık, C., Türkkan, M., Marbou, S. ve Gül, S. (2024). "Stock Market Performance Evaluation of Listed Food and Beverage Companies in Istanbul Stock Exchange with MCDM Methods", *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 7(2), 35-64. <https://doi.org/10.31181/dmame722024692>
- Işık, S. (2025). "Sürdürülebilir Kalkınma ile Yeşil Büyüme İlişkisi: Seçilmiş AB Ülkeleri Özelinde Ampirik Bir Analiz". *Verimlilik Dergisi*, 59(1), 1-12. <https://doi.org/10.51551/verimlilik.1555668>
- Kara, K., Yalçın, G.C., Kaygısız, E.G. ve Edinsel, S. (2024). "Assessing the Academic Performance of Turkish Universities in 2023: A MEREC-WEDBA Hybrid Methodology Approach", *Journal of Operations Intelligence*, 2(1), 252-272. <https://doi.org/10.31181/jopi21202422>
- Karadaş, H.A. ve Işık, H.B. (2019). "Türkiye'de Yeşil Büyüme: OECD Göstergeleri ile İstatistiksel Bir Karşılaştırma", *Fiscaeconomia*, 3(1), 268-317. <https://doi.org/10.25295/fsecon.2019.01.012>
- Karakış, E. (2021). "Machine Selection for a Textile Company with CRITIC and MAUT Methods", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 27, 842-848. <https://doi.org/10.31590/ejosat.994697>
- Keleş, N. (2023). "A Multi-Criteria Decision-Making Framework Based on the MEREC Method for the Comprehensive Solution of Forklift Selection Problem", *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, 18(2), 573-590. <https://doi.org/10.17153/oquiibf.1270016>
- Keshavarz-Ghorabae, M., Amiri, M., Zavadskas, E.K., Turskis, Z. ve Antucheviciene, J. (2021). "Determination of Objective Weights Using a New Method Based on the Removal Effects of Criteria (MEREC)", *Symmetry*, 13(4), 525. <https://doi.org/10.3390/sym13040525>
- Krishnan, A.R., Kasim, M. M., Hamid, R. ve Ghazali, M.F. (2021). "A modified CRITIC Method to Estimate the Objective Weights of Decision Criteria", *Symmetry*, 13(6), 973. <https://doi.org/10.3390/sym13060973>
- Lukić, R. (2023). "Analysis of the Performance of the Serbian Economy Based on the MEREC-WASPAS Method", *MARSONIA: Časopis za društvena i humanistička istraživanja*, 2(1), 39-52.
- Mohammadi, F., Mahmoudi, H., Ranjbaran, Y. ve Ahmadzadeh, F. (2022). "Compilation and Prioritizing Human-Wildlife Conflict Management Strategies Using the WASPAS Method in Iran", *Environmental Challenges*, 7, 100482. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100482>
- Mughees, M. ve Ayaz, M. (2022). "Assessment of Best Performing Top 10 Economies Based on OECD Green Growth Indicators: Using AHP, TOPSIS and Regression", *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 10, 294-301. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.46984>
- Naik, M.G., Kishore, R. ve Dehmourdi, S.A.M. (2021). "Modeling A Multi-Criteria Decision Support System for Prequalification Assessment of Construction Contractors Using CRITIC and EDAS Models", *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*, 4(2), 79-101. <https://doi.org/10.31181/oresta20402079n>
- Nosheen, M., Iqbal, J. ve Abbasi, M.A. (2021). "Do Technological Innovations Promote Green Growth in the European Union?", *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 21717-21729. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11926-2>
- Özaslan, A. (2023). "Sürdürülebilir Kalkınma Yolunda Yeşil Büyüme Stratejilerinin Kentlere Yansıması", *Sağlık ve Sosyal Refah Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 98-113. <https://doi.org/10.55050/sarad.1183810>
- Pamucar, D., Ecer, F., Gligorić, Z., Gligorić, M. ve Deveci, M. (2024). "A novel WENSLO and ALWAS Multicriteria Methodology and Its Application to Green Growth Performance Evaluation", *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 9510-9525. <https://doi.org/10.1109/TEM.2023.3321697>
- Puška, A., Nedeljković, M., Prodanović, R., Vladislavljević, R. ve Suzić, R. (2022). "Market Assessment of Pear Varieties in Serbia Using Fuzzy CRADIS and CRITIC Methods", *Agriculture*, 12(2), 139. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020139>
- Raj, D., Maity, S. R., ve Das, B. (2024). "Optimization of Process Parameters of Laser Cladding on AISI 410 Using MEREC Integrated MABAC Method", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(8), 10725-10739. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08487-0>
- Rao, C.N. ve Sujatha, M. (2023). "A Consensus-Based Fermatean Fuzzy WASPAS Methodology for Selection of Healthcare Waste Treatment Technology Selection", *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 6(2), 600-619. <https://doi.org/10.31181/dmame622023621>
- Saqib, N., Usman, M., Ozturk, I. ve Sharif, A. (2024). "Harnessing the Synergistic Impacts of Environmental Innovations, Financial Development, Green Growth, and Ecological Footprint through the Lens of SDGs Policies for Countries Exhibiting High Ecological Footprints", *Energy Policy*, 184, 113863. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113863>
- Shanmugasundar, G., Sapkota, G., Čep, R. ve Kalita, K. (2022). "Application of MEREC in Multi-Criteria Selection of Optimal Spray-Painting Robot", *Processes*, 10(6), 1172. <https://doi.org/10.3390/pr10061172>
- Streimikiene, D. (2024). "Western Balkan Countries in Green Transition: Assessment of Results and Challenges", *Montenegrin Journal of Economics*, 20(4), 203-212.

- Şeker, F. ve Çetin, M. (2015). "Düşük Karbonlu Yeşil Büyüme ve Karbondioksit Salınımının Temel Belirleyicileri: Türkiye Uygulaması", *Balkan Sosyal Bilimler Dergisi*, 4(8), 22-41.
- Wu, H.W., Zhen, J. ve Zhang, J. (2020). "Urban Rail Transit Operation Safety Evaluation Based on an Improved CRITIC Method and Cloud Model", *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 16, 100206. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2020.100206>
- Yenilmez, S. ve Ertuğrul, İ. (2023). "Laptop selection with MEREC based WASPAS Method", *Business Economics and Management Research Journal*, 6(1), 18-27. <https://doi.org/10.58308/bemarej.1207859>
- Yücel, M.A. ve Terzioğlu, M.K. (2023). "Sürdürülebilir Kalkınma ve Eko-Inovasyon: Dinamik Mekânsal Etkileşim", *Verimlilik Dergisi*, Döngüsel Ekonomi ve Sürdürülebilirlik (Özel Sayı), 171-186. <https://doi.org/10.51551/verimlilik.1103725>
- Zavadskas, E.K. ve Podvezko, V. (2016). "Integrated Determination of Objective Criteria Weights in MCDM", *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 15(02), 267-283. <https://doi.org/10.1142/S0219622016500036>
- Žižović, M., Miljković, B. ve Marinković, D. (2020). "Objective Methods for Determining Criteria Weight Coefficients: A Modification of the CRITIC Method", *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 3(2), 149-161. <https://doi.org/10.31181/dmame2003149z>
- Zuhal, M. ve Cantürk, S. (2022). "Türkiye'nin Yeşil Büyüme Endeksindeki Performansının İncelenmesi: OECD Ülkeleri ile Karşılaştırmalı Bir Analiz", *İktisadi ve İdari Bilimlerde Uluslararası Araştırmalar-II*, Editör: Mete, M. ve Akardeniz, E., Serüven Yayınevi, İzmir, 285-304.

EKLER**EK 1. CRITIC Yöntemi Çözüm Aşamaları****Tablo A1. Normalize edilmiş karar matrisi**

<i>Ülkeler</i>	<i>Verimli ve Sürdürülebilir Kaynak Kullanımı</i>	<i>Doğal Sermayenin Korunması</i>	<i>Yeşil Ekonomik Fırsatlar</i>	<i>Sosyal Katılım</i>
Almanya	0,6673	0,9652	1,0000	0,9146
Arnavutluk	0,6491	0,9569	0,3650	0,3516
Avusturya	0,9134	0,9092	0,7606	0,9637
Belarus	0,5863	0,7196	0,8655	0,7278
Belçika	0,3884	0,8139	0,5601	0,8660
Birleşik Krallık	0,6840	0,8611	0,7081	0,8639
Bosna Hersek	0,7020	0,5285	0,7078	0,0647
Bulgaristan	0,4133	0,9062	0,4180	0,4970
Çekya	0,7381	0,9370	0,7718	0,6720
Danimarka	0,8761	0,6790	0,8990	0,8533
Estonya	0,6026	0,7769	0,5360	0,6758
Finlandiya	0,6933	0,7025	0,7930	0,8926
Fransa	0,6717	0,8654	0,5272	0,9180
Hırvatistan	0,6104	0,9939	0,2888	0,5194
Hollanda	0,4951	0,6725	0,7629	0,9451
İrlanda	0,5276	0,3515	0,2193	0,7439
İspanya	0,5393	0,8021	0,4457	0,8939
İsveç	0,8404	0,8522	0,6856	1,0000
İsviçre	1,0000	0,8976	0,8431	0,9713
İtalya	0,6470	0,9057	0,5930	0,6885
İzlanda	0,4568	0,0000	0,3104	0,7240
Karadağ	0,0000	0,5570	0,2005	0,0000
Letonya	0,7774	0,8031	0,2799	0,5773
Litvanya	0,6972	0,7088	0,4650	0,5744
Lüksemburg	0,7490	0,7804	0,2990	0,7342
Macaristan	0,6387	0,9186	0,5906	0,5085
Makedonya	0,5190	0,7716	0,5418	0,0938
Malta	0,2608	0,4708	0,0000	0,4789
Moldova	0,5579	0,5703	0,1272	0,4966
Norveç	0,5655	0,6402	0,5859	0,9311
Polonya	0,5300	0,7869	0,5023	0,7236
Portekiz	0,6234	0,8591	0,4574	0,8525
Romanya	0,5755	0,8288	0,3911	0,5757
Rusya	0,4085	0,3321	0,6063	0,3005
Sırbistan	0,5621	0,6321	0,3765	0,2553
Slovakya	0,7620	1,0000	0,4903	0,4941
Slovenya	0,5677	0,8674	0,6467	0,6454
Ukrayna	0,4641	0,5441	0,3953	0,1445
Yunanistan	0,6182	0,8177	0,1245	0,6226

Tablo A2. Korelasyon matrisi

	<i>Verimli ve Sürdürülebilir Kaynak Kullanımı</i>	<i>Doğal Sermayenin Korunması</i>	<i>Yeşil Ekonomik Fırsatlar</i>	<i>Sosyal Katılım</i>
Verimli ve Sürdürülebilir Kaynak Kullanımı	0,0000	0,5373	0,4927	0,5124
Doğal Sermayenin Korunması	0,5373	0,0000	0,6835	0,7399
Yeşil Ekonomik Fırsatlar	0,4927	0,6835	0,0000	0,5681
Sosyal Katılım	0,5124	0,7399	0,5681	0,0000

Tablo A3. Bilgi miktarı değerlerinin hesaplanması

	<i>Verimli ve Sürdürülebilir Kaynak Kullanımı</i>	<i>Doğal Sermayenin Korunması</i>	<i>Yeşil Ekonomik Fırsatlar</i>	<i>Sosyal Katılım</i>
C_j	3,0331	4,7194	3,0801	3,9168

EK 2. MEREC Yöntemi Çözüm Aşamaları**Tablo A4. Normalize edilmiş karar matrisi**

<i>Ülkeler</i>	<i>Verimli ve Sürdürülebilir Kaynak Kullanımı</i>	<i>Doğal Sermayenin Korunması</i>	<i>Yeşil Ekonomik Fırsatlar</i>	<i>Sosyal Katılım</i>
Almanya	0,4638	0,5368	0,3885	0,7665
Arnavutluk	0,4707	0,5390	0,6351	0,8951
Avusturya	0,3872	0,5517	0,4551	0,7570
Belarus	0,4961	0,6086	0,4233	0,8049
Belçika	0,5977	0,5789	0,5315	0,7761
Birleşik Krallık	0,4577	0,5651	0,4729	0,7765
Bosna Hersek	0,4512	0,6792	0,4730	0,9789
Bulgaristan	0,5827	0,5525	0,6031	0,8580
Çekya	0,4388	0,5442	0,4515	0,8171
Danimarka	0,3972	0,6223	0,4141	0,7787
Estonya	0,4892	0,5902	0,5424	0,8162
Finlandiya	0,4543	0,6143	0,4448	0,7708
Fransa	0,4621	0,5639	0,5465	0,7658
Hırvatistan	0,4860	0,5295	0,6875	0,8525
Hollanda	0,5383	0,6246	0,4543	0,7606
İrlanda	0,5224	0,7609	0,7434	0,8014
İspanya	0,5170	0,5824	0,5877	0,7706
İsveç	0,4072	0,5676	0,4809	0,7501
İsviçre	0,3660	0,5548	0,4297	0,7556
İtalya	0,4715	0,5526	0,5172	0,8134
İzlanda	0,5582	1,0000	0,6717	0,8057
Karadağ	1,0000	0,6676	0,7601	1,0000
Letonya	0,4261	0,5821	0,6942	0,8387
Litvanya	0,4529	0,6122	0,5774	0,8394
Lüksemburg	0,4352	0,5891	0,6800	0,8035
Macaristan	0,4747	0,5491	0,5182	0,8552
Makedonya	0,5265	0,5918	0,5397	0,9697
Malta	0,6888	0,7038	1,0000	0,8624
Moldova	0,5085	0,6623	0,8332	0,8581
Norveç	0,5051	0,6360	0,5202	0,7633
Polonya	0,5213	0,5871	0,5584	0,8058
Portekiz	0,4807	0,5657	0,5814	0,7788
Romanya	0,5007	0,5744	0,6189	0,8391
Rusya	0,5856	0,7711	0,5117	0,9090
Sırbistan	0,5066	0,6390	0,6279	0,9216
Slovakya	0,4310	0,5280	0,5644	0,8587
Slovenya	0,5041	0,5633	0,4955	0,8231
Ukrayna	0,5543	0,6728	0,6164	0,9541
Yunanistan	0,4828	0,5777	0,8361	0,8282

Tablo A5. Alternatiflerin genel performans değerleri (S_i)

<i>Ülkeler</i>	<i>S_i</i>
Almanya	0,5011
Arnavutluk	0,3948
Avusturya	0,5022
Belarus	0,4502
Belçika	0,3966
Birleşik Krallık	0,4628
Bosna Hersek	0,3976
Bulgaristan	0,3702
Çekya	0,4746
Danimarka	0,4901
Estonya	0,4149
Finlandiya	0,4616
Fransa	0,4408
Hırvatistan	0,3872
Hollanda	0,4306
İrlanda	0,3076
İspanya	0,4042
İsveç	0,4831
İsviçre	0,5187
İtalya	0,4400
İzlanda	0,2618
Karadağ	0,1567
Letonya	0,3946
Litvanya	0,4067
Lüksemburg	0,3997
Macaristan	0,4315
Makedonya	0,3739
Malta	0,1972
Moldova	0,3045
Norveç	0,4153
Polonya	0,4026
Portekiz	0,4211
Romanya	0,3889
Rusya	0,3294
Sırbistan	0,3498
Slovakya	0,4390
Slovenya	0,4311
Ukrayna	0,3216
Yunanistan	0,3443

Tablo A6. Alternatiflerin performans niceliğindeki değişimler (S'_{ij})

Ülkeler	Verimli ve Sürdürülebilir Kaynak Kullanımı	Doğal Sermayenin Korunması	Yeşil Ekonomik Fırsatlar	Sosyal Katılım
Almanya	0,3773	0,4021	0,3465	0,4599
Arnavutluk	0,2591	0,2849	0,3152	0,3760
Avusturya	0,3472	0,4079	0,3753	0,4591
Belarus	0,3317	0,3677	0,3028	0,4150
Belçika	0,3061	0,3001	0,2842	0,3530
Birleşik Krallık	0,3316	0,3687	0,3374	0,4222
Bosna Hersek	0,2540	0,3304	0,2631	0,3940
Bulgaristan	0,2723	0,2622	0,2789	0,3434
Çekya	0,3375	0,3752	0,3425	0,4426
Danimarka	0,3376	0,4146	0,3450	0,4510
Estonya	0,2893	0,3239	0,3085	0,3809
Finlandiya	0,3289	0,3818	0,3251	0,4198
Fransa	0,3082	0,3441	0,3385	0,3969
Hırvatistan	0,2566	0,2730	0,3215	0,3598
Hollanda	0,3245	0,3510	0,2934	0,3851
İrlanda	0,1805	0,2560	0,2515	0,2660
İspanya	0,2876	0,3097	0,3113	0,3597
İsveç	0,3339	0,3917	0,3633	0,4378
İsviçre	0,3566	0,4269	0,3843	0,4761
İtalya	0,3109	0,3396	0,3278	0,4062
İzlanda	0,1428	0,2618	0,1821	0,2193
Karadağ	0,1567	0,0663	0,0962	0,1567
Letonya	0,2394	0,2990	0,3311	0,3645
Litvanya	0,2653	0,3214	0,3108	0,3771
Lüksemburg	0,2495	0,3068	0,3329	0,3623
Macaristan	0,3026	0,3291	0,3186	0,4058
Makedonya	0,2570	0,2793	0,2617	0,3686
Malta	0,1176	0,1224	0,1972	0,1664
Moldova	0,1713	0,2255	0,2703	0,2759
Norveç	0,2957	0,3377	0,3011	0,3697
Polonya	0,2873	0,3093	0,3001	0,3658
Portekiz	0,2931	0,3229	0,3279	0,3792
Romanya	0,2642	0,2902	0,3041	0,3587
Rusya	0,2282	0,2815	0,2010	0,3121
Sırbistan	0,2221	0,2676	0,2642	0,3353
Slovakya	0,2932	0,3304	0,3423	0,4141
Slovenya	0,3131	0,3332	0,3100	0,3989
Ukrayna	0,2085	0,2470	0,2298	0,3130
Yunanistan	0,2062	0,2421	0,3121	0,3104

Tablo A7. Mutlak sapmaların toplamı (E_j)

	Verimli ve Sürdürülebilir Kaynak Kullanımı	Doğal Sermayenin Korunması	Yeşil Ekonomik Fırsatlar	Sosyal Katılım
E_j	4,8531	3,4132	3,8885	1,2401

EK 3. WASPAS Yöntemi Çözüm Aşamaları**Tablo A8. Normalize edilmiş karar matrisi**

<i>Ülkeler</i>	<i>Verimli ve Sürdürülebilir Kaynak Kullanımı</i>	<i>Doğal Sermayenin Korunması</i>	<i>Yeşil Ekonomik Fırsatlar</i>	<i>Sosyal Katılım</i>
Almanya	0,7890	0,9836	1,0000	0,9787
Arnavutluk	0,7775	0,9797	0,6117	0,8380
Avusturya	0,9451	0,9572	0,8536	0,9909
Belarus	0,7377	0,8677	0,9178	0,9320
Belçika	0,6122	0,9122	0,7310	0,9665
Birleşik Krallık	0,7996	0,9344	0,8215	0,9660
Bosna Hersek	0,8111	0,7775	0,8213	0,7663
Bulgaristan	0,6280	0,9557	0,6441	0,8743
Çekya	0,8339	0,9702	0,8605	0,9180
Danimarka	0,9214	0,8485	0,9382	0,9634
Estonya	0,7481	0,8947	0,7163	0,9190
Finlandiya	0,8055	0,8596	0,8734	0,9732
Fransa	0,7919	0,9365	0,7108	0,9795
Hırvatistan	0,7530	0,9971	0,5651	0,8799
Hollanda	0,6799	0,8454	0,8550	0,9863
İrlanda	0,7005	0,6939	0,5226	0,9360
İspanya	0,7079	0,9066	0,6610	0,9735
İsveç	0,8988	0,9303	0,8078	1,0000
İsviçre	1,0000	0,9517	0,9040	0,9928
İtalya	0,7762	0,9555	0,7511	0,9222
İzlanda	0,6556	0,5280	0,5783	0,9310
Karadağ	0,3660	0,7909	0,5111	0,7501
Letonya	0,8589	0,9071	0,5596	0,8944
Litvanya	0,8080	0,8625	0,6728	0,8937
Lüksemburg	0,8409	0,8963	0,5713	0,9336
Macaristan	0,7709	0,9616	0,7496	0,8772
Makedonya	0,6951	0,8922	0,7198	0,7736
Malta	0,5313	0,7502	0,3885	0,8698
Moldova	0,7197	0,7972	0,4662	0,8742
Norveç	0,7245	0,8302	0,7468	0,9828
Polonya	0,7020	0,8994	0,6957	0,9309
Portekiz	0,7612	0,9335	0,6682	0,9631
Romanya	0,7309	0,9192	0,6277	0,8940
Rusya	0,6250	0,6848	0,7592	0,8252
Sırbistan	0,7224	0,8264	0,6187	0,8139
Slovakya	0,8491	1,0000	0,6883	0,8736
Slovenya	0,7259	0,9374	0,7840	0,9114
Ukrayna	0,6602	0,7848	0,6302	0,7862
Yunanistan	0,7580	0,9140	0,4646	0,9057

Tablo A9. Ağırlıklı Toplam Yöntemine (WSM) Dayalı i. alternatifin toplam nispi öneminin hesaplanması

Ülkeler	Verimli ve Sürdürülebilir Kaynak Kullanımı	Doğal Sermayenin Korunması	Yeşil Ekonomik Fırsatlar	Sosyal Katılım	$Q_i^{(1)}$
Almanya	0,2437	0,3324	0,2513	0,0997	0,9271
Arnavutluk	0,2401	0,3311	0,1537	0,0854	0,8103
Avusturya	0,2919	0,3235	0,2145	0,1010	0,9309
Belarus	0,2278	0,2932	0,2306	0,0950	0,8467
Belçika	0,1891	0,3083	0,1837	0,0985	0,7795
Birleşik Krallık	0,2470	0,3158	0,2064	0,0984	0,8676
Bosna Hersek	0,2505	0,2628	0,2064	0,0781	0,7977
Bulgaristan	0,1940	0,3230	0,1619	0,0891	0,7679
Çekya	0,2575	0,3279	0,2162	0,0936	0,8952
Danimarka	0,2846	0,2868	0,2358	0,0982	0,9053
Estonya	0,2310	0,3024	0,1800	0,0937	0,8070
Finlandiya	0,2488	0,2905	0,2195	0,0992	0,8579
Fransa	0,2446	0,3165	0,1786	0,0998	0,8395
Hırvatistan	0,2326	0,3370	0,1420	0,0897	0,8012
Hollanda	0,2100	0,2857	0,2149	0,1005	0,8111
İrlanda	0,2163	0,2345	0,1313	0,0954	0,6776
İspanya	0,2186	0,3064	0,1661	0,0992	0,7903
İsveç	0,2776	0,3144	0,2030	0,1019	0,8969
İsviçre	0,3088	0,3216	0,2272	0,1012	0,9588
İtalya	0,2397	0,3229	0,1887	0,0940	0,8454
İzlanda	0,2025	0,1785	0,1453	0,0949	0,6211
Karadağ	0,1130	0,2673	0,1284	0,0764	0,5852
Letonya	0,2653	0,3066	0,1406	0,0911	0,8036
Litvanya	0,2495	0,2915	0,1691	0,0911	0,8012
Lüksemburg	0,2597	0,3029	0,1436	0,0951	0,8013
Macaristan	0,2381	0,3250	0,1884	0,0894	0,8408
Makedonya	0,2147	0,3015	0,1809	0,0788	0,7759
Malta	0,1641	0,2535	0,0976	0,0886	0,6039
Moldova	0,2223	0,2694	0,1172	0,0891	0,6979
Norveç	0,2238	0,2806	0,1877	0,1002	0,7921
Polonya	0,2168	0,3040	0,1748	0,0949	0,7905
Portekiz	0,2351	0,3155	0,1679	0,0982	0,8167
Romanya	0,2257	0,3107	0,1577	0,0911	0,7852
Rusya	0,1930	0,2314	0,1908	0,0841	0,6993
Sırbistan	0,2231	0,2793	0,1555	0,0829	0,7408
Slovakya	0,2622	0,3380	0,1730	0,0890	0,8622
Slovenya	0,2242	0,3168	0,1970	0,0929	0,8309
Ukrayna	0,2039	0,2652	0,1584	0,0801	0,7076
Yunanistan	0,2341	0,3089	0,1168	0,0923	0,7520

Tablo A10. Ağırlıklı Ürün Yöntemine (WPM) Dayalı i. alternatifin toplam nispi öneminin hesaplanması

<i>Ülkeler</i>	<i>Verimli ve Sürdürülebilir Kaynak Kullanımı</i>	<i>Doğal Sermayenin Korunması</i>	<i>Yeşil Ekonomik Fırsatlar</i>	<i>Sosyal Katılım</i>	<i>$Q_i^{(2)}$</i>
Almanya	0,9294	0,9944	1,0000	0,9978	0,9222
Arnavutluk	0,9252	0,9931	0,8838	0,9822	0,7976
Avusturya	0,9827	0,9853	0,9610	0,9991	0,9297
Belarus	0,9103	0,9532	0,9787	0,9928	0,8431
Belçika	0,8594	0,9694	0,9243	0,9965	0,7674
Birleşik Krallık	0,9333	0,9773	0,9518	0,9965	0,8651
Bosna Hersek	0,9374	0,9184	0,9517	0,9732	0,7975
Bulgaristan	0,8662	0,9848	0,8953	0,9864	0,7534
Çekya	0,9455	0,9898	0,9629	0,9913	0,8933
Danimarka	0,9750	0,9460	0,9841	0,9962	0,9043
Estonya	0,9143	0,9631	0,9196	0,9914	0,8027
Finlandiya	0,9354	0,9501	0,9666	0,9972	0,8567
Fransa	0,9305	0,9781	0,9178	0,9979	0,8335
Hırvatistan	0,9161	0,9990	0,8664	0,9870	0,7827
Hollanda	0,8877	0,9448	0,9614	0,9986	0,8052
İrlanda	0,8959	0,8838	0,8495	0,9933	0,6681
İspanya	0,8988	0,9674	0,9012	0,9973	0,7815
İsveç	0,9676	0,9759	0,9478	1,0000	0,8949
İsviçre	1,0000	0,9834	0,9750	0,9993	0,9581
İtalya	0,9247	0,9847	0,9306	0,9918	0,8405
İzlanda	0,8777	0,8059	0,8714	0,9927	0,6119
Karadağ	0,7331	0,9238	0,8448	0,9711	0,5556
Letonya	0,9541	0,9676	0,8643	0,9887	0,7888
Litvanya	0,9363	0,9513	0,9052	0,9886	0,7970
Lüksemburg	0,9479	0,9637	0,8688	0,9930	0,7880
Macaristan	0,9228	0,9868	0,9301	0,9867	0,8358
Makedonya	0,8937	0,9622	0,9207	0,9742	0,7713
Malta	0,8226	0,9074	0,7885	0,9859	0,5803
Moldova	0,9034	0,9263	0,8255	0,9864	0,6814
Norveç	0,9053	0,9390	0,9293	0,9982	0,7885
Polonya	0,8965	0,9648	0,9128	0,9927	0,7838
Portekiz	0,9192	0,9770	0,9037	0,9962	0,8084
Romanya	0,9077	0,9719	0,8895	0,9886	0,7759
Rusya	0,8649	0,8799	0,9331	0,9806	0,6963
Sırbistan	0,9044	0,9376	0,8863	0,9792	0,7360
Slovakya	0,9507	1,0000	0,9104	0,9863	0,8537
Slovenya	0,9058	0,9784	0,9407	0,9906	0,8258
Ukrayna	0,8796	0,9214	0,8905	0,9758	0,7042
Yunanistan	0,9180	0,9701	0,8248	0,9900	0,7271

Tablo A11. Toplamsal ve çarpımsal metodların ağırlıklandırılmış ortak genel kriter değerinin hesaplanması

<i>Ülkeler</i>	<i>Q_i</i>	<i>Sıralama</i>
Almanya	0,9247	3
Arnavutluk	0,8039	18
Avusturya	0,9303	2
Belarus	0,8449	10
Belçika	0,7734	29
Birleşik Krallık	0,8664	7
Bosna Hersek	0,7976	20
Bulgaristan	0,7606	30
Çekya	0,8943	6
Danimarka	0,9048	4
Estonya	0,8049	17
Finlandiya	0,8573	9
Fransa	0,8365	13
Hırvatistan	0,7919	23
Hollanda	0,8081	16
İrlanda	0,6729	36
İspanya	0,7859	26
İsveç	0,8959	5
İsviçre	0,9585	1
İtalya	0,8429	11
İzlanda	0,6165	37
Karadağ	0,5704	39
Letonya	0,7962	21
Litvanya	0,7991	19
Lüksemburg	0,7947	22
Macaristan	0,8383	12
Makedonya	0,7736	28
Malta	0,5921	38
Moldova	0,6897	35
Norveç	0,7903	24
Polonya	0,7871	25
Portekiz	0,8125	15
Romanya	0,7805	27
Rusya	0,6978	34
Sırbistan	0,7384	32
Slovakya	0,8580	8
Slovenya	0,8283	14
Ukrayna	0,7059	33
Yunanistan	0,7396	31

Öğrenci Memnuniyetini ve Kaynak Etkinliğini Esas Alan Bir Sınav Planlama Modeli: Matematiksel Modelleme ve Uygulamalı Bir Karar Destek Sistemi TasarımıEren Çelik¹ , Ezgi Kıran¹ , Asya Aybala Özdil¹ , Banu İçmen Erdem¹ **ÖZET**

Amaç: Bu çalışmanın amacı, üniversitelerde sınav çizelgeleme sürecinin daha etkin, adil ve tekrar edilebilir şekilde yürütülmesi için çok amaçlı bir matematiksel model geliştirmek ve bu modeli uygulamaya geçirecek bir karar destek sistemi (KDS) tasarlamaktır.

Yöntem: Çalışmada, zorluk derecesi, kapasite, gözetmen uygunluğu ve zaman çakışmaları gibi kısıtları içeren iki amaçlı bir matematiksel model geliştirilmiş; model GAMS ortamında çözülmüş ve Excel VBA ile kullanıcı dostu bir karar destek sistemi tasarlanmıştır.

Bulgular: Model ve karar destek sistemi, aynı gün içinde birden fazla zor sınava giren öğrenci oranını azaltarak öğrenci memnuniyetini artırmış ve kapasite ve gözetmen kullanımında denge sağlamıştır. Geliştirilen KDS, sınav çizelgesi oluşturma süresini %60'a kadar azaltmış ve akademik birimlerin güncellenen verilerle daha hızlı uyum sağlayabilmesini mümkün kılmıştır.

Özgünlük: Bu çalışma literatüre üç temel katkı sunmaktadır: (1) Öğrenci zorluk algısına dayalı olarak sınav zorluk puanlarının modele entegre edilmesi, (2) Çok amaçlı bir matematiksel model ile üniversite sınav çizelgeleme probleminin eşzamanlı olarak kaynak etkinliği ve öğrenci yükü dengesi açısından optimize edilmesi, (3) Modelin karar destek sistemine dönüştürülerek kullanıcıya açık, şeffaf ve tekrar edilebilir bir sınav çizelgeleme süreci sunması.

Anahtar Kelimeler: Sınav Çizelgeleme, Karar Destek Sistemi, Matematiksel Optimizasyon, Zorluk Derecesi.

JEL Kodları: C61, I23, O22.

Student Satisfaction and Resource Efficiency-Oriented Exam Scheduling Model: Mathematical Modelling and an Applied Decision Support System Design**ABSTRACT**

Purpose: This study aims to develop a multi-objective mathematical model for ensuring a more effective, fair, and repeatable exam scheduling process in universities and to implement a decision support system (DSS) that applies this model.

Methodology: A bi-objective mathematical model considering constraints such as exam difficulty, classroom capacity, invigilator availability, and time conflicts was developed. The model was solved in GAMS, and a user-friendly decision support system was implemented using Excel VBA.

Findings: The model and DSS reduced the number of students facing multiple difficult exams on the same day, thereby improving student satisfaction. It also achieved balanced use of capacity and invigilators. The system reduced the schedule preparation time by up to 60% and enabled faster adaptation to updated academic data.

Originality: This study contributes to the literature in three key ways: (1) Integrating student-perceived difficulty scores into the model, (2) Simultaneously optimizing resource efficiency and workload balance via a multi-objective model, and (3) Transforming the model into a transparent, repeatable, and user-accessible DSS for exam scheduling.

Keywords: Exam Scheduling, Decision Support System, Mathematical Optimization, Difficulty Level.

JEL Codes: C61, I23, O22.

¹ Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

Sorumlu Yazar-Corresponding Author: Banu İçmen Erdem, bicmen@eskisehir.edu.tr

DOI: 10.51551/verimlilik.1675882

Araştırma Makalesi / Research Article | Geliş / Submitted: 15.04.2025 | Kabul / Accepted: 28.07.2025

Atıf/Cite: Çelik, E., Kıran, E., Özdil, A.A. ve İçmen Erdem, B. (2025). "Öğrenci Memnuniyetini ve Kaynak Etkinliğini Esas Alan Bir Sınav Planlama Modeli: Matematiksel Modelleme ve Uygulamalı Bir Karar Destek Sistemi Tasarımı", *Verimlilik Dergisi*, 59(4), 853-870.

EXTENDED ABSTRACT

Exam scheduling is essential to the smooth operation of university academic programs. Time management, effective resource use, and raising student satisfaction are all greatly impacted by a well-designed scheduling procedure. However, limited classroom capacities and invigilator constraints make the exam scheduling problem increasingly complex and challenging to solve.

Traditional exam scheduling approaches at the institution under study primarily relied on heuristic methods without any systematic optimization model. This frequently resulted in a number of issues, such as overlapping exams, wasteful use of resources, and elevated student anxiety, especially when several challenging exams were planned for the same day.

The main purpose of this study is to propose a multi-objective mathematical model to generate more efficient, fair, and repeatable exam timetables by simultaneously optimizing student satisfaction and resource efficiency. Additionally, a decision support system (DSS) was developed to ensure practical usability and fast implementation of the proposed model.

The proposed model integrates multiple constraints, including classroom capacity, exam difficulty levels, invigilator availability, and time conflicts. A bi-objective mathematical model was designed to (1) minimize the total number of classrooms used and (2) minimize the total difficulty scores for all student groups.

To support practical implementation, a user-friendly Excel-VBA-based DSS was developed. The system allows flexible data input, automatic scheduling, conflict detection, and real-time reporting.

The difficulty levels of exams were determined using a student feedback-based survey and expert opinions. A Likert-scale questionnaire (1 = very easy, 5 = very difficult) was conducted with 90 students, and the results were used to assign difficulty scores to each course. These scores were incorporated into the model to minimize clustering of highly difficult exams on the same day or in consecutive sessions.

Findings

GAMS was used to solve the mathematical model, which was then applied to a real dataset that included three centrally scheduled exams and twenty-four departmental exams spread over two weeks and six classrooms and fifty time slots.

- There were substantially less students taking several challenging exams on the same day.
- Classroom and invigilator resources were utilized more efficiently.
- The time required to generate a feasible exam schedule decreased when using the DSS.

Comparisons with historical schedules show a notable improvement in balancing student workload and minimizing resource conflicts.

Furthermore, the DSS generated schedules within seconds, automatically identified constraint violations, and allowed for rapid scenario testing when academic data changed.

Discussion and Conclusion

This work provides an integrated method to exam scheduling by combining mathematical optimization with a user-friendly decision support system. The findings highlight three important contributions:

1. Scheduling that takes into account what is considered the level of difficulty by the students.
2. Development of a multi-objective optimization model to balance student workload and maximize resource efficiency simultaneously.
3. Design and implementation of a practical DSS to facilitate repeatable, transparent, and adaptive scheduling.

The proposed system reduces scheduling conflicts, improves fairness, and enhances operational efficiency. Future studies might concentrate on expanding the model to include more criteria, like faculty preferences and physical accessibility limitations, and implementing the DSS on a web-based platform for wider institutional adoption.

1. GİRİŞ

Üniversitelerde yürütülen akademik programların başarılı bir şekilde sürdürülmesi, dersler ve sınavlar gibi kritik unsurların doğru planlanmasına bağlıdır. Bu doğrultuda çizelgeleme, herhangi bir kurumun operasyonel süreçlerinde öncelikli olarak ele alınması gereken önemli bir sorundur. Çizelgeleme sürecinin uygun biçimde tasarlanması; zaman yönetimi, kaynak kullanım verimliliği ve katılımcı memnuniyeti açılarından büyük önem taşımaktadır.

Çizelgeleme, üretim ve hizmet sektörlerinde kaynakların etkin kullanımını sağlamak amacıyla sıklıkla karşılaşılan bir optimizasyon problemidir (Vurğun Koç ve Güner, 2023). Üretim hatlarında ve makine çizelgeleme problemlerinde sıkça karşımıza çıkan bu problemin, hizmet ve eğitim sektörlerinde de farklı uygulama alanları bulunmaktadır (Durna ve diğerleri, 2022; Çiçek ve Kamışlı Öztürk, 2020; Ergül ve Kamışlı Öztürk, 2017).

Sınav çizelgeleme, öğrenci sayısının giderek artması ve mevcut derslik/gözetmen kapasitesinin sınırlı olması gibi sebeplerden dolayı üniversiteler için çözümlenmesi güç bir problem olarak öne çıkmaktadır. Yanlış veya verimsiz planlanan bir sınav takvimi; öğrencilerde performans düşüklüğüne, sınav çakışmalarına, derslik yetersizliklerine ve gözetmen dağılımlarında ortaya çıkan sorunlar gibi çeşitli olumsuz sonuçlara yol açabilir. Bu nedenle hem öğrencilerin hem de akademik personelin gereksinimlerini dikkate alan, esnek ve etkin bir sınav planlamasına duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır.

Bu makalede incelenen eğitim kurumundaki mevcut uygulamada sınav çizelgeleri ağırlıklı olarak sezgisel yöntemlerle hazırlanmakta; ders saatine öncelik verilerek sınavlar bu saatlere atanmakta veya zaman çakışması olduğunda “en uygun boşluk” ilkesine göre farklı zaman dilimlerine kaydırılmaktadır. Bu süreçte resmi olarak belirlenmiş, katı kurallara dayanan bir model ya da sistematik bir optimizasyon yaklaşımı bulunmamaktadır. Dolayısıyla süreç hem zaman almakta hem de kimi durumlarda istenmeyen sonuçlara yol açabilmektedir. Aşağıda, gözlenen temel sorunlar ve üzerinde durulması gereken kilit noktalar özetlenmiştir:

(1) *Öğrenci Memnuniyetindeki Azalma*: Aynı gün içinde “zor” kabul edilen birden fazla sınava giren öğrencilerde stres düzeyinin yükseldiği, bunun da genel memnuniyet ve başarı seviyelerini olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Özellikle birbirine yakın saatlerde yapılan sınavların, öğrencilerin hazırlanma sürelerini kısalttığı ve performans düşüklüğüne yol açtığı gözlemlenmektedir.

(2) *Çakışan Sınavlar ve Zaman Aralıklarının Verimsiz Kullanımı*: Birden fazla dersi alan öğrencilerin, rastlantısal veya yetersiz planlama neticesinde sınav çakışması yaşamaları hâlâ ihtimal dâhilindedir. Ayrıca, derslik kısıtları gözlemlenmeden yapılan atamalar nedeniyle bazı sınav salonları gereksiz yere boş kalabilirken bazıları yoğun şekilde kullanılabilir. Bu durum, derslik ve sınav salonlarının verimsiz kullanıldığını göstermektedir.

(3) *Kaynakların (Derslikler/Gözetmenler) Yetersiz kullanılması veya İsraf Edilmesi*: Mevcut sezgisel atama yaklaşımında, derslik kapasitesi ve gözetmen dağılımı bazen gerçek ihtiyaçlar göz ardı edilerek yapılmaktadır. Bu da bazı sınavlarda gereksiz yere büyük kapasitede salonların kullanımı veya tersi şekilde kapasite yetersizliği gibi durumlara neden olmaktadır. Benzer şekilde, müsait gözetmen sayısı zaman zaman doğru hesaba katılmadığından, gözetmenlerin uygunluk durumunu dengelemek zorlaşabilmektedir.

(4) *Verilerin Sürekli Güncellenmesi Gerekliliği*: Akademik takvimde farklı dönemlerde derslik sayıları, öğrenci nüfusundaki değişiklikler veya öğretim elemanı durumları nedeniyle verilerde ani güncellemeler olabilmektedir. Dolayısıyla, her güncellemede sıfırdan çizelge oluşturmak hem zaman kaybına hem de program hatalarına yol açabilmektedir.

(5) *Zorluk Derecesi (Öğrenci Geri Bildirimi) Unsurunun Göz Ardı Edilmesi*: Mevcut çizelgede, derslerin “zor” ya da “kolay” kabul edilmesi büyük oranda deneyim ve sezgisel görüşler üzerinden yürümekte; öğrencilerin söz konusu derse dair genel görüşleri ve başarısızlık oranları sistematik biçimde dikkate alınmamaktadır. Bu durum, özellikle üst sınıfların mesleki derslerinde sorun oluşturmakta, sınavların aynı gün veya birbirine yakın saatlerde birikmesi öğrenci performansını olumsuz etkilemektedir.

(6) *Planlamanın Tekrar Edilebilir ve Sistematik Olmaması*: Kimi dönemlerde elde edilen “uygun” çizelgeler, esasen bireysel uzmanlık ve tecrübeye dayanmaktadır; bu da çizelge hazırlayan kişi veya komisyon değiştiğinde aynı kalitede sonuç almayı güçleştirmektedir. Tekrar edilebilir ve herkese açık bir yöntem veya yazılım bulunmadığından, şeffaflık ve süreklilik sağlanamamaktadır.

Bu sorunların üstesinden gelebilmek adına, öncelikle bir matematiksel model kurgulayarak problemin temel bileşenlerinin (derslik kapasitesi, gözetmen sayısı, derslerin zorluk dereceleri, öğrenci sayıları vb.) bilimsel yöntemlerle ele alınması hedeflenmiştir. Ardından da bu modelin sunduğu prensipleri kolay ve hızlı bir şekilde uygulayabilecek bir karar destek sistemi geliştirilmesi planlanmıştır. Bu sayede sınavların hangi zaman aralıklarına atanacağı ve gerekli derslik sayısı daha kesin biçimde belirlenebilecek; öğrencilerin aynı

gün içinde yüksek zorluk düzeyine sahip birden fazla sınava girmek zorunda kalmaları en aza indirilebilecek; ayrıca gözetmen ve derslik kaynaklarının kullanım etkinliği artırılacaktır.

Bu çalışmada, sınav çizelgeleme problemine matematiksel model ve karar destek sistemleri temelinde bir çözüm yaklaşımı sunulmaktadır. İlk aşamada, literatürdeki benzer çalışmalar incelenerek problem tanımları, kullanılan model ve algoritmalar değerlendirilmiştir. Ardından, ilgili kurumdaki çizelgeleme süreci irdelenmiş ve bu sürecin aksayan yönlerini gidermeye yönelik bir matematiksel model tasarlanmıştır. Geliştirilen modelin uygulamada yaygın kullanılabilmesi ve kullanıcı dostu bir ara yüz sunabilmesi için Excel VBA destekli bir karar destek sistemi de oluşturulmuştur. Böylece hem uygun sınav programlarının üretilmesi hem de bu programların kolayca güncellenip yönetilebilmesi amaçlanmıştır.

Bu makalede öncelikle sınav çizelgeleme probleminin kapsamı ve literatürdeki yaklaşımlar üzerinde durulacak, sonrasında geliştirilen matematiksel model tanıtılacak ve elde edilen sonuçlar detaylandırılacaktır. Çalışmanın sonunda ise önerilen model ve karar destek sisteminin sağlayabileceği katkılar tartışılacak ve gelecekte yapılabilecek geliştirmelere değinilecektir.

Bu çalışmanın literatüre ve uygulamaya sağladığı temel katkılar aşağıda özetlenmiştir:

- Üniversitelerde sınav çizelgeleme sürecine yönelik iki amaçlı yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir.
- Modelde, öğrenci memnuniyetini artırmaya yönelik olarak sınav zorluk dereceleri sistematik biçimde dikkate alınmıştır.
- Geliştirilen model, derslik kapasitesi, gözetmen uygunluğu ve zaman çakışmaları gibi çok sayıda kısıtı aynı anda göz önüne alarak gerçekçi çözümler üretmektedir.
- Modelin uygulamaya geçirilebilmesi için Excel-VBA tabanlı bir Karar Destek Sistemi tasarlanmış ve kullanıcı dostu bir ara yüzle entegrasyon sağlanmıştır.
- Önerilen yaklaşım, mevcut sezgisel yöntemlere kıyasla hem zaman tasarrufu sağlamış hem de tekrar edilebilir, şeffaf ve optimize edilmiş çizelgeler üretmiştir.

Makalenin ikinci bölümünde, sınav çizelgeleme problemlerine ilişkin literatürde yer alan yöntemler ve çözüm yaklaşımları incelenmiştir. Üçüncü bölümde, önerilen iki amaçlı matematiksel modelin detayları sunulmuş; modelde kullanılan parametreler, karar değişkenleri ve kısıtlar açıklanmıştır. Ayrıca, öğrenci geri bildirimlerine dayalı olarak derslerin zorluk derecelerinin belirlenme süreci ve Excel-VBA tabanlı karar destek sisteminin yapısı detaylandırılmıştır. Dördüncü bölümde, modelin ve karar destek sisteminin uygulama sonuçları paylaşılmış ve çözüm performansları karşılaştırılmıştır. Beşinci ve son bölümde ise, elde edilen bulgular ışığında genel değerlendirmeler yapılmış ve çalışmanın sağladığı katkılar özetlenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Üniversitelerde sınav çizelgeleme ve ders programı oluşturma süreçleri, öğrenci sayısının giderek artması ve kaynakların kısıtlı olması nedeniyle çözümü zorlayıcı problemler olarak öne çıkmaktadır. Literatürde bu konuyu ele alan çalışmalar, genellikle matematiksel modelleme, sezgisel ya da meta-sezgisel yöntemler kullanarak kapsamlı çözüm önerileri geliştirmektedir.

Köse Küçük ve diğerleri (2020), sınav zaman dilimlerinin belirlenmesi sonrasında derslik atama ve gözetmen ataması şeklinde iki aşamalı bir çözüm yaklaşımı sunmuştur. Gerçek verilere dayalı bu yaklaşım hem öğrenci memnuniyetini artırmayı hem de öğretim üyelerinin tercihlerini gözetenek zaman ve iş gücü tasarrufu sağlamayı amaçlamıştır. Tapkan (2019) ise ek kısıtlar (örneğin günde sadece iki sınav, sınavlar arası minimum dinlenme süresi ve öğrencilerin “zor” olarak nitelendirdiği derslerin aynı gün ardışık gelmemesi gibi) dâhil edilerek oluşturduğu bir matematiksel model yardımıyla, büyük ölçekli sınav çizelgeleme problemlerinin nasıl iyileştirilebileceğini incelemiştir.

Gashgari ve diğerleri (2018), sınav çizelgeleme problemini çözmeye yönelik kullanılan teknikleri kapsamlı şekilde inceleyerek, sezgisel, meta-sezgisel ve doğrusal programlama temelli yaklaşımları karşılaştırmıştır. Literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemlerin avantajları, sınırlılıkları ve uygulama alanları sınıflandırılarak özetlenmiştir.

Acar ve Şevkli (2013), sınav çizelgeleme problemini önce matematiksel model yardımıyla formüle etmiş ancak büyük boyutlu veri setlerinin zaman açısından çözümü zorlaştırdığını görerek sezgisel bir yöntem geliştirmiştir. Gerçek bir üniversitenin final sınav verileriyle uygulanan bu yöntem, sınav çakışmalarını engelleyerek aynı anda birden fazla sınava girmesi gereken öğrenci sayısını sıfıra indirmeyi başarmıştır. Benzer şekilde, Sancar Edis ve Edis (2019)’de sınavları “kolay”, “orta” ve “zor” olarak sınıflandırıp bir tam sayılı programlama yaklaşımı kullanmış ve aynı gün birden fazla “zor” sınavla karşılaşan öğrenci sayısını minimize etmeye odaklanmıştır. Bu amaçla önce derslerin zorluk dereceleri belirlenmiş, ardından zorluk değerlerinin yüksek olduğu dersleri birbirinden olabildiğince uzak zaman aralıklarına atayacak bir model geliştirilmiştir.

Dowsland ve Thompson (2005), sınav çizelgeleme problemini çözmek için Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO) algoritmasını uygulamış ve ANTCOL adı verilen bir yaklaşım geliştirmiştir. Grafik boyama temelli bu model, zaman çakışmalarını önlemeye odaklanmakla birlikte, gerçek sınav verilerinde karşılaşılan ek kısıtlar için çeşitli iyileştirmeler ve çeşitlendirme stratejileri de sunmuştur.

Zhu ve diğerleri (2020), sınav çizelgeleme problemini GRA (Group Role Assignment with Constraints) metodolojisiyle modelleyerek çözmüş, bu kapsamda sınavları roller, sınav yer ve zamanlarını ise kaynak olarak ele almışlardır. Model, kapasite kısıtları, sınav çakışmaları ve öğrenci başına günlük sınav sınırı gibi hem sert hem yumuşak kısıtları kapsayacak şekilde genişletilmiştir.

Çizelgeleme problemlerinin kapsamı, yalnızca sınavların değil ders programlarının da düzenlenmesini içerecek şekilde genişletilerek ele alınabilmektedir. Küçüksille ve Tokmak (2014), ders çizelgeleme sorununu Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritmasıyla çözmek üzere bir yazılım geliştirmiş ve bu yazılımın sert kısıtları tamamen, yumuşak kısıtları ise büyük oranda sağladığını göstermiştir. Eren ve diğerleri (2018), üniversite ders çizelgeleme problemine 0-1 tamsayılı programlama yaklaşımı uygulamış, akademisyen ve öğrenci tercihlerini gözleterek %16'ya varan bir iyileşme elde etmiştir. Bu çalışmalar, sezgisel ve matematiksel model temelli yöntemlerin, akademik planlamada ne kadar etkili olabileceğini ortaya koymaktadır.

Çizelgeleme ile ilgili çok amaçlı optimizasyon örneklerinde ise farklı skalarizasyon yaklaşımları devreye girmektedir. Kasimbeyli ve diğerleri (2015, 2019), ağırlıklı toplam ve ϵ -kısıtlama gibi yöntemlerin çok amaçlı problemler üzerindeki etkilerini detaylıca karşılaştırmış ve bu yaklaşımların çoklu kriterleri aynı anda dikkate alan problemlerde ne şekilde kullanılabileceğine dair önemli çıkarımlar sunmuştur. Sınav çizelgeleme problemleri de çoğunlukla aynı anda birden fazla hedefi (öğrenci memnuniyeti, kaynak tasarrufu vb.) optimize etmeyi gerektirdiğinden bu tür yöntemler sıklıkla tercih edilebilmektedir.

Kamışlı Öztürk ve diğerleri (2024) pandemi koşullarında üniversite sınavlarının çizelgelenmesine yönelik çok amaçlı bir matematiksel model önerilmiş ve bu modeli destekleyen genetik algoritma tabanlı web tabanlı bir karar destek sistemi geliştirilmiştir. Model, sınıf doluluk oranlarının azaltılması, öğrenci etkileşiminin en aza indirilmesi ve sınav zorluk seviyelerine göre kategorilendirme gibi pandemi kaynaklı yeni kısıtları dikkate alarak sekiz bölüm için eşzamanlı çizelgeleme başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Thepphakorn ve diğerleri (2024) sınav çizelgeleme problemini çözmek için çok amaçlı bir tamsayılı programlama modeli geliştirmiştir. Model, sınav çakışmalarının önlenmesi, öğrenciler için dengeli sınav dağılımı sağlanması ve gözetmenlerin uygunluklarına göre atama yapılması gibi çeşitli hedefleri bir arada ele almaktadır. Yöntem, klasik tek amaçlı modellere kıyasla daha esnek ve uygulanabilir çözümler sunmakta; çözüm süreci ise Gurobi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçek verilerle yapılan deneyler, modelin pratikte etkili ve verimli çizelgeler oluşturabildiğini göstermektedir.

Burke ve diğerleri (2004) bilgisayarların işlem hızındaki artışın, arama algoritmalarının daha fazla iterasyon yapmasına olanak tanısa da her zaman daha iyi çözümler üretip üretmediğini sorgulamaktadır. Bu amaçla, çalışma süresi önceden belirlenebilen iki yerel arama yöntemi sunulmuştur. Yapılan deneyler, bu iki yöntemin sınav çizelgeleme problemlerinde önceki en iyi sonuçlardan daha kaliteli çözümler ürettiğini göstermektedir. Ancak, bu kalite artışı daha uzun çalışma süresi gerektirir. Çalışmada ayrıca kalite ile çalışma süresi arasındaki bu denge ve yürütme süresinin doğru tahmini konuları ele alınmaktadır.

Güler ve Geçici (2020) sınav çizelgeleme probleminin artan öğrenci sayıları ve kısıtlı kaynaklar nedeniyle manuel olarak çözülmesinin giderek zorlaştığı vurgulanmakta ve bu probleme yönelik pratikte kullanılabilir bir çözüm sunulmaktadır. Literatürde yüksek kaliteli çözümler sunan pek çok model bulunsa da çoğu karar destek sistemine entegre edilmemiştir. Bu eksikliği gidermek amacıyla, Yıldız Teknik Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'ne ait sınav çizelgeleme problemini çözmek için karışık tamsayılı programlama modeli geliştirilmiş ve bu model bir elektronik tablo tabanlı karar destek sistemine entegre edilmiştir. Önerilen sistem, teknik bilgi gerektirmeden ortalama bir kullanıcı tarafından kolayca kullanılabilir; minimum çakışma ve ardışık sınav içeren programlar üretmekte, akademik ve öğrenci taleplerini dikkate almaktadır.

Mandal ve diğerleri (2020) sınav çizelgeleme problemini çözmek için önerilen kısmi sınav atama yaklaşımı incelenmiştir. Geleneksel yöntemler tüm sınavları tek seferde zaman dilimlerine ve salonlara atayıp ardından bu başlangıç çözümünü iyileştirmeye çalışırken, bu çalışmada sınavlar parça parça çizelgelenmekte, her parça için iyileştirme yapılmakta ve süreç tüm sınavlar atanıncaya kadar devam etmektedir. Yaklaşım, kısmi grafik sezgisel sıralama ile modifiye edilmiş Great Deluge algoritmasını (mGD) birleştirerek PGH-mGD yöntemi olarak sunulmuştur.

Almeida ve diğerleri (2024) ise tez savunma çizelgeleme problemi için öğretim üyesi uygunluğu, öğrenci tercihleri ve zamanlama verimliliğini eş zamanlı optimize eden çok amaçlı bir model önermiştir. Model, kısıtların ihlalini önleyen doğrusal programlama yapısıyla formüle edilmiştir ve gerçek bir uygulama ile

doğrulanmıştır. Bu çalışma, sınav ve savunma planlaması problemlerine çok kriterli yaklaşımın etkinliğini göstermektedir.

Sonuç olarak, sınav ve ders programı çizelgeleme problemlerine yönelik çalışmalar; bir yandan öğrenci ve akademisyen ihtiyaçlarını gözetken, diğer yandan kısıtlı kaynakları verimli kullanmayı hedefleyen optimizasyon modelleri ve sezgisel/meta-sezgisel yöntemlerin etkinliğini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda geliştirilen modellerin gerçek veri setleri üzerinde uygulanabilirliği ve elde edilen iyileştirme oranları, üniversitelerin planlama süreçlerine önemli katkılar sağlamaktadır.

3. YÖNTEM

3.1. Matematiksel Model

Sınav çizelgeleme probleminin daha sistematik ve etkin bir şekilde çözülmesi için oluşturulan matematiksel model hem öğrenci hem de akademik personel açısından önemli kısıtları göz önüne alarak geliştirilmiştir. Bu modelin temel amacı, öğrencilerin “zor” olarak nitelendirdiği derslerin aynı zaman diliminde ya da arka arkaya gelmesini engellerken, gözetmen ve derslik kaynaklarının da verimli kullanılmasını sağlamaktır. Bu problemin çözümü için bazı varsayımlar belirlenmiştir:

- Her Ders İçin Tek Sınav: Sınavların, her ders için bir kez yapıldığı varsayılmıştır.
- Ders Zorluk Skalası: Derslerin zorluk dereceleri, belirlenmiş bir anket veya uzman görüşü üzerinden 1-5 (kolaydan zora) şeklinde puanlandırılmıştır.
- Gözetmen Uygunluk Bilgisi: İlgili gözetmenlerin hangi zaman aralıklarında sınav gözetmenliğine uygun olduğu önceden bilinir ve modele parametre olarak girilir.
- Derslik Kapasiteleri Sabittir: Belirlenmiş dersliklerin kapasitelerinde (kullanılabilir öğrenci sayısı) değişiklik olmadığı varsayılır.
- Zorunlu/Mesleki Ders Ayrımı: Öğrenci grubunun aynı anda birden çok zorunlu dersi veya yüksek zorluk dereceli mesleki dersi arka arkaya almasının istenmediği dikkate alınır.
- Sınav Süreleri Eşit veya Uyumlu: Her sınavın süresinin, belirlenmiş zaman bloklarına tam olarak denk gelecek şekilde planlanabildiği varsayılır.

3.1.1. Küme ve Parametreler

$i \in \{1, \dots, s\}$: sınav kümesi;

$j \in \{1, \dots, n\}$: derslik kümesi;

$k \in \{1, \dots, t\}$: zaman aralığı kümesi;

$m \in \{1, 2, 3, 4\}$: sınıf seviyeleri kümesi;

a_i : i sınavına girecek toplam öğrenci sayısı;

c_j : j dersliğinin öğrenci kapasitesi;

g_k : k zaman aralığındaki uygun gözetmen sayısı;

d_i : i sınavının ait olduğu sınav grubu; $d_i = \begin{cases} 1, & 1. \text{ sınıf zorunlu dersi ise} \\ 2, & 2. \text{ sınıf zorunlu dersi ise} \\ 3, & 3. \text{ sınıf zorunlu yada mesleki seçmeli dersi ise} \\ 4, & 4. \text{ sınıf zorunlu yada mesleki seçmeli ders ise} \end{cases}$

h_i : i sınavının zorluk derecesi (1-5 arası puanlandırılmıştır);

t_k : k zaman aralığının hangi güne ait olduğunu gösteren değer;

p_k : k zaman aralığının çakışma bilgisini gösteren değer;

φ_m : m sınıf seviyesi için belirlenmiş önem parametresi

Yukarıda verilen parametre tanımlarına göre, a_i parametresi, i .sınava girecek öğrenci sayısını ifade eder. Örneğin, $a_7 = 98$ ifadesi, 7 numaralı sınava 98 öğrencinin katılmasının beklendiğini belirtmektedir. Bu parametre, sınavın salonlara uygun şekilde yerleştirilmesinde temel veri olarak kullanılır.

c_j parametresi, bölüm bünyesinde bulunan dersliklerin kapasitesini temsil eder. Örneğin, $c_2 = 72$ ifadesi, 2 numaralı dersliğin en fazla 72 öğrenci alabilecek kapasitede olduğunu göstermektedir. Bu bilgi, sınav salonlarının öğrenci sayılarına göre uygun biçimde atanabilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

g_k parametresi, belirli bir zaman aralığında uygun gözetmen sayısını belirtir. Örneğin, $g_7 = 4$ değeri, 7. zaman aralığında dört gözetmenin görev yapabilecek durumda olduğunu ifade eder. Bu parametre, sınav organizasyonunda gözetmen ihtiyacının karşılanıp karşılanamayacağının kontrolü için kullanılır.

h_i parametresi, i .sınavın zorluk derecesini yansıtır. Zorluk derecesi, öğrenciler ve akademik personelden alınan geri bildirimler doğrultusunda 1 ile 5 arasında puanlanmıştır. Bu skalada 1 “kolay”, 2 “kolaya yakın”, 3 “normal”, 4 “zora yakın” ve 5 “zor” anlamına gelir. Bu puanlama, sınav haftasında ardışık günlerde zor sınavların denk gelmesini engellemek amacıyla dikkate alınmıştır.

d_i parametresi ise i .sınavın ait olduğu grubu belirtir. Bu parametre aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır:

- $d_i = 1$ ise i .sınav 1.sınıf dersi
- $d_i = 2$ ise i .sınav 2.sınıf dersi
- $d_i = 3$ ise i .sınav 3.sınıf dersi veya mesleki seçmeli ders
- $d_i = 4$ ise i .sınav 4.sınıf dersi veya mesleki seçmeli ders

Zaman aralıklarının günlerle olan ilişkisi t_k parametresi ile tanımlanır. Bu parametre, k zaman aralığının hangi haftanın hangi gününe karşılık geldiğini belirtir. Modelde toplam 10 günlük sınav periyodu (iki hafta) tanımlanmıştır ve bu doğrultuda $t_k \in \{1,2, \dots, 10\}$ olacak şekilde değer alır. Örneğin, $t_{17} = 4$ ifadesi, 17. zaman aralığının sınav döneminin 4. gününe (örneğin Perşembe) karşılık geldiğini gösterir. Her sınav günü beş farklı zaman aralığına bölünmüştür:

- $k = 1$ (09:00–11:00),
- $k = 2$ (11:00–13:00),
- $k = 3$ (13:00–15:00),
- $k = 4$ (14:00–16:00),
- $k = 5$ (16:00–18:00).

İkinci sınav gününden itibaren k değerleri 6’dan başlayarak aynı saat bloklarıyla devam eder. Ancak, bazı zaman dilimlerinde saat çakışmaları söz konusudur. Örneğin $k = 3$ ve $k = 4$ zaman aralıklarında birbirine kısmi çakışma vardır. Bu durum, modelde p_k parametresi ile kontrol altına alınmıştır.

$$p_k = \begin{cases} 1, & k \text{ zaman aralığında çakışma var ise} \\ 0, & k \text{ zaman aralığında çakışma yok ise} \end{cases}$$

φ_m parametresi, öğrencilerin sınıf seviyelerine göre belirlenmiş önem derecelerini belirtir. Öğrencilerden alınan geri bildirimlere göre mezuniyete yaklaştıkça öğrencilerin stres seviyelerinin artacağı tespit edilmiştir. Bu nedenle 1.sınıflardan başlayarak sınıf seviyesi arttıkça artan önem derecesi atanmıştır. Bu değer amaç fonksiyonunda üst sınıfların toplam zorluk değerlerine daha fazla ağırlık verilmesini sağlar.

3.1.2. Karar Değişkenleri

$x_{ik} = i$. sınav k zaman aralığında yapılırsa 1, diğer durumda 0 değerini alır;

$y_{ijk} = i$. sınav j dersliğinde k zaman aralığında yapılırsa 1, diğer durumda 0 değerini alır;

$q_m = m$. sınıfın toplam zorluk seviyesi.

3.1.3. Matematiksel Model

$$\min \sum_i \sum_j \sum_k y_{ijk} \quad (1)$$

$$\min \sum_m \varphi_m q_m \quad (2)$$

$$\sum_k x_{ik} = 1 \quad i = 1, \dots, s \quad (3)$$

$$a_i x_{ik} \leq \sum_j c_j y_{ijk} \quad i = 1, \dots, s; k = 1, \dots, t \quad (4)$$

$$\sum_i y_{ijk} \leq 1 \quad j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, t \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_j y_{ijk} \leq g_k \quad k = 1, \dots, t \quad (6)$$

$$\sum_{i \in d_i} x_{ik} \leq 1 \quad k = 1, \dots, t; d_i = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

$$x_{ik} + x_{i,k+1} \leq 1 \quad k = 1, \dots, t-1; d_i = 1, 2, 3, 4; i \in d_i \quad (8)$$

$$\sum_{i \in d_i} (x_{ik} + x_{ik'}) \leq 1 \quad t_k = 1, \dots, 10; d_i = 1, 2, 3, 4; k \in t_k; p_k = 1; p_{k'} = 1 \quad (9)$$

$$\sum_i y_{ijk} \leq 1 \quad j = 1, \dots, n; t_k = 1, \dots, 10; k \in t_k; p_k = 1 \quad (10)$$

$$\sum_{i \in d_i} \sum_k h_i x_{ik} \leq q_m \quad t_k = 1, \dots, 10; d_i = 1, 2, 3, 4; m = 1, 2, 3, 4 \quad (11)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad i = 1, \dots, s; k = 1, \dots, t \quad (12)$$

$$y_{ijk} \in \{0,1\} \quad i = 1, \dots, s; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, t \quad (13)$$

$$q_m \geq 0 \quad m = 1, 2, 3, 4 \quad (14)$$

Eşitlik 1 ile kullanılan toplam derslik sayısının en küçüklenmesi amaçlanmıştır. İkinci amaç fonksiyonu olan Eşitlik 2'de tüm sınıf seviyelerinin toplam zorluk dereceleri en küçüklenmektedir. Eşitlik 3, her sınavın sadece tek bir zaman aralığına atanmasını sağlar. Dersliklerin kapasitesinin aşılmamasını Eşitlik 4 kontrol etmektedir. Eşitlik 5, aynı zaman aralığında belirli bir derslikte en fazla tek sınav yapılmasını sağlar. Eşitlik 6, belli bir zaman aralığına atanacak sınav sayısının ihtiyaç duyulan gözetmen kapasitesini aşmamasını kontrol eder. Belli bir sınıf grubunun aynı zaman aralığında en fazla bir sınavı olması Eşitlik 7 ile belirlenir. Eşitlik 8, belli bir sınıf grubunun ardışık zaman aralıklarında sınavlarının olmamasını gösterir. Eşitlik 9 ile gün içerisindeki çakışmalı saat aralıklarına aynı sınıf seviyesinden 1'den fazla sınav atanması engellenmiştir. Benzer şekilde çakışmalı saatlerde aynı dersliğe sınav atanmaması da Eşitlik 10 ile sağlanır. Eşitlik 11 her sınıf grubunun toplam zorluk derecesini hesaplar ve bu değerler ikinci amaç fonksiyonunda kullanılır. Son olarak Eşitlik 12, 13 ve 14 ile karar değişkenlerinin işaret kısıtları verilmiştir.

Verilen matematiksel model iki amaçlı olarak geliştirilmiştir. Ancak her iki amaç fonksiyonu farklı birimler ile hesaplandığı için minimizasyon işleminin sağlıklı yapabilmek adına değerlerin normalleştirilmesi gerekmektedir. Amaç fonksiyonlarının normalleştirilmesi için Eşitlik 15'te verilen formül (Marler ve Arora, 2004) kullanılmıştır:

$$F_i = \frac{F_i(x) - F_i^u}{F_i^{max} - F_i^u} \quad (15)$$

Eşitlik 15'te $F_i(x)$, i .amaç fonksiyonunun hesaplanan değerini, F_i^u , i .amaç fonksiyonunun ütopik değerini ve F_i^{max} , i .amaç fonksiyonunun alabileceği en kötü değeri temsil etmektedir.

Bu model, yukarıdaki amaç fonksiyonları ve kısıtlar çerçevesinde çözüldüğünde;

- Sınavların zaman aralığı seçimleri (zorlayıcı derslerin aynı günde veya ardışık saatlerde yoğunlaşmaması),
- Derslik kullanımının verimliliği (gereksiz büyük kapasiteli salonlar yerine doğru kapasitede salonlar),
- Gözetmen sayısının yetersiz kalmaması veya aşırı fazla gözetmen kullanılmaması gibi noktalar dikkate alınarak sınav çizelgesi elde edilir.

3.2. Sınavların Zorluk Düzeylerinin Belirlenmesi

Matematiksel modelde önemli bir yer alan h_i zorluk düzeyi parametresi, öğrencilerden toplanan veriler doğrultusunda belirlenmiştir. Buradaki temel amaç, zor olarak nitelendirilen sınavların aynı gün ya da ardışık saatlerde birikmesini engellemek ve böylece öğrencilerin sınav stresini azaltmaktır. Zorluk düzeylerinin doğru şekilde tayin edilebilmesi için, farklı sınıflardan öğrenci katılımcıları kapsayan bir anket çalışması yürütülmüştür.

Anket, her ders için öğrencinin “dersi en az bir dönem almış veya tecrübe etmiş” olmasını göz önünde bulunduran bir grup öğrenciye elektronik ortamda iletilmiştir. Anketteki ölçek, 1'den 5'e (1 “çok kolay”, 5 “çok zor” olacak şekilde) puanlamaya dayanan Likert tipi bir düzenleme şeklinde tasarlanmıştır. Her öğrenci, aldığı derslere yönelik olarak kişisel deneyim ve algısını puanlamıştır. Dönemlik olarak açılan her derse dair “teorik bilgi yoğunluğu”, “hesaplama veya uygulama zorluğu”, “geçmiş başarı/başarısızlık istatistikleri” gibi ek bilgiler de toplanarak, öğrencilerin dersleri hangi faktörlere göre zor veya kolay gördüğü anlaşılmaya çalışılmıştır.

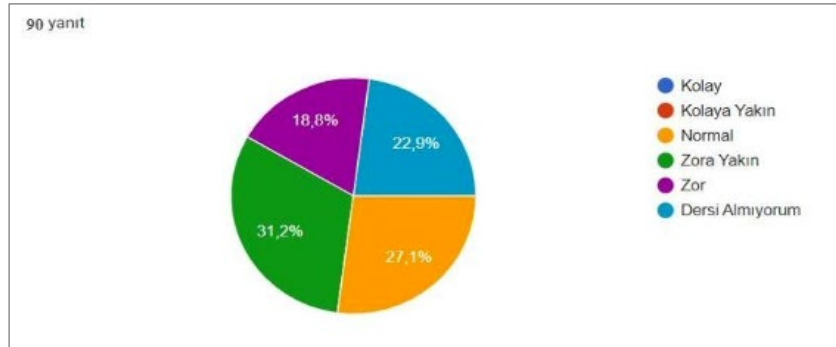
Anket, 1., 2., 3., ve 4. sınıflardan rastgele seçilen öğrencilere gönderilmiştir. Bölümün zorunlu dersleriyle birlikte seçmeli ve mesleki seçmeli dersleri de kapsamıştır. Dersi henüz almamış veya almayı düşünmeyen öğrenciler için ayrıca “Dersi Almıyorum” seçeneği de eklenmiştir. Ankete toplam 90 öğrenci katılmıştır. Bu sayede, öğrencilerin her derse dair tecrübe ettiği zorluk düzeyi farklı yönleriyle analiz edilmiştir.

Zorluk derecelerinin belirlenmesinde kullanılan anket, 1. ila 4. sınıf öğrencilerinden oluşan 90 kişilik bir örneklem grubuna uygulanmıştır. Katılımcılar yalnızca daha önce deneyimledikleri dersleri değerlendirmiştir. Bu sayede, doğrudan deneyime dayalı öznel ama anlamlı geri bildirimler toplanmıştır. Çalışmanın amacı kapsamındaki sınırlılıklar göz önüne alındığında, güvenilirlik ve geçerlilik analizleri yapılmamış; ancak anket uygulama yöntemi, özneliği dengelemeye yönelik şekilde yapılandırılmıştır.

Veriler toplandıktan sonra, her ders için ayrı ayrı ortalama zorluk puanı hesaplanmıştır. Elde edilen ortalama puanlar, 1'den 5'e kadar tam sayıya yuvarlanarak modele girdi olacak şekilde düzenlenmiştir. Böylece, “1 = Kolay”, “5 = Zor” olmak üzere ara değerleri de temsil edebilen bir skalaya ulaşılmıştır. Bazı dersler için, ankete katılan ve dersi almış öğrenci sayısının yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Bu derslere ait zorluk puanı,

bölümdeki öğretim elemanlarının deneyimleri ve geçtiğimiz yıllardaki genel başarı istatistikleri (ortalama not dağılımı, geçme oranı vb.) dikkate alınarak netleştirilmiştir.

Genel olarak 1. sınıf derslerinin çoğunluğu “2 veya 3” gibi orta-alt zorluk puanlarıyla derecelendirilirken, 3. ve 4. sınıf düzeyindeki uzmanlık veya mesleki derslerin bir kısmı “4 veya 5” puan bandında yer almıştır. Matematiksel modelin önemli parametrelerinden biri olan zorluk derecesi dağılımı, toplamda 30’dan fazla dersin değerlendirildiği çalışmada 2.7 ortalama ve 0.9 standart sapma civarında gerçekleşmiştir. Yani derslerin çoğu 3 ve yakınında puan alırken, bir grup ders 4 veya 5 bandına yerleşerek “zor” kategorisine girmiştir. Örnek bir ders için elde edilen sonuçlar Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Bir ders örneğinin zorluk düzeyinin dağılımı

Anket sonuçlarının model girdi parametresi hâline getirilmesi, tamamen nicel ve kanıta dayalı bir yaklaşım oluşturur. Bu sayede, daha öznel diyebileceğimiz “dersler zor mu, kolay mı?” sorusuna sistematik bir cevap elde edilmiş olur. Bu şekilde tasarlanan ve uygulanan anket çalışması, matematiksel modelin zorluk parametresini gerçeğe en yakın biçimde yansıtabilmesini sağlamış; derslerin ve dolayısıyla sınavların doğru kategorize edilmesine katkı sunmuştur. Böylece, sınavların öğrenciler üzerindeki yükü dengeli biçimde paylaştırılabilmiş ve özellikle “zor” nitelikli derslerin aynı gün veya ardışık saat aralıklarına atanmaması, modeldeki temel kısıtların etkin şekilde kullanılmasıyla desteklenmiştir.

Çalışmada kullanılan zorluk düzeyi parametresi, öğrenci görüşlerine dayalı anket verileriyle belirlenmiş ve modele nicel bir girdi olarak entegre edilmiştir. Ancak zorluk algısının zamanla ve öğrenci gruplarına göre değişkenlik gösterebileceği dikkate alındığında, bu tür verilerin sürdürülebilir bir planlama sürecine dönüştürülmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda, sistemin daha dinamik ve güncel kalabilmesi için her sınav dönemi sonunda anketin yeniden uygulanması ya da sınav formlarının sonuna “dersin zorluk düzeyine ilişkin kısa bir değerlendirme bölümü” eklenmesi önerilebilir. Böylece, öğrenci geri bildirimleri periyodik olarak toplanarak modele entegre edilebilir ve sınav yükü zaman içinde daha adil ve dengeli bir biçimde planlanabilir.

3.3. Karar Destek Sistemi

Matematiksel model ile elde edilen çözüm prensiplerini, bölümün güncel ve değişen verilerine uygun biçimde hızlıca uygulayabilmek amacıyla bir Karar Destek Sistemi (KDS) tasarlanmıştır. Bu sistem, Microsoft Excel üzerinde Visual Basic for Applications (VBA) kullanılarak geliştirilmiş olup veri giriş ekranları, otomatik atama algoritmaları, hata yakalama modülü ve çıktı raporlaması gibi fonksiyonları bir arada sunmaktadır. Bu bölümde, sistemin genel yapısı ve çalışma adımları ayrıntılı şekilde açıklanmaktadır.

3.3.1. Amaç ve Genel Mimarisi

KDS’nin temel amacı, kapasite, zorluk derecesi ve gözetmen uygunluğu gibi belirlenmiş kurallara uygun şekilde sınav çizelgelerini otomatik veya yarı otomatik olarak oluşturabilmek, güncellenen verileri hızla işleyerek her defasında yeni bir program üretebilmek, hangi sınavın hangi zaman diliminde ve hangi derslikte yapılacağını kullanıcı dostu bir ara yüz üzerinden anlaşılır biçimde sunabilmek ve tüm bu süreci yürütürken kullanıcı kaynaklı hataları asgari düzeye indirerek daha güvenilir bir planlama süreci elde etmektir. Geliştirilen sistemin mimari özeri izleyen şekildedir:

- **Veri Girişi Katmanı:** Derslik ve gözetmen verileri, sınav listesi (dersin kodu, zorluk değeri, öğrenci sayısı, vb.), farklı sınıflara ait sınav takvimi bilgileri bu katmanda toplanır. Excel tabloları ve VBA formları üzerinden kullanıcı dostu giriş ekranları sağlanır.
- **İş Mantığı (Model Entegrasyonu):** VBA modülleri içinde, matematiksel modeldeki kısıtların iş kurallarına dönüştürüldüğü kontrol mekanizmaları bulunur. Kullanıcı, “Sınav Programını Oluştur” gibi bir komutu tetiklediğinde bu kurallara göre Excel hücrelerinde otomatik atama yapılır.

- Çıktı / Raporlama Katmanı: Oluşan sınav takvimi, derslik listeleri, gözetmen atama tabloları gibi bilgiler gerek Excel sayfalarında gerekse PDF veya başka formatlarda raporlanabilir.

3.3.2. Veri Giriş Ekranları ve Özellikleri

Geliştirilen KDS'de farklı veri giriş ekranları oluşturularak kullanıcı dostu bir ara yüz ile kullanıcı deneyiminin verimliliği hedeflenmiştir. Karar destek sistemi ana menüsü Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Karar destek sistemi ana menü

- Ana Menü: Sistem ilk açıldığında kullanıcıyı yönlendiren bir "Ana Menü" ekranı görüntülenir. Buradan, "Derslik Verileri", "Sınav Verileri", "Gözetmen Verileri" gibi farklı ekranlara geçiş sağlanır. Ayrıca "Sınav Programını Oluştur" veya "Mevcut Programı Görüntüle" gibi temel işlem düğmeleri bulunur.
- Derslik ve Gözetmen Verisi Giriş Ekranı: Kullanıcı, sahip olduğu dersliklerin kapasitesini ve konumunu tanımlayabilir. Gözetmenlerin hangi zaman aralıklarında uygun olduğunu girebilir. Örneğin, "Gözetmen A", pazartesi 09.00-11.00 ve salı 11.00-13.00 aralığında müsait gibi. Bu bilgiler Excel tablolarına saklanır ve sistem her güncellemede yeni değerleri dikkate alır.
- Bölüm Sınav Verisi Giriş Ekranı: Bölüme ait derslerin sınav bilgileri (ders kodu, dersin zorluk değeri, dersin sınıfı, sınava girecek öğrenci sayısı, vb.) tek tek girilir. Aynı dersin birden fazla şubesi var ise bunlar ayrı satırlarda işlenir veya toplam öğrenci sayıları birleştirilerek modele girilir. Burada "Dersin Saatine Göre Atama" seçeneği de bulunabilir; eğer ders saatine öncelik verilmek isteniyorsa, bu saat sabitlenebilir.
- Dekanlık veya Fakülte Ortak Sınav Verisi Giriş Ekranı: Bazı derslerin sınav saat ve günleri merkezî olarak belirlenebilir (örneğin, Yabancı Dil dersi). Bu durumda kullanıcı, ilgili sınavlar için "zaman aralığı sabit" seçeneğini işaretleyerek programa bu sınavların elle sabitlenmesini sağlar. Model, sabit sınavlar dışındaki atamaları otomatik hesaplar.
- Ders Programı Seçim Penceresi: Eğer matematiksel modelde "ders saatine sadık kal" kısıtı isteniyorsa, halihazırda kullanılan ders programları (haftalık ders çizelgesi) Excel sayfasına yüklenir ve sınavlar otomatik olarak bu saatlere yerleştirilmek üzere işaretlenir. Aksi durumda, sistem daha esnek davranarak yalnızca "uygun" zaman aralıklarını bulmaya çalışır.
- Sınav Programı Görüntüleme: Sistemde "Sınav Programını Oluştur" komutu tetiklendikten sonra, belirli bir sayfada hangi sınavın hangi gün ve hangi saat dilimine atandığı gösterilir. Ayrıca derslik ve gözetmen ataması sonuçları da ek satırlarda yer alır.

3.3.3. Çalışma Prensipleri ve Akışı

Bu karar destek sisteminin çalışma akışı, öncelikle kullanıcı tarafından veri giriş ekranlarının doldurulması ve ardından sistemin bu verileri kontrol etmesiyle başlamaktadır. Eksik veya hatalı bilgi girişi tespit edildiğinde, örneğin derslik kapasitesinin öğrenci sayısından düşük olması gibi, kullanıcıya uyarı verilerek durumun düzeltilmesi istenir. Tüm veriler doğru girildiğinde, Excel VBA modülleri içerisinde tanımlanmış dizi veya tablo yapısında toplanır ve her bir sınava ait zorluk puanı, öğrenci sayısı, sınıf bilgisi, derslik kapasitesi ile zaman aralıklarındaki gözetmen mevcudu gibi kritik bilgiler bir araya getirilir. Modelin kısıtları (zorluk seviyeleri, gözetmen ve kapasite sınırları, ders saatine öncelik gibi) sürekli olarak denetlenirken, sistem bir en iyi yerleştirme arayışını otomatik veya yarı otomatik biçimde sürdürür. Atama işlemi tamamlandığında, her sınavın hangi zaman aralığı ve derslik(ler)de yapılacağı kontrol edilir, kısıtlara uyulduğundan emin olmak için gerekirse düzeltmeler uygulanır. Nihayetinde kısıt ihlali tespit edilmezse, oluşan sınav takvimi geçerli kabul edilerek Excel sayfasında tablo hâlinde kullanıcıya sunulur. Kullanıcının tüm bilgileri kontrol

ettiği son teyit uyarısı Şekil 3'de verilmiştir. Kullanıcı talep ederse bu tabloyu PDF veya CSV formatında dışa aktararak paylaşabilir veya güncellenebilir bir taslak olarak sistemde saklayabilir.

Şekil 3. Karar destek sistemi teyit ekranı

3.3.4. Hata Yakalama Mekanizması

Hata yakalama mekanizması kapsamında, sistem öncelikle veri girişi aşamasında kullanıcıyı yönlendirmeyi amaçlar. Zorunlu alanların boş bırakılması veya öğrenci sayısının negatif girilmesi gibi durumlarda, formlar üzerinde kırmızı çerçeveler aracılığıyla uyarılar görünür ve kullanıcı bu verileri düzeltmeden sonraki aşamaya geçemez. Bunun yanı sıra, kısıt ihlalleri tespit edildiğinde, örneğin kapasiteyi veya müsait gözetmen sayısını aşan bir sınav ya da günlük zorluk puanı sınırının üstünde ders ataması gibi, sistem açılır bir mesaj penceresiyle bu durumu bildirir ve ilgili eyleme onay vermez. Son olarak, karmaşık atama döngüleri sırasında oluşabilecek olası sonsuz döngü durumları için “acil durdurma” özelliği geliştirilmiştir; belli bir süre içinde sonuç üretilmezse işlem sonlandırılır ve kullanıcıya parametrelerini ya da girdi verilerini kontrol etmesi gerektiği yönünde uyarı yapılır.

4. BULGULAR

Bu çalışmada, bir yüksek öğretim kurumunda sınav çizelgeleme sürecini iyileştirmek amacıyla geliştirilen matematiksel model ve karar destek sistemi (KDS) uygulanarak çeşitli testler gerçekleştirilmiştir. Bu testler sırasında, bölümün güncel verileri (derslik, gözetmen, ders zorluk değerleri, öğrenci sayıları vb.) baz alınmış ve hem matematiksel model hem de KDS üzerinden üretilen sınav çizelgeleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bölüm tarafından atanan toplam 24 sınav bulunmaktadır. Bu sınavların her biri zorunlu veya mesleki seçmeli ders sınavı niteliği taşıyabilmektedir. Bunlara ilave olarak, dekanlık tarafından merkezi şekilde atanan ve günü-saat aralığı sabit olan 3 sınav daha söz konusudur. Sınavlar 2 haftaya yayılmıştır ve her gün birkaç seans şeklinde planlanarak toplamda 50 zaman aralığına bölünmüştür. Bu zaman aralıklarının her biri 2 saatlik veya kısmen çakışan bloklardan oluşmaktadır. Zaman aralıklarının temsili bir hafta için Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Haftalık zaman aralıkları temsili

	Hafta				
	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma
09:00-11:00	1	6	11	16	21
11:00-13:00	2	7	12	17	22
13:00-15:00	3	8	13	18	23
14:00-16:00	4	9	14	19	24
16:00-18:00	5	10	15	20	25

Final haftasında 6 derslik kullanılmaktadır: İlk üç dersliğin her biri 72 kişilik kapasiteye sahipken, diğer üç dersliğin kapasitesi 35’er kişidir. Dolayısıyla toplam 6 derslik üzerinden atamalar yapılmaktadır. Her bir zaman aralığında 4 gözetmenin müsait olduğu varsayılmıştır. Bu sayı, herhangi bir aralıkta aynı anda kaç salonun aktif olarak sınav yapabileceğini belirleyen temel kısıt niteliğindedir. Her sınav için katılacak öğrenci sayısı değişiklik göstermekle birlikte, 30–120 öğrenci aralığında dağılan dersler mevcuttur.

Toplamda 24 bölüm sınavı + 3 sabit dekanlık sınavı bulunan; 6 derslikli, 2 haftalık (50 zaman aralığı) bir planlama problemi söz konusudur. Zorluk değerlerinden kapasite ve gözetmen kısıtlarına kadar farklı etmenlerin devreye girdiği bu veri seti hem matematiksel model hem de karar destek sistemi için yeterli

karmaşıklık sağlamaktadır. Sisteme girilen bu verilerle model çözüldüğünde, ardışık ya da çakışan zor dersleri minimize etmek ve gözetmen/derslik kaynaklarını dengeli kullanmak hedeflenmiştir.

4.1. Matematiksel Modelin Sonuçları

Geliştirilen matematiksel model ile sınav çizelgeleme problemi çözdürülmüştür. Matematiksel modelin çözümü için, GAMS 23.3 sürümü kullanılmıştır. Çözüm için kullanılan bilgisayar özellikleri; Intel Core i7-9750H işlemci (2.6 GHz) ve 8 GB RAM olarak belirtilmektedir. Matematiksel model, yaklaşık 7,186 saniyede sonuç vererek optimal çözüme ulaşmıştır. Elde edilen çözümler Tablo 2’de verilmiştir. Toplam 35 derslik kullanılarak tüm sınavların çizelgelenmesi sağlanmıştır.

Tablo 2. Elde edilen sınav çizelgesi

Hafta 1				Hafta 2		
Gün	Zaman Aralığı	Ders Adı	Derslik	Zaman Aralığı	Ders Adı	Derslik
Pazartesi	11:00-13:00	*	D1	13:00-15:00	*	D1
	13:00-15:00	*	D1-D2	16:00-18:00	*	D1-D3
	16:00-18:00	*	D1	16:00-18:00	*	D2
Salı	11:00-13:00	*	D1-D2	11:00-13:00	*	D1
Çarşamba	11:00-13:00	*	D1-D2	14:00-16:00	*	D1-D2
	13:00-15:00	*	D2-D3	09:00-11:00	*	D1-D2
	16:00-18:00	*	D1	14:00-16:00	*	D1
Perşembe	11:00-13:00	*	D1	09:00-11:00	*	D1-D3
	14:00-16:00	*	D1-D2	16:00-18:00	*	D1
	14:00-16:00	*	D3	13:00-15:00	*	D1
Cuma	11:00-13:00	*	D6	14:00-16:00	*	D2-D3
	14:00-16:00	*	D1-D2	16:00-18:00	*	D1

4.2. Karar Destek Sisteminin Sonuçları

Karar destek sistemi (KDS), Intel Core i7-9750H işlemci (2.6 GHz) ve 8 GB RAM özellikle bir bilgisayarda Excel VBA arayüzü ile derslik, gözetmen, ders zorluk puanları, öğrenci sayısı gibi verileri aldıktan sonra, arka plandaki kısıt denetimi ve atama algoritmaları yardımıyla ortalama birkaç saniye içinde taslak bir sınav programı oluşturmaktadır. Bu süreçte herhangi bir kısıt ihlâli oluştuğunda, sistem anında kullanıcıya uyarı vererek müdahale gereken alanları net şekilde belirtmektedir. Geliştirdiğimiz sınav çizelgeleme karar destek sistemi, açık kaynak kodlu olarak GitHub’da (https://github.com/bicmen-design/exam_scheduling) erişime sunulmuştur.

Şekil 4’te, 4. sınıf öğrencileri için iki haftayı kapsayacak şekilde oluşturulmuş bir sınav çizelgesi örneği sunulmaktadır. Görselleştirme, modelin çıktılarının genel yapısını ortaya koymak amacıyla sadeleştirilmiş biçimde hazırlanmıştır. Bu nedenle ders adlarına yer verilmemiştir. Ders isimlerinin paylaşılması, her dersin farklı öğretim elemanına ait olması nedeniyle dolaylı olarak kişisel verilerin ifşasına neden olabileceği için tercih edilmemiştir. Gerçek uygulama verileri ile çalışılmış olsa da, bu görsellerde sistemin yapısını göstermek öncelikli tutulmuş ve etik ilkelere uygunluk gözetilmiştir.

4. Sınıf Sınav Programı (Hafta 1)					
Saatler	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma
09.00-11.00					
11.00-13.00					
13.00-15.00					
14.00-16.00					
16.00-18.00					

4. Sınıf Sınav Programı (Hafta 2)					
Saatler	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma
09.00-11.00					
11.00-13.00					
13.00-15.00					
14.00-16.00					
16.00-18.00					

Şekil 4. Karar destek sistemi ile oluşturulan 4.sınıf sınav programı

Bölümde sınav programlarını hazırlayan görevliyle yapılan görüşmeler sonucunda, ilk taslak programın oluşturulmasının yaklaşık 120 dk sürdüğü belirtilmiştir. Bu sürenin, görevi üstlenen kişinin çalışma performansına ve tekrar deneyimine bağlı olarak değişebileceği öngörülmekle birlikte, 120 dk ortalama süre olarak kabul edilmiştir. KDS, üç farklı kullanıcı tarafından denenmiş ve ana menüde yer alan tüm işlemler uygulanarak ilk taslak programın oluşturulması istenmiştir. Sonuç olarak, ilk taslak program yaklaşık 21 dk’da hazırlanmıştır. Buna göre, süreç KDS ile yaklaşık %82,5 oranında daha az zaman gerektirmiştir. İlk taslak sonrasındaki düzeltmeler ise gelen itirazlara göre değiştiğinden sabit bir süre belirlenememiştir; ancak KDS’de bu aşamada tüm bilgileri yeniden girmek yerine yalnızca ilgili sınavlarda değişiklik

yapılabildiği için sürenin daha da kısaldığı gözlenmektedir. Dolayısıyla sistem, önemli ölçüde zaman tasarrufu sağlamaktadır.

Matematiksel modelde tanımlı zorluk kısıtlarının “kullanıcı dostu” formlar aracılığıyla yönetilebilir hale getirilmesi de süreçte önemli bir avantaj sağlamıştır. Örneğin zorluk puanı 5 olarak işaretlenen bir ders, aynı gün içinde başka bir yüksek zorluğa sahip sınavla çakışmayacak biçimde planlanarak öğrencilerin aşırı yüklenmesi engellenmiştir. Bu uygulama sayesinde aynı günde biriken zor derslerin sayısı, önceki çizelge düzenlemelerine kıyasla belirgin biçimde azalmıştır. Ayrıca, Excel üzerinde tablo halinde listelenen otomatik sınav programı PDF veya CSV formatlarında çıktı alınarak hızla öğretim elemanlarına dağıtılabilmüş, onay sürecini kısaltmıştır. Buna ek olarak, yeni ders veya derslik eklenmesi gibi veri değişikliklerine sistemin hızlı yanıt vermesi, sürekli güncellenen akademik takvim koşullarına kısa sürede uyum sağlanmasını mümkün kılmıştır.

4.3. Uygulamalar

Geliştirilen sistemin verimlilik değerlendirmesinin yapılması için geçmiş yıllarda gerçekleştirilmiş üç farklı sınav için çözüm elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar gerçekleştirilen sınav verileri ile karşılaştırılmıştır. Eşitlik 16 ile her bir sınıf seviyesinin zorluk düzeyi ortalaması hesaplanmıştır. 3. ve 4. sınıfların ortak bir mesleki seçmeli dersler havuzundan seçim yapabildikleri için zorunlu dersleri dışında kalan dersleri de aynı programda değerlendirilmiştir. 1. ve 2. sınıflarda dekanlık ortak derslerinin bulunması sebebiyle karşılaştırmaya alınmamıştır. Bu derslerin dekanlık sınav programında sabit tutulması sebebiyle değişimi mümkün değildir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3’te verilmiştir.

$$\delta_m = \frac{m.sınıf\ seviyesine\ ait\ derslerin\ toplam\ zorluğu}{sınav\ atanan\ gün\ sayısı} \quad (16)$$

Tablo 3. Sonuçların karşılaştırılması

			Toplam Zorluk Puanı	Sınav Atanan Gün Sayısı	δ	Gün Bazında Max_{zorluk}	Gün Bazında $Max_{sınav\ sayısı}$
1.	Gerçekleşen	3.	57	8	7,125	12	3
Sınav	KDS	Sınıf		9	6,33	10	2
	Gerçekleşen	4.	47	6	7,83	11	4
	KDS	Sınıf		10	4,7	10	2
2.	Gerçekleşen	3.	60	7	8,57	14	4
Sınav	KDS	Sınıf		10	6	9	3
	Gerçekleşen	4.	44	6	7,33	11	4
	KDS	Sınıf		10	4,4	10	2
3.	Gerçekleşen	3.	65	7	9,28	16	4
Sınav	KDS	Sınıf		10	6,5	10	3
	Gerçekleşen	4.	50	7	7,14	11	3
	KDS	Sınıf		10	5	9	2

Tablo 3’te, üç farklı sınav uygulamasının gerçekleşen programları ile karar destek sistemi (KDS) aracılığıyla elde edilen program karşılaştırılmıştır. δ sütununda, 3. ve 4. sınıflar için sınav dönemi boyunca ortalama zorluk düzeyi raporlanmıştır; bu hesaplamada toplam sınav günü sayısı yerine sınav atanan gün sayısı esas alınmıştır. Buna göre, tüm sınavlar için ortalama zorluk düzeyinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca, her bir sınıf için bir gün içerisindeki en yüksek zorluk düzeyi bir sonraki sütunda verilmiştir. KDS ile elde edilen çözümlerde her iki sınıf düzeyinde de hem en yüksek günlük zorluk düzeyinde düşüş hem de bir güne atanan sınav sayısında azalma gözlenmiştir. Bu bulgular, zorluk düzeyleri açısından KDS’nin daha iyi sonuçlar ürettiğini göstermektedir.

5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, üniversitelerde giderek karmaşıklaşan sınav çizelgeleme sürecinin daha sistematik ve verimli bir şekilde yürütülebilmesi amacıyla bir matematiksel model geliştirilmiş ve bu model üzerine kurulu bir karar destek sistemi (KDS) tasarlanmıştır. Model, öğrenci memnuniyeti, kaynak verimliliği ve tekrar edilebilirlik gibi kritik unsurları bir araya getirerek, sınav planlamasının çok boyutlu yapısına bütüncül bir çözüm sunmayı amaçlamıştır.

Uygulama sonuçları, geliştirilen modelin ve KDS’nin, hem işlemsel etkinlik hem de kullanıcı memnuniyeti açısından önemli katkılar sağladığını göstermiştir. Matematiksel model ile oluşturulan çizelgede; zor olarak değerlendirilen derslerin aynı gün veya ardışık saatlerde gruplaşması engellenmiş, gözetmen ve derslik kapasitesi dengeli biçimde kullanılmıştır. Modelin GAMS ortamında çözümlenmesiyle optimal çözümlere ulaşılmış ve elde edilen çizelge, mevcut uygulamalara kıyasla çok daha sistematik bir yapı sunmuştur.

Karar destek sistemi ise, veri girişinden çıktı üretimine kadar olan tüm süreci kullanıcı dostu bir arayüzle yönetilebilir hale getirmiştir. KDS sayesinde; sınav çakışmalarının önlenmesi, kapasite ve gözetmen kısıtlarının ihlal edilmemesi gibi birçok hata anında tespit edilebilmiş ve bu sayede çizelgeleme süresinde zaman tasarrufu sağlanmıştır. Ayrıca, zorluk puanlarına dayalı sınav yerleştirmelerinin etkili biçimde yürütülmesiyle, öğrencilerin sınav yükü daha adil bir şekilde dağıtılmıştır.

Çalışmanın bir diğer önemli katkısı, ders zorluk derecelerinin nicel verilere dayalı olarak belirlenmesidir. Öğrencilerden toplanan anket verileri, öğretim elemanı görüşleri ve geçmiş başarı istatistikleri kullanılarak oluşturulan bu parametre, modelin gerçekçi bir şekilde işlemlerini sağlamış ve öğrenci odaklı planlamayı mümkün kılmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışmada geliştirilen yaklaşım hem mevcut sezgisel yöntemlerin eksikliklerini gidermekte hem de akademik planlama süreçlerine bütüncül ve veri temelli bir çözüm getirmektedir. Geliştirilen sistem, farklı bölümlere ve fakülterlere uyarlanabilir esnekliği ile sürdürülebilir bir planlama aracı olarak kullanılabilir. Gelecekteki çalışmalar, modelin çok amaçlı optimizasyon çerçevesinde daha farklı kriterlerle (örneğin akademisyen tercihleri, fiziksel erişim mesafeleri gibi) genişletilmesi ve web tabanlı ortamlara entegrasyonu yönünde ilerleyebilir.

Yazar Katkıları /Author Contributions

Eren Çelik: Literatür Taraması, Modelleme, Analiz *Ezgi Kıran:* Literatür Taraması, Veri Derleme, Makale Yazımı – orijinal taslak *Asya Aybala Özdi:* Literatür Taraması, Modelleme *Banu İçmen Erdem:* Kavramsallaştırma, Metodoloji, Makale Yazımı – inceleme ve düzenleme

Eren Çelik: Literature Review, Modelling, Analysis *Ezgi Kıran:* Literature Review, Data Curation, Writing-original draft *Asya Aybala Özdi:* Literature Review, Modelling *Banu İçmen Erdem:* Conceptualization, Methodology, Writing – review and editing

Çatışma Beyanı /Conflict of Interest

Yazarlar tarafından herhangi bir potansiyel çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No potential conflict of interest was declared by the authors.

Fon Desteği / Funding

Bu çalışma, Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Komisyonu tarafından 24LÖP010 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

This study was supported by the Scientific Research Commission of Eskişehir Technical University under project number 24LÖP010.

Etik Standartlara Uygunluk / Compliance with Ethical Standards

Yazarlar tarafından, çalışmada kullanılan araç ve yöntemlerin Etik Kurul izni gerektirmediği beyan edilmiştir. *It was declared by the authors that the tools and methods used in the study do not require the permission of the Ethics Committee.*

Etik Beyanı / Ethical Statement

Yazarlar tarafından bu çalışmada bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan edilmiştir.

It was declared by the authors that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.



Yazarlar, Verimlilik Dergisi'nde yayımlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptirler ve çalışmaları CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayımlanmaktadır.

The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.

KAYNAKÇA

- Acar, M.F. ve Şevkli, M. (2013). "Sınav Çizelgelemesi İçin Matematiksel Model Yaklaşımı", *Verimlilik Dergisi*, 1, 75-86.
- Almeida, J., Santos, D., Figueira, J.R. ve Francisco, A.P. (2024). "A Multi-Objective Mixed Integer Linear Programming Model for Thesis Defence Scheduling", *European Journal of Operational Research*, 312(1), 92-116. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.06.031>
- Burke, E., Bykov, Y., Newall, J. ve Petrovic, S. (2004). "A Time-Predefined Local Search Approach to Exam Timetabling Problems", *IIE Transactions*, 36(6), 509-528. <https://doi.org/10.1080/07408170490438410>
- Çiçek, Z.İ.E. ve Kamışlı Öztürk, Z. (2020). "A Comparative Study of Scalarization Techniques on the Multi-Objective Single Machine-Scheduling Problem Under Sequence-Dependent Setup Time, Release Date and Due Date Constraints", *Gazi University Journal of Science*, 33(2), 429-444. <https://doi.org/10.35378/gujs.581780>
- Dowsland, K.A., ve Thompson, J.M. (2005). "Ant Colony Optimization for the Examination Scheduling Problem", *Journal of the Operational Research Society*, 56(4), 426-438. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601830>
- Durna, O., Tor, H.B., İçmen Erdem, B. ve Kasimbeyli, R. (2022). "Flexible Job Shop Scheduling Problem with Setup Times and Routing Structure: A Real-Life Case", *Applied Analysis and Optimization*, 6(2), 289-298.
- Eren, T., Taş, C. ve Bedir, N. (2018). "0-1 Tamsayılı Programlama ile Ders Programı Çizelgeleme Probleminin Çözümü: Bir Yükseköğretim Kurumunda Uygulama", *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3), 166-175.
- Ergül, Z. ve Kamışlı Öztürk, Z. (2017). "A New Mathematical Model for Multisession Exams-Building Assignment", *ACTA Physica Polonica A*, 132(3-II), 1207-1210. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.132.1207>
- Gashgari, R., Alhashimi, L., Obaid, R., Palaniswamy, T., Aljawi, L. ve Alamoudi, A. (2018). "A Survey on Exam Scheduling Techniques", *Proceedings of the 2018 1st International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS)*, Riyadh, Saudi Arabia, 1-5. <https://doi.org/10.1109/CAIS.2018.8441950>
- Güler, M.G. ve Geçici, E. (2020). "A Spreadsheet-Based Decision Support System for Examination Timetabling", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 28(3), 26. <https://doi.org/10.3906/elk-1909-14>
- Kamışlı Öztürk, Z., Gündoğan, H.S., Mumyalmaz, E. ve Keçecioğlu, T. (2024). "Exam Scheduling Under Pandemic Conditions: A Mathematical Model and Decision Support System", *Technological Forecasting and Social Change*, 208, 123687. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123687>
- Kasimbeyli, R., Kamışlı Öztürk, Z., Kasimbeyli, N., Dinç Yalçın, G. ve İçmen Erdem, B. (2015). "Conic Scalarization Method in Multiobjective Optimization and Relations with Other Scalarization Methods", *Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences* (Editörler: H. Le Thi, T. Pham Dinh, N. Nguyen), Springer, Cham, 359, 395-407. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18161-5_27
- Kasimbeyli, R., Kamışlı Öztürk, Z., Kasimbeyli, N., Dinç Yalçın, G. ve İçmen Erdem, B. (2019). "Comparison of Some Scalarization Methods in Multiobjective Optimization", *Bulletin of the Malaysian Mathematical Sciences Society*, 42, 1875-1905. <https://doi.org/10.1007/s40840-017-0579-4>
- Köse Küçük, M., Telloğlu, B. ve Çavdur, F. (2020). "Sınav Çizelgeleme Probleminde Sınıf ve Gözetmen Atamaları İçin İki Aşamalı Bir Çözüm Yaklaşımı", *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(2), 789-812. <https://doi.org/10.17482/uumfd.713329>
- Küçükşille, E. ve Tokmak, M. (2014). "Yapay Arı Kolonisi Algoritması Kullanarak Otomatik Ders Çizelgeleme", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(3), 203-210. <https://doi.org/10.19113/sdufbed.79047>
- Mandal, A.K., Kahar, M.N.M. ve Kendall, G. (2020). "Addressing Examination Timetabling Problem Using a Partial Exams Approach in Constructive and Improvement", *Computation*, 8(2), 46. <https://doi.org/10.3390/computation8020046>
- Marler, R. ve Arora, J. (2004). "Survey of Multi-Objective Optimization Methods for Engineering", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(6), 369-395. <https://doi.org/10.1007/s00158-003-0368-6>
- Sancar Edis, R. ve Edis, E.B. (2019). "Gerçek Bir Sınav Çizelgeleme Problemi İçin İki Aşamalı Çözüm Yaklaşımı", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(1), 71-81.
- Tapkan, P.Z. (2019). "Final Sınav Programı Hazırlama Problemine Ait Bir Matematiksel Model ve Uygulama", *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 53, 138-156. <https://doi.org/10.18070/erciyesiibd.341232>
- Thepphakorn, T., Pongcharoen, P. ve Vitayasak, S. (2024). "Multi-Objective Hybrid Optimizations for Designing Course Schedules Based on Operating Costs and Resource Utilization", *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-024-06363-0>
- Vurğun Koç, H. ve Güner, E. (2023). "Akış Atölyesi Çizelgeleme Probleminin Sistemik Literatür Taraması ve Bütünsel Bir Çerçevesi", *Verimlilik Dergisi*, 57(3), 577-594. <https://doi.org/10.51551/verimlilik.1207259>
- Zhu, H., Yu, Z. ve Gningue, Y. (2020). "Solving the Exam Scheduling Problem with GRA", *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Toronto, Canada, 1485-1490. <https://doi.org/10.1109/SMC42975.2020.9283074>

Geliştirilmiş Entropi Temelli Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Enflasyon Muhasebesi Uygulamasının İşletme Performansına Etkisinin Değerlendirilmesi: Ana Metal Sanayi Sektörü Üzerine Bir Uygulama

Feyzi Yaşar¹ 

ÖZET

Amaç: Çalışmada, Türkiye’de yeniden yürürlüğe giren enflasyon muhasebesi uygulamasının, BİST ana metal sanayi sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin finansal performansları üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak analiz edilmesi amaçlanmıştır.

Yöntem:

Çalışmada performans değerlendirmesi için Geliştirilmiş Entropi ve Gri İlişkisel Analiz (GİA) yöntemleri birlikte uygulanmıştır. İlk aşamada, finansal oranların ağırlıkları Geliştirilmiş Entropi ile belirlenmiş, ardından GİA ile firmaların enflasyon öncesi ve sonrası performansları karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada, GİA skorlarının geçerliliği, firmaların yıllık hisse senedi getirileriyle karşılaştırılarak piyasa tepkileri ile teknik analiz sonuçlarının uyumu incelenmiştir.

Bulgular: Analiz sonuçları, enflasyon düzeltmesi sonrası firma sıralamalarında anlamlı değişimler yaşandığını, bazı firmaların performansında yükselme, bazı firmaların performanslarında ise düşüş görülmüştür. Hisse getirileri ile GİA skorları arasında ise zayıf ve istatistiksel olarak anlamsız bir ilişki belirlenmiştir. Buna karşılık, enflasyon öncesi ve sonrası dönem skorları arasında tutarlı bir ilişki gözlemlenmiştir.

Özgünlük: Literatürde enflasyon muhasebesini Geliştirilmiş Entropi ve GİA yöntemleriyle bütüncül biçimde ele alınarak sonuçları hisse senedi getirileriyle karşılaştıran kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu yönüyle araştırma, yöntemsel farklılığı ve analiz derinliğiyle literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Gri İlişkisel Analiz, Geliştirilmiş Entropi, Enflasyon Muhasebesi, İşletme Performansı.

JEL Kodları: M40, M41.

Evaluation of the Effect of Inflation Accounting on Business Performance with An Improved Entropy-Based Gray Relational Analysis Method: An Application on Basic Metal Industry Sector

ABSTRACT

Purpose: The study aims to comparatively analyse the effects of the reintroduction of inflation accounting in Türkiye on the financial performance of companies operating in the main metal industry sector on the BIST.

Methodology: In the study, Improved Entropy and Grey Relational Analysis (GRA) methods were applied together for performance evaluation. In the first stage, the weights of the financial ratios were determined by Improved Entropy, and then the pre- and post-inflation performances of the firms were compared using GRA. In the second stage, the validity of the GRA scores was examined by comparing them with the annual stock returns of the firms, and the consistency between market reactions and technical analysis results was evaluated.

Findings: The results of the analysis show that there are significant changes in firm rankings after inflation adjustment, with some firms' performance increasing and some firms' performance decreasing. There is a weak and statistically insignificant relationship between stock returns and TIA scores. On the other hand, there is a consistent relationship between the scores of the pre- and post-inflation periods.

Originality: In the literature, no comprehensive study has been found that addresses inflation accounting in an integrated manner with the Improved Entropy and GRA methods and compares the results with stock returns. In this respect, the study makes an original contribution to the literature with its methodological difference and depth of analysis.

Keywords: Gray Relational Analysis, Enhanced Entropy, Inflation Accounting, Firm Performance.

JEL Codes: M40, M41.

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Göksun Meslek Yüksekokulu, Muhasebe ve Vergi Uygulamaları Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

Sorumlu Yazar-Corresponding Author: Feyzi Yaşar, feyziyasar1246@gmail.com

DOI: 10.51551/verimlilik.1720437

Araştırma Makalesi / Research Article | Geliş / Submitted: 17.06.2025 | Kabul / Accepted: 21.08.2025

Atıf/Cite: Yaşar, F. (2025). "Geliştirilmiş Entropi Temelli Gri İlişkisel Analiz Yöntemi İle Enflasyon Muhasebesi Uygulamasının İşletme Performansına Etkisinin Değerlendirilmesi: Ana Metal Sanayi Sektörü Üzerine Bir Uygulama", *Verimlilik Dergisi*, 59(4), 871-892.

EXTENDED ABSTRACT

In inflationary environments, the ability of financial statements to reflect reality decreases, which undermines the reliability of information in decision-making processes. In this context, inflation accounting aims to increase the accuracy of financial information by ensuring that non-monetary items are reported at their real value. This study aims to analyze the effects of inflation accounting, which was reintroduced in Türkiye in 2023, on business performance in an objective and comparative framework.

Within the scope of the research, the inflation-adjusted and unadjusted financial statements of 17 enterprises operating in the basic metal industry sector in Borsa Istanbul for the year 2022 were used. The Gray Relational Analysis method was preferred for performance evaluation, and the criteria weights were determined by the Enhanced Entropy method, which excludes decision maker subjectivity. Z-score standardization eliminates computational problems caused by negative and zero values. Thus, the statistical integrity of the decision matrix was preserved. The relationship between financial performance and market reactions was tested by comparing the performance scores calculated with the TIA with the stock returns calculated with the “Buy and Hold” method.

The study shows that return on equity in the pre-inflation period and operating profit margin in the post-adjustment period are the criteria with the highest weights. This reveals that different dimensions of performance stand out depending on the analysis period. While CEMAS maintained its leadership in both periods, BURCE exhibited a remarkable rise. On the other hand, firms such as CUSAN and CELHA showed significant declines. These changes reveal that inflation accounting can significantly affect firm-based rankings.

When stock returns are compared with TIA scores, weak and statistically insignificant relationships are found in both pre- and post-inflation periods. On the other hand, there is a moderate positive relationship between pre- and post-inflation performance scores. This result suggests that there is consistency in firms' structural performance tendencies, but market reactions are shaped by different variables.

The study shows that inflation accounting not only improves the quality of financial reporting, but also enables a more realistic assessment of firm performance in multi-criteria analysis. The integrated use of Enhanced Entropy and ICA methods provides a stronger analytical basis for decision makers by combining objective weighting with performance measurement. Nevertheless, the lack of absolute alignment with market returns reveals the multidimensional nature of investor behavior and that financial ratios alone are not sufficient. Future studies in different sectors with long term and large data sets are expected to deepen the literature both conceptually and practically.

1. GİRİŞ

Günümüzün yoğun rekabet ortamında işletmelerin sürdürülebilir ve kârlı bir şekilde faaliyet gösterebilmeleri, performanslarının doğru ve objektif biçimde değerlendirilmesine bağlıdır (Tayyar ve diğerleri, 2014). Performans kavramı, işletmelerin hem bugünkü durumunu hem de gelecekteki stratejik hedeflerini belirleyebilmesi açısından önemli bir karar aracıdır. Bu doğrultuda, işletmelerin finansal performansı, finansal durum tablosu, kapsamlı gelir tablosu ve nakit akım tablosu gibi temel finansal verilerden elde edilen oranlar kullanılarak değerlendirilmekte; bu değerlendirmelerde geleneksel analiz yöntemlerinin yanı sıra çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden de yararlanılmaktadır (Söylemez, 2020; Güleç ve Özkan, 2018).

Finansal performansın sağlıklı bir şekilde ölçülmesi, çok sayıda ve çoğu zaman birbiriyle çelişen kriterlerin analiz edilmesini gerektirir (Ersoy, 2020). Bu durum, karar problemlerini çok kriterli karar verme çerçevesine taşımaktadır. ÇKKV yöntemleri, karar vericilere farklı alternatifleri çeşitli açılardan karşılaştırma ve sıralama imkânı sunarak, daha sistematik ve rasyonel kararlar alınmasına katkı sağlar (Meydan ve diğerleri, 2016). Özellikle gri ilişkisel analiz (GİA), az sayıda veriden anlamlı sonuçlar üretebilmesi, ideal değerlere göre karşılaştırma yapabilmesi ve belirsizlik içeren durumlara uyulanabilir yapısı sayesinde öne çıkan bir yöntemdir (Ersoy, 2020; Akyüz, 2021). Özellikle son yıllarda Türkiye’de yaşanan ekonomik gelişmeler, finansal performans analizlerini doğrudan etkileyen bir başka unsur, enflasyon muhasebesi uygulamalarını yeniden gündeme getirmiştir. Son yıllarda Türkiye ekonomisinde artan döviz dalgalanmaları, küresel salgın etkileri ve yüksek enflasyon oranları, işletmelerin finansal tablolarında kayıtlı değerler ile gerçek ekonomik değerler arasında önemli farklar oluşmasına neden olmuştur. Bu durum, mali tabloların karar alıcılar açısından güvenilirliğini azaltmış ve enflasyon muhasebesinin yeniden gündeme gelmesini zorunlu kılmıştır. Enflasyon muhasebesi, parasal olmayan kalemlerin enflasyon etkisinden arındırılarak daha doğru, karşılaştırılabilir ve gerçekçi bilgi sunulmasını amaçlamaktadır. Ülkemizde en son 2004 yılında uygulanan bu yöntem, 2021 yılında gerekli ekonomik koşullar oluşmasına rağmen ancak 2023 itibarıyla yeniden yürürlüğe girmiştir. Bilanço esasına göre kazançlarını belirleyen mükellefleri kapsayan düzenleme; özellikle stoklar, duran varlıklar ve özkaynaklar gibi kalemlerde düzeltme öngörmektedir. Bu gelişmeler doğrultusunda, söz konusu düzenlemenin işletmelerin finansal performansı ve etkinliği üzerinde nasıl bir etki yarattığı, bu araştırmanın temel çıkış noktasını oluşturmaktadır (Alataş, 2025).

Bu çalışma Türkiye’de yeniden uygulamaya konulan enflasyon muhasebesinin, Borsa İstanbul’da (BİST) ana metal sanayi sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin finansal performansları üzerindeki etkisini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Çalışmanın veri seti, Borsa İstanbul ana metal sanayi sektöründe faaliyet gösteren 17 işletmenin, 2022 yılına ait enflasyon düzeltmesi uygulanmış ve uygulanmamış finansal tablolarından elde edilen 14 adet finansal oran üzerinden oluşturulmuştur. Bu kapsamda, işletmelerin performans değerlendirmesi ÇKKV yöntemlerinden biri olan GİA ile gerçekleştirilmiştir. GİA’da kullanılacak finansal oranların ağırlıkları ise karar verici öznelliğinden uzak, veriye dayalı bir yaklaşım sunan Geliştirilmiş Entropi yöntemi ile belirlenmiştir. Ayrıca, GİA ile elde edilen performans sıralamaları, işletmelerin aynı yıla ait hisse senedi getirileri ile karşılaştırılarak analiz bulgularının geçerliliği sınanmıştır. Çalışma; giriş, literatür, yöntem, bulgular ve sonuç olmak üzere beş bölümden oluşmaktadır. Bu çerçevede araştırmanın temel sorusu, “Enflasyon muhasebesi uygulaması, Borsa İstanbul ana metal sanayi sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin finansal performansını nasıl etkilemektedir ve bu etkinin piyasa göstergeleriyle (hisse senedi getirileri) ne ölçüde örtüştüğü” şeklinde ifade edilebilir. Bu çerçevede araştırmanın temel sorusu, “Enflasyon muhasebesi uygulaması, Borsa İstanbul ana metal sanayi sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin finansal performansını nasıl etkilemektedir ve bu etkinin piyasa göstergeleriyle (hisse senedi getirileri) ne ölçüde örtüştüğü” şeklinde ifade edilebilir.

Bu doğrultuda çalışmanın ilerleyen bölümleri şu şekilde yapılandırılmıştır: İkinci bölümde konuya ilişkin literatür taramasına yer verilmiş, üçüncü bölümde araştırmada kullanılan yöntem ve veri seti açıklanmıştır. Dördüncü bölümde elde edilen bulgular sunulmuş, beşinci ve son bölümde ise sonuçlar değerlendirilerek elde edilen bulgular ışığında genel çıkarımlar yapılmış ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

GİA ve Entropi yöntemi, çok kriterli karar verme yaklaşımları arasında öne çıkan yöntemler içerisinde yer almaktadır. Literatürde bu yöntemlerin birlikte veya ayrı ayrı uygulandığı çok sayıda akademik çalışma bulunmaktadır. Aşağıda, söz konusu çalışmalardan bazıları konu ve sektör bazında ayrı ayrı özetlenmiştir.

Finans, Bankacılık ve Sigortacılık Alanındaki Uygulamalar: Altan ve Candoğan (2014), Türkiye’deki katılım bankalarının finansal performansını GİA yöntemi ile değerlendirerek bu yöntemin geleneksel oran analizine kıyasla daha etkili sıralama sunduğunu vurgulamışlardır. Doğan (2013), 10 bankayı GİA ile değerlendirerek Akbank’ın en yüksek, Yapı Kredi’nin en düşük performansa sahip olduğunu tespit etmiştir. Ayırçay ve diğerleri (2017) Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ile ağırlıklandırarak GİA uygulamış; Vakıf Katılım Bankası’nın performansı öne çıkmıştır. Peker ve Baki (2011), sigorta sektöründeki üç firmanın GİA

yöntemiyle değerlendirmesinde yüksek likidite oranına sahip şirketlerin üstün performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Karadağ Erdemir ve Kırkağaç (2022), hayat dışı sigorta şirketlerini AHP ve GİA yöntemleriyle analiz etmiş ve ağırlıklandırma tekniğinin sonuçları etkilediğini göstermiştir. Kaplan (2021) ise GİA yönteminin geleneksel ve katılım bankalarının karşılaştırmalı analizinde ne kadar etkin olduğunu sistematik literatür taramasıyla incelemiştir. Gül (2021), Entropi, Geliştirilmiş Entropi ve TOPSIS yöntemleriyle Türkiye'deki bankaları analiz etmiş; özkaynak ve aktif kârlılığının belirleyici kriterler olduğunu belirtmiştir.

Sanayi, Üretim ve Enerji Sektörüne Yönelik Uygulamalar: Güleç ve Özkan (2018), BIST'teki 16 çimento firmasının GİA skorlarını hisse getirileriyle karşılaştırmış; istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulamamışlardır. Yıldırım ve diğerleri (2021), demir-çelik firmalarının GİA ile sıralandığını, EREGL, KRDM ve ISDMR'nin öne çıktığını göstermiştir. Söylemez (2020), GİA ve TOPSIS yöntemleriyle Ana Metal sektörünü karşılaştırmalı olarak analiz etmiş ve benzer sonuçlara ulaşmıştır. Akyüz (2021), orman ürünleri sanayindeki firmaların GİA ile sıralamasını sunmuştur. Özdaoğlu ve diğerleri (2017), 98 imalat firmasını GİA yöntemiyle değerlendirmiştir. Hasanzadeh ve diğerleri (2023), plastik atıkların gazlaştırılmasında GİA ve TOPSIS yöntemlerini birlikte uygulayarak HDPE malzemesinin en yüksek performansa sahip olduğunu belirlemiştir.

Hizmet, Ulaştırma ve Turizm Sektörü Uygulamaları: Ecer ve Günay (2014), turizm firmalarının performanslarını GİA ile analiz etmiş; kaldıraç oranlarının belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Karaatlı (2016), Entropi-GİA ile turizm sektörünün çok yıllık performansını değerlendirmiştir. Karkacier ve Yazgan (2017), turizm sektöründe GİA ile kaldıraç oranının etkili kriter olduğunu göstermiştir. Sakarya ve Aksu (2020), ulaştırma sektöründe Geliştirilmiş Entropi-TOPSIS yöntemi ile analiz yaparak en yüksek performansa sahip firmaları belirlemiştir. Ersoy (2020) ve Başdeğirmen ve Işıldak (2018), ulaştırma sektörünü GİA ile değerlendirerek önemli performans kriterlerini ortaya koymuştur. Başdeğirmen ve Tunca (2017), lojistik sektöründe öz sermaye ve aktif toplamının belirleyici olduğunu belirtmiştir. Candan (2019), lojistik sektörünü bulanık AHP-GİA kombinasyonu ile analiz etmiştir. Sakarya ve Budak (2022), perakende sektörünü Geliştirilmiş Entropi-TOPSIS yöntemiyle analiz ederek MİGROS'un öne çıktığını tespit etmiştir.

Sürdürülebilirlik, Çevre ve Sosyal Alandaki Uygulamalar: Yıldız Kaya ve Öztel (2018), Otocar firmasının sürdürülebilirlik raporlarını Entropi ve GİA ile analiz etmiştir. Zhang ve diğerleri (2014), çevresel hassasiyeti ölçmek için entropi ağırlıklı model geliştirmiştir. Guoliang ve Qiang (2007), entropi teorisi ile GİA'yı birleştirerek düşük hassasiyet sorununu çözmeye odaklanmıştır. Huang ve Chu (1999), GİA'yı bulanık modelleme ile entegre ederek dönüşüm yöntemlerinin etkinliğini test etmiştir. Yan ve diğerleri (2023), Jiangxi Eyaleti'nde kırsal turizm gelişimini entropi ağırlıklı GİA ile analiz etmiştir. Haseki ve Avşar (2023), AB ülkelerinin teknoloji üretim başarısını Entropi ve GİA ile sıralamıştır.

Spor, Bireysel ve Kurumsal Performans Değerlendirmeleri: Ecer ve Boyukaslan (2014), büyük futbol kulüplerini GİA yöntemiyle analiz etmiş, yükümlülük oranlarının etkili olduğunu tespit etmiştir. Ecemiş ve diğerleri (2021), Süper Lig takımlarının genel performansını Entropi-GİA ile değerlendirmiştir. Umut (2023), bireysel emeklilik firmalarının performansını GİA ile ölçmüştür. Setiawansyah (2024), çalışan performansını Entropi ve GİA yöntemleriyle analiz etmiştir. Lalithchandra ve Rajendhiran (2021), likidite oranlarının sürdürülebilirlikteki önemine dikkat çekmiştir. Tayyar ve diğerleri (2014), bilişim firmalarının GİA ve AHP ile analizinde Link Bilgisayar'ın öne çıktığını belirtmiştir. Chen (2020), tedarikçi seçimi için Entropi-AHP-TOPSIS modelini önermiştir. Liu ve diğerleri (2020), madenlerdeki gaz patlaması riskini Entropi ağırlıklı GİA ve makine öğrenmesi ile tahmin etmiştir. Li ve Guo (2022), Çin'deki kargo firmalarını entropi ve GİA ile analiz ederek SF Express'i en rekabetçi firma olarak belirlemiştir.

Tartışma kapsamında incelenen eserler, GİA ve Entropi yöntemlerinin çok çeşitli sektörlerde ve farklı veri yapılarına uygulanabilir olduğunu, başarılı sonuçlar elde edildiğini göstermektedir. Özellikle GİA'nın sıralama ve karşılaştırmadaki üstünlüğü ile Entropi'nin nesnel ağırlık belirlemedeki katkısı, bu yöntemleri çok kriterli karar verme analizlerinde vazgeçilmez kılmaktadır. Bununla birlikte, bu araştırma, önceki çalışmalardan farklı olarak, enflasyon muhasebesine göre düzeltilmiş ve düzeltilmemiş finansal tabloları karşılaştırmalı biçimde analiz etmekte; Geliştirilmiş Entropi ve GİA yöntemlerini birlikte kullanarak firmaların performans sıralamalarını hisse senedi getirileriyle ilişkilendirmektedir. Bu yönüyle çalışma, yalnızca finansal performansı değil aynı zamanda piyasa tepkisini de değerlendiren özgün bir bakış açısı sunmaktadır.

3. YÖNTEM

Bu çalışmada, Türkiye'de yeniden uygulamaya konulan enflasyon muhasebesinin işletmelerin finansal performansı üzerindeki etkilerini analiz edebilmek için ÇKKV yöntemlerinden yararlanılmıştır. Çalışmada, karar verici öznelliğini en aza indirgeyerek finansal oranların ağırlıklarını nesnel biçimde belirleyen Geliştirilmiş Entropi Yöntemi ile, bu ağırlıklara dayalı olarak işletmelerin performans sıralamalarını ortaya koyan GİA birlikte uygulanmıştır. Ayrıca, elde edilen performans skorlarının piyasa tepkileriyle

karşılaştırılabilirliği amacıyla firmaların hisse senedi getirileri hesaplanmış ve analiz sonuçlarının güvenilirliği test edilmiştir. Böylece, çalışmada hem içsel finansal oranlara hem de dışsal piyasa göstergelerine dayalı bütüncül bir yöntemsel yaklaşım geliştirilmiştir.

3.1. Araştırmanın Amacı

Araştırmada, Türkiye’de yeniden uygulamaya konulan enflasyon muhasebesi uygulamasının işletmelerin finansal performans düzeyleri üzerindeki etkisini, nesnel ve karşılaştırmalı bir yaklaşımla ortaya konulması amaçlanmıştır.

3.2. Araştırmanın Veri Seti ve Değişkenleri

Araştırma, 2022 yılı itibarıyla Borsa İstanbul ana metal sanayi sektöründe faaliyet gösteren 17 işletmeyi kapsamaktadır. Söz konusu işletmelere ait bilgilere Tablo 1’de yer verilmiştir. Veriler, KAP’ta yayımlanan yıllık finansal durum tabloları, kapsamlı gelir tabloları ve bağımsız denetim raporlarından elde edilmiştir. İlgili yılda işletmeler hem enflasyon düzeltmesi uygulanmış hem de uygulanmamış finansal tablolar yayımlamıştır. Bu durum, enflasyon muhasebesinin finansal performans üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak analiz etme olanağı sunmuştur.

Tablo 1. Araştırma kapsamındaki ana metal şirketlerinin bilgileri

Sıra No	Şirket Borsa Kodu	Şirket Unvanı
1	AYES	AYES ÇELİK HASIR VE ÇİT SANAYİ A.Ş.
2	BMSCH	BMS ÇELİK HASIR SANAYİ VE TİCARET A.Ş.
3	BURCE	BURÇELİK BURSA ÇELİK DÖKÜM SANAYİİ A.Ş.
4	BURVA	BURÇELİK VANA SANAYİ VE TİCARET A.Ş.
5	CELHA	ÇELİK HALAT VE TEL SANAYİİ A.Ş.
6	CEMAS	ÇEMAŞ DÖKÜM SANAYİ A.Ş.
7	CEMTS	ÇEMTAŞ ÇELİK MAKİNA SANAYİ VE TİCARET A.Ş.
8	CUSAN	ÇUHADAROĞLU METAL SANAYİ VE PAZARLAMA A.Ş.
9	DMSAS	DEMİSAŞ DÖKÜM EMAYE MAMÜLLERİ SANAYİ A.Ş.
10	DOKTA	DÖKTAŞ DÖKÜMCÜLÜK TİCARET VE SANAYİ A.Ş.
11	ERBOS	ERBOSAN ERCİYAS BORU SANAYİ VE TİCARET A.Ş.
12	IZMDC	İZMİR DEMİR ÇELİK SANAYİ A.Ş.
13	KRDMD	KARDEMİR KARABÜK DEMİR ÇELİK SANAYİ VE TİCARET A.Ş.
14	PNLSN	PANELSAN ÇATI CEPHE SİSTEMLERİ SANAYİ VE TİCARET A.Ş.
15	SARKY	SARKUYSAN ELEKTROLİTİK BAKIR SANAYİ VE TİCARET A.Ş.
16	TUCLK	TUĞÇELİK ALÜMİNYUM VE METAL MAMÜLLERİ SANAYİ VE TİCARET A.Ş.
17	YKSLN	YÜKSELEN ÇELİK A.Ş.

Çalışmada incelenen işletmelerin finansal performanslarının değerlendirilmesinde, literatürde yaygın biçimde kullanılan oranlar esas alınarak dört temel başlık altında gruplandırılmış ve her bir oran türü, Tablo 2’de sunulan sınıflandırmaya uygun şekilde analiz edilmiştir (Jihadi ve diğerleri, 2021; Blessing ve Sakougovui, 2023; Peker ve Baki, 2011; Tayyar ve diğerleri, 2014; Ecer ve Günay, 2014; Karkacier ve Yazgan, 2017; Akyüz ve diğerleri, 2019; Güleç ve Özkan, 2018; Söylemez, 2020).

Tablo 2. Finansal performans göstergeleri ve hesaplama formülleri

Oran Grubu	Kod	Oranlar	Formül	Referans
Likidite	L1	Cari Oran	Dönen Varlık / KVK	Maksimum
Oranları	L2	Asit-Test Oranı	(Dönen Varlıklar-Stoklar) / KVK	Minimum
	L3	Nakit Oran	(Hazır Değerler + Menkul Kıymetler) / KVK	Maksimum
Faaliyet	F1	Alacak Devir Hızı	Net Satışlar / Ticari Alacaklar	Maksimum
Oranları	F2	Maddi Duran Varlık Devir Hızı	Net Satışlar / Maddi Duran Varlık Toplamı	Maksimum
	F3	Özkaynak Devir Hızı	Net Satışlar/Özkaynaklar	Maksimum
Mali Yapı	M1	Finansal Kaldıraç Oranı	Yabancı Kaynak Toplamı /Kaynak Toplamı	Minimum
Oranları	M2	Finansman Oranı	Özkaynak/Yabancı Kaynak Toplamı	Maksimum
	M3	Maddi Duran Varlık Oranı	Maddi Duran Varlıklar / Öz kaynaklar	Maksimum
Kârlılık	K1	Net Kâr Marjı	NK / Net Satışlar	Maksimum
Oranları	K2	Faaliyet Kâr Marjı	Faaliyet Kârı / Net Satışlar	Maksimum
	K3	Aktif Kârlılığı (ROA)	Net Kâr / Aktif Toplamı	Maksimum
	K4	Özkaynak Kârlılığı (ROE)	Net Kâr / Özkaynak Toplamı	Maksimum
	K5	Hisse Başı Kâr	Net Kâr /Hisse Sayısı	Maksimum

Finansal analizlerin temelini oluşturan finansal oranlar, işletmenin mali durumunu değerlendirmeye yönelik nicel göstergeler olup, kapsamlı gelir tablosu, finansal durum tablosu ve nakit akış tablosu gibi temel finansal raporlardan türetilmektedir. Bu oranlar aracılığıyla işletmenin faaliyet verimliliği, kârlılık düzeyi ve finansal istikrarı hakkında anlamlı çıkarımlarda bulunmak mümkündür (Blessing ve Sakougovui, 2023). Bu doğrultuda, literatürde genel kabul görmüş yaklaşımlar çerçevesinde, söz konusu oranlar dört ana grupta ele alınarak aşağıda açıklanmıştır.

Likidite oranları, işletmelerin kısa vadeli borçlarını ödeme kapasitesini değerlendirmeye yönelik önemli finansal göstergelerdir. Bu oranlar, özellikle cari oran, asit-test oran ve nakit oran gibi alt başlıklar aracılığıyla, işletmenin dönen varlıklarının kısa vadeli yükümlülüklerini karşılama yeterliliğini ölçer (Akgüç, 2011: 436; Peker ve Baki, 2011; Söylemez, 2020). Likidite analizleri sayesinde firmaların net çalışma sermayesi düzeyi ve nakit dönüşüm sürecindeki yeterliliği anlaşılır. Yüksek likidite oranı, genellikle finansal sağlığın güçlü olduğunu, düşük oranlar ise nakit sıkışıklığı veya borç ödeme riskine işaret etmektedir (Blessing ve Sakougovui, 2023; Susellawati ve diğerleri, 2022).

Faaliyet oranları, işletmenin sahip olduğu varlıkları ne ölçüde verimli kullandığını ortaya koyar. Bu oranlar; stok devir hızı, alacak devir hızı ve borç devir hızı gibi göstergelerle, işletmenin kaynaklarını kârlı faaliyetlere dönüştürme performansını değerlendirir (Meydan ve diğerleri, 2016; Söylemez, 2020). Ayrıca faaliyet oranları, likidite oranlarının eksik bıraktığı nakit yaratma kapasitesine dair önemli bilgiler sağlar. Bu oranlar, işletmenin müşterilere tanıdığı vadelerin etkinliği, stok yönetimi başarısı ve varlık devir hızının yeterliliği gibi konulara ışık tutar (Susellawati ve diğerleri, 2022; Akyüz ve diğerleri, 2019).

Mali yapı oranları ya da diğer adıyla kaldıraç oranları, bir işletmenin sermaye yapısını, borçla ne ölçüde finanse edildiğini ve uzun vadeli ödeme kapasitesini değerlendirir. Özellikle borç/özkaynak oranı ve finansal kaldıraç oranı, işletmenin borç yükünün seviyesini, faiz yükümlülüklerine karşı duyarlılığını ve finansal riskini analiz etmede kullanılır (Akdoğan ve Tenker, 2001: 616; Blessing ve Sakougovui, 2023). Bu oranların yüksek olması, borç baskısının artması ve iflas riskinin yükselmesi anlamına gelebilirken, özkaynağın ağırlıklı olması finansal güvenilirliği güçlendirebilir (Peker ve Baki, 2011; Söylemez, 2020).

Kârlılık oranları, işletmenin faaliyetlerinden ve finansal stratejilerinden ne derece başarılı sonuçlar elde ettiğini gösteren temel performans ölçütleridir. Net kâr marjı, brüt kâr marjı, aktif kârlılığı (ROA) ve özkaynak kârlılığı (ROE) gibi oranlarla, işletmenin maliyetlere oranla ne düzeyde gelir elde ettiği, yatırımcılarına ne ölçüde değer sunduğu analiz edilir (Meydan ve diğerleri, 2016; Jihadi ve diğerleri, 2021). Bu oranlar aynı zamanda firmanın risk düzeyi, rekabet gücü ve sürdürülebilirliği hakkında da bilgi sunmaktadır (Tayyar ve diğerleri, 2014; Peker ve Baki, 2011).

3.3. Araştırmanın Modeli

Çalışmada, Türkiye’de yeniden uygulamaya konulan enflasyon muhasebesinin, işletmelerin finansal performans düzeylerine etkisini belirlemek amacıyla Geliştirilmiş Entropi Yöntemi ve Gri İlişkisel Analiz (GİA) yöntemi birlikte kullanılmıştır. İlk aşamada, finansal oranların ağırlıklarının karar verici öznelliğinden uzak, güvenilir ve veri temelli biçimde belirlenebilmesi amacıyla Geliştirilmiş Entropi Yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemle elde edilen ağırlıklar doğrultusunda, GİA yöntemi kullanılarak işletmelerin enflasyon düzeltmesi öncesi ve sonrası finansal performans düzeyleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Araştırma modelinde ayrıca, GİA sonuçlarının geçerliliğini test etmek ve sermaye piyasalarının finansal performans göstergelerine verdiği tepkiyi incelemek amacıyla, şirketlerin hisse senedi getirileri hesaplanarak değerlendirmeye dahil edilmiştir. Hisse getirileri, “Satın Al ve Elde Tut (Buy and Hold)” yöntemiyle hesaplanmış ve nesnel bir karşılaştırma ölçütü olarak kullanılmıştır. Böylece, hem içsel finansal oranlara dayalı performans ölçümleri ile hem de dışsal piyasa tepkileriyle desteklenmiş bütüncül bir analiz yaklaşımı geliştirilmiştir. Çalışmada yer alan değişkenler arasındaki ilişkilerin belirlenmesine yönelik korelasyon analizi SPSS 23.0 istatistiksel analiz programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, performans değerlendirmesi kapsamında uygulanan Gelişmiş Entropi yöntemi ile GİA işlemleri, Microsoft Excel ortamında formül tabanlı olarak yürütülmüş ve sonuçlar bu araç üzerinden elde edilmiştir. Çalışmada uygulanan yöntemlerin detayları ve analiz adımları, izleyen bölümde sistematik biçimde açıklanmaktadır.

3.3.1. Geliştirilmiş Entropi

Entropi kavramı ilk olarak Alman fizikçi Rudolf Clausius tarafından 1865 yılında termodinamik bağlamında ortaya konmuş, daha sonra Shannon tarafından 1948’de bilgi kuramına uyarlanarak enformasyon entropisi şeklinde geliştirilmiştir (Chen, 2020; Zhang ve diğerleri, 2011). Çok kriterli karar verme (ÇKKV) süreçlerinde kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesi, karar kalitesini doğrudan etkileyen kritik bir aşamadır. Karar vericilerin sübjektif yargılarından kaynaklanan öznelliği azaltmak amacıyla geliştirilen Entropi yöntemi, karar matrisi verilerine dayalı olarak kriterlerin önem derecelerini objektif şekilde belirlemeyi sağlamaktadır (Çatı ve diğerleri, 2017; Özaydın ve Kayahan Karakul, 2021). Özellikle karar matrisi verilerinin bilindiği durumlarda, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) gibi eşli karşılaştırmaya dayalı yöntemler yerine, Entropi ve LINMAP gibi

istatistiksel temelli yöntemlerin tercih edilebileceği literatürde vurgulanmaktadır. Klasik Entropi yönteminin önemli bir sınırlılığı ise, negatif veya sıfır değer içeren karar matrislerinde logaritmik hesaplamaların uygulanamamasıdır. Bu sorunun çözümü için Zhang ve diğerleri (2014) tarafından Z-skoru standardizasyonu içeren *Geliştirilmiş Entropi Yöntemi* önerilmiştir. Bu yöntem, klasik yapıyı koruyarak hesaplama sorunlarını bertaraf ederken, karar vericilere daha güvenilir ve uygulaması geniş bir ağırlıklandırma mekanizması sunmaktadır (Ayçin, 2019a; Sakarya ve Budak, 2022). Böylece, Entropi yöntemi yalnızca fen bilimlerinde değil, sosyal bilimlerde de karar destek süreçlerinde etkin bir araç haline gelmiştir. Yöntemin uygulama adımları aşağıdaki gibidir (Ayçin ve Güçlü, 2020; Sakarya ve Budak, 2022; Zhang ve diğerleri, 2014; Yavuz, 2025).

1. Karar Matrisinin Oluşturulması: Yöntemin başlangıç aşamasında, x_{ij} değerlerinden oluşan ve D sembolüyle ifade edilen karar matrisi, Eşitlik 1'de tanımlanmıştır.

$$D = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Burada x_{ij} ; i . alternatif ile j . kriterin değerini temsil eder.

2. Karar Matrisinin Normalize Edilmesi: Alternatiflerin karşılaştırılabilirliğini sağlamak amacıyla karar matrisi normalizasyon işlemine tabi tutulur. Normalizasyon işlemi ile alternatiflere ait kriterlere ilişkin değerler, $[0,1]$ aralığında olacak şekilde standart hale getirilir. Bu normalizasyon işlemi Eşitlik 2'deki formülasyon kullanılarak gerçekleştirilir.

$$P_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}}, \quad \forall i, j \quad (2)$$

Karar matrisinde negatif değerlerin bulunması hâlinde, entropi değerlerin hesaplanmasında doğal logaritma fonksiyonundan yararlanıldığından dolayı logaritmik işlemlerde sorun ortaya çıkmaktadır. Bu tür sorunları gidermek amacıyla literatürde farklı düzeltme yöntemleri önerilmektedir. Bunlardan biri Zhang ve arkadaşları (2014) tarafından geliştirilen ve Ayçin ile Güçlü (2020) tarafından da uygulanan Z-skoru tabanlı standartlaştırma dönüşüm yaklaşımıdır. Bu yaklaşım sayesinde negatif değerler normalizasyon işleminden önce pozitif değerlere dönüştürülür. Bu kapsamda karar matrisindeki veriler, öncelikle Eşitlik 3 kullanılarak Z-skoru standardizasyonuna tabi tutulur.

$$x_{ij} = \frac{(x_{ij} - \bar{x}_j)}{\sigma_j} \quad (3)$$

Burada x_{ij} , i . alternatife j . kritere göre normalize değerini, $\bar{x}_j$ karar matrisinde yer alan orjinal veriyi, σ_j j . kriterin standart sapmasını ifade eder.

Daha sonra pozitif dönüşüm işlemi Eşitlik 4 aracılığıyla gerçekleştirilir ve bu sayede karar matrisindeki x_{ij} değerleri yerine, dönüşümü tamamlanmış x'_{ij} değerleri kullanılmaya başlanır. Pozitif hâle getirilen bu yeni karar matrisi, bir sonraki adımda normalizasyon işlemine tabi tutulur. Eşitlik 4'teki A değeri, $|\min(x_{ij})|$ değerine ne kadar yakın olursa, değerlendirme sonucu o kadar anlamlı olur (Zhang ve diğerleri, 2014).

$$x'_{ij} = x_{ij} + A, A > |\min(x_{ij})| \quad (4)$$

3. Her bir Kriter İçin Entropi Değerinin Hesaplanması: Bu aşamada her bir değerlendirme kriterine ait entropi değerleri (e_j), Eşitlik 5 ile hesaplanır.

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln(P_{ij}), \quad k = \frac{1}{\ln(m)}, \quad 0 \leq e_j \leq 1 \quad (5)$$

Burada k sabit bir katsayı ve e_j , j . kriterin belirsizlik ölçüsü ya da diğer bir ifade ile entropi değeridir.

4. Kriterlerin Farklılaşma Derecelerinin Hesaplanması: Bu aşamada bir önceki adımda elde edilen entropi değerleri esas alınarak, her bir kritere ilişkin farklılaşma dereceleri (d_j) Eşitlik 6 ile hesaplanır.

$$d_j = 1 - e_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

5. Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması: Yöntemin son aşamasında, her bir kriterin farklılaşma derecesi toplam farklılaşma derecesine oranlanarak, kriter ağırlıkları (w_j) hesaplanmaktadır. Bu hesaplama süreci, Eşitlik 7 ile gerçekleştirilmektedir.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (7)$$

3.3.2. Gri İlişkisel Analizi

Gri İlişkisel Analiz (GİA), 1982 yılında Julong Deng tarafından geliştirilen Gri Sistem Teorisi'ne dayanmaktadır. Bu teori, özellikle eksik, belirsiz ve kısıtlı bilgiyle karar verilmesi gereken durumlarda sistematik analiz imkânı sunmak amacıyla geliştirilmiştir (Arslan, 2022; Akyüz, 2021). Deng'in gri sistem teorisini tanıttığı ilk uluslararası çalışması (Gri Sistemin Denetim Problemleri) sonrası, belirsizlik içeren sistemleri analiz etme yeteneği sayesinde teori geniş çapta uygulanmaya başlanmıştır (Karkacier ve Yazgan, 2017). GİA, alternatiflerin ideal referans seriyile olan benzerliğini ölçerek karar noktalarının önceliklendirilmesini sağlamaktadır. Bu benzerlik, gri ilişki katsayısı ile ifade edilir ve 0 ile 1 arasında değer almaktadır. 1'e yakınlık, alternatifin ideal çözüme daha yakın olduğunu göstermektedir (Yıldırım ve diğerleri, 2021). Yöntemin öne çıkan avantajları; az veri ile çalışabilmesi, istatistiksel dağılım varsayımı gerektirmemesi ve hesaplama kolaylığı sunmasıdır. Bu yönleriyle GİA, sosyal bilimlerden mühendisliğe, finans, enerji, tarım ve turizm gibi farklı disiplinlerde yaygın şekilde uygulanmaktadır (Ersoy, 2019). GİA'nın, bilgi eksikliği nedeniyle geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda güvenilir ve uygulanabilir çözümler üretmesi, yöntemi çok kriterli karar verme literatüründe ayrıcalıklı bir konuma taşımaktadır. Yöntemin uygulama adımları aşağıdaki sunulmuştur (Suvvari ve diğerleri, 2019; Ecer ve Boyukaslan, 2014; Özdağoğlu ve diğerleri, 2017; Tayyar ve diğerleri, 2014; Ecer ve Günay, 2014; Meydan ve diğerleri, 2016; Karkacier ve Yazgan, 2017; Peker ve Baki, 2011; Başdeğirmen ve Işıldak, 2018; Candan, 2019):

1. Karar Matrisinin Oluşturulması: Alternatiflerin her bir kriter için aldıkları değerleri gösteren, $m \times n$ karar matrisi (X) oluşturulur. Karakterize edilen m alternatif (bu çalışmada 17 ana metal şirketi) ile n kriter (kullanılan 14 finansal oran) olduğu varsayıldığında, karşılaştırılan diziler Eşitlik 8'deki gibi bir matris formunda gösterilebilir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{1(1)} & x_{1(2)} & \cdots & x_{1(n)} \\ x_{2(1)} & x_{2(2)} & \cdots & x_{2(n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m(1)} & x_{m(2)} & \cdots & x_{m(n)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$i = 1, 2, \dots, m$ ve $j = 1, 2, \dots, n$,

Burada $x_i(j)$; j . finansal orana karşılık gelen i . İşletmesinin değeridir.

2. Veri Setinin Normalleştirilmesi (Karşılaştırma Matrisinin Oluşturulması): Kriterler farklı birimlerle ölçüldüğünden dolayı, birbirleriyle karşılaştırılabilir hale getirmek için standartlaştırma işlemi yapılır. Standartlaştırma işleminde büyük, küçük ya da ideal değerlerin tercih edilmesi durumuna göre üç farklı eşitlikten yararlanılabilir; büyük olan daha iyi, küçük olan daha iyi ve ideal olan en iyi.

Fayda durumu, daha büyük daha iyi normalleştirme için (amaç kârlılık gibi en büyük değere ulaşmak ise) x_i 'yi, x_i^* 'ye dönüştürme Eşitlik 9 ile gerçekleştirilmektedir.

$$x_i^* = \frac{x_i(j) - \min_j x_i(j)}{\max_j x_i(j) - \min_j x_i(j)} \quad (9)$$

Burada $\min_j x_i(j)$ j . finansal oranın minimum değeri ve $\max_j x_i(j)$ j . finansal oranın maksimum değeridir.

Maliyet durumu, daha küçük daha iyi normalleştirme (amaç borçluluk gibi en küçük değere ulaşmak ise) için Eşitlik 10 kullanılır.

$$x_i^* = \frac{\max_j x_i(j) - x_i(j)}{\max_j x_i(j) - \min_j x_i(j)} \quad (10)$$

Optimal durum, hedef İdeal değer ise daha iyi normalleştirme için Eşitlik 11 kullanılır.

$$x_i^* = \frac{|x_i(j) - x_{ob}(j)|}{\max_j x_i(j) - x_{ob}(j)} \quad (11)$$

Burada $x_{ob}(j)$ j . finansal oranın hedef (ideal) değeridir ve standartlaştırma işlemi uygulandıktan sonra tüm durumlar için büyük değerler daha iyi duruma getirilmiş olur ve standartlaştırılmış değerler 0 ile 1 arasında ($\min_j x_i(j) \leq x_{ob}(j) \leq \max_j x_i(j)$) değer alır.

3. Normalleştirilmiş Matrisin ve Referans Dizisinin Oluşturulması: Normalleştirme işleminden sonra, bu aşamada bir önceki adımda elde edilen değerlerden yararlanılarak standartlaştırılmış karar matrisi oluşturulur. Eşitlik 12 ilk karar matrisinin revize edilmiş versiyonu olan normalleştirilmiş matrisi ve Eşitlik 13 referans dizisini göstermektedir:

$$X = \begin{bmatrix} x_1^*(1) & x_1^*(2) & \dots & x_1^*(n) \\ x_2^*(1) & x_2^*(2) & \dots & x_2^*(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_m^*(1) & x_m^*(2) & \dots & x_m^*(n) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$x_0^* = x_0^*(1), x_0^*(2), \dots, x_0^*(j), \dots, x_0^*(n), \quad (13)$$

Burada $x_0^*(j)$ j. finansal oran için referans değerdir

4. Fark (Mutlak Değer) Matrisinin Oluşturulması: Standartlaştırılmış karar matrisinden referans serisi çıkartılarak fark matrisi elde edilir. $\Delta_{0i}(j)$, j. finansal oranın “normalleştirilmiş değeri” ile “referans değeri” arasındaki farkın mutlak değeridir ve Eşitlik 14 ile hesaplanır.

$$\Delta_{0i}(j) = |x_0^*(j) - x_i^*(j)| \quad (14)$$

$\Delta_{0i}(j)$ değerlerinin hesaplanmasından sonra, oluşturulan mutlak değer matrisi Eşitlik 15'te gösterilmektedir.

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta_{01}(1) & \Delta_{01}(2) & \dots & \Delta_{01}(n) \\ \Delta_{02}(1) & \Delta_{02}(2) & \dots & \Delta_{02}(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_{0m}(1) & \Delta_{0m}(2) & \dots & \Delta_{0m}(n) \end{bmatrix} \quad (15)$$

5. Gri İlişkisel Katsayının Hesaplanması: Gri ilişkisel katsayının hesaplanması Eşitlik 16 kullanılarak elde edilir.

$$\gamma_{0i(j)} = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{0i(j)} + \zeta \Delta_{max}} \quad \Delta_{max} = \max_i \max_j \Delta_{0i(j)}, \Delta_{min} = \min_i \min_j \Delta_{0i(j)} \quad (16)$$

Burada $\gamma_{0i(j)}$ j. finansal oranın Gri ilişkisel katsayısı ve ζ ayırt edici katsayıdır. Bu katsayı 0 ile 1 arasında bir değerdir. Bununla birlikte, ζ genellikle 0,1 ile 0,5 arasında değişir.

6. Gri İlişki Derecesinin Hesaplanması: Finansal oranların ağırlıkları belirlendiyse, Gri ilişkisel derece Eşitlik 17 ile hesaplanır.

$$\Gamma_{0i} = \sum_{j=1}^m [w_{(j)} \times \gamma_{0i(j)}], \quad \sum_{j=1}^m w_{(j)} = 1 \quad (17)$$

Burada Γ_{0i} Gri ilişkisel derecedir ve $w_{(j)}$ j. finansal oranın bu çalışmadaki ağırlığıdır.

Bu derece, karşılaştırılabilir seri ve referans arasındaki korelasyon seviyesini gösterir. Gri ilişkisel derecenin büyüklüğü, ilişkinin kuvvetli olduğunu göstermektedir. Büyük değerli gri ilişki derecesinden küçük derecelere doğru alternatiflerin sıralanması sonucunda, gri ilişkisel derecesi ne kadar geniş olursa ya da yüksek dereceye sahipse; ideal çözüme en yakın ve daha iyi alternatife o kadar yakın olur Sonuç olarak, ana metal şirketlerinin performansı Gri ilişkisel derecelere göre sıralanabilir. Daha yüksek bir Gri ilişkisel derece, şirketlerin daha iyi finansal performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.

4. BULGULAR

Bu bölümde, çalışmada yer alan ana metal sanayi sektöründe faaliyet gösteren işletmelere ait 2022 yılına ilişkin finansal veriler kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonuçlarına yer verilmektedir. GİA yöntemiyle ölçülen finansal performans skorlarının hesaplanmasında kullanılan kriter ağırlıkları, nesnel ölçütlere dayalı olarak Geliştirilmiş Entropi yöntemiyle belirlenmiştir. Analizlerde, işletmelerin enflasyon düzeltmesi yapılmadan önceki ve sonraki finansal tabloları ayrı ayrı değerlendirilerek karşılaştırmalı sonuçlara ulaşılmıştır. Ayrıca, elde edilen GİA skorlarının geçerliliğini test etmek amacıyla, firmaların hisse senedi getirileri ile ilişkilendirilmiş ve piyasa tepkisinin içsel performans ölçütleriyle tutarlılığı incelenmiştir. Bu kapsamda, GİA sonuçları, entropi ağırlıkları ve hisse getirileri üzerinden elde edilen bulgular aşağıda sistematik olarak sunulmaktadır.

4.1. Geliştirilmiş Entropi ile Kriter Ağırlıklandırma Sonuçları

4.1.1. Enflasyon Düzeltmesi Öncesi Geliştirilmiş Entropi Aşamaları

Geliştirilmiş Entropi analizinin, ana metal sanayi sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin enflasyon düzeltmesi öncesi finansal verilerine uygulanmasına ilişkin aşamalar ve elde edilen bulgular aşağıda sistematik biçimde sunulmuştur.

1. Aşama: Uygulama sürecinin ilk adımında 17 ana metal sanayi işletmesine ait 14 finansal oranın oluşturduğu karar matrisi düzenlenmiş ve karşılaştırmaya esas veri yapısı aşağıdaki Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Enflasyon düzeltmesi öncesi karar matrisi verileri

İşletme	L1	L2	L3	F1	F2	F3	M1	M2	M3	K1	K2	K3	K4	K5
AYES	1,181	0,871	0,479	36,401	29,507	14,094	0,680	0,471	0,478	0,041	0,053	0,187	0,583	3,870
BMSCH	1,631	1,375	0,696	47,686	4,227	3,050	0,347	1,884	0,721	0,062	0,065	0,124	0,190	1,748
BURCE	1,188	0,782	0,370	8,489	0,745	0,842	0,376	1,660	1,132	0,100	0,125	0,053	0,084	3,519
BURVA	1,136	0,563	0,059	4,322	2,849	2,971	0,737	0,357	1,043	0,037	0,103	0,029	0,109	0,215
CELHA	0,884	0,499	0,080	6,555	11,213	51,642	0,961	0,040	4,606	0,006	0,053	0,013	0,331	0,220
CEMAS	5,339	4,415	2,729	2,906	1,422	0,457	0,105	8,530	0,321	0,617	0,194	0,252	0,282	0,620
CEMTS	4,757	2,572	0,934	6,836	9,142	1,753	0,175	4,718	0,192	0,289	0,306	0,417	0,506	9,452
CUSAN	4,757	2,572	0,934	3,968	5,307	1,018	0,175	4,718	0,192	0,497	0,218	0,417	0,506	9,452
DMSAS	0,796	0,560	0,034	3,531	4,226	9,551	0,871	0,148	2,260	-0,076	-0,067	-0,093	-0,722	-1,065
DOKTA	0,850	0,408	0,058	8,786	1,477	2,748	0,673	0,485	1,860	0,016	0,048	0,015	0,045	0,645
ERBOS	2,379	1,469	0,696	6,278	13,260	2,477	0,382	1,620	0,187	0,149	0,219	0,228	0,369	18,285
IZMDC	0,825	0,365	0,209	26,311	6,251	9,665	0,780	0,283	1,546	0,046	0,132	0,099	0,448	0,762
KRDMD	1,300	0,671	0,150	6,536	2,741	2,390	0,570	0,755	0,872	0,079	0,104	0,082	0,190	1,907
PNLSN	1,710	1,347	0,648	3,895	4,620	1,894	0,486	1,057	0,410	0,148	0,121	0,144	0,281	2,325
SARKY	1,361	0,868	0,091	7,754	30,866	10,807	0,708	0,411	0,350	0,041	0,065	0,130	0,445	2,822
TUCLK	1,180	0,952	0,093	1,945	0,899	1,426	0,668	0,498	1,587	0,129	0,209	0,061	0,184	2,892
YKSLN	1,443	1,005	0,123	2,656	24,998	3,584	0,678	0,474	0,143	0,112	0,199	0,130	0,403	1,329

2. Aşama: Karar matrisinin normalize edilmesinde vektör tabanlı normalizasyon yöntemi tercih edilmiştir (Sakarya ve Aksu, 2020). Burada ilk önce Eşitlik 3'ten yararlanılarak Z-skoru standartlaştırılması ile oluşturulmuş olan matris Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Enflasyon düzeltmesi öncesi standardize edilmiş matris

İşletme	L1	L2	L3	F1	F2	F3	M1	M2	M3	K1	K2	K3	K4	K5
AYES	-0,511	-0,375	-0,022	2,009	2,117	0,593	0,522	-0,536	-0,527	-0,542	-0,838	0,396	1,158	0,086
BMSCH	-0,202	0,120	0,317	2,898	-0,498	-0,341	-0,830	0,104	-0,304	-0,421	-0,705	-0,079	-0,205	-0,370
BURCE	-0,506	-0,462	-0,192	-0,188	-0,859	-0,528	-0,712	0,003	0,072	-0,203	-0,017	-0,623	-0,572	0,010
BURVA	-0,542	-0,678	-0,680	-0,516	-0,641	-0,348	0,755	-0,588	-0,009	-0,569	-0,271	-0,804	-0,485	-0,699
CELHA	-0,716	-0,741	-0,647	-0,340	0,224	3,770	1,664	-0,731	3,256	-0,744	-0,842	-0,925	0,286	-0,698
CEMAS	2,347	3,110	3,503	-0,627	-0,789	-0,560	-1,812	3,117	-0,670	2,789	0,779	0,896	0,114	-0,612
CEMTS	1,947	1,297	0,691	-0,318	0,010	-0,451	-1,528	1,389	-0,789	0,888	2,065	2,151	0,891	1,285
CUSAN	1,947	1,297	0,691	-0,544	-0,387	-0,513	-1,528	1,389	-0,789	2,095	1,057	2,151	0,891	1,285
DMSAS	-0,775	-0,681	-0,720	-0,578	-0,498	0,209	1,298	-0,682	1,106	-1,219	-2,219	-1,731	-3,371	-0,974
DOKTA	-0,738	-0,831	-0,682	-0,164	-0,783	-0,366	0,495	-0,529	0,740	-0,687	-0,900	-0,911	-0,708	-0,607
ERBOS	0,312	0,212	0,318	-0,362	0,436	-0,389	-0,688	-0,015	-0,794	0,081	1,068	0,712	0,417	3,182
IZMDC	-0,756	-0,873	-0,445	1,215	-0,289	0,219	0,927	-0,621	0,452	-0,513	0,064	-0,272	0,691	-0,582
KRDMD	-0,429	-0,572	-0,538	-0,341	-0,652	-0,397	0,075	-0,407	-0,166	-0,322	-0,255	-0,402	-0,206	-0,336
PNLSN	-0,147	0,092	0,242	-0,549	-0,458	-0,439	-0,264	-0,270	-0,589	0,076	-0,060	0,074	0,110	-0,246
SARKY	-0,388	-0,378	-0,630	-0,246	2,258	0,315	0,638	-0,563	-0,644	-0,543	-0,705	-0,036	0,680	-0,139
TUCLK	-0,511	-0,295	-0,626	-0,703	-0,843	-0,478	0,473	-0,524	0,489	-0,034	0,943	-0,558	-0,225	-0,124
YKSLN	-0,331	-0,244	-0,579	-0,647	1,650	-0,296	0,516	-0,534	-0,834	-0,131	0,837	-0,038	0,534	-0,460

Standardize edilmiş matris üzerinden, Eşitlik(4)'ten faydalanılarak negatif veriler koordinat dönüşümü ile pozitif çevrilmiş ve elde edilen matris Tablo 5'te sunulmuştur (Sakarya ve Budak, 2022). Burada koordinat dönüşümü yapılırken Tablo 4'teki en küçük değer-3,371 ve $A > |\min(x_{ij})|$ olduğundan $A=3,400$ olarak alınmıştır. Çünkü A değeri $|\min(x_{ij})|$ değerine ne kadar yakın olursa değerlendirme sonucu o kadar anlamlı olur (Zhang ve diğeleri, 2014). Tablo 5'teki veriler kullanılarak Eşitlik 2 yardımıyla hesaplanan normalize matris Tablo 6'da sunulmuştur.

3. Aşama: Tablo 6'daki veriler kullanılarak Eşitlik (5) yardımıyla hesaplanan kriterlere ilişkin entropi değerleri (E_j) Tablo 7 sunulmuştur.

Tablo 5. Enflasyon düzeltmesi öncesi koordinat dönüşümü yapılmış karar matrisi

İşletme	L1	L2	L3	F1	F2	F3	M1	M2	M3	K1	K2	K3	K4	K5
AYES	2,889	3,025	3,378	5,409	5,517	3,993	3,922	2,864	2,873	2,858	2,562	3,796	4,558	3,486
BMSCH	3,198	3,520	3,717	6,298	2,902	3,059	2,570	3,504	3,096	2,979	2,695	3,321	3,195	3,030
BURCE	2,894	2,938	3,208	3,212	2,541	2,872	2,688	3,403	3,472	3,197	3,383	2,777	2,828	3,410
BURVA	2,858	2,722	2,720	2,884	2,759	3,052	4,155	2,812	3,391	2,831	3,129	2,596	2,915	2,701
CELHA	2,684	2,659	2,753	3,060	3,624	7,170	5,064	2,669	6,656	2,656	2,558	2,475	3,686	2,702
CEMAS	5,747	6,510	6,903	2,773	2,611	2,840	1,588	6,517	2,730	6,189	4,179	4,296	3,514	2,788
CEMTS	5,347	4,697	4,091	3,082	3,410	2,949	1,872	4,789	2,611	4,288	5,465	5,551	4,291	4,685
CUSAN	5,347	4,697	4,091	2,856	3,013	2,887	1,872	4,789	2,611	5,495	4,457	5,551	4,291	4,685
DMSAS	2,625	2,719	2,680	2,822	2,902	3,609	4,698	2,718	4,506	2,181	1,181	1,669	0,029	2,426
DOKTA	2,662	2,569	2,718	3,236	2,617	3,034	3,895	2,871	4,140	2,713	2,500	2,489	2,692	2,793
ERBOS	3,712	3,612	3,718	3,038	3,836	3,011	2,712	3,385	2,606	3,481	4,468	4,112	3,817	6,582
IZMDC	2,644	2,527	2,955	4,615	3,111	3,619	4,327	2,779	3,852	2,887	3,464	3,128	4,091	2,818
KRDMD	2,971	2,828	2,862	3,059	2,748	3,003	3,475	2,993	3,234	3,078	3,145	2,998	3,194	3,064
PNLSN	3,253	3,492	3,642	2,851	2,942	2,961	3,136	3,130	2,811	3,476	3,340	3,474	3,510	3,154
SARKY	3,012	3,022	2,770	3,154	5,658	3,715	4,038	2,837	2,756	2,857	2,695	3,364	4,080	3,261
TUCLK	2,889	3,105	2,774	2,697	2,557	2,922	3,873	2,876	3,889	3,366	4,343	2,842	3,175	3,276
YKSLN	3,069	3,156	2,821	2,753	5,050	3,104	3,916	2,866	2,566	3,269	4,237	3,362	3,934	2,940

Tablo 6. Enflasyon düzeltmesi öncesi normalize edilmiş matris

İşletme	L1	L2	L3	F1	F2	F3	M1	M2	M3	K1	K2	K3	K4	K5
AYES	0,050	0,052	0,058	0,094	0,095	0,069	0,068	0,050	0,050	0,049	0,044	0,066	0,079	0,060
BMSCH	0,055	0,061	0,064	0,109	0,050	0,053	0,044	0,061	0,054	0,052	0,047	0,057	0,055	0,052
BURCE	0,050	0,051	0,055	0,056	0,044	0,050	0,047	0,059	0,060	0,055	0,059	0,048	0,049	0,059
BURVA	0,049	0,047	0,047	0,050	0,048	0,053	0,072	0,049	0,059	0,049	0,054	0,045	0,050	0,047
CELHA	0,046	0,046	0,048	0,053	0,063	0,124	0,088	0,046	0,115	0,046	0,044	0,043	0,064	0,047
CEMAS	0,099	0,113	0,119	0,048	0,045	0,049	0,027	0,113	0,047	0,107	0,072	0,074	0,061	0,048
CEMTS	0,093	0,081	0,071	0,053	0,059	0,051	0,032	0,083	0,045	0,074	0,095	0,096	0,074	0,081
CUSAN	0,093	0,081	0,071	0,049	0,052	0,050	0,032	0,083	0,045	0,095	0,077	0,096	0,074	0,081
DMSAS	0,045	0,047	0,046	0,049	0,050	0,062	0,081	0,047	0,078	0,038	0,020	0,029	0,001	0,042
DOKTA	0,046	0,044	0,047	0,056	0,045	0,052	0,067	0,050	0,072	0,047	0,043	0,043	0,047	0,048
ERBOS	0,064	0,062	0,064	0,053	0,066	0,052	0,047	0,059	0,045	0,060	0,077	0,071	0,066	0,114
IZMDC	0,046	0,044	0,051	0,080	0,054	0,063	0,075	0,048	0,067	0,050	0,060	0,054	0,071	0,049
KRDMD	0,051	0,049	0,050	0,053	0,048	0,052	0,060	0,052	0,056	0,053	0,054	0,052	0,055	0,053
PNLSN	0,056	0,060	0,063	0,049	0,051	0,051	0,054	0,054	0,049	0,060	0,058	0,060	0,061	0,055
SARKY	0,052	0,052	0,048	0,055	0,098	0,064	0,070	0,049	0,048	0,049	0,047	0,058	0,071	0,056
TUCLK	0,050	0,054	0,048	0,047	0,044	0,051	0,067	0,050	0,067	0,058	0,075	0,049	0,055	0,057
YKSLN	0,053	0,055	0,049	0,048	0,087	0,054	0,068	0,050	0,044	0,057	0,073	0,058	0,068	0,051

Tablo 7. Enflasyon düzeltmesi öncesi her bir kriter için hesaplanan entropi değerleri

İşletme	L1	L2	L3	F1	F2	F3	M1	M2	M3	K1	K2	K3	K4	K5
AYES	-0,150	-0,154	-0,166	-0,222	-0,224	-0,185	-0,183	-0,149	-0,149	-0,149	-0,138	-0,179	-0,200	-0,169
BMSCH	-0,160	-0,170	-0,176	-0,242	-0,150	-0,156	-0,138	-0,170	-0,157	-0,153	-0,143	-0,164	-0,160	-0,155
BURCE	-0,150	-0,151	-0,160	-0,161	-0,137	-0,149	-0,143	-0,167	-0,169	-0,160	-0,166	-0,146	-0,148	-0,167
BURVA	-0,149	-0,144	-0,144	-0,150	-0,145	-0,155	-0,189	-0,147	-0,166	-0,148	-0,158	-0,139	-0,151	-0,143
CELHA	-0,143	-0,142	-0,145	-0,156	-0,174	-0,259	-0,213	-0,242	-0,249	-0,142	-0,138	-0,135	-0,176	-0,143
CEMAS	-0,230	-0,246	-0,254	-0,146	-0,140	-0,148	-0,099	-0,246	-0,144	-0,239	-0,190	-0,193	-0,170	-0,146
CEMTS	-0,220	-0,204	-0,187	-0,156	-0,167	-0,152	-0,111	-0,206	-0,140	-0,193	-0,223	-0,225	-0,193	-0,204
CUSAN	-0,220	-0,204	-0,187	-0,149	-0,154	-0,150	-0,111	-0,206	-0,140	-0,224	-0,198	-0,225	-0,193	-0,204
DMSAS	-0,140	-0,144	-0,142	-0,147	-0,150	-0,173	-0,204	-0,144	-0,199	-0,124	-0,080	-0,102	-0,004	-0,133
DOKTA	-0,142	-0,138	-0,144	-0,161	-0,140	-0,155	-0,182	-0,149	-0,189	-0,144	-0,136	-0,135	-0,143	-0,146
ERBOS	-0,176	-0,173	-0,176	-0,155	-0,180	-0,154	-0,144	-0,166	-0,140	-0,169	-0,198	-0,188	-0,179	-0,247
IZMDC	-0,141	-0,137	-0,152	-0,202	-0,157	-0,173	-0,194	-0,146	-0,180	-0,150	-0,169	-0,158	-0,187	-0,147
KRDMD	-0,153	-0,148	-0,149	-0,156	-0,145	-0,154	-0,169	-0,153	-0,161	-0,156	-0,158	-0,153	-0,160	-0,156
PNLSN	-0,162	-0,170	-0,174	-0,148	-0,152	-0,152	-0,158	-0,158	-0,147	-0,169	-0,165	-0,169	-0,170	-0,159
SARKY	-0,154	-0,154	-0,146	-0,159	-0,227	-0,176	-0,186	-0,148	-0,145	-0,149	-0,143	-0,166	-0,187	-0,162
TUCLK	-0,150	-0,157	-0,146	-0,143	-0,138	-0,151	-0,181	-0,149	-0,182	-0,166	-0,194	-0,148	-0,159	-0,163
YKSLN	-0,156	-0,159	-0,147	-0,145	-0,213	-0,157	-0,182	-0,149	-0,138	-0,162	-0,192	-0,165	-0,183	-0,152
Ln(m)	2,833													
Ej	0,986	0,987	0,987	0,987	0,986	0,988	0,984	0,987	0,987	0,986	0,984	0,985	0,975	0,987

Eşitlik 5'teki k sabiti, m alternatif (işletme) sayısını göstermek üzere $k = 1/\ln(m) = 1/\ln(17) = 1/2,833213 = 0,352956$ olarak bulunur.

4. **Aşama:** Tablo 7'de bulunan entropi değerleri (E_j), Eşitlik 6'da yerine yazılarak her bir kriter için elde edilen farklılaşma dereceleri (D_j) Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. Enflasyon düzeltme öncesi farklılaşma dereceleri

	L1	L2	L3	F1	F2	F3	M1	M2	M3	K1	K2	K3	K4	K5
Dj	0,0136	0,0134	0,0129	0,0132	0,0138	0,0122	0,0163	0,0132	0,0133	0,0135	0,0161	0,0147	0,0246	0,0132

5. **Aşama:** Tablo 8'deki farklılaşma dereceleri (D_j), Eşitlik 7'de kullanılarak hesaplanan entropi kriter ağırlık değerleri (W_j) Tablo 9'da sunulmuştur.

Tablo 9. Enflasyon düzeltme öncesi entropi kriter ağırlık değerleri

	L1	L2	L3	F1	F2	F3	M1	M2	M3	K1	K2	K3	K4	K5
Wj	0,0667	0,0654	0,0630	0,0647	0,0678	0,0599	0,0799	0,0647	0,0652	0,0664	0,0789	0,0721	0,1204	0,0648

Tablo 9 incelendiğinde, K4 (Özkaynak Kârlılığı) kriteri, 0,1204 ile en yüksek ağırlık değerine sahip kriter olarak dikkat çekmektedir. Bu bulgu, söz konusu oranın firma performansının değerlendirilmesinde ayırt edici bir rol oynayabileceğine işaret etmektedir. Kârlılık oranları içerisinde öne çıkan bu bulgu, yatırımcılar ve yöneticiler açısından sermaye kârlılığının karar süreçlerinde önemli bir belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Diğer yandan, F3 (Özkaynak Devir Hızı) kriteri 0,0599 ile en düşük ağırlık değerine sahip olup, bu göstergenin analiz edilen dönemde firma performansını farklılaştırma etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Likidite (L1–L3), Faaliyet (F1–F3) ve Mali Yapı (M1–M3) oranlarına ait kriterlerin ağırlıklarının birbirine yakın değerlerde seyrettiği gözlemlenmektedir. Bu durum, bu gruplardaki oranların performans üzerinde benzer düzeyde etkili olduğunu gösterebilmektedir.

4.1.2. Enflasyon Düzeltmesi Sonrası Geliştirilmiş Entropi Değerleri

Geliştirilmiş Entropi analizinin, işletmelerin enflasyon düzeltmesi sonrası finansal verilerine uygulanmasında, analiz süreci düzeltme öncesiyle aynı yöntem adımlarını izlediğinden bu aşamalara yeniden değinilmemiştir. Ancak, düzeltme sonrası elde edilen entropi ağırlık değerleri Tablo 10'da sunulmuştur.

Tablo 10. Enflasyon düzeltme sonrası entropi kriter ağırlık değerleri

	L1	L2	L3	F1	F2	F3	M1	M2	M3	K1	K2	K3	K4	K5
Wj	0,0617	0,0605	0,0596	0,0618	0,0646	0,0647	0,0787	0,0593	0,0708	0,0721	0,1238	0,0743	0,0824	0,0657

Enflasyon düzeltmesi sonrası döneme ait Tablo 10 incelendiğinde, K2 (Faaliyet Kâr Marjı) kriterinin 0,1238 ağırlık değeri ile öne çıktığı görülmektedir. Bu sonuç, satış ve üretim süreçlerindeki etkinliğin performans ölçümünde daha belirgin bir rol kazanmış olabileceğine işaret etmektedir. Ardından gelen K4 (Özkaynak Kârlılığı) ve K3 (Aktif Kârlılığı) kriterleri de görece olarak yüksek ağırlıklarla kârlılık boyutunun güçlü temsilcileri olarak dikkat çekmektedir. Buna karşın, M2 (Finansman Oranı) ve L3 (Nakit Oranı) gibi oranların daha düşük ağırlıklara sahip olması, bu göstergelerin analiz edilen dönemde sınırlı ayırt edicilik taşıyabileceğini düşündürmektedir. Genel dağılım incelendiğinde, oranların ağırlıkları görece daha dengeli seyretilmekte; bu da enflasyon düzeltmesinin finansal oranlar üzerindeki etkisini sınırlı ama seçici biçimde yeniden yapılandığına işaret etmektedir.

4.2. Gri İlişkisel Analiz Sonuçları

4.2.1. Enflasyon Düzeltme Öncesi GİA Değerleri

Gri ilişkisel analizinin, ana metal sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin enflasyon düzeltmesi öncesi finansal verilerine uygulanmasına ilişkin aşamalar ve elde edilen bulgular, aşağıda sistematik biçimde sunulmuştur. Uygulama sürecinin ilk adımında, 17 ana metal işletmesine ait 14 finansal oranın oluşturduğu karar matrisi düzenlenmiş ve karşılaştırmaya esas veri yapısı aşağıdaki Tablo 11'de sunulmuştur.

Uygulama sürecinin ikinci adımında, karar matrisine referans serisi eklenmiş olup Tablo 12'de sunulmuştur. Referans serisi, Tablo 11'de verilen kriter yönleri esas alınarak M1(Finansal Kaldıraç Oranı) kriterin minimum, diğer kriterlerin ise maksimum değerleri alınarak oluşturulmuştur.

Uygulama sürecinin üçüncü adımında, Tablo 12'de verilen karar matrisinin normalizasyonu yapılır. Normalizasyon işlemi, maliyet (minimizasyon) yönlü kriter olan M1'e ait değerler Eşitlik 10, diğer 13 kriter için ise fayda (maksimizasyon) yönlü kriterlere ilişkin Eşitlik 9'dan faydalanılarak normalize edilmiş ve Tablo 13'te sunulmuştur (Ayçin, 2019b).

Tablo 11. Enflasyon düzeltme öncesi karar matrisinin oluşturulması

İşletme	L1	L2	L3	F1	F2	F3	M1	M2	M3	K1	K2	K3	K4	K5
AYES	1,181	0,871	0,479	36,401	29,507	14,094	0,680	0,471	0,478	0,041	0,053	0,187	0,583	3,870
BMSCH	1,631	1,375	0,696	47,686	4,227	3,050	0,347	1,884	0,721	0,062	0,065	0,124	0,190	1,748
BURCE	1,188	0,782	0,370	8,489	0,745	0,842	0,376	1,660	1,132	0,100	0,125	0,053	0,084	3,519
BURVA	1,136	0,563	0,059	4,322	2,849	2,971	0,737	0,357	1,043	0,037	0,103	0,029	0,109	0,215
CELHA	0,884	0,499	0,080	6,555	11,213	51,642	0,961	0,040	4,606	0,006	0,053	0,013	0,331	0,220
CEMAS	5,339	4,415	2,729	2,906	1,422	0,457	0,105	8,530	0,321	0,617	0,194	0,252	0,282	0,620
CEMTS	4,757	2,572	0,934	6,836	9,142	1,753	0,175	4,718	0,192	0,289	0,306	0,417	0,506	9,452
CUSAN	4,757	2,572	0,934	3,968	5,307	1,018	0,175	4,718	0,192	0,497	0,218	0,417	0,506	9,452
DMSAS	0,796	0,560	0,034	3,531	4,226	9,551	0,871	0,148	2,260	-0,076	-0,067	-0,093	-0,722	-1,065
DOKTA	0,850	0,408	0,058	8,786	1,477	2,748	0,673	0,485	1,860	0,016	0,048	0,015	0,045	0,645
ERBOS	2,379	1,469	0,696	6,278	13,260	2,477	0,382	1,620	0,187	0,149	0,219	0,228	0,369	18,285
IZMDC	0,825	0,365	0,209	26,311	6,251	9,665	0,780	0,283	1,546	0,046	0,132	0,099	0,448	0,762
KRDMD	1,300	0,671	0,150	6,536	2,741	2,390	0,570	0,755	0,872	0,079	0,104	0,082	0,190	1,907
PNLSN	1,710	1,347	0,648	3,895	4,620	1,894	0,486	1,057	0,410	0,148	0,121	0,144	0,281	2,325
SARKY	1,361	0,868	0,091	7,754	30,866	10,807	0,708	0,411	0,350	0,041	0,065	0,130	0,445	2,822
TUCLK	1,180	0,952	0,093	1,945	0,899	1,426	0,668	0,498	1,587	0,129	0,209	0,061	0,184	2,892
YKSLN	1,443	1,005	0,123	2,656	24,998	3,584	0,678	0,474	0,143	0,112	0,199	0,130	0,403	1,329
Kriter Yönleri	maks	maks	maks	maks	maks	maks	min	maks	maks	maks	maks	maks	maks	maks

Tablo 12. Enflasyon düzeltme öncesi referans serisinin eklendiği karar matrisi

	L1	L2	L3	F1	F2	F3	M1	M2	M3	K1	K2	K3	K4	K5
Ref. Ser.	5,339	4,415	2,729	47,686	30,866	51,642	0,105	8,530	4,606	0,617	0,306	0,417	0,583	18,285
AYES	1,181	0,871	0,479	36,401	29,507	14,094	0,680	0,471	0,478	0,041	0,053	0,187	0,583	3,870
BMSCH	1,631	1,375	0,696	47,686	4,227	3,050	0,347	1,884	0,721	0,062	0,065	0,124	0,190	1,748
BURCE	1,188	0,782	0,370	8,489	0,745	0,842	0,376	1,660	1,132	0,100	0,125	0,053	0,084	3,519
BURVA	1,136	0,563	0,059	4,322	2,849	2,971	0,737	0,357	1,043	0,037	0,103	0,029	0,109	0,215
CELHA	0,884	0,499	0,080	6,555	11,213	51,642	0,961	0,040	4,606	0,006	0,053	0,013	0,331	0,220
CEMAS	5,339	4,415	2,729	2,906	1,422	0,457	0,105	8,530	0,321	0,617	0,194	0,252	0,282	0,620
CEMTS	4,757	2,572	0,934	6,836	9,142	1,753	0,175	4,718	0,192	0,289	0,306	0,417	0,506	9,452
CUSAN	4,757	2,572	0,934	3,968	5,307	1,018	0,175	4,718	0,192	0,497	0,218	0,417	0,506	9,452
DMSAS	0,796	0,560	0,034	3,531	4,226	9,551	0,871	0,148	2,260	-0,076	-0,067	-0,093	-0,722	-1,065
DOKTA	0,850	0,408	0,058	8,786	1,477	2,748	0,673	0,485	1,860	0,016	0,048	0,015	0,045	0,645
ERBOS	2,379	1,469	0,696	6,278	13,260	2,477	0,382	1,620	0,187	0,149	0,219	0,228	0,369	18,285
IZMDC	0,825	0,365	0,209	26,311	6,251	9,665	0,780	0,283	1,546	0,046	0,132	0,099	0,448	0,762
KRDMD	1,300	0,671	0,150	6,536	2,741	2,390	0,570	0,755	0,872	0,079	0,104	0,082	0,190	1,907
PNLSN	1,710	1,347	0,648	3,895	4,620	1,894	0,486	1,057	0,410	0,148	0,121	0,144	0,281	2,325
SARKY	1,361	0,868	0,091	7,754	30,866	10,807	0,708	0,411	0,350	0,041	0,065	0,130	0,445	2,822
TUCLK	1,180	0,952	0,093	1,945	0,899	1,426	0,668	0,498	1,587	0,129	0,209	0,061	0,184	2,892
YKSLN	1,443	1,005	0,123	2,656	24,998	3,584	0,678	0,474	0,143	0,112	0,199	0,130	0,403	1,329

Tablo 13. Enflasyon düzeltme öncesi normalize karar matrisi

	L1	L2	L3	F1	F2	F3	M1	M2	M3	K1	K2	K3	K4	K5
Ref. Ser.	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
AYES	0,085	0,125	0,165	0,753	0,955	0,266	0,328	0,051	0,075	0,169	0,322	0,548	1,000	0,255
BMSCH	0,184	0,249	0,246	1,000	0,116	0,051	0,718	0,217	0,130	0,199	0,353	0,426	0,699	0,145
BURCE	0,086	0,103	0,125	0,143	0,000	0,008	0,683	0,191	0,221	0,254	0,514	0,286	0,618	0,237
BURVA	0,075	0,049	0,009	0,052	0,070	0,049	0,262	0,037	0,202	0,162	0,455	0,239	0,637	0,066
CELHA	0,019	0,033	0,017	0,101	0,348	1,000	0,000	0,000	1,000	0,118	0,321	0,208	0,807	0,066
CEMAS	1,000	1,000	1,000	0,021	0,023	0,000	1,000	1,000	0,040	1,000	0,700	0,677	0,770	0,087
CEMTS	0,872	0,545	0,334	0,107	0,279	0,025	0,918	0,551	0,011	0,526	1,000	1,000	0,941	0,544
CUSAN	0,872	0,545	0,334	0,044	0,151	0,011	0,918	0,551	0,011	0,827	0,765	1,000	0,941	0,544
DMSAS	0,000	0,048	0,000	0,035	0,116	0,178	0,105	0,013	0,474	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
DOKTA	0,012	0,011	0,009	0,150	0,024	0,045	0,336	0,052	0,385	0,133	0,308	0,211	0,588	0,088
ERBOS	0,348	0,272	0,246	0,095	0,415	0,039	0,677	0,186	0,010	0,324	0,767	0,629	0,836	1,000
IZMDC	0,006	0,000	0,065	0,533	0,183	0,180	0,212	0,029	0,314	0,176	0,533	0,376	0,897	0,094
KRDMD	0,111	0,075	0,043	0,100	0,066	0,038	0,457	0,084	0,163	0,224	0,459	0,342	0,699	0,154
PNLSN	0,201	0,242	0,228	0,043	0,129	0,028	0,555	0,120	0,060	0,323	0,504	0,465	0,769	0,175
SARKY	0,124	0,124	0,021	0,127	1,000	0,202	0,295	0,044	0,046	0,169	0,353	0,437	0,894	0,201
TUCLK	0,085	0,145	0,022	0,000	0,005	0,019	0,343	0,054	0,323	0,296	0,738	0,302	0,695	0,204
YKSLN	0,142	0,158	0,033	0,016	0,805	0,061	0,330	0,051	0,000	0,271	0,713	0,436	0,862	0,124

Uygulama sürecinin dördüncü adımında, Tablo 13'te normalize edilmiş referans serisinin değerleri ile karar matrisinin değerleri arasındaki mutlak farklar Eşitlik 14 yardımıyla hesaplanmış olup Tablo 14'te sunulmuştur (Ayçin, 2019b:142).

Tablo 14. Enflasyon düzeltme öncesi mutlak değer matrisi

İşletme	L1	L2	L3	F1	F2	F3	M1	M2	M3	K1	K2	K3	K4	K5
AYES	0,915	0,875	0,835	0,247	0,045	0,734	0,672	0,949	0,925	0,831	0,678	0,452	0,000	0,745
BMSCH	0,816	0,751	0,754	0,000	0,884	0,949	0,282	0,783	0,870	0,801	0,647	0,574	0,301	0,855
BURCE	0,914	0,897	0,875	0,857	1,000	0,992	0,317	0,809	0,779	0,746	0,486	0,714	0,382	0,763
BURVA	0,925	0,951	0,991	0,948	0,930	0,951	0,738	0,963	0,798	0,838	0,545	0,761	0,363	0,934
CELHA	0,981	0,967	0,983	0,899	0,652	0,000	1,000	1,000	0,000	0,882	0,679	0,792	0,193	0,934
CEMAS	0,000	0,000	0,000	0,979	0,977	1,000	0,000	0,000	0,960	0,000	0,300	0,323	0,230	0,913
CEMTS	0,128	0,455	0,666	0,893	0,721	0,975	0,082	0,449	0,989	0,474	0,000	0,000	0,059	0,456
CUSAN	0,128	0,455	0,666	0,956	0,849	0,989	0,082	0,449	0,989	0,173	0,235	0,000	0,059	0,456
DMSAS	1,000	0,952	1,000	0,965	0,884	0,822	0,895	0,987	0,526	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
DOKTA	0,988	0,989	0,991	0,850	0,976	0,955	0,664	0,948	0,615	0,867	0,692	0,789	0,412	0,912
ERBOS	0,652	0,728	0,754	0,905	0,585	0,961	0,323	0,814	0,990	0,676	0,233	0,371	0,164	0,000
IZMDC	0,994	1,000	0,935	0,467	0,817	0,820	0,788	0,971	0,686	0,824	0,467	0,624	0,103	0,906
KRDMD	0,889	0,925	0,957	0,900	0,934	0,962	0,543	0,916	0,837	0,776	0,541	0,658	0,301	0,846
PNLSN	0,799	0,758	0,772	0,957	0,871	0,972	0,445	0,880	0,940	0,677	0,496	0,535	0,231	0,825
SARKY	0,876	0,876	0,979	0,873	0,000	0,798	0,705	0,956	0,954	0,831	0,647	0,563	0,106	0,799
TUCLK	0,915	0,855	0,978	1,000	0,995	0,981	0,657	0,946	0,677	0,704	0,262	0,698	0,305	0,796
YKSLN	0,858	0,842	0,967	0,984	0,195	0,939	0,670	0,949	1,000	0,729	0,287	0,564	0,138	0,876

Uygulama sürecinin beşinci adımında, Tablo 14'teki veriler esas alınarak $\Delta_{\max}=1,000$ ve $\Delta_{\min}=0,000$ değerleri bulunduktan sonra Eşitlik (16) yardımıyla da gri ilişkisel katsayı matrisi oluşturulmuş olup Tablo 15'te sunulmuştur. Eşitlik (16)'taki ayırıcı katsayısı (ζ) literatürdeki çalışmalar baz alınarak $\zeta=0,5$ olarak alınmıştır (Ayçin, 2019b).

Tablo 15. Enflasyon düzeltme öncesi gri ilişkisel katsayı matrisi

İşletme	L1	L2	L3	F1	F2	F3	M1	M2	M3	K1	K2	K3	K4	K5
AYES	0,353	0,364	0,375	0,670	0,917	0,405	0,427	0,345	0,351	0,376	0,425	0,525	1,000	0,402
BMSCH	0,380	0,400	0,399	1,000	0,361	0,345	0,639	0,390	0,365	0,384	0,436	0,465	0,624	0,369
BURCE	0,354	0,358	0,364	0,369	0,333	0,335	0,612	0,382	0,391	0,401	0,507	0,412	0,567	0,396
BURVA	0,351	0,345	0,335	0,345	0,350	0,345	0,404	0,342	0,385	0,374	0,478	0,396	0,580	0,349
CELHA	0,338	0,341	0,337	0,357	0,434	1,000	0,333	0,333	1,000	0,362	0,424	0,387	0,722	0,349
CEMAS	1,000	1,000	1,000	0,338	0,338	0,333	1,000	1,000	0,342	1,000	0,625	0,607	0,685	0,354
CEMTS	0,796	0,524	0,429	0,359	0,409	0,339	0,860	0,527	0,336	0,513	1,000	1,000	0,895	0,523
CUSAN	0,796	0,524	0,429	0,344	0,371	0,336	0,860	0,527	0,336	0,743	0,680	1,000	0,895	0,523
DMSAS	0,333	0,344	0,333	0,341	0,361	0,378	0,359	0,336	0,488	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333
DOKTA	0,336	0,336	0,335	0,370	0,339	0,344	0,430	0,345	0,448	0,366	0,420	0,388	0,548	0,354
ERBOS	0,434	0,407	0,399	0,356	0,461	0,342	0,607	0,381	0,336	0,425	0,683	0,574	0,753	1,000
IZMDC	0,335	0,333	0,348	0,517	0,380	0,379	0,388	0,340	0,422	0,378	0,517	0,445	0,829	0,356
KRDMD	0,360	0,351	0,343	0,357	0,349	0,342	0,479	0,353	0,374	0,392	0,480	0,432	0,624	0,371
PNLSN	0,385	0,398	0,393	0,343	0,365	0,340	0,529	0,362	0,347	0,425	0,502	0,483	0,684	0,377
SARKY	0,363	0,363	0,338	0,364	1,000	0,385	0,415	0,343	0,344	0,376	0,436	0,470	0,826	0,385
TUCLK	0,353	0,369	0,338	0,333	0,335	0,338	0,432	0,346	0,425	0,415	0,656	0,418	0,621	0,386
YKSLN	0,368	0,373	0,341	0,337	0,720	0,348	0,428	0,345	0,333	0,407	0,636	0,470	0,784	0,363

Uygulama sürecinin son adımında ise, geliştirilmiş entropi yöntemiyle elde edilen Tablo 9'daki kriter ağırlık değerleri kullanılarak Eşitlik (17) yardımıyla GİA değerleri hesaplanmış ve ilgili sonuçlar Tablo 16'da sunulmuştur.

Tablo 16 incelendiğinde, enflasyon düzeltmesi öncesi GİA değerlerine göre CEMAS, CEMTS ve CUSAN işletmeleri ilk üç sırada yer almakta olup, bu firmalar finansal oranlar bakımından görece olarak en yüksek performansa sahip şirketler olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 16. Enflasyon düzeltme öncesi gri ilişkisel katsayı matrisi ile derecelerin belirlenmesi

İşletme	L1	L2	L3	F1	F2	F3	M1	M2	M3	K1	K2	K3	K4	K5	GİA Değeri	Sıra
AYES	0,353	0,364	0,375	0,670	0,917	0,405	0,427	0,345	0,351	0,376	0,425	0,525	1,000	0,402	0,523	5
BMSCH	0,380	0,400	0,399	1,000	0,361	0,345	0,639	0,390	0,365	0,384	0,436	0,465	0,624	0,369	0,479	8
BURCE	0,354	0,358	0,364	0,369	0,333	0,335	0,612	0,382	0,391	0,401	0,507	0,412	0,567	0,396	0,426	13
BURVA	0,351	0,345	0,335	0,345	0,350	0,345	0,404	0,342	0,385	0,374	0,478	0,396	0,580	0,349	0,397	15
CELHA	0,338	0,341	0,337	0,357	0,434	1,000	0,333	0,333	1,000	0,362	0,424	0,387	0,722	0,349	0,487	6
CEMAS	1,000	1,000	1,000	0,338	0,338	0,333	1,000	1,000	0,342	1,000	0,625	0,607	0,685	0,354	0,692	1
CEMTS	0,796	0,524	0,429	0,359	0,409	0,339	0,860	0,527	0,336	0,513	1,000	1,000	0,895	0,523	0,637	2
CUSAN	0,796	0,524	0,429	0,344	0,371	0,336	0,860	0,527	0,336	0,743	0,680	1,000	0,895	0,523	0,623	3
DMSAS	0,333	0,344	0,333	0,341	0,361	0,378	0,359	0,336	0,488	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,351	17
DOKTA	0,336	0,336	0,335	0,370	0,339	0,344	0,430	0,345	0,448	0,366	0,420	0,388	0,548	0,354	0,393	16
ERBOS	0,434	0,407	0,399	0,356	0,461	0,342	0,607	0,381	0,336	0,425	0,683	0,574	0,753	1,000	0,530	4
IZMDC	0,335	0,333	0,348	0,517	0,380	0,379	0,388	0,340	0,422	0,378	0,517	0,445	0,829	0,356	0,449	10
KRDMD	0,360	0,351	0,343	0,357	0,349	0,342	0,479	0,353	0,374	0,392	0,480	0,432	0,624	0,371	0,416	14
PNLSN	0,385	0,398	0,393	0,343	0,365	0,340	0,529	0,362	0,347	0,425	0,502	0,483	0,684	0,377	0,442	11
SARKY	0,363	0,363	0,338	0,364	1,000	0,385	0,415	0,343	0,344	0,376	0,436	0,470	0,826	0,385	0,479	7
TUCLK	0,353	0,369	0,338	0,333	0,335	0,338	0,432	0,346	0,425	0,415	0,656	0,418	0,621	0,386	0,427	12
YKSLN	0,368	0,373	0,341	0,337	0,720	0,348	0,428	0,345	0,333	0,407	0,636	0,470	0,784	0,363	0,469	9

4.2.2. Enflasyon Düzeltme Sonrası GİA Değerleri

GİA yönteminin enflasyon düzeltmesi sonrası finansal veriler üzerinde uygulanmasında, analiz süreci düzeltme öncesiyle aynı yöntemsel adımları izlediğinden ilgili aşamalar bu bölümde tekrar edilmemiştir. Ancak, enflasyon düzeltmesi sonrası döneme ait GİA değerleri aşağıdaki Tablo 17’de sunulmaktadır.

Tablo 17. Enflasyon düzeltme sonrası gri ilişkisel katsayı matrisi ile değerlerin belirlenmesi

İşletme	L1	L2	L3	F1	F2	F3	M1	M2	M3	K1	K2	K3	K4	K5	GİA Değeri	Sıra
AYES	0,353	0,363	0,374	0,672	0,954	1,000	0,400	0,342	0,411	0,468	0,673	0,585	0,642	0,440	0,557	5
BMSCH	0,380	0,399	0,398	1,000	0,387	0,399	0,575	0,375	0,603	0,426	0,646	0,406	0,475	0,360	0,498	10
BURCE	0,363	0,357	0,363	0,368	0,335	0,339	0,564	0,373	1,000	1,000	0,753	0,662	0,614	1,000	0,600	2
BURVA	0,373	0,344	0,335	0,346	0,363	0,360	0,399	0,342	0,406	0,746	0,780	0,640	0,699	0,408	0,495	11
CELHA	0,338	0,341	0,337	0,358	0,395	0,651	0,333	0,333	0,486	0,422	0,669	0,407	0,422	0,353	0,433	16
CEMAS	1,000	1,000	1,000	0,341	0,341	0,333	1,000	1,000	0,500	0,333	0,781	0,382	0,471	0,372	0,632	1
CEMTS	0,806	0,519	0,427	0,360	0,395	0,357	0,841	0,516	0,434	0,593	0,860	0,719	0,599	0,516	0,591	3
CUSAN	0,363	0,359	0,338	0,347	0,435	0,391	0,398	0,342	0,371	0,438	0,894	0,441	0,493	0,370	0,457	14
DMSAS	0,333	0,344	0,333	0,342	0,365	0,447	0,348	0,335	0,512	0,350	0,333	0,333	0,333	0,333	0,359	17
DOKTA	0,336	0,337	0,335	0,357	0,343	0,383	0,370	0,338	0,779	0,470	0,662	0,473	0,532	0,389	0,455	15
ERBOS	0,454	0,409	0,404	0,357	0,430	0,371	0,587	0,379	0,397	0,485	0,829	0,518	0,542	0,557	0,505	9
IZMDC	0,336	0,333	0,348	0,518	0,371	0,437	0,407	0,343	0,655	0,623	0,680	1,000	1,000	0,444	0,560	4
KRDMD	0,364	0,348	0,342	0,359	0,343	0,351	0,503	0,359	0,677	0,476	0,658	0,476	0,522	0,396	0,460	13
PNLSN	0,384	0,396	0,407	0,343	0,396	0,364	0,471	0,353	0,389	0,501	0,717	0,513	0,550	0,399	0,462	12
SARKY	0,363	0,363	0,338	0,365	1,000	0,695	0,384	0,340	0,374	0,471	0,647	0,551	0,621	0,427	0,508	8
TUCLK	0,353	0,369	0,338	0,333	0,333	0,343	0,422	0,345	0,862	0,867	0,804	0,583	0,623	0,579	0,538	6
YKSLN	0,369	0,372	0,341	0,337	0,887	0,397	0,396	0,341	0,333	0,472	1,000	0,486	0,542	0,385	0,508	7

Tablo 17 incelendiğinde, enflasyon düzeltmesi sonrası GİA değerlerine göre CEMAS, CEMTS ve BURCE işletmeleri ilk üç sırada yer alarak finansal oranlar açısından en yüksek göreceli performansı sergileyen işletmeler olarak öne çıkmaktadır.

Enflasyon düzeltmesi öncesi ve sonrası GİA bulguları birlikte değerlendirildiğinde, CEMAS ve CEMTS her iki dönemde de üst sıralarda yer alarak finansal performans açısından istikrarlı bir görünüm sergilemiştir.

4.3. GİA Değerleri ile Hisse Senedi Getirileri Arasındaki İlişki

Çalışmada, GİA ile ölçülen finansal performans düzeylerinin geçerliliğini değerlendirebilmek amacıyla, işletmelerin hisse senedi getirileri ile karşılaştırma yapılmıştır. Hisse senedi getirileri, “objektif” bir kıyaslama ölçütü olarak ele alınmış ve GİA skorlarıyla ilişkisi analiz edilmiştir. Böylece hem elde edilen bulguların güvenilirliği artırılmış hem de finansal performans göstergeleri ile sermaye piyasasının tepkisi arasındaki ilişkiye ışık tutulmuştur. Hiss senedi Getiri hesaplamalarında, literatürde sıkça kullanılan ve Eşitlik 18 ile hesaplama yöntemi açıklanan *Satın Al ve Elde Tut (Buy and Hold)* yöntemi tercih edilmiştir. Bu kapsamda, her bir işletmenin hisse fiyatı olarak ertesi yılın (2023) mart ayı sonundaki kapanış değeri esas alınmıştır. Bu tarihin seçilme nedeni, Borsa İstanbul’da faaliyet gösteren şirketlerin finansal tablolarını genellikle bu

dönem itibarıyla kamuya açıklamalarıdır. Böylece, finansal bilgi açıklamalarının ardından hisse fiyatlarında oluşan piyasa tepkisi daha sağlıklı biçimde yakalanmıştır (Güleç ve Özkan, 2018).

$$(T \text{ yılı 3.ayın sonu hisse senedi değeri}) - (T_{-1} \text{ yılı 3.ayın sonu hisse senedi değeri})$$

$$(T_{-1} \text{ yılı 3.ayın sonu hisse senedi değeri})$$

(18)

Enflasyon düzeltmesi uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra elde edilen GİA skorları ile hisse senedi getirilerinin birlikte değerlendirildiği bulgular Tablo 18'de sunulmuştur. Bu karşılaştırma, finansal performans göstergeleri ile piyasa getirileri arasındaki ilişkinin daha kapsamlı biçimde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.

Tablo 18. İşletmelerin GİA değerleri ve hisse getirilerine göre performans karşılaştırması

İşletme	Hisse Getiri Oranı ve İşletme Sıralaması		Enflasyon Düzeltme Öncesi GİA Değeri ve İşletme Sıralaması		Enflasyon Düzeltme Sonrası GİA Değeri ve İşletme Sıralaması	
	Hisse Senedi Getirisi	Sıralama	Enflasyon Öncesi GİA Değeri	Sıralama	Enflasyon Sonrası GİA Değeri	Sıralama
AYES	1,0975	8	0,5228	5	0,5569	5
BMSCH	1,0398	10	0,4791	8	0,4976	10
BURCE	0,5565	12	0,4258	13	0,6000	2
BURVA	0,2968	16	0,3968	15	0,4945	11
CELHA	2,7373	1	0,4869	6	0,4332	16
CEMAS	0,4957	13	0,6917	1	0,6323	1
CEMTS	1,0964	9	0,6370	2	0,5908	3
CUSAN	1,5593	4	0,6232	3	0,4568	14
DMSAS	1,0993	7	0,3514	17	0,3590	17
DOKTA	0,9044	11	0,3932	16	0,4547	15
ERBOS	0,1025	17	0,5295	4	0,5047	9
IZMDC	1,6296	3	0,4493	10	0,5596	4
KRDMD	0,2986	15	0,4156	14	0,4599	13
PNLSN	2,6517	2	0,4415	11	0,4624	12
SARKY	1,1295	6	0,4792	7	0,5076	8
TUCLK	1,3594	5	0,4273	12	0,5379	6
YKSLN	0,3096	14	0,4690	9	0,5082	7

Tablo 18 incelendiğinde, enflasyon düzeltmesi öncesi ve sonrası GİA performans sıralamalarında bazı şirketlerde dikkat çekici değişimler olduğu görülmektedir. CEMAS, her iki dönemde de 1. sıradaki yerini koruyarak performans istikrarını sürdürmüştür. CEMTS, 2. sıradan 3. sıraya gerileyerek küçük bir değişim göstermiştir. CUSAN, enflasyon öncesi 3. sıradayken enflasyon sonrası 14. sıraya düşerek önemli bir performans kaybı yaşamıştır. ERBOS, 4. sıradan 9. sıraya gerilemiştir. AYES 5. sıradaki yerini korurken, CELHA 6. sıradan 16. sıraya düşerek en yüksek negatif değişimi göstermiştir. SARKY, 7. sıradan 8. sıraya düşerken, BMSCH 8. sıradaki konumunu 10. sıraya çekmiştir. YKSLN 9. sıradan 7. sıraya yükselmiş; IZMDC 10. sıradan 4. sıraya çıkarak kayda değer bir performans artışı sergilemiştir. PNL SN 11. sıradayken 12. sıraya, TUCLK 12. sıradayken 6. sıraya yükselmiştir. BURCE 13. sıradan 2. sıraya çıkarak ciddi bir performans artışı göstermiştir. KRDMA, KRDMB, KRDMD şirketleri 14. sıradan 13. sıraya yükselirken, BURVA 15. sıradaki yerini 11. sıraya taşımıştır. DOKTA 16. sıradayken 15. sıraya çıkmış; DMSAS ise hem enflasyon öncesi hem sonrası 17. sırada kalmıştır. Bu bulgular, enflasyon düzeltmesinin şirketlerin göreceli performans konumlarını önemli ölçüde etkileyebildiğini ortaya koymaktadır.

Hisse senedi getirileri ile enflasyon düzeltmesi öncesi GİA sıralamaları karşılaştırıldığında, sıralamalar arasında genel olarak zayıf bir uyum olduğu gözlenmektedir. Hisse getirisi en yüksek olan CELHA, GİA sıralamasında 6. sıradadır. Onu takip eden PNLSN, GİA sıralamasında 11. sırada yer almaktadır. 3. sıradaki IZMDC, GİA'da 10. sırada; 4. sıradaki CUSAN, GİA'da 3. sıradadır. 5. sıradaki TUCLK, GİA'da 12.; 6. sıradaki SARKY ise GİA'da 7. sıradadır. 7. sıradaki DMSAS, GİA sıralamasında son sırada yer almakta; 8. sıradaki AYES ise GİA'da 5. sıradadır. Diğer yandan, en düşük hisse getirisine sahip ERBOS, GİA'da 4. sıradadır. Bu sonuç, hisse senedi getirilerinin, şirketlerin enflasyon düzeltme öncesi finansal oranlara dayalı performans düzeylerini doğrudan yansıtmakta yetersiz kaldığını ve sermaye piyasası getirileri ile finansal analiz temelli performans ölçümleri arasında mutlak bir paralellik bulunmadığını ortaya koymaktadır.

Hisse senedi getirileri ile enflasyon düzeltmesi sonrası GİA sıralamaları karşılaştırıldığında da benzer bir tablo ortaya çıkmaktadır. Hisse getirisi en yüksek olan CELHA, enflasyon sonrası GİA sıralamasında 16. sıraya gerilemiştir. 2. sıradaki PNL SN, GİA'da 12.; 3. sıradaki IZMDC ise GİA'da 4. sırada yer almaktadır. 4. sıradaki CUSAN, GİA sıralamasında 14. sıraya düşmüştür. 5. sıradaki TUCLK, 6. sıraya yükselmiş ve görece uyum göstermiştir. 6. sıradaki SARKY, GİA'da 8.; 7. sıradaki DMSAS ise yine son sırada kalmıştır.

AYES 8. sırada yer alırken, GİA'da 5. sıradaki konumunu korumuştur. Diğer yandan, hisse getirisi en düşük olan ERBOS, GİA sıralamasında 9. sıradadır. Bu sonuç, hisse senedi getirilerinin, şirketlerin enflasyon düzeltme sonrası finansal oranlara dayalı performans düzeylerini doğrudan yansıtmakta yetersiz kaldığını ve sermaye piyasası getirileri ile finansal analiz temelli performans ölçümleri arasında mutlak bir paralellik bulunmadığını ortaya koymaktadır.

Bu bulgular genel olarak değerlendirildiğinde, enflasyon düzeltmesi finansal oranlara dayalı performans sıralamalarında anlamlı değişikliklere neden olmuş; bazı şirketlerin konumu önemli ölçüde değişmiştir. Ancak hem enflasyon düzeltmesi öncesi hem de sonrası dönemlerde hisse senedi getirileri ile GİA skorları arasında bir uyum gözlemlenmemiştir. Bu durum, piyasa getirilerinin yalnızca finansal oranlarla açıklanamayacağını ve yatırımcıların karar süreçlerinde farklı değişkenleri dikkate aldığını göstermektedir. Aynı zamanda, enflasyon muhasebesinin finansal analiz sonuçlarını etkilediği ve performans değerlendirmelerinde dikkate alınması gereken önemli bir unsur olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada korelasyon analizi, firmaların içsel finansal performans göstergeleri ile dışsal piyasa performansı göstergeleri arasındaki tutarlılığın sınanabilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, enflasyon düzeltmesi öncesi ve sonrası dönemlerde elde edilen GİA performans sıralamaları ile hisse senedi getirileri arasındaki ilişkinin yönü ve gücü Spearman korelasyonu ile Tablo 19'da incelenmiştir. Bunun yanında, hisse senedi getirileri ile GİA performans değerleri arasındaki ilişkiler ise Pearson korelasyonu ile Tablo 20'de değerlendirilmiştir. Böylece, piyasa tepkilerinin işletmelerin enflasyon düzeltmesi öncesi ve sonrası finansal performans ölçütleriyle ne ölçüde örtüştüğü ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Tablo 19. Hisse senedi getirisi ile işletme performans sıralamaları arasındaki ilişki

		Hisse Senedi Getiri Sıralaması (HSGS)	Enflasyon Öncesi Getiri Sıralaması (EÖGS)	Enflasyon Sonrası Getiri Sıralaması (ESGS)
HSGS	Korelasyon Katsayısı	1,000	0,100	-0,199
	Anlamlılık (çift yönlü)		0,701	0,445
	N	17	17	17
EÖGS	Korelasyon Katsayısı	0,100	1,000	0,426
	Anlamlılık (çift yönlü)	0,701		0,088
	N	17	17	17
ESGS	Korelasyon Katsayısı	-0,199	0,426	1,000
	Anlamlılık (çift yönlü)	0,445	0,088	
	N	17	17	17

Tablo 19 incelendiğinde hisse senedi getirisi sıralamaları ile GİA skorlarına dayalı işletme performans sıralamaları arasında anlamlı bir ilişki olmadığı görülmektedir. Hisse getirisi ile enflasyon düzeltmesi öncesi performans sıralaması arasındaki korelasyon katsayısı² $r = 0,100$ olup, istatistiksel olarak anlamsızdır ($p = 0,701$). Bu durum, piyasa getirilerinin enflasyon öncesi teknik performans ölçütlerini yansıtmadığını göstermektedir. Benzer şekilde, hisse getirisi ile enflasyon sonrası performans sıralaması arasındaki korelasyon da negatif yönlü ve zayıftır ($r = -0,199$; $p = 0,445$). Bu bulgu, piyasanın enflasyon düzeltme sonrası performans sıralamalarını da dikkate almadığını göstermektedir. Öte yandan, enflasyon öncesi ve sonrası performans sıralamaları arasında $r = 0,426$ düzeyinde orta kuvvette ve pozitif bir ilişki tespit edilmiştir ($p = 0,088$). Bu sonuç, düzeltme öncesi ve sonrası performans değerlendirmeleri arasında kısmi bir tutarlılık olduğunu, ancak bu ilişkinin istatistiksel olarak anlamlı düzeye ulaşmadığını göstermektedir.

Tablo 20. Hisse senedi getirisi ile işletme performans değerleri arasındaki ilişki

		Hisse Senedi Getiri Değeri (HSGD)	Enflasyon Öncesi Getiri Değeri (EÖGD)	Enflasyon Sonrası Getiri Değeri (ESGD)
HSGD	Korelasyon Katsayısı	1	-,014	-,294
	Anlamlılık (çift yönlü)		,958	,253
	N	17	17	17
EÖGD	Korelasyon Katsayısı	-,014	1	,544*
	Anlamlılık (çift yönlü)	,958		,024
	N	17	17	17
ESGD	Korelasyon Katsayısı	-,294	,544*	1
	Anlamlılık (çift yönlü)	,253	,024	
	N	17	17	17

Not: * Korelasyon, 0.05 anlamlılık düzeyinde (çift yönlü) istatistiksel olarak anlamlıdır.

² Korelasyon katsayısı, bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin yönü ve büyüklüğünü belirten katsayıdır. Bu katsayı, (-1) ile (+1) arasında bir değer alır. Pozitif değerler direkt yönlü doğrusal ilişkiyi; negatif değerler ise ters yönlü bir doğrusal ilişkiyi belirtmektedir.

Tablo 20 incelendiğinde, hisse senedi getirileri ile GİA performans değerleri arasındaki ilişkilerin sınırlı ve istatistiksel olarak anlamlı olmadığı görülmektedir. Hisse senedi getirisi ile enflasyon düzeltmesi öncesi performans değeri arasında çok zayıf ve anlamsız bir ilişki bulunmaktadır ($r = -0,014$; $p = ,958$). Enflasyon düzeltmesi sonrası GİA performans değeriyle olan ilişki de negatif yönlü olup istatistiksel olarak anlamlı değildir ($r = -0,294$; $p = ,253$). Buna karşılık, enflasyon düzeltmesi öncesi ve sonrası performans değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı ve orta düzeyde pozitif bir ilişki bulunmaktadır ($r = 0,544$; $p = ,024$). Bu bulgu, enflasyon düzeltmesi öncesi ve sonrası performans ölçümleri arasında yapısal bir tutarlılık olduğunu ancak bu performans değişimlerinin hisse senedi getirileriyle istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki sergilemediğini göstermektedir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Günümüzde işletmelerin performanslarını değerlendirmek ve elde edilen bu sonuçlara göre karar vermek isteyen finansal bilgi kullanıcıları yalnızca temel finansal oranlarla üretilen bilgilerle yetinmeyip piyasa tepkileriyle birlikte çok boyutlu ve nesnel analizler yapıp bu sonuçlarla karşılaştırılan detaylı analiz sonuçları ile karar vermektedirler. Bu çerçevede, finansal bilgi kullanıcılarının bu beklentileri çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımları, belirsizlik ve karmaşık karar ortamlarında önemli bir rol oynamaktadır. Gri İlişkisel Analiz (GİA), karar birimlerinin referans değerlerle olan benzerliğini ölçerek sıralama yapan etkili bir çözüm aracı olarak öne çıkarken; Entropi ve Geliştirilmiş Entropi yöntemleri ise öznellikten uzak, veriye dayalı kriter ağırlıklarını belirlemeye olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada kullanılan Geliştirilmiş Entropi yöntemi, klasik Entropi'nin zayıf olduğu negatif veya sıfır değer sorunlarını ortadan kaldırarak daha sağlıklı bir ağırlıklandırma yapısı sunmuştur.

Bu çalışmanın temel amacı, ülkemizde en son 2004 yılında uygulanan ve 2021 yılında gerekli ekonomik koşulların oluşmasına rağmen ancak 2023 yılı itibarıyla yeniden yürürlüğe giren enflasyon muhasebesi uygulamasının Borsa İstanbul ana metal sanayi sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin finansal performansları üzerindeki etkisini nesnel ve karşılaştırmalı bir analizle ortaya koymaktır. Bu kapsamda, çalışma 17 şirkete ait enflasyon düzeltmesi yapılmış ve yapılmamış finansal tablolar üzerinden hesaplanan 14 finansal oran üzerinden yürütülmüştür. Enflasyon düzeltmesi yapılmış ve yapılmamış finansal verilerden oluşan iki ayrı veri seti üzerinden yürütülen çalışmada, kriter ağırlıkları Geliştirilmiş Entropi Yöntemi (GEY) ile belirlenmiş; bu ağırlıklar doğrultusunda, Gri İlişkisel Analiz (GİA) yöntemi kullanılarak işletmelerin finansal performans düzeyleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen GİA skorları, enflasyon muhasebesi uygulaması öncesi ve sonrası dönemlere ait performans düzeylerinin farklılaşma yönünü ve büyüklüğünü ortaya koymuş; böylece, söz konusu uygulamanın firmaların finansal etkinliğine olan etkisi nesnel verilerle değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, GİA yöntemiyle elde edilen performans sıralamalarının geçerliliğini sınamak ve sermaye piyasalarının bu performans düzeylerine verdiği tepkileri ölçmek amacıyla, şirketlerin yıllık hisse senedi getirileri hesaplanmış ve analiz kapsamına alınmıştır. Bu kapsamda hisse senedi getirileri, piyasa temelli ve dışsal bir karşılaştırma ölçütü olarak kullanılmış; böylece analiz daha kapsamlı ve bütüncül bir yapıya kavuşturulmuştur.

Elde edilen sonuçlar, enflasyon düzeltmesinin şirketlerin finansal performans sıralamaları üzerinde önemli değişimlere yol açtığını göstermektedir. Bazı firmalar enflasyon öncesine göre sıralamada ciddi yükseliş veya düşüş yaşarken, birkaç firma konumunu istikrarlı bir şekilde korumuştur. Bu durum, enflasyon muhasebesinin işletmeler arası göreceli performansının daha sağlıklı biçimde ortaya konmasına katkı sunduğunu göstermektedir. Öte yandan, hisse senedi getirileri ile GİA sıralamaları karşılaştırıldığında her iki dönemde de istatistiksel olarak anlamlı ve güçlü bir ilişki saptanamamıştır. Bu bulgu, yatırımcıların kararlarında yalnızca teknik oranlara değil; sektörel beklentiler, piyasa duyarlılığı ve makroekonomik koşullar gibi farklı faktörlere de önem verdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, enflasyon düzeltmesi öncesi ve sonrası GİA skorları arasında anlamlı ve pozitif yönlü bir ilişki saptanmış olup bu bulgu performans ölçümlerinde yapısal bir tutarlılık olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, enflasyon muhasebesinin yalnızca finansal raporların güncelliği açısından değil aynı zamanda karar destek süreçlerinde kullanılacak analizlerin güvenilirliği açısından da dikkate alınması gereken önemli bir unsur olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma, çok kriterli karar verme tekniklerinin birlikte kullanımının ve enflasyon muhasebesine dayalı finansal verilerin analizdeki etkisinin değerlendirilmesine yönelik bir uygulama sunmuştur. Hisse senedi getirilerinin performans sıralamalarıyla birlikte incelenmesi, çalışmanın dikkate değer bir yönü olup, finansal performans değerlendirmelerinde piyasa tepkilerinin sınırlı yansımalarını ortaya koymuştur. Enflasyon düzeltmesinin firma sıralamaları üzerinde dikkat çekici değişimlere yol açtığı görülmüş; bu durum, finansal tabloların yeniden düzenlenmesinin karar süreçlerine sağlayabileceği katkıya işaret etmektedir. Bununla birlikte, piyasa getirileriyle analiz sonuçları arasında tutarlı bir ilişki kurulamamış olması, yatırımcı davranışlarının daha geniş kapsamlı etkenlerle şekillendiğini düşündürmektedir. Gelecek araştırmalarda, farklı sektörler, alternatif karar verme yöntemleri ya da daha uzun dönemli veri setleriyle yapılacak karşılaştırmalı analizlerin literatüre katkı sunması beklenmektedir.

Çatışma Beyanı / Conflict of Interest

Yazar tarafından herhangi bir potansiyel çıkar çatışması beyan edilmemiştir.
No potential conflict of interest was declared by the author.

Fon Desteği / Funding

Bu çalışmada herhangi bir resmi, ticari ya da kâr amacı gütmeyen organizasyondan fon desteği alınmamıştır.

Any specific grant has not been received from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Etik Standartlara Uygunluk / Compliance with Ethical Standards

Yazar tarafından, çalışmada kullanılan araç ve yöntemlerin Etik Kurul izni gerektirmediği beyan edilmiştir.
It was declared by the author that the tools and methods used in the study do not require the permission of the Ethics Committee.

Etik Beyanı / Ethical Statement

Yazar tarafından bu çalışmada bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan edilmiştir.

It was declared by the author that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.



Yazarlar, Verimlilik Dergisi'nde yayımlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptirler ve çalışmaları CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayımlanmaktadır.

The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.

KAYNAKÇA

- Akdoğan, N. ve Tenker, N. (2001). "Finansal Tablolar ve Analizi", Gazi Kitabevi, Ankara.
- Akgüç, Ö. (2011). "Finansal Yönetim", Avcıol Basım Yayın, İstanbul.
- Akyüz, K.C. (2021). "Orman Ürünleri Sanayi Sektöründe Gri İlişkisel Analiz Yöntemiyle Performans Değerlendirme", *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 22(2), 300-305. <https://doi.org/10.17474/artvinofd.992174>
- Akyüz, K.C., Akyüz, İ., Yıldırım, İ. ve Ersen, N. (2019). "Borsa İstanbul'da Basım-Yayın Sanayi Grubunda Yer Alan Şirketlerin Performanslarının Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi", *Türkiye Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 23(1), 141-152.
- Alataş, A. (2025). "Enflasyon Muhasebesinin Firma Etkinliği Üzerine Etkisi: BİST 100 İmalat Sektörü Üzerine Bir Uygulama", *Verimlilik Dergisi*, 59(2), 397-416. <https://doi.org/10.51551/verimlilik.1608736>
- Altan, M. ve Candoğan, M.A. (2014). "Bankalarının Finansal Performanslarının Değerlendirilmesinde Geleneksel ve Gri İlişki Analizi: Katılım Bankalarında Karşılaştırmalı Bir Uygulama", *Sosyoekonomik Araştırmalar Dergisi*, 14(27), 47-64.
- Arslan, E. (2022). "BİST Kayseri Endeksinde (XSKAY) Yer Alan İşletmelerin Finansal Performanslarının Entropi ve Gri İlişki Analizi (GİA) Yöntemleriyle Değerlendirilmesi", *Turizm Ekonomi ve İşletme Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 117-132.
- Ayçin, E. (2019a). "BİST Menkul Kıymet Yatırım Ortaklıkları Endeksinde (XYORT) Yer Alan İşletmelerin Finansal Performanslarının Entropi ve Gri İlişkisel Analiz Bütünleşik Yaklaşımı ile Değerlendirilmesi", *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 33(2), 595-622. <https://doi.org/10.24988/deuiibf.2018332799>
- Ayçin, E. (2019b). "Çok Kriterli Karar Verme: Bilgisayar Uygulamalı Çözümler", Nobel Yayıncılık, Ankara.
- Ayçin, E. ve Güçlü, P. (2020). "BİST Ticaret Endeksinde Yer Alan İşletmelerin Finansal Performanslarının Entropi ve MAIRCA Yöntemleri ile Değerlendirilmesi", *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, 85, 287-312. <https://doi.org/10.25095/mufad.673739>
- Ayırçay, Y., Özçalıcı, M. ve Bolat, İ. (2017). "Katılım Bankalarının Performanslarının AHP ve GİA Tekniklerinden Oluşan Bütünleşik Bir Sistem ile Değerlendirilmesi: Türkiye Örneği", *Pamukkale Journal of Eurasian Socioeconomic Studies (PJESS)*, 4(2), 54-69. <https://doi.org/10.5505/pjess.2017.29290>
- Başdeğirmen, A. ve Işıldak, B. (2018). "Ulaştırma Sektöründe Faaliyet Gösteren İşletmelerin Performanslarının Gri İlişkisel Analiz ile Değerlendirilmesi", *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 23(2), 563-577.
- Başdeğirmen, A. ve Tunca, M.Z. (2017). "Lojistik Sektöründe Faaliyet Gösteren İşletmelerin Finansal Performanslarının Gri İlişkisel Analiz ile Değerlendirilmesi", *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 22(2), 327-340.
- Blessing, H. ve Sakougovui, G. (2023). "Impact of Liquidity and Solvency Ratios on Financial Performance: A Comprehensive Analysis", *Indonesia Auditing Research Journal*, 12(3), 102-115. <https://journals.iarn.or.id/index.php/ARJ/index>
- Candan, G. (2019). "Lojistik Performans Değerlendirmesi için Bulanık AHP ve Gri İlişkisel Analiz Yöntemleri ile Bütünleşik Bir Yaklaşım", *Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(5), 277-286. <https://doi.org/10.18506/anemon.481113>
- Chen, C.H. (2020). "A Novel Multi-Criteria Decision-Making Model for Building Material Supplier Selection Based on Entropy-AHP Weighted TOPSIS", *Entropy*, 22(2), 233. <https://doi.org/10.3390/e22020233>
- Çatı, K., Eş, A. ve Özevin, O. (2017). "Futbol Takımlarının Finansal ve Sportif Etkinliklerinin Entropi ve TOPSIS Yöntemiyle Analiz Edilmesi: Avrupa'nın 5 Büyük Ligi ve Süper Lig Üzerine Bir Uygulama", *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 13(1), 199-222.
- Doğan, M. (2013). "Measuring Bank Performance with Gray Relational Analysis: The Case of Turkey", *Ege Akademik Bakış*, 13(2), 215-225.
- Ecemiş, O., Akçan, F. ve Abakay, U. (2021). "Analysis of the Performance of Football Teams via the Entropy-Gray Relational Analysis Method: Turkish Super League Model", *SPORMETRE Beden Eğitimi ve Spor Bilimleri Dergisi*, 19(3), 51-59. <https://doi.org/10.33689/spormetre.854446>
- Ecer, F. ve Boyukaslan, A. (2014). "Measuring Performances of Football Clubs Using Financial Ratios: The Gray Relational Analysis Approach", *American Journal of Economics*, 4(1), 62-71. <https://doi.org/10.5923/j.economics.20140401.06>
- Ecer, F. ve Günay, F. (2014). "Borsa İstanbul'da İşlem Gören Turizm Şirketlerinin Finansal Performanslarının Gri İlişkisel Analiz Yöntemiyle Ölçülmesi", *Anatolia: Turizm Araştırmaları Dergisi*, 25(1), 35-48. <https://doi.org/10.17123/atad.25iss195016>

- Ersoy, N. (2020). "Finansal Performansın Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi: Borsa İstanbul Ulaştırma Endeksi'ndeki Şirketler Üzerine Bir Araştırma", *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, (86), 223-246. <https://doi.org/10.25095/mufad.710372>
- Guoliang, L. ve Qiang, F. (2007). "Grey Relational Analysis Model Based on Weighted Entropy and Its Application", 2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Shanghai, China, 5500–5503. <https://doi.org/10.1109/WICOM.2007.1347>
- Gül, Y. (2021). "Entropiye Dayalı TOPSIS Yöntemi ile Bankaların Performans Değerlendirmesi", *Uşak Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 14(1), 1–26.
- Güleç, Ö.F., ve Özkan, A. (2018). "Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Finansal Performansın Değerlendirilmesi: BİST Çimento Şirketleri Üzerine Bir Araştırma", *Muhasebe ve Denetim Bakış*, (54), 77–96.
- Hasanzadeh, R., Mojaver, P., Azdast, T., Khalilarya, S., Chitsaz, A., ve Rosen, M.A. (2023). "Decision Analysis for Plastic Waste Gasification Considering Energy, Exergy and Environmental Criteria Using TOPSIS and Grey Relational Analysis", *Process Safety and Environmental Protection*, 174, 414-423. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.036>
- Haseki, M.İ. ve Avşar, İ. İ. (2023). "Avrupa Birliği ve Seçili Ülkelerinin Teknoloji Üretim Odaklı Verilerinin Entropi ve Gri İlişkiler Analiz Modelleriyle İncelenmesi", *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi (Uluslararası IJEAS)*, 2023(39), 1–20. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ulikidince>
- Huang, Y.-P. ve Chu, H.-C. (1999). "Simplifying Fuzzy Modeling by Both Gray Relational Analysis and Data Transformation Methods", *Fuzzy Sets and Systems*, 104(2), 183–197. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(98\)00247-5](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(98)00247-5)
- Jihadi, M., Vilantika, E., Hashemi, S.M., Arifin, Z., Bachtiar, Y. ve Sholichah, F. (2021). "The Effect of Liquidity, Leverage, and Profitability on Firm Value: Empirical Evidence from Indonesia", *Journal of Asian Finance, Economics and Business*, 8(3), 423–431. <https://doi.org/10.13106/jafeb.2021.vol8.no3.0423>
- Kaplan, H.E. (2021). "Evaluating Financial Performances of Conventional and Participation Banking in Turkey within the Scope of Grey Relational Analysis: A Comparative Literature Review", *Pearson Journal of Social Sciences and Humanities*, (10), 1–14. <http://dx.doi.org/10.46872/pj.176>
- Karaatlı, M. (2016). "Entropi-Gri İlişkisel Analiz Yöntemleri ile Bütünleşik Bir Yaklaşım: Turizm Sektöründe Uygulama", *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 21(1), 63–77.
- Karadağ Erdemir, Ö. ve Kırkağaç, M. (2022). "A Comparative Study on Performance of Insurance Companies with Grey Relational Analysis and Analytic Hierarchy Process", *Alanya Akademik Bakış*, 6(3), 2627–2645. <https://doi.org/10.29023/alanyaakademik.1070741>
- Karkacier, O. ve Yazgan, A.E. (2017). "Turizm Sektöründe Gri İlişkisel Analiz (GİA) Yöntemiyle Finansal Performans Değerlemesi", *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (37), 154–162.
- Lalithchandra, B.N. ve Rajendhiran, N. (2021). "Liquidity Ratio: An Important Financial Metrics", *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 12(2), 1113–1114.
- Li, X. ve Guo, J. (2022). "Evaluation of the Competitiveness of Express Enterprises Based on Gray Relational Analysis and Entropy Weight", *Ind. Eng. Innov. Manag.*, 5, 19–27.
- Liu, H., Dong, Y. ve Wang, F. (2020). "Gas Outburst Prediction Model Using Improved Entropy Weight Grey Correlation Analysis and IPSO-LSSVM", *Mathematical Problems in Engineering*, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2020/8863425>
- Meydan, C., Yıldırım, B.F. ve Senger, Ö. (2016). "BİST'te İşlem Gören Gıda İşletmelerinin Finansal Performanslarının Gri İlişkisel Analiz Yöntemi Kullanılarak Değerlendirilmesi", *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, (69), 147–171.
- Özaydın, G. ve Kayahan Karakul, A. (2021). "Entropi Tabanlı MAUT, SAW ve EDAS Yöntemleri ile Finansal Performans Değerlendirmesi", *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 26(1), 13–29.
- Özdaoğlu, A., Gümüş, Y., Özdaoğlu, G. ve Gümüş, G.K. (2017). "Evaluating Financial Performance with Grey Relational Analysis: An Application of Manufacturing Companies Listed on Borsa İstanbul", *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, (73), 95–108.
- Peker, İ. ve Baki, B. (2011). "Gri İlişkisel Analiz Yöntemiyle Türk Sigortacılık Sektöründe Performans Ölçümü", *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 4(7), 1-18.
- Sakarya, Ş. ve Budak, M.Y. (2022). "Covid-19 Pandemisi Sürecinde BİST Perakende Ticaret Sektöründe Faaliyet Gösteren Şirketlerin Finansal Performanslarının Geliştirilmiş Entropi Temelli TOPSIS Yöntemi ile Belirlenmesi", *Uluslararası Muhasebe ve Finans Araştırmaları Dergisi*, 4(1), 17-39.
- Sakarya, Ş. ve Aksu, M. (2020). "Ulaştırma Sektöründeki İşletmelerin Finansal Performanslarının Geliştirilmiş Entropi Temelli TOPSIS Yöntemi ile Değerlendirilmesi", *Optimum Ekonomi ve Yönetim Bilimleri Dergisi*, 7(1), 21-40. <https://doi.org/10.17541/optimum.529858>

- Setiawansyah, S. (2024). "Penerapan Metode Entropy dan Grey Relational Analysis Dalam Evaluasi Kinerja Karyawan", *Journal of Data Science and Information System (DIMIS)*, 2(1), 29-39. <https://doi.org/10.58602/dimis.v2i1.100>
- Söylemez, Y. (2020). "Finansal Performans Değerlendirmesinde TOPSIS ve Gri İlişkisel Analiz Yöntemlerinin Karşılaştırılması", *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 18(3), 61-79. <https://doi.org/10.11611/yead.771575>
- Susellawati, S., Sari, D.P., Nabella, S.D. ve Fadilah, A.H. (2022). "The Effect of Profitability, Liquidity, Leverage, and Activity Ratios on Dividend Policy in Manufacturing Companies in the Food and Beverage Industry Sector Listed on the Indonesia Stock Exchange in the 2016–2020 Period", *Jurnal Mantik*, 6(2), 1365-1375.
- Suvvari, A., Durai, R.S. ve Goyari, P. (2019). "Financial Performance Assessment Using Grey Relational Analysis (GRA): An Application to Life Insurance Companies in India", *Grey Systems: Theory and Application*, 9(4), 502-516. <https://doi.org/10.1108/GS-05-2019-0010>
- Tayyar, N., Akcanlı, F., Genç, E. ve Erem, İ. (2014). "BİST'e Kayıtlı Bilişim ve Teknoloji Alanında Faaliyet Gösteren İşletmelerin Finansal Performanslarının Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve Gri İlişkisel Analiz (GİA) Yöntemiyle Değerlendirilmesi", *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, (61), 115–130.
- Umut, M. (2023). "Measuring the Performance of Private Pension Companies in Türkiye by Gray Relational Analysis Method", *Journal of Risk and Financial Management*, 16(9), 396. <https://doi.org/10.3390/jrfm16090396>
- Yan, X., Luo, M. ve Zhong, C. (2023). "Evaluation of Rural Tourism Development Level Based on Entropy-Weighted Grey Correlation Analysis: The Case of Jiangxi Province", *Grey Systems: Theory and Application*, 13(4), 677–700. <https://doi.org/10.1108/GS-03-2023-0019>
- Yavuz, S. (2025). "Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) Yöntemleri ve Temel Bileşenler Analizi (TBA) Yöntemi Kullanılarak Ülkelerin Yaşam Kalitesi Bakımından Değerlendirilmesi", Özgür Publications. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub716>
- Yıldırım, M., Bal, K. ve Doğan, M. (2021). "GRİ İlişkisel Analiz Yöntemi ile Finansal Performans Analizi: BİST'te İşlem Gören Demir Çelik Şirketleri Üzerinde Bir Uygulama", *Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi*, 23(1), 122–143. <https://doi.org/10.31460/mbdd.788840>
- Yıldız Kaya, P. ve Öztel, A. (2018). "Kurumsal Sürdürülebilirlik Performansının Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi: Otokar Örneği", *USOBED Uluslararası Batı Karadeniz Sosyal ve Beşeri Bilimler Dergisi*, 2(2), 98–130.
- Zhang, H., Gu, C.J., Gu, L.W. ve Zhang, Y. (2011). "The Evaluation of Tourism Destination Competitiveness by TOPSIS ve Information Entropy – A Case in the Yangtze River Delta of China", *Tourism Management*, 32(2), 443–451. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2010.02.007>
- Zhang, X., Wang, C., Li, E. ve Xu, C. (2014). "Assessment Model of Ecoenvironmental Vulnerability Based on Improved Entropy Weight Method", *The Scientific World Journal*, 2014, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2014/797814>

The Efficiency of Health Systems in European Union (EU) Countries with Undesirable Output: A DEA-Slack-Based Model Approach

Gözde Yeşilaydın¹ , Bilal Saraç² 

ABSTRACT

Purpose: This study was conducted to evaluate the efficiency of the health system of the EU countries by using DEA-Slack Based Measure (SBM) Model. The study also aimed to determine the healthcare resources that created a statistical difference in the efficiency status of countries.

Methodology: In the study, 27 member countries of the European Union were considered as decision-making units. Health expenditure and workforce were used as input; adult mortality rate was used as an undesirable and health status were used as desired output variables. DEA-SBM method was employed to evaluate efficiency, the Mann-Whitney U test was used to determine healthcare resources that created a statistically significant difference.

Findings: Approximately 40.74 % of countries were efficient. The number of nursing and midwifery personnel created a statistically significant difference in the efficiency status of the countries. It can be said that inefficient countries do not use their healthcare resources efficiently and they consume more health financial, technological, and workforce resources compared to efficient countries.

Originality: In addition to the input and output variables, the undesired output variable was also included in the analysis. This is considered to be the original aspect of the study.

Keywords: Efficiency, Data Envelopment Analysis, European Union, Health Systems, Slack Based Measure Model.

JEL Codes: I00, I10, C67.

Avrupa Birliği (AB) Ülkelerinin Sağlık Sistemlerinin İstenmeyen Çıktıyla Etkinliği: Aylak Tabanlı Veri Zarflama Analizi Yaklaşımı

ÖZET

Amaç: Bu çalışma, AB ülkelerinin sağlık sisteminin etkinliğini Aylak Tabanlı Veri Zarflama Analizi Modeli kullanılarak değerlendirmek amacıyla yürütülmüştür. Çalışmada ayrıca ülkelerin etkinlik durumlarında istatistiksel açıdan fark yaratan sağlık kaynaklarının belirlenmesi de amaçlanmıştır.

Yöntem: Çalışmada Avrupa Birliği'ne üye 27 ülke karar verme birimi olarak ele alınmıştır. Sağlık harcamaları ve sağlık insangücü girdi; yetişkin ölüm oranı istenmeyen çıktı ve sağlık durumu ise istenen çıktı değişkenidir. Ülkelerin etkinliğinin değerlendirilmesinde aylak tabanlı veri zarflama analizi yöntemi kullanılmış; ülkelerin etkin olup olmama durumu üzerinde fark yaratan sağlık kaynaklarının belirlenmesi ise MannWhitney U testi ile yapılmıştır.

Bulgular: Ülkelerin yaklaşık %40,74'ü etkindir. Hemşire ve Ebe sayısı ülkelerin etkinlik durumlarında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yaratmıştır. Etkin olmayan ülkelerin sağlık kaynaklarını yeterli düzeyde etkin kullanmadıkları ve etkin ülkelere kıyasla daha fazla finansal, teknolojik ve sağlık insangücü kaynağı tükettikleri söylenebilir.

Özgünlük: Çalışmada girdi ve çıktı değişkenlerine ek olarak istenmeyen çıktı değişkeni de analize dahil edilmiştir. Bu durumun çalışmanın özgün yönü olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Etkinlik, Veri Zarflama Analizi, Avrupa Birliği, Sağlık Sistemleri, Aylak Tabanlı Ölçüm Modeli.

JEL Kodları: I00, I10, C67.

¹ Eskişehir Osmangazi University, Faculty of Health Sciences, Department of Health Management, Eskişehir, Türkiye

² Anadolu University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Business Administration, Eskişehir, Türkiye

Corresponding Author: Gözde Yeşilaydın, gyesilaydin@ogu.edu.tr

DOI: 10.51551/verimlilik.1638688

Research Article | Submitted: 12.02.2025 | Accepted: 22.08.2025

Cite: Yeşilaydın, G. ve Saraç, B. (2025). "The Efficiency of Health Systems in European Union (EU) Countries with Undesirable Output: A DEA-Slack-Based Model Approach", *Verimlilik Dergisi*, 59(4), 893-908.

1. INTRODUCTION

Recently, health systems around the world have faced some challenges due to the aging population and disability, increase in chronic diseases, increased expectations of citizens, and increased use of technology (Pastorino et al., 2019). Additionally, health systems must focus on resource and cost efficiency to provide value-added healthcare services; at the same time, they must also cope with some financial challenges while ensuring the provision of competent human resources to maintain the quality of healthcare delivery (Io Storto and Gončiaruk, 2017). The combination of demographic changes and technological developments has increased the cost of service (Jakubowski and Busse, 1998). For this reason, the current health expenditure (CHE) as a percentage of Gross Domestic Product (GDP) increases over the years. For example, in Europe while CHE of GDP was 7.69% in 2019, 8.59% in 2020 and 8.70% 2021 (WHO GHO, 2023). As is the case all over the world, member countries of the EU that have to allocate more healthcare resources than GDP have faced common difficulties in providing equal, efficient, and quality health services at affordable cost when the amount of care to be given has begun to exceed the resource base (Jakubowski and Busse, 1998). In almost all EU countries, great efforts have been made to cope with these challenges, to provide better healthcare, to increase quality, and to improve efficiency and productivity (Garel, 2018). Policymakers, private payers, and systems leaders have been looking for ways to increase the efficiency of health services (Dhaoui, 2019). Because of these reasons, the efficiency of human, materials, and financial resources in the health sector throughout Europe has become a relevant topic for both scientists and health policymakers (Asandului et al., 2014).

In the health sector, which has high levels of uncertainty and dynamic relationships, healthcare providers need to determine how they use their limited resources, such as financial resources, employees, materials, and devices, to utilize them better and to provide their services efficiently and productively (Popescu et al., 2014). On the other hand, countries have to inspect their health efficiency according to relevant health indicators and reorganize their policies and systems to improve their health status (Shetty and Pakkala, 2010). One of the preferred methods for achieving these goals is efficiency analysis (Hsu, 2014). Countries elaborate on systematically evaluating the efficiency of their health systems and comparing them with other countries (Cylus et al., 2016). This is because health policymakers are increasingly interested in comparing the performance of national health systems among countries (Varabyova and Schreyögg, 2013). Therefore, it is important to evaluate, develop, and analyze the health-related efficiencies of countries at the international level (Kaya Samut and Cafri, 2016).

As in all systems, one of the main objectives of health systems is to ensure efficiency (Linna et al., 2006). It has been stated that the inefficiency of health systems is caused by the excess of inputs used and the deficiency of outputs (Şahin, 1999). However, it is quite difficult to define a functional relationship between the inputs and outputs in health systems. While it is possible to predict the extent of change in the output for a specific increase in input for any system, determining the direction and scale of change that inputs will cause in the outputs of health systems is quite difficult. So, in research, non-parametric Data Envelopment Analysis (DEA) is often chosen to assess how well health systems work because it doesn't need to define a specific relationship between inputs and outputs (Kocaman et al., 2012).

Traditional DEA models are either input-oriented or output-oriented, without considering slack variables. However, slack variables have an important role in the evaluation of efficiency. This method can better reveal the reasons for inefficiency compared to other efficiency measurement models (Tone, 2004). In light of these, the current study aimed to evaluate the health system efficiency of the EU countries by using the DEA-SBM model approach. We calculated the efficiency values of the countries in this context. Furthermore, the healthcare resources that created a statistical difference in the efficiency status of countries were determined. To this end, we posed the following research questions.

- What percentage of EU counties are efficient?
- Which variables creates a statistically significant difference according to the efficient status of countries?

The production process is evaluated together with the desired and undesired outputs. However, the traditional classical data envelopment analysis approach is insufficient to express the true production process by not including the undesired outputs (Cheng and Zervopoulos, 2014). To align with this concept, the study opted for the DEA-SBM method over the classical DEA method. On the other hand, although there are many studies on the efficiency of health systems in European countries, no study has been found that especially examines the efficiency of European Union countries with the DEA-SBM method. Moreover, there are studies focusing on the need for healthcare personnel, especially during the Covid-19 pandemic; the number of studies that integrate this into the analysis by prioritizing undesirable outcomes is still low. In this study, we look at healthcare resources like the health workforce and health spending, and we also include negative outcomes in our analysis to evaluate how efficiently the health systems of European Union member countries are performing. These situations are thought to be the original aspects of the study.

The rest of the paper is organized as follows: the Literature Review expressing the gap in the literature, Materials and Method detailing the methodology and method used in the study, Results presenting the findings related to the DEA-SBM method and Mann-Whitney U Test, Discussions highlighting the practical and social implications of the research, and the Conclusion, where the article ends.

2. LITERATURE REVIEW

Performance measurement is carried out to determine the position of health systems among similar systems, to monitor and control their current status with the help of measurable data. These measurements provide decision-makers with the opportunity to understand the strengths and weaknesses of the systems and to take action for units that are not functioning effectively. Efficiency, while being a dimension of performance, is important in terms of the health systems of countries. Therefore, it can be said that the analysis of efficiency holds an important place in the health field literature (Hsu, 2014). Although there are many methods used in the literature to examine efficiency in the health field, we can see that DEA has found a wide application area in the health sector, proven to be a versatile technique in the analysis of health systems, and is used globally (O'Neill et al., 2008). Since Sherman (1984) measured the efficiency of 7 university hospitals in the state of Massachusetts, USA, using DEA. DEA has been used many times in national and international studies in the field of health. It is possible to approach the application of efficiency analysis in the healthcare sector in different ways. There are studies in the literature that evaluate the performance of healthcare institutions (Jacobs, 2001; Ozcan, 2008; Nayar and Ozcan, 2008; Yiğit, 2016; Şenol and Gençtürk, 2017; Kohl et al., 2019; Çalışkan, 2020; Lindaas et al., 2024) and healthcare services (Stefko et al., 2018; Koçak, 2020; Pehlivan and Yiğit, 2022; Jung et al., 2023; Doğan, 2024). Additionally, studies examining the efficiency of vaccination areas (Valdmanis et al., 2003), immunotherapy for AIDS (Bian et al., 2004), and radiotherapy units, which play a significant role in cancer treatment (Santos and Amado, 2012), are different application areas where efficiency in the health sector is evaluated. This study evaluates the efficiencies of the healthcare systems of EU countries, so Table 1 has been included to illustrate the approach taken in some studies that examine efficiency from similar perspectives.

Table 1 shows that the efficiency of countries' healthcare systems is generally determined using traditional DEA, while SBM-DEA and its extensions are used much less frequently. Moreover, traditional methods with the radial approach tend to produce many decision units with an efficiency score of "1" (Zhou et al., 2006). Therefore, they stated that slack-based measurement has a higher distinctive power compared to traditional DEA methods. Because of, slack-based measurement is considered to constitute a better approach to reflect the nature of efficiency evaluation. Since the production process is evaluated together with the desired and undesirable outputs, and the traditional classical data envelopment analysis is insufficient to express the true production process by not including the undesirable outputs (Cheng and Zervopoulos, 2014), in this study the DEA-SBM model was preferred to be used instead of the classical DEA.

Most studies in the literature evaluate the efficiency of healthcare institutions such as hospitals and medical centers, while others focus on macro-level efficiency, such as countries. A significant portion of studies assessing macro-level evaluate the efficiency of OECD countries. In recent years, there have been studies evaluating the efficiency of health systems in countries such as Iran, Canada, Latvia, Germany, and China, as well as studies on various classifications such as ASEAN, the Western Balkans, Sub-Saharan Africa, and low- and middle-income countries. However, studies examining the efficiency of health systems specifically within the EU are still limited. Therefore, this study, which examines the efficiency of healthcare systems within EU countries using a DEA-Slack Based model, is believed to fill a significant gap in the literature, both in terms of the distinct decision-making unit and in offering an alternative method to classical DEA in efficiency analysis.

3. MATERIALS AND METHODS

3.1. Study Design

This research is an empirical retrospective multi-country cross-sectional study conducted using secondary data obtained from the World Health Organization (WHO) Global Health Observatory (WHO GHO, 2023) and Global Health Expenditure (WHO GHE, 2023) database.

3.2. Selection of Decision-Making Units (DMUs) and Variables

In the study, 27 EU member countries were considered DMUs. We ensured the homogeneity of the units by examining the efficiency of only EU countries. In the first phase, determine input, desirable, and undesirable output variables to evaluate the relative efficiency of these countries' health systems. The variables used in the study were obtained by a comprehensive literature review and were selected from the variables frequently used in studies evaluating the efficiencies of health systems at the country level (Io Storto and Gončiaruk, 2017; Asandului et al., 2014; Amponsah and Amanfo, 2017). In this direction, healthcare resources are handled as input variables (number of medical doctors per 10.000 population,

number of nursing and midwifery personnel per 10.000 population, and current health expenditure per capita in US\$ in current PPP). Output variables are categorized into two types: desirable outputs and undesirable outputs. Gomes and Lins (2008) suggest that we should minimize the production of undesirable outputs, as they are the result of undesirable production processes. From a moral perspective, maximizing the "Adult Mortality Rate" is undesirable. For this reason, while "Adult Mortality Rate (probability of dying between 15 and 60 years) per 1.000 population" was the undesired output, "life expectancy at birth total (LEAB) (years)" and "healthy life expectancy total (HALE) (years)" were included in the analysis as the desired output variables.

Table 1. Summary table of efficiency analysis studies conducted in the health field

<i>Author(s)</i>	<i>Methods</i>	<i>The Subject of Study</i>
Puig-Junoy (1998)	DEA	The evaluation of the relative efficiency of the healthcare systems in OECD countries in the 60s, 70s, and 80s within the framework of health production
Retzlaff-Roberts et al. (2004)	DEA	Addressing the efficiency of health systems in the use of health resources with the help of 1998 data from OECD countries
Lorcu (2008)	DEA	Comparison of the performance analyses of the healthcare systems of Türkiye and EU member countries
Yıldırım and Yıldırım (2011)	DEA	Determining the efficiency of EU member and candidate countries based on data from the year 2000
Kocaman et al. (2012)	DEA	Comparison of the efficiency of health systems in OECD countries
Asandului et al. (2014)	DEA	Examination of the efficiency of EU countries' health systems in 2010
Boz and Önder (2017)	DEA	Analysis of the efficiency of OECD countries' health systems in 2000 and 2013
Dincă et al. (2020)	DEA	Identification of the most efficient healthcare systems among 17 EU countries
Lupu and Tiganasu (2022)	DEA	Evaluation of EU countries' pandemic-era efficiency and identification of factors affecting efficiency
Kaya and Naldöken (2023)	DEA	A comparative study and evaluation of the health systems of G20 countries in terms of health, demographic, and economic indicators
Köse (2024)	DEA	Calculation of the health system performance of EU and OECD member countries
Manavgat and Audibert (2024)	DEA	Measuring and comparing the resilience of OECD countries' healthcare systems before and during Covid-19
Molender (2025)	DEA	Comparing the performance of member countries' public and private sectors with the help of performance indicators developed by the OECD
Mogha et al. (2015)	SBM-DEA	Determining the relative efficiency of public hospitals in Uttarakhand, India, in 2011
Ngee-Wen et al. (2020)	SBM-DEA	Evaluation of the efficiency among 20 public emergency departments in Malaysia
Dirik and Sahin (2020)	SBM-DEA	Examining the change in the efficiency of healthcare services in Turkish provinces between 2012 and 2016
Ortega-Díaz and Martín (2022)	SBM-DEA	Determining whether there is a possible trade-off between efficiency and quality in Spanish hospitals when undesirable outcomes are encountered
Hussain et al. (2024)	SBM-DEA	Evaluation of the health performance of OECD countries and examination of the role of health expenditures and management in increasing efficiency
Rashidi and Olfati (2025)	SBM-DEA	In the analysis of biological pattern recognition using cellular characteristics of breast cancer patients
Zarrin (2023)	Extended SBM-DEA	Using the 2017 data from 28 public hospitals in Germany to exemplify the efficiency for the proposed model
Yetim et al. (2023)	Weighted SBM-DEA	Evaluation of the efficiency of the healthcare systems of OECD countries
Song et al. (2025)	Meta Frontier SBM-DEA	Evaluation of the efficiency of healthcare services in various provinces of China within the framework of regional differences

Because there was a strong and positive relationship ($r=0.881$; $p<0.05$) between the desired output variables, they were treated as two separate variables in two different models, like in the study by Asandului et al. (2014). In the first model, the output variable was just HALE, and in the second model, it was just LEAB. The same input and undesired output variables were used in both models. In the first model, the output variable was only HALE, while in the second model it was only LEAB. The same input and undesired output variables were used in both models. It was also necessary to consider the relationship between the number of inputs/outputs and the number of decision-making units. In the literature, there are different views on the relationship between the number of decision-making units and the number of input/output variables. One of them is that the number of decision-making units (N) should not be less than five times the total number of input (m) and output (s) variables (Chen and Jia, 2017). When the decision-making units selected within the scope of the study ($N = 27$) and the sum of the number of input and output variables (a total of five for each model) are examined, it can be said that the relevant view is confirmed for both models.

3.3. Data Analysis

In the study, DEA-Slack Based Measure (SBM) Model was employed to evaluate the efficiency of the countries. Traditional DEA models are either input-oriented or output-oriented, without considering slacks variables. However, slacks variables have an important role in the evaluation of efficiency. In slack-based measurement model, both desirable (good) and undesirable (bad) input and output variables may exist. This method can better reveal the reasons for inefficiency compared to other efficiency measurement models (Tone, 2004). The main goal of slack-based measurement is to find out where the decision units stand in relation to the efficiency frontier and to reduce the objective function by identifying the highest slackness values (Park et al., 2018).

The “Undesirable Output Model” of the slack-based measurement is separable into two according to the states of the output variables. The “BadOutput Model” deals with desirable (good) and undesirable (bad) outputs independently, and the term independently mentioned here means that a change in undesirable outputs will not affect desirable outputs. While the “NonSeperable Model” establishes a connection between desired and undesirable outputs. With the connection expression mentioned here, it is explained that reducing undesirable outputs will also reduce desirable outputs (Tone, 2004). In this study, under the assumption of General Returns to Scale (GRS) models, the “BadOutput Model” was used because there was no mentioned connection between desirable and undesirable output variables. This DEA–SBM model with undesirable outputs can be formulated as follows in Equations 1-5:

Objective Function

$$\rho^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{r0}} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_{r0}} \right)} \quad (1)$$

Constraints

$$x_0 = X\lambda + s^- \quad (2)$$

$$y_0^g = Y^g\lambda - s^g \quad (3)$$

$$y_0^b = Y^b\lambda + s^b \quad (4)$$

$$s^-, s^g, s^b, \lambda \geq 0 \quad (5)$$

$s^- \in R^m$ and $s^b \in R^{s_2}$ correspond to excess in inputs and undesirable outputs, respectively, and $s^g \in R^{s_1}$ correspond to shortage in desirable outputs. Also, these variables are called slack variables. The objective function shows an absolute decrease with respect to each s_i^- , s_r^g and s_r^b and takes values in the range of $0 < \rho^* \leq 1$.

Let there be an optimal solution $(\lambda^*, s^{-*}, s^{g*}, s^{b*})$ of the program given by Equation 1-5. In case of undesirable outputs, a necessary condition for any decision unit to be efficient is $\rho^* = 1$, $s^{-*} = 0$, $s^{g*} = 0$, $s^{b*} = 0$ that is. If the decision unit is inactive, it will be $\rho^* < 1$.

To compare how well the healthcare systems of EU countries perform, we can use tools like GAMS, LINDO, and various software made for data envelopment analysis, such as Frontier Analyst, DEA Solver PRO, On Front, Warwick, and free options like DEA Excel Solver, DEAP, EMS, and Pioneer (Babacan, 2006). In this study, the efficiencies of the healthcare systems of EU countries was evaluated. The DEA Solver PRO (Data Envelopment Analysis Solver PRO) software was used.

After determining whether the countries were efficient or not by looking at their efficiency scores, in the second step, it was determined whether there was a statistically significant difference between efficiency and inefficiency countries based on selected variables. We compared the groups using the Mann-Whitney U test. The null hypothesis was rejected at the 5% level.

4. RESULTS

The descriptive statistics for the data of the EU countries are shown in Table 2. Number of medical doctors (per 10.000 population), number of nursing and midwifery personnel (per 10.000 population), current health expenditure per capita in US\$ in current PPP, and adult mortality rate (probability of dying between 15 and 60 years) per 1.000 population are below the average in more than half of the countries. However, there are relatively few countries with below-average life expectancy at birth total (LEAB) (years) and healthy life expectancy total (HALE) (years) (Table 2).

Table 2. Descriptive statistics of input, undesirable and desirable output variables

	<i>Variables</i>	<i>Mean</i>	<i>SD*</i>	<i>Median</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>n (%)**</i>
Inputs	Number of medical doctors (per 10.000 population)	44.71	10.97	42.64	29.74	70.62	15 (55.56)
	Number of nursing and midwifery personnel (per 10.000 population)	103.03	50.15	96.63	36.98	223.20	14 (51.90)
	Current health expenditure per capita in US\$ in current PPP	3757.4	2283.3	2990.0	963.0	7636.0	17 (63.00)
Undesirable Output	Adult mortality rate (probability of dying between 15 and 60 years) per 1.000 population	84.44	32.63	71.00	52.00	155.00	18 (66.70)
Desirable Outputs	Life Expectancy at birth total (LEAB) (years)	82.88	1.96	83.50	78.60	85.70	10 (37.00)
	Healthy life expectancy total (HALE) (years)	70.00	1.97	70.90	66.20	72.40	10 (37.00)

Note: *SD: standart deviation; **: Number and percentage of countries with below-average values

The fact that the selection of input and output variables to be included in the efficiency analysis is suitable for the structural features of the decision units is closely related to the evaluation of the efficiency of DMUs. In other words, the relationship between input and output variables in the DEA methodology should not be irregular. Because in the DEA method, an increase in the input amount will lead to the formation of more outputs. At this point, the assumption of "isotonicity" between the input and output variables in the efficiency analysis should be tested. An isotonicity assumption involves calculating the inter-correlations between input and output variables to determine whether an increased amount of input leads to more output (Hwang et al., 2018). In the "isotonicity assumption," an increase in the value of any input variable is expected not to decrease the values of any output variables, but rather to increase the value of at least one output variable (Amponsah and Amanfo, 2017; Golany and Roll, 1989). To ensure this assumption, Spearman's rho correlation analysis should be performed between the input and output variables to be used in the efficiency analysis model. Accordingly, there is a positive correlation between Life Expectancy at birth total (LEAB) (years) and the number of medical doctors (per 10.000 population) ($r=0.238$), the number of nursing and midwifery personnel (per 10.000 population) ($r=0.242$), and current health expenditure per capita in US\$ in current PPP ($r=0.614$). Also, there was a positive correlation between Healthy life expectancy total (HALE) (years) and the number of medical doctors ($r=0.225$), number of nursing and midwifery personnel (per 10.000 population) ($r=0.314$), and current health expenditure per capita in US\$ in current PPP ($r=0.704$). When the correlation analysis is examined, it is seen that the relationship between the inputs and the desired outputs is positive; in other words, the "isotonicity assumption" is confirmed.

The EU countries efficiency values obtained from the first model, where HALE is the desired output, using the Slack-Based Measure "Undesirable Outputs Model" are presented in Table 3. The EU countries efficiency values obtained from the second model, where Life Expectancy at birth total (LEAB) (years) is the desired output, using the Slack-Based Measure "Undesirable Outputs Model" are presented in Table 4.

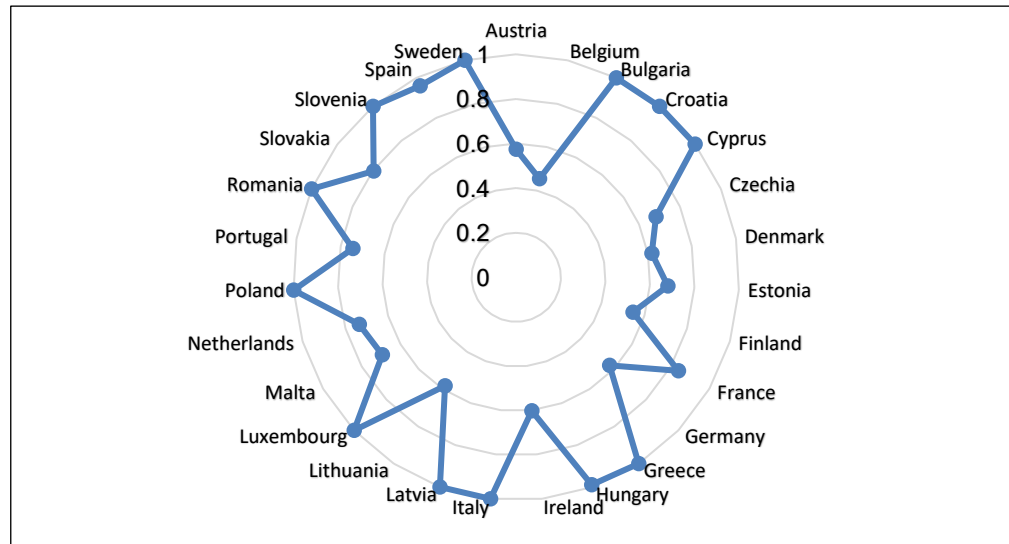
For any decision unit to be efficient in the SBM analysis undesirable outcomes model, the efficiency score must be 1.00 ($\rho^* = 1$) and the values of slack variables ($s^{-*} = 0$, $s^{g*} = 0$, $s^{b*} = 0$). If the decision unit is inefficient, the efficiency score will be less than 1.00 ($\rho^* < 1$). From the analysis results of the two models, it has been concluded that Bulgaria, Croatia, Cyprus, Greece, Italy, Latvia, Luxembourg, Poland, Romania, Slovenia and Sweden are efficient, while other EU countries are inefficient (Table 3 and Table 4). It is also possible to see the efficiency scores in Table 3 and Table 4 graphically in Figure 1.

Table 3. Slack-Based Measure analysis score of countries and projections (Model 1 - HALE)

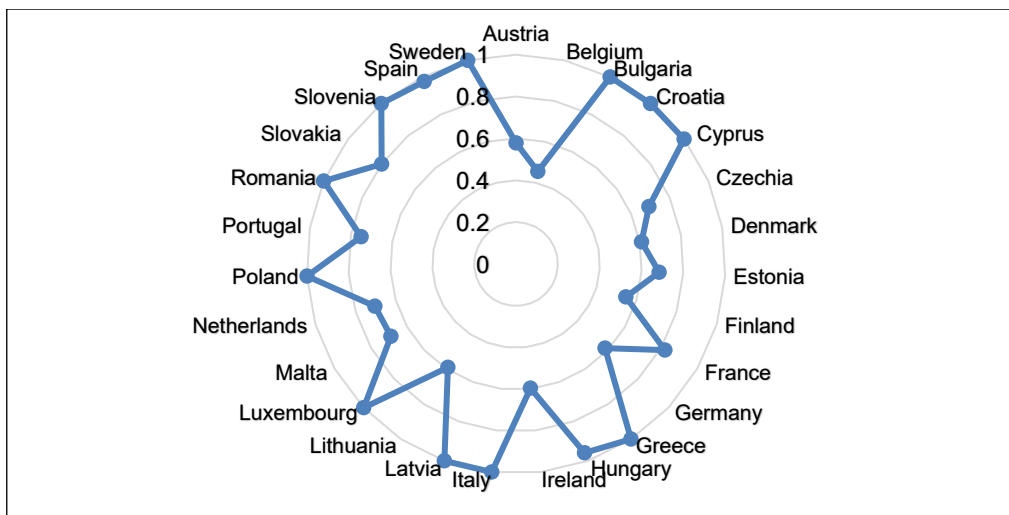
DMU	Score	(I) Number of medical doctors (per 10.000 population)		(I) Number of nursing and midwifery personnel (per 10.000 population)		(I) Current health expenditure per capita in US\$ in current PPP		(O) Adult mortality rate (probability of dying between 15 and 60 years) per 1.000 population		(O) Healthy life expectancy total (HALE) (years)		Sum of Change (%)
		Projection	Change (%)	Projection	Change (%)	Projection	Change (%)	Projection	Change (%)	Projection	Change (%)	
Bulgaria	1	41.682	0.00%	47.411	0.00%	1.040.023	0.00%	135.000	0.00%	66.3	0.00%	0.00%
Croatia	1	34.655	0.00%	80.932	0.00%	1.384.119	0.00%	88.000	0.00%	68.6	0.00%	0.00%
Cyprus	1	53.753	0.00%	46.279	0.00%	2.989.653	0.00%	55.000	0.00%	72.4	0.00%	0.00%
Greece	1	63.060	0.00%	36.982	0.00%	1.845.776	0.00%	66.000	0.00%	70.9	0.00%	0.00%
Italy	1	41.263	0.00%	65.530	0.00%	3.349.602	0.00%	54.000	0.00%	71.9	0.00%	0.00%
Latvia	1	33.451	0.00%	44.004	0.00%	1.897.953	0.00%	154.000	0.00%	66.2	0.00%	0.00%
Luxembourg	1	29.851	0.00%	120.845	0.00%	7.635.702	0.00%	56.000	0.00%	71.6	0.00%	0.00%
Poland	1	37.137	0.00%	67.617	0.00%	1.159.328	0.00%	111.000	0.00%	68.7	0.00%	0.00%
Romania	1	29.739	0.00%	73.723	0.00%	963.013	0.00%	135.000	0.00%	66.8	0.00%	0.00%
Slovenia	1	32.792	0.00%	105.355	0.00%	2.774.987	0.00%	72.000	0.00%	70.7	0.00%	0.00%
Sweden	1	70.616	0.00%	215.939	0.00%	6.900.785	0.00%	52.000	0.00%	71.9	0.00%	0.00%
Hungary	0.9894	32.906	0.00%	66.044	0.00%	1.337.770	-3.17%	126.000	0.00%	67.2	0.00%	-3.17%
Spain	0.9612	45.766	0.00%	58.626	-7.04%	3.221.105	-0.41%	54.375	-2.90%	72.1	0.00%	-10.35%
France	0.8392	33.237	0.00%	108.107	-11.51%	3.404.755	-36.72%	71.000	0.00%	72.1	0.00%	-48.23%
Slovakia	0.7974	46.292	0.00%	60.795	-22.56%	1.560.247	-7.38%	77.168	-25.80%	68.5	0.00%	-55.74%
Portugal	0.7437	56.152	0.00%	49.019	-35.16%	1.741.729	-36.59%	72.501	-4.60%	71	0.00%	-76.35%
Netherlands	0.7357	38.355	0.00%	78.717	-30.53%	3.351.042	-48.75%	59.000	0.00%	71.4	0.00%	-79.28%
Malta	0.6943	53.085	-3.22%	45.704	-68.27%	2.952.489	-18.92%	54.316	-1.24%	71.5	0.00%	-91.65%
Czechia	0.6830	54.686	0.00%	47.031	-48.89%	1.691.935	-32.28%	70.004	-13.58%	68.8	0.00%	-94.75%
Estonia	0.6808	34.958	-9.51%	81.640	-26.97%	1.396.225	-33.34%	88.770	-25.40%	69.2	0.00%	-95.22%
Denmark	0.6171	40.746	-4.45%	64.710	-38.61%	3.307.674	-55.19%	53.324	-17.96%	71	0.00%	-116.21%
Ireland	0.6034	40.622	0.00%	65.757	-55.85%	3.300.209	-51.21%	53.841	-13.16%	71.1	0.00%	-120.22%
Lithuania	0.5824	36.056	-27.16%	65.649	-32.06%	1.125.578	-39.44%	107.769	-30.47%	66.7	0.00%	-129.13%
Germany	0.5751	40.689	-9.95%	64.619	-47.67%	3.303.015	-50.15%	53.249	-22.83%	70.9	0.00%	-130.60%
Austria	0.5740	52.639	-3.57%	45.320	-57.94%	2.927.713	-54.99%	53.860	-13.13%	70.9	0.00%	-129.63%
Finland	0.5465	40.746	-5.79%	64.710	-71.01%	3.307.674	-39.73%	53.324	-23.82%	71	0.00%	-140.35%
Belgium	0.4536	40.517	-35.25%	64.345	-68.65%	3.289.039	-42.10%	53.024	-26.36%	70.6	0.00%	-172.36%

Table 4. Slack-Based Measure analysis score of countries and projections (Model 2 - LEAB)

DMU	Score	(I) Number of medical doctors (per 10.000 population)		(I) Number of nursing and midwifery personnel (per 10.000 population)		(I) Current health expenditure per capita in US\$ in current PPP		(O) Adult mortality rate (probability of dying between 15 and 60 years) per 1.000 population		(O) Life Expectancy at birth total (LEAB) (years)		Sum of Change (%)
		Projection	Change (%)	Projection	Change (%)	Projection	Change (%)	Projection	Change (%)	Projection	Change (%)	
Bulgaria	1	41.682	0.00%	47.411	0.00%	1.040.023	0.00%	135.000	0.00%	78.6	0.00%	0.00%
Croatia	1	34.655	0.00%	80.932	0.00%	1.384.119	0.00%	88.000	0.00%	81.6	0.00%	0.00%
Cyprus	1	53.753	0.00%	46.279	0.00%	2.989.653	0.00%	55.000	0.00%	85.1	0.00%	0.00%
Greece	1	63.060	0.00%	36.982	0.00%	1.845.776	0.00%	66.000	0.00%	83.6	0.00%	0.00%
Italy	1	41.263	0.00%	65.530	0.00%	3.349.602	0.00%	54.000	0.00%	84.9	0.00%	0.00%
Latvia	1	33.451	0.00%	44.004	0.00%	1.897.953	0.00%	154.000	0.00%	79.8	0.00%	0.00%
Luxembourg	1	29.851	0.00%	120.845	0.00%	7.635.702	0.00%	56.000	0.00%	84.2	0.00%	0.00%
Poland	1	37.137	0.00%	67.617	0.00%	1.159.328	0.00%	111.000	0.00%	81.9	0.00%	0.00%
Romania	1	29.739	0.00%	73.723	0.00%	963.013	0.00%	135.000	0.00%	79.3	0.00%	0.00%
Slovenia	1	32.792	0.00%	105.355	0.00%	2.774.987	0.00%	72.000	0.00%	84.1	0.00%	0.00%
Sweden	1	70.616	0.00%	215.939	0.00%	6.900.785	0.00%	52.000	0.00%	84	0.00%	0.00%
Spain	0.9761	45.766	0.00%	59.944	-4.95%	3.234.293	0.00%	55.152	-1.51%	85.7	0.00%	-6.46%
Hungary	0.9590	32.906	0.00%	66.044	0.00%	1.211.628	-12.30%	126.000	0.00%	79.6	0.00%	-12.30%
France	0.8214	33.237	0.00%	106.366	-12.94%	3.193.596	-40.65%	71.000	0.00%	85.1	0.00%	-53.59%
Slovakia	0.8005	46.292	0.00%	61.194	-22.05%	1.562.680	-7.23%	77.508	-25.47%	81.4	0.00%	-54.75%
Portugal	0.7514	56.152	0.00%	49.857	-34.05%	1.746.842	-36.40%	73.217	-3.66%	84.4	0.00%	-74.11%
Netherlands	0.7032	38.355	0.00%	74.314	-34.41%	3.141.975	-51.95%	57.511	-2.52%	83.1	0.00%	-88.88%
Czechia	0.6908	54.686	0.00%	48.051	-47.78%	1.698.161	-32.03%	70.875	-12.50%	81.9	0.00%	-92.31%
Malta	0.6892	40.728	-25.75%	64.681	-55.10%	3.306.203	-9.21%	53.300	-3.09%	83.8	0.00%	-93.15%
Estonia	0.6839	35.080	-9.20%	81.924	-26.72%	1.401.081	-33.11%	89.078	-25.14%	82.6	0.00%	-94.17%
Denmark	0.6086	40.340	-5.40%	64.063	-39.22%	3.274.640	-55.64%	52.792	-18.78%	83	0.00%	-119.04%
Ireland	0.5968	40.583	-0.10%	64.449	-56.73%	3.294.367	-51.30%	53.110	-14.34%	83.5	0.00%	-122.47%
Lithuania	0.5908	36.457	-26.35%	66.379	-31.31%	1.138.095	-38.77%	108.967	-29.70%	80.4	0.00%	-126.13%
Germany	0.5852	41.214	-8.79%	65.453	-47.00%	3.345.657	-49.51%	53.936	-21.83%	84.8	0.00%	-127.13%
Austria	0.5777	40.728	-25.39%	64.681	-39.97%	3.306.203	-49.17%	53.300	-14.03%	83.8	0.00%	-128.56%
Finland	0.5479	40.826	-5.61%	64.835	-70.95%	3.314.094	-39.61%	53.428	-23.67%	84	0.00%	-139.84%
Belgium	0.4545	40.583	-35.14%	64.449	-68.60%	3.294.367	-42.00%	53.110	-26.24%	83.5	0.00%	-171.98%



(a) Model 1- HALE



(b) Model 2 - LEAB

Figure 1. Graphical representation of efficiency scores (Model 1- HALE and Model 2 - LEAB)

The rates of change shown in Table 3 and Table 4 represent excess input and undesirable output variables, as there are no desirable output variables available for the analysis. These rates of change in inputs and undesirable outputs can help transform inefficient countries into efficient ones. For example, for Hungary and Spain, which are the countries closest to the efficiency limit, to become efficient in Model 1 and Model 2, they need to increase the values of Healthy life expectancy total (HALE) (years) and Life Expectancy at birth total (LEAB) (years), which are the desired output variables. With the increase in these variables, the rate of change in input and undesirable outputs will be "0.00." By increasing these variables, Hungary and Spain will achieve efficiency. On the other hand, Hungary has a better efficiency score than Spain because it consumes excesses in input and undesirable output variables. In other words, the sum of Spain's rates of change in input and undesirable output variables is greater than the sum of Hungary's rates of change. Therefore, we can assert that Hungary's efficiency value surpasses Spain's (Table 3, Table 4, Figure 1). Within the scope of the study, it was also examined which input and output variables would show a statistically significant difference according to the efficiency status of the countries in Table 4.

Therefore, Hypothesis 2, which meets the $p < 0.05$ condition, is accepted. Other hypotheses are rejected as they do not meet this condition. There was a statistically significant difference between efficient and inefficient countries in "the number of nursing and midwifery personnel (per 10.000 population)" (H_2). The median value of inefficient countries was higher than that of efficient countries (Table 5). In other words, a significant difference in favour of inefficiency has been obtained regarding the mentioned variable in the efficiency values of EU member countries ($Z = -2.369, p < 0.05$).

Table 5. Hypotheses testing (Mann-Whitney U Test)

<i>Hypothesis</i>	<i>Median</i>		<i>Z</i>	<i>p</i>	<i>Statistical Decision</i>
	<i>Efficient</i>	<i>Inefficient</i>			
H ₁ : Number of medical doctors (per 10.000 population)	37.14	45.48	-1.431	0.162	Rejected
H ₂ : Number of nursing and midwifery personnel (per 10.000 population)	67.62	109.77	-2.369	0.017	Accepted
H ₃ : Current health expenditure per capita in US\$ in current PPP	1898.00	4511.50	-1.579	0.121	Rejected
H ₄ : Adult mortality rate (probability of dying between 15 and 60 years) per 1.000 population	72.00	70.50	-0.025	0.981	Rejected
H ₅ : Life Expectancy at birth total (LEAB) (years)	83.60	83.50	-0.370	0.716	Rejected
H ₆ : Healthy life expectancy total (HALE) (years)	70.70	70.95	-0.494	0.645	Rejected

5. DISCUSSION

The importance of efficiency in resource use and expenditures in the health sector has been recognized all over the world (Purohit, 2016). The efficiency of health systems has become a relevant topic for both healthcare providers and policymakers in the health sector. In this context, it is necessary to examine the efficiency of health systems on a country basis, that is, at the macro level, and to identify methods that will increase the efficiency of health systems (Lee, 2016). Countries need to evaluate their health systems against other comparable countries and then efficiently allocate the necessary resources for their health systems. Thus, an important step will have been taken to facilitate the decision-making process for improving the performance of health systems in different countries (Abolghasem et al., 2019). In the literature, it can be stated that the efficiency of international health systems is more frequently addressed than that of regional or national scales. Additionally, studies comparing the efficiency of high-income countries' health systems by income groups are more frequently encountered (Mbau et al., 2023). Our research findings support the published literature indicating that among these countries, Spain, Slovenia (Önen and Sayin, 2017), Sweden and Romania (Dincă et al., 2020), Cyprus, Luxembourg, and Greece (Kujawska, 2018) have some of the most efficient healthcare systems. In EU member countries, the fact that Spain has the highest life expectancy at birth, and that the lowest mortality rates among people up to 65 years old are observed in Cyprus and Greece (Eurostat, 2023), as well as the higher number of doctors and nurses per 1000 people in Greece, Denmark, and Spain compared to other countries (OECD, 2021), aligns with our findings that these countries have efficient healthcare systems. Additionally, although countries like Germany and France allocate the highest share of health expenditures among EU countries (OECD, 2021), it is noteworthy that the performance of these countries' health systems is low.

"Good Health and Well-Being," the 3rd of the 17 Sustainable Development Goals for 2030 published by the United Nations in 2015, reveals the importance of healthy life expectancy by using "ensure healthy lives and promote well-being for all at all ages" as its mission statement (WHO SDGs, 2023). However, a review of the literature indicated that Life Expectancy at birth total (LEAB) (years) was frequently used as an output variable in studies examining the efficiency of countries, whereas Healthy life expectancy total (HALE) (years) was considered an output variable in a relatively limited number of studies (Asandului et al., 2014; Hosokawa et al., 2020). According to Asandului et al. (2014), increasing the value of Healthy life expectancy total (HALE) (years) is one of the constant goals of EU policies since it will help reduce the costs of health systems and increase employees' productivity, as well as the social benefits it provides. In this context, we thought that it would be appropriate to use both Life Expectancy at birth total (LEAB) (years) and Healthy life expectancy total (HALE) (years) as desired output variables in the study. To achieve homogeneity, only the efficiency of EU member countries was examined in the current study.

Although there are many studies on traditional classical DEA, a limited number of studies in which the DEA-SBM method was employed to do an efficiency analysis in the health sector were found. Some of these studies were carried out in microform at the level of healthcare institutions, such as hospitals, primary healthcare institutions, or clinical units (Mei et al., 2023). Some of them are studies that evaluate the health efficiencies of countries, states, and regions at the macro level. For example, Kujawska (2021) used the SBM to examine the health system efficiency of European countries. As a result of the study, a total of ten countries, including Bulgaria, Cyprus, Greece, Iceland, Ireland, Malta, Poland, Spain, Sweden, and the United Kingdom, were found to be efficient. Some of the countries that are efficient in the current study are the same. In another study, Hsu (2014) measured the health expenditure performance of European and Central Asian countries with the SBM method. This study revealed that most countries exhibit lower levels of efficiency. In the benchmarking study conducted by Io Storto and Gončiaruk (2017), the healthcare system performances of 32 European countries in 2011 and 2014 were evaluated. Liu et al. (2019) examined the health expenditure efficiency in rural China using the Super SBM model. Another study by Sinimole (2023) aimed to evaluate the efficiency of health systems worldwide in combating the epidemic.

The study found efficiency in sixteen out of 161 countries. In the study conducted by Cheng and Zervopoulos (2014), the efficiency of the health system of 171 countries was evaluated. The study used the child mortality rate under 5 years old and the maternal mortality rate as undesired output variables. As can be seen, the number of studies evaluating efficiency at the macro level using the SBM method is limited compared to studies using classical DEA. While some studies have looked at the health efficiency of EU countries using classical and dynamic network DEA, it hasn't been shown that the DEA-SBM method has been specifically applied to EU member countries. Given the research gaps identified above, this study is considered original because it specifically evaluates the efficiency of EU countries using this method.

In the last few years, many important changes have taken place in the health sector due to the new challenges brought by the pandemic (Sinimole, 2023). Especially in the period of the Covid-19 pandemic, which has affected the whole world, the health systems of the countries need to meet the health needs of the society and to enhance the health system capacity by strengthening the health services to tackle the new epidemic waves in the future (Giannopoulou and Tsobanoglou, 2020). The resources of the health system (doctors, nurses, and beds) were not sufficient to cope with the pandemic in many countries (Sinimole, 2023). In addition, with the pandemic, the issue of effective and efficient use of healthcare resources has gained importance, especially the existence of health workforce resources. In the current study, results were obtained that support this view.

5.1. Practical and Social Implications

We anticipate that the results of this study will have practical implications. The remarkable finding is that only the number of nurses and midwives significantly impacted healthcare resources. Nurses have the largest component of the health workforce in almost all EU countries. The importance of nurses, who play a key role in preserving the core values of global health systems and providing care in hospitals, long-term care facilities, and the community, has increased once again, especially during the COVID-19 pandemic (Schwerdtle et al., 2020; OECD, 2022). Based on this, the WHO has declared 2020 the "International Year of Nurses and Midwives" for its unique contributions to global health (Safeguarding Health in Conflict Coalition, 2020). According to Catton (2020), the next decade is likely to face global challenges related to pan-national infections such as Covid-19 and global warming, which affect healthcare services. The continuity and resilience of health services will depend on having enough nurses to face these upcoming challenges. For this reason, it is thought that it is important for the efficiency of the health system that countries establish a balance in terms of employment by analyzing the current situation, especially regarding the number of nurses and midwives.

One of the main goals of the countries is to achieve improvements regarding both the quality and efficient delivery of health services and how optimally they use healthcare resources (Caballer-Tarazona et al., 2010). With improvements in financial and health workforce resources, it will be possible to provide easy access to health services, reduce health inequalities, better manage health problems, and improve health outcomes in inefficient countries. The results of the current study can help policymakers identify deficiencies in national health systems, justify the need for reform, and find the top priority countries in need of reform in the health sector. Since the efficiency status plays an important role in the development, sustainability, and well-being of a country, through this study, it can be learned how each national health system compares to the others and may contribute to identifying the aspects of health systems that are open for improvement in the future. On the other hand, it should not be forgotten that the efficiencies of health systems and the health workforce resources, especially physicians, nurses, and midwives, become even more important in emergencies such as the Covid-19 global epidemic that affects the whole world or the earthquake disaster in Türkiye on February 06, 2023.

By revealing the current situation, this study is thought to benefit managers, planners, policymakers, and decision makers in the planning and delivery of health services. With the results obtained from this study, determining more appropriate policies in resource allocation, revealing how well the health systems of the countries work, continuously improving the efficiency by establishing a connection between the resources of the health systems and the outputs, developing policies that will ensure more efficient ways for the allocation of healthcare resources, balancing the distribution of resources, and redesigning the national health systems of countries. On the other hand, it is important for all stakeholders to cooperate so that the efficiency of health systems can be included in health policies. At this point, it is recommended that health managers, including nurses and midwives, who constitute the largest share among health workers, should be in contact with governments, national and international nursing and midwifery associations, and occupational chambers and develop policies in line with their opinions.

5.2. Research Limitations

The study had several limitations. One of these limitations was that the study only covers EU countries. Other world countries were not included in the study due to the necessity of homogeneity in decision-

making units, which is one of the basic assumptions of the DEA-SBM method. Therefore, the results cannot be generalized to all countries in the world. In addition, environmental factors were not used while evaluating the efficiency to provide opinions on the relationship between the number of variables and decision-making units. Therefore, we conducted the analysis using the most commonly used healthcare resource variables in the literature. The results obtained from the SBM-DEA model may vary depending on the selected variables. Therefore, using a different set of variables will yield different results. Furthermore, variable selection was influenced by data availability. On the other hand, it was assumed that the secondary data obtained were accurate.

6. CONCLUSION

The study examined the efficiency of EU countries' health systems using the DEA-SBM method, creating two distinct models. Accordingly, it turned out that only 11 out of 27 countries (Bulgaria, Croatia, Cyprus, Greece, Italy, Latvia, Luxembourg, Poland, Romania, Slovenia, and Sweden) were efficient in both models, and the number of efficient countries was quite low (40.74%). It can be said that these efficient countries use their health expenditures and human resources better; in other words, they have less slack capacity to reach a healthy population compared to others. This situation can be associated with the elderly population rate, the number of pregnant women, chronic disease burden, mortality rates, immunization and vaccination policies, the health system model used, education level, income level, rural/urban population ratio, and environmental factors in countries. It would be beneficial for these countries to implement healthcare reforms that will reduce resource intensity and increase the quality of healthcare services delivery. One could argue that inefficient countries possess more slack capacity compared to their efficient counterparts. These countries are not efficient because there are still resources available for input and undesirable output variables. We recommend that these countries utilize their slack resources to become efficient.

Among the health workforce resources, only the number of nurses and midwives created a statistically significant difference in the efficiency status of the countries. The median value of inefficient countries was higher than that of efficient countries. This result shows that inefficient countries have higher resource intensity in terms of the number of nurses and midwives.

In future studies, it may be suggested to include different indicators such as education level, income and related inequalities, dietary habits, patient satisfaction, service delivery quality, health system infrastructure, and health-related environmental and lifestyle risk factors in the analysis. Countries' GDP and the share they allocate to their health systems vary. Therefore, in studies comparing health systems, countries can be analyzed by separating them into developed and developing categories. In this way, it will be possible to understand the relationships between economic, social, and health service variables that may affect the delivery of health services. Additionally, we suggest expanding the study to include longitudinal data using time series and panel data. On the other hand, the health reforms of efficient countries can be examined using policy analysis methods.

Author Contributions

Gözde Yeşilaydın: Literature review, Conceptualization, Methodology, Data Curation, Analysis, Writing and editing *Bilal Saraç*: Literature review, Methodology, Data Curation, Analysis, Writing and editing

Conflict of Interest

No potential conflict of interest was declared by the authors.

Funding

Any specific grant has not been received from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Compliance with Ethical Standards

It was declared by the authors that the tools and methods used in the study do not require the permission of the Ethics Committee.

Ethical Statement

It was declared by the author(s) that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.



The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.

REFERENCES

- Abolghasem, S., Toloo, M. and Amézquita, S. (2019). "Cross-Efficiency Evaluation in The Presence of Flexible Measures with An Application to Healthcare Systems", *Health Care Management Science*, 22, 512-533. <https://doi.org/10.1007/s10729-019-09478-0>
- Amponsah, S. and Amanfo, S. (2017). "Efficiency and Productivity Growth in the Health Care Systems of Ghana: Regional Comparison Analysis Using DEA", IL, Chicago.
- Asandului, L., Roman, M. and Fatulescu, P. (2014). "The Efficiency of Healthcare Systems in Europe: A Data Envelopment Analysis Approach", *Procedia Eco and Fin*, 10, 261-268. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00301-3](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00301-3)
- Babacan, A. (2006). "Türkiye'deki Üniversitelerde VZA Yöntemiyle Verimlilik Analizi". Yayınlanmamış Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sivas
- Bian, F., Cui, L. and Lessner, L. (2004). "DEA-Based Anti-HIV Immunotherapy Model", *Progress in Natural Science*, 14(9), 828-832.
- Boz, C. and Önder, E. (2017). "OECD Ülkelerinin Sağlık Sistemi Performanslarının Değerlendirilmesi". *Sosyal Güvence*, 11, 24-61.
- Caballer-Tarazona, M., Moya-Clemente, I., Vivas-Consuelo, D. and Barrachina-Martínez, I. (2010). "A Model to Measure the Efficiency of Hospital Performance", *Mathematical and Computer Modelling*, 52(7-8), 1095-1102. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.03.006>
- Catton, H. (2020). "Global Challenges in Health and Health Care for Nurses and Midwives Everywhere", *International Nursing Review*, 67(1), 4-6. <https://doi.org/10.1111/inr.12578>
- Chen, L. and Jia, G. (2017). "Environmental Efficiency Analysis of China's Regional Industry: A Data Envelopment Analysis (DEA) Based Approach", *Journal of Cleaner Production*, 142, 846-853. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.045>
- Cheng, G. and Zervopoulos, P.D. (2014). "Estimating the Technical Efficiency of Health Care Systems: A Cross-Country Comparison Using the Directional Distance Function", *European Journal of Operational Research*, 238(3), 899-910. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.05.007>
- Cylus, J., Papanicolas, I. and Smith, P.C. (2016). "Health System Efficiency: How to Make Measurement Matter for Policy and Management", World Health Organization Regional Office for Europe.
- Çalışkan, H. (2020). "Kamu Hastane Birliklerinin Verimlilik Düzeylerinin Veri Zarflama Analizi ile Değerlendirilmesi", *Verimlilik Dergisi*, 2, 157-178.
- Dhaoui, I. (2019). "Healthcare System Efficiency and Its Determinants: A Two-Stage Data Envelopment Analysis (DEA) From MENA Countries", Working Paper, Economic Research Forum (ERF), Giza, Egypt.
- Dincă, G., Dincă, M.S. and Andronic, M.L. (2020). "The Efficiency of the Healthcare Systems in EU Countries—A DEA Analysis", *Acta Oeconomica*, 70(1), 19-36. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00301-3](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00301-3)
- Dirik, C. and Sahin, S. (2020). "Türkiye'deki Sağlık Hizmetlerinin Etkinlik ve Verimlilik Analizi: Radyal ve Radyal Olmayan VZA ve MVE Modellerinin Karşılaştırılması", *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 11(28), 790-814. <https://doi.org/10.21076/vizyoner.659548>
- Doğan, H. (2024). "VZA Süper Etkinlik Modeli ile Türkiye'deki Şehirlerin Sağlık Hizmeti Etkinliklerinin İncelenmesi", *Sağlık ve Sosyal Refah Araştırmaları Dergisi*, 6(2), 154-165. <https://doi.org/10.55050/sarad.1466379>
- Eurostat (2023). "Mortality and Life Expectancy Statistics", https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Mortality_and_life_expectancy_statistics, (Erişim tarihi: 06.06.2025).
- Garel, P. (2018). "Hospitals in Europe Healthcare Data", HOPE Publications, Belgium, https://www.hope.be/wp-content/uploads/2018/07/2018_Hospitals-in-EU-28-Synthesis-final-for-publication-002.pdf, (Erişim tarihi: 06.06.2025).
- Giannopoulou, I. and Tsobanoglou, G.O. (2020). "COVID-19 Pandemic: Challenges and Opportunities for the Greek Health Care System", *Irish Journal of Psychological Medicine*, 37(3), 226-230. <https://doi.org/10.1017/ipm.2020.35>
- Golany, B. and Roll, Y. (1989). "An Application Procedure for DEA", *Omega*, 17(3), 237-250.
- Gomes, E.G. and Lins, M.P.E. (2008). "Modelling Undesirable Outputs with Zero Sum Gains Data Envelopment Analysis Models", *Journal of the Operational Research Society*, 59(5), 616-623. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602384>
- Hosokawa, R., Ojima, T., Myojin, T., Aida, J., Kondo, K. and Kondo, N. (2020). "Associations between Healthcare Resources and Healthy Life Expectancy: A Descriptive Study Across Secondary Medical Areas in Japan", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(17), 6301. <https://doi.org/10.3390/ijerph17176301>
- Hsu, Y.C. (2014). "Efficiency in Government Health Spending: A Super Slacks-Based Model", *Quality & Quantity*, 48(1),

- 111-126. <https://doi.org/10.1007/s11135-012-9753-9>
- Hussain, Z., Huo, C., Ahmad, A. and Shaheen, W. A. (2024). "An Assessment of Economy-and Transport-Oriented Health Performance", *Health Economics Review*, 14(1), 80. <https://doi.org/10.1186/s13561-024-00544-0>
- Hwang, Y. G., Park, S. and Kim, D. (2018). "Efficiency Analysis of Official Development Assistance Provided by Korea", *Sustainability*, 10(8), 2697. <https://doi.org/10.3390/su10082697>
- Jacobs, R. (2001). "Alternative Methods to Examine Hospital Efficiency: Data Envelopment Analysis and Stochastic Frontier Analysis", *Health Care Management Science*, 4(2), 103-115.
- Jakubowski, E. and Busse, R. (1998). "Health Care Systems in the EU A Comparative Study", Working Paper, Public Health and Consumer Protection Series. Luxembourg: European Parliament Directorate General for Research Working Paper.
- Jung, S., Son, J., Kim, C. and Chung, K. (2023). "Efficiency Measurement Using Data Envelopment Analysis (DEA) in Public Healthcare: Research Trends from 2017 to 2022". *Processes*, 11(3), 811. <https://doi.org/10.3390/pr11030811>
- Kaya Samut, P. and Cafri, R. (2016). "Analysis of the Efficiency Determinants of Health Systems in OECD Countries by DEA and Panel Tobit", *Social Indicators Research*, 129, 113-132. <https://doi.org/10.1007/s11205-015-1094-3>
- Kaya, M. V. and Naldöken, Ü. (2023). "G20 Ülkelerinin Sağlık Sistemleri Açısından Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi ve Değerlendirilmesi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 25(1), 244-256. <https://doi.org/10.32709/akusosbil.1053949>
- Koçak, E. (2020). "Sağlık Hizmeti Kaynaklarının Kullanımında Teknik Etkinliğin OECD Ülkeleri Arası Karşılaştırmaları", *Uluslararası Sağlık Yönetimi ve Stratejileri Araştırma Dergisi*, 6(3), 490-502.
- Kocaman, A.M., Mutlu, M., Bayraktar, D. and Araz, Ö.M. (2012). "OECD Ülkelerinin Sağlık Sistemlerinin Etkinlik Analizi", *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 23(4), 14-31.
- Kohl, S., Schoenfelder, J., Fügner, A. and Brunner, J.O. (2019). "The Use of Data Envelopment Analysis (DEA) in Healthcare with A Focus on Hospitals", *Health Care Management Science*, 22(2), 245-286. <https://doi.org/10.1007/s10729-018-9436-8>
- Köse, A. (2024). "Avrupa Birliği ile Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü Üyesi Ülkelerdeki Sağlık Sistemi Performansının Değerlendirilmesi". *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 14(4), 1002-1035.
- Kujawska, J. (2018). "Efficiency of Healthcare Systems in European Countries-the DEA Network Approach", *Metody Ilościowe w Badaniach Ekonomicznych*, 19(1), 60-70. <https://doi.org/10.22630/MIBE.2018.19.1.6>
- Kujawska, J. (2021). "Comparison of the Effectiveness of Health Systems in the European Countries-Two-Stage DEA Model", *37th IBIMA Conference*, Cordoba, Spain, 30-31 May.
- Lee, D. (2016). "Comparison of Efficiency of Healthcare Systems of Countries with Global Competitiveness Using Data Envelopment Analysis", *Global Business and Economics Review*, 21(1), 46-55. <https://doi.org/10.17549/gbfr.2016.21.1.46>
- Lindaas, N. A., Anthun, K.S. and Magnussen, J. (2024). "New Public Management and Hospital Efficiency: The Case of Norwegian Public Hospital Trusts", *BMC Health Services Research*, 24(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s12913-023-10479-7>
- Linna, M., Häkkinen, U. and Magnussen, J. (2006). "Comparing Hospital Cost Efficiency between Norway and Finland". *Health Policy*, 77(3), 268-278.
- Liu, W., Xia, Y. and Hou, J. (2019). "Health Expenditure Efficiency in Rural China Using the Super-SBM Model and the Malmquist Productivity Index", *International Journal for Equity in Health*, 18, 1-13. <https://doi.org/10.1186/s12939-019-1003-5>
- Io Storto, C.L. and Gončiaruk, A.G. (2017). "Efficiency vs Effectiveness: A Benchmarking Study on European Healthcare Systems", *Economy and Society*, 10(3), 1102-115. <https://doi.org/10.14254/2071-789X.2017/10-3/8>
- Lorcu, F. (2008). "Veri Zarflama Analizi (DEA) ile Türkiye ve Avrupa Birliği Ülkelerinin Sağlık Alanındaki Etkinliklerinin Değerlendirilmesi", Yayınlanmamış Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Lupu, D. and Tiganasu, R. (2022). "COVID-19 and the Efficiency of Health Systems in Europe", *Health Economics Review*, 12(1), 14. <https://doi.org/10.1186/s13561-022-00358-y>
- Manavgat, G. and Audibert, M. (2024). "Healthcare System Efficiency and Drivers: Re-Evaluation of OECD Countries for COVID-19", *SSM-Health Systems*, 2, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.ssmhs.2023.100003>
- Mbau, R., Musiega, A., Nyawira, L., Tsofa, B., Mulwa, A., Molyneux, S., Maina, I., Jemuati, J., Normand, C., Hanson, K. and Barasa, E. (2023). "Analysing the Efficiency of Health Systems: A Systematic Review of the Literature", *Applied Health Economics and Health Policy*, 21(2), 205-224. <https://doi.org/10.1007/s40258-022-00785-2>
- Mei, K., Kou, R., Bi, Y., Liu, Y., Huang, J. and Li, W. (2023). "A Study of Primary Health Care Service Efficiency and Its

- Spatial Correlation in China", *BMC Health Services Research*, 23(1), 1-17. <https://doi.org/10.1186/s12913-023-09197-x>
- Mogha, S.K., Yadav, S.P. and Singh, S.P. (2015). "Slack Based Measure of Efficiencies of Public Sector Hospitals in Uttarakhand (India)", *Benchmarking: An International Journal*, 22(7), 1229-1246. <https://doi.org/10.1108/BIJ-12-2013-0122>
- Molander, P. (2025). "Public versus Private Healthcare Systems in the OECD Area—A Broad Evaluation of Performance", *The European Journal of Health Economics*, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10198-025-01767-6>
- Nayar, P. and Ozcan, Y.A. (2008). "Data Envelopment Analysis Comparison of Hospital Efficiency and Quality", *Journal of Medical Systems*, 32(3), 193-199. <https://doi.org/10.1007/s10916-007-9122-8>
- Ngee-Wen, T., Zailani, S., Aziz, A.A. and Ahmad, R. (2020). "Lean Public Emergency Department Efficiency Evaluation by Slack-Based Measure Data Envelopment Analysis", *Malaysian Journal of Medicine & Health Sciences*, 16(2), 105-111.
- O'Neill, L., Rauner, M., Heidenberger, K. and Kraus, M. (2008). "A Cross-National Comparison and Taxonomy of DEA-Based Hospital Efficiency Studies", *Socio-Economic Planning Sciences*, 42(3), 158-189.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), (2022). "Health at a Glance: Europe 2022: State of Health in the EU Cycle", OECD Publishing Paris. <https://doi.org/10.1787/507433b0-en>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2021). "Health at a Glance 2021: OECD Indicators", <https://doi.org/10.1787/ae3016b9-en>. (Accessed: 06.06.2026).
- Ortega-Díaz, M.I. and Martín, J.C. (2022). "How to Detect Hospitals Where Quality Would Not Be Jeopardized by Health Cost Savings? A Methodological Approach Using DEA with SBM Analysis", *Health Policy*, 126(10), 1069-1074. <https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2022.07.010>
- Ozcan, Y. A. (2008). "Health Care Benchmarking and Performance Evaluation: An Assessment Using Data Envelopment analysis (DEA)", Springer US, Boston MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-75448-2_9
- Önen, Z. and Sayın, S. (2017). "Evaluating Healthcare System Efficiency of OECD Countries: A DEA-Based Study", *Operations Research Applications in Health Care Management*, Springer International Publishing, Cham.
- Park, Y.S., Lim, S.H., Egilmez, G. and Szmerkovsky, J. (2018). "Environmental Efficiency Assessment of US Transport Sector: A Slack-Based Data Envelopment Analysis Approach", *Transportation Research Part D: Transportation and Environment*, 61, 152-164. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.09.009>
- Pastorino, R., De Vito, C., Migliara, G., Glocker, K., Binenbaum, I., Ricciardi, W. and Boccia, S. (2019). "Benefits and Challenges of Big Data in Healthcare: An Overview of the European Initiatives", *European Journal of Public Health*, 29(Supplement_3), 23-27. <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckz168>
- Pehlivan, D. and Yiğit, A. (2022). "Türkiye'de Büyükşehir Statüsüne Sahip İllerin Sağlık Hizmetleri Performansının Değerlendirilmesi". *Giresun Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 8(2), 194-211. <https://doi.org/10.46849/guiibd.1191919>
- Popescu, C., Asandului, L. and Fatulescu, P. (2014). "A Data Envelopment Analysis for Evaluating Romania's Health System", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 109, 1185-1189. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.12.609>
- Puig-Junoy, J. (1998). "Measuring Health Production Performance in the OECD", *Applied Economics Letters*, 5(4), 255-259.
- Purohit, B.C. (2016). "Healthcare Sector Efficiency in Gujarat (India): An Exploratory Study Using Data Envelopment Analysis", *Healthcare in Low-Resource Settings*, 4(1), 22-27. <https://doi.org/10.4081/hls.2016.5525>
- Rashidi, S.F. and Olfati, M. (2025). "Using Modified SBM and Decision Tree to Find Targets in Breast Cancer Data". *International Journal of Operations Research and Artificial Intelligence*, 1(1), 29-39. <https://doi.org/10.48314/ijorai.v1i1.54>
- Retzlaff-Roberts, D., Chang, C.F. and Rubin, R.M. (2004). "Technical Efficiency in the Use of Health Care Resources: A Comparison of OECD Countries", *Health Policy*, 69(1), 55-72.
- Safeguarding Health in Conflict Coalition (2020). "Health Workers At Risk: Violence Against Health Care", <https://reliefweb.int/report/world/health-workers-risk-violence-against-health-care>, (Accessed: 10.01.2024).
- Santos, S.P. and Amado, C.A. (2012). "Using Data Envelopment Analysis for Formative Evaluation of Radiotherapy Services: An Exploratory Study", *Advanced Decision Making Methods Applied to Health Care*, (Editors: Elena T., Angela, T.), Springer Milan, Milano.
- Schwerdtle, P.N., Connell, C.J., Lee, S., Plummer, V., Russo, P.L., Endacott, R. and Kuhn, L. (2020). "Nurse Expertise: A Critical Resource in the COVID-19 Pandemic Response", *Annals of Global Health*, 86(1), 49, 1-5. <https://doi.org/10.5334%2Faogh.2898>
- Sherman, H. D. (1984). "Hospital Efficiency Measurement and Evaluation: Empirical Test of A New Technique", *Medical Care*, 22(10), 922-938.

- Shetty, U. and Pakkala, T.P.M. (2010). "Technical Efficiencies of Healthcare System in Major States of India: An Application of NP-RDM of DEA Formulation", *Journal of Health Management*, 12(4), 501-518. <https://doi.org/10.1177/097206341001200406>
- Sinimole, K.R. (2023). "Healthcare Efficiency and the Best Practices of Health Systems Across the World during COVID-19 Pandemic", *International Journal of Healthcare Management*, 16(1), 1-11. <https://doi.org/10.1080/20479700.2022.2126672>
- Song, Q., Ye, A., Zhou, M., Chen, T. And Jiang, W. (2025). "Based on Regional Heterogeneity: Measurement of Hospital Service Efficiency and Analysis of Spatial Effects", *Frontiers in Public Health*, 13, 1556737. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1556737>
- Stefko, R., Gavurova, B. and Kocisova, K. (2018). "Healthcare Efficiency Assessment Using DEA analysis in the Slovak Republic", *Health Economics Review*, 8(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s13561-018-0191-9>
- Şahin, İ. (1999). "Sağlık Kurumlarında Göreceli Verimlilik Ölçümü: Sağlık Bakanlığı Hastanelerinin İllere Göre Karşılaştırmalı Verimlilik Analizi", *Amme İdaresi Dergisi*, 32(2), 123-145.
- Şenol, O. and Gençtürk, M. (2017). "Veri Zarflama Analiziyle Kamu Hastaneleri Birliklerinde Verimlilik Analizi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 29, 265-286.
- Tone, K. (2004). "Dealing with Undesirable Outputs in DEA: A Slacks-Based Measure (SBM) Approach". NAPW III, Toronto.
- Valdmanis, V., Walker, D. and Fox-Rushby, J. (2003). "Are Vaccination Sites in Bangladesh Scale Efficient?", *International Journal of Technology Assessment in Health Care*, 19(4), 692-697. <https://doi.org/10.1017/S0266462303000655>
- Varabyova, Y. and Schreyögg, J. (2013). "International Comparisons of the Technical Efficiency of the Hospital Sector: Panel Data Analysis of OECD Countries Using Parametric and Non-Parametric Approaches", *Health Policy*, 112(1-2), 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2013.03.003>
- World Health Organization Global Health Observatory (WHO GHO), (2023). "World Health Organization Global Health Observatory Database", <https://apps.who.int/gho/data/node.main>, (Accessed: 05.06.2023).
- World Health Organization Global Healthcare Expenditure (WHO GHE), (2023). "World Health Organization Global Healthcare Expenditure Database", <https://apps.who.int/nha/database/Select/Indicators/en>, (Accessed: 10.11.2023).
- World Health Organization Sustainable Development Goals (WHO SDGs), (2023). "World Health Organization Sustainable Development Goals", <https://www.who.int/europe/about-us/our-work/sustainable-development-goals>, (Accessed: 14.09.2023).
- Yetim, B., Sönmez, S., Konca, M. and İlğün, G. (2023). "Benchmarking Countries' Technical Efficiency Using AHP-Based Weighted Slack-Based Measurement (W-SBM): A Cross-National Perspective", *Health Policy and Technology*, 12(3), 100782. <https://doi.org/10.1016/j.hlpt.2023.100782>
- Yiğit, V. (2016). "Hastanelerde Teknik Verimlilik Analizi: Kamu Hastane Birliklerinde Bir Uygulama", *Süleyman Demirel Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 7(2), 9-16.
- Yıldırım, H.H. and Yıldırım, T. (2011). "Avrupa Birliği'ne Üyelik Sürecinde Türkiye Sağlık Sektörü", İmaj Yayınevi, Ankara.
- Zarrin, M. (2023). "A Mixed-Integer Slacks-Based Measure Data Envelopment Analysis for Efficiency Measuring of German University Hospitals", *Health Care Management Science*, 26(1), 138-160. <https://doi.org/10.1007/s10729-022-09620-5>
- Zhou, P.A.B.W., Ang, B.W. and Poh, K.L. (2006). "Slacks-Based Efficiency Measures for Modeling Environmental Performance", *Ecol Econ*, 60(1), 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.12.001>

The Impacts of Firms' Research and Development Capacities on Innovation Development*

Saim Aydın¹ , Erdinç Koç² 

ABSTRACT

Purpose: The main objective of this study is to measure the effects of R&D capacities of firms operating in Türkiye, registered in Borsa İstanbul and having R&D centers on innovation development.

Methodology: In this research, the panel data analysis technique is applied. In this research, innovation (defined as the total number of patent, utility model, design, and trademark filings) is considered the dependent variable. The intensity of R&D expenditures and the number of personnel engaged in R&D activities serve as independent variables, while firm age is treated as a control variable.

Findings: As a result of the analysis, it was determined that both the number of personnel working in R&D activities and the intensity of R&D expenditures had a positive but not significant effect on innovation.

Originality: As far as the authors' is aware, no research has been carried out at the firm level concerning the impact of the workforce employed in R&D centers on innovation. This study adds to the existing body of knowledge by investigating the influence of firms' R&D capabilities on innovation advancement through the number of personnel engaged in R&D activities.

Keywords: Innovation, R&D Personnel, R&D Intensity, Firm Age, Firm Size, Panel Data Analysis.

JEL Codes: M11, O31, O32.

Firmaların Araştırma ve Geliştirme Kapasitelerinin İnovasyon Geliştirme Üzerindeki Etkileri

ÖZET

Amaç: Bu çalışmanın temel amacı Türkiye'de faaliyet gösteren, Borsa İstanbul'a kayıtlı ve Ar-Ge merkezi olan firmaların Ar-Ge kapasitelerinin inovasyon geliştirme üzerindeki etkilerini ölçmektir.

Yöntem: Bu çalışmada panel veri analizi tekniği uygulanmıştır. Bu çalışmada inovasyon (patent, faydalı model, tasarım ve ticari marka başvurularının toplam sayısı olarak tanımlanmaktadır) bağımlı değişken olarak ele alınmaktadır. Ar-Ge harcamalarının yoğunluğu ve Ar-Ge faaliyetlerinde çalışan personel sayısı bağımsız değişkenler olarak, firma yaşı ise kontrol değişkeni olarak ele alınmıştır.

Bulgular: Analiz sonucunda, hem Ar-Ge faaliyetlerinde çalışan personel sayısının hem de Ar-Ge harcamaları yoğunluğunun inovasyona pozitif yönlü fakat anlamlı bir etkide bulunmadığı tespit edilmiştir.

Özgünlük: Yazarların bildiği kadarıyla, Ar-Ge merkezlerinde istihdam edilen işgücünün inovasyon üzerindeki etkisine ilişkin firma düzeyinde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma, firmaların Ar-Ge yeteneklerinin Ar-Ge faaliyetlerinde çalışan personel sayısı aracılığıyla inovasyonun ilerlemesi üzerindeki etkisini araştırarak mevcut bilgi birikimine katkıda bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İnovasyon, Ar-Ge Personeli, Ar-Ge Yoğunluğu, Firma Yaşı, Firma Büyüklüğü, Panel Veri Analizi.

JEL Kodları: M11, O31, O32.

* This study is derived from Saim Aydın's Doctorate Thesis entitled 'Examining the Factors Affecting Innovation with Panel Data Analysis', conducted under the supervision of Assoc. Prof. Dr. Erdinç Koç at Bingöl University Institute of Social Sciences.

¹ Bingöl University, Institute of Social Sciences, Department of Business Administration, Bingöl, Türkiye

² Malatya Turgut Özal University, Faculty of Social Sciences and Humanities, Department of Management Information Systems, Malatya, Türkiye

Corresponding Author: Saim Aydın, saydin@bingol.edu.tr

DOI: 10.51551/verimlilik.1703375

Research Article | Submitted: 21.05.2025 | Accepted: 28.08.2025

Cite: Aydın, S. and Koç, E. (2025). "The Impacts of Firms' Research and Development Capacities on Innovation Development", *Verimlilik Dergisi*, 59(4), 909-924.

1. INTRODUCTION

Since the early 20th century, innovation, which has become an important issue in developed economies, is a complex concept that many disciplines address from different perspectives. Austrian economist Joseph Schumpeter defined innovation, which is derived from the Latin word *innovatus* and expressed with the term “innovation” According to the lexicon of the Turkish Language Association, in the capacity of “the creation and implementation of new alternatives for new products and services, business processes or markets” in his work titled *Economic Development Theory* published in 1934 (Schumpeter, 1934: 84).

Innovation has become an indispensable tool for economic growth, social development and enhancing the standard of living amid the swiftly evolving dynamics of our era. Therefore, states that develop innovation-oriented policies and strategies have the opportunity to have a stronger and more stable position in the global arena (Yılmaz and İncekaş, 2018). Technological developments and innovative initiatives are known to produce positive results in terms of reducing unemployment, increasing social welfare and strengthening international competitiveness (Carlsson and Eliasson, 2003). Therefore, governments invest heavily in innovation and develop appropriate policies in this field.

Today, the rapid change in communication and technology transforms consumer behavior and forces companies, like countries, to constantly innovate. This leads to increased competition and firms offering new products and services (Bozyiğit, 2020: 19). Therefore, the products of companies that remain passive in the face of changing consumer demands and rapidly evolving technology may be replaced by new products offered by their competitors (Wulfen, 2015: 54).

Examining the factors affecting innovation has long been a major theme in the literature, with numerous studies adopting different approaches and methods. The main factors thought to affect innovation are:

- *R&D expenditure*, a central driver of innovation capacity (Kondo, 1999; Huergo, 2006; Çalıpınar and Baç, 2007; Mercan et al. 2011; Güloğlu and Tekin, 2012; Zemplerová and Hromádková, 2012; Costa et al., 2018; Zhu et al., 2019; Kayahan Karakul and Özeydin, 2019; Hussen and Çokgezen, 2020; Dong et al., 2020; Şahin, 2023).
- *Firm size*, which indicates the scale and market reach of the company and its potential to commit resources to innovation (Bhattacharya and Bloch, 2004; Çalıpınar and Baç, 2007; Terzioğlu et al., 2008; Raymond et al., 2009; Özücü et al., 2011; Ren et al., 2015; Costa et al., 2018; Zhu et al., 2019; Hussen and Çokgezen, 2020; Ning et al., 2023).
- *Number of employees*, reflecting the human capacity available for innovation-related activities (Çalıpınar and Baç, 2007; Özücü et al., 2011; Ezanoğlu and Çetin, 2021).
- *Education level of employees*, which enhances the ability to generate and implement innovative ideas (Hussen and Çokgezen, 2020).
- *Market-related factors*, including market structure, profitability, legal framework, level of competition, technology adoption, and managerial capability in adopting new technologies (Bhattacharya and Bloch, 2004; Özücü et al., 2011; Terzioğlu et al., 2008; Zhu et al., 2019; Hussen and Çokgezen, 2020; Jung and Yoo, 2022), as well as the degree of internationalisation and export rate (Ren et al., 2015; Hussen and Çokgezen, 2020) and perceived market dominance by incumbent firms (Costa et al., 2018).
- *Financial factors*, such as access to bank loans and the presence of internal and external investors (Costa et al., 2018; Jiang and Jiang, 2024; Shen, 2024).

Moreover, various analysis methods have been employed in studies investigating these factors. These methods include panel data analysis (Huergo, 2006; Raymond et al., 2009; Costa et al., 2018; Zhu et al., 2019; Jung and Yoo, 2022; Jiang and Jiang, 2024), multiple regression analysis (Kondo, 1999; Çalıpınar and Baç, 2007; Kayahan Karakul and Özeydin, 2019; Farkhod, 2020; Shen, 2024) and correlation and regression analysis (Özücü et al., 2011), the t-test and chi-squared test (Şendoğdu and Öztürk, 2013), correlation and logistic regression analysis (Hussen and Çokgezen, 2020), and ordinary least squares analysis (Ning et al., 2023).

It has been observed that the R&D personnel variable, which serves as the foundation for innovation capability development and the focal point of corporate production, has received minimal attention in the extant literature (Zhu et al., 2019). A review of the relevant literature revealed a limited number of studies using R&D employment as an independent variable (Huergo, 2006; Wencong et al., 2014). In his study, Huergo (2006) obtained R&D employment data by posing a question to firm officials regarding the proportion of personnel involved in R&D operations relative to the total number of employees, utilising a survey methodology. This study investigates the impact of the independent variables of the number of workforce in R&D activities and the intensity of R&D expenditures, which are not found to be used as independent variables in the extant literature, and the effects of the firm age variable on innovation. The present research provides a unique addition to the extant literature by addressing the factors influencing innovation within enterprises. This study utilises a panel data analysis of firms with R&D centres registered

in Borsa Istanbul (BIST) to examine the impact of the quantity of employees involved in R&D activities and R&D expenditures on innovation. The research provides strategic insights for businesses to enhance their innovation and offers a guiding framework for academia and policymakers in developing and sustaining innovation policies. The study is divided into five sections. Following the introduction, the second section presents a concise brief summary of the extant existing research on the factors influencing innovation. The third section provides detailed information regarding the study's objectives, methodological approach, and the data set utilized. The fourth section of this research showcase the findings of the evaluation. The final part of the text contains the conclusion.

2. LITERATURE REVIEW

Innovation has been identified as a critical element in enhancing the competitiveness of firms in the context of rapidly changing market conditions. A plethora of factors believed to influence innovation development have been the subject of scrutiny in the extant literature. Innovation, as an overarching concept, has been typologized in various studies as product/service, process, market, business model, communication and organisational innovation (Raja and Wei, 2015; Stornelli et al., 2021). The present study focuses on the issue of product/service innovation. When the studies with product/service innovation as the explained (dependent) variable are examined, it is observed that indicators obtained through qualitative and quantitative research have been identified in different studies as representatives of innovation. In order to overcome the bias problem of indicators obtained by qualitative research, indicators obtained by quantitative research are frequently used in studies (Ponta et al., 2021). In quantitative studies, the following indicators are considered to represent innovation: the number of patent applications (Kondo, 1999; Nagaoka et al., 2010; Burrus et al., 2018); the number of utility models (Beneito, 2006; Olubiye et al., 2025); the number of novel merchandise (Hagedoorn and Cloudt, 2003; Kayahan Karakul and Özyayın, 2019); the number of designs (Ghazal and Zulkhibri, 2015; Kayahan Karakul and Özyayın, 2019); and the number of trademarks (Greenhalgh and Rogers, 2012).

In their systematic literature review, Newaz et al. (2022) stated that there are 102 factors affecting innovation. The categorisation of these factors has been subject to variation in different studies. In their seminal study, Özdemir Güngör and Gözliü (2012) advanced a categorisation of the factors that they believed to exert influence on product and process innovation, distinguishing among intrinsic and extrinsic elements. Intrinsic factors refer to the elements that are owned and controlled by the firm, while extrinsic factors refer to elements that are related to the firm but over which it has limited or no control. Heirman and Clarysse (2007) and Hidayat and Pok (2025) categorised the factors affecting innovation under the headings of tangible and intangible factors. The tangible factors that have been identified as contributing to the phenomenon under investigation include firm size, research and development expenditures, the number of R&D workers, and firm age. Intangible factors include innovation culture, collaborations, intellectual knowledge and management support. The present study concentrates on the tangible factors that have an impact on innovation.

The effect of firm size regarding innovation has frequently been investigated in the literature. Bhattacharya and Bloch (2004), Huergo (2006), Terzioğlu et al. (2008), Hussen and Çokgezen (2020), Ning et al. (2023), and Shen (2024) found a favorable influence of firm size on innovation. However, Costa et al. (2018) and Jung and Yoo (2022) argue that firm size has no effect on innovation. Zhu et al. (2019), on the other side, found a 'U'-shaped association between firm size and innovation. Similarly, Terzioğlu et al. (2008) and Zhu et al. (2019) state that the utilisation of technology positively affects innovation, whereas Farkhod (2020) argues that this relationship does not exist.

Another noteworthy research topic is the effect of market framework on innovation. While Bhattacharya and Bloch (2004) and Jung and Yoo (2022) found a association between market framework and innovation, Costa et al. (2018) found a negative one. Furthermore, Bhattacharya and Bloch (2004) and Çalipınar and Baç (2007) emphasise the positive effects of export and import activities on innovation. Zhu et al. (2019), in his study of export and import variables, found that they had a 'U'-shaped effect on innovation.

Important findings on how R&D activities shape firms' innovation capacity can also be found in the literature. Çalipınar and Baç (2007) and Costa et al. (2018), however, they emphasise that there is no association between R&D expenditure and innovation. Conversely, Kondo (1999), Bhattacharya and Bloch (2004), Terzioğlu et al. (2008), Raymond et al. (2009), Ren et al. (2015), Zhu et al. (2019), Kayahan Karakul and Özyayın (2019), Farkhod (2020), and Hussen and Çokgezen (2020) found that R&D expenditure positively impacts innovation.

Huergo (2006) and Kayahan Karakul and Özyayın (2019) state that the number of personnel working in research and development activities has a favorable impact regarding innovation. Zhu et al. (2019) also states this. However, Özücü et al. (2011) state that the number of firm employees has a favorable impact regarding innovation, while Çalipınar and Baç (2007) and Şendoğdu and Öztürk (2013) state that it has no

effect. Çalipınar and Baç (2007) also state that advertising expenditure has a favorable impact regarding innovation.

The effect on variables like firm age, quality certificates and intellectual knowledge on innovation has also been the subject of studies. While Çalipınar and Baç (2007), Şendoğdu and Öztürk (2013), Hussen and Çokgezen (2020) and Jung and Yoo (2022) argue that firm age has no effect on innovation, Ning et al. (2023) argue for a negative effect. Terzioğlu et al. (2008) on quality certificate ownership, Özücü et al. (2011) on legal structures, Farkhod (2020) on intellectual knowledge, Hussen and Çokgezen (2020) on managers' education level and Şendoğdu and Öztürk (2013), Jiang and Jiang (2024) on bank loans have positive effects on innovation. However, Şendoğdu and Öztürk (2013) stated that the education level of managers has no effect on innovation.

This research employs panel data analysis to examine the impact of independent variables such as R&D expenditure intensity and R&D on firm-level innovation, with the aim of contributing to related literature. Specifically, the impact of innovation indicators (the total number of patent, utility model, design, and trademark submission), considered as the explained variable, and the independent variables (R&D spending intensity and the number of staff involved in R&D) on innovation development in relation to firm age is examined. The analysis of the effect of firms' R&D capacities regarding innovation development is an important reference source for formulating innovation policies. Furthermore, the study's findings provide insights into the applicability of R&D and innovation strategies across a broad spectrum of firms, ranging from SMEs to large firms. The aim is to provide a robust framework that enables the steps taken for innovation development to be based on concrete foundations.

3. METHODOLOGY

The essential goal of this research is to measure the effect of R&D capacity on the innovative development of firms operating in Türkiye that are registered with BIST and have an R&D centre. To this end, the interaction between innovation (defined as the total number of patent, utility model, design and trademark applications) and the intensity of R&D spending and the number of staff engaged in R&D activities (used as independent variables) under the influence of firm age is analyzed through the panel data approach with the EViews 13 and Stata-17 programs.

Panel data analysis is a powerful method that considers the dynamic structure and heterogeneity of data by examining cross-sectional observations of entities such as countries, company, households, and individuals at a given point in time (Baltagi, 2008: 123; Yerdelen Tatoğlu, 2024: 2). This method enables detailed examination of the relationships between different time periods and firms.

Panel data models constructed with panel data typically face scenarios where the quantity of cross-sectional units (N) surpasses the number of time periods (T) ($N > T$) (Kıral and Çelik, 2018: 1015). The panel data model is typically constructed as shown below (Yerdelen Tatoğlu, 2024: 4):

$$Y_{it} = \alpha_{it} + \beta_{kit}X_{kit} + U_{it} \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T$$

In this model, Y is the dependent variable, X_k the independent variables, α the constant, β the slope parameters, and U the error term. The i subscript indicates units and the t subscript indicates time. The presence of sub-indices i and t on the variables and the error term indicates that the model uses a panel dataset.

This study developed two panel regression models with a view to examining the relationship between firms' R&D capacities and innovation. The initial model appraises the impact of the number of R&D personnel on innovation, while the second model focuses on the impact of R&D expenditures. In both models, firm size and firm age were included as control variables. The estimated coefficients are representative of the marginal effects of the independent variables on innovation. In order to ascertain the appropriateness of the panel data structure, a series of specification tests were employed. The F-test was employed to investigate the existence of unit effects, the Lagrange Multiplier (LM) test was applied to ascertain the presence of time effects, and the Hausman (1978) test was utilised to determine the distinction between fixed-effects and random-effects estimators. In terms of the stationarity of the series, the Cross-sectionally Augmented IPS (CIPS) test developed by Pesaran (2007) was employed. Finally, in order to address heteroskedasticity, the Levene–Brown–Forsythe test was applied.

Innovation (the sum of the number of patent, utility model, design and trademark applications) is used as the dependent variable, while the intensity of R&D spendings and the natural logarithm of the number of R&D personnel are used as independent variables. The natural logarithm of the number of years since the date of establishment, which represents the age of firms, is used as the control variable in the analysis. Detailed information on the variables is presented in Table 1.

Table 1. Descriptive information on variables

<i>Code</i>	<i>Name</i>	<i>Explanation</i>	<i>Source of Data</i>	<i>References</i>
<i>Dependent Variable</i>				
LNINOV	Innovation	Natural logarithm of the sum of the number of patent, utility model, design and trademark applications	Obtained from the web page of the Turkish Patent Office. (https://www.turkpatent.gov.tr/)	Karaöz and Albeni (2004), Ghazal and Zulkhibri (2015), Kayahan Karakul and Özaydın (2019), Lee (2024), An et al., (2025)
<i>Independent Variables</i>				
LNARGEAL	Number of Personnel Working in R&D activities	The natural logarithm of the total number of personnel working in the firm's R&D center is taken.	The annual reports of the companies published on KAP, sustainability reports published on the websites of the companies and correspondence with some firms were obtained. (https://www.kap.org.tr/tr/Sektorler)	Huergo (2006), Mercan et al., (2011), Zhu et al. (2019), Kayahan Karakul and Özaydın (2019),
ARGEYG	R&D Expenditure Intensity	Total annual R&D expenditures of the firm are divided by net sales.	Obtained from the financial statements of the companies published on KAP. (https://www.kap.org.tr/tr/Sektorler)	Kondo (1999), Bhattacharya and Bloch (2004), Huergo (2006), Çalipınar and Baç (2007), Mercan et al., (2011), Zemplerinová and Hromádková (2012), Zhu et al. (2019), Kayahan Karakul and Özaydın (2019), Hussen and Çokgezen (2020), Dong et al., 2020, Şahin (2023)
<i>Control Variables</i>				
LNFYSL	Firm Age	The natural logarithm of the years since the establishment of the firm has been taken.	Obtained from companies' websites.	Lægreid et al., (2011), Chen et al., (2014), Terjesen and Patel(2017), Demircioğlu et al., (2019), Ezanoğlu and Çetin (2021), Ning et al., (2023), Shen (2024)
LNFBYK	Firm Size	The natural logarithm of the company's total annual assets was used as a control variable.	Obtained from companies' financial statements published on KAP. (https://www.kap.org.tr/tr/Sektorler)	Cohen and Klepper (1996), Martinez-Ros (1999), Lian et al. (2022), Ning et al. (2023), Shen (2024), Feng and Fang (2025)

As shown in Equations 1 and 2 below, a different model has been developed for each independent variable described in Table 1. The objective for developing two separate models is to estimate and compare the marginal effects of the number of R&D personnel and R&D expenditures on innovation. With this method, the research findings are likely to be comprehensive and trustworthy since the impacts of each independent variable are separated and clear.

Model (1) was created for measuring the effect of the number of personnel working in R&D activities on innovation is given in Equation 1.

$$Lninov_{it} = \alpha + \beta_1 Lnargecal_{it} + \beta_2 Lnfysi_{it} + \beta_3 Lnfbyk_{it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

Model (2) for measuring the impact of R&D expenditure intensity on innovation is presented in Equation 2.

$$Lninov_{it} = \alpha + \beta_1 Argeyg_{it} + \beta_2 Lnfysi_{it} + \beta_3 Lnfbyk_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

The dataset used in the study focused on the R&D activities of firms registered on the BIST. Of the 703 firms registered on the BIST between 2009 and 2023, 71 were identified as having made R&D expenditure during this period. Of these, only 28 applied for at least one intellectual property right, such as patents, utility models, designs or trademarks, during this period. Additionally, although data on the number of personnel working in R&D activities was available for 18 firms, the analysis was based on 270 observations reflecting sectoral diversity. Data were obtained from the Public Disclosure Platform (KAP), the Turkish Patent Office, and the firms' websites.

4. FINDINGS

Firstly, the study provides descriptive statistics about the variables, and then calculates the correlation coefficients between them. The models were subsequently estimated using a random effects approach. Panel models are generally divided into fixed effect and random effect models. The Hausman test is then used to determine whether a fixed or random effects model should be used (Dong et al., 2020; Aslan, 2022). The F-test is used to test fixed effects and the LM-test is used to test random effects in the model. Following the F and LM tests, it was determined that both fixed and random effects were present in the model. Therefore, a Hausman test (1978) was conducted to determine which estimator to use. After the model was determined, it was tested for cross-section dependence.

Before estimating the model, tests were applied to detect deviations from the assumptions relating to heteroscedasticity, autocorrelation and inter-unit correlation. These tests revealed that the model is subject to problems of heteroscedasticity, autocorrelation, and cross-sectional dependence. The models were then interpreted using regression estimation.

Table 2. Descriptive statistics of variables

	<i>LNINOVLNARGE</i>	<i>CAL ARGEYG</i>	<i>LNFYSI</i>	<i>LNFBYK</i>	
Mean	3.2613	5.4702	0.0271	3.9888	22.1783
Median	3.2770	5.4697	0.0083	4.0431	22.2287
Maximum	7.1899	8.8142	0.6343	4.6821	28.6815
Minimum	0.6931	2.0794	0.0002	2.4849	17.4342
Standard Dev.	1.5014	1.6076	0.0748	0.4429	2.1345
Jarque-Bera	6.8062	9.9307	8044.2610	26.9025	3.9225
Probability	0.0333	0.0070	0.0000	0.0000	0.1407
Numb. of Obs.	270	270	270	270	270

Descriptive statistics for the variables used in the study are presented in Table 2. Table 2 shows that the mean natural logarithm of innovation (LNINOV) for the 18 companies is 3.26. When examining the standard deviation values, it is understood that the highest volatility is 2.1345 in firm size (LNFBYK), and the lowest volatility is 0.0748 in R&D expenditure intensity (ARGEYG). However, it can be stated that, in general, the variables do not volatile around a high variance. According to the Jarque-Bera normality test, none of the variables exhibit a normal distribution.

The correlation coefficients of the variables used in the analysis are provided in Table 3. Statistically, the correlation coefficient can take a value between -1 and 1, and the sign of the coefficient indicates the direction of the relationship between the variables. A coefficient close to one in absolute value indicates a strong relationship, while a coefficient close to zero indicates a weak relationship.

Table 3. Correlation coefficient of variables

	<i>LNINOV</i>	<i>LNARGECAL</i>	<i>ARGEYG</i>	<i>LNFYSI</i>	<i>LNFBYK</i>
<i>LNINOV</i>	1				
<i>LNARGECAL</i>	0.6987	1			
<i>ARGEYG</i>	-0.1377	0.0193	1		
<i>LNFYSI</i>	0.0246	-0.0579	-0.2933	1	
<i>LNFBYK</i>	0.4939	0.6459	-0.3316	0.2278	1

According to Table 3, the natural logarithm of the number of personnel working in R&D activities (Lnargecal), which is used as an independent variable in the models, has a correlation coefficient of (-0.0579) and (0.6459), respectively; the correlation between the R&D expenditure intensity (Argeyg) variable, another independent variable, and the control variables Lnfyys and Lnfbk is (-0.2933) and (-0.3316), respectively. Since no high correlation was detected between the explanatory variables and the control variables used in the model, there is no multicollinearity issue in the model (Gujarati, 2003: 359).

A fundamental consideration in panel data analysis pertains to the identification of potential cross-sectional dependence among units. Ignoring cross-sectional dependence can result in deviations and statistical inconsistencies in the analysis results (Alataş and Peker, 2016). Consequently, in order to obtain reliable and valid results, it is necessary to perform tests for cross-sectional dependence. In the context of panel data analysis, a pivotal initial step entails the identification of potential cross-sectional dependence among variables. This is undertaken prior to the execution of unit root tests, the purpose of which is to ascertain the stationarity of the series. In the absence of observed dependence between units, first-generation unit root tests are conventionally favoured. The most significant disadvantage of first-generation tests is that they ignore horizontal section dependence (Belke et al., 2019). Therefore, if the data set has cross-sectional dependence, it would be more appropriate to use second-generation unit root tests that accept cross-sectional dependence (Çiğdem and Altaylar, 2020). In this context, the cross-sectional dependence of the variables included in the analysis was tested using the Pesaran Scaled LM (2004), and Bias-Corrected Scaled LM (Baltagi et al., 2012) tests. The findings are presented in Table 4.

Table 4. Cross-sectional dependency test for variables

<i>Variables</i>	<i>Pesaran scaled LM</i>	<i>Bias-corrected scaled LM</i>	<i>Pesaran CD</i>
LNINOV	10.2859* (0.0000)	9.6430* (0.0000)	4.8690* (0.0000)
LNARGEAL	67.8617* (0.0000)	67.2188* (0.0000)	32.6201* (0.0000)
ARGEYG	17.4523* (0.0000)	16.8094* (0.0000)	1.94492* (0.0000)
LNFYYS	122.3359* (0.0000)	121.6931* (0.0000)	47.8853* (0.0000)
LNFBK	111.9939* (0.0000)	111.3511* (0.0000)	45.9289* (0.0000)

Note: Statistical significance at the 1%, 5%, and 10% levels are represented by *, **, and ***, respectively.

The Pesaran Scaled LM, Bias-Corrected Scaled LM, and Pesaran Cd tests applied to the panel data set rejected the null hypothesis H₀, which suggests that there is no cross-sectional dependence, at the 1% significance level. The findings indicate the presence of cross-sectional dependence among all units incorporated in the analysis. Consequently, second-generation unit root tests that take cross-sectional dependence into account were employed to ascertain the stationarity levels of the series.

The results of the cross-sectionally augmented IPS (CIPS) test, a second-generation unit root test proposed by Pesaran (2007), indicate that the variables lninnov, argeyg, lnargecal, and lnfbk are stationary in both the intercept and intercept+trend models. This finding suggests that the variables in question can be utilised directly in panel data analyses. Conversely, the lnfyys variable was found to be non-stationary under the intercept model but stationary under the intercept+trend model. This discrepancy is indicative of the presence of a time trend effect in the series. The experimental tests were conducted at significance levels of 1%, 5%, and 10%, with the maximum lag length set to 2.

Table 5. Second-generation panel data unit root test for variables

<i>Variables</i>	<i>Model Type</i>	<i>Stat.</i>	<i>Critical Values</i>			<i>P Value</i>	<i>Stationary State</i>
			<i>%1</i>	<i>%5</i>	<i>%10</i>		
LNINOV	Intercept	-3.3500	-2.45	-2.22	-2.11	<0.01	Stationary
	Intercept+Trend	-3.5270	-3.00	-2.77	-2.65	<0.01	Stationary
ARGEYG	Intercept	-3.9950	-2.45	-2.22	-2.11	<0.01	Stationary
	Intercept+Trend	-3.5700	-2.98	-2.76	-2.98	<0.01	Stationary
LNARGEAL	Intercept	-3.1970	-2.45	-2.22	-2.11	<0.01	Stationary
	Intercept+Trend	-3.5350	-2.98	-2.76	-2.64	<0.01	Stationary
LNFYYS	Intercept	-1.5970	-2.45	-2.22	-2.11	>0.10	Not stationary
	Intercept+Trend	-3.46610	-2.98	-2.76	-2.64	<0.01	Stationary
LNFBK	Intercept	-3.5480	-2.45	-2.22	-2.11	<0.01	Stationary
	Intercept+Trend	-3.9420	-3.00	-2.77	-2.65	<0.01	Stationary

Note: Statistical significance at the 1%, 5%, and 10% levels are represented by *, **, and ***, respectively.

To evaluate the appropriateness of the panel data structure, both the fixed and random effects models are checked for unit and time effects with F and LM tests. In the presence of both unit and time effects, the most appropriate estimator is determined by the Hausman test (1978) (Yerdelen Tatoğlu, 2024: 195). The results of the F, LM and Hausman tests for Model (1) are presented in Table 4.

Table 6. F, LM and Hausman test results for Model (1)

<i>Test</i>	<i>Stat.</i>	<i>Prob.</i>	<i>Result</i>
F _{Unit}	0.2620	0.9988	There is no unit effect
F _{Time}	1.4917	0.9975	There is no time effect
F _{Unit-Time}	0.8698	0.6650	There is no unit-time effect
LM _{Unit}	0.0000	1.0000	There is no unit effect
LM _{Time}	1.8750***	0.0850	There is a time effect
LM _{Unit-Time}	1.8750	0.3920	There is no unit-time effect
Hausman	1.3425	0.7191	Random effect model

Note: Statistical significance at the 1%, 5%, and 10% levels is represented by *, **, and ***, respectively.

As demonstrated in Table 6, the findings of the F and LM tests, which were conducted to ascertain the presence of fixed and random effects, indicated that the unit and unit-time effects did not attain statistical significance. However, the LM test revealed that the time effect was significant at the 10% level of confidence. In this context, the Hausman (1978) test was employed to determine the most appropriate model – whether fixed or random – to employ. It is evident from the findings of this study that the null hypothesis (H₀) postulating the existence of random effects has been substantiated. Consequently, the decision was taken to employ the random effects model.

For cross-sectional dependence, the Breusch-Pagan LM (1980) test is more effective when $N < T$, the Pesaran scaled LM (2004) test is more effective when $N = T$, and the Pesaran CD (2004) test is more effective when $N > T$ (Yerdelen Tatoğlu, 2024: 258). The random effects model determined by the Hausman (1978) test was tested using the Pesaran CD (2004) test since the data used in the analysis had $N > T$, and the results are presented in Table 7. According to the results of the Pesaran CD test presented in Table 7, the null hypothesis (H₀), which states that there is no cross-sectional dependence at a 1% significance level, is rejected. Therefore, cross-sectional dependence exists in the model.

Normal panel regression estimations are based on the assumption of no autocorrelation or variance issues. However, it is necessary to test for deviations from these assumptions. To determine the need for robust estimators in estimating Model (1), Table 7 presents the results of the Levene–Brown–Forsythe test for heteroscedasticity, the D-W and Baltagi-Wu tests for autocorrelation, and the Pesaran test for cross-sectional dependence.

The presence of heteroscedasticity was tested using the test statistics (W_0 , W_{50} , and W_{100}) developed by Levene (1960) and Brown and Forsythe (1974). In this study, as suggested by Karaş and Çelikkol (2025), the problem of heteroscedasticity in the random effects model was analysed using the Levene-Brown-Forsythe test. These tests provide more robust results in situations where the Gaussian distribution assumption underlying traditional F tests is not valid. Brown and Forsythe proposed measures such as the median and trimmed mean, which are more resistant to outliers, instead of the mean used in Levene's test statistic (Yerdelen Tatoğlu, 2024: 265). Levene-Brown-Forsythe tests conducted using the mean and standard deviations of the residuals for 18 units in the model were compared with the Snedecor F table with 17 degrees of freedom and 252 degrees of freedom, and the null hypothesis that “the variances of the units are equal” was rejected. This result indicates that there is a problem of heteroscedasticity in the model.

Table 7. Heteroscedasticity, autocorrelation and cross-sectional dependence test for Model (1)

<i>Tests</i>	<i>Stat.</i>	<i>Prob.</i>	<i>Result</i>
Heteroscedasticity (Levene-Brown-Forsythe)	W0=2.1390* W50=1.9260** W100=2.1313*	0.0065 0.0168 0.0067	There is a problem of heteroscedasticity
Autocorrelation (<i>D-W and Baltagi-Wu Tests</i>)	Durbin-Watson 2.2546	Baltagi-Wu LBI 2.4171	There is no autocorrelation problem
Cross-Sectional Dependence Test (Pesaran Test)	2.9650*	0.0030	There is a cross-sectional dependence problem

Note: Statistical significance at the 1%, 5%, and 10% levels is represented by *, **, and ***, respectively.

The Durbin-Watson (1950) and Baltagi-Wu LBI statistics were used for the autocorrelation test. A Durbin-Watson value below 2 indicates a first-order autocorrelation problem in the random effects model (Yerdelen Tatoğlu, 2024: 249). Since the values obtained from both tests were greater than 2, it was concluded that there was no autocorrelation problem.

Pesaran (2004) proposed the Pesaran CD test statistic to test for the presence of cross-sectional dependence when N is greater than T (Yerdelen Tatoğlu, 2024: 259). Since the p-value was less than 0.05 in the test results, the null hypothesis (no correlation between units) was rejected, and it was concluded that there was a cross-sectional dependence problem.

In this case, both heteroscedasticity, autocorrelation, and the presence of cross-sectional dependence are present. Therefore, the robust estimators Driscoll-Kraay (1998) and Beck-Katz (1995) were used, and since there is no random time effect, Model (1) was estimated as a one-way random effects model.

Table 8. Random effect regression results for Model (1)

Variables	Driscoll-Kraay				Beck-Katz PCSE			
	Coeff.	Std. Dev.	t	P	Coeff.	Std. Dev.	Z	P
LNARGEAL	0.3983	0.2911	1.37	0.1930	0.4110	0.3895	1.06	0.2910
LNFYSI	-0.0119	0.4321	-0.03	0.9780	0.0236	0.8290	0.03	0.9770
LNFBYK	-0.0519	0.1227	-0.59	0.5670	-0.0408	0.1358	-0.30	0.7640
C	0.5606	1.4394	0.13	0.8990	0.0098	0.0652	0.15	0.8810
R ² = 0.007 Wald chi2 = 77.82* p= 0.0000 R ² = 0.007 Wald chi2 = 3.32 p = 0.3443								

Note: Statistical significance at the 1%, 5%, and 10% levels is represented by *, **, and ***, respectively.

When Table 8 is examined, the results of Model (1) are generally consistent with the estimates obtained using both the Driscoll-Kraay and Beck-Katz PCSE methods. The Driscoll-Kraay estimator found that the coefficient of the Lnargecal variable was positive but not significant. A one-unit increase in the number of personnel engaged in R&D activities was found to result in a 0.3983-unit increase in innovation according to the Driscoll-Kraay estimator and a 0.4110-unit increase according to the Beck-Katz PCSE estimator. This finding is consistent with the findings of Zhu et al. (2019), who found that an increase in the number of personnel working in R&D activities does not have a significant and positive effect on innovation. Similarly, Li et al. (2013) found no significant relationship between the impact of local personnel engaged in R&D activities and innovation. Although the effects of both the Lnfysi variable and the Lnfbk variable on innovation are negative, no significant relationship was found between them and innovation. The model was found to be significant at the 1% significance level, and it was determined that the explanatory power of the model, as measured by both the Driscoll-Kraay estimator and the Beck-Katz PCSE estimator, was negligible.

According to the results of the F, LM and Hausman tests for Model (2), the presence of unit and time effects is examined. In the case of a random unit effect, the Hausman test is used to determine whether the model should be estimated with fixed or random effects, and the results are given in Table 9.

According to Table 9, as a result of the F and LM tests conducted to test the existence of fixed effects and random effects, it was observed that the unit and unit-time effects were not significant, but according to the LM test, the time effect was significant at the 10% significance level. In this context, the Hausman (1978) test was performed to decide which of the fixed-effect model and random-effect models to use. Based on the results of this test, the null hypothesis (H₀) claiming the presence of random effects was accepted. Therefore, it was decided to use the random effects model.

Table 9. F, LM and Hausman test results for Model (2)

Test	Stat.	Prob.	Result
F _{Unit}	0.2651	0.9987	There is no unit effect
F _{Time}	1.5066	0.1164	There is no time effect
F _{Unit-Time}	0.8904	0.6346	There is no unit-time effect
LM _{Unit}	0.0000	1.0000	There is no unit effect
LM _{Time}	2.2080***	0.0690	There is a time effect
LM _{Unit-Time}	2.2080	0.3310	There is no unit-time effect
Hausman	1.8157	0.6115	Random effect model

Note: Statistical significance at the 1%, 5%, and 10% levels is represented by *, **, and ***, respectively.

The cross-sectional dependence of the random effects model was determined using the Hausman test, and the Pesaran CD (2004) test was utilised for the purpose of testing. The results of this analysis are presented in Table 10. According to the results of the Pesaran CD test shown in Table 10, the null hypothesis H₀, which states that there is no cross-sectional dependence at the 1% significance level, is rejected. In other words, there is cross-sectional dependence in the model.

Normal panel regression estimates are based on the assumption that there are no autocorrelation and variance problems. However, it is necessary to test whether there are deviations from these assumptions. To determine whether robust estimators are needed for Model (2), Table 10 shows the results of the Levene-

Brown-Forsythe test for heteroscedasticity, the D-W and Baltagi-Wu tests for autocorrelation, and the Pesaran test for cross-section dependence.

Table 10. Heteroscedasticity, Autocorrelation and Cross-Sectional Dependence Test for Model (2)

Test	Stat.	Prob.	Result
Heteroscedasticity (Levene-Brown-Forsythe)	W0 =2.1738* W50 =1.9992* W100=2.1675*	0.0055 0.0122 0.0057	There is a problem of heteroscedasticity
Autocorrelation (<i>D-W and Baltagi-Wu Tests</i>)	Durbin-Watson 2.2327	Baltagi-Wu LBI 2.4203	There is no autocorrelation problem
Cross-Sectional Dependence Test (Pesaran Test)	3.0720*	0.0021	There is a cross-sectional dependence problem

Note: Statistical significance at the 1%, 5%, and 10% levels is represented by *, **, and ***, respectively.

The presence of heteroscedasticity was tested using the test statistics (W_0 , W_{50} , and W_{10}) developed by Levene (1960) and Brown and Forsythe (1974). Levene-Brown-Forsythe tests performed using the mean and standard deviations of the residuals for 18 units in the model were compared with the Snedecor F table with 17 degrees of freedom and 252 degrees of freedom, and the null hypothesis that “the variances of the units are equal” was rejected. This result indicates the presence of the problem of heteroscedasticity in the model. Durbin-Watson and Baltagi-Wu LBI statistics were used for the autocorrelation test. Since the values were greater than 2 in both tests, it was determined that there was no autocorrelation problem. The Pesaran CD test was used to test for the presence of cross-sectional dependence. As the p-value was less than 0.01, the null hypothesis (no correlation between units) was rejected, and it was concluded that there was a cross-sectional dependence problem.

In this case, the presence of both heteroscedasticity, autocorrelation, and cross-sectional dependence is evident. Therefore, the robust estimators Driscoll-Kraay (1998) and Beck-Katz (1995) were used, and since there was no random time effect, Model (2) was estimated as a one-way random effects model.

Table 11. Random Effect Regression Results for Model (2)

Variables	Driscoll-Kraay				Beck-Katz PCSE			
	Coeff.	Std. Dev.	t	P.	Coeff.	Std. Dev.	Z	P.
ARGEYG	0.9079	1.6136	0.56	0.5830	1.0259	2.6691	0.38	0.7010
LNFYSI	0.3302	0.3252	1.02	0.3270	0.3721	0.8060	0.46	0.6440
LNFBYK	-0.0263	0.0563	-0.47	0.6480	-0.0321	0.1351	-0.24	0.8120
C	0.0278	0.0714	0.39	0.7030	0.0293	0.0653	0.45	0.6530
R ² =0.003 Wald chi2= 73.92* p = 0.0000 R ² =0.004 Wald chi2=2.44 p = 0.4857								

Note: Statistical significance at the 1%, 5%, and 10% levels is represented by *, **, and ***, respectively.

When Table 11 is examined, the effect of Argeyg on innovation is examined in the random effects regression analysis conducted within the scope of Model (2). The results obtained with both the Driscoll-Kraay and Beck-Katz PCSE estimators show that although the coefficient of the Argeyg independent variable is positive, it is not statistically significant. These findings are consistent with the studies by Çalıpınar and Baç (2007) and Costa et al. (2018). The Lnfbyk and Lnfysi variables used as control variables in the model do not yield significant results according to either the Driscoll-Kraay or Beck-Katz estimator. According to the Driscoll-Kraay estimator, the model as a whole was found to be statistically significant at the 1% level, but both the Driscoll-Kraay estimator and the Beck-Katz PCSE estimator indicated that the explanatory power of the model was negligible.

5. CONCLUSION

Encouraging and sustaining innovation is of great importance for firms. Because innovation is an important factor for firms to sustain their activities, grow economically and gain competitive power in the market. Along with the importance of innovation, it has been the subject of studies by many researchers. Studies on the factors that are thought to affect innovation by different authors are seen in the relevant literature. The fact that innovation, which has been shown to be affected by many factors, has its own unique structure and is open to interaction with many external factors shows that it has a complex structure. In order to contribute to the cumulative progress of the related literature, this research aims to examine the impacts of firms' R&D capacities regarding innovation development.

In the study, the data of 18 firms registered in the BIST, whose data can be accessed both in terms of R&D expenditures and the number of personnel working in R&D activities between 2009 and 2023, were used. In the analysis section, first descriptive statistics were performed and then the correlation coefficient of the variables was calculated. Then, F and LM tests were performed to determine whether to use a fixed-effects

model or a random-effects model to estimate the panel. Since the results of these tests indicated the presence of both unit and time effects, the Hausman test was performed to decide which test to use. As a result of the Hausman test, the random effect model was selected for both Model (1) and Model (2). After determining the model, the cross-sectional dependence test was performed separately for each model. Before estimating the model, tests of variance, autocorrelation and inter-unit correlation are applied to detect deviations from the assumptions. Finally, the analysis was performed using the random effects model from panel data regression models.

The dependent variable is innovation, defined as the sum of patent, utility model, design and trademark applications. The independent variables include R&D expenditure intensity and the natural logarithm of personnel working in R&D activities. The natural logarithm of the number of years since the date of establishment, which represents the age of the firms, is used as a control variable in the analysis.

The analysis revealed that the number of personnel working in R&D activities and the intensity of R&D expenditures did not have a positive but significant effect on innovation. Increasing the number of research and development personnel may not necessarily lead to an increase in the level of innovation for a number of reasons. These are emphasised in the literature and include the unqualified people working in R&D, a lack of integration R&D processes with the corporate strategies, an inadequate valuing of new ideas from employees, insufficient technical and infrastructure resources, and a lack of supervision of R&D personnel. These explanations are not derived from the dataset in the present research, but they are consistent with the conclusions in the literature. Although these reasons for stating that an increase in R&D personnel may not lead to an increase in innovation are not direct findings of this study, they are consistent with those reported in extant literature. In light of the extant literature addressing the aforementioned reasons, Leiponen (2005) asserts that the organisational learning and absorptive capacity exerts a more significant impact on the firm's innovation structure than the size of the research and development teams. Crossan and Apaydin's (2010) research further emphasises the pivotal role of managerial support, sufficient resource allocation, and the establishment of an environment conducive to innovation in enabling research and development (R&D) personnel to contribute meaningfully. In consideration of the aforementioned rationales and the extant research conducted within the relevant field, it is conceivable that firms may encounter challenges in enhancing their innovation performance by merely increasing their number of R&D personnel. The fact that the intensity of R&D expenditures does not have the expected effect on increasing innovation may not be directly observable in the present dataset, but is a frequent topic of discussion in the literature. It has been hypothesised that the phenomenon under investigation may be attributable to the ineffective use of the budget or its misallocation to inappropriate projects (Hall and Lerner, 2010). While the judicious utilisation of R&D resources is widely anticipated to exert a favourable and substantial influence on innovation, expenditures that are not congruent with strategic objectives and innovation targets may prove ineffective in generating the anticipated outcomes (Belderbos et al., 2004; Flor and Oltra, 2004). In this regard, the establishment of appropriate control strategies to ensure the effective use of the R&D budget is emphasised as a critical step in enhancing innovation performance.

Factors influencing innovation are generally studied at the macro level and have a large place in the literature. Various studies have been conducted using different approaches and methods. However, this study is one of the few micro-level studies in Türkiye. Using panel data analysis, this study focuses on certain explanatory variables that are believed to directly contribute to the innovation process in BIST-listed firms with R&D centers in Türkiye. Considering the difficulties in accessing data in this sector, this original study examines the relationship between firm-level innovation and R&D capabilities and provides a valuable reference for future research.

This study has several limitations. In this study, the results were obtained by analyzing the data of only 18 companies registered in the BIST. The reason for this situation is that the data of the dependent and independent variables used in the study could not be accessed. In addition to this limitation, it can be noted that not all subdivisions of the manufacturing and service sectors of the data obtained could be reached. If the data analyzed in the study can be obtained from the annual reports and open sources of the firms registered in BIST, the factors affecting innovation on a sectoral basis can be revealed with their impact values. In addition, if all firms of all sizes (small, medium, and large) with R&D employees are selected as the main population and data are obtained through appropriate sampling methods, the ability of the results to represent the general population can be increased. However, companies should be compelled by legislation to share more information with innovation agents and factors with the public for the study, which is believed to be more representative of the general population.

Author Contributions

Saim Aydın: Literature Review, Conceptualization, Methodology, Data Curation, Analysis, Writing-original draft *Erdoğan Koç*: Modelling, Writing-review and editing

Conflict of Interest

No potential conflict of interest was declared by the authors.

Funding

Any specific grant has not been received from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Compliance with Ethical Standards

It was declared by the authors that the tools and methods used in the study do not require the permission of the Ethics Committee.

Ethical Statement

It was declared by the authors that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.



The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.

REFERENCES

- Alataş, S. and Peker, O. (2016). "Institutional Quality and Income: Panel Data Analysis", *Journal Of Social Sciences Eskişehir Osmangazi University*, 17(2), 61-79.
- An, J., He, G., Ge, S. and Wu, S. (2025). "The Impact of Government Green Subsidies on Corporate Green Innovation", *Finance Research Letters*, 71(2025), 106378. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.106378>
- Aslan, M. (2022). "The Effect of Intellectual Capital on Firm Performance: An Application in BIST Manufacturing Sector", *Duzce University Journal of Social Sciences*, 12(2), 597-615. <https://doi.org/10.55179/dusbed.1053308>
- Baltagi, B.H. (2008). *Econometric Analysis of Panel Data* (Vol. 4), John Wiley ve Sons, Chichester, England.
- Baltagi, B.H., Feng, Q. and Kao, C. (2012). "A Lagrange Multiplier Test for Cross-Sectional Dependence in a Fixed Effects Panel Data Model", *Journal of Econometrics*, 170(1), 164-177. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2012.04.004>
- Beck, N. and Katz, J.N. (1995). "What to Do (and Not to Do) With Time-Series Cross-Section Data", *American Political Science Review*, 89(3), 634-647. <https://doi.org/10.2307/2082979>
- Belderbos, R., Carree, M. and Lokshin, B. (2004). "Cooperative R&D and Firm Performance", *Research Policy*, 33(10), 1477-1492. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2004.07.003>
- Belke, M., Kaya, H. and Bolat, S. (2019). "Convergence in Central and Eastern European Countries Income Redistribution: Evidence from SPSM Method", *Erciyes University Journal of Faculty of Economics and Administrative Sciences*, 54, 343-366. <https://doi.org/10.18070/erciyesiibd.532758>
- Beneito, P. (2006). "The Innovative Performance of In-House and Contracted R&D in Terms of Patents and Utility Models", *Research Policy*, 35, 502-517. <https://doi.org/10.1016/J.RESPOL.2006.01.007>
- Bhattacharya, M. and Bloch, H. (2004). "Determinants of Innovation", *Small Business Economics*, 22(2), 155-162. <https://doi.org/10.1023/B:SBEJ.0000014453.94445.de>
- Bozyiğit, S. (2020). "Innovation Concept and Marketing", *Innovation and Marketing*, (Editor: D. Zeren, O. Yılmaz), Gazi Kitabevi, Ankara, 19-35.
- Breusch, T. and Pagan, A. (1980). "The Lagrange Multiplier Test and Its Applications to Model Specification in Econometrics", *The Review of Economic Studies*, 47(1), s. 239-253. <https://doi.org/10.2307/2297111>
- Brown, M.B. and Forsythe, A.B. (1974). "Robust Tests for the Equality of Variances", *Journal of the American Statistical Association*, 69(346), 364-367. <https://doi.org/10.1080/01621459.1974.10482955>
- Burrus, R.T., Graham, J.E. and Jones, A.T. (2018). "Regional Innovation and Firm Performance", *Journal of Business Research*, 88, 357-362. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2017.12.042>
- Carlsson, B. and Eliasson, G. (2003). "Industrial Dynamics and Endogenous Growth", *Industry and Innovation*, 10(4), 435-455. <https://doi.org/10.1080/1366271032000163676>
- Chen, V.Z., Li, J., Shapiro, D.M. and Zhang, X. (2014). "Ownership Structure And Innovation: An Emerging Market Perspective", *Asia Pacific Journal of Management*, 31, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s10490-013-9357-5>
- Cohen, W.M. and Klepper, S. (1996). "A reprise of size and R&D", *The Economic Journal*, 106(437), 925-951. <https://doi.org/10.2307/2235365>
- Costa, J., Botelho, A. and Matias, J. (2018). "Hindering Factors to Innovation: A Panel Data Analysis", *Entrepreneurship and the Industry Life Cycle: The Changing Role of Human Capital and Competences* (Editors: S. Cubico, G. Favretto, J. Leitão, U. Cantner), Siprenger, Switzerland, 269-298.
- Crossan, M.M. and Apaydin, M. (2010). "A Multi-Dimensional Framework of Organizational Innovation: A Systematic Review of the Literature", *Journal of Management Studies*, 47(6), 1154-1191. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6486.2009.00880.x>
- Çalçınpınar, H., and Baç, U. (2007). "The Factors Effecting The Realization of Innovation in SMEs and A Field Survey", *Ege Academic Review*, 7(2), 123-135.
- Çiğdem, G. and Altaylar, M. (2020). "Cointegration Evidences from the New Fragile Five", *Journal of Life Economics*, 7(3), 269-282. <https://doi.org/10.15637/jlecon.7.020>
- Demircioğlu, M.A., Audretsch, D.B. and Slaper, T.F. (2019). "Sources of Innovation and Innovation Type: Firm-Level Evidence From The United States", *Industrial and Corporate Change*, 28(6), 1365-1379.
- Dong, Y., Wei, Z., Liu, T. and Xing, X. (2020). "The Impact of R&D Intensity on The Innovation Performance of Artificial Intelligence Enterprises-Based on The Moderating Effect of Patent Portfolio", *Sustainability*, 13(1), 328. <https://doi.org/10.3390/su13010328>
- Driscoll, J.C. and Kraay, A.C. (1998). "Consistent Covariance Matrix Estimation with Spatially Dependent Panel Data", *Review of Economics and Statistics*, 80(4), 549-560. <https://doi.org/10.1162/003465398557825>

- Durbin, J. and Watson, G.S. (1950). "Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression: I", *Biometrika*, 37(3/4), 409-428. <https://doi.org/10.2307/2332391>
- Ezanoğlu, Z. and Çetin, D. (2021). "The Effects of Incentives on Firm Innovation Performance as a Policy Tool to Support R&D Activities in Turkey", *Journal of Public Finance*, 181, 206-233.
- Farkhod, M. (2020). "Econometric Modelling of the Innovation Process in Uzbekistan", *International Journal of Psychosocial Rehabilitation*, 24(02), 8. <https://doi.org/10.37200/IJPR/V24I2/PR200343>
- Feng, M. and Fang, X. (2025). "Empirical Analysis of the Impact of Open Innovation on Total Factor Productivity of Enterprises Based on the Multiple Fixed Effects Model", *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 25(3), 2263-2274. <https://doi.org/10.1177/14727978241312137>
- Flor, M.L. and Oltra, M.J. (2004). "Identification of Innovative Firms through Technological Innovation Indicators: An Application to the Spanish Ceramic Tile Industry", *Research Policy*, 33(2), 323-336. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2003.09.009>
- Ghazal, R. and Zulkhibri, M. (2015). "Determinants of Innovation Outputs in Developing Countries: Evidence from Panel Data Negative Binomial Approach", *Journal of Economic Studies*, 42(2), 237-260. <https://doi.org/10.1108/JES-01-2013-0016>
- Greenhalgh, C. and Rogers, M. (2012). "Trade Marks and Performance in Services and Manufacturing Firms: Evidence of Schumpeterian Competition Through Innovation", *The Australian Economic Review*, 45(1), 50-76. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8462.2011.00665.x>
- Gujarati, D.N. (2003). "Basic Econometrics", McGraw-Hill Higher Education, Boston.
- Güloğlu, B. and Tekin, R.B. (2012). "A Panel Causality Analysis of The Relationship Among Research and Development, Innovation, and Economic Growth in High-income OECD Countries", *Eurasian Economic Review*, 2, 32-47. <https://doi.org/10.14208/BF03353831>
- Hagedoorn, J. and Cloudt, M. (2003). "Measuring Innovative Performance: Is There an Advantage in Using Multiple Indicators?", *Research Policy*, 32, 1365-1379. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00137-3](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00137-3)
- Hall, B.H. and Lerner, J. (2010). "The Financing of R&D and Innovation", *Handbook of the Economics of Innovation*, 1, 609-639. North-Holland Amsterdam, The Netherlands. [https://doi.org/10.1016/S0169-7218\(10\)01014-2](https://doi.org/10.1016/S0169-7218(10)01014-2)
- Hausman, J.A. (1978). "Specification Tests in Econometrics", *Econometrica*, 46, 1251-1271. <https://doi.org/10.2307/1913827>
- Heirman, A. and Clarysse, B. (2007). "Which Tangible and Intangible Assets Matter for Innovation Speed in Start-Ups?", *Journal of Prod. Innov. Management*, 24, 303-315. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2007.00253.x>
- Hidayat, A.S. and Pok, W.C. (2025). "Empowering SMEs Innovation Through Intangible Factors", *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, 14(1), 1-25. <https://doi.org/10.1186/s13731-024-00437-w>
- Huergo, E. (2006). "The Role of Technological Management As a Source of Innovation: Evidence From Spanish Manufacturing Firms", *Research policy*, 35(9), 1377-1388. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2006.07.005>
- Hussen, M.S. and Çokgezen, M. (2020). "Analysis of Factors Affecting Firm Innovation: An Empirical Investigation for Ethiopian Firms", *Journal of African Business*, 21(2), 169-192. <https://doi.org/10.1080/15228916.2019.1625020>
- Jiang, X. and Jiang, C. (2024). "Government R&D Subsidies, Bank Credit and The Innovation Efficiency of High-Tech Enterprises", *International Review of Economics and Finance*, 96, 103565. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2024.103565>
- Jung, Y.L. and Yoo, H.S. (2022). "Competition and Pharmaceutical Innovation: The Moderating Role of Size and Age of Leading Companies in The Market", *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 3088-3097. <https://doi.org/10.1109/TEM.2022.3204676>
- Karaöz, M. and Albeni, M. (2004). "An Evaluation of Technology Efforts in Turkey: Patent Activity in Turkey", III.Information Technologies Congress, Bilgitek, Pamukkale University, October 9-7, 2004, Denizli.
- Karaş, G. and Celikkol, H. (2025). "Do Green Bonds Impact Sustainable Development? An Empirical Analysis", *Ekonomika*, 104(1), 88-102. <https://doi.org/10.15388/Ekon.2025.104.1.5>
- Kayahan Karakul, A. and Özyayın, G. (2019). "Modelling the Relations Between Innovation Indicators of Turkey By Heteroscedastic Multivariate Regression", *Izmir Katip Celebi University Faculty of Economics and Administrative Sciences Journal*, 2(2), 125-139.
- Kıral, G. and Çelik, C. (2018). "Investigating of Turkey Housing Demand with Panel Data Analysis and Clustering Method", *Trend in Business and Economics*, 32(4), 1009-1026.
- Kondo, M. (1999). "R&D Dynamics of Creating Patents in The Japanese Industry", *Research Policy*, 28(6), 587-600. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(98\)00129-2](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(98)00129-2)
- Lægreid, P., Roness, P.G. and Verhoest, K. (2011). "Explaining The Innovative Culture and Activities of State Agencies", *Organization Studies*, 32(10), 1321-1347. <https://doi.org/10.1177/0170840611416744>

- Lee, K. (2024). "The Four Major Forms of IPRs, Innovation and Economic Development By Latecomers: Patents, Utility Models, Trademarks, and Industrial Designs (CBDS Working Paper No. 2024/1)", Centre for Business and Development Studies.
- Leiponen, A. (2005). "Skills and innovation", *International Journal of Industrial Organization*, 23(5-6), 303-323. <https://doi.org/10.1016/j.ijindorg.2005.03.005>
- Levene, H. (1960). "Robust Tests for Equality of Variances", *Contributions to probability and statistics*, 278-292.
- Li, X., Wang, J. and Liu, X. (2013). "Can locally-recruited R&D personnel significantly contribute to multinational subsidiary innovation in an emerging economy?", *International Business Review*, 22(4), 639-651. <https://doi.org/10.1016/j.ibusrev.2012.12.002>
- Lian, G., Xu, A. and Zhu, Y. (2022). "Substantive Green Innovation or Symbolic Green Innovation? The Impact of ER on Enterprise Green Innovation Based on the Dual Moderating Effects", *Journal of Innovation & Knowledge*, 7(3), 100203. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2022.100203>
- Martinez-Ros, E. (1999). "Explaining the Decisions to Carry Out Product and Process Innovations: The Spanish Case", *The Journal of High Technology Management Research*, 10(2), 223-242. [https://doi.org/10.1016/S1047-8310\(99\)00016-4](https://doi.org/10.1016/S1047-8310(99)00016-4)
- Mercan, B., Gömleksiz, M. and Göktaş, D. (2011). "Effects of R&D Activities and Entrepreneurs on Innovation: Evidence from Panel Data", *Paradoks: Economy, Sociology and Policy Journal*, 7(2), 27-44.
- Nagaoka, S., Motohashi, K. and Goto, A. (2010). "Patent Statistics As an Innovation Indicator. Ed. Hall, B. and Rosenberg, N. "Handbook of The Economics Innovation", 1083-1127. Elsevier, Netherlands. [https://doi.org/10.1016/S0169-7218\(10\)02009-5](https://doi.org/10.1016/S0169-7218(10)02009-5)
- Newaz, M.N., Datta, P. and Alam, R.M.K. (2022). "Do The Organizational Proficiencies Dominate in Innovation and Can Manage The Major Factors of Innovation?", *Journal of Business and Retail Management Research*, 16(2), 60-86. <https://doi.org/10.24052/JBMRR/V16IS02/ART-06>
- Ning, J., Jiang, X. and Luo, J. (2023). "Relationship Between Enterprise Digitalization and Green Innovation: A Mediated Moderation Model", *Journal of Innovation and Knowledge*, 8(1), 100326. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2023.100326>
- Olubiyi, I.A., Irumekhai, O.S. and Oyediji-Oduyale, R.O. (2025). "Use of Utility Models/Patents for Encouragement of Local Innovations in Developing Countries: Lessons for Nigeria", *Journal of Intellectual Property Rights*, 30, 215-228. <https://doi.org/10.56042/ijpr.v30i2.9009>
- Örücü, E., Kılıç, R. and Savaş, A. (2011). "Innovation Strategies of SMEs and The Factors Affecting Involvement in Innovation: An Implementation", *Journal of Dogus University*, 12(1), 58-73.
- Özdemir Güngör, D. and Gözlü, S. (2012). "Influencing Factors of Innovation for Turkish Companies", *International Journal of Quality and Service Sciences*, 4(4), 374-386. <https://doi.org/10.1108/17566691211288359>
- Pesaran, M.H. (2004). "General Diagnostic Tests for Cross Section Dependence in Panels", Cambridge Working Papers in Economics, No. 0435. University of Cambridge.
- Pesaran, M.H. (2007). "A Simple Panel Unit Root Test in the Presence of Cross-Section Dependence", *Journal of Applied Econometrics*, 22(2), 265-312. <https://doi.org/10.1002/jae.951>
- Ponta, L., Puliga, G. and Manzini, R. (2021). "A Measure of Innovation Performance: The Innovation Patent Index", *Management Decision*, 59(13), 73-98. <https://doi.org/10.1108/MD-05-2020-0545>
- Raja, M.W. and Wei, S. (2015). "Evaluating Innovation Performance and Quality Practices Relationship: A Review From Different Industries", *TEKHNE- Rev. Appl. Manag. Stud.* 13, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.tekhne.2015.09.002>
- Raymond, W., Mohnen, P., Palm, F. and Van Der Loeff, S.S. (2009). "Innovative Sales, R&D and Total Innovation Expenditures: Panel Evidence on Their Dynamics", *CESIFO Working Paper*, No. 2716. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1437496>
- Ren, S., Eisingerich, A.B. and Tsai, H.T. (2015). "How do Marketing, Research and Development Capabilities, and Degree of Internationalization Synergistically Affect The Innovation Performance of Small and Medium-Sized Enterprises (SMES)? A Panel Data Study of Chinese SMES", *International Business Review*, 24(4), 642-651. <https://doi.org/10.1016/j.ibusrev.2014.11.006>
- Schumpeter, J.A. (1934). "Theory Of Economic Development", Cambridge: Harvard University Press.
- Shen, Y. (2024). "The Impact of Investor Interest Protection on Corporate Innovation Efficiency", *Finance Research Letters*, 62, 105106. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.105106>
- Stornelli, A., Ozcan, S. and Simms, C. (2021). "Advanced Manufacturing Technology Adoption and Innovation: A Systematic Literature Review on Barriers, Enablers, and Innovation Types", *Research Policy*, 50, 104229. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2021.104229>
- Şahin, D.K. (2023). "R&D Expenditures-Innovation Relationship: Panel Data Analysis for Selected Countries", *Ankara Hacı Bayram University Journal of the Faculty of Economics and Administrative Sciences*, 25(3), 1033-1052. <https://doi.org/10.26745/ahbvuibfd.1311554>

- Şendoğdu, A.A. and Öztürk, Y.E. (2013). "A Research on The Relation Between The Tendency For Making Innovation In Smes and The Level of Innovation Performance Achievement", *Journal of Niğde University Faculty of Economics and Administrative Sciences*, 6(2), 104-116.
- Terjesen, S. and Patel, P.C. (2017). "In Search of Process Innovations: The Role of Search Depth, Search Breadth, and The Industry Environment", *Journal of Management*, 43(5), 1421-1446. <https://doi.org/10.1177/0149206315575710>
- Terzioğlu, M., Avcı, M. and Gökovaı, U. (2008). "Innovation Capabilities of Firms: The Case of Textile and Wearing Sector In Denizli", *Ç.Ü. Journal of Institute of Social Sciences*, (17), 3, 377-388.
- Wencong, M., Feng, B., Huang, S. and Ye, Y. (2024). "The Impacts of R&D Expenditure and Personnel Investment on Innovation Performance: The Moderating Effects of Employee Motivation", *BioTechnology: An Indian Journal*, 10(19), 11638–11644.
- Wulfen, G.V. (2015). "İnovasyon Seferi İnovasyon Başlatmak İçin Görsel Alet Takımı", (Çeviren: Şengözer, P.), Optimist Yayınevi, İstanbul.
- Yerdelen Tatoğlu, F. (2024). "Panel Data Econometrics: Stata Applied" (7th Edition), Beta Publications, İstanbul.
- Yılmaz, Z. and İncekaş, E. (2018). "Innovation and Regional Development In Turkey", *Kirklareli University Journal of Social Sciences*, 2(1), 154-169.
- Zemplinerová, A. and Hromádková, E. (2012). "Determinants of Firm's Innovation", *Prague Economic Papers*, 21(4), 487-503. <https://doi.org/10.18267/j.pep.436>
- Zhu, J., Wang, Y. and Wang, C. (2019). "A Comparative Study of The Effects of Different Factors on Firm Technological Innovation Performance in Different High-Tech Industries", *Chinese Management Studies*, 13(1), 2-25. <https://doi.org/10.1108/CMS-10-2017-0287>

Türkiye'deki Devlet Üniversitelerinde Yazılım Tedarik Kararları: GAHP ve Duyarlılık Analizi Uygulaması

Mustafa Kaya¹ 

ÖZET

Amaç: Bu çalışma, Türkiye'deki devlet üniversitelerinin Bilgi İşlem Daire Başkanlıkları (BİDB) bünyesinde yazılım tedarik süreçlerini verimliliği sağlayacak, sistematik ve bilimsel bir yöntemle yönetmelerine yardımcı olacak bir karar modeli sunmayı amaçlamaktadır.

Yöntem: Çalışmada, altı temel kriter (Maliyet, Teknik Uygunluk, Zaman ve Hız, Performans ve Kalite, Güvenlik ve Uyumluluk, Risk ve Esneklik) ve yedi alternatif (Tamamen Kurum İçi Geliştirme, Kısmen Dış Kaynak Kullanımı, Tamamen Dış Kaynak Kullanımı, Hazır Yazılım, Hibrit/Modüler Çözüm, Ortak Geliştirme, Bulut Çözüm) değerlendirilmiştir. Karar verme sürecine beş uzman katılmış, her biri teknik uygunluk, bütçe, güvenlik ve kullanıcı deneyimi gibi alanlarda katkı sağlamıştır. Çalışmada Grup Analitik Hiyerarşi Süreci (GAHP) yöntemi kullanılarak, karar vericilerin kolektif uzmanlığını nesnel bir çerçevede birleştirmesi amaçlanmıştır.

Bulgular: GAHP ve duyarlılık analizi sonuçları, Tamamen Kurum İçi Geliştirmenin en iyi alternatif olduğunu göstermektedir. Ayrıca, modelin karar değişimlerine karşı dayanıklı olduğu belirlenmiştir.

Özgünlük: Bu çalışma, Türkiye'deki devlet üniversitelerinde yazılım tedarik süreçlerine yönelik GAHP uygulamasını içeren sınırlı sayıda çalışmalardan biridir. Aynı zamanda, Sıralama Tersine Dönmesi Yöntemi ile duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş ve karar modelinin istikrarı test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çok Kriterli Karar Verme, Tedarikçi Seçimi, Grup Analitik Hiyerarşi Süreci (GAHP), Karar Destek Sistemleri, Yönetim Bilişim Sistemleri.

JEL Kodları: C44, C61, C88, M11, M15.

Software Supply Decisions in State Universities in Türkiye: An Application of GAHP and Sensitivity Analysis

ABSTRACT

Purpose: This study aims to present a decision model designed to help the Information Technology Departments (ITDs) of state universities in Türkiye manage software procurement processes more efficiently through a systematic and scientific approach.

Methodology: Six key criteria (Cost, Technical Suitability, Time and Speed, Performance and Quality, Security and Compliance, and Risk and Flexibility) and seven alternatives (In-House Development, Partial Outsourcing, Full Outsourcing, Off-the-Shelf Software, Hybrid/Modular Solution, Joint Development, and Cloud Solution) were evaluated. Five experts participated in the decision-making process, each contributing expertise in areas such as technical suitability, budgeting, security, and user experience. The Group Analytic Hierarchy Process (GAHP) method was applied to integrate the collective expertise of decision-makers into an objective framework.

Findings: The results of GAHP and the sensitivity analysis show that In-House Development is the most favorable alternative. Moreover, the model was found to be robust against ranking reversals.

Originality: This study is among the limited research focusing on the application of Group AHP in software procurement processes within Turkish state universities. In addition, sensitivity analysis was conducted using the rank reversal method, which confirmed the stability of the decision model.

Keywords: Multi-Criteria Decision Making (MCDM), Supplier Selection, Group Analytic Hierarchy Process (GAHP), Decision Support Systems, Management Information Systems.

JEL Codes: C44, C61, C88, M11, M15.

¹ Hacettepe Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Ankara, Türkiye

Sorumlu Yazar-Corresponding Author: Mustafa Kaya, mkaya@hacettepe.edu.tr

DOI: 10.51551/verimlilik.1633117

Araştırma Makalesi / Research Article | Geliş / Submitted: 04.02.2025 | Kabul / Accepted: 05.09.2025

Atıf/Cite: Kaya, M. (2025). "Türkiye'deki Devlet Üniversitelerinde Yazılım Tedarik Kararları: GAHP ve Duyarlılık Analizi Uygulaması", *Verimlilik Dergisi*, 59(4), 925-942.

EXTENDED ABSTRACT

In Türkiye's state universities, rising student numbers, diversified research and development activities, and growing demand for digitalization have made software procurement and development decisions multi-stakeholder and multi-criteria in nature. Information Technology Departments (ITDs) manage software development or acquisition, integration of existing systems, improvements in user experience, and the alignment of institutional strategy with digital transformation. These tasks are carried out under principles of regulation, transparency, effectiveness, and efficiency. For this reason, cost, technical suitability, security, time, performance, and risk need to be evaluated together. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) offers a systematic, consistent, and objective framework for such complex problems.

The Analytic Hierarchy Process (AHP) and its group-decision form, Group AHP (GAHP), allow the integration of assessments from stakeholders with different expertise. In the Turkish literature, fuzzy AHP and hybrid approaches are common, while GAHP and formal sensitivity analyses are relatively limited. This study models software procurement decisions in state universities with GAHP and tests model stability through a rank-reversal-based sensitivity analysis. The central question is which alternative emerges as the most consistent and robust choice under multiple criteria in the ITD context.

The model evaluates six criteria (Cost, Technical Suitability, Time and Speed, Performance and Quality, Security and Compliance, Risk and Flexibility) and seven alternatives (In-House Development, Partial Outsourcing, Full Outsourcing, Off-the-Shelf Software, Hybrid/Modular Solution, Joint Development, Cloud Solution). Five experts participated: an ITD director, a senior software engineer, a system administrator, a user-side representative, and a finance officer. Using the 1–9 scale, they completed pairwise comparisons. Individual matrices were aggregated with the geometric mean under GAHP. Criterion weights and local priorities were computed with the eigenvector approach. A rank-reversal sensitivity analysis was then performed by removing each criterion and each alternative in turn. The implementation was carried out in a VBA-based Excel tool.

GAHP results show In-House Development (A1) ranks first with a final score of 0.3531, followed by Partial Outsourcing (A2) at 0.1827, then A5 (0.1360), A7 (0.1156), A3 (0.0846), A6 (0.0659), and A4 (0.0621). Criterion weights are as follows: Cost 0.3546, Technical Suitability 0.1890, Security and Compliance 0.1864, Time and Speed 0.1028, Risk and Flexibility 0.0872, Performance and Quality 0.0800. Criterion sensitivity: removing any single criterion did not change the ranking; the order $A1 > A2 > A5 > A7 > A3 > A6 > A4$ was preserved. Alternative sensitivity: when A1 was removed, A2 moved to first place. Removing A3 moved A4 and A6 up by one position. Removing A5 raised A7 to third place. Removing A4, A6, or A7 largely preserved the overall order.

Considering institutional know-how, regulatory compliance and security requirements, and long-term sustainability, in-house development is a strong leading alternative. Partial outsourcing appears as a rational second option due to speed and access to expertise. Limited criterion-level sensitivity indicates that results are not overly dependent on any single criterion, while the observed alternative-level changes are in expected directions, which supports consistency. From a governance perspective, the model supports transparency and accountability and facilitates stakeholder agreement. The main limitations are the small expert panel and the single country and institution type. Future work may expand stakeholder coverage, compare with fuzzy and hybrid MCDM approaches, add scenarios that incorporate total cost of ownership and life-cycle risks, and explore integration of machine-learning modules into the decision process.

1. GİRİŞ

Türkiye'deki devlet üniversiteleri, artan öğrenci sayısı, çeşitlenen araştırma-geliştirme faaliyetleri ve hızla artan dijitalleşme talebi ile kurumsal kapasitelerini geliştirmeye yönelik çeşitli yazılım çözümlerine ihtiyaç duymaktadır. Üniversitelerin bünyesinde faaliyet gösteren Bilgi İşlem Daire Başkanlıkları, bu yazılım çözümlerini geliştirmek veya temin etmek, mevcut sistemleri entegre etmek, kullanıcı memnuniyetini artıracak uygulamalar tasarlamak ve kurumun stratejik hedeflerini dijitalleşme yoluyla desteklemek gibi pek çok önemli görevi üstlenmektedir. Ancak, bu süreçte karşılaşılan temel zorluklardan biri, yazılım seçiminin birden fazla paydaşı ve kriteri dikkate alan çok boyutlu ve karmaşık bir karar verme sürecini gerektirmesidir.

Devlet kurumları, özellikle üniversiteler, kurumsal kaynakları kullanırken mevzuat, şeffaflık, *etkinlik*, *verimlilik* ve stratejik planlama ilkeleri doğrultusunda hareket etmek zorundadır. Bu durum, yazılım seçim sürecinde dikkate alınması gereken faktörlerin ve kriterlerin artmasına neden olmaktadır. Maliyet, teknik uygunluk, güvenlik, zaman, performans ve risk gibi unsurların aynı anda değerlendirilmesi, sürecin sadece teknik değil aynı zamanda stratejik bir karar verme problemine dönüşmesine yol açmaktadır (Saaty, 1980, s. 1, 82–83). Bu bağlamda, çok kriterli karar verme yöntemleri, karmaşık ve çok boyutlu problemler için sistematik, tutarlı ve objektif bir çerçeve sunarak, karar vericilere önemli bir avantaj sağlamaktadır (Forman ve Peniwati, 1998).

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), Thomas L. Saaty tarafından geliştirilen ve bir karar problemini hiyerarşik bir yapıda tanımlayarak kriterler ve alternatifler arasında ikili karşılaştırma yöntemiyle ağırlık hesaplaması yapan, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri arasında en yaygın kullanılan araçlardan biridir (Saaty ve Vargas, 2012, s. 14, 24–27). AHP'nin grup karar verme süreçlerine uyarlanmış hali olan GAHP, birden fazla uzmanın değerlendirmelerini birleştirerek daha kapsayıcı ve dengeli bir karar mekanizması sunar. Bu yöntemde, uzmanların görüşleri geometrik ortalama gibi toplulaştırma teknikleriyle birleştirilir ve nihai karar için ortak bir temel oluşturulur. GAHP, özellikle farklı uzmanlık alanlarından gelen paydaşların yer aldığı üniversite ortamlarında, yazılım seçimi gibi stratejik konular için oldukça uygundur (Karsak ve Ozogul, 2009).

Bu çalışmada, mevcut GAHP metodolojisi, Türkiye'deki devlet üniversitelerinin yazılım tedarik süreçlerine uyarlanmıştır. Karar verme süreci, 6 kriter (Maliyet, Teknik Uygunluk, Zaman ve Hız, Performans ve Kalite, Güvenlik ve Uyumluluk, Risk ve Esneklik) ve 7 alternatif (Tamamen Kurum İçi Geliştirme, Kısmen Dış Kaynak Kullanımı, Tamamen Dış Kaynak Kullanımı, Hazır Yazılım, Hibrit ve Modüler Çözüm, Ortak Geliştirme, Bulut Çözümü) üzerinden değerlendirilmiştir. Bu süreçte, AHP adımları izlenmiş, GAHP yaklaşımı kullanılarak uzman görüşleri birleştirilmiş ve nihai sıralamalar elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, Sıralama Tersine Dönmesi (Rank Reversal) yöntemi ile duyarlılık analizi yapılmıştır. Sıralama Tersine Dönmesi, AHP'deki geleneksel sıralama sonuçlarının her seferinde bir kriterin veya alternatifin modelden çıkarılmasıyla nasıl değiştiğini analiz eden ve karar modelinin kırılabilirliklerini ortaya koyan bir yöntemdir. Belton ve Gear (1983), AHP'nin yeni bir alternatifin eklenmesiyle mevcut sıralamanın değişebileceğini ve bunun karar sürecini etkileyebileceğini göstermiştir. Dyer (1990), AHP'nin metodolojik tutarsızlıklar içerebileceğini ve Sıralama Tersine Dönmesinin karar verme süreçlerinde ciddi etkileri olabileceğini tartışmıştır. Bu eleştirilere yanıt olarak Saaty (1990), AHP'nin doğru uygulandığında Sıralama Tersine Dönmesini engelleyebileceğini ve yöntemin tutarlı kararlar ürettiğini savunmuştur.

Çalışmanın önemi, kamu kurumlarında karar verme süreçlerine sistematik bir yaklaşım getirerek, karar mekanizmasının şeffaflığının, doğruluğunun, *verimliliğinin* artırılmasına yönelik katkı sunmasıdır. Ayrıca, bir alternatifin çıkarılmasıyla hangi alternatiflerin daha güçlü hale geldiğini veya bir kriterin çıkarılmasıyla sıralamanın nasıl değiştiğini görmek, karar vericilerin daha bilinçli ve güvenilir sonuçlara ulaşmasına katkıda bulunmaktadır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, mevcut literatürde ters sıralama yönteminin Türkiye'deki kamu kurumlarında uygulama potansiyelini göstermesi açısından önemli bir yer tutmaktadır. Çalışmada elde edilen bulgular, kamu kurumlarının verimliliğini artırmayı ve stratejik karar verme süreçlerine ışık tutmayı hedeflemektedir.

Makalenin devamında, literatür taramasıyla yazılım seçimi ve ÇKKV yöntemlerine dair teorik çerçeve sunulacak, ardından çalışmada kullanılan yöntemler detaylandırılacaktır. GAHP modeli ve duyarlılık analizi sonuçlarının tartışılmasıyla birlikte, modelin uygulanabilirliği ve karar vericilere sağladığı faydalar değerlendirilecektir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çok kriterli karar verme yöntemleri, karmaşık karar verme problemlerinde sistematik bir yaklaşım sunması nedeniyle işletme, mühendislik, tedarik zinciri yönetimi, sağlık ve kamu politikaları gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler, birden fazla kriterin dikkate alındığı, paydaşların farklı önceliklere sahip olduğu durumlarda karar vericilere objektif bir çerçeve sağlayarak öne çıkmaktadır. ÇKKV yöntemleri arasında en çok kullanılanlardan biri olan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), kriterlerin ve

alternatiflerin ağırlıklandırılması için hiyerarşik bir yapıda ikili karşılaştırmalara dayalı bir analiz sunar (Saaty, 1980; Saaty ve Vargas, 2012). AHP'nin temel avantajları arasında uygulama kolaylığı, tutarlılık kontrolü ve karar verme sürecini şeffaf hale getirme kapasitesi yer almaktadır (Saaty ve Vargas, 2012). Özellikle, AHP'nin kamu yönetiminde dijital dönüşüm süreçlerinde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. E-devlet uygulamalarında kişisel veri koruma politikalarının değerlendirilmesine yönelik çalışmalarda da AHP tabanlı analizler kullanılmaktadır (Muhammad ve Hromada, 2023).

Grup Analitik Hiyerarşi Süreci (GAHP), birden fazla karar vericinin görüşlerini entegre ederek ortak bir karar matrisine dönüştürme sürecidir (Forman ve Peniwati, 1998). Geometrik ortalama, aritmetik ortalama veya ağırlıklı toplulaştırma gibi teknikler kullanılarak bireysel değerlendirmeler birleştirilir ve tek bir grup kararı oluşturulur. Bu yöntem, özellikle üniversite, kamu kurumları ve büyük organizasyonlar gibi çok paydaşlı yapılar için oldukça uygundur. GAHP, uzman görüşlerinin entegre edilmesi ve farklı perspektiflerin bir araya getirilmesi açısından etkili bir çözüm sunmaktadır (Vaidya ve Kumar, 2006).

Sıralama Tersine Dönmesi, AHP ve diğer ÇKKV yöntemleriyle elde edilen sıralamaların duyarlılık analizini gerçekleştirmek için kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yöntemde, her bir kriter veya alternatif modelden tek tek çıkarılarak veya eklenerek yeni sıralamalar oluşturulur ve karar sürecindeki hassasiyet analiz edilir. Sıralama tersinmesi, hangi kriter veya alternatiflerin karar süreci üzerinde kritik bir etkisi olduğunu belirlemede karar vericilere önemli bilgiler sağlar. Literatürde, sıralama tersinmesi yöntemi, karar modellerinin kırılganlık ve istikrar analizi açısından önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır (Dyer, 1990). AHP'de sıralama tersinmesi sorunu ve bu durumu önlemeye yönelik çözüm yöntemleri üzerine yapılan araştırmalar, karar verme süreçlerinin güvenilirliğini artırmaya yönelik yeni yaklaşımlar geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Majumdar ve diğerleri, 2021). Özellikle Schmidt ve diğerleri (2016), Ishizaka ve Labib (2011) Sıralama Tersine Dönmesi olgusunun matematiksel temellerini ve etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemiştir.

Türkiye bağlamında yapılan araştırmalar, yazılım tedariki ve kamu kurumları ile yükseköğretimde karar verme süreçlerinde çoğunlukla Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve onun bulanık uzantılarına dayalı ÇKKV yaklaşımlarını öne çıkarmaktadır. Çalışkan ve Aksakal (2019), Likert tabanlı AHP'yi PROMETHEE ile birleştirmiş ve yazılım seçimi özelinde modifiye edilmiş bir GAHP yaklaşımı geliştirmiştir. Bu çalışma, özellikle çok paydaşlı ortamlarda grup karar verme mekanizmalarının önemini vurgulamaktadır. Benzer biçimde Önüt ve Efendigil (2010), Kurumsal Kaynak Planlaması (ERP) yazılım seçimi için bulanık AHP modeli önermiş, Rouyendegh ve Erkan (2011) ise klasik AHP yapısını bir Türk ERP örneğine uygulamış, ancak grup veya bulanık uzantılar raporlanmamıştır.

Kurumsal Kaynak Planlaması dışındaki uygulamalarda, Kahraman ve diğerleri (2013) bulanık AHP ile bulanık İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralama Tekniğini (TOPSIS) birleştirerek yükseköğretim yatırımlarını değerlendirmiş ve uzman tercihleri değiştiğinde sonuçların sağlamlığını test etmek için senaryo temelli hassasiyet analizi yürütmüştür. Bu özellik, yalnızca kriter ağırlıkları raporlanan ancak sağlamlık testi yapılmayan çoğu Türk çalışmasından farklıdır. Calik ve diğerleri (2012) bulanık AHP'den elde edilen ağırlıkları veri zarflama analizi (DEA) ile birleştirerek 69 devlet üniversitesinin görelî etkinliğini analiz etmiş, Vatansever (2013) ise devlet hastanelerindeki ürün tedarikinde bulanık AHP uygulamış ve sonuçları ihale mevzuatı ile karşılaştırmıştır. Daha yakın dönemde, Seker ve Kahraman (2021) Türkiye'de bir yakıt şirketinde yazılım tedariki için Pythagorean kübik bulanık hibrit (TOPSIS + Etkileşimli Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi (TODIM)) yaklaşımı geliştirmiş ve bulguların sağlamlığını hassasiyet ve karşılaştırma analizleriyle test etmiştir. Genel olarak bu çalışmalar, Türkiye'de bulanık AHP ve hibrit yaklaşımların hâkim olduğunu, ancak GAHP ve sistematik hassasiyet analizlerinin sınırlı kullanıldığını göstermektedir.

Uluslararası literatürde ise yöntemsel çeşitlilik daha ileri düzeydedir. Marcarelli ve Squillante (2019), kamu ihaleleri için birleşik bir GAHP modeli geliştirmiş ve puanlama kurallarının doğrulanması için hassasiyet analizinin önemini vurgulamıştır. Pekin ve arkadaşları (2006) öngörü yazılımlarının seçiminde AHP uygulamış ve ağırlıklardaki değişimlerin etkilerini test etmiştir. Favretto ve Nottar (2016) Brezilya'daki bir üniversite örneğinde AHP ile akademik yazılım seçimi yapmış ve bilgi güvenilirliği ile sağlayıcı desteğinin en kritik kriterler olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, İslam ve Arakawa (2022) belirsizlik ortamında tedarikçi seçimi için entegre bulanık grup ÇKKV modeli geliştirmiş, Ghosh ve diğerleri (2012) ise AHP'yi Tavlama Benzetimi meta-sezgisel algoritması ile birleştirerek NP-zor tedarik problemlerini ele almıştır. Ivanco (2014), senaryo tabanlı testlerin ötesine geçerek türev temelli analitik hassasiyet modeli geliştirmiştir. Bunun yanında, Then ve Amaria (2013) ile Arshad ve diğerleri (2013), üniversitelerde yazılım tedarik süreçlerinde maliyet, yatırımın geri dönüşü (ROI), toplam sahip olma maliyeti (TCO) ve eski sistemlerle entegrasyon gibi yönetim kriterlerinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamıştır.

Tablo 1. Tedarik kararlarında kullanılan ÇKKV yaklaşımlarının karşılaştırmalı görünümü

<i>Çalışma</i>	<i>Odak</i>	<i>Yöntem</i>
Çalışkan ve Aksakal (2019)	HACM yazılım seçimi (Türkiye)	Likert-tabanlı AHP + PROMETHEE; GAHP varyantı
Önüt ve Efendigil (2010)	ERP yazılım seçimi (Türkiye)	Bulanık AHP hiyerarşik model
Rouyendegh ve Erkan (2011)	ERP yazılım seçimi (Türkiye)	Klasik AHP
Kahraman ve diğerleri (2013)	Yükseköğretim yatırımları (Türkiye)	Bulanık AHP + Bulanık TOPSIS; hassasiyet analizi
Calik ve diğerleri (2012)	Devlet üniversitelerinin etkinliği (Türkiye)	Bulanık AHP ağırlıkları + DEA
Vatansever (2013)	Kamu hastanelerinde tedarik (Türkiye)	Bulanık AHP
Seker ve Kahraman (2021)	Yazılım tedariki (yakıt şirketi, Türkiye)	Pythagorean kübik Fuzzy AHP (FAHP) + TOPSIS/TODIM
Uzoka ve Akinnuwesi (2019)	Genel yazılım seçimi (uluslararası)	AHP modeli, kriter ağırlıkları
Marcarelli ve Squillante (2019)	Kamu ihaleleri (uluslararası)	GAHP
Pekin ve diğerleri (2006)	Öngörü yazılım seçimi (uluslararası)	Klasik AHP + Hassasiyet analizi
Favretto ve Nottar (2016)	Akademik yazılım seçimi (Brezilya, üniversite)	Klasik AHP
Islam ve Arakawa (2022)	Belirsizlikte tedarikçi seçimi (Uluslararası)	Entegre bulanık grup ÇKKV
Ghosh ve diğerleri (2012)	Tedarikçi seçimi optimizasyonu (Uluslararası)	AHP + meta-sezgisel (Simüle Tavlama)

Tablo 1'e baktığımızda, konunun geneli hakkındaki akademik eğilimleri görmekteyiz. Türkiye'deki çalışmalar, özellikle bulanık AHP ve hibrit yöntemlerle belirsiz yargıları modellemeye odaklanırken (Önüt ve Efendigil, 2010; Kahraman ve diğerleri, 2013; Vatansever, 2013), GAHP ve formal hassasiyet analizleri yalnızca birkaç örnekle sınırlı kalmaktadır (Çalışkan ve Aksakal, 2019). Uluslararası literatür ise GAHP'nin formal çerçevede uygulanması (Marcarelli ve Squillante, 2019), türev tabanlı hassasiyet yöntemleri (Ivanco, 2014) ve meta-sezgisel hibritler (Ghosh ve diğerleri, 2012) gibi daha gelişmiş yaklaşımları içermektedir. Bu durum, Türkiye literatürünün bağlamsal açıdan zengin olmakla birlikte, uluslararası düzeyde yaygınlaşan metodolojik derinlikten henüz uzak olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada kamu politikaları bütüncül düzeyde doğrudan ele alınmamış, odak noktası olarak Türkiye'deki devlet üniversitelerinin yazılım tedarik süreçleri seçilmiştir. Bu kapsamda, literatürde vurgulanan şeffaflık, tutarlılık ve sistematiklik ilkelerinin mikro düzey karar süreçlerinde nasıl uygulanabileceği elde edilen bulgular üzerinden gösterilmiştir. İlk olarak, farklı uzmanların değerlendirmeleri GAHP yaklaşımıyla geometrik ortalama yöntemi üzerinden birleştirilmiş; böylece uzmanların farklı bakış açılarının ortak bir yapıya dönüştürülmesi, karar verme sürecinde çok paydaşlı katılımın ve şeffaflığın sağlanmasına imkân vermiştir. İkinci olarak, modelin duyarlılığını test etmek amacıyla gerçekleştirilen Sıralama Tersine Dönmesi analizi, her bir kriter ve alternatifin modelden çıkarılmasıyla öncelik sıralamalarındaki değişimleri ortaya koymuş; bu bulgu, karar modelinin tutarlılığını ve istikrarını değerlendirmeye olanak tanımıştır. Ayrıca, bu prosedürün adım adım uygulanması, duyarlılık analizinin sistematik bir biçimde yürütülmesini sağlamıştır. Çalışma, bu yönetsel katkılar aracılığıyla, üniversitelerin yazılım tedarik kararlarının yalnızca kavramsal düzeyde değil, ampirik bulgular ışığında daha şeffaf, karşılaştırılabilir ve değerlendirilebilir bir çerçevede ele alınabileceğini göstermekte; bu yönüyle mevcut literatüre Türkiye bağlamında somut bir uygulama örneği kazandırmaktadır.

3. YÖNTEM

Bu çalışmada yazılım geliştirme veya temin etme sürecinde dikkate alınacak değişkenleri temsil etmek üzere altı temel kriter belirlenmiştir: (1) Maliyet, (2) Teknik Uygunluk, (3) Zaman ve Hız, (4) Performans ve Kalite, (5) Güvenlik ve Uyumluluk ve (6) Risk ve Esneklik. Bazı kriterler yüksek kavramsal örtüşmeleri nedeniyle birlikte ele alınmıştır. Örneğin, Güvenlik/Uyumluluk kriteri hem teknik güvenlik önlemlerini hem de Kişisel Verilerin Korunması Kanunu (KVKK) ve ISO 27001 gibi yasal ve kurumsal standartlara uygunluğu kapsadığından tek başlık altında bütünleştirilmiştir. Ayrıca, AHP yönteminde kriter sayısının azaltılması karar vericiler için önemli bir kolaylık sağlamaktadır. Çalışmada kullanılan kriterlerin kapsamı ve gerekçeleri Tablo 2'de ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Tablo 2. Yazılım tedarikinde dikkate alınan kriterler, açıklamaları ve referansları

Kriter	Açıklama	Referans
Maliyet	Özellikle bütçe sınırlamalarıyla çalışan kurumlarda büyük önem taşır; projelerin sürdürülebilirliği ve uygulanabilirliği üzerinde doğrudan etkilidir.	Önüt ve Efendigil (2010), Vaidya ve Kumar (2006), Çalışkan ve Aksakal (2019)
Teknik Uygunluk	Mevcut altyapı ve personel yetkinlikleriyle ne ölçüde uyduğunu değerlendirir. Özellikle Bilgi İşlem Daire Başkanlıkları (BİDB) tarafından yönetilen teknik altyapı, yazılımın kurulum, bakım ve entegrasyon süreçleri açısından kritik rol oynamaktadır. Bu nedenle kriter hem mevcut sistemlerle entegrasyon kabiliyetini hem de teknik personelin bilgi ve deneyimiyle uyumluluğu kapsamaktadır.	Vaidya ve Kumar (2006), Çalışkan ve Aksakal (2019)
Zaman ve Hız	Yazılım projelerinin ne kadar kısa sürede işlevsel hâle getirilebileceği veya güncellenebileceğini yansıtır; proje yönetimi ve kullanıcı ihtiyaçlarının hızlı karşılanmasında önemlidir.	Ishizaka ve Labib (2011), Çalışkan ve Aksakal (2019)
Performans ve Kalite	Performans, sistemin iş yükü altındaki kararlılığını ifade ederken; kalite, kullanıcı memnuniyeti ve işlevsellik boyutlarını kapsar. Yazılım performansı ve kalite birbirinden bağımsız değerlendirilemeyeceği için tek başlık altında birleştirilmiştir.	Önüt ve Efendigil (2010), Vaidya ve Kumar (2006), Ishizaka ve Labib (2011), Çalışkan ve Aksakal (2019)
Güvenlik ve Uyumluluk	Veri koruması, KVKK ve ISO 27001 gibi uluslararası standartlara uygunluğu, ayrıca siber saldırılara karşı dayanıklılığı içerir. Güvenlik teknik boyutu, uyumluluk ise yasal/regülasyon boyutu temsil ettiğinden tek kriter olarak ele alınmıştır.	Muhammad ve Hromada (2023); Vaidya ve Kumar (2006), Çalışkan ve Aksakal
Risk ve Esneklik	Risk, uzun vadede ortaya çıkabilecek belirsizlikleri ifade ederken; esneklik, sistemin değişen koşullara uyarlanabilme kapasitesini ifade eder. Bu iki unsur yazılım yaşam döngüsünde birbirini tamamladığı için tek başlıkta toplanmıştır.	Saaty, 1987; Majumdar ve diğerleri (2021), Çalışkan ve Aksakal

Çalışmada, üniversitelerin yazılım geliştirme veya temin etme aşamasında yararlanabileceği 7 farklı alternatif değerlendirilmeye alınmıştır. Tamamen Kurum İçi Geliştirme, tüm geliştirme sürecinin üniversite personeline yönetilmesini ifade eder. Kısmen Dış Kaynak Kullanımı, projenin belirli kısımlarında veya uzmanlık gerektiren alanlarında dışarıdan destek almayı içerir. Tamamen Dış Kaynak Kullanımı, bütünüyle harici bir firma veya ekibe yazılım geliştirme işinin devrini öngörür. Hazır (Paket) Yazılım, piyasada mevcut, yaygın kullanımda olan paket hâlindeki çözümlerin satın alınıp uyarlanmasıdır. Hibrit/Modüler Çözüm, birden fazla kaynaktan (kamu, özel, açık kaynak) alınan veya geliştirilen modüllerin bütüncül bir sistem olarak birleştirilmesini amaçlar. Ortak Geliştirme, bir ya da birden fazla üniversitenin iş birliği içinde aynı ihtiyaca yönelik yazılım geliştirmesini ifade eder. Son olarak, Bulut Hizmeti seçeneği, bulut sağlayıcıları üzerinden sunulan çözümlerin kiralanması veya abonelik sistemiyle kullanılması şeklinde tanımlanır.

Karar verme sürecinde, üniversite bünyesinde ve ilgili alanlarda deneyimli 5 uzman yer almıştır. Uzmanların profilleri, kurum içi bilişim stratejilerini çok yönlü bir bakış açısıyla değerlendirebilecek şekilde çeşitlendirilmiştir. Uzman 1 (U1), Bilgi İşlem Dairesi Başkanı'dır, stratejik planlama ve bütçe süreçlerini yakından takip etmektedir. Uzman 2 (U2), kıdemli yazılım mühendisi olarak teknik uygunluk ve yeni teknolojiler konusunda deneyim sahibidir. Uzman 3 (U3), sistem yöneticisi pozisyonunda güvenlik ve veri koruması alanında uzmanlaşmıştır. Uzman 4 (U4), öğrenci işleri daire başkanlığı temsilcisi sıfatıyla kullanıcı deneyimi ve yazılımların entegrasyon gereksinimleriyle yakından ilgilenmektedir. Son olarak, Uzman 5 (U5), mali işler sorumlusu olup proje maliyet analizi ve sürdürülebilirlik konularında derinlemesine bilgi sahibidir.

Öncelikle, bahsi geçen 5 uzmana kriterler arası ikili karşılaştırma matrisleri (6×6) doldurmaları için formlar sunulmuştur. Uzmanlar, Saaty'nin 1–9 ölçeğini kullanarak ilgili iki kriterin birbirine göre önemini belirlemişlerdir. Ardından, her bir kriter için 7 alternatifi (Tamamen Kurum İçi Geliştirme, Kısmen Dış Kaynak vb.) ikili karşılaştırma matrisleri (7×7) oluşturulmuş ve uzman görüşleri aynı şekilde toplanmıştır.

Elde edilen tüm matrisler, geometrik ortalama yöntemiyle birleştirilerek tek bir "grup" matrisi oluşturulmuştur. Bu işlem, her uzmana eşit ağırlık vermek suretiyle bireysel değerlendirmelerin ortak bir sonuca dönüştürülmesini sağlamıştır. Son olarak, AHP yönteminin özvektör (*eigenvector*) yaklaşımı kullanılarak, önce kriter ağırlıkları (kriterlerin genel önemi) daha sonra da alternatiflerin her kritere göre öncelik değerleri

hesaplanmıştır. Bu öncelik değerleri, kriter ağırlıklarıyla çarpılarak her alternatifin nihai skoru elde edilmiş; böylece alternatiflerin öncelik sıralaması ortaya çıkmıştır.

GAHP sonucunda elde edilen orijinal sıralama sonrasında, kararın hangi derecede kırılabilir veya istikrarlı olduğunu anlamak amacıyla Sıralama Tersine Dönmesi analizi uygulanmıştır. Bu analizde, her seferinde bir kriter (ör. Maliyet ya da Güvenlik ve Uyumluluk) modelden çıkartılarak AHP hesaplamaları tekrar yürütülmüştür. Benzer şekilde, her bir alternatif de (ör. Tamamen Kurum İçi Geliştirme, Hazır Paket Yazılım vb.) modelden sırasıyla elenmiş ve kalan seçenekler arasında yeni bir öncelik sıralaması elde edilmiştir. Ortaya çıkan yeni sıralamalar, orijinal sonuçlar ile karşılaştırılarak, "Hangi kriter/alternatif eksik olduğunda sıralama ne yönde değişmektedir?" sorusu incelenmiştir. Böylece, belli bir kriter ya da alternatifin modeldeki önem düzeyi ve karar verici açısından ikame edilebilirliği veya vazgeçilmezliği görünür hâle gelmiştir. GAHP sonuçlarına ek bir duyarlılık testi sunarak, Sıralama Tersine Dönmesi durumunun varlığı test edilmiştir.

Bu çalışmada GAHP ve duyarlılık analizi, geliştirilen VBA tabanlı bir Excel eklentisi aracılığıyla uygulanmıştır. İlk aşamada standart analiz gerçekleştirilmiş, ardından programa eklenen ek satırlar sayesinde her bir kriter ve her bir alternatif tek tek döngüsel olarak modelden çıkarılarak analiz yeniden hesaplanmış ve raporlanmıştır. Böylece, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) çerçevesinde Sıralama Tersine Dönmesi yöntemi kullanılarak hem kriterler hem de alternatifler bazında duyarlılık analizi yapılmış, karar modelinin tutarlılığı ile sıralamalardaki değişim potansiyeli kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir (Bkz. Tablo 7 ve Tablo 8).

3.1. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)

AHP, Saaty (1980) tarafından geliştirilmiş olup, ÇKKV yöntemleri arasında önemli bir yere sahiptir. Bu yöntem, karmaşık karar problemlerini hiyerarşik bir yapıya oturtarak, subjektif yargıları kantitatif verilere dönüştürmeyi amaçlamaktadır. AHP, karar vericinin tercihlerine dayalı olarak kriterlerin ve alternatiflerin karşılaştırılmasını sağlayarak, en uygun seçeneğin belirlenmesine imkân tanımaktadır (Saaty, 1990). Yöntemin temel aşamaları, problem hiyerarşisinin oluşturulması, ikili karşılaştırmaların yapılması, ağırlık vektörlerinin hesaplanması, tutarlılık analizinin gerçekleştirilmesi ve nihai karar sıralamasının belirlenmesi olarak sıralanabilir.

AHP'nin ilk aşaması, karar probleminin net bir şekilde tanımlanması ve bir hiyerarşik model oluşturulmasıdır. Bu hiyerarşi, en üst seviyede karar hedefini, orta seviyede karar kriterlerini ve en alt seviyede alternatifleri içerecek şekilde modellenir. Böylece, karar süreci daha sistematik hale getirilerek, kriterler arasındaki ilişkilerin ve her bir alternatifin göreceli öneminin daha net anlaşılması sağlanır (Saaty, 2008). Hiyerarşik yapı sayesinde, karmaşık karar problemleri daha küçük ve yönetilebilir parçalara ayrılarak analiz edilebilir ve karar vericilerin daha bilinçli tercihler yapmasına olanak tanır.

İkinci aşamada, kriterler ve alternatifler arasında ikili karşılaştırmalar yapılır. Karar vericiler, her bir kriterin diğerlerine ve her bir alternatifin ilgili kriterlere göre göreceli önemini belirleyerek bir çift karşılaştırma matrisi oluştururlar. Karşılaştırma matrisi Eşitlik 1 (A), Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) kapsamında kullanılan ikili karşılaştırmaların yer aldığı simetrik bir matristir. Bu matris, karar vericilerin belirlediği önceliklere göre oluşturulur. Karşılaştırma matrisindeki (a_{ij}) satır i ve sütun j kesişimindeki elemandır. Bu değer, i kriterinin veya alternatifinin j kriterine veya alternatifine göre önem derecesini gösterir. Saaty'nin 1-9 ölçeği kullanılarak belirlenir. Karşılaştırma matrisi, Eşitlik 1'deki gibi gösterilir:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \frac{1}{a_{13}} & \frac{1}{a_{23}} & 1 & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \frac{1}{a_{3n}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Bu matrisin simetrik olması ve karar vericinin tutarlı yargılar oluşturmasını sağlamak için belirli matematiksel özelliklere sahip olması gerekmektedir. Ağırlık vektörü, matrisin her bir satırının geometrik ortalaması (GM_i) alınarak normalize edilmesiyle elde edilir (Saaty ve Vargas, 2012):

Geometrik Ortalama Eşitlik 2 (GM_i); karşılaştırma matrisinin i 'inci satırındaki elemanların geometrik ortalaması alınarak hesaplanır. Ağırlık vektörü, matrisin her bir satırının geometrik ortalaması alınarak normalize edilmesiyle elde edilir (Saaty ve Vargas, 2012):

$$GM_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

Bu değerler toplamlarına bölünerek normalleştirilir ve kriter ya da alternatiflerin ağırlıkları Eşitlik 3 (W_i) hesaplanır:

$$W_i = \frac{GM_i}{\sum_{k=1}^n GM_k} \quad (3)$$

AHP'nin en kritik aşamalarından biri, karar vericinin değerlendirmelerinin tutarlılığının ölçülmesidir. Tutarlılık, karar vericinin yaptığı karşılaştırmaların ne derece mantıklı olduğunu belirlemek için hesaplanır. Bunun için öncelikle karşılaştırma matrisinin en büyük özdeğeri Eşitlik 4 ($\lambda_{\max}$) hesaplanır (Saaty, 2003). Ağırlık vektörü W ile karşılaştırma matrisi A çarpılarak şu formül kullanılır:

$$\lambda_{\max} = \frac{(AW)_i}{W_i} \quad (4)$$

Elde edilen özdeğer ile tutarlılık indeksi Eşitlik 5 (CI - Consistency Index) şu şekilde hesaplanır:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

Bu değer, rastgele oluşturulmuş bir matrisin beklenen tutarsızlığına karşılık gelen rastgele indeks (RI - Random Index) ile karşılaştırılarak tutarlılık oranı Eşitlik 6 (CR - Consistency Ratio) elde edilir (Saaty, 1990):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

Burada RI değeri, matrisin boyutuna bağlı olarak önceden belirlenmiş sabit bir değerdir. Eğer $CR < 0.1$ ise karar vericinin değerlendirmeleri tutarlı kabul edilir. Ancak $CR \geq 0.1$ olması durumunda karşılaştırmaların gözden geçirilmesi önerilir (Saaty, 2001).

Son aşamada, alternatiflerin her bir kriter için ağırlıklı toplamaları hesaplanarak nihai skorlar belirlenir. Alternatiflerin her bir kriterine göre değerlendirme skorları ve kriterlerin ağırlıkları kullanılarak toplam ağırlıklandırılmış puan Eşitlik 7 ($S(A_i)$) hesaplanır (Saaty, 2003):

$$S(A_i) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot S_{ij} \quad (7)$$

Elde edilen toplam skorlar sıralanarak en uygun alternatif belirlenir. Bu yöntem, karar sürecinin sistematik, ölçülebilir ve rasyonel olmasını sağlayarak, subjektif yargıların objektif verilere dönüştürülmesine olanak tanır.

Çok sayıda kriter ve alternatif içeren karar problemlerinde sağladığı yapılandırılmış analiz süreci, karar vericilere daha güvenilir ve etkin çözümler sunmaktadır. Bu nedenle, günümüzde stratejik planlama, yatırım analizi ve politika oluşturma gibi kritik karar süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Saaty ve Vargas, 2012).

3.2. Grup Analitik Hiyerarşi Süreci

Özellikle karmaşık problemlerde, birden fazla karar vericinin görüşlerini dikkate almak gerektiğinde, GAHP yöntemi devreye girmektedir. GAHP, bireysel değerlendirmeleri sistematik bir şekilde birleştirerek, karar sürecini daha nesnel hale getiren bir çerçeve sunar. Bu yöntemin temel amacı, bir grup içindeki bireylerin subjektif yargılarını istatistiksel ve matematiksel yöntemlerle bütünleştirerek, kolektif bir kararın oluşturulmasını sağlamaktır (Saaty ve Vargas, 2012).

GAHP'nin uygulanması, öncelikle karar problemine ilişkin hiyerarşik bir yapının oluşturulmasıyla başlar. Karar süreci, en üst seviyede karar hedefini, orta seviyede kriterleri ve alt seviyede alternatifleri içerecek şekilde yapılandırılır (Saaty, 2008). Grup karar verme sürecinde, her bir karar verici, kriterleri ve alternatifleri ikili karşılaştırma matrisleriyle değerlendirir. Ancak bu değerlendirmeler bireysel yargılara dayandığından, grup üyeleri arasında farklılıklar oluşabilir. Bu nedenle, bireysel karşılaştırma matrislerinden ortak bir matris türetmek gerekmektedir.

GAHP'nin en yaygın kullanılan iki birleştirme yöntemi Aritmetik Ortalama Yöntemi (AOM - Arithmetic Mean Method) ve Geometrik Ortalama Yöntemi (GOM - Geometric Mean Method) olarak öne çıkmaktadır. AOM , bireylerin verdikleri ikili karşılaştırma değerlerinin aritmetik ortalamasını alarak grup matrisini oluşturur (Eşitlik 8):

$$a_{ij}^{group} = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k a_{ij}^{(p)} \quad (8)$$

Burada Eşitlik 8 a_{ij}^{group} , grup tarafından oluşturulan nihai karşılaştırma değerini; $a_{ij}^{(p)}$, karar vericinin ilgili ikili karşılaştırma değerini; k , karar verici sayısını ifade etmektedir.

Öte yandan, Geometrik Ortalama Yöntemi, her karar vericinin karşılaştırma değerlerinin çarpımının k kökünü alarak hesaplanır (Eşitlik 9).

$$a_{ij}^{grup} = \left(\prod_{p=1}^k a_{ij}^{(p)} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (9)$$

Saaty (1990) tarafından önerilen Geometrik Ortalama Yöntemi, çarpımsal özellikleri nedeniyle AHP'nin temel varsayımlarına daha uygun kabul edilmekte ve daha tutarlı sonuçlar verdiği gösterilmektedir (Saaty, 1990).

Grup karar verme sürecinde, bireysel ikili karşılaştırma matrislerinin birleşmesiyle elde edilen grup matrisinden özvektör yöntemi kullanılarak ağırlık vektörleri hesaplanır. Ancak, grup karar verme süreçlerinde Sıralama Tersine Dönmesi etkisinin daha belirgin hale geldiği ve karar vericiler arasındaki bilişsel önyargıların sıralama değişimlerini tetikleyebileceği belirtilmektedir (Melnik-Leroy ve Dzemyda, 2021). Aires ve Ferreira (2018) tarafından yapılan deneysel analizler, grup karar verme süreçlerinde kullanılan *aritmetik ortalama* ve *geometrik ortalama* yaklaşımlarının Sıralama Tersine Dönmesi etkisini nasıl farklılaştırdığını göstermektedir. Karşılaştırma matrisinin her bir satırının geometrik ortalaması alınarak normalize edilmesi yöntemi Eşitlik 10'da gösterilmektedir:

$$w_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{kj} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (10)$$

Bu işlem sonucunda her bir kriter ve alternatif için ağırlık değerleri elde edilir ve karar probleminin çözümü sağlanır. GAHP'nin önemli bir yönü de tutarlılık analizidir. Karar vericilerin değerlendirmelerinin belirli bir tutarlılık seviyesinde olması gerekmektedir. Grup karar verme sürecinde, bireysel kararların birleşmesiyle elde edilen matrisin tutarlılık oranı (CR - Consistency Ratio), bireysel matrislerin tutarlılık oranlarının ortalaması Eşitlik 11 olarak hesaplanabilir:

$$CR_{grup} = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k CR^{(p)} \quad (11)$$

Burada $CR^{(p)}$, her bir karar vericinin tutarlılık oranını göstermektedir. Eğer elde edilen grup tutarlılık oranı 0.1'den küçükse, değerlendirmelerin tutarlı olduğu kabul edilir; aksi takdirde, karar vericilerden değerlendirmelerini yeniden gözden geçirmeleri istenir (Saaty, 2003).

GAHP'nin karar verme sürecine sağladığı avantajlardan biri de bireysel önyargıları minimize ederek daha dengeli bir karar alınmasını sağlamasıdır. Bunun yanı sıra, karar vericiler arasında uzlaşa sağlanmasına yardımcı olur ve karar sürecinin şeffaf olmasını mümkün kılar (Vargas, 1990). Ancak, GAHP'nin uygulanması bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Özellikle büyük gruplarda karar vericiler arasındaki uzmanlık seviyelerinin çok farklı olması, nihai matrisin oluşturulmasını zorlaştırabilir ve tutarsızlıklara neden olabilir (Forman ve Peniwati, 1998). Aslında daha deneyimli uzmanlar daha yüksek tutarlılıkta girdi sağlar. Ayrıca uzmanların hiyerarşik seviyeleri göz ardı edilerek yalnızca 'uzmanlık' seviyelerine göre seçilmesi hem daha 'demokratik' kararların alınmasına hem de çok daha doğru sonuçlar elde edilmesine yardımcı olur (Chakhar ve Saad, 2014).

Sonuç olarak, GAHP yöntemi, birden fazla karar vericinin katılımını gerektiren kompleks karar süreçlerinde önemli bir analiz aracı olarak kullanılmaktadır. Matematiksel yöntemleri sayesinde, bireysel yargıları objektif verilere dönüştürerek, karar sürecinin sistematik ve güvenilir olmasını sağlar. Bu nedenle, stratejik planlama, tedarik zinciri yönetimi, proje yönetimi, sağlık hizmetleri, mühendislik ve kamu yönetimi gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.3. Sıralama Tersine Dönmesi

Sıralama Tersine Dönmesi, ÇKKV yöntemlerinde, karar probleminin yapısında bir değişiklik yapıldığında alternatiflerin sıralamasının beklenmedik şekilde değişmesi durumudur (Belton ve Gear, 1983). Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) gibi yöntemlerde bu olgu, özellikle yeni bir alternatifin eklenmesi veya mevcut bir alternatifin çıkarılması durumunda ortaya çıkabilir (Saaty, 1990). Ancak, son yıllarda yapılan çalışmalar, Sıralama Tersine Dönmesi olgusunun yalnızca matematiksel bir durum olmadığını, aynı zamanda karar vericilerin bilişsel önyargıları, kriter ağırlıklandırma süreçlerinde yapılan seçimler ve normalizasyon teknikleri ile de ilişkili olduğunu göstermektedir (Aires ve Ferreira, 2018; Majumdar ve diğerleri, 2021). Özellikle, alternatiflerin eklenmesi veya çıkarılması durumunda oluşan sıralama değişimleri, karar modellerinin güvenilirliği açısından önemli bir sorun teşkil edebilir (Melnik-Leroy ve Dzemyda, 2021).

Matematiksel olarak Sıralama Tersine Dönmesi, ağırlıklandırılmış bir karar matrisindeki değişikliklerin, kriter ağırlıkları veya alternatiflerin birbirine göreceli öncelik değerlerini beklenmedik bir şekilde değiştirmesiyle ifade edilir. AHP'de alternatiflerin öncelik vektörü, özvektör yöntemi ile hesaplanır (Eşitlik 12):

$$Aw = \lambda_{max} w \quad (12)$$

Eşitlik 12’de A , karar matrisi; w , öncelik vektörü ve $\lambda_{\max}$, en büyük özdeğerdir. Eğer yeni bir alternatif eklendiğinde veya mevcut bir alternatif çıkarıldığında A matrisindeki ikili karşılaştırmalar değişirse, özvektörlerin normalizasyon sürecinden dolayı ağırlıkların yeniden ölçeklenmesi, alternatiflerin sıralamasını tersine çevirebilir (Dyer, 1990).

Sıralama Tersine Dönmesi olgusu, özellikle belirli ÇKKV yöntemlerinde tutarsızlık yaratabileceğinden, karar destek sistemlerinde dikkate alınması gereken kritik bir konudur. Sıralama Tersine Dönmesini önlemek için ideal normalizasyon teknikleri ve karar matrisinin duyarlılık analizleri gibi yöntemler önerilmektedir. Bununla birlikte, literatürde yapılan duyarlılık analizi çalışmaları, farklı AHP yöntemlerinin sıralama değişimlerine karşı değişen seviyelerde hassasiyet gösterdiğini ortaya koymuştur (Toth ve Vacik, 2018). Ayrıca, Ishizaka ve Labib (2011) tarafından yapılan kapsamlı bir inceleme, Sıralama Tersine Dönmesi etkisini minimize etmek için geometrik ortalama ve doğrusal ağırlıklandırma gibi tekniklerin daha tutarlı sonuçlar ürettiğini göstermektedir.

3.4. Duyarlılık Analizi

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), karar destek sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntem olup, alternatiflerin ve kriterlerin önceliklendirilmesi sürecinde sistematik bir yaklaşım sunmaktadır. Ancak, karar modelinin sağlamlığını test etmek ve karar sürecinin hangi faktörlerden daha fazla etkilendiğini anlamak için duyarlılık analizi kritik bir aşamadır (Ivanco ve diğerleri, 2017; Maletič ve diğerleri, 2014). Duyarlılık analizi, karar modelinde belirli kriterlerin veya alternatiflerin çıkarılması veya değiştirilmesi durumunda sıralama değişimlerinin incelenmesini sağlar. Bu yöntem, karar vericilerin kararlarının güvenilirliğini değerlendirmelerine ve modelin hangi değişkenlere karşı daha hassas olduğunu belirlemelerine yardımcı olur (Masuda ve Fujii, 1987).

Duyarlılık analizi, özellikle ÇKKV modellerinde modelin tutarlılığını test etmek ve Sıralama Tersine Dönmesi olasılığını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, duyarlılık analizi ile belirlenen kriterlerin ve alternatiflerin model üzerindeki etkileri incelenerek, sıralama değişimlerinin nasıl şekillendiği analiz edilmiştir. Bunun için kullanılan duyarlılık analizi yaklaşımının genel algoritmik yapısı aşağıda verilmiştir.

Algoritma: Duyarlılık Analizi

Girdiler:

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$: Kriterler kümesi

- $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$: Alternatifler kümesi
- W : Kriter ağırlık vektörü, $\sum w_i = 1$
- *GrupVerisi* : grup üyelerine ait ikili karşılaştırma verileri

Çıktı

DuyarlılıkRaporu (Kriter ve alternatif çıkarımlarının sıralamaya etkilerini içeren rapor)

1. TemelSıralama $\leftarrow$ SıralamaHesapla($A, C, W, \text{GrupVerisi}$)
2. DuyarlılıkRaporu $\leftarrow \emptyset$
3. // Kriter Duyarlılık Analizi
4. For each $c \in C$ do
5. $C' \leftarrow C \setminus \{c\}$
6. $W' \leftarrow \text{AğırlıklarıYenidenHesapla}(C', \text{GrupVerisi})$
7. YeniSıralama $\leftarrow$ SıralamaHesapla($A, C', W', \text{GrupVerisi}$)
8. Değişim $\leftarrow$ SıralamaKarşılaştır(TemelSıralama, YeniSıralama)
9. DuyarlılıkRaporu $\leftarrow$ DuyarlılıkRaporu $\cup \{\text{Tür: "Kriter", Çıkarılan: } c, \text{Değişim: Değişim}\}$
10. End For
11. // Alternatif Duyarlılık Analizi
12. For each $a \in A$ do
13. $A' \leftarrow A \setminus \{a\}$
14. YeniSıralama $\leftarrow$ SıralamaHesapla($A', C, W, \text{GrupVerisi}$)
15. Değişim $\leftarrow$ SıralamaKarşılaştır(TemelSıralama, YeniSıralama)
16. DuyarlılıkRaporu $\leftarrow$ DuyarlılıkRaporu $\cup \{\text{Tür: "Alternatif", Çıkarılan: } a, \text{Değişim: Değişim}\}$
17. End For
18. Return DuyarlılıkRaporu

4. BULGULAR

Yazılım seçimi, devlet üniversitelerinin Bilgi İşlem Daire Başkanlıkları için stratejik bir karar sürecidir. Bu süreçte, alternatif yazılım çözümleri çeşitli kriterler doğrultusunda değerlendirilmeli ve en uygun seçenek belirlenmelidir. Çalışmada, GAHP yöntemi ile yedi farklı alternatif karşılaştırılmış ve karar sürecinde belirleyici olan altı temel kriter kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, hangi alternatifin öncelikli olarak tercih edilmesi gerektiği konusunda kapsamlı bir değerlendirme sağlamaktadır.

Bulgular, her bir alternatifin belirlenen kriterler doğrultusunda nasıl performans gösterdiğini ortaya koymakta ve bu doğrultuda en iyi seçeneği belirlemektedir. Ters Sıralama analizi ile, farklı kriterlerin veya alternatiflerin çıkarılması durumunda sonuçların nasıl değiştiği incelenmiş ve karar sürecinin duyarlılığı değerlendirilmiştir. Bulguların detayları aşağıda sunulmaktadır.

4.1. Örnek Uygulama

Yöntemin işleyişini daha açık gösterebilmek için üç kriter (Maliyet, Teknik Uygunluk, Zaman ve Hız) ve üç alternatiften (Kurum İçi Geliştirme, Hazır Paket Yazılım, Dış Kaynak Kullanımı) oluşan basitleştirilmiş bir örnek uygulama gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, her bir alternatifin kriter bazındaki yerel öncelikleri belirlenmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Örnek uygulama – Alternatiflerin yerel öncelikleri

Alternatif	K1 (Maliyet)	K2 (Teknik Uygunluk)	(Zaman ve Hız)
Kurum İçi Geliştirme (A1)	0,60	0,55	0,40
Hazır Paket Yazılım (A2)	0,30	0,35	0,40
Dış Kaynak Kullanımı (A3)	0,10	0,10	0,20

Kriter ağırlıkları: Maliyet = 0,50; Teknik Uygunluk = 0,30; Zaman ve Hız = 0,20.

Bu değerler GAHP yöntemiyle çarpılarak her alternatifin Tablo 4'te görüldüğü gibi nihai skorları hesaplanmıştır.

Tablo 4. Örnek uygulama – Nihai skorlar

Alternatif	Nihai Skor
Kurum İçi Geliştirme (A1)	0,545
Hazır Paket Yazılım (A2)	0,335
Dış Kaynak Kullanımı (A3)	0,120

Tablo 4'e göre birinci sırada Kurum İçi Geliştirme (A1, 0,545), ikinci sırada Hazır Paket Yazılım (A2, 0,335) ve üçüncü sırada Dış Kaynak Kullanımı (A3, 0,120) yer almaktadır. Ardından, sıralamanın tersine yöntemi uygulanmış; kriterler ve alternatifler sırayla çıkarılarak yeni sıralamalar elde edilmiştir.

Tablo 5. Örnek uygulama – Kriter çıkarımı

Çıkarılan Kriter	Yeni Sıralama	Not
K1 (Maliyet)	A1> A2>A3	Sıralama değişmedi
K2 (Teknik Uyg.)	A1>A2>A3	Sıralama değişmedi
K3 (Zaman ve Hız)	A1>A2> A3	Sıralama değişmedi

Tablo 6. Örnek uygulama – Alternatif çıkarımı

Çıkarılan Alternatif	Yeni Sıralama	Not
A1	A2>A3	A2 öne geçti
A2	A1>A3	Sıralama değişmedi
A3	A1>A2	Sıralama değişmedi

Bu örnek uygulama, GAHP ve Sıralama Tersine Dönmesi analizinin nasıl işlediğini sayısal bir senaryo üzerinden göstermektedir (Tablo 5). Kriterlerden herhangi birinin çıkarılması sıralamada değişime yol açmamıştır. A1 çıkarıldığında A2'nin öne geçmesi, A1'in baskın bir alternatif olduğunu kanıtlamaktadır. Bu sonuç, kriterlerin tek başına sıralamayı değiştirecek ölçüde baskın olmadığını, ancak A1'in güçlü bir lider alternatif olduğunu ortaya koymaktadır (Tablo 6).

4.1. GAHP Bulguları

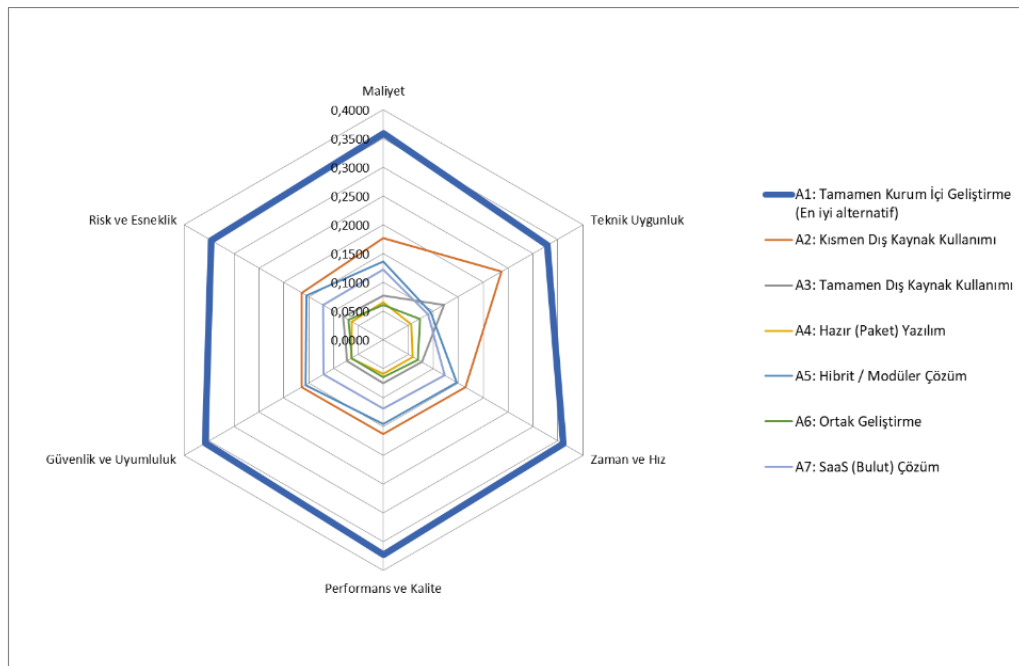
GAHP uygulanarak yazılım tedariki yöntem seçimi sonuçları Tablo 7'de verilmiştir. Bu Tabloya göre, A1 (Tamamen Kurum İçi Geliştirme) her bir kriterde en yüksek kısmi puana yakın bir değere sahip olup, 0,3531'lik nihai skorla en iyi alternatif seçilmiştir. Özellikle "Maliyet" ve "Performans ve Kalite" gibi kriterlerde diğer seçeneklere göre büyük fark yaratmaktadır. A2 (Kısmen Dış Kaynak Kullanımı), 0,1827 puanla ikinci sırada yer almakta; özellikle "Teknik Uygunluk" boyutunda (0,2373) kayda değer bir başarı göstermektedir. Bu, üniversite altyapısının belirli modüller için dış kaynakla hızlı şekilde entegre edilebileceği fikrini

yansıtabilir. A5 (Hibrit/Modüler) ve A7 (Bulut Çözümü) sırasıyla 0,1360 ve 0,1156 skorlarıyla orta düzeyde tercih edilir görünmektedir. Hibrit modelin modüller arası uyum zorluğu, Hizmet olarak Yazılım (SaaS) modelinde ise veri güvenliği ve mevzuata uyum endişeleri öne çıkmış olabilir. A3 (Tamamen Dış Kaynak Kullanımı), 0,0846 skoruyla beşinci sıradadır. Bu seçenek, proje yönetimi ve güvenlik konusundaki riskler nedeniyle dikkatli yaklaşılması gereken bir yöntem olarak algılanmıştır. A6 (Ortak Geliştirme), 0,0659 puanla altıncı sırada kalmış, farklı kurumlar arası koordinasyon ve proje takvimi yönetim zorlukları nedeniyle düşük tercih edilir bir model olduğu görülmüştür. A4 (Hazır Paket Yazılım), 0,0621 değerle son sıradadır. Hazır paket çözümlerin düşük özelleştirme kapasitesi ve üniversiteye özgü ihtiyaçları tam karşılayamaması, bu sonucun temel nedeni olabilir.

Tablo 7. GAHP sonuçları

Alternatifler/ Kriterler	Maliyet (K1)	Teknik Uygunluk (K2)	Zaman ve Hız (K3)	Performans ve Kalite (K4)	Güvenlik ve Uyumluluk (K5)	Risk ve Esneklik (K6)	Alternatif Ağırlıkları
Tamamen Kurum İçi Geliştirme (A1)	0,3592	0,3285	0,3613	0,3729	0,3571	0,3452	0,3531
Kısmen Dış Kaynak Kullanımı (A2)	0,1775	0,2373	0,1640	0,1632	0,1646	0,1644	0,1827
Tamamen Dış Kaynak Kullanımı (A3)	0,0768	0,1208	0,0766	0,0754	0,0731	0,0805	0,0846
Hazır (Paket) Yazılım (A4)	0,0660	0,0552	0,0587	0,0586	0,0643	0,0630	0,0621
Hibrit / Modüler Çözüm (A5)	0,1368	0,0953	0,1466	0,1463	0,1565	0,1549	0,1360
Ortak Geliştirme (A6)	0,0610	0,0734	0,0697	0,0648	0,0639	0,0704	0,0659
Bulut Çözüm (A7)	0,1228	0,0895	0,1232	0,1188	0,1203	0,1216	0,1156
Kriter Ağırlıkları	0,3546	0,1890	0,1028	0,0800	0,1864	0,0872	

Tablo 7'ye göre, seçimlerde en etkili kriter 0,3546 ağırlık skoru ile birinci sırada Maliyet kriteri olmuştur, ikinci sırada ise 0,1890 skorla Teknik Uygunluk kriteri yer almıştır, etki düzeyi üçüncü sırada olan kriter Güvenlik/Uyumluluk 0,1864 ağırlık skoruna sahiptir, dördüncü sırada 0,1028 ağırlık skoru ile Zaman ve Hız kriteri yer almaktadır, Risk ve Esneklik 0,0872 ağırlığı ile beşinci sırada, 0,0800 ağırlık skoru ile Performans ve Kalite ise en az etkiye sahip kriter olmuştur.



Şekil 1. GAHP skorlar radar grafiği

Şekil 1'de, GAHP yöntemi kullanılarak değerlendirilmiş karar alternatiflerinin kriter bazlı skorlarını içeren bir radar grafiği verilmiştir. Şekil 1, incelendiğinde, A1 (Tamamen Kurum İçi Geliştirme) alternatifinin tüm kriterlerde en yüksek skora sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, kurum içi geliştirme modelinin uzun vadeli sürdürülebilirlik, kalite, güvenlik ve risk yönetimi açısından diğer seçeneklere kıyasla üstün performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle "Maliyet" ve "Güvenlik ve Uyumluluk" kriterlerinde belirgin bir avantaj sağladığı görülmektedir.

A2 (Kısmen Dış Kaynak Kullanımı) alternatifi, özellikle "Teknik Uygunluk" ve "Maliyet" kriterlerinde A1'den sonra en güçlü aday olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, tamamen dış kaynaktan kaçınıp hibrit bir model benimseyen yaklaşımların hem maliyet hem de teknik uygunluk açısından dengeli bir çözüm sunduğunu göstermektedir. A3 (Tamamen Dış Kaynak Kullanımı) ve A4 (Hazır Paket Yazılım) alternatifleri, genellikle daha düşük ağırlıklandırılmış kriterlere sahiptir. Bu durum, dış kaynak kullanımına yönelik çözümlerin karar vericiler tarafından daha riskli ve güvenlik açısından daha az esnek olarak değerlendirildiğini gösterebilir (Saaty, 2008). Ayrıca, hazır yazılım çözümlerinin (A4), özelleştirilebilirlik ve uzun vadeli performans açısından sınırlamalar içerdiği anlaşılmaktadır. Öte yandan, A5 (Hibrit / Modüler Çözüm) alternatifi, bazı kriterlerde makul seviyede rekabet edebilmekle birlikte risk ve esneklik, güvenlik açısından belirgin sınırlamalar içermektedir. A6 (Ortak Geliştirme) alternatifi ise genel olarak düşük skorlarla temsil edilmekte olup, karar vericilerin bu yaklaşımı daha düşük bir öncelik olarak değerlendirdiği görülmektedir. Son olarak, A7 (Bulut Çözümü) alternatifi, özellikle "Zaman ve Hız" kriterinde diğer alternatiflere yakın bir performans sergilemektedir. Bu durum, SaaS çözümlerinin hızlı devreye alınabilme avantajlarını yansıtmaktadır (Vaidya ve Kumar, 2006). Ancak, "Güvenlik ve Uyumluluk" ve "Risk ve Esneklik" kriterlerinde nispeten daha düşük skorlarla yer alması, karar vericilerin bulut çözümlerine yönelik belirli çekinceleri olduğunu göstermektedir.

4.2. Kriterlerin Duyarlılık Analizi Bulguları

Grup Analitik Hiyerarşi Süreci çerçevesinde Sıralama Tersine Dönmesi yöntemi kullanılarak kriter bazında duyarlılık analizini içermektedir. Tablo 8, belirli bir kriterin çıkarılması durumunda alternatiflerin sıralamalarında nasıl bir değişiklik meydana geldiğini göstermektedir. Bu analizin amacı, karar modelinin tutarlılığını, karar değişkenlerine olan duyarlılığını ve alternatifler arasındaki göreceli önemin nasıl şekillendiğini değerlendirmektir.

Tablo 8. Kriterlerin duyarlılık analizi özet tablosu

Çıkarılan Kriter	Sıra							Notlar
	1	2	3	4	5	6	7	
K1	A1	A2	A5	A7	A3	A6	A4	K1 çıkarıldığında, A1 en yüksek ağırlıklı skora sahip oluyor.
K2	A1	A2	A5	A7	A3	A6	A4	K2 çıkarıldığında, A1 en yüksek ağırlıklı skora sahip oluyor. Sıralama değişmiyor.
K3	A1	A2	A5	A7	A3	A6	A4	K3 çıkarıldığında, A1 en yüksek ağırlıklı skora sahip oluyor. Sıralama değişmiyor.
K4	A1	A2	A5	A7	A3	A6	A4	K4 çıkarıldığında, A1 en yüksek ağırlıklı skora sahip oluyor. Sıralama değişmiyor.
K5	A1	A2	A5	A7	A3	A6	A4	K5 çıkarıldığında, A1 en yüksek ağırlıklı skora sahip oluyor. Sıralama değişmiyor.
K6	A1	A2	A5	A7	A3	A6	A4	K6 çıkarıldığında, A1 en yüksek ağırlıklı skora sahip oluyor. Sıralama değişmiyor.

Tablo 8'e göre, her bir kriter çıkarıldığında alternatiflerin sıralamasında belirgin bir değişim gözlenmemektedir. Alternatiflerin en yüksek skoru alma sırası her kriter çıkarıldığında aynı kalmıştır (A1, A2, A5, A7, A3, A6, A4). Bu durum şu şekilde yorumlanabilir:

Her bir kriterin çıkarılmasının alternatiflerin sıralamalarına etkisinin sınırlı olması, karar modelinde kullanılan kriterlerin birbirine yakın ağırlıklara sahip olduğu veya belirli bir kriterin baskın olmadığı yönünde bir değerlendirme yapmayı mümkün kılmaktadır. Eğer belirli bir kriterin çıkarılması sıralamada ciddi değişiklikler yaratsaydı, bu kriterin aşırı belirleyici bir faktör olduğu ve karar sürecinde potansiyel bir önyargıya yol açabileceği anlamına gelebilirdi.

Alternatifler arasındaki sıralamanın değişmemesi, kriterlerin birbirinden bağımsız olarak değerlendirildiğini ve karar modelinin kriter ağırlıklarına aşırı duyarlı olmadığını göstermektedir. Ayrıca alternatiflerin sıralamasında değişiklik olmaması, AHP modelinin iyi kalibre edilmiş olduğunu ve kriterlerin ağırlıklarının dengeli bir şekilde dağıtıldığını düşündürmektedir. Karar modelinin duyarlılık analizi karşısında dirençli olduğu ve herhangi bir kriterin çıkarılmasının karar üzerindeki etkisinin sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu bulgular özellikle, tek tek kriter ağırlıklarındaki değişimlere rağmen kurum içi geliştirmenin yüksek dayanıklılığı (*Robust*) olduğunu göstermektedir.

4.2.2. Alternatiflerin Duyarlılık Analizi Bulguları

Bu uygulama ile Sıralama Tersine Dönmesi yöntemi kullanılarak alternatiflerin duyarlılık analizi sonuçları değerlendirilmiştir. Tablo 9, alternatiflerden birinin sistematik olarak çıkarılmasıyla karar modelinin tutarlılığını ve sıralamadaki değişimlerin etkilerini ortaya koymaktadır.

Tablo 9. Alternatiflerin duyarlılık analizi özet tablosu

Çıkarılan Alternatif	Sıra							Notlar
	1	2	3	4	5	6	7	
Orijinal	A1	A2	A5	A7	A3	A6	A4	Orijinal sıralama; A1 en yüksek ağırlıklı skora sahip.
A1	A2	A5	A7	A3	A6	A4	-	A1 çıkarıldığında, A2 en yüksek ağırlıklı skora sahip oluyor.
A2	A1	A5	A7	A3	A6	A4	-	A2 çıkarıldığında sıralamada herhangi bir değişiklik olmadı.
A3	A1	A2	A5	A7	A4	A6	-	A3 çıkarıldığında, A4 ve A6 sıralamada birer basamak yükseldi.
A4	A1	A2	A5	A7	A3	A6	-	A4 çıkarıldığında sıralama büyük ölçüde değişmedi.
A5	A1	A2	A7	A3	A6	A4	-	A5 çıkarıldığında, A7 üçüncü sıraya yükseldi.
A6	A1	A2	A5	A7	A3	A4	-	A6 çıkarıldığında, sıralama önemli ölçüde değişmedi.
A7	A1	A2	A5	A3	A6	A4	-	A7 çıkarıldığında bir değişiklik yaşanmamıştır.

Orijinal sıralamada, A1 (0,3531) en yüksek ağırlıklı skorla en iyi alternatif olarak öne çıkmaktadır. Ardından A2 (0,1827), A5 (0,1360), A7 (0,1156), A3 (0,0846), A6 (0,0659) ve A4 (0,0621) alternatifleri sıralanmaktadır. Orijinal Sıralama, yapılan analizde, başlangıçta A1 en yüksek ağırlıklı skora sahip alternatif olarak belirlenmiştir. Bu durum, A1'in karar modelinde en baskın alternatif olarak değerlendirildiğini göstermektedir. A1 sistemden çıkarıldığında, A2 en yüksek ağırlıklı alternatif haline gelmiştir. Bu, A1'in güçlü bir lider olduğu ancak A2'nin de önemli bir alternatif olarak sistemde yer aldığını göstermektedir. A1'in yokluğunda, karar sürecinin A2'yi en iyi alternatif olarak değerlendirdiği gözlemlenmektedir. A2'nin çıkarılmasıyla birlikte sıralamada herhangi bir değişiklik olmaması, A2'nin karar modelindeki ağırlığının diğer alternatifler üzerinde doğrudan bir etki yaratmadığını göstermektedir. Bu durum, A2'nin belirleyici bir faktör olmadığını ancak A1'in varlığında güçlü bir alternatif olarak değerlendirildiğini ortaya koymaktadır. A3 sistemden çıkarıldığında, A4 ve A6'nın sıralamada birer basamak yükseldiği görülmüştür. Bu durum, A3'ün A4 ve A6 üzerinde baskı oluşturan bir alternatif olduğunu ve A3'ün yokluğunda bu iki alternatifin daha avantajlı hale geldiğini göstermektedir. A4 çıkarıldığında sıralamanın büyük ölçüde değişmediği gözlemlenmiştir. Bu bulgu, A4'ün karar modelinde baskın bir alternatif olmadığını ve çıkarıldığında diğer alternatiflerin konumlarını büyük ölçüde koruduğunu göstermektedir. A5'in Çıkarılması: A5 çıkarıldığında, A7'nin üçüncü sıraya yükselmesi, A5'in özellikle A7 üzerinde doğrudan bir rekabet oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Bu, A7'nin A5'in varlığında baskılandığını ve A5'in yokluğunda daha yüksek bir sıralamaya sahip olabileceğini göstermektedir. A6 çıkarıldığında, sıralamanın önemli ölçüde değişmediği gözlemlenmiştir. Bu, A6'nın karar modelindeki etkisinin görece daha düşük olduğunu ve diğer alternatiflerle doğrudan güçlü bir rekabet içinde olmadığını göstermektedir. A7'nin çıkarılması durumunda sıralamada herhangi bir değişiklik olmaması, A7'nin karar modeli üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, A7'nin belirleyici bir alternatif olmadığını desteklemektedir.

Bu duyarlılık analizi, karar modelinin alternatiflerin varlığına karşı nasıl bir tepki verdiğini ortaya koymuştur. Sıralama Tersine Dönmesi yönteminin uygulanmasıyla şu temel çıkarımlara ulaşılmıştır: A1 ve A2 karar modelinde en baskın iki alternatiftir ve A1'in çıkarılması A2'nin en yüksek ağırlıklı alternatif olmasına neden olmuştur. A3 ve A5'in çıkarılması, belirli alternatiflerin sıralamalarında değişikliğe neden olmuş, özellikle A4, A6 ve A7 üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. A4, A6 ve A7'nin çıkarılması sıralamada büyük değişimlere yol açmamıştır, bu da bu alternatiflerin karar modelindeki etkisinin görece daha düşük olduğunu göstermektedir.

Yapılan duyarlılık analizi, orijinal GAHP karar modelinin kararlılığını desteklemekte ve sıralama değişimlerine karşı dayanıklı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu da modelin sağlam bir şekilde inşa edildiğini ve karar sürecinin güvenilir olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışma, kamu üniversitelerinin yazılım tedarik ve geliştirme süreçlerini sistematik ve nesnel bir yaklaşımla yönetmelerine katkı sağlamak amacıyla mevcut Grup Analitik Hiyerarşi Süreci (GAHP) metodunu yazılım tedarik problemine uygulamıştır. Geleneksel karar süreçlerindeki bireysel öznellik, kurumsal öncelikler arasındaki uyumsuzluk ve kararların doğrulanabilir olmaması gibi sınırlamaları aşmak için GAHP yöntemi tercih edilmiştir. Böylece, birden fazla paydaşın görüşleri bilimsel bir çerçevede

birleştirilerek çok kriterli bir değerlendirme yapılmış ve kurumsal bir karar alma sürecinin daha şeffaf, sistematik ve tekrarlanabilir hale getirilmesi sağlanmıştır. Literatürde de GAHP'nin çok paydaşlı ortamlarda şeffaflık ve sistematiklik kazandırdığı geniş şekilde vurgulanmaktadır (Forman ve Peniwati, 1998; Vaidya ve Kumar, 2006).

Karar modelinin sadece belirli bir senaryo için değil, değişen koşullara karşı nasıl tepki verdiğini anlamak amacıyla Sıralama Tersine Dönmesi yöntemiyle test edilmiştir. Modelin dayanıklılığı, farklı kriter ve alternatiflerin çıkarılması durumunda sıralama değişimlerinin analiz edilmesiyle değerlendirilmiş, karar modelinin tutarlılığı doğrulanmıştır. Bu yöntem sayesinde, üniversite yönetimlerinin farklı senaryolarda en uygun alternatifleri belirleyerek daha esnek ve bilinçli kararlar alması desteklenmiştir. Literatürde de Sıralama Tersine Dönmesi yönteminin karar modellerinin kırılganlık ve istikrar analizinde kritik bir araç olduğu ve model güvenilirliğini artırmaya yönelik önemli bir metodolojik katkı sunduğu belirtilmektedir (Dyer, 1990; Ishizaka ve Labib, 2011; Majumdar ve diğerleri, 2021). Bu açıdan, yapılan uygulama hem mevcut metodolojinin geçerliliğini test etmekte hem de literatürde vurgulanan katkıları desteklemektedir.

Çalışmanın bulguları, üniversitelerin dijital dönüşüm stratejilerini daha bilinçli yönetebilmeleri için kapsamlı bir çerçeve sağlamaktadır. Özellikle kamu sektöründe teknoloji yönetimi, bütçe planlaması ve sürdürülebilirlik stratejilerinin daha verimli hale getirilmesine katkı sağlama potansiyeli taşımaktadır. GAHP ve Sıralama Tersine Dönmesi yöntemlerinin entegrasyonu sayesinde, karar süreçleri daha öngörülebilir hale gelmekte ve kurumların kaynaklarını en etkili şekilde yönlendirmelerine olanak tanımaktadır. Bu sonuçlar, literatürde AHP ve GAHP'nin kamu yönetimi, yazılım seçimi ve e-devlet uygulamalarında karar süreçlerine şeffaflık ve sistematiklik kazandırdığına dair bulgularla uyumludur (Muhammad ve Hromada, 2023). Dolayısıyla, bu çalışma yeni bir yöntem geliştirmekten ziyade mevcut yöntemin kamu üniversitelerindeki yazılım tedarik problemine uygulanmasına dayalı özgün bir katkı sunmaktadır.

Ayrıca elde edilen sonuçlar, tedarikçi seçimi, proje yönetimi ve kamu politikalarında ÇKKV yöntemlerinin etkinliğini ortaya koyan önceki çalışmaları da desteklemektedir. Örneğin, bilgi teknolojileri projelerinin önceliklendirilmesinde AHP tabanlı modellerin etkinliği daha önce de gösterilmiştir (Sari ve diğerleri, 2024). Bu bağlamda, üniversitelerin yazılım tedarik süreçlerinde gerçekleştirilen bu uygulama, yalnızca çalışmanın özgün bağlamında değil, aynı zamanda geniş ölçekli karar ortamlarında da uygulanabilir bir çerçeve sunmakta ve literatürde rapor edilen bulgularla (Ghosh ve diğerleri, 2012; Islam ve Arakawa, 2022; Marcarelli ve Squillante, 2019) örtüşmektedir.

Bu çalışmanın katkısı, yalnızca bilgi işlem yöneticilerinin yazılım seçim süreçlerini iyileştirmekle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda kamuda karar verme mekanizmalarının güvenilirliğini, hesap verebilirliğini, verimliliğini ve etkinliğini artırmaya yönelik metodolojik bir katkı sağlamasındadır. GAHP yöntemi ile yapılan uygulamalar, karar vericilere yalnızca en iyi alternatifi seçme konusunda değil, aynı zamanda kararlarının değişen koşullara karşı nasıl bir direnç göstereceğini anlamaları konusunda da önemli bir rehber sunmaktadır. Literatürde kamu kurumlarında ve özel sektörde benzer yöntemlerin başarıyla uygulandığı çalışmalarla karşılaştırıldığında (Chan ve diğerleri, 2008; Rivero Gutiérrez ve diğerleri, 2021), bu bulguların uluslararası ölçekte de tutarlı olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada yapılan uygulama, yalnızca kamu üniversiteleriyle sınırlı kalmayıp, farklı kamu kurumlarında, özel sektörde ve geniş ölçekli organizasyonlarda da uygulanabilecek potansiyele sahiptir. Özellikle büyük ölçekli yazılım projeleri, kamu ihaleleri, tedarik zinciri yönetimi ve stratejik planlama gibi alanlarda karar vericilere daha şeffaf ve sürdürülebilir çözümler sunmak için kullanılabilir. Gelecekteki çalışmalar, bu uygulamanın farklı karar ortamlarında nasıl performans gösterdiğini analiz etmek, kullanılan kriterleri genişletmek ve uygulanabilirliğini test etmek üzerine yoğunlaşabilir. Ayrıca, GAHP modeline yapay zekâ ve makine öğrenimi gibi tekniklerin entegre edilerek karar süreçlerinin otomatikleştirilmesi, kamu yönetiminde ve büyük organizasyonlarda karar almayı daha hızlı ve etkili hale getirebilir. Literatürde AHP'nin, Makine Öğrenmesi (ML) ile entegrasyonu üzerine yapılan son uygulamalar (Sayed ve diğerleri, 2024) bu tür geliştirmelerin mümkün ve faydalı olabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, kamu üniversitelerinin dijitalleşme stratejilerine yönelik bilinçli ve bilimsel temelli kararlar almalarına rehberlik eden yönetsel bir çerçeve sunmaktadır. Analitik karar verme yaklaşımlarının benimsenmesi, yalnızca üniversiteler düzeyinde değil, aynı zamanda yükseköğretim politikaları ve kamu yönetimi ölçeğinde de bir araç olarak kullanılabilir.

Çatışma Beyanı / Conflict of Interest

Yazar tarafından herhangi bir potansiyel çıkar çatışması beyan edilmemiştir.
No potential conflict of interest was declared by the author.

Fon Desteği / Funding

Bu çalışmada herhangi bir resmi, ticari ya da kâr amacı gütmeyen organizasyondan fon desteği alınmamıştır.
This study received no funding from any governmental, commercial or non-profit organisation.

Etik Standartlara Uygunluk / Compliance with Ethical Standards

Yazar tarafından, çalışmada kullanılan araç ve yöntemlerin Etik Kurul izni gerektirmediği beyan edilmiştir.
It was declared by the author that the tools and methods used in the study do not require the permission of the Ethics Committee.

Etik Beyanı / Ethical Statement

Yazar tarafından bu çalışmada bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan edilmiştir.
It was declared by the author that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.



Yazarlar, Verimlilik Dergisi'nde yayımlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptirler ve çalışmaları CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayımlanmaktadır.
The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.

KAYNAKÇA

- Aires, R.F. ve Ferreira, L.M.D. (2018). "The Impact of Rank Reversal on Multi-Criteria Decision Analysis Methods: A Comparative Analysis", *Operational Research*, 18(3), 567-583. <https://doi.org/10.1007/s12351-017-0354-x>
- Arshad, Y., Ahlan, A.R. ve Ajayi, B.A. (2013). "Intelligent IT Governance Decision-Making Support Framework for A Developing Country's Public University", *International Journal of Digital Content Technology and Its Applications*, 7(11), 1-12. <https://doi.org/10.3233/IDT-130183>
- Belton, V. ve Gear, T. (1983). "On A Short-Coming of Saaty's Method of Analytic Hierarchies", *Omega*, 11(3), 228-230. [http://dx.doi.org/10.1016/0305-0483\(83\)90047-6](http://dx.doi.org/10.1016/0305-0483(83)90047-6)
- Calik, A., Pehlivan, N.Y. ve Pekgor, A. (2012). "Fuzzy AHP/DEA Approach for Relative Efficiency of State Universities in Turkey", *Uncertainty Modeling in Knowledge Engineering and Decision Making*, 1064-1069. https://doi.org/10.1142/9789814417747_0170
- Chakhar, S. ve Saad, I. (2014). "Incorporating Stakeholders' Knowledge in Group Decision-Making", *Journal of Decision Systems*, 23(1), 113-126. <http://dx.doi.org/10.1080/12460125.2014.865828>
- Chan, F.T.S., Kumar, N., Tiwari, M.K., Lau, H.C.W. ve Choy, K.L. (2008). "Global Supplier Selection: A Fuzzy-AHP Approach", *International Journal of Production Research*, 46(14), 3825-3857. <http://dx.doi.org/10.1080/00207540600787200>
- Çalışkan, E. ve Aksakal, E. (2019). "Hybrid Use of Likert Scale-Based AHP and PROMETHEE Methods for Hazard Analysis and Consequence Modeling (HACM) Software Selection", *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 18(5), 1825-1851. <https://doi.org/10.1142/S0219622019500330>
- Dyer, J.S. (1990). "Remarks on the Analytic Hierarchy Process", *Management Science*, 36(3), 249-258. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.36.3.249>
- Favretto, J. ve Nottar, L.A. (2016). "Utilização da metodologia Analytic Hierarchy Process (AHP) na definição de um software acadêmico para uma Instituição de Ensino Superior do Oeste Catarinense. *Revista de Administração e Inovação*", 11(2), 81-98. <https://doi.org/10.20985/1980-5160.2016.v11n2.881>
- Forman, E. ve Peniwati, K. (1998). "Aggregating Individual Judgments and Priorities with the Analytic Hierarchy Process", *European Journal of Operational Research*, 108(1), 165-169. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00244-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00244-0)
- Ghosh, T., Chakraborty, T. ve Dan, P.K. (2012). "An Effective AHP Based Metaheuristic Approach to Solve Supplier Selection Problem", *International Journal of Procurement Management*, 5(6), 725-740. <https://doi.org/10.1504/IJPM.2012.045647>
- Ishizaka, A. ve Labib, A. (2011). "Review of the Main Developments in the Analytic Hierarchy Process", *Expert Systems with Applications*, 38(11), 14336-14345. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.143>
- Islam, M.M. ve Arakawa, M. (2022). "Integrated Multi-Criteria Group Decision Making Model for Supplier Selection in An Uncertain Environment", *Cogent Engineering*, 9(1), 2079220. <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2079220>
- Ivanco, M.L. (2014). "Development of Analytical Sensitivity Analysis for AHP Applications", Master's Thesis, Old Dominion University. <https://doi.org/10.25777/yqdz-jv40>
- Ivanco, M., Hou, G. ve Michaeli, J. (2017). "Sensitivity Analysis Method to Address User Disparities in the Analytic Hierarchy Process", *Expert Systems with Applications*, 85, 187-196. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.08.003>
- Kahraman, C., Suder, A. ve Cebi, S. (2013). "Fuzzy Multi-Criteria and Multi-Experts Evaluation of Government Investments in Higher Education: The Case of Turkey", *Technological and Economic Development of Economy*, 19(1), 1-25. <https://doi.org/10.3846/20294913.2013.837110>
- Karsak, E.E. ve Özogul, C.O. (2009). "An Integrated Decision-Making Approach for ERP System Selection", *Expert Systems with Applications*, 36(1), 660-667. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2007.09.016>
- Majumdar, A., Tiwari, M.K., Agarwal, A. ve Prajapat, K. (2021). "A New Case of Rank Reversal in Analytic Hierarchy Process due to Aggregation of Cost and Benefit Criteria", *Operations Research Perspectives*, 8, 100185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.orp.2021.100185>
- Maletič, D., Maletič, M., Lovrenčić, V., Al-Najjar, B. ve Gomišček, B. (2014). "An Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) and Sensitivity Analysis for Maintenance Policy Selection", *Organizacija*, 47(4), 251-262. <https://doi.org/10.2478/orga-2014-0016>
- Marcarelli, G. ve Squillante, M. (2019). "A Group AHP Based Approach for Selecting the Best Public Tender", *Soft Computing*, 23(22), 11829-11840. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04479-1>
- Masuda, T. ve Fujii, K. (1987). "Sensitivity Analyses of Priorities Used in the Analytic Hierarchy Process (AHP)", *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, 23(10), 1060-1067. <https://doi.org/10.9746/sicetr1965.23.1060>
- Melnik-Leroy, G. ve Dzemyda, G. (2021). "Cognitive Biases in Multi-Criteria Decision-Making: AHP Case Study", *Journal of Behavioral Decision Making*, 34(2), 125-140. <https://doi.org/10.1002/bdm.2223>
- Muhammad, H. ve Hromada, M. (2023). "Evaluating A Proposed E-Government Stage Model in Terms of Personal Data Protection", *Applied Sciences*, 13(6), 3913. <http://dx.doi.org/10.3390/app13063913>

- Önüt, S. ve Efendigil, T. (2010). "A Theoretical Model Design for ERP Software Selection Process under the Constraints of Cost and Quality: A Fuzzy Approach", *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 21(6), 365-378. <https://doi.org/10.3233/IFS-2010-0457>
- Pekin, A., Özkan, G., Eski, O., Karaarslan, U., Ertek, G. ve Kılıç, K. (2006). "Application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) for Selection of Forecasting Software", *5th International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems*, Sakarya, Turkey.
- Rivero Gutiérrez, L., De Vicente Oliva, M.A. ve Romero-Ania, A. (2021). "Managing Sustainable Urban Public Transport Systems: An AHP Multicriteria Decision Model", *Sustainability*, 13(9), 4614. <http://dx.doi.org/10.3390/su13094614>
- Rouyendegh, B.D. ve Erkan, T.E. (2011). "ERP System Selection by AHP Method: Case Study from Turkey", *The International Journal of Business and Management*, 6(1), 152-160.
- Saaty, T.L. ve Vargas, L.G. (2012). "Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process", *International Series in Operations Research & Management Science*, Springer US. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6>
- Saaty, T.L. (1980). "The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation", McGraw-Hill.
- Saaty, T.L. (1987). "Risk—Its Priority and Probability: The Analytic Hierarchy Process", *Risk Analysis*, 7(2), 159-172. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1539-6924.1987.tb00980.x>
- Saaty, T.L. (1990). "How to Make A Decision: The Analytic Hierarchy Process", *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Saaty, T.L. (2001). "Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process", *Managing Forest Ecosystems* Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-015-9799-9_2
- Saaty, T.L. (2003). "Decision-Making with the AHP: Why Is the Principal Eigenvector Necessary", *European Journal of Operational Research*, 145(1), 85-91. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00227-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00227-8)
- Saaty, T.L. (2008). "Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons Are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors—The Analytic Hierarchy/Network Process", *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales Serie A Matematicas*, 102(2), 251-318. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03191825>
- Sari, R., Kurniastuti, I. ve Sulistiyan, E. (2024). "Comparative Analysis of Prioritization Model between AHP (Analytic Hierarchy Process) and ANP (Analytic Network Process) for Project Portfolio Management SI/IT Surabaya City Government", *Applied Technology and Computing Science Journal*, 6(2), 88-95. <http://dx.doi.org/10.33086/atcsj.v6i2.5208>
- Sayed, H.A., Abdelhamid, M.A., Abdelkader, T.K., Lai, Q., Mousa, A.M. ve Refai, M. (2024). "Machine Learning and Analytic Hierarchy Process Integration for Selecting A Sustainable Tractor", *Scientific Reports*, 14, 26735. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78023-z>
- Schmidt, K., Babac, A., Pauer, F., Damm, K. ve von der Schulenburg, J.M. (2016). "Measuring Patients' Priorities Using the Analytic Hierarchy Process in Comparison with Best-Worst-Scaling and Rating Cards: Methodological Aspects and Ranking Tasks", *Health Economics Review*, 6(1), 50. <http://dx.doi.org/10.1186/s13561-016-0130-6>
- Seker, S. ve Kahraman, C. (2021). "A Pythagorean Cubic Fuzzy Methodology Based on TOPSIS and TODIM Methods and Its Application to Software Selection Problem", *Soft Computing*, 25(12), 7843-7857. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-06469-8>
- Then, K.A. ve Amaria, P. (2013). "Factors Related to the Adoption of IT Emerging Technologies by Research and Non-Research Based Higher Education Institutions", *Research in Higher Education Journal*, 21, 1-12.
- Toth, E. ve Vacik, H. (2018). "A Comprehensive Sensitivity Analysis for Multi-Criteria Decision-Making Methods in Environmental Decision Support", *Environmental Modelling & Software*, 103, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.02.002>
- Uzoka, F.-M.E. ve Akinuwa, B. (2019). "Development and Evaluation of An AHP Model for Software Systems Selection", *Multiple Criteria Decision Making*, 14(1), 109-130. <https://doi.org/10.22367/MCDM.2019.14.07>
- Vaidya, O.S. ve Kumar, S. (2006). "Analytic Hierarchy Process: An Overview of Applications", *European Journal of Operational Research*, 169(1), 1-29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028>
- Vargas, L.G. (1990). "An Overview of the Analytic Hierarchy Process and Its Applications", *European Journal of Operational Research*, 48(1), 2-8. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90056-H](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(90)90056-H)
- Vatansever, K. (2013). "Evaluation of Product Purchase Decisions with Fuzzy AHP Method in State Hospitals: Gediz State Hospital Case", *Journal of Health and Hospital Administration*, 1(1), 45-58.

Analysis of Bed Utilization Efficiency of Intensive Care Units with Pabon Lasso Model

Ferda Işıkcılık¹ , Derya Engin² 

ABSTRACT

Purpose: This study aimed to evaluate the efficiency of intensive care units in a public university hospital in Türkiye from 2015 to 2024.

Methodology: In this study, the efficiency of the anesthesia, emergency, paediatric, general surgery, internal medicine, cardiology, neurology, neurosurgery, neonatal and cardiovascular surgery intensive care units of a public university hospital in Türkiye was evaluated. The efficiency of ICUs for the period 2015-2024 was analyzed using the Pabon Lasso Model. The assessment was conducted using the following indicators: bed turnover rate, bed occupancy rate, and average length of stay.

Findings: The study determined that the highest number of emergency and cardiology intensive care units were found in the efficient region over the years. The bed occupancy rate of the cardiology unit decreased over time and moved to the second region. The bed occupancy rate of the emergency intensive care unit improved over time and moved to the efficient region. However, the cardiovascular surgery unit was found to be in the inefficient region in all years.

Originality: The study evaluated the ten-year effectiveness of a university hospital's intensive care units using the Pabon Lasso model. The fact that no research in this context exists in the literature expresses the study's originality.

Keywords: Efficiency, Hospital, Intensive Care, Performance, Productivity.

JEL Codes: I1, I15, I18.

Yoğun Bakım Ünitelerinin Yatak Kullanım Etkinliğinin Pabon Lasso Modeli ile Analizi

ÖZET

Amaç: Bu çalışmanın amacı, Türkiye'de bir üniversite hastanesinin yoğun bakım ünitelerinin 2015-2024 yılları arasındaki etkinliğini değerlendirmektir.

Yöntem: Bu çalışmada, Türkiye'deki bir kamu üniversitesi hastanesinin anestezi, acil, çocuk, genel cerrahi, dahiliye, kardiyoloji, nöroloji, nöroşirürji, yenidoğan ve kalp damar cerrahisi yoğun bakım ünitelerinin verimliliği değerlendirilmiştir. Yoğun bakım ünitelerinin 2015-2024 dönemi etkinliği, Pabon Lasso Modeli kullanılarak analiz edilmiştir. Değerlendirme yatak devir hızı, yatak doluluk oranı ve ortalama kalış günü göstergeleri ile yapılmıştır.

Bulgular: Araştırmada yıllar itibarıyla verimli bölgede en fazla acil ve kardiyoloji yoğun bakım ünitelerinin bulunduğu saptanmıştır. Kardiyoloji ünitesinin yatak doluluk oranı zamanla düşerek ikinci bölgeye geçmiştir. Acil yoğun bakım ünitesinin yatak doluluk oranı zamanla gelişerek etkin bölgeye geçmiştir. Bununla birlikte, kardiyovasküler cerrahi ünitesinin tüm yıllarda verimsiz bölgede bulunduğu belirlenmiştir.

Özgünlük: Araştırma, bir üniversite hastanesinin yoğun bakım ünitelerinin on yıllık etkinliği Pabon Lasso modeli ile değerlendirmiştir. Literatürde bu kapsamda bir araştırmaya rastlanmamış olması çalışmanın özgün değerini ifade eder.

Anahtar Kelimeler: Etkinlik, Hastane, Yoğun Bakım, Performans, Verimlilik.

JEL Kodları: I1, I15, I18.

¹ Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Health Management, Burdur, Türkiye

² Hacettepe University Hospitals, Ankara, Türkiye

Corresponding Author: Ferda Işıkcılık, ferdabuluc@gmail.com

DOI: 10.51551/verimlilik.1657712

Research Article | Submitted: 14.03.2025 | Accepted: 13.09.2025

Cite: Işıkcılık, F. and Engin, D. (2025). "Analysis of Bed Utilization Efficiency of Intensive Care Units with Pabon Lasso Model", *Verimlilik Dergisi*, 59(4), 943-954.

INTRODUCTION

The sustainability of hospitals, which are important building blocks of healthcare systems, depends on their successful management. This reminds me of management guru Peter Drucker's statement, "You can't manage what you don't measure". This emphasizes the importance of measurement in the management process. The assessment results obtained by measuring the current situation benefit managers by enabling them to identify the aspects of organizations that need improvement. Furthermore, given the increasing demand for healthcare services and the need for financial prudence, the importance of efficiency measurement in hospitals cannot be overstated. Efficiency measurement is, therefore, an essential tool for sustainable hospitals. The efficiency of hospitals can be assessed in terms of all inputs and outputs used in service delivery. For example, the efficiency of health personnel, medical equipment, financial resources, service delivery units such as outpatient or inpatient treatment units, and various health outputs can be measured.

Evaluating the efficiency of hospitals' most critical units is a priority because these units are unable to accept errors. Yiğit (2019) emphasizes that bed utilization is an important indicator of efficiency, as it directly affects hospitals' ability to meet patients' needs. In this context, the efficiency of intensive care units (ICU), one of the most important units, is important. ICU is defined as "service units that aim to improve the care of patients who require intensive care due to serious dysfunction of one or more organs or organ systems, that have a special feature in terms of patient care in terms of physical infrastructure and location, that are equipped with advanced technological devices, where vital indicators are monitored, and where patient care and treatment are provided 24 hours a day without interruption" (Ministry of Health, 2011). According to 2022 data, Türkiye has 57.4 ICU beds per 100,000 population, the highest among OECD countries. The adult ICU Bed Occupancy Rate (BOR) will be 65.7%. (OECD, 2025). Studies show that ICUs consume between 13% and 40% of hospital operating costs (Bauman and Hyzy, 2012; Kim et al., 2015). The need to measure efficiency is understood because, due to their specialized nature, ICU resources are among the most limited in hospitals (Cuadrado et al., 2023).

Lasso (1986) developed the Pabon Lasso model in 1986, which evaluates the efficiency of general hospital and intensive care beds. The Pabon Lasso model is a widely used statistical tool for assessing hospital performance by analyzing specific efficiency indicators. The efficiency indicators used in the analysis are BOR, Bed Turnover Rate (BTR), and Average Length of Stay (ALS). The model uses a graphical method to provide a visual assessment of each hospital's relative efficiency. The graph is divided into four quadrants (Lasso, 1986), which are determined by the average values of BOR and BTR and classify hospitals ranging from under-utilization (low BOR and low BTR) to over-utilization (high BOR and high BTR). The units whose efficiency is assessed are positioned in one of the four regions in the graph according to their relative efficiency status. Thus, the efficiency status of the evaluated units can be easily understood visually. It also allows for comparing units such as evaluated periods, hospitals, and clinics.

As demonstrated in Table 1, a significant number of studies have employed the Pabon Lasso model to assess the efficiency of various hospitals and healthcare units. However, despite the paucity of studies evaluating the technical efficiency of ICUs (Dedecan and Torun, 2023; Göktaş and Yalçın Balçık, 2024), a range of methodologies has been employed in these studies. Conversely, studies evaluating the effectiveness of the ICU using the Pabon Lasso model are similarly limited in scope.

The present study analysed the effectiveness of ICUs in teaching research hospitals (Esen and Yiğit, 2021; Leblebici et al., 2019). In contrast to the extant literature, the present study focuses on a public university hospital. In this context, the study aims to evaluate the efficiency of the ICUs of a public university hospital in Türkiye for the period 2015-2020 using the Pabon Lasso Model. At this juncture, the study is regarded as original. The study compares the efficiency of intensive care units over the course of the research period. In the following section, the importance of the research is addressed, after which the literature review, methods, findings, and conclusions are presented.

2. LITERATURE REVIEW

Table 1 summarizes the studies evaluating the efficiency of hospitals using the Pabon Lasso model. This model is widely used to measure efficiency in different countries, especially in Iran and Türkiye. The studies found that the Pabon Lasso model has been used to evaluate the bed utilization efficiency of different hospital groups, health groups, inpatient treatment units, health regions, and countries. Several studies have been conducted that analyse changes in the efficiency of hospitals or units over time. The findings of these studies indicate that the efficiency of the units under comparison exhibits a fluctuating trend over time. A review of the extant literature focusing on hospitals has revealed that the proportion of hospitals in the effective region varies between 3% and 50% (Table 1). This finding suggests that the efficiency of hospitals is subject to significant variation.

Table 1. Literature review

<i>Author (year)</i>	<i>Data Year</i>	<i>Scope</i>	<i>Result</i>
Köse (2024)	2020-2021	Hospitals in European Union member states	Hospitals in Germany, Estonia, Italy, Latvia, and Austria are in the efficient region.
Samsudin et al. (2024)	2014, 2018	Hospitals in Malaysia	Thirty-nine percent of hospitals in 2014 and 36 percent in 2018 are in the efficient region.
Malekzadeh et al. (2023)	2019-2020	Hospitals in Northern Iran	Seventeen percent of hospitals are in the efficient regions.
Çırak et al. (2023)	2019	Health regions in Türkiye	The Mediterranean and Southeastern Anatolia Regions in the efficient region.
Leblebici et al. (2019)	2017-2018	Neonatal ICU of a teaching hospital in Türkiye	Neonatal ICU is in the efficient region.
Esen (2023)	2018-2021	Internal and surgical clinics in Türkiye	Neurology, Obstetrics and Gynaecology (O&G), Otorhinolaryngology in 2018; Paediatrics, Gastroenterology, Neurology, O&G in 2019; Gastroenterology, Nephrology, Neurology, Medical Oncology, and Ophthalmology in 2020; Gastroenterology, Neurology, O&G, Ophthalmology in 2021 in the efficient region.
Işıkçelik and Ağırbaş (2023)	2018-2021	Ministry of Health Hospitals in Türkiye	38% of A1 group hospitals, 36% of All group, and 32% of B group hospitals are in the efficient region.
Mahmoodpour-Azari et al. (2022)	2019	Hospitals in Iran	35% of hospitals are in the efficient region.
Roshani et al. (2022)	2015-2019	Hospitals in Iran	33% of hospitals are in the efficient region.
Medaravic (2022)	2019-2020	Hospitals in the former Yugoslavia	The percentage of top-performing hospitals within the territory varied between 20% and 43%.
Yılmaz (2022)	2008-2018	A teaching hospital in Türkiye	The hospital is in the efficient region in 2014 and 2015.
Konca et al. (2022)	2017	Secondary public hospitals in Türkiye	3% of the hospitals are in the efficient region.
Esen and Yiğit (2022)	-	Public hospitals in the Mediterranean Region	32% of the hospitals are in the efficient region.
Shaqura et al. (2021)	2016-2018	Surgical and internal departments of hospitals in Gaza	42.8% of surgical departments and 28.6%-42.8% of internal departments are in the efficient regions.
Esen and Yiğit (2021)	2017-2018	ICUs of a teaching hospital in Türkiye	Of the intensive care units, 30% were in the efficient region in 2017 (Anaesthesia and Reanimation, Surgical, Coronary ICU), and 20% in 2018 (Internal, Coronary ICU).
Aloh et al. (2020)	2011-2016	Teaching hospitals in Southeast Nigeria	Only 10-20% of hospitals were in the efficient region during the survey years.
Taşkaya (2020)	2017	Training and research hospitals in Türkiye	30.5 percent of hospitals are in the efficient region.
Taşkaya (2019)	2014, 2017	Affiliated hospitals in Türkiye	18% of hospitals in 2014 and 29% in 2017 were in the efficient region.
Yiğit (2019)	2017	Pediatric clinics in Türkiye	38% of pediatric clinics (pediatric surgery, urology, pediatric health and diseases, hematology and oncology, endocrinology, and chest diseases) are in the efficient region.
Boz et al. (2018)	2014	Public Hospitals Unions in Türkiye	26% of hospitals are located in the efficient region.
Yiğit and Esen (2017)	2015	Public hospitals in Antalya	50% of hospitals are located in the efficient region.
Yiğit (2017)	2014	Clinics of the Ministry of Health hospitals in Türkiye	23% of clinics (Obstetrics and Gynaecology, Cardiology, Plastic and Aesthetic Surgery, Urology) are in the efficient region.
Yıldız (2017)	2002-2015	Hospitals in Türkiye (Ministry of Health, University, Private)	Ministry of Health hospitals were in the efficient region from 2011 to 2015.
Qodoosinejad et al. (2017)	2009-2013	Hospitals in Tabriz	26% of hospitals are in the efficient region.
Çalışkan (2016)	2014	Public Hospitals Unions in Türkiye	Twenty-five percent of the units are in the efficient region.
Tripathi et al. (2016)	2007-2014	Psychiatric, neurological, neurosurgery services in a tertiary care hospital	Psychiatry and Neurosurgery in 2014 and Neurology in 2007 are in the efficient region.

A study of Türkiye's regional efficiency, conducted in the context of the Mediterranean and Southeast Anatolia regions, has yielded notable findings (Çırak et al., 2019). A study was conducted to evaluate Turkish hospitals according to ownership and to determine the relative efficiency of different hospital types. The study's findings indicated that Ministry of Health hospitals demonstrated a higher level of efficiency compared to other hospital types (Yıldız, 2017). In single or multi-period studies examining clinics, clinics in effective regions have both similarities and differences (Esen, 2023; Shaqura et al., 2021; Tripathi et al., 2016; Yiğit, 2017; Yiğit, 2019). The extant literature demonstrates a paucity of studies evaluating the efficiency of ICUs, with those that do exist focusing on the ICUs of teaching hospitals (Esen ve Yiğit, 2021; Leblebici et al., 2019). This observation underscores a paucity of data concerning the efficiency of intensive care in university hospitals and other hospital groups, thereby highlighting a substantial research deficit in this domain. In view of the extensive and intricate nature of the treatment services furnished in ICUs, the evaluation of the efficacy of such units assumes paramount importance. University hospitals exhibit a distinct organisational structure when compared to other hospital types. This distinction arises from the advanced healthcare services they provide, in addition to their educational and research functions.

Consequently, the study's emphasis on university hospitals addresses a significant gap in the existing literature by facilitating the evaluation of both patient care and the quality of academic and professional education.

3. METHODOLOGY

In this study, the efficiency of the Anesthesia ICU (I1), Emergency ICU (I2), Paediatric ICU (I3), General Surgery ICU (I4), Internal Medicine ICU (I5), Cardiology ICU (I6), Neurology ICU (I7), Neurosurgery ICU (I8), Neonatal ICU (I9), and Cardiovascular Surgery ICU (I10) units of a public university hospital in Türkiye was evaluated. The efficiency of ICUs for the period 2015-2024 was analyzed using the Pabon Lasso Model, a widely accepted tool for evaluating the efficiency and efficiency of healthcare units. Within the scope of the Pabon Lasso model, the assessment was conducted based on the BOR, BTR, and ALS indicators. This descriptive and cross-sectional study utilised secondary data. The research data was obtained from the hospital information management system in an Excel file. The data concerning the BOR, BTR, and ALS indicators for the ICUs encompassed within the study for the period 2015–2024 are complete, with no data loss. Examining the scope of the data, BOR shows the utilisation rate of patient beds over time. BTR refers to the number of patients using a patient bed. ALS is the average number of days a patient stays in hospital (OECD, 2025). The analysis was conducted on an individual annual basis, with the results visualised through the utilisation of Pabon Lasso graphs. The Pabon Lasso graph, which consists of the BOR, BTR, and ALS indicators, is shown in Figure 1. The X-axis of the graph shows BOR, and the Y-axis shows BTR. The average BOR line is drawn on the X-axis, and the average BTR line is drawn on the Y-axis. These lines divide the Pabon Lasso graph into four quadrants. Region 1 on the graph is inefficient, expressing low BOR and BTR. Region 2 shows low BOR and high BTR. Region 3 is the efficient region, with high BOR and BTR. Region 4 represents low BTR and high BOR. The evaluated ICUs are placed on the graph according to their BOR and BTR values. The lines drawn on the points representing the ICU on the graph are ordered from the left to the right of the graph, from the shortest to the longest.

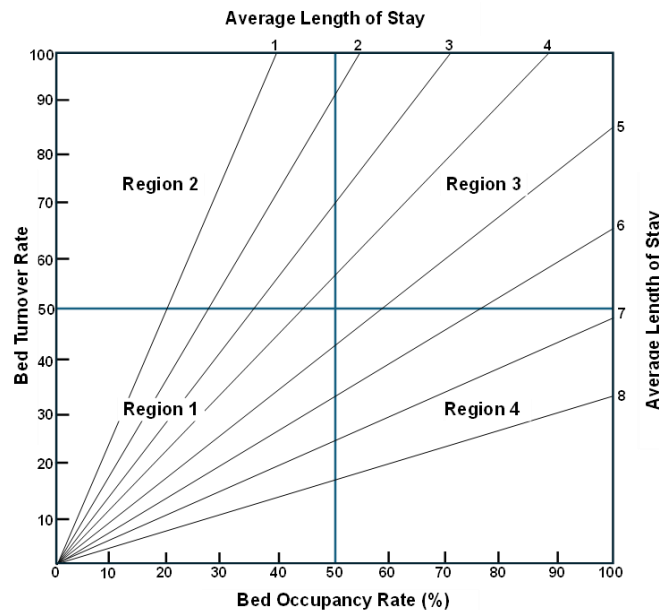


Figure 1. Pabon Lasso modeli (Lasso, 1986)

The Pabon Lasso Model used in this study has certain methodological limitations. The model measures effectiveness relatively and does not reveal absolute levels of effectiveness. In other words, the effectiveness of the ICUs within the scope of the study can be evaluated relative to each other. However, no direct inference can be made about the absolute level of effectiveness of each ICU. Changes in the ICUs addressed in the research may alter the research results. Furthermore, the model is based solely on BOR, BTR, and ALS indicators. It assesses the effectiveness of ICUs within the framework of these three indicators (Lasso, 1986). It is important to consider these limitations when evaluating the research findings.

4. RESULTS

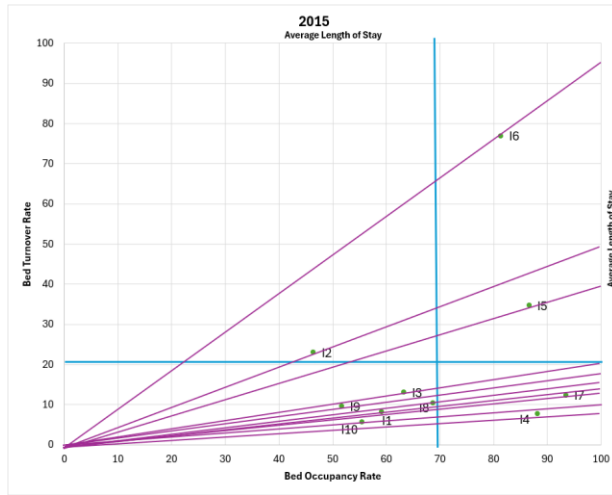
This study analyzed the efficiency of ICUs in a public university hospital. Table 2 shows descriptive statistics of the ICUs' BTR, BOR, and ALS values. The highest average BTR of the hospital was in 2023, while the lowest was in 2015. The highest BTR values of ICUs belong to I6 from 2015 to 2018 and 2024 and I2 from 2019 to 2023. The lowest BTR values were I10 in 2015-2016, I4 in 2017-2018, I10 in 2019-2023, and I3 in 2024. The highest average BOR of the hospital is in 2022, while the lowest is in 2020. The highest BOR values of the ICUs were I7 in 2015, I4 in 2016, I6 in 2017, I2 in 2018-2020 and 2023, and I5 in 2021, 2022, and 2024. The hospital's average ALS is shortest in 2021 and longest in 2019. The ICUs with the shortest ALS were I6 from 2015 to 2019, I2 from 2020, and I5 from 2021 to 2024. The longest ALS ICUs were I4 from 2015 to 2018, I10 in 2019 and 2020, I7 in 2021 and 2022, I9 in 2023, and I3 in 2024.

Figure 2 shows the Pabon-Lasso graphs of the ICUs for the period 2015-2024. In 2015, I1, I3, I8, I9, and I10 were in the first region (inefficient region), I2 in the second region, I5 and I6 in the third region (efficient region), and I4 and I7 in the fourth region. This year's graph shows that the ALS of ICUs is ranked from shortest to longest as I6, I2, I5, I3, I9, I8, I1, I7, I10, and I4. In 2016, I1, I9, and I10 are in inefficient region 1, I2 in the second region, I5 and I6 in the efficient region, and I3, I4, I7, and I8 in the fourth region. This year's graph shows that the ALS is ranked from shortest to longest as I6, I2, I5, I3, I7, I9, I8, I1, I10 and I4. In 2017, I1, I3, I9, and I10 were in the inefficient region, I2 in the second region, I5 and I6 in the efficient region, and I4, I7, and I8 in the fourth region. This year's graph shows that the ALS of ICUs is ranked from shortest to longest as I6, I2, I5, I3, I9, I7, I8, I1, I10 and I4. In 2018, I1, I3, I8, I9 and I10 are in the inefficient region, I2 and I6 in the efficient region, I4, I5 and I7 in the fourth region. The ALS of the ICUs this year are I6, I2, I3, I5, I9, I8, I7, I1, I10 and I4 from shortest to longest. In 2019, I1, I3, I5, I8, I9 and I10 are in the inefficient region, I2 and I6 in the efficient region, I4 and I7 in the fourth region. This year's graph shows that the ALS of ICUs is ranked from shortest to longest as I6, I2, I3, I9, I1, I5, I8, I7, I4 and I10. In 2020, I1, I4, and I10 are in inefficient region, I2 and I6 are in the efficient region, and I3, I5, I7, I8, and I9 are in the fourth region. This year's graph shows that the ALS is ranked from shortest to longest as I2, I5, I1, I6, I4, I3, I9, I8, I7 and I10. In 2021, I1, I3, I4, I8, I9 and I10 are in inefficient region, I2 and I6 are in the efficient region, I5 and I7 are in fourth region. This year's graph shows that the ALS of ICUs is ranked from shortest to longest as I5, I2, I6, I4, I1, I8, I3, I9, I10 and I7. In 2022, I3, I7, I9, and I10 are in the inefficient region, I6 is in the second region, I2 is in the efficient region, and I1, I4, I5, and I8 are in the fourth region. This year's graph shows that the ALS of ICUs is ranked from shortest to longest as I5, I2, I4, I6, I9, I1, I3, I8, I10 and I7. In 2023, I3, I4, I8, and I10 are in the inefficient region, I6 is in the second region, I2 is in the efficient region, and I1, I5, I7, and I9 are in the fourth region. This year's graph shows that the ALS of ICUs is ranked from shortest to longest as I5, I2, I8, I1, I4, I6, I3, I7, I10 and I9. In 2024, I3, I4, I9, and I10 are in the inefficient region, I6 in the second region, I2 in the efficient region, and I3, I5, I7, and I8 in the fourth region. This year's graph shows that the ALS is ranked from shortest to longest as I5, I2, I4, I1, I6, I9, I8, I10, I7 and I3.

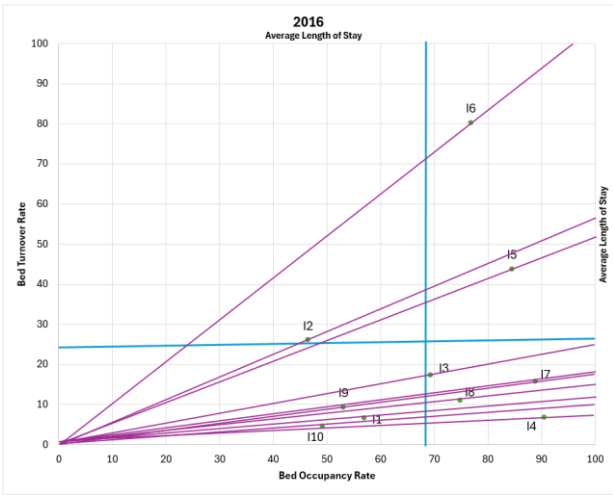
Table 2. Descriptive statistics

Year ICU	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	Minimum	Maximum	Mean	Standart Deviation
2015 ALS	26.28	7.39	17.76	42.07	9.13	3.86	27.67	24.21	19.77	36.39	3.86	42.07	21.45	12.44
BTR	8.22	22.94	13.00	7.65	34.63	76.90	12.33	10.36	9.55	5.57	5.57	76.90	20.12	21.78
BOR	59.18	46.45	63.27	88.16	86.61	81.37	93.49	68.74	51.71	55.53	46.45	93.49	69.45	16.82
2016 ALS	31.08	6.51	14.65	48.19	7.05	3.50	20.71	24.61	20.80	39.14	3.50	48.19	21.62	14.65
BTR	6.69	26.06	17.25	6.85	43.75	80.20	15.67	11.09	9.31	4.59	4.59	80.20	22.15	23.54
BOR	56.99	46.45	69.25	90.49	84.45	76.79	88.89	74.79	53.05	49.18	46.45	90.49	69.03	16.64
2017 ALS	32.98	5.29	12.79	76.65	10.84	4.11	21.27	22.19	20.74	43.52	4.11	76.65	25.04	21.83
BTR	6.13	37.12	16.81	4.11	26.38	79.11	15.22	12.64	11.16	4.48	4.11	79.11	21.32	22.76
BOR	55.43	53.76	58.90	86.33	78.32	89.16	88.71	76.81	63.43	53.42	53.42	89.16	70.43	14.96
2018 ALS	37.72	4.36	16.68	85.83	23.62	3.56	33.08	28.44	23.88	42.00	3.56	85.83	29.92	23.44
BTR	3.89	76.35	14.06	3.15	11.00	88.67	6.61	9.45	8.49	3.98	3.15	88.67	22.56	31.91
BOR	40.22	91.27	64.28	74.00	71.19	86.45	59.87	73.67	55.51	45.75	40.22	91.27	66.22	16.44
2019 ALS	30.96	3.42	18.73	82.48	31.78	3.24	41.17	37.61	26.23	87.67	3.24	87.67	36.33	28.73
BTR	6.13	102.06	13.19	4.08	7.67	100.78	7.25	5.83	7.99	2.00	2.00	102.06	25.70	40.01
BOR	51.99	95.52	67.69	92.08	66.75	89.56	81.78	60.11	57.41	48.12	48.12	95.52	71.10	17.40
2020 ALS	18.02	2.66	20.48	20.73	12.62	3.45	25.86	31.91	18.92	33.12	2.66	33.12	18.78	10.37
BTR	8.11	122.59	11.17	5.87	18.94	68.63	10.99	7.00	14.52	3.68	3.68	122.59	27.15	38.51
BOR	40.07	89.38	62.65	33.32	65.47	64.95	77.88	61.20	75.24	33.36	33.32	89.38	60.35	19.14
2021 ALS	16.27	3.54	20.82	25.46	16.92	3.25	17.93	29.23	16.67	27.76	3.25	29.23	17.79	8.93
BTR	16.89	98.29	12.08	9.78	22.17	92.15	19.29	9.56	15.81	3.92	3.92	98.29	29.99	34.81
BOR	75.28	95.42	68.93	68.20	99.22	82.15	94.79	76.53	72.20	29.81	29.81	99.22	76.25	19.91
2022 ALS	16.16	3.23	19.41	17.60	17.67	2.85	23.24	33.43	15.47	29.05	2.85	33.43	17.81	9.70
BTR	19.04	109.29	12.42	21.58	22.20	92.08	11.52	10.83	17.45	6.93	6.93	109.29	32.33	36.59
BOR	84.29	96.62	66.03	91.03	99.79	71.84	73.37	99.22	73.95	55.11	55.11	99.79	81.12	15.37
2023 ALS	23.74	2.54	26.40	30.85	17.33	1.94	17.28	29.18	17.64	30.40	1.94	30.85	19.73	10.62
BTR	13.17	179.09	10.08	6.76	17.50	101.29	17.74	7.56	15.63	6.17	6.17	179.09	37.50	57.30
BOR	85.70	97.89	72.92	57.13	83.09	53.80	83.99	60.40	75.53	51.42	51.42	97.89	72.19	15.80
2024 ALS	17.65	3.61	36.63	18.38	16.36	2.00	18.85	32.38	15.55	23.93	2.00	36.63	18.53	10.85
BTR	20.75	92.12	6.53	11.12	20.91	114.89	15.77	11.33	16.47	7.65	6.53	114.89	31.75	38.50
BOR	92.64	91.04	65.57	56.00	93.71	63.10	81.41	86.18	70.14	50.14	50.14	93.71	74.99	16.05

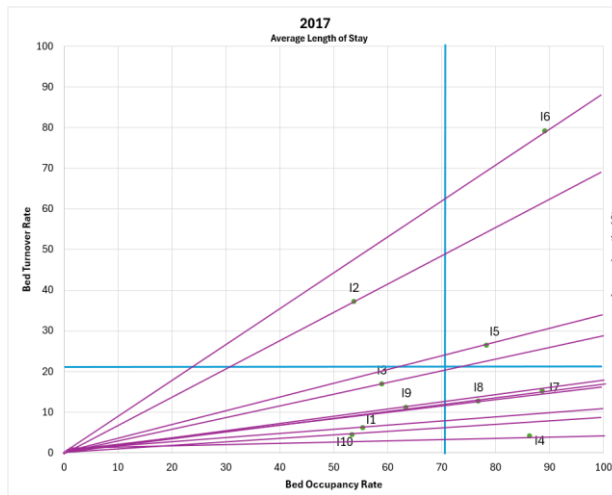
ALS: Average Length of Stay, BTR: Bed Turnover Rate, BOR: Bed Occupancy Rate



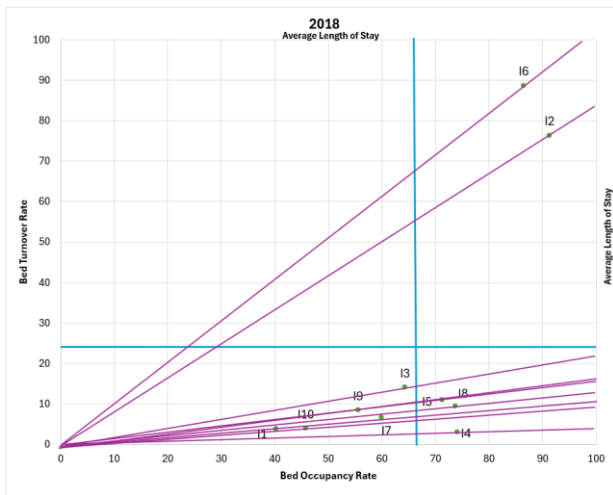
(a) 2015



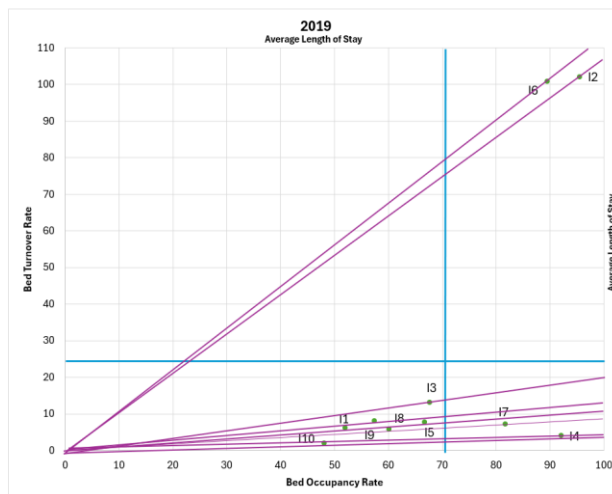
(b) 2016



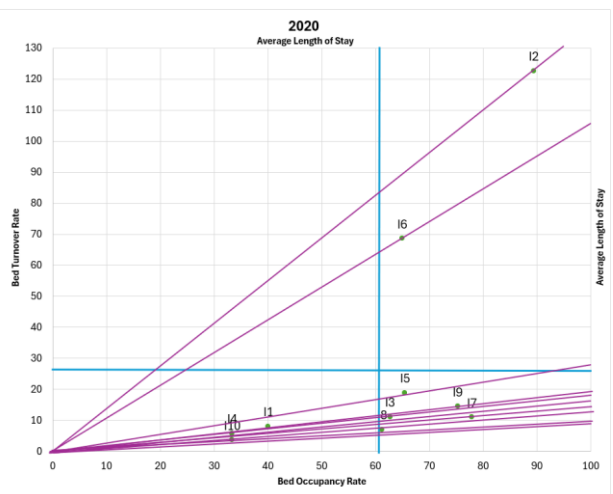
(c) 2017



(d) 2018



(e) 2019



(f) 2020

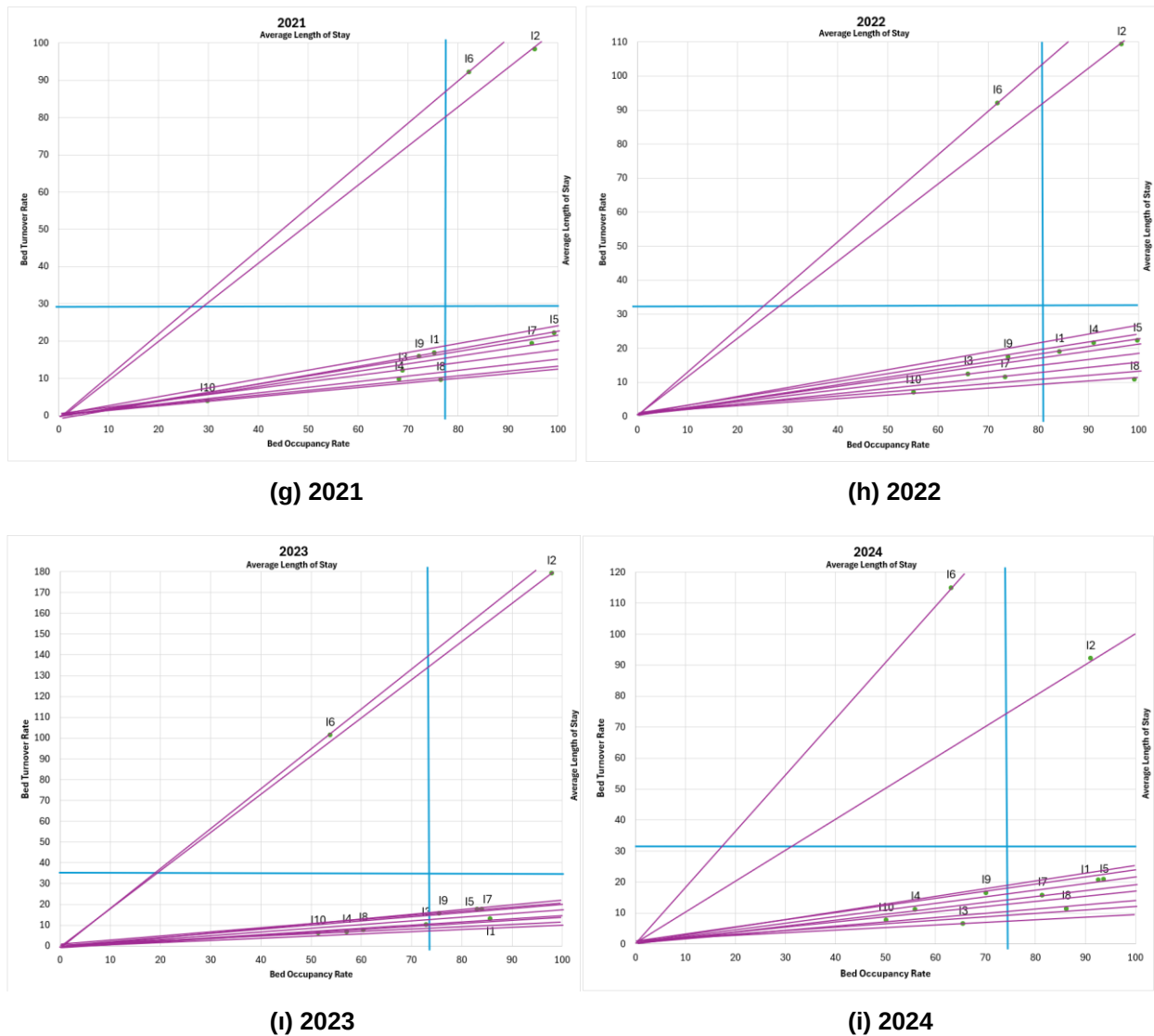


Figure 2. Pabon Lasso graphs for 2015-2024

5. DISCUSSION and CONCLUSION

As healthcare services advance, the role of ICUs continues to grow. The management of acute conditions and the increasing prevalence of chronic diseases, coupled with an aging population, have heightened the demand for intensive care (Duke et al., 2014). The presence of ICUs contributes to reducing overall healthcare costs by enabling effective management of complex cases and preventing complications. Effective intensive care interventions can decrease the need for long-term rehabilitation following critical illnesses, thereby reducing long-term healthcare expenditures (Costa et al., 2019; Ely, 2004). Therefore, the efficient and sustainable provision of critical care services in ICUs is of paramount importance.

This study evaluated the efficiency of the ICUs of a university hospital in Türkiye from 2015 to 2024. The average ALS in the hospital fluctuated between 17.79 and 36.33 days over the years. The shortest ALS values are in 2021 and 2022 when the Covid-19 pandemic was effective. It is likely that the reduction in the length of patients' hospital stays due to protective measures during the pandemic will impact this situation. On a branch basis, the longest ALS belongs to the general surgery ICU, cardiovascular surgery ICU, neurosurgery ICU, and anesthesia ICU. The shortest ALS belongs to the cardiology ICU and emergency ICU. Surgical ICUs have the longest ALS, while medical ICUs have the shortest. Patients typically take longer to stabilize in surgical ICUs, so a longer ALS is expected. A study evaluating the ICUs of a training and research hospital found that the longest ALS is in the Neurology and Neonatal ICUs (Esen and Yigit, 2021). In this study, Neonatal ICU ALS of university hospital was 15-26 days, while the same value was calculated as 10.6-10.1 days in a training and research hospital (Leblebici et al., 2019).

The average BOR of the hospital was at its lowest in 2020 (60.35%) and at its highest in 2022 (81.12%). The low BOR in 2020 was largely due to the postponement of healthcare services for non-COVID-19

conditions during the peak of the pandemic, whereas the high BOR in 2022 reflects the renewed demand for these services and the treatment of previously deferred cases (Ministry of Health, 2023). Cardiovascular surgery ICUs had the lowest occupancy, while internal medicine ICUs had the highest. The high occupancy in the latter is attributable to the primary treatment of patients infected with the COVID-19 virus in the ICU for Internal Medicine. The average occupancy rate for adult intensive care in Türkiye's ICUs in 2023 was 65.7 (Ministry of Health, 2023), with higher rates observed in the Anesthesia, Emergency, Internal Medicine, and Neurology ICUs in the same year. A study of the ICUs of a tertiary hospital revealed that the BOR of the Surgical ICU was higher than that of the Internal ICU (Esen and Yigit, 2021). Leblebici et al. (2019) found the BOR of the Neonatal ICU in a training and research hospital to be between 85.24% and 66.19%. However, in this study, the BOR varies between 51-75% according to years. This study revealed a general trend of higher BORs for ICUs belonging to internal medicine departments. The BTR of the hospital demonstrated variability over the years, ranging from 20.12 to 37.50. The lowest BTR was observed in 2015, while the highest BTR was in 2023. The observed increase in BTR over time can be attributed to the shortening of treatment times due to improvements in medical care. The units with the highest BTR are Cardiology, ICU, and Emergency ICU, while the lowest is Cardiovascular Surgery ICU. Yiğit and Esen (2021) found that the internal ICU had a higher BTR. The discrepancy likely reflects the different diseases treated in each ICU and their associated mortality rates. In this study, the Neonatal ICU of the university hospital was between 7 and 17, while another study found that it was between 30.06 and 40.12 in a training and research hospital (Leblebici et al., 2019).

According to the Pabon Lasso results, the anesthesia ICU was in the inefficient region from 2015 to 2021. However, its BOR improved from 2022 to 2024, moving it into the fourth region and indicating an overall improvement in efficiency over time. It was determined that the Emergency ICU was in the second region, which was efficient in BTR but inefficient in BOR from 2015 to 2017, and moved to the efficient region in 2018 and later. The position of the pediatric ICU has varied between the inefficient region and the fourth region over the years. The ICU experiences performance changes from time to time in terms of BOR. While General Surgery ICU was in the fourth region in 2015-2019 and 2022, it was in the inefficient region in 2020, 2021, 2023, and 2024. This situation is due to the change in BOR. While the internal medicine ICU was in the efficient region in 2015-2017, BOR activity decreased in 2018, and the ICU was in the fourth region. In 2019, BOR activity also decreased and moved to the inefficient region, and in 2020-2024, it is again in the fourth region. While the cardiology ICU was in the efficient region from 2015 to 2021, the BOR activity decreased from 2022 to 2024, and the unit moved to the second region. The neurology ICU is in the fourth region in all years except 2022. Compared to other years, it is inefficient for all indicators in 2022. In 2015, 2019, 2021, and 2023, the neurosurgery ICU was in the inefficient region. In other years, the BOR was found to be active and moved to the fourth region. The neonatal ICU was in the fourth region in 2020 and 2023 but was in the inefficient region in other years. The cardiovascular surgical ICU has been inefficient for all years.

Over the years, the ICUs most frequently in the efficient region were the Emergency ICU and the Cardiology ICU. While the Cardiology ICU's efficiency in terms of LOS declined over time, placing it in the second region, the Emergency ICU improved its BOR and entered the efficient region. Notably, the Cardiovascular Surgery ICU remained in the inefficient region throughout all years. Neonatal ICU and Neurology ICU were in the inefficient region 8 times, and the Anaesthesia ICU was in the inefficient region 7 times during the ten-year study period. Neonatal ICU was in the fourth region in some years (2020 and 2023), as in the study by Leblebici et al. (2019). In the study of Yiğit and Esen (2021), internal and coronary ICUs were in the efficient region, while general and neonatal ICUs were in the inefficient region. Differences in ICU efficiency among institutions providing the same level of services may be due to regional differences, periodic differences, and details of services provided.

As a result, this study evaluated the bed utilization performance of a university hospital using the Pabon-Lasso model. As mentioned in the research text, intensive care units are the most specialized units in hospitals. As such, they need to operate efficiently to provide continuous service. To this end, it is important to identify areas for improvement through efficiency analyses. A limited number of studies in the literature evaluate the efficiency of ICUs. It would be helpful to increase research in this area. For this purpose, it is recommended that the efficiency of ICUs be evaluated using both Pabon-Lasso and different analysis methods. The employment of alternative efficiency measurement models to the Pabon Lasso model has the potential to engender more comprehensive and holistic results about the efficiency of the ICU. Given that Pabon Lasso is founded on relative efficiency measurement and is thus incapable of performing absolute efficiency assessment, it is necessary to conduct research employing methods that facilitate absolute efficiency measurement. Nevertheless, absolute efficiency measurement necessitates the determination of standard effectiveness indices. Standard efficiency values for ICUs can be established based on findings obtained from an increasing number of studies on different types of effectiveness measurement. Furthermore, given that the Pabon Lasso model assesses effectiveness within the

framework of the BOR, BTR, and ALS indicators, it is important to utilise methods that also consider different indicators. In this context, the employment of varied models for the measurement of efficiency serves to enhance methodological diversity and contributes to the establishment of standard values. In addition, conducting studies in a range of hospitals or hospital groups in future research and increasing the number of studies that compare these groups will strengthen the generalisability of the findings and the validity of policy recommendations.

The findings of this article provide policymakers with important information for determining the level of efficiency of ICUs. The analyses reveal relative differences in efficiency between units and indicate potential inefficiencies in resource utilisation. Accordingly, it is recommended that bed and staff distribution in ICUs be optimised, process improvements be implemented in low-efficiency units, performance monitoring systems be regularly applied, and efficiency data be used in health policy decision-making processes. Such efficiency-focused policies will support the effective use of ICU resources, maintain service quality, and support the sustainability of the healthcare system.

Author Contributions

Ferda Işıklıçelik: Literature review, Conceptualization, Methodology, Data Curation, Analysis, Writing-original draft *Derya Engin*: Modelling, Writing-review and editing

Conflict of Interest

No potential conflict of interest was declared by the authors.

Funding

Any specific grant has not been received from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Compliance with Ethical Standards

It was declared by the authors that the tools and methods used in the study do not require the permission of the Ethics Committee.

Ethical Statement

It was declared by the author(s) that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.



The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.

REFERENCES

- Aloh, H.E., Onwujekwe, O.E., Aloh, O.G. and Nweke, C.J. (2020). "Is Bed Turnover Rate a Good Metric for Hospital Scale Efficiency? A Measure of Resource Utilization Rate for Hospitals in Southeast Nigeria", *Cost Effectiveness and Resource Allocation*, 18, 1-8. <https://doi.org/10.1186/s12962-020-00216-w>
- Bauman, K. and Hyzy, R. (2012). "ICU 2020: Five Interventions to Revolutionize Quality of Care in the ICU", *Journal of Intensive Care Medicine*, 29(1), 13-21. <https://doi.org/10.1177/0885066611434399>
- Boz, C., Yılmaz, F. and Şenel, İ.K. (2018). "Türkiye Kamu Hastane Birliklerinin Yatak Kullanım Performansı Üzerinde Etkili Olan Faktörler", *Ombudsman Akademik*, 5(9), 203-221.
- Costa, R., Baptista, J., Freitas, R. And Martins, P. (2019). "Hospital-acquired Pneumonia in a Multipurpose Intensive Care Unit: One-Year Prospective Study", *Acta Médica Portuguesa*, 32(12), 746-753. <https://doi.org/10.20344/amp.11607>
- Cuadrado, D., Valls, A. and Riaño, D. (2023). "Predicting Intensive Care Unit Patients' Discharge Date with a Hybrid Machine Learning Model That Combines Length of Stay and Days to Discharge", *Mathematics*, 11(23), 4773. <https://doi.org/10.3390/math11234773>
- Çalışkan, Z. (2016). "Kamu Hastane Birlikleri Performansının Pabón Lasso Modeli ile Analizi", *Sosyal Güvençe Dergisi*, 5(10), 1-24.
- Çırak, M., Şenel, İ.K. and Boz, C. (2024). "Sağlık Bölgelerinin Makine Öğrenmesi ve Pabon Lasso Modeli ile Karşılaştırmalı Kapasite Kullanım Analizi", *Social Sciences Studies Journal*, 9(112), 7207-7212. <https://doi.org/10.29228/sssj.70322>
- Dedecan, M. and Torun, N. (2023). "Yoğun Bakım Ünitelerinin Etkinliklerinin Değerlendirilmesi: Bir Üniversite Hastanesi Örneği", *Verimlilik Dergisi*, 57(1), 103-120. <https://doi.org/10.51551/verimlilik.1137264>
- Duke, G., Barker, A., Knott, C. And Santamaria, J. (2014). "Outcomes of Older People Receiving Intensive Care in Victoria", *The Medical Journal of Australia*, 200(6), 323-326. <https://doi.org/10.5694/mja13.10132>
- Ely, E. (2004). "Delirium as a Predictor of Mortality in Mechanically Ventilated Patients in the Intensive Care Unit", *Jama*, 291(14), 1753. <https://doi.org/10.1001/jama.291.14.1753>
- Esen, H. (2023). "Dahili ve Cerrahi Kliniklerin Yatak Kullanım Performansının Pabon Lasso Modeli ile Değerlendirilmesi", *Uluslararası Sağlık Yönetimi ve Stratejileri Araştırma Dergisi*, 9(2), 227-239.
- Esen, H. and Yiğit, V. (2021). "Yoğun Bakım Yatak Kullanım Verimliliğinin Pabon Lasso Modeli ile Değerlendirilmesi", *Manas Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 10(2), 1138-1150. <https://doi.org/10.33206/mjss.661570>
- Esen, H. and Yiğit, V. (2022). "Kamu Hastanelerinde Performans Değerlendirmesi: Veri Zarflama Analitik Hiyerarşi Prosesi (VZAHP) ve Pabon Lasso Modeli (PLM) Uygulaması", *Verimlilik Dergisi*, (2), 231-250. <https://doi.org/10.51551/verimlilik.897138>
- Göktaş, T. A. and Yalçın Balçık, P. (2024). "Yoğun Bakım Ünitelerinin Etkinliklerinin Malmquist Toplam Faktör Verimliliği Analizi ile Değerlendirmesi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 15(42), 692-710.
- İşıkçelik, F. and Ağırbaş, İ. (2023). "Genel Hastanelerin Yatak Kullanım Performansının Pabon Lasso Yöntemiyle Değerlendirilmesi", *Journal of Mehmet Akif Ersoy University Economics and Administrative Sciences Faculty*, 10(1), 277-294. <https://doi.org/10.30798/makuiibf.1097416>
- Kim, S., Chan, C., Olivares, M. and Escobar, G. (2015). "ICU admission Control: An Empirical Study of Capacity Allocation and its Implication for Patient Outcomes", *Management Science*, 61(1), 19-38. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2014.2057>
- Konca, M., İlğün, G. and Yetim, B. (2022). "İkinci Basamak Kamu Hastanelerinin Kaynak Kullanım Verimliliğinin Pabon Lasso Modeli ile Değerlendirilmesi", *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 24(1), 421-433. <https://doi.org/10.16953/deusosbil.976923>
- Köse, A. (2024). "Hastane Yatak Kullanım Etkinliğinin Değerlendirilmesi: Avrupa Birliği Ülkeleri Örneği", *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (80), 31-48. <https://doi.org/10.51290/dpusbe.1388556>
- Lasso, H.P. (1986). "Evaluating Hospital Performance Through Simultaneous Application of Several Indicators", *Bulletin of the Pan American Health Organization*, 20(4), 341-357.
- Leblebici, Y., Çerçi, S., Bülbül, A., Uslu, H.S., Al, E.S. and Selamaz, M. (2019). "Yenidoğan Yoğun Bakım Kliniğinde Hizmet Süreçlerinin Değerlendirilmesi: Pabon Lasso Metodu", *7. Çocuk Dostları Kongresi*, 7-9 Mart 2019, İstanbul.
- Mahmoodpour-Azari, M., Hajizadeh, M., Kazemi-Karyani, A., Haidari, A. and Rezaei, S. (2022). "COVID-19 Pandemic and Hospital Efficiency in Iran: Insight from an Interrupted Time Series Analysis and Pabon Lasso Model", *Journal of Lifestyle Medicine*, 12(3), 178. <https://doi.org/10.15280/jlm.2022.12.3.178>
- Malekzadeh, R., Tavana, M., Abedi, G., Ziapour, A. and Abedini, E. (2023). "Comparing the Efficiency of Hospitals in Northern Iran Before and After the Covid-19 Pandemic Using the Pabon Lasso Model", *Africa Journal of Nursing & Midwifery*, 25(2).

- Medarević, A. (2022). "Performance Evaluation of General Public Hospitals in Territories of the Former Yugoslavia: An Ecological Study Using the Pabon Lasso Model", *The International Journal of Health Planning and Management*, 37(4), 2106-2121. <https://doi.org/10.1002/hpm.3453>
- Ministry of Health (2011). Yataklı Sağlık Tesislerinde Yoğun Bakım Hizmetlerinin Uygulama Usul ve Esasları Hakkında Tebliğ. Resmî Gazete, 20 Temmuz 2011, Sayı: 28000.
- Ministry of Health (2023). Sağlık İstatistikleri Yıllığı, 2023, Ankara.
- OECD (2025). "OECD Data Explorer". [https://data-explorer.oecd.org/?fs\[0\]=Topic%2C0%7CHealth%23HEA%23&pg=0&fc=Topic&bp=true&snb=84](https://data-explorer.oecd.org/?fs[0]=Topic%2C0%7CHealth%23HEA%23&pg=0&fc=Topic&bp=true&snb=84) (Erişim Tarihi: 10.03.2025).
- Qodoosinejad, J., Daemi, A., Saadati, M. and Yaghoubi, R. (2017). "Evaluation of the Efficiency of Tabriz Hospitals; Using the Pabon Lasso Model in a 5-Year Period", *Evidence Based Health Policy, Management and Economics*, 1(3), 151-157.
- Roshani, M., Ghorbani Kalkhajeh, S. and Raadabadi, M. (2022). "Low Efficiency in a Five-Year Hospital Performance Assessment According to Pabon Lasso Model: State-affiliated Hospitals of Abadan", *Hospital Topics*, 100(1), 8-15. <https://doi.org/10.1080/00185868.2021.1901065>
- Samsudin, M.F., Lim, Y.C., Rochmah, T.N. and Dahlui, M. (2024). "Assessing the Performance of Non-Specialised Private Hospitals in Malaysia-an Upper-Middle-Income Medical Tourism Destination Country Using the Pabón-Lasso Model", *BMC Health Services Research*, 24(1), 1414. <https://doi.org/10.1186/s12913-024-11768-5>
- Shaqura, I.I., Gholami, M. and Akbari Sari, A. (2021). "Assessment of Public Hospitals Performance in Gaza Governorates Using the Pabón Lasso Model", *The International Journal of Health Planning and Management*, 36(4), 1223-1235. <https://doi.org/10.1002/hpm.3159>
- Taşkaya, S. (2019). "Sağlık Bakanlığı ve Üniversite Ortak Hastanelerinin Verimliliğinin Pabon Lasso Modeli ile Değerlendirilmesi", *Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi*, 22(3), 559-576.
- Taşkaya, S. (2020). "Türkiye'deki Eğitim ve Araştırma Hastanelerinin Verimliliğinin Pabon Lasso ve Veri Zarflama Analizleri ile Belirlenmesi", *Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi*, 23(2), 247-260.
- Tripathi, C.B., Kumar, R., Sharma, R.C. and Agarwal, R. (2016). "Assessment of Performance of Services in a Tertiary Care Neuropsychiatric Institute Using Pabon Lasso Model", *Asian Journal of Medical Sciences*, 7(6), 69-74.
- Yıldız, M.S. (2017). "Türkiye'de 2002-2015 Yılları Arasında Hastane Yatak Kullanımının Değerlendirilmesi: Pabon Lasso Metodu Uygulaması", *Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi*, 20(3), 347-356.
- Yılmaz, S. (2022). "Bir Kamu Hastanesinin Yatak Kullanım Verimliliğinin Pabon Lasso Modeli ile Ölçümü", *Nicel Bilimler Dergisi*, 4(2), 141-160. <https://doi.org/10.51541/nicel.1152557>
- Yiğit, A. (2019). "Analysis of Bed Use Performance of Pediatrics Clinics in Turkey", *J Contemp Med*, 9(4), 354-358. <https://doi.org/10.16899/jcm.612561>
- Yiğit, V. (2017). "Hastanelerde Yatak Kullanım Etkinliğinin Pabón Lasso Modeli ile Analizi", *USAYSAD*, 3(1), 164-174.
- Yiğit, V. and Esen, H. (2017). "Pabon Lasso Modeli ve Veri Zarflama Analizi ile Hastanelerde Performans Ölçümü", *SDÜ Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(2), 26-32. <https://doi.org/10.22312/sdusbed.303864>

OECD Ülkelerinde Yeşil Ticari Açıklığın Çevresel Sürdürülebilirlik Üzerine Etkisi: Malzeme Ayak İzine Dayalı Kanıtlar

Gizem Mukiyen Avcı¹ 

ÖZET

Amaç: Bu çalışmanın amacı, dış ticaretin çevresel etkilerini dikkate alarak, yeşil ticari açıklığın çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini OECD ülkeleri özelinde incelemektir. Yeşil ticaretin, ekonomik büyüme ve doğal kaynakların korunması arasındaki dengeye katkı sağlayıp sağlamadığı araştırılmaktadır.

Yöntem: 1999-2021 dönemine ait 32 OECD ülkesini kapsayan panel veri seti kullanılmıştır. Değişkenler arasındaki uzun dönemli ilişkileri belirlemek amacıyla Westerlund (2005) ve GUW (2015) panel eşbütünleşme testleri uygulanmış ve ayrıca değişkenlerin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini tahmin etmek için de AMG tahmin yöntemi tercih edilmiştir.

Bulgular: Elde edilen sonuçlar, malzeme ayak izi, gelir düzeyi ve yeşil ticari açıklık değişkenlerinin uzun dönemde birlikte hareket ettiğini göstermektedir. AMG tahmin yöntemiyle yapılan analizler, gelir düzeyindeki artışın malzeme ayak izini artırdığını, yeşil ticari açıklık düzeyindeki artışın ise malzeme ayak izini azalttığını ortaya koymuştur. Ülkelere özgü AMG katsayıları ise, gelir düzeyindeki iyileşmenin tüm ülkelerde malzeme ayak izini artırdığını, ancak yeşil ticari açıklığın etkisinin ülkelere göre farklılık arz ettiğini ortaya koymaktadır.

Özgünlük: Çalışma, çevresel sürdürülebilirliği temsil eden malzeme ayak izi değişkenini merkeze alarak yeşil ticaret açıklığı ile ilişkisini inceleyen nadir araştırmalardan biridir. Ayrıca, IMF tarafından sunulan güncel yeşil ticari açıklık verilerinin kullanılması, çalışmayı mevcut literatürden ayıran önemli bir katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çevresel Sürdürülebilirlik, Yeşil Ticari Açıklık, Malzeme Ayak İzi, Ekonomik Büyüme, OECD.

JEL Kodları: O44, Q50, Q56.

The Impact of Green Trade Openness on Environmental Sustainability in OECD Countries: Evidence Based on Material Footprint

ABSTRACT

Purpose: The aim of this study is to examine the impact of green trade openness on environmental sustainability, taking into account the environmental effects of foreign trade, with a specific focus on OECD countries. It investigates whether green trade contributes to balancing economic growth and the preservation of natural resources.

Methodology: A panel data set covering 32 OECD countries for the period of 1999-2021 is used in this study. To determine the long-term relationships among the variables, Westerlund (2005) and GUW (2015) panel cointegration tests are employed. Additionally, the AMG (Augmented Mean Group) estimation method is used to assess the effects of the variables on environmental sustainability.

Findings: The results indicate that material footprint, income level, and green trade openness move together in the long run. Analyses conducted using the AMG estimation method reveal that an increase in income level raises the material footprint, while an increase in green trade openness reduces it. Country-specific AMG coefficients show that higher income levels increase the material footprint in all countries; however, the impact of green trade openness varies across countries.

Originality: This study is one of the few that focuses on the relationship between green trade openness and environmental sustainability by using the material footprint as a central indicator. Moreover, the use of up-to-date green trade openness data provided by the IMF offers a significant contribution that distinguishes this research from the existing literature.

Keywords: Environmental Sustainability, Green Trade Openness, Material Footprint, Economic Growth, OECD.

JEL Codes: O44, Q50, Q56.

¹ Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İktisat Bölümü, Zonguldak, Türkiye

Sorumlu Yazar-Corresponding Author: Gizem Mukiyen Avcı, gmavci@beun.edu.tr

DOI: 10.51551/verimlilik.1722288

Araştırma Makalesi / Research Article | Geliş / Submitted: 18.06.2025 | Kabul / Accepted: 16.09.2025

Atıf/Cite: Mukiyen Avcı, G. (2025). "OECD Ülkelerinde Yeşil Ticari Açıklığın Çevresel Sürdürülebilirlik Üzerine Etkisi: Malzeme Ayak İzine Dayalı Kanıtlar", *Verimlilik Dergisi*, 59(4), 955-970.

EXTENDED ABSTRACT

Today, disregarding environmental impacts for the sake of economic growth, along with industrialization, energy consumption, overuse of resources, and increasing carbon emissions, is leading to permanent and irreversible environmental problems on a global scale. Factors such as industrialization, energy consumption, excessive use of natural resources and increases in carbon emissions create permanent and irreversible effects on the environment. In this context, the concept of sustainable growth has brought to the agenda the responsibility of protecting not only today's economic goals but also the quality of life of future generations. Sustainable growth has brought forward not only today's economic goals but also the responsibility of preserving the quality of life for future generations. Defined in the United Nations' 1987 Brundtland Report as "meeting the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs," this concept emphasizes that development strategies must integrate not only economic but also social and environmental sustainability. In this context, foreign trade contributes positively by increasing production capacity, creating employment, facilitating technology transfer, and strengthening economic relations between countries. However, issues such as the "pollution haven" hypothesis arising from production concentrated in countries with low environmental standards, and the high carbon emissions and energy consumption caused by international transportation, highlight the negative impacts of trade on the environment. Therefore, aligning foreign trade with environmental considerations and adopting the concept of green trade have become increasingly important.

Green trade refers to the international promotion of environmentally friendly products and sustainable production technologies, and it is directly linked to environmental sustainability. Encompassing the global trade of products that do not harm nature, emit less carbon, are energy-efficient, and produced with renewable resources, this concept both supports environmental sustainability and facilitates the transition to a low-carbon economy. Therefore, green trade makes significant contributions to the UN Sustainable Development Goals, particularly "Responsible Consumption and Production" (Goal 12) and "Climate Action" (Goal 13). In the literature, the relationship between green trade and environmental sustainability has mostly been examined through CO₂ emissions or ecological footprint indicators; however, in recent years, the material footprint, a more comprehensive measure, has gained prominence. The material footprint accounts for all natural resources used (both domestic and imported) to meet a country's final consumption, allowing for a broader assessment of environmental impact.

This study examines the impact of green trade on environmental sustainability for a sample of 32 OECD countries during the 1999-2021 period. OECD countries provide a suitable framework due to their high income levels, the applicability of environmental policies, and data availability. The analysis uses per capita GDP, the green trade openness index, and material footprint as variables, with data drawn from WDI, IMF, and UN databases. Second-generation panel data tests reveal long-term relationships among these variables. AMG estimation results indicate that higher per capita income increases the material footprint, reflecting greater environmental degradation, while greater green trade openness reduces the material footprint and supports environmental sustainability. Country-level findings show that in nations such as the United States, the United Kingdom, France, South Korea, and Turkey, green trade helps limit natural resource use, whereas in countries like Denmark, the Netherlands, and Norway, it unexpectedly increases the material footprint. These results suggest that the effects of green trade vary depending on country-specific conditions and the management of production and import chains.

In this context, the following policy recommendations are included in the study: Reducing tariff and non-tariff barriers to facilitate green product trade between countries, popularizing green technologies in production and logistics, supporting and encouraging environmentally friendly cross-border investments, developing labeling and certification systems based on environmental criteria in order to increase consumer awareness, implementing sustainability-focused free trade agreements in wider geographies, developing and encouraging low-carbon transportation and logistics infrastructures, popularizing recycling practices, and adopting circular economy principles. In this context, in order to achieve sustainable development goals and maintain ecological balance, it is necessary to develop globally coordinated policies and structural reforms that will increase green trade. In particular, ensuring a transformation that focuses on environmental criteria in international supply chains is of critical importance in reducing environmental degradation.

1. GİRİŞ

Günümüzde iktisadi büyüme ve çevresel sorunlar arasındaki ikilem, sıkça tartışılan konuların başında gelmektedir. Ülkelerin iktisadi büyümenin çevresel boyutlarını ihmal etmesi, çevresel bozulmaları beraberinde getirmiş ve bu sorunların çözümü için küresel ölçekte çeşitli tedbirler alınmaya başlanmıştır. Söz konusu tedbirlerin temelinde, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını tehlikeye atmadan günümüz ihtiyaçlarının karşılanması anlayışı yer almakta ve bu durum, ekonomi alanında sürdürülebilir büyüme kavramının önemini artırmaktadır.

Sürdürülebilir büyüme kavramı, ilk kez 1987 yılında Birleşmiş Milletler tarafından yayımlanan Ortak Geleceğimiz: Brundtland Raporu'nda (UN, 1987: 11) "gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneklerini tehlikeye atmaksızın bugünün ihtiyaçlarının karşılanması" şeklinde tanımlanmıştır. Bu kavram, insani kazanımlar ile doğal çevre arasındaki dengenin sağlanmasını ifade etmekte olup, iktisadi büyüme ve kalkınmanın ekonomik, sosyal ve çevresel sürdürülebilirlik ilkelerine uygun biçimde gerçekleştirilmesini amaçlamaktadır. Ekonomik sürdürülebilirlik, kaynakların verimli kullanılması ve uzun vadede istikrarlı bir büyümenin sağlanmasını ifade ederken, sosyal sürdürülebilirlik, eğitim, sağlık ve istihdam olanaklarının geliştirilmesini, genel refah düzeyinin artırılmasını, toplumsal eşitsizliklerin ve yoksulluğun azaltılmasını hedeflemektedir. Çevresel sürdürülebilirlik ise doğal kaynakların tükenmesinin önlenmesi, karbon salınımının, malzeme kullanımının ve çevre kirliliğinin azaltılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması ve biyoçeşitliliğin korunması gibi unsurları kapsamaktadır (Hajian ve Kashani, 2021). Dolayısıyla, sürdürülebilir büyüme, yalnızca ekonomik kalkınma odaklı değil, aynı zamanda sosyal refahın artırılmasını ve ekosistemin korunmasını gözeten bütüncül bir yaklaşımı ifade etmektedir.

Ülkelerin iktisadi büyüme ve kalkınma hedefleri doğrultusunda öne çıkan iktisadi faktörlerden biri dış ticarettir. Dış ticaret, ülke kaynaklarının etkin kullanılması, üretim ve istihdam olanaklarının artırılması, ülke sınırları içerisinde üretilmeyen mallara erişim sağlanması, rekabet gücünün artırılması, ülkeler arası ekonomik ve siyasi ilişkilerin geliştirilmesi, teknoloji transferi ve dış ticaret dengesinin sağlanması gibi pek çok avantaj sağlamaktadır (Shahsavani ve Basavaraju, 2016; Jin, 2002). Ancak, ticaretin bu olumlu etkilerinin yanı sıra çeşitli olumsuz etkileri de bulunmaktadır. Bu olumsuz etkiler arasında; aşırı kaynak kullanımı, ülkeler arası mal transferi sırasında yakıt tüketimine bağlı olarak artan karbondioksit emisyonları, çevre standartlarının düşük olduğu ülkelerde üretim artışı ve bunun sonucunda ortaya çıkan kirlilik sığınağı hipotezi (Mukiyen Avcı, 2023a) gibi sorunlar yer almaktadır. Bir başka deyişle, ticaretin ülkeler üzerindeki etkileri hem olumlu hem de olumsuz yönde şekillenebilmektedir. Bu durum, ülkelerin büyüme süreçlerinde ticaretin yanı sıra yeşil ticaretin etkisini de önemli bir değerlendirme alanı haline gelmesine yol açmıştır. Bu süreçte, yeşil ürünlerin benimsenmesi ve kullanımının artırılması, sürdürülebilirliğin sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır.

İktisat literatüründe yeşil kavramı; okyanuslar, topraklar ve ormanlar dahil olmak üzere doğal kaynakların sürdürülebilir bir biçimde yönetildiği, geçim kaynaklarının iyileştirildiği ve gıda güvenliğinin sağlandığı bir dünyayı ifade etmektedir. Literatürde yeşil ürünlere ilişkin ortak kabul edilen bir tanım bulunmamakla birlikte, yeşil ürün² genel anlamda yaşam döngüleri boyunca mevcut teknolojiye bağlı olarak çevresel etkileri en aza indiren mallar olarak tanımlanmaktadır (Sdrolia ve Zarotiadis, 2019). Yeşil ürünler, aynı amaca hizmet eden diğer ürünlere kıyasla çevreye daha az zarar vererek, ekosistemin korunmasına katkı sağlamaktadır (Dünya Bankası, 2023). Sürdürülebilir ekonomik büyümenin yanı sıra düşük karbon ekonomisine geçiş için de gerekli olan yeşil ürünlerin ticareti, söz konusu malların sınır ötesine yayılmasının temel mekanizmalarından biridir. Ancak, her ülkenin yeşil ürün üretimi için gerekli üretim faktörlerine ve kapasiteye sahip olması mümkün değildir. Bu nedenle, yeşil ürünlerin küresel ölçekte yaygınlaştırılabilmesi ve çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesi için yeşil ürün ticaretinin teşvik edilmesi gerekmektedir (Alvi ve diğerleri, 2023).

Yeşil ticaret, çevre dostu ticaret politikalarının tasarımı ve uygulanması yoluyla, iktisadi büyüme ile çevresel sürdürülebilirliğin uyum içinde gerçekleştirilmesini kapsamaktadır (Hinsberg ve Can, 2024). Bu çerçevede hükümetler; yeşil ürünlerin kullanımını artıran, çevre dostu teknolojik yeniliklerle verimlilik artışını destekleyen, sürdürülebilir bütçeleme politikaları benimseyen ve yeşil büyümeyi teşvik eden dış ticaret stratejileri izlemelidir (Dünya Bankası, 2008: 75). Bu bağlamda yeşil ticaret, enerji verimliliğini artırması, karbon salınımını azaltması ve çevresel kalitenin iyileştirilmesi açısından etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır (Gao ve Zheng, 2017: 9). Diğer yandan; çevresel malların ticaretine ilişkin veriler (yeşil ticarete dayalı olarak ülkelerin politika oluşturmaları açısından), tarife ve tarife dışı engellerin azaltılmasına yönelik anlaşmaların müzakere edilmesinde ve bu mallara ilişkin ekonomiler arasındaki temel bağımlılıkların

² Yeşil ürünlere ilişkin olarak kabul görmüş ortak bir tanım bulunmamaktadır. Literatürde yeşil ürün kavramı ile ilgili olarak ekolojik ürün, çevre dostu ürün, eko-ürün, çevresel ürün, yeşil ürün ve sürdürülebilir ürün gibi farklı kavramlar kullanılabilmektedir. WB (2008)'de çevresel mallar geleneksel çevre dostu ürünler ve çevresel olarak tercih edilebilir ürünler olmak üzere iki şekilde kavramsallaştırılmıştır. IMF (2021) veri setinde ise çevresel ürünler olarak kullanılmaktadır.

belirlenmesinde faydalı olabilir (IMF, 2021). Bu doğrultuda, yenilenebilir enerji kaynakları ve çevre dostu teknolojilerin (örneğin, güneş panelleri, rüzgâr türbinleri) ticareti, fosil yakıt tüketimini azaltmaya imkân tanıyan ürün ve teknolojilerin (örneğin, elektrikli araçlar) ticareti ve yeşil teknoloji transferleri, yeşil ticaretin kapsamına girmektedir (Can ve diğerleri, 2022). Yeşil ticaretin artışı, çevre dostu yeni sektörlerin ve istihdam olanaklarının ortaya çıkmasına katkı sunarak da ekonomik büyümeyi desteklemektedir. Bu süreçte, yeşil ürünlerin benimsenmesi, kullanımının artırılması ve ticareti, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından önem taşımaktadır. Diğer yandan, küresel çevre sorunlarıyla mücadelede de önemli bir araç olan yeşil ticaret, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (Sustainable Development Goals, SDG) arasında yer alan “Sorumlu Tüketim ve Üretim” (12. Hedef) ile “İklim Eylemi” (13. Hedef) hedeflerinin gerçekleştirilmesine de yardımcı olmaktadır (SDG, 2023).

Literatürde yeşil ticaret ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki ilişkiyi inceleyen sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Söz konusu çalışmalarda genellikle çevresel sürdürülebilirliği temsilen CO₂ emisyonu ve ekolojik ayak izi değişkenlerinin kullanıldığı görülmektedir. Ancak son yıllarda, bu değişkenlerin yerini malzeme ayak izi değişkeni almaktadır. Wiedmann ve diğerleri (2015) tarafından ortaya konan malzeme ayak izi değişkeni, bir ülkenin nihai talebini karşılamak için gerçekleştirilen üretim sürecinde kullanılan tüm malzemeleri, ithalat yoluyla temin edilenler de dahil olmak üzere ölçmekte ve CO₂ ile ekolojik ayak izi değişkenlerine kıyasla daha kapsamlı bir ölçüt sunmaktadır. Bu çalışmada, yeşil ticaret ile çevresel sürdürülebilirlik entegrasyonunun öneminden hareketle, çevresel sürdürülebilirliği temsil eden malzeme ayak izi değişkeni ile yeşil ticareti temsil eden yeşil açıklık değişkeni arasındaki ilişki analiz edilmektedir.

Çalışmada 32 OECD ülkesi için 1999-2021 yılları arasında sürdürülebilirlik ve yeşil ticari açıklık ilişkisi incelenmektedir. Bu alanda mevcut literatürde yaygın olarak kullanılan değişken ve veri setlerinin farklılaştırılması ile literatüre katkıda bulunması amaçlanmaktadır. Aynı zamanda analizde kullanılan IMF yeşil ticari açıklık endeksinin güncel bir veri setine dayalı olmasının literatüre önemli katkı bir sunacağı düşünülmektedir. Çalışmanın organizasyon yapısı şu şekildedir: İzleyen bölümünde, sürdürülebilirlik ve yeşil açıklık arasındaki ilişkiye yönelik ampirik literatür incelenmektedir. Bunu takiben, ampirik analiz bölümünde araştırmanın modeli, veri seti, ekonometrik metodoloji ve ampirik bulgular detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Sonuç bölümünde ise ampirik sonuçlar değerlendirilmekte ve politika önerileri tartışılmaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Ticaret, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir faktördür ve üretim, tüketim ile ulaşım süreçlerinin her aşaması, doğrudan veya dolaylı olarak çevre üzerinde etkiler yaratmaktadır. Bu nedenle dış ticaret ile çevre arasındaki ilişki, birçok araştırmanın odağında yer almıştır. Ticaretin çevresel bozulma üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar farklı sonuçlara ulaşmıştır. Bazı araştırmalar dış ticaretin çevre kalitesini iyileştirici ve çevresel bozulmayı azaltıcı bir etkisi olduğunu ileri sürerken (Antweiler ve diğerleri, 2001; Shahbaz ve diğerleri, 2012; Zhang ve diğerleri, 2017; Udeagha ve Muchapondwa, 2022); diğer bazı çalışmalar ise dış ticaret artışının çevresel bozulmayı artırdığını göstermektedir (Managi ve diğerleri, 2009; Al-Mulali ve Ozturk, 2015; Farhani ve diğerleri, 2013; Omri ve diğerleri, 2015; Daly ve Abdouli, 2023).

Mevcut literatürün gelişimi çevresel sürdürülebilirlik açısından incelendiğinde ilk yıllarda yaygın olarak çevresel sürdürülebilirliği temsilen CO₂ değişkeninin kullanıldığı görülmektedir. Ancak zamanla CO₂ emisyonu değişkeninin açıklayıcı gücünün sınırlı kalması, yerini ekolojik ayak izine bırakmasına neden olmuştur. Wackernagel ve Rees (1996) tarafından geliştirilen ekolojik ayak izi endeksi, çevresel sürdürülebilirliği değerlendirmede daha etkili bir gösterge olarak kabul edilmiştir. Ekolojik ayak izi, mevcut teknoloji kullanılarak insanlığın tükettiği kaynakların üretimi ve bu üretimden kaynaklanan atıkların emilimi için gereken arazi ve su alanlarının büyüklüğünü ölçmektedir (Galli ve diğerleri, 2012). Son yıllarda ise çevre ekonomisi ile ilgili çalışmalarda araştırmacılar tarafından malzeme ayak izi değişkeni ilgi görmektedir. Wiedmann ve diğerleri (2015) tarafından geliştirilen malzeme ayak izi, biyoyakıtlar, fosil yakıtlar, metal cevherleri ve metal olmayan minerallerin toplamı olarak tanımlanmaktadır. Ülkelerin üretim ve tüketim bazlı malzeme kullanımını hesaplayan bu değişken, diğer göstergelere kıyasla daha kapsamlı bir analiz sunması nedeniyle son yıllarda giderek daha fazla tercih edilmektedir.

Dış ticaret açısından incelendiğinde ise genellikle ihracat, ithalat ve dışa açıklık gibi farklı değişkenlerin ticareti temsil etmek için kullanıldığı görülmektedir. Ancak bu çalışmalar, ticaret ve çevre ilişkisini incelerken ticarete konu olan malların özelliklerini çoğu zaman göz ardı etmektedir. Analizlerde genellikle yeşil ve yeşil olmayan mallar arasında ayırım yapılmaksızın, toplam ticari açıklık endeksi üzerinden değerlendirmeler yapılmaktadır. Dış ticaretin çevresel bozulmayı arttırıcı etkisi, sürdürülebilir büyüme kapsamında dış ticarete konu olan yeşil malların ticaretinin ve yeşil ticaretin sürdürülebilirlik üzerindeki etkisinin incelenmesi gerekliliğini gündeme getirmiştir. Bu nedenle, son yıllarda geleneksel uluslararası ticaret yerine çevre dostu ve yeşil ürünlerin ticaretini kapsayan “yeşil ticaret” konusu giderek daha fazla ilgi görmektedir. Ancak

literatürde, yeşil ticaretin ve/veya yeşil ticaretin bir göstergesi olan yeşil ticari açıklığın sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini inceleyen çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır.

Bu bölümde sürdürülebilirlik ve yeşil ticari açıklık arasındaki ilişkiyi ele alan çalışmalara ilişkin literatüre yer verilmektedir. Aynı zamanda Tablo 1’de söz konusu çalışmalara ilişkin bilgiler özetlenmiştir. Tabloda, çalışmaların analizinde sürdürülebilirliği temsil eden bağımlı değişken, modelde yer alan bağımsız değişkenler ve bağımsız değişkenlerden biri olan yeşil açıklık endeksinde ilişkin bilgiler öne çıkmaktadır.

Tablo 1. Sürdürülebilirlik ve yeşil ticari açıklık ilişkisine yönelik ampirik literatür

Yazar	Örneklem	Bağımlı Değişken	Bağımsız Değişkenler	Yeşil Ticari Açıklık Endeksi
Can ve diğerleri (2021)	35 OECD	Ekolojik ayak izi	Gelir, gelir ² , enerji tüketimi, yeşil ticari açıklık.	Yazar tarafından hesaplanmıştır. OECD stat-CLEG (255 ürün)
Can ve diğerleri (2022)	31 OECD ülkesi	Ekolojik ayak izi	Gelir, gelir ² , enerji tüketimi, yeşil ticari açıklık.	Yazar tarafından hesaplanmıştır. APEC (54 ürün) CLEG + (40 ürün) BETA Akademi
Ahmad ve diğerleri (2022)	BRICS ülkeleri	CO ₂ emisyonu	Finansal gelişme, teknolojik yenilik, yeşil ticari açıklık, ekonomik büyüme, enerji tüketimi.	BETA Akademi
Güzel ve Oluç (2023)	32 ülke	CO ₂ emisyonu	Gelir, enerji tüketimi, yeşil ticari açıklık.	BETA Akademi
Hinsberg ve Can (2024)	33 OECD ülkesi	Hava kalitesi	Gelir, enerji tüketimi, yeşil ticari açıklık.	BETA Akademi
Maji ve diğerleri (2023)	45 Afrika ülkesi	CO ₂ emisyonu	Kurumsal kalite, yeşil ticari açıklık, GSYİH büyümesi, nüfus artışı, temel okur-yazarlık.	Ticaret faaliyetlerinde fosil yakıt kullanımı (yeşil ticaret)
Bai ve diğerleri (2023)	G7 ülkeleri	CO ₂ emisyonu	Yeşil teknolojik yenilik, yeşil ithalat, yeşil ihracat, GSYİH, ticaret.	OECD stat
Alvi ve diğerleri (2023)	105 ülke	CO ₂ emisyonu	GSYİH, DYY, çevresel mal ticareti, çevresel olmayan mal ticareti.	APEC
Hu ve diğerleri (2024)	20 OECD ülkesi	Ekolojik ayak izi tüketim yoğunluğu	Kentleşme, yeşil ticari açıklık, para politikası araçları, maliye politikası araçları, GSYİH, çevresel yenilik.	OECD stat
Tariq ve diğerleri (2024)	12 GOÜ	CO ₂ emisyonu	Yeşil büyüme, yeşil ticari açıklık, karbon fiyatı, eko-yenilik, yeşil enerji, GSYİH.	OECD stat-CLEG (255 ürün)
Chavda ve Mehta (2024)	Hindistan	Ekolojik ayak izi	Düşük karbonlu teknoloji ürünleri ticareti, yenilenebilir enerji tüketimi, patent başvurusu, GSYİH.	IMF- İklim Değişikliği Gösterge Panosu
Ganda (2024)	BRICS	Malzeme ayak izi	Eko-inovasyon, yeşil olmayan ürün ticareti, yeşil ürün ticareti, ekonomik büyüme, çevresel yönetim.	Küresel Malzeme Akımı Veri tabanı çevresel mallar-biyokütle ürünleri (ihracat+ithalat)

Can ve diğerleri (2021) çalışmasında 2003-2016 döneminde 35 OECD ülkesi için yeşil malların çevre üzerindeki etkilerini analiz etmektedir. Çalışmada OECD CLEG sepetinden hareketle 255 ürün için yeşil açıklık endeksi oluşturulmuştur. Analiz sonucunda EKC hipotezinin geçerli olduğu ve yeşil açıklığın ekolojik ayak izini azalttığı ve çevresel sürdürülebilirliği teşvik ettiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmanın ardından Can ve diğerleri (2022)’in çalışmasında 2007-2017 yılları arasında 31 OECD ülkesinde ticaret ve çevre ilişkisini inceleyerek “yeşil ticaret çevreyi koruyabilir mi” sorusuna cevap aranmıştır. Analiz sonucunda Çevresel Kuznets Eğrisi hipotezinin geçerli olduğu ve ülkelerin ticaret sepetindeki yeşil ürünlerin varlığının ekolojik ayak izini azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmada OECD “Çevresel Malların Birleşik Listesi”nden (CLEG+) 40 ürünü kapsayan ve Asya-Pasifik Ekonomik İşbirliği (APEC) “Çevresel Mallar Listesi”nden 54 ürünü kapsayan iki farklı yeşil ticari açıklık endeksi ve söz konusu endekslerin yer aldığı iki farklı model üzerinden ticaret-çevre ilişkisi analiz edilmiştir. Bu çalışma, Beta Akademi- Sosyal Bilimler Araştırma Laboratuvarı aracılığı ile yeşil açıklık endeksinin oluşturulması açısından önemli bir yere sahiptir.

Oluşturulan endeks, literatürde bazı çalışmalarda (Ahmad ve diğerleri, 2022; Güzel ve Oluç, 2023; Hinsberg ve Can, 2024) kullanılmıştır.

Beta Akademi yeşil açıklık endeksinin kullanıldığı çalışmalardan biri olan Ahmad ve diğerleri (2022)'in çalışmasında, 2004-2018 döneminde BRICS ülkeleri için finansal katılım, teknolojik yenilik, yeşil açıklık ve CO₂ emisyonları arasındaki ilişki araştırılmaktadır. Analiz sonucunda söz konusu ülkelerde finansal katılımın çevresel bozulmaya katkıda bulunduğu, teknolojik yenilik ve yeşil açıklığın CO₂ emisyonlarını azaltıcı etkide bulunduğu sonucuna ulaşılmıştır. Güzel ve Oluç (2023)'ün çalışmasında ise 2003-2016 dönemi arasında 32 gelişmiş ülke için yeşil açıklığın karbon emisyonları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Analiz sonucunda EKC hipotezinin geçerli olduğu, ayrıca yeşil açıklık ile CO₂ arasında ters yönlü bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle EKC hipotezi çerçevesinde gelir düzeyindeki bir artış çevre kirliliğini artırırken, yeşil açıklık düzeyindeki bir artış çevre kirliliğini azaltmaktadır. Ayrıca modelde yer alan enerji tüketimi artışının da çevresel bozulmayı artırıcı rolü olduğu tespit edilmiştir. Beta Akademi yeşil açıklık endeksinin kullandığı bir diğer çalışmada, Hinsberg ve Can (2024) yeşil açıklığın hava kalitesi üzerindeki etkisini ele almıştır. Çevresel Kuznets Eğrisinden hareketle hava kirliliğini temsilen azot oksit ve kükürt oksit emisyonlarının ele alındığı çalışmada 2003-2016 yılları arasında 33 OECD ülkesinde çevre dostu ürün ticaretinin serbestleşmesinin hava kalitesini arttırdığı, enerji tüketiminin ise azalttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Maji ve diğerleri (2023), çalışmasında kurumsal kalitenin ve yeşil ticaretin karbon emisyonları üzerindeki rolünü araştırmış ve kurumsal kaliteyi yeşil ticarete doğru güçlendirmenin, karbon emisyonlarını azaltıcı etkisi olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Dolayısıyla yeşil ticaret ve kurumsal yapının güçlendirilmesi, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli olmaktadır.

Çevre kirliliğini azaltmaya yönelik olarak ülkelerin iki rakip politika tercihi ile karşı karşıya olduğunu belirten Bai ve diğerleri (2023) çalışmasında, yeşil ticaret artışının ve yeşil teknoloji yatırımı artışının çevresel bozulma üzerindeki etkisini incelemiştir. Literatürden farklı olarak çalışmada üretime dayalı karbon emisyonu yerine tüketime dayalı karbon emisyonu dikkate alınmıştır. G-7 ülkeleri için uygulanan analiz sonucunda yeşil ticaretin payındaki artışın karbon emisyonlarını arttırdığı, yeşil teknoloji yatırımlarının ise azalttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Mal ticaretinin çevresel ve çevresel olmayan mal ticareti olmak üzere iki grupta ele alındığı Alvi ve diğerleri (2023)'ün çalışmasında, ticaretin çevresel bozulma üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu bağlamda çevresel mal ticareti, çevresel olmayan mal ticareti ve doğrudan yabancı yatırımların karbon emisyonları üzerindeki etkisi incelenmiştir. 2007-2020 yılları arasında 60 orta gelirli ve 45 yüksek gelirli ülkenin ele alındığı çalışmada çevresel mal ticaretinin karbon emisyonlarını azaltıcı, çevresel olmayan mal ticaretinin ise artırıcı yönde etkide bulunduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ülkeler gelir düzeyine göre incelendiğinde orta gelirli ülkelerdeki çevresel mal ticaretinin etkisi, yüksek gelirli ülkelere kıyasla daha yüksek oranda gerçekleşmektedir.

Hu (2024)'ün çalışmasında ise mali ve parasal politikaların yeşil ticari açıklığın ekolojik sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini yumuşatmadaki birleşik etkisi analiz edilmektedir. Bu çalışmada yeşil ticari açıklık yerine yeşil ihracat ve yeşil ithalat verileri kullanılmıştır. Analiz sonucunda genel anlamda yeşil ticari açıklığın ticaretten elde edilen kazançlar ile ekolojik sürdürülebilirliği iyileştirdiği sonucuna ulaşılmaktadır. Harcama odaklı mali genişleme ekolojik olarak daha az/orta derecede verimli olan ekonomilerde yeşil ticaret açıklığının ekolojik sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini olumlu etkilerken, ekolojik olarak daha verimli ekonomilerde olumsuz etkilemektedir. Diğer yandan vergi odaklı mali daralma daha az/orta derecede verimli olan ekonomilerde yeşil ticaret açıklığının ekolojik sürdürülebilirlik üzerindeki iyileştirici etkisini teşvik ederken, ekolojik olarak daha verimli ekonomilerde etkisi nötr kalmaktadır. Faiz oranı odaklı parasal daralma durumu ise yeşil açıklığın ekolojik sürdürülebilirliğin iyileştirici etkisini çoğaltmaktadır. Tariq ve diğerleri (2024)'in çalışmasında ise çevresel yenilik, yeşil açıklık, karbon fiyatı ve yeşil enerjideki pozitif şokların karbon emisyonlarını azaltarak, yeşil ekonomik büyümeyi teşvik ettiği, negatif şokların ise çevresel bozulmayı artırarak, yeşil büyümeyi azalttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Son olarak Chavda ve Mehta (2024) çalışmasında yeşil ticaretin, teknolojik yeniliğin, yenilenebilir enerjinin ve ekonomik büyümenin ekolojik ayak izleri üzerindeki etkilerini araştırılmaktadır. 2000-2023 yılları arasında Hindistan için uygulanan zaman serisi analizi sonucunda, yeşil ticaret, teknolojik yenilik ve yenilenebilir enerjinin ekolojik ayak izini azaltıcı yönde etkilediği görülmektedir. Diğer yandan ekonomik büyümenin ekolojik ayak izini kısa dönemde arttırdığı, uzun dönemde ise azalttığı, böylece EKC hipotezinin geçerli olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Chavda ve Mehta (2024) çalışmasında, diğer çalışmalardan farklı olarak yeşil açıklık endeksini temsil etmesi amacıyla IMF tarafından geliştirilen İklim Değişikliği Gösterge Panosu'ndaki (Climate Change Dashboard) düşük karbonlu teknoloji ürünleri ticareti verisini kullanmıştır.

Literatürde sürdürülebilirlik ve yeşil açıklık arasındaki ilişki incelendiğinde, genellikle sürdürülebilirliği temsilen CO₂ emisyonu ve ekolojik ayak izi değişkenlerine odaklanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada

çevresel sürdürülebilirliği temsilen malzeme ayak izi değişkeni kullanılarak literatüre katkıda bulunulması amaçlanmaktadır.

Sürdürülebilirlik ve yeşil ticaret arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmaların çoğu CO₂ emisyonu ve ekolojik ayak izi değişkenlerine odaklanırken, Ganda (2024) çalışması, bu alanda farklı bir yaklaşım benimseyerek sürdürülebilirliği malzeme ayak izi üzerinden değerlendirmektedir. Çalışmada 2000-2019 yılları için BRICS ülkelerinde çevresel yönetim, ekonomik büyüme, yeşil ürün ve yeşil olmayan ürün ticareti ve eko-inovasyonun malzeme ayak izi ve yenilenebilir enerji kullanımı üzerindeki etkisini iki farklı model ile araştırılmaktadır. Modelde yeşil ürün ticareti verileri ihracat ve ithalatın toplamı şeklinde olup, yeşil ticari açıklıktan farklılık göstermektedir. Analizde Küresel Malzeme Akımı Veri tabanı (Global Material Flows Database) yeşil ürün verileri kullanılmıştır. Analiz sonucunda yeşil olmayan ürün ticaretinin malzeme ayak izini azalttığı, yeşil ürün ticaretinin ise malzeme ayak izini arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Nedensellik sonuçları da yeşil olmayan ürün ticareti ve malzeme ayak izi, yeşil ürün ticareti ve malzeme ayak izi, yenilenebilir enerji kullanımı ve eko-inovasyon, yenilenebilir enerji tüketimi ve çevresel yönetim ve yenilenebilir enerji kullanımı ve yeşil ürün ticareti arasında çift yönlü bir nedensellik ilişkisi olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, çevresel sürdürülebilirliği temsil eden malzeme ayak izi kullanılarak yeşil ticari açıklık ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki ilişkinin incelenmesi ve yeşil açıklık endeksinin IMF veri setine dayanması, çalışmayı literatürdeki benzer çalışmalardan ayırtan önemli bir unsur olarak öne çıkmaktadır.

3. AMPİRİK ANALİZ

Bu bölümde öncelikle çalışmanın modeli, veri seti ve ekonometrik metodolojisi hakkında bilgi verilmektedir. Ardından ampirik sonuçlar sunulmaktadır.

3.1. Model ve Veri Seti

Çalışmada sürdürülebilirlik ve yeşil ticari açıklık arasındaki ilişki, 1999-2021 dönemi verileri kullanılarak 32 OECD ülkesi için incelenmiştir. OECD ülkelerinin, genellikle yüksek gelirli ve sanayileşmiş ekonomilere sahip olmaları, dünya ticaretinde önemli bir pay üstlenmeleri, sanayileşmiş ekonomilerde malzeme kullanımının yoğunluğu ve çevresel sürdürülebilirlik ile yeşil ekonomi politikalarında öncü konumda bulunmaları, bu ülkelerin analiz için tercih edilmesinde belirleyici olmuştur. Ayrıca, OECD ülkelerinde çevresel sürdürülebilirlik, ticaret ve malzeme kullanımı gibi konularda güvenilir ve kapsamlı veri setlerine erişimin mümkün olması, örneklem bu ülkelerle sınırlandırılmasını destekleyen bir diğer faktördür.

Çalışmanın modeli Ansari ve diğerleri (2020) ve Can ve diğerleri (2022)'den hareketle belirlenmiş olup, Eşitlik 1'deki gibidir:

$$MF_{it} = \alpha_{0i} + \alpha_{1i}GDP_{it} + \alpha_{2i}GOP_{it} + u_{it} \quad (1)$$

Denklemden, i yatay kesiti, t zamanı, α_0 sabit terimi, α_1 ve α_2 eğim parametrelerini ve u hata terimini temsil etmektedir. Ayrıca MF toplam malzeme ayak izini; GDP kişi başına düşen GSYİH düzeyini ve GOP ise yeşil ticari açıklığı temsil etmektedir. MF ve GDP değişkenleri logaritmik biçimde modele dahil edilmiştir. Modeldeki değişkenlere dair ayrıntılar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Değişkenlere ilişkin açıklamalar

Değişken	Açıklama	Kaynak
<i>MF</i>	Malzeme Ayak İzi (Biyokütle, fosil yakıtlar, metal cevherleri ve metal olmayan minerallerin toplamı -metrik ton)	UN, SDG
<i>GDP</i>	Gayrisafi Yurt İçi Hasıla (Kişi başı, 2015 sabit USD)	WDI
<i>GOP</i>	Yeşil Ticari Açıklık (X+M)/GDP	IMF

Not: UN SDG, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri Göstergeleri Veri Tabanını (United Nations, Sustainable Development Goals Indicators Database); WDI, Dünya Kalkınma Göstergelerini (World Development Indicators); IMF ise Uluslararası Para Fonu'nu (International Monetary Fund) ifade etmektedir.

3.2. Ekonometrik Metodoloji ve Ampirik Bulgular

Çalışmada kullanılan değişkenlere ilişkin tanımlayıcı istatistikler Tablo 3'te özetlenmektedir.

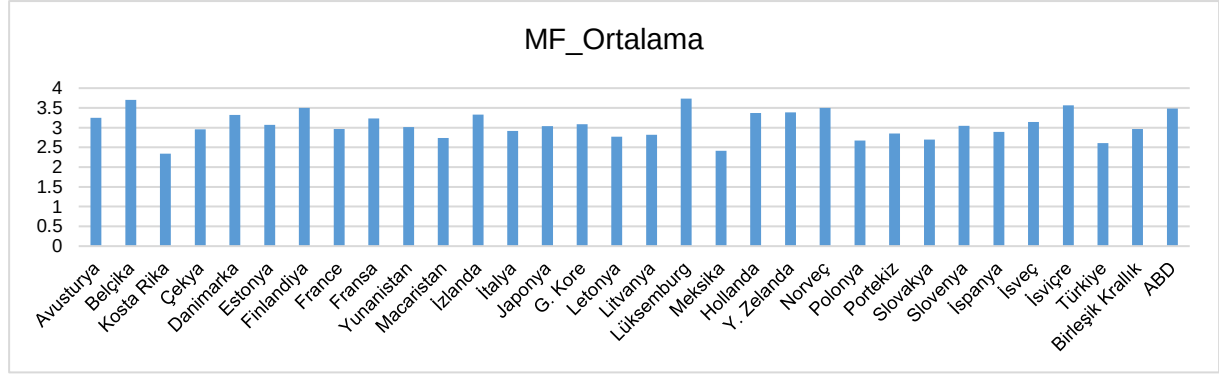
Tablo 3. Tanımlayıcı istatistikler

Değişken	Gözlem	Ortalama	Standart Sapma	Minimum	Maximum
<i>MF</i>	736	3.074	0.384	2.051	4.341
<i>GDP</i>	736	10.206	0.694	8.680	11.630
<i>GOP</i>	736	4.998	3.523	1.006	25.565

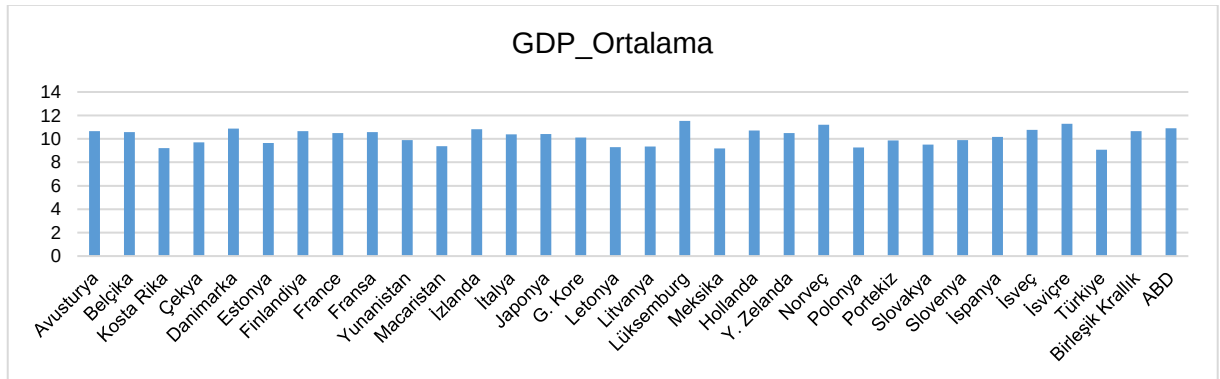
MF değişkeni 736 gözlemde oluşmakta olup ortalama değeri 3.074, standart sapması 0.384'tür. Bu değişkenin minimum değeri 2.051 ile 2001 yılında Türkiye'de, maksimum değeri ise 4.341 ile 2021 yılında Lüksemburg'da gözlenmiştir.

GDP değişkeni için de 736 gözlem bulunmaktadır. Ortalama değer 10.206, standart sapma 0.694 olarak hesaplanmıştır. Minimum değer 8.680 ile 2001 yılında Türkiye'de, maksimum değer ise 11.630 ile 2007 yılında Lüksemburg'da kaydedilmiştir.

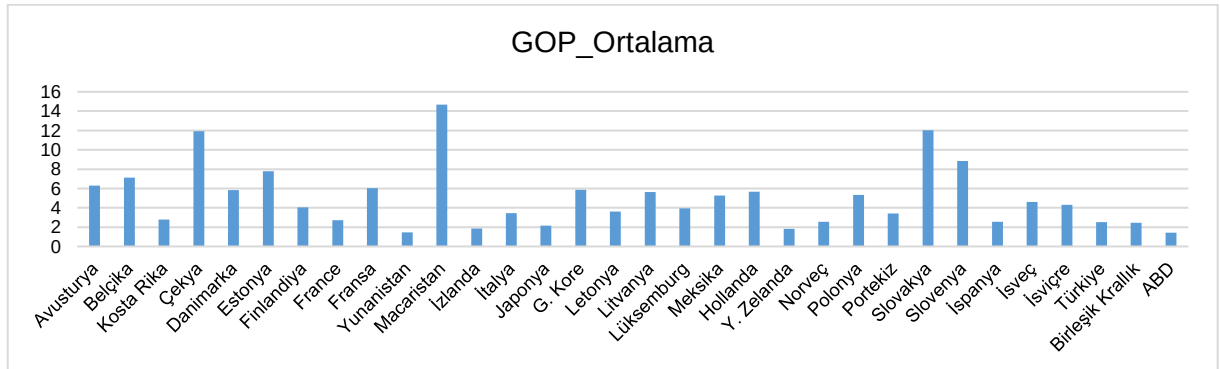
GOP değişkeni bakımından ise 736 gözlemde elde edilen sonuçlara göre ortalama değer 4.998, standart sapma 3.523'tür. Bu değişkenin minimum değeri 1.006 ile 2002 yılında Yunanistan'da, maksimum değeri ise 25.565 ile 2021 yılında Slovakya'da gerçekleşmiştir. Ayrıca değişkenlere ilişkin ortalama değerlerin ülkelere göre dağılımı Şekil 1-3'te gösterilmektedir.



Şekil 1. Malzeme ayak izi ortalama değerlerinin ülkelere göre dağılımı



Şekil 2. Gayrisafi yurt içi hasıla ortalama değerlerinin ülkelere göre dağılımı

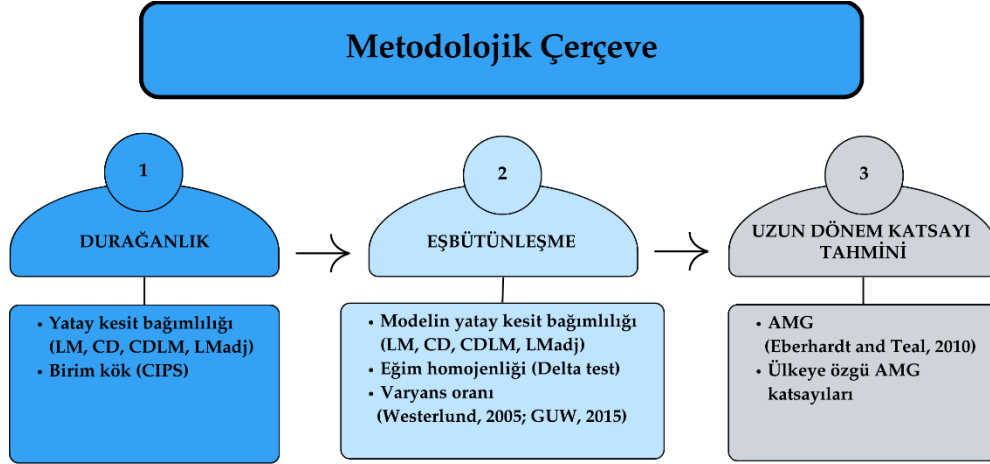


Şekil 3. Yeşil ticari açıklık ortalama değerlerinin ülkelere göre dağılımı

Ülkelerin performanslarını farklı göstergeler üzerinden karşılaştıran şekiller incelendiğinde, her bir ölçütün ülkeler arası farklılıkları ortaya koyma düzeyinin değiştiği görülmektedir. *MF_Ortalama* sonuçları, ülkelerin büyük ölçüde 2,5-3,5 aralığında yoğunlaştığını ve bu bağlamda ülkeler arasında görece dengeli bir dağılım bulunduğunu göstermektedir. Türkiye, bu ölçekte yaklaşık 2,60 değeri ile ortalamanın biraz altında konumlanmaktadır. *GDP_Ortalama* grafiği ise, görece homojen bir dağılım sergilemekte, ülkelerin büyük çoğunluğu 8-11 aralığında yoğunlaşmaktadır. Türkiye, yaklaşık 9 değeri ile ortalamaya yakın düzeyde yer almaktadır. Buna karşılık, *GOP_Ortalama* sonuçları ülkeler arasındaki farklılıkların en belirgin biçimde

ortaya çıktığı göstermektedir. Bu kapsamda Macaristan, Slovakya ve Çekya yüksek değerleriyle öne çıkarken, ABD ve Yunanistan düşük seviyeleriyle dikkat çekmektedir; Türkiye ise yaklaşık 2,5 değeriyle ortalamanın altında kalmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, MF ve GDP ortalamalarının ülkeler arasında daha istikrarlı ve dengeli bir dağılım gösterdiği, GOP ortalamasının ülkeler arasındaki farklılıkları keskin biçimde yansıtan gösterge olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Tanımlayıcı istatistiklerin ardından, çalışmanın metodolojisi ve ampirik sonuçlara geçmeden önce, izlenen metodolojik çerçeve Şekil 4’de grafiksel olarak sunulmaktadır.



Şekil 4. Metodolojik çerçeve

Panel veri analizlerinde, küresel ekonomi koşullarında ülkeler (yatay kesit birimleri) arası etkileşimin, analiz bulgularının güvenilirliğini etkileyebilmesi nedeni ile öncelikle yatay kesit bağımlılık sorunu sınanmaktadır. Paneli oluşturan birimler arasında yatay kesit bağımlılığın bulunması, analizde sapmalı sonuçlar elde edilmesine neden olacaktır (Breusch ve Pagan, 1980; Pesaran, 2004). Bu nedenle çalışmada öncelikle yatay kesit bağımlılığın varlığı analiz edilerek, “birimler arası bağımlılık yoktur” hipotezi sınanmaktadır. Yatay kesit bağımlılığın analizinde Breusch ve Pagan (1980) LM testi ve Pesaran (2004) CD testi uygulanmaktadır. Breusch ve Pagan (1980) LM testi zaman boyutunun yatay kesit boyutundan büyük olduğu durumlarda kullanılmakta olup yatay kesit boyutunun büyük olduğu durumlarda güvenilir sonuçlar vermemektedir (Pesaran, 2004: 7). Zaman boyutunun küçük ve yatay kesit boyutunun büyük olduğu durumlarda ise Breusch ve Pagan (1980) LM testine alternatif olarak Pesaran (2004) CD test ileri sürülmüştür.

Yatay kesit bağımlılığı araştıran ve Lagrange çarpanı yaklaşımına dayanan Breusch ve Pagan (1980) LM testi şu şekilde gösterilmektedir (Eşitlik 2):

$$\lambda_{LM} = T \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \hat{p}_{ij}^2 \quad (2)$$

2 numaralı eşitlikte $\hat{p}_{ij}^2$ i. ve j. birimlerin kalıntıları arasındaki korelasyon katsayısını göstermektedir. LM testinde “Birimler arasında bağımlılık yoktur” temel hipotezi sınanmaktadır. LM test istatistiği $N(N-1)/2$ serbestlik derecesi ile X^2 asimptotik olarak dağılmaktadır. Pesaran (2004) CD testi ise Eşitlik 3’teki gibidir.

$$CD = \sqrt{\frac{2T}{N(N-1)}} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \hat{p}_{ij} \quad (3)$$

3 numaralı eşitlikte $\hat{p}_{ij}^2$ i. ve j. birimlerin kalıntıları arasındaki korelasyon katsayısıdır. CD test istatistiği $N(N-1)/2$ serbestlik derecesi ile X^2 asimptotik olarak dağılmaktadır.

Diğer yandan LM ve CD testleri grup ortalaması sıfır olduğu, fakat bireysel ortalamasının sıfırdan farklı olduğu durumlarda sapmalı olmaktadır. PUY (Pesaran ve diğerleri, 2008) test istatistiğine varyans ve ortalamayı ekleyerek sapması düzeltilmiş LM (LM_{adj}) testini ileri sürmüşlerdir. LM_{adj} testinde $H_0: p_{ij} = cor(u_{it}, u_{jt}) = 0$ $i \neq j$ “Yatay kesit bağımlılık yoktur” temel hipotezi sınanmaktadır. LM_{adj} testi Eşitlik 4’teki gibidir:

$$LM_{adj} = \sqrt{\frac{2}{N(N-1)}} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{(T-k)\hat{p}_{ij}^2 - \mu_{Tij}}{v_{Tij}} \quad T \rightarrow \infty \text{ ve } N \rightarrow \infty \text{ ve } LM_{adj} \rightarrow N(0,1) \quad (4)$$

Yatay kesit bağımlılığın araştırılmasına ilişkin LM testi (Breusch ve Pagan, 1980), CD (Pesaran, 2004), CD_{LM} (Pesaran, 2004) ve LM_{adj} (Pesaran ve diğerleri, 2008) test sonuçları Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Yatay kesit bağımlılık testi

Değişken	LM (Breusch Pagan, 1980)	CD (Pesaran, 2004)	CD _{LM} (Pesaran, 2004)	LM _{adj} (Pesaran ve diğerleri, 2008)
MF	3236.890 (0.000)*	-2.936 (0.002)*	132.650 (0.000)*	34.668 (0.000)*
GDP	4202.753 (0.000)*	-2.849 (0.002)*	175.588 (0.000)*	38.259 (0.000)*
GOP	2084.126 (0.000)*	-2.756 (0.003)*	81.403 (0.000)*	19.464 (0.000)*

Not: Parantez içindeki değerler olasılık (p) değerini, * ise %1'de anlamlılığı göstermektedir.

Tabloda yer alan test sonuçlarından hareketle, “yatay kesit bağımlılık yoktur” hipotezi tüm değişkenler için reddedilmektedir. Elde edilen sonuçlar yatay kesitler arasında bir etkileşim olduğunu, diğer bir ifade ile yatay kesit bağımlılık sorununun bulunduğunu göstermektedir. Bu nedenle analizin devamında yatay kesit bağımlılığı sorunu dikkate alan testler uygulanmaktadır.

Yatay kesit bağımlılık sorununun varlığının tespit edilmesinin ardından değişkenlerin durağanlığı araştırılmıştır. Değişkenlerin durağanlık sınaması yatay kesit bağımlılık sorunu dikkate alan ikinci nesil birim kök testleri yardımıyla yapılmıştır. Bu bağlamda çalışmada Pesaran (2007) tarafından geliştirilen CIPS (Im, Pesaran ve Shin) testi kullanılmıştır. CIPS testi, yatay kesit bağımlılığı altında tutarlı sonuçlar vermektedir. CIPS istatistik değerleri CADF regresyonundan hareketle, ADF birim kök testi regresyonunun gecikmeli yatay kesit ortalamaları ve bunun birinci farkları ile genişletilmesine dayalı olup, (Baltagi, 2005: 249) Eşitlik 5'teki şekilde elde edilmektedir:

$$\Delta y_{it} = \alpha_i + p_i^* y_{i,t-1} + d_0 \bar{y}_{t-1} + \sum_{j=0}^p d_{j+1} \Delta \bar{y}_{t-j} + \sum_{k=1}^p c_k \Delta y_{i,t-k} + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

Eşitlikte $\bar{y}_{t-j}$ kesit ortalamasının gecikmeli seviyesini, $\Delta \bar{y}_{t-j}$ ise her birim için kesit ortalamasının birinci farklarını ifade etmektedir. Dolayısıyla gecikmeli yatay kesit ortalamaları ve birinci farklarının varlığıyla birlikte, birimler arasındaki korelasyon göz önünde bulundurulmalıdır. Buradan hareketle CIPS değeri şu şekildedir (Eşitlik 6):

$$CIPS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i(N, T) \quad (6)$$

CIPS durağanlık testinde “paneldeki tüm seriler birim kök içerir (yani durağan değildir)” hipotezi sınanmaktadır. CIPS birim kök test bulguları Tablo 5'teki gibidir.

Tablo 5. CIPS bulguları

Değişken	CIPS	
	I(0)	I(1)
MF	-1.422	-4.585*
GDP	-1.973	-3.395*
GOP	-1.867	-4.102*

Not: * %1'de anlamlılığı göstermektedir. CIPS kritik değeri; %1 için -2.23'dür.

Tablo 5'e göre; paneldeki tüm seriler için düzeyde “seride birim kök yoktur” hipotezi reddedilmektedir. Diğer bir ifade ile seriler birim kök içermektedir ve düzeyde durağan değildir. Farkları alındığı durumda ise seriler durağan hale gelmektedir. Dolayısıyla tüm seriler fark durağan, I(1)'dir. Serilerin durağanlığının incelenmesinin ardından serilerin uzun dönem ilişkisini inceleyebilmek için eşbütünleşme testi uygulanması gerekmektedir. Ancak eşbütünleşme tahmincisinin belirlenmesi için öncesinde modelde yatay kesit bağımlılığın ve eğim parametrelerinin homojenliğinin tespit edilmesi gerekmektedir. Modele ilişkin yatay kesit bağımlılık ve homojenite test bulguları Tablo 6'da verilmektedir.

Tablo 6. Model için yatay kesit bağımlılık ve homojenite test bulguları

Model: $MF_{it} = \alpha_{0i} + \alpha_{1i} GDP_{it} + \alpha_{2i} GOP_{it} + u_{it}$		
	Test İstatistiği	p-değeri
Yatay Kesit Bağımlılık Testi		
LM (Breusch Pagan, 1980)	2675.778	0.000*
CD (Pesaran, 2004)	33.951	0.000*
CD _{LM} (Pesaran, 2004)	69.208	0.000*
LM _{adj} (PUY, 2008)	107.339	0.000*
Homojenite Testleri		
$\tilde{\Delta}$	21.019	0.000*
$\tilde{\Delta}_{adj}$	23.126	0.000*

Not: * %1'de anlamlılığı göstermektedir.

Tablo 6'da yer alan istatistiklerden hareketle, "modelde yatay kesit bağımlılık yoktur" hipotezi reddedilmekte, dolayısıyla modelde yatay kesit bağımlılığın bulunduğu görülmektedir. Ayrıca delta test sonuçları da "eğim katsayıları homojendir" şeklindeki hipotezin reddedildiğini, eğim katsayılarının heterojen olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla elde edilen bulgular eşbütünleşme analizinde yatay kesit bağımlılığını dikkate alan ve heterojen tahmine dayalı ikinci nesil eşbütünleşme testlerinin tercih edilmesini gerektirmektedir.

Çalışmada değişkenler arasındaki uzun vadeli ilişkinin varlığını dikkate alan ve söz konusu durumlara uygun olan sırasıyla Westerlund (2005)'in varyans oranına dayalı eşbütünleşme testi ve Gengenbach ve diğerleri (2015) eşbütünleşme testi kullanılmıştır. Westerlund (2005) sırasıyla homojenlik ve heterojenlik varsayımları altında iki test istatistiği hesaplamaktadır. Eğim heterojenliğini dikkate alan grup ortalaması varyans oranı istatistiği şu şekilde tahmin edilmektedir (Eşitlik 7):

$$VR_G = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \hat{E}_{it}^2 \hat{R}_i^{-1} \quad (7)$$

Denklikte $\hat{E}_{it} \equiv \sum_{j=1}^1 \hat{e}_{ij}$, $\hat{R}_{it} \equiv \sum_{t=1}^T \hat{e}_{it}^2$ ve $\hat{e}_{it}$ hata terimi olup, hipotez "eşbütünleşme yoktur" şeklindedir.

Gengenbach ve diğerleri (2015) tarafından önerilen eşbütünleşme testi ise yatay kesit bağımlılığını dikkate alarak, hata düzeltme yaklaşımına dayanan bir eşbütünleşme testidir. Gengenbach, Urbain ve Westerlund (GUW) testi Eşitlik 8'deki gibidir.

$$\Delta y_{it} = d\delta_{y,xi} + \alpha_{yi}y_{i,-1} + \omega_{i,-1}\gamma_i + v_i\pi_i + \varepsilon_{y-xi} = \alpha_{yi}y_{i,-1} + g_i^d\lambda_i + \varepsilon_{y,xi} \quad (8)$$

İlk aşamada modelde x her bir birim için OLS ile tahmin edilir ve "eşbütünleşme yoktur" şeklindeki hipotez test edilir. Ardından her bir birime ait test istatistiğinin ortalamasından panele ilişkin test istatistiği hesaplanır. Panel test istatistiği Eşitlik 9'daki gibi olup, temel hipotez "panelde eşbütünleşme yoktur" şeklindedir.

$$\bar{T}_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{ci} \quad (9)$$

Westerlund (2005) ve GUW (2015) eşbütünleşme testlerine ilişkin bulgular Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Panel eşbütünleşme test bulguları

<i>Westerlund (2005) Eşbütünleşme Testi</i>		<i>İstatistik</i>	<i>Olasılık Değeri</i>	
<i>H₀: Eşbütünleşme yoktur.</i>				
<i>H₁: Tüm panel eşbütünleşiktir.</i>				
<i>Varyans oranı</i>		-1.622	0.052***	
<i>H₀: Eşbütünleşme yoktur.</i>				
<i>H₁: Bazı paneller eşbütünleşiktir.</i>				
<i>Varyans oranı</i>		-1.616	0.053***	
<i>GUW (2015) Eşbütünleşme Testi</i>		<i>Katsayı</i>	<i>T-bar</i>	<i>Olasılık Değeri</i>
<i>H₀: Eşbütünleşme yoktur.</i>		-0.807	-2.964	<=0.05

Not: *** %10'da anlamlılığı göstermektedir.

Tablo 7'de yer alan Westerlund (2005) test sonuçlarına göre "eşbütünleşme yoktur" temel hipotezi hem panel hem de modeldeki bazı paneller için reddedilmektedir. Benzer bir şekilde GUW (2015) eşbütünleşme testine göre de "eşbütünleşme yoktur" hipotezi reddedilmektedir. Dolayısıyla her iki eşbütünleşme test bulgularından, değişkenlerin eşbütünleşik olduğu, MF, GDP ve GOP'un uzun dönemde birlikte hareket ettikleri sonucuna ulaşılmaktadır.

Eşbütünleşme ilişkisinin tespit edilmesinin ardından GDP ve GOP'un MF üzerindeki uzun dönemli etkileri tespit edilebilmektedir. Bunun için yine yatay kesit bağımlılığını dikkate alan ve her bir yatay kesit için heterojen katsayıların hesaplanmasına imkân tanıyan Augmented Mean Group (AMG) tahmincileri kullanılmıştır. AMG (Eberhardt ve Teal, 2010) tahmincileri iki aşamalı süreçten oluşmaktadır Eşitlik 10 ve 11).

$$\text{İlk aşama: } \Delta y_{it} = b' \Delta x_{it} + \sum_{t=2}^T c_t \Delta D_t + e_{it} \quad \hat{c}_t \equiv \hat{\mu}_t^* \quad (10)$$

Denklemden yer alan c kukla katsayısını, D_t zaman kuklalarını ve $\hat{\mu}_t^*$ kukla değişkenlerden elde edilen ve ayrıca yatay kesit bağımlılığını modele dahil eden değişkeni ifade etmektedir.

$$\text{İkinci aşama: } y_{it} = \alpha_i + b_i' x_{it} + c_i t + d_i \hat{\mu}_t^* + e_{it} \quad (11)$$

İkinci aşamada, birinci aşamadan elde edilen kukla değişken katsayıları modele dahil edilerek model tahmini yapılmaktadır. AMG tahmincisi $\hat{b}_{AMG} = N^{-1} \sum_i \hat{b}_i$ birimlere özgü istatistiklerin ortalaması alınarak hesaplanan panel katsayılarını göstermektedir. Bu bağlamda AMG tahmincisi hem panel hem de ülkelere özgü tahmin sonuçları hesaplayabilmektedir. AMG tahmin sonuçları Tablo 8'de yer almaktadır.

Tablo 8. AMG tahmin sonuçları

<i>Değişkenler</i>	<i>Katsayı</i>	<i>Standart Hata</i>	<i>Z</i>	<i>Olasılık değeri</i>
GDP	1.541	0.134	11.48	0.000*
GOP	-0.039	0.016	-2.49	0.013**
Sabit	12.541	1.504	-8.34	0.000*

Not: * ve ** sırasıyla %1 ve %5'de anlamlılığı göstermektedir.

Tablo 8'de yer alan AMG tahmin sonuçlarına göre, kişi başına gelir düzeyindeki artışın malzeme ayak izi üzerinde istatistiki olarak anlamlı ve pozitif etkisi olduğu tespit edilmiştir. Kişi başına gelir düzeyi, iktisadi büyümenin bir göstergesi olarak değerlendirildiğinde, gelir artışı ülkelerin üretim ve tüketim düzeylerini artırmakta, bu da malzeme kullanımının yükselmesine neden olmaktadır. Bu bulgu, Ansari ve diğerleri (2020), Sahoo ve diğerleri (2021), Dada ve Al-Faryan (2024) ve Mukiyen Avcı (2023b)'in gelir düzeyindeki artışın malzeme ayak izi kullanımını arttırdığına işaret eden çalışmalarındaki sonuçlarla uyum göstermektedir.

Diğer yandan, yeşil ticari açıklığın malzeme kullanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde, ülkelerin yeşil ticari açıklık düzeyindeki artışın malzeme kullanımı üzerinde istatistiki olarak anlamlı ve negatif bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, yeşil ticari açıklığın malzeme ayak izini azaltma potansiyelini ortaya koymaktadır. Yeşil ticari açıklık, üretim süreçlerinde kaynakların verimli kullanılması, döngüsel ekonomi politikalarının uygulanması, uluslararası ticarete yeşil ürünlerin teşvik edilmesi ve çevre dostu lojistik uygulamalarının benimsenmesi yoluyla söz konusu etkiyi güçlendirebilir.

Literatürde, doğrudan malzeme ayak izi ile yeşil ticari açıklık arasındaki ilişkiyi ele alan bir çalışmaya rastlanmamakla birlikte Ganda (2024) yeşil ve yeşil olmayan malların (X+M) malzeme ayak izi üzerindeki etkisini incelemiştir. Ancak, söz konusu çalışmada yeşil ürünlerin (X+M) malzeme ayak izini artırdığı yönünde elde edilen bulgular, mevcut analizde ulaşılan sonuçlarla örtüşmemektedir.

Tablo 9. Ülkeye özgü AMG katsayıları

<i>Ülke</i>	<i>Sabit</i>	<i>GDP</i>	<i>GOP</i>	<i>Ülke</i>	<i>Sabit</i>	<i>GDP</i>	<i>GOP</i>
ABD	-9.398 (0.000)*	1.238 (0.000)*	-0.265 (0.001)*	İzlanda	-4.486 (0.072)***	0.719 (0.062)***	0.144 (0.062)***
Almanya	-9.289 (0.000)*	1.206 (0.000)*	-0.002 (0.887)	Japonya	-18.096 (0.006)*	2.064 (0.001)*	-0.068 (0.245)
Avusturya	-8.196 (0.000)*	1.091 (0.000)*	0.006 (0.468)	Kosta Rika	-5.97 (0.000)*	0.946 (0.000)*	-0.068 (0.136)
Belçika	-16.494 (0.000)*	1.924 (0.000)*	0.009 (0.643)	Letonya	-8.31 (0.000)*	1.197 (0.000)*	0.048 (0.061)**
Birleşik Krallık	-7.091 (0.001)*	0.981 (0.000)*	-0.077 (0.019)**	Litvanya	-4.937 (0.000)*	0.848 (0.000)*	0,010 (0,386)
Çekya	-5.475 (0.000)*	0.91 (0.000)*	-0.014 (0.004)*	Lüksemburg	-33.204 (0.002)*	3.203 (0.000)*	0,047 (0,723)
Danimarka	-3.656 (0.020)**	0.636 (0.008)*	0.051 (0.008)*	Macaristan	-11.463 (0.000)*	1.577 (0.000)*	-0,024 (0,000)*
Estonya	-11.192 (0.000)*	1.519 (0.000)*	-0.021 (0.109)	Meksika	-7.89 (0.005)*	1.124 (0.000)*	0,041 (0,000)*
Finlandiya	-18.401 (0.000)*	2.103 (0.000)*	-0.072 (0.011)**	Norveç	-33.299 (0.000)*	3.286 (0.000)*	0,083 (0,045)**
Fransa	-13.215 (0.000)*	1.583 (0.000)*	-0.070 (0.024)**	Polonya	-9.602 (0.000)*	1.411 (0.000)*	-0,108 (0,000)*
Güney Kore	-6.25 (0.000)*	0.961 (0.000)*	-0,024 (0.001)*	Portekiz	-22.619 (0.005)*	2.661 (0.001)*	-0,172 (0,000)*
Hollanda	-10.11 (0.000)*	1.268 (0.000)*	0.022 (0.001)*	Slovakya	-5.094 (0.000)*	0.845 (0.000)*	-0,002 (0,699)
İspanya	-12.373 (0,013)**	1.568 (0,001)*	-0.175 (0,000)*	Slovenya	-3.232 (0,050)**	0.678 (0,000)*	-0,024 (0,024)**
İsveç	-15,414 (0,000)*	1,741 (0,000)*	0,007 (0,773)	Türkiye	-13,149 (0,000)*	1,796 (0,000)*	-0,133 (0,043)**
İsviçre	-36,085 (0,000)*	3,598 (0,000)*	-0,174 (0,000)*	Yeni Zelanda	-17,433 (0,000)*	2,016 (0,000)*	-0,060 (0,032)**
İtalya	-10,537 (0,000)*	1,313 (0,000)*	0,016 (0,221)	Yunanistan	-9,357 (0,000)*	1,3 (0,000)*	-0,177 (0,000)*

Not: *, ** ve *** sırasıyla %1, %5 ve %10'da anlamlılığı göstermektedir

Mevcut bulgular, yeşil ticari açıklığın çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini inceleyen diğer bazı araştırmaları destekler niteliktedir. Can ve diğerleri (2021, 2022), Hu ve diğerleri (2024) ve Chavda ve Mehta (2024)'ün çevresel sürdürülebilirliği ekolojik ayak izi değişkeni üzerinden değerlendirdikleri çalışmalarında ve Güzel ve Oluç (2023), Tariq ve diğerleri (2024) ve Alvi ve diğerleri (2023) ise bu değerlendirmeyi CO₂ değişkeni temelinde ele aldıkları çalışmalarında, yeşil ticari açıklığın malzeme ayak izini azalttığı sonucuna ulaşmıştır. Bu bulgular, yeşil ticari açıklığın çevresel sürdürülebilirlik politikaları açısından önemli bir araç olduğunu göstermektedir. Son olarak Tablo 9'da ülkelere özgü AMG katsayılarına ilişkin bulgulara yer verilmektedir. Tablo 9'da sunulan ülkelere özgü AMG katsayıları incelendiğinde, ele alınan tüm ülkelerde kişi başına gelir düzeyindeki artışın malzeme ayak izini artırdığı görülmektedir.

Yeşil açıklığın malzeme ayak izi üzerindeki ülkelere özgü etkisi değerlendirildiğinde, Amerika Birleşik Devletleri, Birleşik Krallık, Çekya, Finlandiya, Fransa, Güney Kore, İspanya, İsviçre, Macaristan, Polonya, Portekiz, Slovenya, Türkiye, Yeni Zelanda ve Yunanistan'da yeşil ticari açıklıktaki bir artışın malzeme ayak izini azalttığı görülmektedir.

Buna karşılık Danimarka, Hollanda, İzlanda, Letonya, Meksika ve Norveç'te yeşil ticari açıklıktaki bir artış malzeme ayak izini artırmaktadır. Bu bulgu Bai ve diğerleri (2023)'ün çevresel sürdürülebilirliği CO₂ değişkeni üzerinden inceledikleri çalışmada, yeşil ticari açıklığın malzeme ayak izini artırdığı sonucu ile örtüşmektedir. Benzer bir şekilde Ganda (2024)'nin yeşil malların (X+M) malzeme kullanımı arttığı bulgusu ile genel bir paralellik göstermektedir. Yeşil ticari açıklık, sürdürülebilirliği genellikle teşvik etse de, bazı durumlarda malzeme kullanımı artışına yol açabilmektedir. Bu durum, kaynak yoğun yeşil teknolojilerin benimsenmesi, ticaret hacmindeki artışlar ve küresel tedarik zincirinde yaşanan verimsizliklerden kaynaklanabilir.

Avusturya, Belçika, Kosta Rika, Estonya, Almanya, İtalya, Japonya, Litvanya, Lüksemburg, Slovakya ve İsveç'te ise yeşil ticari açıklığın malzeme ayak izi üzerinde istatistiki olarak anlamlı bir etkisi bulunamamıştır. Bu bulgular, yeşil ticaret açıklığının etkilerinin her ülkenin özgün ekonomik, teknolojik ve ticari dinamiklerine bağlı olarak farklı sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir.

4. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Çalışmada, 1999-2021 yılları arasında 32 OECD ülkesinde yeşil ticari açıklık ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki ilişki araştırılmaktadır. Değişkenler arasındaki uzun dönemli ilişkiyi tespit etmek için Westerlund (2005) ve GUW (2015) panel eşbütünleşme analizleri uygulanmıştır. Analiz sonuçlarına göre, her iki eşbütünleşme testi de serilerin eşbütünleşik olduğunu göstermektedir. Buna göre malzeme ayak izi, gelir düzeyi ve yeşil ticari açıklık değişkenleri uzun dönemde birlikte hareket etmektedir.

Ayrıca, gelir düzeyi ve yeşil ticari açıklığın malzeme ayak izi üzerindeki etkilerini incelemek amacı ile AMG tahmincisi kullanılmıştır. AMG tahmini sonuçlarına göre, gelir düzeyindeki bir artış malzeme ayak izini artırmaktadır. Diğer bir ifadeyle, ülkelerin ekonomik büyüme süreçlerinde üretim ve tüketim düzeylerinin artması, malzeme kullanımını artırarak çevresel bozulmaya yol açmakta ve çevresel sürdürülebilirliği olumsuz etkilemektedir. Bu bulgu, Ansari ve diğerleri (2020) ile Sahoo ve diğerleri (2021)'in çalışmalarıyla uyumlu olup, ekonomik büyümenin çevresel kaynak tüketimini yükselttiğine dair literatürdeki genel eğilimi teyit etmektedir. Nitekim, Boz ve diğerleri (2025), karbon salınımının özellikle en yüksek %1'lik gelir grubunun tüketim alışkanlıklarından kaynaklandığını ortaya koymuştur. Öte yandan, yeşil ticari açıklığın malzeme ayak izi üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, yeşil ticari açıklık düzeyinin artmasının malzeme ayak izini azaltıcı yönde etkilediği tespit edilmiştir. Bu bulgu, yeşil ticari açıklığın çevresel sürdürülebilirlik politikalarının uygulanmasında etkili bir araç olarak değerlendirilebileceğini göstermekte olup, bu sonuç Can ve diğerleri (2021; 2022), Güzel ve Oluç (2023) ve Hu ve diğerleri (2024)'ün yeşil ticaretin çevresel sürdürülebilirliği teşvik ettiği yönündeki bulgularıyla paralellik göstermektedir.

Son olarak ele alınan 32 OECD ülkesi için, ülkelere özgü AMG katsayıları hesaplanarak değişkenlerin etkileri değerlendirilmiştir. Ele alınan ülkelerin tümünde gelir düzeyindeki artış malzeme ayak izini arttırırken, yeşil ticari açıklığın malzeme ayak izi üzerindeki etkisi farklılık göstermektedir. Amerika Birleşik Devletleri, Birleşik Krallık, Çekya, Finlandiya, Fransa, Güney Kore, İspanya, İsviçre, Macaristan, Polonya, Portekiz, Slovenya, Türkiye, Yeni Zelanda ve Yunanistan'da yeşil ticari açıklıktaki bir artışın malzeme ayak izini azaltırken, Danimarka, Hollanda, İzlanda, Letonya, Meksika ve Norveç'te yeşil ticari açıklıktaki bir artış malzeme ayak izini artırmaktadır.

Çalışma literatürdeki mevcut bulguları desteklemekle birlikte, malzeme ayak izini merkeze alması ve IMF'nin güncel yeşil ticaret açıklığı verilerini kullanması yönüyle özgün bir katkı sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, ülkelerin ekonomik büyüme ve kalkınma süreçlerinde, çevre dostu mal ve hizmetlerin üretimini ve ticaretini teşvik edecek politikalar benimsemeleri gerektiğini ortaya koymaktadır. Diğer bir ifadeyle, ekonomik büyümenin ekosistem üzerinde tahribata yol açmadan sürdürülebilmesi temel bir öncelik olmalı ve bu anlamda yeşil ürün ticaretine yönelik politikalar hayata geçirilmelidir.

Ülkelerin yeşil ticari açıklık düzeyini artırabilmesi için yeşil ve çevre dostu ürünlere ilişkin tarife ve tarife dışı engellerin azaltılması önemli bir politika aracı olacaktır. Yeşil ticari açıklık, çevre dostu ve yeşil ürünlerin üretimini ve ticaretini teşvik ederek, doğrudan malzeme kullanımını azaltma potansiyeline sahiptir. Bu doğrultuda, ülkelerarası serbest ticaret anlaşmalarına ekosisteme zarar vermeyen, iklim değişikliğine yol açmayan çevresel malların dahil edilmesi önem taşımaktadır. Ayrıca ticarete konu olan malların üretiminde, tedarik zinciri yönetiminde ve lojistik süreçlerinde çevreye duyarlı teknolojilerin geliştirilmesi ve benimsenmesi, yeşil ticaretin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki olumlu etkisini güçlendirecektir.

Bunun yanı sıra, taşımacılık sektöründe yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, nakliye ve lojistik süreçlerinde atık miktarının minimize edilmesi ve düşük karbonlu lojistik sağlayan politikaların benimsenmesi çevresel sürdürülebilirliği destekleyen önemli adımlardır. Ayrıca çevreye zarar veren ve kaynak yoğun mal ticareti yapan firmalara daha yüksek çevresel standartlar ve vergi yükümlülükleri getirilmesi, üretim süreçlerinde fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının teşvik edilmesi ve hammadde tüketimi yerine geri dönüşüm malzemelerinin tercih edilmesi, üretim ve ticarete malzeme kullanımının azaltmasına katkı sağlayacaktır. Bu tür politika ve uygulamalar, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir.

Çatışma Beyanı / Conflict of Interest

Yazar tarafından herhangi bir potansiyel çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No potential conflict of interest was declared by the author.

Fon Desteği / Funding

Bu çalışmada herhangi bir resmi, ticari ya da kâr amacı gütmeyen organizasyondan fon desteği alınmamıştır.

Any specific grant has not been received from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Etik Standartlara Uygunluk / Compliance with Ethical Standards

Yazar tarafından, çalışmada kullanılan araç ve yöntemlerin Etik Kurul izni gerektirmediği beyan edilmiştir.

It was declared by the author that the tools and methods used in the study do not require the permission of the Ethics Committee.

Etik Beyanı / Ethical Statement

Yazarlar tarafından bu çalışmada bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan edilmiştir.

It was declared by the author that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.

KAYNAKÇA

- Ahmad, M., Ahmed, Z., Bai, Y., Qiao, G., Popp, J. ve Oláh, J. (2022). "Financial Inclusion, Technological Innovations and Environmental Quality: Analyzing the Role of Green Openness", *Frontiers in Environmental Science*, 10(851263), 1-12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.851263>
- Al-Mulali, U. ve Ozturk, I. (2015). "The Effect of Energy Consumption, Urbanization, Trade Openness, Industrial Output, and the Political Stability on the Environmental Degradation in the MENA (Middle East and North African) Region", *Energy*, 84, 382-389. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.004>
- Alvi, S., Ahmad, I. ve Rehman, A. (2023). "Trade of Environmental Versus Non-Environmental Goods and Carbon Emissions in High and Middle-Income Countries", *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 65283-65295. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26972-9>
- Ansari, M.A., Haider, S. ve Khan, N.A. (2020). "Enviromental Kuznets Curve Revisited: An Analysis Using Ecological and Material Footprint", *Ecological Indicators*, 115(106416), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106416>
- Antweiler, W., Copeland, B.R. ve Taylor, S.T. (2001). "Is Free Trade Good for the Enviroment", *The American Economic Review*, 91(4), 877-908. <https://doi.org/10.1257/aer.91.4.877>
- Bai, J., Han, Z., Rizvi, S.K.A. ve Naqvi, B. (2023). "Green Trade or Green Technology? The Way Forward for G-7 Economies to Achieve COP 26 Targets While Making Competing Policy Choices", *Technological Forecasting & Social Change*, 191(122477), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122477>
- Baltagi, B.H. (2005). "Econometric Analysis of Panel Data", England: John Wiley&Sons Ltd. West Sussex.
- Boz, A., Ünalın, G. ve Çaşkurlu, E. (2025). "The Effectiveness of Redistribution in Carbon Inequality: What About the Top 1%?", *Sustainability*, 17(11), 4960, 1-26. <https://doi.org/10.3390/su17114960>
- Breusch, T.S. ve Pagan, A.R. (1980). "The Lagrange Multiplier Test and Its Applications to Model Specification in Econometrics", *The Review of Economic Studies*, 47(1), 239-253. <https://doi.org/10.2307/2297111>
- Can, M., Jebli, B. ve Brusselaers, J. (2021). "Exploring the Impact of Trading Green Products on the Environment: Introducing the Green Openness Index", *MPRA*, 106730, 1-21.
- Can, M., Jebli, B. ve Brusselaers, J. (2022). "Can Green Trade Save the Environment? Introducing the Green (Trade) Openness Index", *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 44091-44102. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18920-w>
- Chavda, P. ve Mehta, D. (2024). "Impact of Green Trade, Technological Innovation and Renewable Energy on India's Ecological Footprint", <https://ssrn.com/abstract=5057184>.
- Dada, J.T. ve Al-Faryan, M.A.S. (2024). "Linking Per Capita Income, Renewable Energy, Natural Resources, Trade, and Urbanisation to Material Footprint: Insights from Saudi Arabia", *Energy Nexus*, 13(100269), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100269>
- Daly, S. ve Abdouli, M. (2023). "The Nexus Between Environmental Quality, Economic Growth, and Trade Openness in Saudi Arabia (1990-2017)", *International Journal of Energy Economics and Policy*, 13(4), 579-598. <https://doi.org/10.32479/ijee.14119>
- Dünya Bankası. (2008). "International Trade and Climate Change - Economic, Legal, and Institutional Perspectives, Opportunities for Win-Win-Win: Liberalizing Trade in Environmental Goods and Services", 73-95, Washington, DC.
- Dünya Bankası. (2023). "Toward a Clean Green Resilient World for All", <https://www.worldbank.org/en/topic/environment/publication/environment-strategy-toward-clean-green-resilient-world>, Erişim tarihi: 05.01.2025.
- Eberhardt, M. ve Teal, F. (2010). "Productivity Analysis in Global Manufacturing Production, *Oxford, Department of Economics*", *Discussion Paper Series* (515).
- Farhani, S., Shahbaz, M. ve Arouri, M.E.H. (2013). "Panel Analysis of CO₂ Emissions, GDP, Energy Consumption, Trade Openness and Urbanization for MENA Countries", *MPRA*, 49258, 1-19.
- Galli, A., Kitzes, J., Niccolucci, V., Wackernagel, M., Wada, Y. ve Marchettini, W. (2012). "Assessing the Global Environmental Consequences of Economic Growth through the Ecological Footprint: A Focus on China and India", *Ecological Indicators*, 17, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.04.022>
- Gao, X., ve Zheng, H. (2017). "Environmental Concerns, Environmental Policy and Green Investment", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12), 1570. <https://doi.org/10.3390/ijerph14121570>
- Ganda, F. (2024). "Investigating the Relationship and Impact of Environmental Governance, Green Goods, Non-Green Goods and Eco-Innovation on Material Footprint and Renewable Energy in the BRICS Group", *Sustainability*, 16(1602), 1-20. <https://doi.org/10.3390/su16041602>
- Gengenbach, C., Urbain, J.P., ve Westerlund, J. (2016). "Error Correction Testing in Panels with Common Stochastic Trends", *Journal of Applied Econometrics*, 31(6), 982-1004. <https://doi.org/10.1002/jae.2475>
- Güzel, I. ve Oluç, I. (2023), "Yeşil Açıklığın Çevresel Bozulma Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi", *İzmir İktisat Dergisi*, 38(1), 19-34. <https://doi.org/10.24988/ije.1068476>

- Hajian, M. ve Kashani, S.J. (2021). "Evolution of the Concept of Sustainability from Brundtland Report to Sustainable Development Goals", *Sustainable Resource Management*, (s. 1-24), Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824342-8.00018-3>
- Hinsberg, N. ve Can, M. (2024). "The Impact of Green Trade Openness on Air Quality", *Ekonomikalia Journal of Economics*, 2(2), 105-118. <https://doi.org/10.60084/eje.v2i2.198>
- Hu, Y., Li, B. ve Ahmad, M. (2024). "Green Trading and Ecological Sustainability Under Macroeconomic Policy Framework", *Geoscience Frontiers*, 15(101776), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101776>
- IMF (2021). "Trade in Environmental Goods. Climate Change Indicators Dashboard", https://climatedata.imf.org/datasets/8636ce866c8a404b8d9baeaffa2c6cb3_0/explore, Erişim tarihi: 25.12.2024.
- Jin, J.C. (2002). "Exports and Growth: Is the Export-Led Growth Hypothesis Valid for Provincial Economies?", *Applied Economics*, 34(1), 63- 76. <https://doi.org/10.1080/00036840010025632>
- Maji, I.K., Saari, M.Y. ve Bello, U.A. (2023). "Institutional Quality, Green Trade and Carbon Emissions in Sub-Saharan Africa", *Cleaner Energy Systems*, 6(100086), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2023.100086>
- Managi, S., Hibiki, A. ve Tsurumi, T. (2009). "Does Trade Openness Improve Environmental Quality?", *Journal of Environmental Economics and Management*, 58, 346-363. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2009.04.008>
- Mukiyen Avcı, G. (2023a). "Environmental Impact of Foreign Direct Investment in Turkey: Does the Quality of Institutions Matter? Evidence from Time Series Analysis Using the Fourier Extension", *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 107841-107853. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29964-x>
- Mukiyen Avcı, G. (2023b). "Malzeme Kuznets Eğrisi Hipotezi Geçerli mi? CIVETS Ülkelerinden Ampirik Kanıtlar", *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 52, 336-351. <https://doi.org/10.52642/susbed.1351678>
- Omri, A., Daly, S., Rault, C. ve Chaibi, A. (2015). "Financial Development, Environmental Quality, Trade and Economic Growth: What Causes What in MENA Countries?", *Energy Economics*, 48, 242-252. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.01.008>
- Pesaran, M.H. (2004). "General Diagnostic Tests for Cross Section Dependence in Panels". <https://doi.org/10.1007/s00181-020-01875-7>
- Pesaran, M.H. (2007). "A Simple Panel Unit Root Test in the Presence of Cross-Section Dependence", *Journal of Applied Econometrics*, 22(2), 265-312. <https://doi.org/10.1002/jae.951>
- Pesaran, M.H., Ullah, A. ve Yamagata, T. (2008). "A Bias-Adjusted LM Test of Error Cross-Section Independence", *The Econometrics Journal*, 11(1), 105-127. <https://doi.org/10.1111/j.1368-423X.2007.00227.x>
- Sahoo, M., Saini, S. ve Villanthenkodath, M.A. (2021). "Determinants of Material Footprint in BRICS Countries: An Empirical Analysis", *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 37689-37704. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13309-7>
- Sdrolia, E. ve Zarotiadis, G. (2019). "A Comprehensive Review for Green Product Term: From Definition to Evaluation", *Journal of Economic Surveys*, 33(1), 150-178. <https://doi.org/10.1111/joes.12268>
- SDG (2023). "Sustainable Development Goal", <https://sdgs.un.org/goals>.
- Shahbaz, M., Lean, H.H. ve Shabbir, M.S. (2012). "Environmental Kuznets Curve Hypothesis in Pakistan: Cointegration and Granger Causality", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2947-2953. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.015>
- Shahsavani, M. ve Basavaraju, C. (2016). "International Trade Benefits and Disadvantages, and Problems", *International Journal of Research in Economics and Social Sciences*, 6(1).
- Tariq M., Xu Y., Ullah K. ve Dong B. (2024). "Toward Low-Carbon Emissions and Green Growth for Sustainable Development in Emerging Economies: Do Green Trade Openness, Eco-Innovation, and Carbon Price Matter?", *Sustainable Development*, 32, 959-978. <https://doi.org/10.1002/sd.2711>
- Udeagha, M.C. ve Muchapondwa, E. (2022). "Environmental Sustainability in South Africa: Understanding the Criticality of Economic Policy Uncertainty, Fiscal Decentralization, and Green Innovation", *Sustainable Development*, 31, 1638-1651. <https://doi.org/10.1002/sd.2473>
- UN (1987). "Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future", https://gat04-live-1517c8a4486c41609369c68f30c8-aa81074.divio-media.org/filer_public/6f/85/6f854236-56ab-4b42-810f-606d215c0499/cd_9127_extract_from_our_common_future_brundtland_report_1987_foreword_chpt_2.pdf.
- Wackernagel, M. ve Rees, W. (1996). "Our ecological footprint". Gabriola Island, BC: New Society Publishers.
- Westerlund, J. (2005). "New Simple Test for Panel Cointegration", *Econometric Reviews*, 24(3), 297-316. <https://doi.org/10.1080/07474930500243019>
- Wiedmann, T.O., Schandl, H., Lenzen, M., Moran, D., Suh, S. ve West, J. (2015). "The Material Footprint of Nations", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(20), 6271-6276. <https://doi.org/10.1073/pnas.1220362110>
- Zhang, S., Liu, X. ve Bae, J. (2017). "Does Trade Openness Affect CO₂ Emissions: Evidence from Ten Newly Industrialized Countries?", *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 17616-17625. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9392-8>

Investigating the Impact of Innovation and Intellectual Capital on Firm Performance Using Structural Equation Modeling

Nilüfer Yücedağ Erdinç¹ 

ABSTRACT

Purpose: This study aims to analyze the effect of intellectual capital and innovation on company performance. Intellectual capital is defined through its relational, human, and structural aspects, while innovation is explored across product, process, marketing, and organizational categories.

Methodology: The research population includes pharmaceutical warehouses involved in R&D activities in Mersin Province as of December 2023. Data was gathered through surveys with 400 questionnaires. Of these, 314 questionnaires were returned, representing five pharmaceutical warehouses, which meets the required sample size. The research model was tested using SEM and multi-group comparison analysis with AMOS.

Findings: The findings show that intellectual capital and innovation are key factors influencing company performance.

Originality: This study offers valuable insights for pharmaceutical warehouses, with the relational capital dimension and process innovation having the most significant impact on company performance.

Keywords: Intellectual Capital, Performance, Innovation, Structural Equation Model.

Jel Classification: O34, O30, L25.

İnovasyon ve Entelektüel Sermayenin Firma Performansına Etkisinin Yapısal Eşitlik Modellemesi Yoluyla Araştırılması

ÖZET

Amaç: Bu çalışmada, entelektüel sermaye ile inovasyonun firma performansına etkisinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Entelektüel sermaye ilişkisel, insan ve yapısal sermaye alt boyutları ile inovasyon ise ürün, süreç, pazarlama ve organizasyonel inovasyon alt boyutları ile incelenmiştir.

Yöntem: Araştırmanın evrenini 2023 Aralık ayı itibarıyla Mersin ilinde Ar&Ge faaliyetinde bulunan ilaç depoları oluşturmaktadır. Veriler anket yoluyla toplanmış il merkezinde faaliyet gösteren beş ilaç deposunda çalışan 400 kişiye ulaşılmış, 314 anket analiz edilmiştir. Bu sayı gerekli örneklem sayısını karşılamaktadır. Anket dört bölümden oluşmaktadır. Araştırma modeli YEM ve AMOS kullanılarak yapılan çoklu grup karşılaştırma analizi ile test edilmiştir.

Bulgular: Sonuçlar, entelektüel sermaye ve inovasyonun firma performansının önemli belirleyicileri olduğunu göstermektedir.

Özgünlük: İlaç depolarında ilişkisel sermaye ve süreç inovasyonu boyutlarının firma performansı üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Entelektüel Sermaye, Performans, İnovasyon, Yapısal Eşitlik Modeli.

JEL Sınıflandırması: O34, O30, L25.

¹ Tarsus University, Vocational School, Department of Finance, Banking and Insurance, Mersin, Türkiye

Corresponding Author: Nilüfer Yücedağ Erdinç, nilufer.erdinc@tarsus.edu.tr

DOI: 10.51551/verimlilik.1768933

Research Article | Submitted: 19.08.2025 | Accepted: 19.09.2025

Cite: Yücedağ Erdinç, N. (2025). "Investigating the Impact of Innovation and Intellectual Capital on Firm Performance Using Structural Equation Modeling", *Verimlilik Dergisi*, 59(4), 971-984.

1. INTRODUCTION

In today's world, where the significance of the information age is growing daily, intellectual capital and innovation remain vital for firms. Intellectual capital is part of a company's intangible assets, which are knowledge-based resources (Nuryaman, 2015). Researchers have offered various definitions for intellectual capital; according to Stewart (1997: 82), it refers to the collective knowledge, information, and intellectual property within an organization that can be used to generate wealth. Petty and Guthrie (2000) describe it as an indicator capable of creating future earnings or financial capital for an organization. Andriessen (2004: 255) classifies intellectual capital into three categories: human capital, structural capital, and relational capital. Intellectual capital creates value through monetary or non-monetary, tangible or intangible resources that businesses need to identify, utilize, measure, evaluate, develop, and manage effectively (Gogan et al., 2014). Researchers (Ante, 1998; Edvinsson, 1997; Bontis, 2001) argue that traditional financial metrics alone are insufficient for analyzing the performance of knowledge-based firms. Compared to conventional financial measures, assessing intellectual capital includes non-financial aspects such as human capital, customer satisfaction, and innovation (Chen et al., 2004). Recognizing tangible and intangible assets as potential strategic assets makes measuring intellectual capital essential for businesses (Kamath, 2008: 684). The intellectual capital of a firm encompasses knowledge, experience, inventions, innovation, and market share that can influence the company (Nuryaman, 2015).

Firms need to capitalize on new opportunities, develop new products and services, and expand into new markets to achieve success and maintain a competitive edge. In developed countries, economic growth is driven more by innovation than by investment. The product life cycle is becoming shorter, and firms can stay ahead in highly competitive markets by continuously creating new products to meet customer demand (Chen et al., 2004). Innovation includes new products, technologies, markets, materials, and novel combinations. It involves developing and implementing new ideas, technologies, products, and processes (Rezende et al., 2017). According to Barney and Hesterly (2006:30), a firm gains a competitive advantage when it creates greater economic value than its competitors. Innovations are the main way an organization can achieve such differentiation (Rezende et al., 2017). The Oslo Guidelines (2005:16) divide innovation into four categories: product, process, marketing, and organizational innovation. Product innovation involves introducing new goods and services to the market, along with substantial improvements in the functionality or user features of existing offerings. Process innovation refers to changes in methods, equipment, or software—for example, adopting a new production technique. Marketing innovation focuses on increasing sales, better serving customer needs, exploring new markets, and positioning products differently. It can include new sales methods and financial strategies. Organizational innovation involves implementing new organizational practices within business operations, workplace structures, or external relationships (Kalkan et al., 2014). Product innovation helps businesses reduce costs and boost revenue by offering a variety of products (Chen et al., 2004).

Firm performance can be assessed across various categories such as financial, product, and market performance (Chen et al., 2004). Financial, market, and product performance are different ways to measure a firm's success (Kalkan et al., 2014). For commercial companies, growth indicators like sales growth and profit metrics such as return on assets or return on sales can be used for performance evaluation. Growth measures show how effectively the company is expanding into new markets or strengthening its position in existing ones. In contrast, profit measures provide insights into operational efficiency and profitability.

Companies can boost their productivity and financial performance through components of intellectual capital. Organizations with highly skilled and dedicated employees can enhance productivity and efficiency, which leads to greater profitability (Nuryaman, 2015). Strong financial results can attract investment, drive up stock prices, and increase overall company value (Nuryaman, 2015). Numerous studies have shown a connection between components of intellectual capital and company performance across various sectors, such as banking, agriculture, tourism, health, manufacturing, the automobile industry, public companies, higher education, insurance, and social cooperatives (Olaewaju and Msomi, 2021). However, there remains a significant gap in research concerning pharmaceutical warehouses, with few studies specifically focusing on this area.

Since firms operate in a highly competitive environment, they are incredibly responsive to their rivals' new product developments. As a result, they react quickly to innovative outcomes from competitors. The swift introduction of new products into the market encourages the spread of similar or alternative offerings, increasing competition in an already saturated market. This shorter product lifespan reduces the profitability of innovative outputs. Additionally, the profit margin of new products tends to stabilize due to diminishing returns from conventional technology and the rapid shifts in customer preferences. (Huang, 2023). As competition drives innovation and variety, it influences firm performance.

Extant literature has thoroughly investigated the link between intellectual capital and innovation (Huang and Huang, 2020; Ozgun et al., 2022; Olarewaju and Msomi, 2021). Additionally, previous research has demonstrated a strong link between intellectual capital and firm performance (McDowell et al., 2018). The purpose of this study is to analyze how intellectual capital and its sub-dimensions, as well as innovation and its sub-components, affect firm performance.

In the report of the Global Innovation Index (GII, 2022), which evaluated 132 countries, Türkiye ranked 37th (TÜRKPATENT, 2022). This index measures the innovation capabilities of global economies. In the 2024 GI report, Türkiye is among the top three economies in the Northern Africa and Western Asia region. The pharmaceutical industry is one sector that conducts extensive research and development activities. Total global spending on pharmaceutical R&D was \$244 billion in 2022 and \$262 billion in 2023. For comparison, R&D expenditures totaled \$145 billion in 2014 (Statista, 2025). In 2023, the pharmaceutical sector led in R&D intensity at 19 percent (www.wipo.int/global-innovation-index). Compared to other industries, pharmaceutical companies are more driven by innovative products.

Innovation in the pharmaceutical industry significantly affects the health of millions and the profits of the companies involved. As of December 2022, there are 855 active organizations in the Turkish pharmaceutical sector. The market for pharmaceutical and medical health products has reached 121.6 billion TL (IEIS, 2022). Profits from successful innovation provide companies with a competitive edge. This industry needs to prioritize customer satisfaction and revenue growth. Therefore, the sector must invest a larger share of its revenues in innovation. Pharmaceutical warehouses operate in a field that combines technology and human elements, serving as intermediaries between pharmacies and pharmaceutical suppliers. They act as connectors between pharmacies and medical suppliers concerning access to medicines. Meeting the needs, demands, and expectations of customers with the widest possible range of products will help the company establish leadership in the sector. Utilizing the latest technological advancements, developing new products and processes, and improving distribution methods are highly significant for the company. Since pharmaceutical warehouses act as intermediaries, innovative activities in this sector are crucial for gaining a competitive advantage and maintaining financial stability. As a result, this sector provides an ideal environment for examining the impact of intellectual capital and innovation on performance.

Intellectual capital components positively impact a company's productivity and financial results. Firms are consistently motivated to develop new products to remain competitive (Huang, 2023: 3). Simultaneously, they strive to build intellectual capital that offers sustainable competitive advantages and forms the foundation of their innovation strategies (McDowell et al., 2018). Numerous studies have explored how the components of intellectual capital influence a company's innovation capabilities, revealing that each component has a significant, positive relationship with innovation (Subramaniam and Youndt, 2005; Roxas et al., 2017; Kalkan et al., 2014; Amin and Aslam, 2017; McDowell et al., 2018; Huang and Huang, 2020).

As noted earlier, the pharmaceutical sector highly values innovation. Turkey is among the countries that have seen the most growth in the GI over the past decade. This highlights the importance of considering innovation in firm performance, especially in innovative sectors. To do this, the model includes intellectual capital and innovation activities, which are key drivers of firm success. The data will provide industry leaders with a solid basis to improve firm performance by focusing on implementing intellectual capital. Although existing research examines the impact of intellectual capital on firm performance, there is a lack of empirical studies specifically exploring this effect within a model of innovation and intellectual capital in the pharmaceutical industry. This research is conducted in pharmaceutical warehouses engaged in R&D activities in Mersin. Due to differences in innovative products, organizations, and processes, the relationships between intellectual capital and firm performance may vary from those in other sectors. Pharmaceutical warehouses in the industry are responsible for nationwide distribution of medicines, procurement of products, and sometimes, production of these products. They are not just participants; they are innovators. Their ability to respond quickly to changing consumer preferences enables them to offer specialized products and services that larger firms often cannot match. For this reason, pharmaceutical warehouses are located in many regions across the country. Serving both as suppliers and as players in developing new products and processes, pharmaceutical warehouses hold a crucial role in the healthcare sector. The literature review shows that this sector has remained relatively underexplored in the academic field in Turkey; therefore, it presents a significant gap for further research. On the other hand, from an economic perspective, the widespread presence of pharmaceutical warehouses across the country contributes significantly to the sector by creating employment and boosting local economies. Its goal is to make a meaningful contribution by exploring this area. First, it incorporates a research model that includes intellectual capital (covering human capital (HC), structural capital (SC), and relational capital (RC)), innovation (covering organizational innovation (OI), product innovation (PI), process innovation (Prcl), and marketing innovation (MI)), and firm performance to empirically test three proposed hypotheses. Second,

it investigates which sub-variables of intellectual capital and innovation influence firm performance. Finally, it offers recommendations based on the study results.

This paper is organized as follows. The next section reviews the theoretical background of the research, examines relevant literature, and presents the research hypotheses. Section 3 describes the research methodology, followed by the analysis and results in Section 4. Section 5 interprets the research findings, discusses their implications and concludes the study, including its limitations and suggestions for future research.

2. LITERATURE REVIEW and HYPOTHESES DEVELOPMENT

This section endeavors to outline the theoretical framework and advance the hypotheses underpinning this study. For this purpose, the key variables of the study are discussed in the extant literature. This section concludes with a presentation of the conceptual framework underpinning the research model.

The firm comprises tangible resources, such as land, labor, and capital, as well as intangible resources, including capabilities and knowledge (Ozgun et al., 2022). The modern business landscape is filled with uncertainty and change. As a result, firms must compete in the marketplace, innovate with new products, and adopt cutting-edge technological solutions. The structure of intellectual capital heavily depends on knowledge, creativity, competence, and valuable skills (Truong and Nguyen, 2024). It includes various intangible resources that are crucial to a firm's overall value and competitiveness (Yang et al., 2024). Intellectual capital can be divided into three main components: human capital, structural capital, and relational capital. Human capital refers to intangible assets like intellectual ability, creativity, and innovation that employees possess. It is essential for driving innovation, as having knowledgeable, skilled, and experienced staff enables companies to adapt more easily and enhances their ability to innovate (Beltramino et al., 2021). The more human capital a firm has, the greater its capacity to exchange and combine knowledge. Additionally, Marimuthu et al. (2009) suggest that human capital increases profitability and is a valuable asset for fostering future creativity. Structural capital involves a firm's ability to access markets, hardware, software, and other supporting elements. It encompasses organizational innovations in creating new products and services, as well as technological innovations related to engineering, systems, processes, and equipment owned by the company. Stiles and Kulvisaechna (2004) observed that structural capital links a firm's resources into processes that generate value for customers and provide sustainable competitive advantages. Gigade and Bhide (2025) investigated the impact of intellectual capital and green innovation on the firm performance of micro, small, and medium enterprises in India. Structural equation modeling (SEM) is used to test the hypotheses. The study found a positive relationship between intellectual capital, green innovation, and firm performance. Mennes et al. (2018), focusing on industrial SMEs in the Netherlands, note that structural capital promotes employee collaboration in decision-making and interaction with various knowledge structures, thereby boosting their innovative capacity. Relational capital pertains to the ability to develop positive relationships with internal and external stakeholders, such as customers, consumers, suppliers, creditors, and government agencies (Nuryaman, 2015). Well-developed relational capital facilitates knowledge sharing through trust and mutual understanding, which in turn stimulates idea generation and innovation (Beltramino et al., 2021). Zerenler et al. (2008) identified a positive relationship between relational capital and innovation in the Turkish automotive supplier industry. This study considers all three components to evaluate their impact on firm performance. Empirical research in existing literature explores the link between intellectual capital and firm performance. For example, Sumedrea (2013) analyzed the structure of intellectual capital and its influence on the economic performance of 62 non-financial companies listed on the Bucharest Stock Exchange. The results showed that during Romania's crisis, firm development was affected by structural and human capital, and a link between profitability and intellectual capital was observed. Olarewaju and Msomi (2021) found that human and structural capital significantly impacted the financial performance of 56 insurance companies from 2008 to 2019. Kalkan et al. (2014) studied the relationship among intellectual capital, innovation, organizational strategy, and firm performance, concluding that these elements positively influence a firm's success. Likewise, Subramaniam and Youndt (2005), Atalay et al. (2013), Roxas et al. (2017), and McDowell et al. (2018) also confirmed a positive connection between intellectual capital and firm performance. Building on these results, the study proposes the following hypothesis:

H1: Intellectual capital is positively related to firm performance.

The relationship between intellectual capital and innovation is a growing area of interest within the field of innovation development. Chen et al. (2004) suggest that companies with higher levels of intellectual capital tend to perform better in terms of innovation. Innovation involves introducing something new or newly developed (Yang et al., 2024). Intellectual capital is recognized as an internal competitive advantage that fosters innovation and is essential for growth (Arshad et al., 2023). The components of intellectual capital support activities necessary for generating innovation and maintaining competitive advantage, primarily

through human capital (Örnek and Ayas, 2015). The internal qualities of a firm serve as inputs to the innovation process. Encouraging employee ideas and promoting innovative behaviors positively impact a firm's performance. Previous studies highlight that innovation capabilities and intellectual capital significantly affect performance. Intangible skills and organizational resources are vital assets influencing a company's strategy and long-term success (Arshad et al., 2023). Nasiri et al. (2022) note that innovative firms tend to outperform their competitors. Atalay (2012) examined how intellectual capital influences innovation and, consequently, firm performance in the automotive supply industry using hierarchical regression analysis. The study found that increasing the sub-dimensions of intellectual capital led to greater product and organizational innovation. It was also observed that product and process innovations play a crucial role in enhancing firm performance by boosting the country's competitive power. Process innovations improve performance by reducing costs or increasing the quality of goods and services, although they are less tangible and less visible to customers than product innovations. Sustaining these improvements over time leads to increased competitiveness and higher performance (Beltramino et al., 2021). Product innovation is a key factor allowing firms to expand into new markets and industries, identify opportunities for abnormal profits, and generate revenue (Rajapathirana and Hui, 2018). In contrast, marketing innovation better addresses customer needs, penetrates new markets, or repositions a firm's product to increase sales, thereby securing a long-term competitive advantage and supporting growth. Organizational innovation can improve performance by reducing administrative and transactional costs, rather than enhancing workplace satisfaction. According to Abdelillah and Samuelides (2001), organizational innovation helps firms adapt and exploit evolving conditions to achieve rapid market growth, which positively impacts financial performance. In their study, McDowell et al. (2018) examined the role of innovation in linking intellectual capital and firm performance, especially among small and medium-sized enterprises (SMEs). Their survey of 460 SMEs in the USA suggested that human and organizational capital positively influence firm performance. It also indicated that innovation partially mediates the relationship between intellectual capital and performance. Huang and Huang (2020) found that market knowledge, relationship, and innovation capabilities have a positive effect on intellectual capital, utilizing SEM.

The components of intellectual capital not only influence each other internally but also promote innovation. Therefore, it is observed that performance, as the ultimate goal, improves positively. An enterprise's success in its field depends on its ability to effectively utilize its intellectual capital and develop innovative behaviors (Örnek and Ayas, 2015).

Similarly, studies exploring the relationship between intellectual capital and innovation show mixed results. Research by Atalay et al. (2013) in Turkey examined 113 senior managers from companies in the automotive industry to explore the link between firm performance and innovation. The study's results revealed that both product and process innovation significantly influenced firm performance. However, organizational and market innovation did not impact performance. Arshad et al. (2023) studied the relationship between innovation capability, intellectual capital, and firm performance in SMEs within the textile sector in Pakistan, using structural equation modeling. The findings suggest that innovation capabilities and intellectual capital influence the performance of SMEs. Alshuaibi et al. (2023) researched 318 SMEs in Pakistan, examining the connection between innovation, intellectual capital, and firm performance. The analysis showed that innovation capability and intellectual capital are key factors for sustainable growth and performance. Wang et al. (2018) assessed how intellectual capital affects firm performance, considering the mediating roles of both innovation speed and quality. The model was tested using structural equation modeling on data from 328 high-technology firms in China. The results indicate a positive relationship between the three components of intellectual capital and both innovation speed and quality. Cahyaningati et al. (2024), examined the correlation between intellectual capital, innovation, and corporate performance in micro, small, and medium enterprises in Indonesia. The results showed that innovation has a significant impact on business success and that intellectual capital has a considerable effect on both. Additionally, innovation mediates the relationship between intellectual capital and business performance. Beltramino et al. (2021), using SEM on 259 Argentine industrial SMEs, found that all three components of intellectual capital positively influence process and product innovation, with structural capital having the most substantial impact. Kalkan et al. (2014), Shin et al. (2016), and McDowell et al. (2018) also explored the link between intellectual capital and innovation. Therefore, the following hypotheses are proposed:

H2: Innovation is positively related to firm performance.

H3: Intellectual capital is related to innovation.

3. METHODOLOGY

This study aims to examine the impact of intellectual capital and innovation on a firm's performance. To achieve this, a questionnaire was distributed to pharmaceutical warehouses in Mersin Province in October

2023, using 400 sets of questionnaires. A convenience sampling method was employed for this purpose. There are 8 pharmaceutical warehouses in the Mersin city center. Out of these, five firms were randomly selected as the research sample. The researcher reached 350 employees and collected 314 questionnaires, with 36 excluded due to a high number of missing values. A total of 314 employees from the five firms participated, either online or face-to-face, with roughly 90% of the surveys conducted face-to-face. The omitted questionnaires were completed online. To address participants' questions about the questionnaire, face-to-face surveys were considered appropriate. This approach aimed to reduce missing data. Respondents were selected from different levels within the firms. The collected data were analyzed using structural equation modeling (SEM), utilizing SPSS and AMOS software. Sample size plays a critical role in SEM because it greatly influences the validity and reliability of the results. One standard guideline states that the minimum sample size should be between 100 and 150 for the model's fit indices to be valid (Acaravcı et al., 2018). In this study, the sample includes 314 employees, indicating the sample size is adequate. Additionally, according to Sekaran (2003), a response rate of about 30% is considered sufficient for gathering meaningful data, and four out of five respondents participated. Selecting pharmaceutical warehouses involved in research and development (R&D) activities is essential for investigating innovation.

In measuring the factors and variables identified in the analysis, scales previously established in the literature review, with reliability and validity confirmed by earlier studies, were used. To determine the participants' levels of intellectual capital, the scale developed by Kianto et al. (2010), which was also used by Atalay (2012), was employed. The scale created by Lin et al. (2010) and adopted by Atalay (2012) was utilized to assess the participants' innovation capabilities. Lastly, the performance scale developed by Alpay et al. (2008) was used to evaluate the firm's performance. The questionnaire consisted of four sections. The first section included seven questions to assess the firm's overall performance, using a 1 to 5 rating scale, where 1 indicates the lowest performance and 5 indicates the highest. The second section contained 21 questions aimed at measuring the participants' level of intellectual capital, also on a 5-point Likert scale. Similarly, the third section included 21 questions to evaluate the participants' innovation capabilities, along with a section for collecting socio-demographic information.

4. ANALYSIS and RESULTS

4.1. Research Model

This study's research model was developed through an examination of existing literature (Yorulmaz and Alkan, 2018; Sandalcı, 2020; Ada and Yardımcıoğlu, 2021; Özbaysal and Alkibay, 2023; Ampofo and Aidoo, 2022). The SEM models and hypotheses are shown in Figure 1.

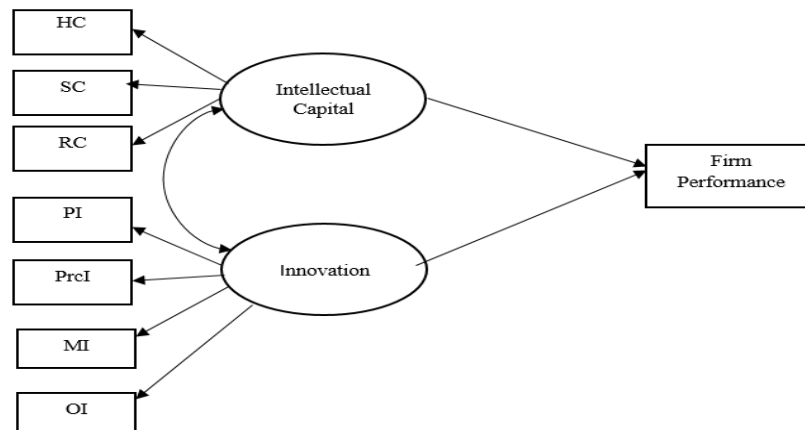


Figure 1. Research model

Cronbach's Alpha (α) coefficients were calculated for the scales and sub-dimensions used in the questionnaire, and it was observed that the reliability of the coefficients was within the acceptable range. The Cronbach's Alpha value for the firm performance scale is 0.93, the intellectual capital scale is 0.946, and the innovation scale is 0.957.

4.2. Results

Table 1 represents the descriptive statistics. The results indicate that 61.8% of the survey participants are male, while 38.2% are female. Additionally, 64.6% fall within the 25-34 age range and 70.4% of the participants graduated from high school. When examining the positions held by the participants within the firms, it can be observed that 91.4% are employees. Furthermore, 38,2% of the firms have been operating

in the sector for 25 years or more. It was also found that 82.8% of the firms have a workforce of 250 employees or more.

Table 1. Descriptive statistics

<i>Variables</i>	<i>Sub-groups</i>	<i>n</i>	<i>(%)</i>
Gender	Female	120	38.2
	Male	194	61.8
Age	18-24 Years	10	3.2
	25-34 Years	203	64.6
	35-44 Years	91	29
	45-54 Years	8	2.5
	>55	2	0.6
Education	Middle School	4	1.3
	High School	221	70.4
	Associate's Degree	49	15.6
	Bachelor's Degree	40	12.7
Positioning	Employee	287	91.4
	Employer/Manager	27	8.6
	1-5 Years	13	4.1
	6-10 Years	28	8.9
Firm Age	11-15 Years	56	17.8
	16-20 Years	41	13.1
	21-24 Years	56	17.8
	>25	120	38.2
Numbers of employees in the firm	10-49 employees	22	7
	50-249 employees	32	10.2
	250+	260	82.8
Total		314	100

The mean value of the innovation scale (3.35) exceeds the average. When examining the innovation types of the scale, it is evident that the lowest rating is in the sub-dimension of process innovation (3.28), while the highest rating is in the sub-dimension of organizational innovation (3.36). The mean of the intellectual capital scale (3.22) is also above average. Upon examining the intellectual capital types of the scale, it is observed that both the relational capital and human capital sub-dimensions (3.22) are higher than the structural capital sub-dimensions (3.2). It can be concluded that the average of the performance scale (3.2) is also above average. The outcomes of this estimation are detailed in Table 2. After that, the data were checked for normality. The normal distribution of the data depends on the skewness and kurtosis values being between ± 3 (Shao, 2002). In this study, since the skewness and kurtosis values meet the expected values for normal distribution, it is stated that the scales used show normal distribution.

Table 2. Descriptive statistics for the research scales and sub-dimensions

<i>Scale and Sub-dimensions</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Deviation</i>
Innovation	3.35	0.728
Organizational Innovation (OI)	3.36	0.764
Product Innovation (PI)	3.4	0.794
Process Innovation (Prcl)	3.28	0.801
Marketing Innovation (MI)	3.36	0.863
Intellectual capital	3.22	0.761
Relation Capital (RC)	3.22	0.771
Human Capital (HC)	3.22	0.89
Structural Capital (SC)	3.2	0.798
Firm Performance	3.2	0.97

After that, the data were checked for reliability and validity. Table 3 presents the findings of the (α) coefficient for the scales used in the research. The reliability results for the (α) coefficients indicated that both the scales and sub-dimensions are within the acceptable range. The convergent validity of the scales was confirmed as all factor loadings exceeded 0.5, and the t-values were significant. The average variance extracted (AVE) values were above 0.5 (Fornell and Larcker, 1981; Hair et al., 2014). Table 3 shows that the AVE for each component exceeds 0.5, fulfilling the convergent validity criteria.

Table 3. Cronbach's alpha coefficient findings for the scales used in the research

Scale	Number of Items	Cronbach's Alpha	AVE
Firm Performance	7	0.728	0.733
Intellectual Capital	18	0.764	0.881
RC	7	0.794	0.674
HC	7	0.801	0.662
SC	4	0.863	0.540
Innovation	21	0.761	0.890
OI	5	0.771	0.797
PI	5	0.89	0.661
Prcl	6	0.798	0.584
MI	5	0.97	0.874

Table 4 presents the correlation coefficients among the research variables. The results indicate that all correlations are positive and statistically significant. In terms of the study's dependent variable, the highest correlation coefficient was found with the structural capital variable, and the lowest correlation coefficient was found with the human capital variable.

Table 4. Correlation coefficients between research variables

	1	2	3	4	5	6	7	8
1. Performance	1							
2. RC	0.772**	1						
3. HC	0.603**	0.836**	1					
4. SC	0.852**	0.797**	0.638**	1				
5. OI	0.694**	0.666**	0.737**	0.770**	1			
6. PI	0.606**	0.587**	0.601**	0.597**	0.617**	1		
7. Prcl	0.707**	0.644**	0.688**	0.628**	0.771**	0.802**	1	
8. MI	0.674**	0.733**	0.716**	0.615**	0.671**	0.830**	0.805**	1

Data were analysed using the AMOS programme. The model fit for different parameters is presented in Table 5. According to Kline (2015: 90), a χ^2/df value below 3 is acceptable. A GFI index greater than 0.8 (Doll et al., 1994) and a CFI index greater than 0.9 (Bentler, 1990) are also considered acceptable. The RMSEA index below 0.08 (Yuhan and Bentler, 2007; Ali et al., 2021) is within acceptable limits. All goodness of fit indices ($\chi^2/df= 2.966$, GFI=0.965, CFI=0.943 and RMSEA=0.079) were within acceptable limits.

Table 5. Goodness of fit coefficients for the model

Indices	Model fit value
χ^2/df	2,966
GFI	0,965
CFI	0,943
RMSEA	0,079

The outcomes of the effects of intellectual capital sub-dimensions and innovation sub-dimensions on the scale, as per the SEM, are also presented in Table 6.

Table 6. Standardized coefficients for pathways in the final structural equation model

	Unstandardized Estimate	Standardized Estimate	Standart Error	Critical Value	P
Intellectual Capital					
HC	1	0.885			
RC	1.338	0.993	0.100	13.361	*
SC	0.637	0.778	0.066	9.665	*
Innovation					
PI	1	0.880			
Prcl	1.064	0.996	0.078	13.59	
MI	1.019	0.906	0.071	14.29	
OI	1.105	0.961	0.091	12.104	
Performance					
Innovation	0.237	0.160	0.114	2.073	0.038
IC	1.267	0.706	0.157	8.086	*

Note: *, $p < 0.05$ is considered statistically significant

The findings indicate that all effect coefficients were statistically significant. Based on the standard effect coefficients, the relational capital dimension had the highest effect, while the structural capital dimension had the lowest effect. When analyzing the effects of innovation scale dimensions on the scale, all effect coefficients were found to be statistically significant. The standard effect coefficients indicate that the process innovation dimension had the highest effect, while the product innovation dimension had the lowest effect.

The structural equation model depicted in Figure 2 revealed that all effect coefficients were statistically significant, as indicated by the findings. In addition, the correlation value between the innovation scale and intellectual capital scale was calculated as 0.833 ($p < 0.05$). Based on the standard effect coefficients, the effect of innovation on performance was 0.160, while the effect of intellectual capital on performance was 0.706 ($p < 0.05$). These results indicate that a 1 unit increase in innovation perception correlates with a 0.160 unit increase in firm performance and a 1 unit increase in intellectual capital perception correlates with a 0.706 unit increase in firm performance. Another finding of the structural equation model is the multiple coefficient of determination (R-squared), as in multiple regression. The coefficient of multiple determination for the model was calculated as 0.711. Accordingly, 71.1% of the variability in firm performance is explained by innovation and intellectual capital variables. Based on the results obtained, H₁, which examines the relationship between IC and firm performance, is accepted, with the model results indicating a correlation coefficient (r) of 0.706. H₂ tests the impact of innovation on firm performance and the model results ($r = 0.160$) show that the hypothesis is accepted. Finally, H₃, which investigates the relationship between IC and innovation, is accepted, with the model results displaying a correlation coefficient of 0.833. It can be stated that, according to the hypotheses, intellectual capital and innovation are directly linked to a firm's performance.

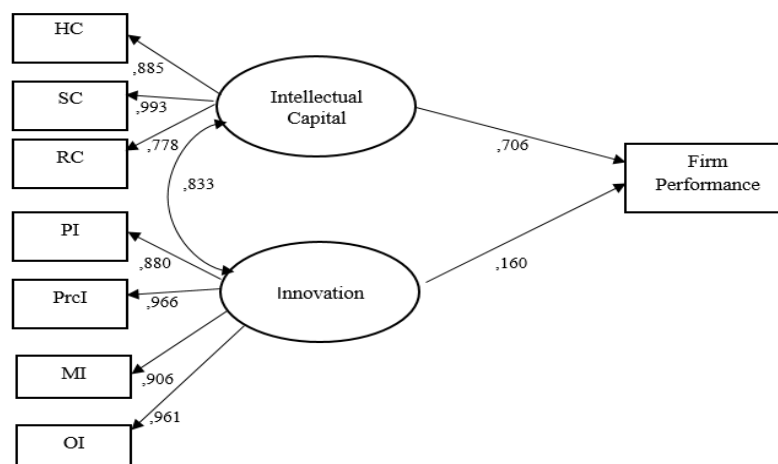


Figure 2. Final structural model

5. CONCLUSION

This study investigates how intellectual capital and innovation influence firm performance. Intellectual capital is evaluated through its human, structural, and relational components, while innovation is measured by its product, process, marketing, and organizational innovation aspects. To achieve this, a questionnaire was distributed to pharmaceutical warehouses involved in R&D activities within Mersin province, yielding data from 314 responses.

The results from SEM analysis show that the relational capital dimension has the greatest impact on market size among the sub-dimensions of intellectual capital. Relational capital is based on the relationships between the company and parties such as customers, consumers, suppliers, and creditors. In other words, relational capital is an intangible asset rooted in a company's ability to build, maintain, and foster positive relationships with anyone or anything that can influence its bottom line (Kamukama and Sulait, 2017). Since pharmaceutical warehouses are also companies that facilitate distribution between pharmacies and pharmaceutical suppliers, the research produced results that support this finding. For pharmaceutical warehouses across the country, quick procurement of products is essential. The results obtained align with the sector's characteristics. This significant impact has a positive influence on company performance, leading to competitive advantages that are vital for managing intellectual assets and ensuring long-term success. Notably, this finding highlights that efforts by pharmaceutical warehouses to strengthen relationships with stakeholders are closely linked to their competitive advantage (Kamukama and Sulait,

2017). Long-term relationships between the company and stakeholders strengthen networks and create channels through which a company can gain a competitive edge over others in the industry (Zahra et al., 1999; Kennerley and Neely, 2000; Kamukama and Sulait, 2017). Evidence indicates that intellectual capital and its sub-dimension, relational capital, positively interact with members of the business community, motivating to generate wealth by enhancing human and structural capitals (Ataei et al., 2024). Relational capital influences service roles and affects the causal relationships among people, customer satisfaction, loyalty, and financial performance (Naderi and Rostami, 2016). The relational capital component, which plays a critical role in the successful continuation of pharmaceutical warehouses' activities, will influence all stakeholders with whom warehouses maintain close relationships, including company managers, pharmaceutical manufacturers, and pharmacies. While these firms export domestic products worldwide, they also provide pharmaceutical support to domestic institutions. Therefore, the revenue generated from the exports of pharmaceutical warehouses will benefit the economy. At this point, both the Ministry of Health and company owners should undertake and implement the necessary planning.

Among the innovation sub-dimensions, the process innovation dimension showed the most substantial impact on the scale. Process innovation encompasses changes made to production or distribution processes, with the results supporting the conclusion that pharmaceutical warehouses can adopt newer, less costly methods of distribution or implement new software and equipment solutions. An example of process innovation is a new type of production method (Kalkan et al., 2014). Although product innovation should significantly support process innovation, it was found to have the lowest impact in this study. Conversely, Roger (1999) stated that the pharmaceutical industry's focus on product innovation affected firm performance. Similarly, Atalay et al. (2013) found a positive relationship between product and process innovation and firm performance. Furthermore, process innovation enhances profitability and efficiency, indicating that being a first mover in both product and process innovations significantly influences profitability. Therefore, implementing both product and process innovation can make firms more flexible in their operations, improve product quality, expand networks, and enhance competitiveness in terms of quality, people, and technology (Rajapathirana and Hui, 2018). For the pharmaceutical sector to grow quickly and adapt to digital innovations, it needs creative and imaginative employees who can develop engaging products and digital promotional content that attract customers. As a result, this can lead to higher sales and improve overall performance firms. On the other hand, innovative software and equipment solutions play a critical role in process innovation, The Ministry of Health of Türkiye should prioritize the development of digital health infrastructure and encourage the adoption of Industry 4.0 technologies across pharmaceutical supply chains.

Developments in information technology, increasing competition, and changes in traditional business concepts have led to the emergence of new approaches and innovative changes that are necessary in our era, in addition to conventional financial measurements. The literature review revealed a consensus indicating that both intellectual capital and innovation have a positive contribution to firm performance. (Chen et al, 2005; Wang and Chang, 2005; Kalkan et al, 2014; Gunday et al, 2011). Empirical findings from this research confirm the existence of a positive relationship between intellectual capital, innovation, and firm performance. The results indicate that higher levels of innovation processes and intellectual capital are associated with improved firm performance. Innovation not only contributes to the firm's sales growth, profitability, and productivity but also enhances intangible assets like intellectual capital. As a result, innovation and intellectual capital positively influence firm performance. Meanwhile, to maximize the benefits of innovation, human capital development should be a key policy priority. Providing continuous training programs for warehouse managers and employees in innovation management, logistics optimization, and digital tools will enhance operational flexibility.

This study has two critical theoretical contributions to the literature. First, to identify which intellectual capital subdimensions most significantly affect the firm's performance. Second, to determine which innovation subdimensions make the firm more likely to develop in innovation. Third, do pharmaceutical firms with higher innovation rates and higher levels of intellectual capital perform better?

Several recommendations concerning innovation and intellectual capital in the pharmaceutical industry are possible. As noted earlier, innovation and intellectual capital positively influence firm performance. The pharmaceutical industry, a crucial sector of global health, focuses on discovering, developing, producing, and marketing drugs aimed at preventing, treating, and curing various diseases. It must improve the effectiveness of innovative activities to remain competitive and profitable. Pharmaceutical companies rely on warehouses to help bring medicines to market. Therefore, warehouses should aid in understanding which subdimensions of innovation affect firm performance. Consequently, warehouse managers need to establish processes and encourage idea development toward practical innovation solutions. Innovation is seen as a factor capable of producing multiple benefits for organizations to gain a competitive advantage (Rajapathirana and Hui, 2018). Market trends are always vital for enterprises to guide their innovation

efforts. Additionally, intellectual capital is the key driving force for absorbing knowledge and achieving sustainable development. Warehouses should focus on investing in intellectual capital through ongoing training and development programs. These programs can enhance employees' skills, creativity, and innovation, and foster a culture of continuous improvement and learning. It works alongside innovation to develop business plans, choose suitable application technologies, and enhance product and service quality. This will help pharmaceutical warehouse firms become more profitable and secure a competitive edge. Furthermore, establishing networks with pharmaceutical companies, hospitals, and pharmacies can facilitate knowledge sharing and resource pooling, leading to collaborative projects that foster innovation across the industry.

However, this study has some limitations. Primarily, the population consists of employees working in pharmaceutical warehouses in Mersin. To improve understanding, future research could compare results by conducting studies in other sectors involved in research and development activities. Additionally, it was suggested that the explanatory power of the model could be improved by including more variables between the innovation and intellectual capital factors.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest was declared by the author.

Funding

This study received no funding from any governmental, commercial or non-profit organisation.

Compliance with Ethical Standards

The study received approval from the Scientific Research and Publication Ethics Committee of the School of Graduate Studies at Tarsus University (2023/49).

Ethical Statement

It was declared by the author that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.

REFERENCES

- Abdelillah, H. and Samuelides, E. (2001). "Innovation's Dynamics in Mobile Phone Services in France", *European Journal of Innovation Management*, 4(3), 153-163. <https://doi.org/10.1108/EJM0000000005670>
- Acaravcı, K.S., Ural, T. and Karaömer, Y. (2018). "Hisse Senedi Getirisi ve Sermaye Yapısı İlişkisine Etki Eden Faktörlerin Yapısal Eşitlik Modellemesi ile Analizi", *İşletme ve İktisat Çalışmaları Dergisi*, 6(4), 26-38. <https://doi.org/10.32479/iicd.152>
- Ada, Ş. and Yardımcıoğlu, M. (2021). "Bağımsız Denetim Kalitesi Üzerinde Etkili Olan Faktörler Üzerine Bir Yapısal Eşitlik Modellemesi", *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 13(4), 3467-3485. <https://doi.org/10.20491/isarder.2021.1335>
- Ali, M.A.- Hussin, N., Haddad, H., Al-Araj, R. and Abed, I. A. (2021). "A Multidimensional View of Intellectual Capital: The Impact on Innovation Performance", *Journal of Open Innovation: Technology, Market and Complexity*, 7, 216, 1-25. <https://doi.org/10.3390/joitmc7040216>
- Alpay, G., Bodur, M., Yılmaz, C., Çetinkaya, S. and Arıkan, L. (2008). "Performance Implications Of Institutionalization Process in Family-Owned Businesses: Evidence From An Emerging Economy", *Journal Of World Business*, 43, 435-448. [doi:10.1016/j.jwb.2008.03.006](https://doi.org/10.1016/j.jwb.2008.03.006)
- Alshuaibi, M.Z., Arshad, D.L., Hendrik, A., Ahmad S.A., Mohammad, S.I.A., Gadah, S., Awais, C. and Lai, F. (2023). "Strategic Resources Alignment For Sustainability: The Impact of Innovation Capability and Intellectual Capital on SME's Performance. Moderating Role of External Environment", *Journal of Cleaner Production*, 417, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137884>
- Amin, S. and Aslam, S. (2017). "Intellectual Capital, Innovation and Firm Performance of Pharmaceuticals: A Study of the London Stock Exchange", *Journal of Information & Knowledge Management*, 16(2), 1-20. <https://doi.org/10.1142/S0219649217500174>
- Ampofo, R.T. and Aidoo, E.N. (2022) "Structural Equation Modelling of COVID-19 Knowledge and Attitude As Determinants of Preventive Practices Among University Students in Ghana", *Scientific African*, 16, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01182>
- Andriessen, D. (2004). "Making Sense of Intellectual Capital: Designing A Method for the Valuation of Intangibles", Elsevier Butterworth-Heinemann, UK.
- Ante, P. (1998), "Measuring the Performance of Intellectual Potential in the Knowledge Economy", www.measuring-ip.at, (Erişim Tarihi: 13.04.2025)
- Arshad, M.Z., Arshad, D.L., Hendrik, A., Ahmad, A.S., Alshuaibi, M.S.I., Albashar, G.S., Awais, C. and Lai, F. (2023), "Strategic Resources Alignment for Sustainability: The Impact of Innovation Capability and Intellectual Capital on SME's Performance. Moderating Role of External Environment", *Journal of Cleaner Production*, 417, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137884>
- Ataei, P.K. and Hamid, Z.R. (2024), "The Role of Entrepreneurial Leadership, Intellectual Capital, Innovativeness Culture, and Entrepreneurial Orientation in Entrepreneurial Opportunity Recognition by Students", *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 10, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100265>
- Atalay, M. (2012), "Entelektüel Sermaye, Yenilik ve İşletme Performansı İlişkisi: Otomotiv Yan Sanayi Sektöründe Bir Araştırma", Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Antalya.
- Atalay, M., Anafarta, N. and Sarvan, F. (2013), "The Relationship Between Innovation and Firm Performance: An Empirical Evidence From Turkish Automotive Supplier Industry", *Social and Behavioral Sciences*, 75, 226-235. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.04.026>
- Barney, J.B. and Hesterly, W.S. (2006), "Strategic Management and Competitive Advantage", Pearson/Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J, UK
- Beltramino, N.S., Garcia, P.L., Domingo, V.J. and Luis E. (2021), "The Role of Intellectual Capital on Process and Products Innovation: Empirical Study in SMEs in An Emerging Country", *Journal of Intellectual Capital*, 23(4), 741-764. <https://doi.org/10.1108/JIC-07-2020-0234>
- Bentler, P.M. (1990), "Comparative Fit Indexes in Structural Models", *Psychological Bulletin*, 107, 238-246. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.107.2.238>
- Bontis, N. (2001), "Assessing Knowledge Assets: A Review of the Models Used to Measure Intellectual Capital", *International Journal of Management Reviews*, 3(1), 41-60. <https://doi.org/10.1111/1468-2370.00053>
- Cahyaningati.R., Chandrarin, G., Harmono and Cahyaningsih, D.S. (2024), "Intellectual Capital and Company Performance with Innovation as Mediation Variables" 8th International Conference on Sustainability: Sustainable Economics, *KnE Social Sciences*, 233-250. <https://doi.org/10.18502/kss.v9i29.17253>
- Chen, J.Z., Zhaozui, X. and Hong, Y. (2004), "Measuring Intellectual Capital: A New Model and Empirical Study", *Journal of Intellectual Capital*, 5(1), 195-212.
- Chen, M.C., Cheng, S.J. and Hwang, Y. (2005), "An Empirical Investigation of the Relationship Between Intellectual Capital and Firms' Market Value and Financial Performance", *Journal of Intellectual Capital*, 6(2), 159-176. <https://doi.org/10.1108/14691930510592771>

- Doll, W.J., Xia, W. and Torkzadeh, G. (1994), "A Confirmatory Factor Analysis of the End-User Computing Satisfaction Instrument", *MIS Quarterly*, 18(4), 453-461. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5414.2003.02428.x>
- Edvinsson, L. (1997), "Developing Intellectual Capital at Skandia", *Long Range Planning*, 30(3), 266-373. [https://doi.org/10.1016/S0024-6301\(97\)90248-X](https://doi.org/10.1016/S0024-6301(97)90248-X)
- Fornell, C. and Larcker, D.F. (1981), "Structural Equation Models with Unobservable Variables and Measurement Error: Algebra and Statistics", *Journal of Marketing Research*, 18(3), 382-388. <https://doi.org/10.2307/3150980>
- Gigade, M. and Bhide, S. (2025), "Exploring the Nexus Between Intellectual Capital, Green Innovation, Sustainability and Financial Performance in Creative Industry MSMEs", *Journal of Enterprising Communities: People and Places in the Global Economy*, 19(3), 457-484. <https://doi.org/10.1108/JEC-07-2024-0134>
- Global Innovation Index (GII). (2024), https://www.wipo.int/web-publications/global-innovation-index-2024/assets/67729/2000%20Global%20Innovation%20Index%202024_WEB3lite.pdf, (Erişim Tarihi: 04.05.2025)
- Gogan, L.M., Rennung, F., Fistis, G. and Draghisi, A. (2014), "A Proposed Tool for Managing Intellectual Capital in Small and Medium Size Enterprises", *Procedia Technology*, 16, 728-736. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.022>
- Gunday, G., Ulusoy, G., Kilic, K. and Alkan, L. (2011), "Effects of Innovation Types on Firm Performance", *International Journal Of Production Economics*, 133(2), 662-676. <https://doi.org/10.1016/j.iipe.2011.05.014>
- Hair, J.F., Sarstedt, M.H., Lucas, K. and Volker, G. (2014), "Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM): An Emerging Tool in Business Research", *European Business Review*, 26(2), 106-121. <https://doi.org/10.1108/EBR-10-2013-0128>
- Huang, C.C. and Huang, S.M. (2020), "External and Internal Capabilities And Organizational Performance: Does Intellectual Capital Matter?", *Asia Pacific Management Review*, 25, 111-120. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2019.12.001>
- Huang, X. (2023), "The Roles of Competition on Innovation Efficiency and Firm Performance: Evidence from the Chinese Manufacturing Industry", *European Research on Management and Business Economics*, 29, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.iedeen.2022.100201>
- Kalkan, A., Bozkurt Çetinkaya, Ö. and Arman, M. (2014), "The Impacts of Intellectual Capital, Innovation and Organizational Strategy on Firm Performance", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 150, 700-707. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.09.025>
- Kamath, G.B. (2008), "Intellectual Capital and Corporate Performance in Indian Pharmaceutical Industry", *Journal of Intellectual Capital*, 9(4), 684-704. <https://doi.org/10.1108/14691930810913221>
- Kamukama, N. and Sulait, T. (2017), "Intellectual Capital and Competitive Advantage in Uganda's Microfinance Industry", *African Journal of Economic and Management Studies*, 8(4), 498-514. <https://doi.org/10.1108/AJEMS-02-2017-0021>
- Kennerley, M. and Neely, A. (2000), "A Framework of the Factors Affecting the Evolution of Performance Measurement Systems", *Institutional Journal of Operations*, 4(2), 67-81. <https://doi.org/10.1108/01443570210450293>
- Kianto A., Hurmelinna, L.P. and Ritala, P. (2010), "Intellectual Capital in Service and Product Oriented Companies", *Journal of Intellectual Capital*, 11(3), 305-325. <https://doi.org/10.1108/14691931011064563>
- Kline, R.B. (2015), "Principles and Practice of Structural Equation Modeling", Guilford Publications, USA
- Lin, R. J., Chen, R.H., Shun, C.N. and Kuan, K. (2010), "Customer Relationship Management and Innovation Capability: An Empirical Study", *Industrial Management & Data Systems*, 110 (1), 111-133. <https://doi.org/10.1108/02635571011008434>
- Marimuthu, M., Arokiasamy, L. and Ismail, M. (2009), "Human Capital Development and Its Impact on Firm Performance: Evidence from Developmental Economics". *The Journal of International Social Research*, 2(8), 265-272.
- Mcdowell, W.C., Peake, W.O., Coder, L.A.H. and Michael L. (2018), "Building Small Firm Performance through Intellectual Capital Development: Exploring Innovation As the Black Box", *Journal of Business Research*, 88, 321-327. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.01.025>
- Mennes, K., Van Gils, A., Odekerken, S.G. and Letterie, W. (2018). "Exploring Antecedents of Service Innovation Performance in Manufacturing SMEs", *International Small Business Journal: Researching Entrepreneurship*, 36(5), 500-520. <https://doi.org/10.1177/0266242617749687>
- Nasiri, M., Saulina, M., Rantala, T. and Ukko, J. (2022), "Sustainable Innovation Among Small Businesses: The Role Of Digital Orientation, The External Environment, and Company Characteristics", *Sustainable Development*, 30(4), 703-712. <https://doi.org/10.1002/sd.2267>
- Naderi, N. and Rostami, S. (2016), "The Impact of Intellectual Capital on Organizational Entrepreneurship (Case Study: Jihad-e-Agriculture Organization of Kermanshah City)", *Journal of Agricultural Extension Education Research*, 9 (3), 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100265>
- Nuryaman, N. (2015), "The Influence of Intellectual Capital on the Firm's Value with the Financial Performance as Intervening Variable", *Social and Behavioral Sciences*, 211, 292-298. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.037>

- Olarewaju, O.M. and Msomi, T.S. (2021), "Intellectual Capital and Financial Performance of South African Development Community's General Insurance Companies", *Heliyon*, 7, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06712>
- Oslo Guide. (2005), "Yenilik Verilerinin Toplanması ve Yorumlanması İçin İlkeler", Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü Avrupa Birliği İstatistik Ofisi, OECD ve Eurostat Ortak Yayımı. 3. Baskı, TÜBİTAK
- Ozgun, A.H., Tarim, M., Delen, D. and Zaim, S. (2022), "Social Capital and Organizational Performance: The Mediating Role of Innovation Activities and Intellectual Capital", *Healthcare Analytics*, 2, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.health.2022.100046>
- Örnek, A.Ş. and Ayas, S. (2015), "Entelektüel Sermaye ile Yenilikçi İş Davranışının İşletme Performansına Etkisi: Bilişim Sektörü Uygulaması", *İşletme Fakültesi Dergisi*, 16(2), 91-116. <https://doi.org/10.24889/ife.268166>
- Özbaysal, T. and Alkibay, S. (2023), "İnovasyonun İhracat Performansına Etkisinde Entelektüel Sermayenin Aracılık Rolü Üzerine Bir Araştırma", *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 15(4), 2922-2941. <https://doi.org/10.20491/isarder.2023.1757>
- Petty R. and Guthrie, J. (2000), "Intellectual Capital Literature Review: Measurement, Reporting and Management", *Journal of Intellectual Capital*, 1, 155-176. <https://doi.org/10.1108/14691930010348731>
- Pharmaceutical Manufacturers Association of Türkiye (IEIS). (2022). "Türkiye İlaç Sektörü Raporu (2022)", <https://www.ieis.org.tr/>, (Erişim Tarihi 11.12.2023)
- Rajapathirana, J.R.P. and Hui, Y. (2018), "Relationship between Innovation Capability, Innovation Type, and Firm Performance", *Journal of Innovation & Knowledge*, 3, 44-55. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2017.06.002>
- Rezende, J.F., Correia, A.A. and Gomez B.A. (2017). "The Intellectual Capital and the Creation of Value in Research Units Linked to the Brazilian Ministry of Science Technology and Innovation", *Innovation and Management Review*, 14, 199-215.
- Roger, P. W. (1999), "Product Innovation, Product-Market Competition and Persistent Profitability in the US Pharmaceutical Industry", *Strategic Management Journal*, 20, 655-670. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199907\)20:7<655::AID-SMJ44>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199907)20:7<655::AID-SMJ44>3.0.CO;2-P)
- Roxas, B., Ashill, N. and Chadee, D. (2017), "Effects of Entrepreneurial and Environmental Sustainability Orientations on Firm Performance: A Study of Small Businesses in the Philippines", *Journal of Small Business Management*, 1-16. <https://doi.org/10.1111/jsbm.12259>
- Sandalcı, U. (2020), "Vergiden Kaçınmayı Etkileyen Faktörlerin Yapısal Eşitlik Modeli ile Analizi", *Alanya Akademik Bakış Dergisi*, 4(3), 1033-1056. <https://doi.org/10.29023/alanyaakademik.686673>
- Sekaran, U. (2003). *Research and Markets: Research Methods for Business - A Skill Building Approach*, 5. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1108/17506200710779521>
- Shao, A. T. (2002). *Marketing Research: An Aid to Decision Making*. South-Western/Thomson Learning, Cincinnati, Ohio.
- Shin, S., He, X. and Kim, S.Y. (2016). "Innovation Capability, Marketing Capability and Firm Performance: A Two-Nation Study of China and Korea", *Asian Business & Management*, 15(1), 32-56.
- Statista. (2025). "Total Global Spending on Pharmaceutical Research and Development from 2016 to 2030", <https://www.statista.com/statistics/309466/global-r-and-d-expenditure-for-pharmaceuticals/>, (Erişim tarihi: 04.05.2025).
- Stewart, T.A. (1997). "Intellectual Capital: The New Wealth of Organizations", Nicholas Brealey, London, UK.
- Stiles, P. and Kulvisaechna, S. (2004), "Human Capital and Performance in Public Sector", Judge Institute of Management, University of Cambridge, Cambridge, UK.
- Subramaniam, M. and Youndt, M.A. (2005), "The Influence of Intellectual Capital on the Types of Innovative Capabilities", *Academy of Management Journal*, 48(3), 450-463. <https://doi.org/10.5465/amj.2005.17407911>
- Sumedrea, S. (2013), "Intellectual Capital and Firm Performance: A Dynamic Relationship in Crisis Time", *Procedia Economics and Finance*, 6, 137-144. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(13\)00125-1](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(13)00125-1)
- Truong, B.T.T. and Nguyen, P.V. (2024), "Driving Business Performance through Intellectual Capital, Absorptive Capacity, and Innovation: The Mediating Influence of Environmental Compliance and Innovation", *Asia Pacific Management Review*, 29, 64-75. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2023.06.004>
- Türk Patent ve Marka Kurumu (TÜRKPATENT). (2022). "Küresel İnovasyon Endeksi", <https://www.turkpatent.gov.tr/haberler/kuresel-inovasyon-endeksi-2022-raporu-yayimlandi> (Erişim Tarihi 11.12.2023)
- Wang, W.Y. and Chang, C. (2005), "Intellectual Capital and Performance in Causal Models: Evidence from the Information Technology Industry in Taiwan", *Journal of Intellectual Capital*, 6(2), 222-236. <https://doi.org/10.1108/14691930510592816>
- Wang, Z., Cai, S., Liang, H., Wang, N. and Xiang, E. (2018), "Intellectual Capital and Firm Performance: The Mediating Role of Innovation Speed and Quality", *The International Journal of Human Resource Management*, 32(6), 1222-1250. <https://doi.org/10.1080/09585192.2018.1511611>
- Yang, F., Lou, C. and Pan, L. (2024), "Do Digitalization And Intellectual Capital Drive Sustainable Open Innovation of Natural Resources Sector? Evidence from China", *Resources Policy*, 88, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104345>

- Yorulmaz, M. and Alkan, G. (2018), "Entelektüel Sermaye Bileşenlerinin Örgüt Performansa Etkisi: Denizcilik Sektöründe Bir Uygulama", *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 11(58), 829-839. <https://doi.org/10.17719/jsir.2018.2596>
- Yuan, K.H. and Bentler, P.M. (2007). "Model Fit Evaluation in Multilevel Structural Equation Models", *Frontiers in Psychology*, 5(81), 1-9. [DOI:10.3389/fpsyg.2014.00081](https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00081)
- Zahra, S.A., Nielsen, A.P. and Bogner, W.C. (1999), "Corporate Entrepreneurship, and Extension, Knowledge and Competence Development", *Entrepreneurship: Theory and Practice*, 23(3), 169-189. <https://doi.org/10.1177/104225879902300310>
- Zerenler, M., Hasiloglu, S.B. and Sezgin, M. (2008), "Intellectual Capital and Innovation Performance: Empirical Evidence in the Turkish Automotive Supplier", *Journal of Technology Management & Innovation*, 3(4), 31-40. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27242008000200003>

Türk Savunma ve Havacılık Sanayisinde Üretim Faktörlerinin Analizi

Fethi Aslan¹ 

ÖZET

Amaç: Bu çalışmanın amacı, Türk savunma ve havacılık sanayisinde istihdam, teknoloji geliştirme ve ürün geliştirme harcamalarının ciro üzerindeki etkilerini inceleyerek, sektörel büyüme dinamiklerini belirlemektir.

Yöntem: Çalışmada, Cobb-Douglas üretim fonksiyonu sektörel verilere dayalı olarak uygulanmıştır. Analiz güvenilirliğini arttırmak amacıyla Bootstrap yeniden örnekleme ve Monte Carlo simülasyon tekniklerinden yararlanılmıştır.

Bulgular: Elde edilen bulgular, Türk savunma ve havacılık sanayisinde istihdam, teknoloji geliştirme ve ürün geliştirme harcamalarının sektörel büyüme üzerinde anlamlı ancak farklılaşan etkiler oluşturduğunun ortaya koymaktadır. Ürün geliştirme harcamaları büyüme performansı (ciro) üzerinde en güçlü etkiye sahiptir. Bununla birlikte, teknoloji geliştirme harcamalarının etkisinin beklenenden düşük seviyede kalmıştır. İstihdam faktörünün ise ürün geliştirme faktörüne yakın bir katkı sağlamıştır.

Orjinallik: Bu çalışmanın özgünlüğü, savunma ve havacılık sektöründe üretim faktörlerinin ekonomik etkisini analiz etmek için Cobb-Douglas üretim fonksiyonunun Bootstrap ve Monte Carlo simülasyon teknikleriyle güçlendirildiği metodolojik açıdan yenilikçi yaklaşımında yatmaktadır. Ayrıca, teknoloji geliştirme ve ürün geliştirme faktörlerinin etkisinin ayrıştırılarak incelenmesiyle bu kritik sektörde detaylı bir faktör analizi sunan ilk çalışmalardan biri olma özelliği taşımaktadır. Bununla birlikte hızlı bir şekilde büyüyen Türk savunma ve havacılık sanayisinde teknoloji geliştirme harcamalarının beklenenin altında etkili olduğu bulgusu özgün bir ampirik katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Ekonometrik Analiz, Verimlilik, Bootstrap, Monte Carlo, Ürün Geliştirme, Teknoloji Geliştirme.

JEL Kodları: D24, F52, H56, O32.

Analysis of Production Factors in Turkish Defense and Aerospace Industry

ABSTRACT

Purpose: The aim of this study is to identify the dynamics of sectoral growth in the Turkish defense and aerospace industry by examining the effects of employment, technology development, and product development expenditures on turnover.

Method: In this study, the Cobb-Douglas production function was applied based on sectoral data. Bootstrap resampling and Monte Carlo simulation techniques were utilized to improve the reliability of the analysis.

Findings: The findings show that employment, technology development, and product development expenditures all have significant effects on sectoral growth in the Turkish defense and aerospace industry. Product development has the strongest impact on turnover. The effect of technology development is lower than expected. Employment provides a contribution close to that of product development.

Originality: The originality of this study lies in its methodologically innovative approach. It strengthens the analysis of the economic effects of production factors in the defense and aerospace industry by combining the Cobb-Douglas production function with Bootstrap and Monte Carlo simulation techniques. Additionally, by separately examining the effects of technology development and product development factors, this study is among the first to provide a detailed factor analysis in this critical sector. At the same time, the finding that technology development expenditures have had a less-than-expected impact in the rapidly growing Turkish defense and aerospace industry provides a unique empirical contribution.

Keywords: Econometric Analysis, Productivity, Bootstrap, Monte Carlo, Product Development, Technology Development.

JEL Codes: D24, F52, H56, O32.

¹ Elazığ İl Özel İdaresi, Elazığ, Türkiye

Sorumlu Yazar-Corresponding Author: Fethi Aslan, fethi.aslan@outlook.com

DOI: 10.51551/verimlilik.1730323

Araştırma Makalesi / Research Article | Geliş / Submitted: 30.06.2025 | Kabul / Accepted: 23.09.2025

Atıf/Cite: Aslan, F. (2025). "Türk Savunma ve Havacılık Sanayisinde Üretim Faktörlerinin Analizi", *Verimlilik Dergisi*, 59(4), 985-1002.

EXTENDED ABSTRACT

The global balance of technological power is undergoing a transformation. The traditional dominance of western actors in research and development is weakening. At the same time, emerging actors such as China are rapidly increasing their strategic technological capabilities. This transformation deeply affects not only international competition but also global geopolitical stability. Within this context, the defense and aerospace industries have become closely associated with strategic autonomy. The level of technological dependency in these sectors has gained even greater importance as a critical factor directly impacting national security. These industries, characterized by R&D intensity and long-term development cycles, are shaped by strategies aimed at reducing investment risks and building capacity through public-private partnerships.

Turkey is one of the countries that confronted these realities and recognized the critical role of the defense and aerospace industry many years ago. One of the key priorities for Turkey's defense and aerospace sector is to achieve strategic autonomy in global competition. To this end, long-term strategies and policies have aimed to enhance technology and product development capabilities. In recent years, significant resources have been allocated to the defense and aerospace industry. These allocations have been made particularly through employment-boosting programs, government incentives, joint projects, and various funding mechanisms. Examining how these resources are utilized is critical for quantitatively understanding their impact on the sector's growth and performance. Within this framework, the present study examines the impact of employment as well as product and technology development expenditures on the performance (turnover) of the defense and aerospace industry. To contribute to this objective, the present study examines the impact of production factors on industry turnover using econometric methods based on SASAD data from the 2012–2023 period.

As part of the analysis, two different Cobb-Douglas production function models were developed to examine the relationship between sectoral output (turnover) and key production inputs. During the analysis process, two distinct econometric models were constructed. In the first model, the independent variables used were total employment level and the combined expenditures on product development and technology development. This approach aimed to measure the overall impact of expenditures as a whole. In the second model, three separate variables were used: total employment, product development expenditures and technology development expenditures. The Ordinary Least Squares (OLS) method was employed as the estimation technique. To enhance the reliability of the results, Bootstrap resampling and Monte Carlo simulation methods were also utilized. This methodological approach helps mitigate potential biases arising from the small sample size. Additionally, it allows for a more robust estimation of confidence intervals for the predicted parameters.

In Model 1, sectoral turnover was used as the dependent variable. Total employment and the combined expenditures on product and technology development served as the independent variables. The analysis results indicate that the model has a very high explanatory power. The residuals exhibit a normal distribution and the overall significance of the model is strongly supported. The coefficient estimates show that both employment and combined product/technology development expenditures have a significant positive impact on turnover. The results of Model 2 indicate that the model explains the data well and is statistically significant. There is no evidence of autocorrelation, and the residuals closely follow a normal distribution. Reliability checks using resampling and simulation methods confirmed the robustness of the estimated coefficients. Confidence intervals obtained from these methods were consistent with the original estimates, with one method providing narrower intervals and the other showing slightly wider intervals. In Model 1, a 100% increase in employment and product and technology development expenditures leads to an overall 102.3% increase in turnover. In Model 2, a 100% increase in employment, technology development, and product development investments results in a 105.2% rise in turnover. These findings indicate that increasing returns to scale apply to the defense and aerospace industry.

This study provides three original contributions. First, it highlights the strategic importance of the Turkish defense and aerospace industry in the context of global transformation. Second, it develops a sector-specific econometric model that reveals interactions among high-tech production inputs. Third, it offers a novel methodological framework combining classical and simulation-based techniques.

In conclusion, this research provides a rigorous, empirically grounded analysis of the impact of production factors on performance in the Turkish defense and aerospace industry. It offers a solid knowledge base for strategic decision-making regarding the sector's future. Another key contribution of the study is its methodological perspective, introduced through the application of Bootstrap resampling and Monte Carlo simulation methods—approaches rarely utilized in the local academic literature.

1. GİRİŞ

Küresel teknolojik güç dengesi tarihsel bir dönüm noktasındadır. Geleneksel olarak araştırma-geliştirme ve üretimde üstün konumda olan batılı ülkelerin bu üstünlükleri giderek azalmaktadır. Çin'in yükselen teknolojik kapasitesi, uluslararası sistemde yeni bir güç dağılımının habercisi niteliğindedir. Bu teknolojik güç kayması, yalnızca teknolojik rekabeti değil aynı zamanda küresel jeopolitik dengeleri yeniden şekillendiren bir değişimi işaret etmektedir (Gaida ve diğerleri, 2023: 1). Çin'in savunma ve uzay teknolojilerindeki hızlı ve stratejik ilerleyişi, küresel güvenlik mimarisinde köklü endişeler yaratmaktadır. Bu teknolojik atılımlar, dünya genelinde teknolojik bağımlılık ve tekelleşme riskine karşı yeni ulusal güvenlik stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Söz konusu riskler ülkelerin stratejik özerkliklerini elde etmesine yönelik çabaları daha da arttırmaktadır. Stratejik özerklik, bir ulusun askeri güç kullanma kararını dış etkilere bağımsız olarak alabilme kapasitesi olarak ifade edilir (Mauro ve Thoma, 2016: 37). Stratejik özerkliğin merkezinde yer alan savunma ve havacılık sanayi, bu dönüşüm sürecinde devletlerin jeopolitik güvenliği ve bağımsızlığı için vazgeçilmez bir unsurdur. Bu bağımlılık yalnızca teknolojinin temini ile sınırlı değildir. Aynı zamanda teknolojinin modernizasyonu, tedarik zincirinin sürdürülebilirliği, lojistiği ve kullanım haklarına ilişkin faktörleri de kapsamaktadır (Markowski ve diğerleri, 1997). Savunma ve havacılık sanayi yatırımları, üretim süreçleri ve uluslararası ticaret faaliyetlerinin doğrudan devlet kontrolü ve düzenlemelerine tabi olması bu sektörü diğer endüstrilerden belirgin biçimde ayırmaktadır.

Savunma ve havacılık sanayisinde teknolojilerin geliştirilmesi oldukça maliyetli ve risklidir. Araştırmalar, savunma ve havacılık sanayisinde başlatılan teknoloji odaklı çalışmaların, sahada kullanılabilir ürün ve sistemlere dönüştürülmesinin onlarca yıllık bir süre gerektirdiğini ortaya koymaktadır (Fernandes ve Centrone, 2024: 16). Bu nedenle, sektördeki temel araştırma ve geliştirme yatırımları ağırlıklı olarak kamu kaynakları ile finanse edilmektedir. Özel sektör kuruluşları ise daha çok ürün geliştirme ve inovasyon projelerine odaklanmaktadır. Temel araştırma ve tasarım faaliyetlerinin kamu kurumları veya devlet destekli kuruluşlar tarafından yürütülmesi, elde edilen teknolojik birikimin ürün geliştirme aşamasında özel sektöre aktarılması en etkili strateji olarak değerlendirilmektedir. Bu tür bir kamu-özel sektör iş birliği modeli, yüksek maliyetli araştırma risklerinin kamu tarafından üstlenilmesini sağlar. Teknolojik bilgi birikiminin endüstriyel ekosistem içinde yaygınlaşmasına ve kapasitesinin gelişmesine olanak tanır (Markowski ve diğerleri, 1997).

Bu alandaki sürdürülebilir başarı, endüstrinin dinamik yapısının doğru bir şekilde analiz edilmesi ve politika önlemlerinin bu analiz doğrultusunda şekillendirilmesine bağlıdır. Nitekim, savunma sanayisinin yüksek teknoloji gerektiren yapısı ve sürekli değişen rekabet koşulları, yalnızca finansal destek mekanizmalarının değil, verimliliği arttıran yapısal faktörlerin de dikkate alınmasını zorunlu kılmaktadır.

Kaynak tahsis teorisi, sınırlı ekonomik kaynakların optimal dağılımı ve kullanımı ile ilgilenen çok boyutlu bir yaklaşımı ifade eder. Bu teori, bir organizasyonun belirli çıktıları elde etmek amacıyla üretim faktörlerini etkin bir şekilde seçmesi ve dağıtması gerektiğini savunur. Kaynak tahsisi süreci, finansal ölçütlerle birlikte sosyal fayda, politik gereklilikler ve teknik yeterlilik gibi faktörlerinde bir arada değerlendirilmesini gerektiren karmaşık bir karar verme süreci olarak ele alınır (Bower, 2018: 1446). Bu nedenle savunma ve havacılık sanayi projeleri, finansman mekanizmaları, insan kaynağı yatırımları ve politik iradenin stratejik bir bütünlük içinde yönetilmesi ile başarıya ulaşabilir (Fernandes ve Centrone, 2024: 16).

Türk savunma ve havacılık sanayisinin küresel düzeyde görece yeni bir aktör olarak konumlanması, sektörün gelişimi için stratejik bir yaklaşımı gerektirmektedir. Bu yeni pozisyon, Türkiye'nin son yıllarda savunma politikasındaki değişiminin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Geçmiş dönemlerde savunma ihtiyaçlarını büyük ölçüde ithalat yoluyla karşılayan Türkiye, uzun yıllardır devam eden çalışmaları sonucunda kayda değer atılımlar gerçekleştirmiştir. Bu stratejik dönüşüm, yalnızca askeri kapasiteyi güçlendirme amacı ile sınırlı değildir. Aynı zamanda teknolojik bağımsızlık, ekonomik kalkınma ve uluslararası alanda rekabet gücü kazanma hedeflerini de içermektedir. Türk savunma sanayisinin bu süreçte farklı zorluklarla karşı karşıyadır. Bunlar, gelişmiş ülkelerdeki köklü savunma şirketlerinin sahip olduğu teknolojik birikim ile rekabet etme, nitelikli insan kaynağını sektöre çekme ve uygun kaynak tahsis modellerini hayata geçirme gibi faktörler yer almaktadır.

Yapılan bu çalışma ile Türk savunma ve havacılık sanayisinde üretim faktörlerinin çıktı üzerindeki etkilerini ve bu faktörler arasındaki karmaşık ilişkileri nicel veriye dayalı olarak ortaya koymak amaçlanmıştır. Söz konusu ilişkiler ekonometrik bir çerçevede sistematik biçimde analiz edilmiştir. Bu doğrultuda, havacılık ve savunma sanayisine ait sektörel veriler kullanılarak Cobb-Douglas üretim fonksiyonu uygulanmış, analiz güvenilirliğini arttırmak amacıyla Bootstrap yeniden örnekleme ve Monte Carlo simülasyon tekniklerinden yararlanılmıştır. Çalışma küresel teknolojik dengelerin yeniden yapılandığı günümüzde savunma ve havacılık sanayisinin artan stratejik önemi ve kaynak tahsisinin ulusal güvenlik ile ekonomik bağımsızlık açısından taşıdığı kritik rol çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmaktadır. Bu bağlamda, üretim süreçlerinin ekonomik verimlilik perspektifiyle analizi hem akademik çevreler hem de politika yapıcılar için büyük önem arz etmektedir. Çalışmanın literatüre yapacağı katkı yalnızca ampirik bulgularla sınırlı

kalmayıp, aynı zamanda teorik ve politik tartışmalara da yön verecek nitelikte olacağını ortaya koymaktadır. Böylelikle çalışma hem metodolojik hem de stratejik katkısıyla literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Uygulanan ekonometrik yaklaşım, karar vericilere yalnızca mevcut durumun analizini değil, aynı zamanda sektörel stratejik planlama ve kaynak tahsisi optimizasyonu için bilimsel bir temel oluşturmaya yönelik bir perspektif de sunmaktadır.

Çalışmanın izleyen bölümleri şu şekilde yapılandırılmıştır. İkinci bölümde, Cobb-Douglas üretim fonksiyonu ile ilgili gerçekleştirilen araştırmaların incelendiği literatür taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, savunma ve havacılık sanayisine ilişkin kapsamlı bilgiler ile çalışmanın değişkenlerinin teorik temellerini ortaya koyan kavramsal çerçeve sunulmuştur. Dördüncü bölümde, Cobb-Douglas üretim fonksiyonu, Monte Carlo simülasyonu ve bootstrap tekniklerinin kullanıldığı yöntem kısmı açıklanmıştır. Beşinci bölümde istatistiksel analizlerin değerlendirildiği bulgulara odaklanılmış, altıncı ve son bölümde ise elde edilen bulguların teorik ve pratik çıkarımları tartışılarak çalışma tamamlanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde, Cobb-Douglas üretim fonksiyonu çerçevesinde işgücü ve sermaye girdilerinin farklı sektörlerdeki çıktı göstergeleri üzerindeki etkilerini inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar, makroekonomik düzeyde ülke ekonomilerinin büyüme dinamiklerinden, tarım ve sanayi gibi spesifik sektörlerin verimlilik analizlerine, firma düzeyinde performans değerlendirmelerine kadar geniş bir yelpazede uygulanmaktadır. Günümüzde enerji kullanımı, çevresel faktörler, teknolojik ilerleme ve Ar-Ge yatırımlarının üretim süreçlerine etkilerini analiz etmek için de yaygın biçimde kullanılmaya devam etmektedir.

Bu alanda yapılan çalışmalar incelendiğinde, Khatun ve Afroze (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, seçilmiş Asya ülkelerinde emek ve sermaye faktörlerinin gayri safi yurt içi hasıla (GSYİH) üzerindeki etkileri, Cobb-Douglas üretim fonksiyonu çerçevesinde analiz edilmiştir. Araştırmacılar, 1990-2014 dönemini kapsayan panel veri setini kullanarak Bangladeş, Hindistan, Çin, Malezya ve Tayland ekonomilerini incelemişlerdir. Çalışmada metodolojik olarak en küçük kareler yöntemi tercih edilmiştir. Ampirik bulgular, üretim faktörlerinin GSYİH üzerindeki etkisinin ülkeler arasında farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle, emek ve sermaye değişkenlerinin GSYİH üzerindeki marjinal etkisinin Çin ve Bangladeş ekonomilerinde istatistiksel olarak daha belirgin ve yüksek olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık, sermaye birikiminin çıktı üzerindeki katkısının Tayland ve Malezya ekonomilerinde görece daha düşük düzeyde kaldığı gözlemlenmiştir. Diğer bir çalışmada Dritsaki ve Stamatiou (2018) çalışmasında, Polonya'nın 1990-2016 kapsayan dönemde piyasa açıklığının uzun vadeli ekonomik büyüme üzerindeki etkisini Cobb-Douglas üretim fonksiyonu çerçevesinde analiz etmiştir. Kişi başına reel gayri safi yurtiçi hasıla, ticari açıklık, finansal gelişmişlik, sermaye stoku ve nitelikli işgücü gibi yapısal faktörlerle ilişkilendirilmiştir. Araştırma sonuçları, sermaye birikiminin hem kısa hem de uzun vadede ekonomik gelişimin temel itici gücü olduğunu göstermiştir. Buna karşılık, işgücü ekonomik büyüme üzerinde negatif etki göstermiştir. Ayrıca, ticari açıklık ve finansal gelişmişlik değişkenleri istatistiksel olarak anlamlı bir etki sergilememiştir. Başka bir çalışmada Basegmez ve Onalan (2018) Amerika Birleşik Devletleri'nin ekonomik büyümesini incelemiştir. Çalışmada çıktı faktörü olarak gayri safi yurtiçi hasıla, girdi faktörleri olarak ise emek ve sermaye faktörlerini kullanmıştır. Yapılan analizler, sermaye yatırımlarındaki artışın üretim üzerinde pozitif bir etkisi olduğunu ancak emeğin üretim üzerindeki etkisinin sermayeye kıyasla çok daha güçlü olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, sermaye ve emeğin toplam katkısının 1'den büyük olması, her iki faktörün bir arada çalışarak toplam üretimde daha büyük bir artışa neden olduğunu göstermiştir.

Hayami (1970) çalışmasında, tarımda kullanılan iş gücü, eğitim ve araştırma faaliyetlerinin buğday üretimi üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamıştır. Bu çalışmada, tarımda çalışan erkek işçi sayısı, okuryazarlık ve okul kayıt oranı, eğitim ve iş gücü değişkenleri olarak kullanılmıştır. Tarımsal araştırma ve geliştirme faaliyetlerini temsil etmek için ise tarım kolejlerinden mezun olan erkek çiftçi sayısı seçilmiştir. Çıktı değişkeni olarak ise buğday üretimi kullanılmıştır. Ayrıca, tarımsal çıktı ölçüsü katma değer ölçüsüne göre hesaplanmış ve yalnızca tohum ve yem girdileri dikkate alınarak tarımsal üretim değerleri belirlenmiştir. Çalışmada, ücret artışlarının tarım üretimini olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Ancak, eğitim ve araştırma gibi değişkenlerin tarım üretimini arttıran önemli faktörler olarak belirgin bir etkisi olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Ücret oranı ile üretim arasındaki ilişki, Cobb-Douglas üretim fonksiyonunun öngördüğü şekilde birim elastikiyetle uyumlu bulunmuştur. Dolayısıyla ücret artışlarının üretim üzerinde orantılı bir etkisi olduğu saptanmıştır. Zhang ve diğerleri (2020) tarafından gerçekleştirilen diğer bir çalışmada, Çin'de mısır verimini etkileyen temel faktörlerin belirlenmesi amacıyla Cobb-Douglas üretim fonksiyonu kullanılmıştır. Çalışmada, mısır üretimini etkileyen dört ana değişken olarak etkili yağış miktarı, mısır ekim alanı, kimyasal gübre kullanımı ve pestisit uygulama oranları ele alınmıştır. Yapılan ekonometrik analizler söz konusu faktörlerin mısır verimi üzerinde istatistiksel olarak anlamlı ve pozitif yönde bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bulgulara göre, mısır verimi üzerinde en yüksek etkiye pestisit uygulaması sahipken, bunu sırasıyla ekim alanı, kimyasal gübre kullanımı ve etkili yağış miktarı izlemiştir. Torres (2020)

çalışmasında, Amerika Birleşik Devletleri'nde mal ve hizmet tüketimi ile ulusal savunma hizmetleri arasındaki ikame esnekliği ile askeri harcamaların ekonomik konjonktürle ilişkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca, savunma sanayindeki teknolojik gelişmelerin ve yatırımların sivil ekonomi üzerindeki yayılma etkileri incelenmiştir. Araştırmacı, bu amaçlar doğrultusunda sermaye ve emek faktörlerini içeren iki sektörlü dinamik stokastik genel denge modelini kullanmıştır. Modelde gayri safi yurt içi hasıla bağımlı değişken, sivil tüketim harcamaları, iş sektöründeki sermaye yatırımları ve askeri mal/hizmet tüketimi bağımsız değişkenler olarak konumlandırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, ekonomik büyüme sürecinde gözlemlenen GSYİH artışı, askeri harcamalarda sistematik bir yükselişe neden olmaktadır. Söz konusu askeri harcamaların artışı, sivil tüketim ve yatırım alanlarına tahsis edilebilecek kaynaklar üzerinde kısıtlayıcı bir etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bununla beraber, çalışmanın bulgularına göre, askeri harcamaların sivil tüketimle olan etkileşimi neticesinde ekonomik performans üzerinde sınırlı düzeyde pozitif bir etki meydana getirmiştir. Wang ve diğerleri (2021) tarafından yapılan çalışmada, Çin'in Sichuan Eyaleti'nde 1996-2018 dönemine ait tarımsal veriler kullanılarak toplam tarımsal üretim büyüme oranı incelenmiştir. Çalışmada, tahminler için hibrit geliştirilmiş yasa optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, tarımsal üretim büyümesinde işgücünün en baskın faktör olduğu ortaya konmuştur. Materyal giderlerinin orta düzeyde bir etkisi bulunurken, arazi kullanımının etkisi ihmal edilebilir düzeyde kalmıştır. Vasylyeva (2021) çalışmasında ise, Ukrayna tarım sektöründe brüt katma değer oluşumunu etkileyen faktörleri Cobb-Douglas üretim fonksiyonu çerçevesinde analiz etmiştir. Çalışmada, sabit sermaye/kullanılan sabit varlıklar, tarımdaki çalışan sayısı ve iş gücü maliyetleri entelektüel varlıkların birleşik katsayısı, ek olarak çevresel kirletici emisyon değişkenleri kullanılmıştır. Araştırmada ayrıca teknolojik katsayı aracılığıyla işgücü potansiyelinin niceliksel olarak ölçülemeyen faktörlerinin etkisi de değerlendirilmiştir. Ampirik bulgular, Ukrayna tarım sektöründe en güçlü pozitif etkinin işgücünden kaynaklandığını ortaya koymuştur. Bunu sırasıyla entelektüel varlıklar ve sermaye yatırımları izlemektedir. Öte yandan, çevresel kirletici emisyonların tarımsal üretim üzerinde güçlü bir negatif etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Wei (2007) tarafından yapılan çalışmada, enerji verimliliği kazanımlarının üretim ve enerji kullanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu inceleme, Cobb-Douglas üretim fonksiyonu kullanılarak hem kısmi analiz hem de iki sektörlü genel denge modeli çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bulgularına göre, enerji üretim verimliliğindeki artışlar enerji kullanımı üzerinde olumlu bir etki yaratmaktadır. Buna karşın, enerji kullanım verimliliğindeki artışların benzer bir etkisi olmadığı ve fiyatlar üzerindeki etkisinin, enerji üretim verimliliğindeki artışlara kıyasla daha sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Yuan ve diğerleri (2009) ise çalışmasında, Cobb-Douglas üretim fonksiyonu çerçevesinde enerji yoğunluğunu etkileyen faktörleri detaylı bir şekilde incelemiştir. Teknolojik ilerlemenin enerji tüketimi üzerindeki etkisi iki temel mekanizma ile açıklanmıştır. İlk mekanizma, teknolojik ilerlemenin ekonomik büyümeyi desteklediği ve üretim ile tüketim faaliyetlerini arttırdığı varsayımına dayanmaktadır. Bu artışın ise enerji tüketiminde bir yükselişe yol açtığı kabul edilmektedir. İkinci mekanizma, teknolojik ilerlemenin daha verimli araçlar ve yöntemler geliştirilmesini sağladığı varsayımına dayanmaktadır. Bu durumun ise enerji verimliliğini artırarak enerji tüketimini azalttığı kabul edilmektedir. Bu çerçevede, enerji yoğunluğunu belirleyen faktörlerin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılabilmesi için çalışmada emek, sermaye ve teknolojik ilerleme değişkenleri analiz edilmiştir. Araştırmacının bulguları, sermaye birikimi ve emek girdisindeki artışların enerji yoğunluğunu arttırdığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık, teknolojik ilerlemenin enerji yoğunluğu üzerinde belirgin bir azaltıcı etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Bond ve Söderbom (2005) çalışmasında, Cobb-Douglas üretim fonksiyonu parametrelerinin tahmin edilmesindeki metodolojik zorluklara ışık tutan önemli bir çalışma gerçekleştirmiştir. Araştırmacılar, ideal piyasa koşullarında tüm firmaların benzer girdi seçimleri yapacağından parametrelerin tahmin edilmesinin teorik olarak imkânsız olduğunu ortaya koymuştur. Ancak gerçek dünyada, firmalar üretim faktörlerini (sermaye ve işgücü) değiştirirken ayarlama maliyetleriyle karşılaşmaktadır. Bu maliyetler, firmaların farklı davranışlar sergilemesine yol açmakta ve ekonometrik tahminlerin yapılmasını mümkün kılmaktadır. Çalışmada Monte Carlo simülasyon teknikleri kullanılarak hem sabit hem de değişken ayarlama maliyetlerinin etkisi modellenmiştir. Özellikle modele rastsal maliyet bileşenlerinin eklenmesinin, tahminlerin doğruluğunu önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir. Başka bir çalışmada Osti (2023), İtalya'nın Bologna şehrinde faaliyet gösteren firmaların gelir yapılarını etkileyen sabit ve değişken maliyetleri incelemiştir. Araştırmada, örneklem olarak seçilen dört firmanın yıllık frekansta toplanan 11 yıllık verilerinden oluşan veri seti kullanılmıştır. Cobb-Douglas üretim fonksiyonu çerçevesinde en küçük kareler, statik ve dinamik panel veri analizleri ile Levinsohn ve Petrin yöntemi gibi çeşitli ekonometrik tahmin yaklaşımlarından faydalanılmıştır. Gelir bileşenleri yıllık toplam satışlar, ihracat gelirleri, hurda satışları ve diğer gelirlerden oluşturulmuştur. Maliyet bileşenleri ise sermaye maliyetleri, işgücü maliyetleri (çalışan sayısı ve toplam işçilik giderleri) ile hammadde ve ara mal alımları olarak belirlenmiştir.

İncelenen çalışmalara göre, Cobb-Douglas üretim fonksiyonu ekonometrik analizlerde yaygın olarak kullanılan bir araçtır. Farklı sektörlerde ve ülkelerde yapılan çalışmalarda bu fonksiyonun yaygın kullanımı,

ekonomik çıktıların modellenmesinde güvenilir bir araç olarak kabul edildiğini göstermektedir. Aynı sektörde bile farklı çalışmalarda farklı faktörlerin baskın olması, ekonomik etkenlerin evrensel değil, bağlamsal olduğunu göstermektedir. Emek ve sermayenin ekonomik çıktı üzerindeki etkisi, ülkeden ülkeye, sektörden sektöre ve zaman içinde önemli farklılıklar göstermektedir. Gelişmekte olan ekonomilerde emek faktörü daha ön plandayken, gelişmiş ekonomilerde sermaye ve teknoloji faktörleri önem kazanmaktadır. Bununla birlikte, aynı gelişmişlik seviyesindeki farklı bölgelerde yapılan benzer çalışmaların farklı sonuçlar vermesi, yerel koşulların ve politikaların da belirleyici rol oynayabileceğini düşündürmektedir.

Çalışmalarda hangi üretim faktörlerinin (sermaye veya emek) daha etkili olduğu konusunda farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bazı çalışmalarda sermaye, ekonomik büyümenin ana itici gücü olarak görülürken, diğerlerinde emeğin etkisinin daha güçlü olduğu saptanmıştır. Ayrıca, üretim süreçlerinin çok değişkenli yapısı dikkate alındığında tek bir faktörün değil, birbiriyle etkileşim halinde olan çoklu değişkenlerin üretim sonuçları üzerinde etkisi olduğu belirlenmiştir.

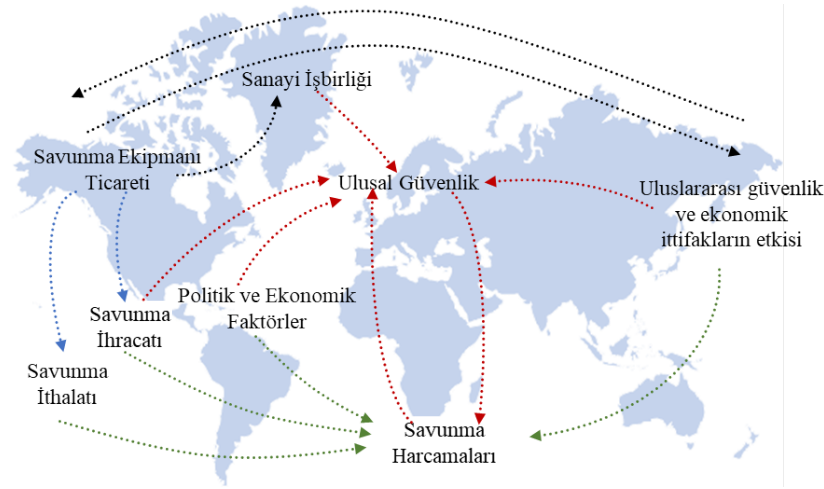
Önceki çalışmalarda Cobb-Douglas üretim fonksiyonunun tahmininde çoğunlukla klasik yöntemler, özellikle en küçük kareler (OLS) tekniği kullanılmıştır. Bu nedenle parametre belirsizlikleri yeterince kapsamlı değerlendirilememiştir. Literatürde Bootstrap ve Monte Carlo yöntemlerinin kullanılabileceğine işaret eden sınırlı sayıda çalışma bulunsa da bu yöntemlerin birlikte uygulanması nadirdir. Bu bağlamda, söz konusu çalışmada Cobb-Douglas üretim fonksiyonu OLS yöntemiyle tahmin edilirken, parametre belirsizliğini daha ayrıntılı analiz edebilmek amacıyla Bootstrap ve Monte Carlo yöntemlerinden yararlanılmıştır. Bu iki yönlü metodolojik yaklaşım, farklı varsayımlar altında model performansını test etme imkânı sunmuştur. Böylece tahmin edilen parametrelerin güven aralıkları ve standart hataları daha hassas bir şekilde belirlenmiş, modelin istatistiksel güvenilirliği artırılmıştır. Geleneksel ekonometrik yöntemlerin ötesine geçen bu yaklaşım hem teorik katkı sağlamış hem de uygulama sonuçlarının sağlamlığını güçlendirmiştir.

Ayrıca, önceki çalışmalarda farklı üretim faktörleri incelenmesine rağmen, savunma ve havacılık sanayisine yönelik üretim faktörleri yeterince incelenmemiştir. Bu durum, söz konusu sektörlerde üretim sürecinin verimliliğini ve kaynak kullanım etkinliğini ölçmeye yönelik bir boşluk bulunduğunu göstermektedir. Bu boşluğu ele almak için, savunma ve havacılık sanayisine özgü üretim faktörleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Böylelikle, Cobb-Douglas üretim fonksiyonunun sektöre özgü dinamiklerin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına katkı sağlanmıştır.

3. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

3.1. Savunma ve Havacılık Sanayi

Savunma ve havacılık sanayinde müşteri portföyünün doğrudan devletlerden oluşması, ticari ilişkilerin çok boyutlu bir stratejik düzlemde ele alınmasını gerektirir. Bu sanayideki ürünlerin küresel dolaşımı; diplomatik münasebetler, stratejik ortaklıklar, güvenlik ittifakları ve algılanan tehdit unsurları gibi kompleks değişkenler ışığında şekillenir. Bu bağlamda, üretim ve ihracat politikaları, ulusal güvenlik doktrini ve dış politika hedefleriyle entegre biçimde formüle edilir. Ayrıca, teknolojik üstünlük ve rekabet dinamikleri de belirleyici rol oynar (Hooke 2005: 4). Şekil 1'de gösterilen çok boyutlu yapı bu stratejik bütünlüğü ve bu alanların birbiriyle olan derin ilişkisini ortaya koymaktadır. Bu yapının her bir bileşeni, diğer elemanlarla organik bir bağ içerisinde fonksiyon göstermekte ve kolektif bir etki yaratmaktadır. Şekil 1'de görselleştirilen bileşenler arasındaki karşılıklı bağımlılık ve etkileşim, ulusal güvenliğin entegre doğasını yansıtmaktadır. Şeklin merkezinde konumlandırılan savunma harcamaları ve ulusal güvenlik stratejileri, farklı unsurların birbiriyle bağlantılı ve etkileşim halinde olduğu merkezi bir noktadır. Ulusal güvenlik, savunma ihracatı, offset mekanizmaları, politik-ekonomik dinamikler ve uluslararası güvenlik-ekonomik iş birliklerinin etkisi altında şekillenmektedir. Savunma harcamaları da benzer şekilde politik-ekonomik değişkenler, savunma ticareti dinamikleri ve uluslararası iş birliklerinin etkileşim halindedir. Teknolojik yeterlilik düzeyleri ülkelerin savunma ekosistemindeki konumlarını belirleyen kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Teknolojik olgunluğa erişememiş ülkeler, savunma ürünlerinin ithalatına yönelirken, ileri teknolojik kapasiteye sahip ülkeler, savunma sanayilerini geliştirerek ihracat potansiyellerini gerçekleştirebilmektedir. Teknolojik yetersizlik yaşayan ülkeler, offset anlaşmaları vasıtasıyla teknoloji transferi sağlayarak savunma endüstrilerinin gelişmesini sağlamaktadır.



Şekil 1. Ulusal güvenlik ve savunma harcamaları arasındaki denge (Hooke, 2005)

Savunma sanayi harcamaları açısından lider konumda bulunan Amerika Birleşik Devletleri, küresel ticaret hacmi ve Ar-Ge yatırımları bakımından da benzer bir üstünlüğe sahiptir. Savunma Ar-Ge harcamalarında ABD 129 milyar Euro, Çin 21 milyar Euro ve Avrupa Birliği 11 milyar Euro düzeyinde harcama gerçekleştirmiştir (European Defence Agency, 2024: 11). Bununla birlikte havacılık, uzay ve savunma sanayi alanındaki kritik teknoloji araştırmalarında Çin lider konumdadır. Tablo 1'de hipersonik uçak motorları, otonom sistemler, gelişmiş robotik ve drone teknolojileri gibi savunma ve uzay alanlarında Çin'in yoğun bir şekilde araştırma ve geliştirme faaliyetleri yürüttüğü açıkça görülmektedir. Özellikle Çin'in yüksek etkili araştırmaların önemli bir bölümüne sahip olması, bu alanlardaki uzun vadeli stratejik planlamasını ve Ar-Ge yatırımlarını başarılı bir şekilde hayata geçirme potansiyelini göstermesi bakımından önemlidir. Bu kritik teknolojilerdeki ilerlemede ABD liderlik pozisyonunu kaybetmiş durumdadır. Ayrıca Hindistan, İran ve Güney Kore, bazı kritik teknolojilerde önemli ilerleme kaydetmiştir. Tablo 1'de ilk beş içerisinde yer alan ülkelerin mevcut katkısı dikkate alındığında, Çin ve ABD gibi iki güce bağımlılık söz konusudur.

Tablo 1. Savunma, havacılık ve uzay araştırmalarında en iyi 5 ülke

Kritik Teknolojiler	Yüksek Etkili Araştırma Üreten İlk Beş Ülke (%)
Gelişmiş uçak motorları (hipersonik dâhil)	Çin %48,5, ABD %11,7, Hindistan %7,0, Birleşik Krallık %3,9, İran %3,6
Dronlar, sürü ve iş birliğine dayalı robotlar	Çin %36,1, ABD %10,3, İtalya %6,1, Hindistan %5,2, Birleşik Krallık %4,5
Küçük uydular	ABD %24,5, Çin %17,3, İtalya %7,8, Almanya %4,4, Birleşik Krallık %4,1
Otonom sistem işletim teknolojisi	Çin %26,2, ABD %21,0, Birleşik Krallık %5,3, Almanya %5,1, Güney Kore %3,6
Gelişmiş robotik	Çin %27,9, ABD %24,6, Birleşik Krallık %5,5, İtalya %4,8, Güney Kore %3,8
Uzay fırlatma sistemleri	ABD %19,7, Çin %18,2, Almanya %9,8, Kanada %8,2, Güney Kore %6,5

Kaynak: (Gaida ve diğerleri, 2023)

3.2. Türk Savunma ve Havacılık Sanayi

Türk savunma ve havacılık sanayisinin gelişimi, 1921'de Askeri Fabrikalar Genel Müdürlüğü'nün kurulmasıyla başlamıştır. 1945'e kadar yerli altyapının temelleri atılmış, tersane, uçak ve motor fabrikalarında önemli gelişmeler sağlanmıştır. 1950-1974 dönemi, savunma sanayisinin kurumsallaşması açısından kritiktir. Bu dönemde MKE'nin askeri fabrikaları bünyesine alması ve Savunma Bakanlığı bünyesinde Ar-Ge Daire Başkanlığı'nın kurulmasıyla merkezi koordinasyon sağlanmıştır. 1974-1985 yılları arasında güçlendirme vakıfları aracılığıyla ASELSAN, HAVELSAN, ASPİLSAN ve TUSAŞ gibi önemli şirketler kurulmuştur. Bu kurumlar aracılığıyla dışa bağımlılığın azaltılması hedeflenmiştir. 1985-2006 döneminde Savunma Sanayi Geliştirme ve Destekleme İdaresi Başkanlığı kurulmuştur. Yabancı ortaklıkları projeler geliştirilmiş ve yerli özel sektörün katılımıyla teknolojik kapasite genişletilmiştir. 2006 sonrası dönemde ise MİLGEM Korveti, Altay Tankı, Atak Helikopteri, Anka ve Bayraktar İHA'ları, Hürkuş, Hürjet ve Kaan gibi projelerle teknolojik ve askeri bağımsızlığını artırarak uluslararası savunma sektöründe önemli bir aktör haline gelmiştir (Savunma Sanayi Başkanlığı, 2025).

Türkiye bu uzun vadeli çalışmaları ile savunma ve havacılık sanayi stratejisini köklü bir şekilde dönüştürmüştür. Geleneksel ithalat temelli tedarik ve modernizasyon yaklaşımından, stratejik özgünlük ve teknolojik bağımsızlık hedefleyen bir modele geçiş yapılmıştır. Böylece hem kamu hem de özel sektör yatırımlarının artırılması yoluyla sanayinin yüksek katma değerli ve nitelikli projeler geliştirmesi teşvik

edilmiştir. Araştırma-geliştirme faaliyetleri ve yerli ürün geliştirme yoluyla yenilikçi bir endüstriyel kapasite inşası amaçlanmıştır. Savunma ve havacılık sanayisinde yerli ekosistemin teknolojik kapasitesini geliştirmek için sürekli ve sistemli yatırımlar yapılmaktadır. Bu önemli çabalara rağmen, hedeflenen yerleştirme düzeyine tam olarak ulaşamamıştır. Özellikle, alt sistem, sistem ve platform düzeyinde ürünler ile önemli birçok yüksek teknoloji bileşeni ve ara üründe dışa bağımlılığın azaltılması stratejik öneme sahiptir.

3.3. Üretim Faktörleri

3.3.1. İşgücü

1776 yılında Adam Smith, “An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations” adlı eserinde yetenek ve fiziki sermayenin ülkelerin refahı için önemli faktörler arasında yer aldığını ifade etmiştir. O tarihten günümüze kadar ülkelerin refahında beşeri sermayenin rolü giderek daha önemli hale gelmiştir (Kubicek, 2022). Becker ve Gartner gibi teorisyenler, işgücünün niteliksel özellikleri ile işin gerektirdiği beceri setlerinin üretim süreçlerindeki başarının temel belirleyicileri arasında olduğunu vurgulamıştır. Araştırmacılar ayrıca bir çalışanın yetkinliğinin, üretim sürecinde verimlilik artışı açısından kritik bir faktör olduğunu belirtmiştir (Acemoglu, 2011: 5).

Henry Kissinger, 1957 yılında “Strategy and Organization” adlı çalışmasında, askeri stratejilerin teknolojik ve mali güç çerçevesinde belirlenmesi gerektiğini ifade etmiştir. Bu yaklaşım, savunma ve güvenlik politikalarının sadece askeri kapasiteye değil, aynı zamanda teknolojik yenilikçiliğe ve ekonomik kaynakların etkin kullanımına dayandırılması gerektiğini vurgulamaktadır. Temel araştırmalardan uygulamalı teknolojilere kadar uzanan süreçte bilim insanları, mühendisler ve teknik personelin yenilikçi çözümler üretme kapasitesi, ulusal güvenliğin temel dayanak noktasını oluşturmaktadır. Özellikle bilim insanlarının inovasyon ve yenilik üretme yetkinliği, ulusal güvenlik kapasitesinin en önemli stratejik bileşenleri arasında yer almaktadır (McKean ve diğerleri, 1960: 1).

Birleşik Krallık'ta 2020 yılında yayımlanan bir çalışma, inovasyon alanında küresel başarının temel unsurlarını ortaya koymaktadır. Söz konusu belgede, yüksek nitelikli bir Ar-Ge işgücüne sahip olmanın ve bu işgücünün yetkinliklerinin sürekli geliştirilmesinin önemi vurgulanmıştır (Belt ve diğerleri, 2021: 4). Başka bir çalışmada ise Avrupa Birliği'nde entegre bir savunma politikasının eksikliğinin savunma harcamalarında önemli bir verimsizliğe yol açtığı iddia edilmiştir. Bu verimsizliğin, potansiyel olarak yaklaşık 300 bin istihdam fırsatının kaçırılması ile sonuçlandığı iddia edilmiştir (Fernandes ve Centrone, 2024: 17).

Savunma sanayi projeleri, diğer endüstrilerde kullanılmayan, yalnızca savunma sektörüne özgü teknik becerilere ihtiyaç duyan özelleştirilmiş ve karmaşık uygulamaları kapsar. (Hartley, 2012: 14). Teknolojik uygulamalar operasyonel gereksinimlerden teknolojik çözümlere ve nihai ürün geliştirmeye kadar uzanan bir değer zinciri oluşturmaktadır. Askeri personelin saha deneyimlerine dayalı operasyonel ihtiyaç analizleri, araştırmacılar ve bilim insanlarının teorik ve uygulamalı araştırma-geliştirme faaliyetlerine yön vermektedir. Bu süreçte elde edilen teknolojik kazanımlar, mühendislik disiplinleri tarafından kullanım amacına uygun sistem ve ürünlere dönüştürülmektedir. Ardından bu sistemlerin operasyonel test ve değerlendirmeleri yine askeri personel tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu döngüsel süreç sürekli iyileştirme ve optimizasyon imkânı sağlamaktadır. Dolayısıyla savunma sanayisinde teknoloji ve ürün geliştirme süreçlerinin başarısı, farklı uzmanlık alanlarının etkileşimine ve her bir disiplinin kendine özgü katkısının sistematik bir şekilde entegre edilmesine bağlıdır (Jermalavičius, 2009: 25). Ayrıca savunma teknolojilerinin gelişim ve üretim süreçlerinin uzun vadeli doğası, sistemin sürdürülebilirliği açısından kritik gereklilikleri beraberinde getirmektedir. Stratejik planlama aşamasından askeri programların olgunlaşmasına kadar geçen zaman 25 yıl ve ötesine uzanan bir zaman dilimine yayılmaktadır. Bu uzun vadeli perspektif içerisinde nitelikli işgücünde devamlılığının sağlanması ve sürekli gelişiminin desteklenmesi, savunma sanayisinin temel yapı taşlarından birini oluşturmaktadır.

3.3.2. Teknoloji ve Ürün Geliştirme

Teknoloji ve ürün geliştirme, savunma ve havacılık alanında yerleşmeyi arttırmanın ve dışa bağımlılığı azaltmanın temel kaynağıdır. Aynı zamanda rekabet gücünün yükseltilmesi ve uzun vadeli teknolojik kapasitenin oluşturulmasında da kritik bir rol oynamaktadır. Teknoloji geliştirme, teorik bilgi ve/veya pratik deneyimlerden faydalanarak bir problemi çözmek, kavramsal bir fikri hayata geçirmek veya var olan çözümleri iyileştirmek amacıyla yapılan iyileştirmelerle ilerleyen, yenilikçi ve yaratıcı araştırma-geliştirme faaliyetlerinin bütünüdür (Aristodemou ve diğerleri, 2019; Aslan, 2023: 89; Oswald, 2014: 25; Stig, 2015: 7). Ürün geliştirme ise temel ve uygulamalı araştırmalar sonucunda elde edilen teknolojilerin, bir ihtiyacı karşılamak amacıyla ticari değer oluşturan mal ve hizmetlere dönüştürülmesi sürecidir. Bu süreç, mevcut veya yeni teknolojileri, pazar ihtiyaçlarını karşılayan somut çözümlere dönüştürmeyi hedefler. Fikir aşamasından başlayarak üretim, pazarlama ve ticarileştirme gibi kapsamlı aşamaları içeren ürün geliştirme süreci, müşteri geri bildirimleri ve pazar araştırmalarını temel alarak ilerler. Bu dönüşüm süreci, araştırma-

geliştirme faaliyetleri, mühendislik uygulamaları, üretim teknolojileri ve pazarlama faaliyetlerinin bütünleşik bir şekilde yönetilmesini gerektirir (Nobelius, 2002: 8; Ulrich ve Eppinger, 2016: 2; Walsh, 1992).

Teknoloji geliştirme ve ürün geliştirme süreçleri birbirleriyle yakından ilişkili olsa da aralarında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Teknoloji geliştirme, geniş kapsamlı hedeflerle yola çıkan ve teknolojinin farklı uygulama alanlarını keşfetmeyi amaçlayan bir süreçtir. Bu süreçte yeni bilgiler elde edilir. Teknolojinin sürecin bir çıktısı olarak görüldüğü bu aşamada belirsizlik ve risk düzeyi oldukça yüksektir. Öte yandan ürün geliştirme süreci, mevcut bir teknolojinin belirli bir ürüne uygulanmasını hedefler. Bu nedenle daha sınırlı hedeflere sahiptir. Kâr odaklı bir yaklaşımla yürütülen bu süreçte teknoloji geliştirme aşamasında elde edilen bilgiler kullanılır. Teknoloji, artık, sürecin bir girdisi konumundadır. Ürün geliştirme sürecinde belirsizlik ve risk düzeyi, teknoloji geliştirme sürecine kıyasla daha düşüktür (Aslan, 2023: 104).

Savunma ve havacılık sanayinde ürün ve teknoloji geliştirme süreçleri, ülkelerin sahip olduğu teknolojik bilgi, altyapı ve kapasite düzeyine bağlı olarak farklı stratejiler gerektirir. Teknolojik bilgi ve kapasitenin sınırlı olduğu durumlarda, teknoloji transferi, taklit ve uluslararası iş birliği modelleri genellikle tercih edilen stratejilerdir. Bu yaklaşımlar, teknolojiye hızlı erişim ve ekonomik büyümeye katkı sağlar. Ancak, bu stratejilerin uzun vadede teknoloji bağımlılığı yaratma riski taşımakta ve yenilikçi kapasitenin gelişimini sınırlayabilmektedir. Bu tür ülkelerde genellikle ürün geliştirme faaliyetleri, mevcut teknolojilerin yerel ihtiyaçlara adapte edilmesi, montaj, bakım veya küçük çaplı iyileştirmeler üzerine yoğunlaşır. Buna karşılık, yüksek teknolojik bilgi ve yeterli kapasiteye sahip ülkeler, sistem ve platform düzeyinde özgün teknolojiler ve ürünler geliştirme kabiliyetine sahiptir. Bu ülkeler, araştırma ve geliştirme yatırımlarını arttırarak küresel düzeyde savunma kapasitesini güçlendiren yenilikçi çözümler üretirler (Shuang-hong ve diğerleri, 2006).

Savunma ve havacılık sanayisinde uçak, füze, gemi ve tank gibi karmaşık platformların geliştirilmesi, teknolojinin birikimsel ilerlemesine dayanmaktadır. Bu tür platformlar, her yeni nesilde önceki teknolojilerin üzerine inşa edilerek daha gelişmiş ve çok yönlü hale getirilmektedir (Belin ve Guille, 2019: 13). Bu durumu en iyi açıklayan örneklerden biri Çin'in hipersonik füze sistemlerinde gösterdiği ilerlemedir. Hipersonik füzelerin geliştirilmesi ancak yeni malzemeler, kaplama ve üretim süreçlerinde sağlanan teknolojik ilerlemelerin sonucunda gerçekleşmiştir (Gaida ve diğerleri, 2023: 17). Bununla birlikte artan teknolojik karmaşıklık ve entegre sistemlerin gerekliliği, geliştirme süreçlerinin maliyetlerini de önemli ölçüde arttırmaktadır (Belin ve Guille, 2019: 13).

4. YÖNTEM

4.1. Cobb-Douglass Üretim Fonksiyonu

Bir firmanın üretim kapasitesini, rekabet gücünü ve kârlılık hedeflerinin belirlenmesi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlar; üretim fonksiyonu, üretime yönelik talep, işgücü ve sermaye kullanımına ilişkin kararlar ile firmanın stratejik karar alma süreçleri ve seçimleridir (Hoch, 1958). Bu kararların rasyonel olarak alınması, ancak ampirik verilere dayalı, sistematik ve analitik yaklaşımların benimsenmesiyle mümkündür. Üretim süreçlerinin matematiksel olarak modellenmesi ve faktör verimliliklerinin ölçülmesi için Cobb-Douglas üretim fonksiyonu gibi niceliksel yaklaşımlar öne çıkmaktadır. Cobb-Douglas üretim fonksiyonu, üretim süreçlerindeki girdi-çıkı ilişkilerinin etkin bir şekilde modellenmesinde kullanılan önemli bir matematiksel yaklaşımdır (Srivastava ve Singh, 1989). Bu yaklaşım ekonomik teoriyle uyumlu olup uzun süredir farklı çalışmalarda tercih edilmektedir (Diwan, 1968). Temel amaç, üretim süreçlerinin ve faktörlerinin üretim üzerindeki etkilerini analiz etmektir.

Yöntem, Büyük Buhran'ın hemen öncesinde, Charles Cobb ve Paul Douglas tarafından ABD imalat sektörüne ait yaklaşık 20 yıllık verilere dayandırılarak geliştirilmiştir. Model, iki temel özelliğe sahiptir. Birincisi logaritmik dönüşümler sayesinde farklı ölçek birimlerine sahip değişkenleri aynı standarda getirir. Böylece aralarındaki ilişkileri daha tutarlı şekilde analiz edebilir. İkincisi, veriler çok geniş bir aralıkta yayılsa bile logaritmik form kullanarak güvenilir ve istikrarlı tahminler üretebilir (Srivastava ve Singh, 1989). Bu yöntem üretim sürecinin temel yapısını anlamamıza yardımcı olurken, bir üretim faktöründeki değişimin diğer faktör sabitken üretim miktarını nasıl etkilediğini gösterir (Kleyn ve diğerleri, 2017).

Cobb-Douglas üretim fonksiyonu emek ve sermayeyi dikkate alan modellerin yanında emek, sermaye ve teknolojik değişimi dikkate alan modeller şeklinde ifade edilebilmektedir. Cobb-Douglas üretim fonksiyonunun analizi sonucunda iki önemli katsayı elde edilir. Bu katsayılardan ilki, işgücünün üretim üzerindeki etkisi, ikincisi ise sermayenin üretim üzerindeki etkisidir. İşgücü girdisi verileri genellikle üretim sürecine dahil olan çalışanların toplam sayısı ile ifade edilir (United Nations, 1990: 416). Cobb-Douglas üretim fonksiyonu Eşitlik 1 ve 2 ile ifade edilir.

$$Y(t) = F[K(t), L(t), A(t)] \quad (1)$$

$$Y(t) = A_t K_t^\alpha L_t^\beta \quad (2)$$

Burada, Y , çıktı/üretim miktarını; K_t , sermaye miktarını; L_t , işgücü miktarını; A_t , teknolojik ilerleme ve diğer

üretim dışı verimlilik faktörlerini ($A>0$); α , sermayenin üretime katkısını, β , işgücünün üretime katkısını göstermektedir. Cobb-Douglas üretim fonksiyonunda ölçek getirileri, α ve β parametrelerinin toplamıyla belirlenir (Eşitlik 3-5). Burada,

$$\alpha + \beta = 1 \quad (3)$$

$$\alpha + \beta > 1 \quad (4)$$

$$\alpha + \beta < 1 \quad (5)$$

koşulu varsayılmaktadır. Bu kısıtlar, üretim fonksiyonunun ölçeğe göre sabit, artan ve azalan getiriye sahip olduğunu gösterir. Eşitlik 3'te sabit ölçek getirileri varsayımında, tüm üretim faktörlerinin aynı oranda artırılması durumunda çıktı miktarı da aynı oranda artış göstereceği varsayılır. Eşitlik 4'te artan ölçek getirileri varsayımında tüm üretim faktörleri aynı oranda artırıldığında, çıktı miktarı bu orandan daha fazla artmaktadır. Eşitlik 5'te azalan ölçek getirileri varsayımında ise tüm üretim faktörleri aynı oranda artırıldığında çıktı miktarı bu orandan daha az azalacağını ifade eder (Josheski ve diğerleri, 2011 ; Kleyne ve diğerleri, 2017: 4-5; KPMG, 2016: 29; Parham ve Segarajasekeran, 2016: 23).

Eşitlik 1'de ifade edilen Cobb-Douglas üretim fonksiyonu temel alınarak, Eşitlik 6'daki model tahmin edilmiştir.

$$\ln Y_t = \ln A_t + \alpha \ln E_t + \beta \ln T O_t + \varepsilon_t \quad (6)$$

Eşitlik 6'da çıktı (Y_t) değişkeni, t zamanında savunma ve havacılık sanayisinin cirosunun doğal logaritmasını, ($T O_t$) değişkeni, t zamanında ürün ve teknoloji geliştirme harcamalarının doğal logaritmasını, (E_t) değişkeni t zamanında çalışan sayısının doğal logaritmasını göstermektedir. Ayrıca $\ln A_t$ toplam faktör verimliliğini veya teknolojik gelişmeyi temsil ederken, α ve β katsayıları sırasıyla sermaye ve işgücünün çıktı esnekliklerini göstermekte, ε_t ise modeldeki hata terimini temsil etmektedir.

Cobb-Douglas üretim fonksiyonunun parametrelerinin tahmininde literatürde farklı yöntemler kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan yöntem en küçük kareler tahmincisi olup, bu yöntem birçok çalışmada (Fraser, 2002; Khatun ve Afroze, 2016; Osti, 2023; Srivastava ve Singh, 1989) tercih edilmiştir. Ayrıca Srivastava ve Singh (1989) OLS ile birlikte Bootstrap ve Monte Carlo yöntemini kullanırken, Bond ve Söderbom (2005) Monte Carlo simülasyonu yaklaşımını tercih etmiştir.

OLS ve diğer ekonometrik tahmin teknikleri, endüstriyel ölçekte logaritmik dönüşüm uygulanmış Cobb-Douglas üretim fonksiyonunu ve ondan türetilen ters faktör talep fonksiyonlarının parametrelerini tahmin etmede etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kapsamda çalışmada Cobb-Douglas üretim fonksiyonunun tahmininde en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Tahmin sonuçlarının güvenilirliğini test etmek için Bootstrap ve Monte Carlo yöntemlerinden yararlanılmıştır. En küçük kareler yöntemi ile elde edilen başlangıç tahminleri, Bootstrap yöntemi ve Monte Carlo simülasyonları ile farklı senaryolar üretilerek parametre tahminlerinin güven aralıkları ve standart hataları hesaplanmıştır.

4.2. Bootstrap Yöntemi

Ekonometrik modellerde parametre tahminlerinin güvenilirliğini değerlendirmede, güven aralığının dar olması, analizlerde arzu edilen bir durumdur. Bu durum, tahminlerin güvenilirliğini artırır. Zaman serilerinin kullanılması durumunda, analiz için minimum 10 yıllık gözleme ihtiyaç duyulmaktadır (United Nations, 1990: 416). Ancak klasik yöntemlerle güven aralığı hesaplamaları özellikle küçük örneklemelerde yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle özellikle küçük örneklem büyüklüğüne sahip veri setlerinde Bootstrap yöntemi, yeniden örnekleme tekniği kullanarak daha güvenilir tahminler elde edilmesine olanak sağlar (Srivastava ve Singh, 1989). Bootstrap yöntemi bağımsız ve aynı dağılıma sahip örneklerden yeni gözlemler oluşturulmasıdır. Gözlenen verilerin ampirik dağılımı Eşitlik 7 ile verilir. P_n , veri setindeki gözlemlerin eşit olasılıklı dağılımını temsil eden bir olasılık dağılımıdır. Bu dağılımda, her bir X_i gözleminin seçilme olasılığı, her bir gözlemin veri setindeki toplam ağırlığa (yani 1'e) olan oranı $1/n$ ile ifade edilir. Bu durum, veri setindeki her bir gözlemin eşit ağırlığa sahip olduğunu ve rassal örneklemede her bir gözlemin seçilme şansının eşit olduğunu gösterir.

$$P_{n(A)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(X_i \in A) \quad (7)$$

θ parametrik bir modelin parametresini gösterir. Parametrik olmayan durumlarda ise parametre, dağılım P 'nin bir fonksiyonu olarak düşünülür ve Eşitlik 8 ile ifade edilir.

$$\theta = T(P) \quad (8)$$

Parametrik olmayan durumlarda ise parametre $\theta = T(P)$, $\widehat{\theta}_n = T(P_n)$ ile tahmin edilir ve bu, yerine koyma tahmincisi olarak adlandırılır. Örneğin, $\theta = T(P) = \int x dP(x)$ ortalama olduğunda, yerine koyma tahmincisi Eşitlik 9 ile ifade edilir.

$$\widehat{\theta}_n = T(P_n) = \int x dP_{n(x)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (9)$$

$$X_1^*, \dots, X_n^* \sim P_{n^*} \quad (10)$$

$(X_1^*, \dots, X_n^*)$, orijinal gözlemlerin amprik dağılımına (P_{n^*}) bağlı olarak n adet gözlemin oluşturulması olarak ifade edilir (Wasserman, 2017).

4.3. Monte Carlo Yöntemi

Monte Carlo yöntemi, bilgisayar simülasyonlarına dayalı sayısal bir yöntemdir. Eşitlik 11'de gösterildiği gibi kapalı formda çözilemeyen problemlerin yaklaşık çözümlerini elde etmek için bu yöntem kullanılır. Monte Carlo simülasyonunda, istenen dağılımdan rastgele örnekler üretilir ve bu örnekler kullanılarak ilgili istatistiksel değerler yaklaşık olarak tahmin edilir.

$$I = \int_0^1 e^{x^{-3}} \cdot 1 dx \quad (11)$$

Eşitlik 11'deki integral için kapalı form çözümü olmadığından, klasik integral hesap yöntemleriyle kesin sonuç bulunamaz. Bu yüzden sayısal bir yöntem olan Riemann integrasyonu kullanılır. Eşitlik 11, $\int f(x)p(x) dx$ olarak yazılabilir burada f bir fonksiyon ve p bir olasılık yoğunluk fonksiyonudur. Eğer $X \sim p(x)$ dağılımından rastgele örnekler alırsak, integral Eşitlik 12'deki gibi yeniden yazılabilir. Burada $p(x)$, x değişkeninin bir olasılık yoğunluk fonksiyonudur.

$$I = \int f(x)p(x) dx \quad (12)$$

$E(f(X))$, X rastgele değişkeninin f(X) fonksiyonunun beklenen değeri olarak Eşitlik 13'teki gibi ifade edilir.

$$\int f(x)p(x) dx = E(f(X)) = I \quad (13)$$

Eşitlik 14, bir integralin beklenen değer biçiminde ifade edilebileceğini göstermektedir. Monte Carlo simülasyonu, bu beklenen değeri rastgele örnekleme ile yaklaşık olarak hesaplamayı amaçlar. Burada $X_1, X_2, \dots, X_N$ bağımsız ve aynı dağılıma sahip (IID) rastgele değişkenlerdir (Chen, 2018).

$$\hat{I}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(X_i) \quad (14)$$

5. BULGULAR

Sektörel analizin temel unsurlarından biri olan sermaye ve işgücü ilişkisi, ekonomik büyümenin dinamiklerini anlamada kritik rol oynamaktadır. Yatırımlar, ekipman ve teknoloji gibi sermaye unsurları ile çalışanlardan oluşan işgücü arasındaki etkileşim ve denge halindedir. Bu denge sektörel performansı doğrudan etkilemektedir. Bu kapsamda çalışmada iki ayrı model kullanılmıştır. İlk modelde sermaye faktörü, teknoloji ve ürün geliştirme harcamalarının toplamı olarak incelenmiştir. İkinci modelde ise teknoloji ve ürün geliştirme harcamaları sermaye faktörünün ayrı bileşenleri olarak incelenmiştir.

Model 1:

$$\ln Y_t = \ln A_t + \alpha \ln E_t + \beta \ln T_o_t + \varepsilon_t \quad (15)$$

Model 1'de savunma ve havacılık sanayi sektörünün cirosu (Y_t) bağımlı değişken, istihdam (E_t) ile ürün ve teknoloji geliştirme harcamalarının toplamı (T_o_t) ise bağımsız değişkenler olarak tanımlanmıştır. Sektörün cirosunu etkileyen faktörlerin analizi için logaritmik formda bir regresyon modeli kullanılmıştır.

Analiz sonuçları, bu faktörlerin firma cirosundaki değişimleri açıklamada yüksek bir açıklayıcı güce sahip olduğunu göstermektedir. Tablo 2'deki R^2 değerine göre, modelin bağımsız değişkenler tarafından açıklanan varyans oranı oldukça yüksektir. Model genel olarak güçlü bir açıklayıcı güce sahiptir. Bu bulgular, bağımsız değişkenlerin savunma ve havacılık sanayi sektöründe cironun değişimini açıklama gücünün yüksek olduğunu doğrulamaktadır. Önceki çalışmalar, zaman serisi analizlerinde bir önceki dönemin hatasının bir sonraki dönemin hatasını etkilediği durumlarda tahmin güvenilirliğinin azalabileceğini vurgulamaktadır. Ayrıca değişkenler arasında yüksek korelasyon olması durumunda çoklu doğrusal bağlantı sorununun tespit edilebilmesi için Durbin-Watson ve VIF değerlerinin incelenmesi gerektiği belirtilmiştir (Diwan, 1968). Buna göre Durbin-Watson testi sonucu otokorelasyonun varlığına dair herhangi bir sorun olmadığını göstermektedir (Durbin ve Watson, 1971). Bununla birlikte, hata terimlerinin normal dağılıma uygunluğunu değerlendiren testlerde elde edilen çarpıklık ve basıklık değerleri, modelin hata dağılımının normal dağılıma oldukça yakındır (Kim, 2013). F-istatistiği ve p-değeri modelin genel anlamlılığını güçlü bir şekilde desteklemektedir. Modelin Log-Olasılık değeri dikkate alındığında, olasılık dağılımı modele oldukça iyi uyum sağlamaktadır. Ayrıca, modelin hata terimlerinin normal dağılıma uygunluğunu değerlendiren Omnibus ve Jarque-Bera testleri, sonuçların hata terimlerinin normal dağılım varsayımını karşılamaktadır. Son olarak, modelin bilgi kriterleri incelendiğinde AIC ve BIC değerlerinin oldukça düşük olup model veri ile iyi uyum sağladığı belirlenmiştir (Jarque ve Bera, 1987).

Tablo 2. Tanısal istatistikleri ve uyum iyiliği göstergeleri (Model 1)

Omnibus:	1,128	Durbin-Watson:	1,798
Omnibus Olasılığı:	0,569	Jarque-Bera:	0,724
Çarpıklık:	0,153	Jarque-Bera Olasılığı:	0,696
Basıklık:	1,836	Koşul Sayısı	351
F-İstatistiği			
R ²	Düzeltilmiş R ²	F-İstatistiği	Olasılığı
0,973	0,946	645,5	1.91e-10
		Log-Olasılık	AIC
		24,369	-42,74
		BIC	-41,28

Tablo 3'teki katsayı tahminleri incelendiğinde, istihdam değişkeninin ve ürün ile teknoloji geliştirme harcamalarının toplamının savunma ve havacılık sanayi sektörünün cirosu üzerinde anlamlı ve pozitif bir etkisi olduğu görülmektedir. Bu durum, her iki faktörün sektördeki ciroyu artırıcı yönde katkıda bulunduğunu göstermektedir. Standart hata değerleri görece düşük olup, tahminlerin güvenilir ve doğru olduğunu işaret etmektedir. t-değerleri de bağımsız değişkenlerin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu doğrulamaktadır. Bu da hem istihdamın hem de ürün ve teknoloji geliştirme harcamalarının sektörel büyüme üzerinde önemli rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Tablo 3. Katsayı tahminleri ve istatistiksel anlamlılık düzeyleri (Model 1)

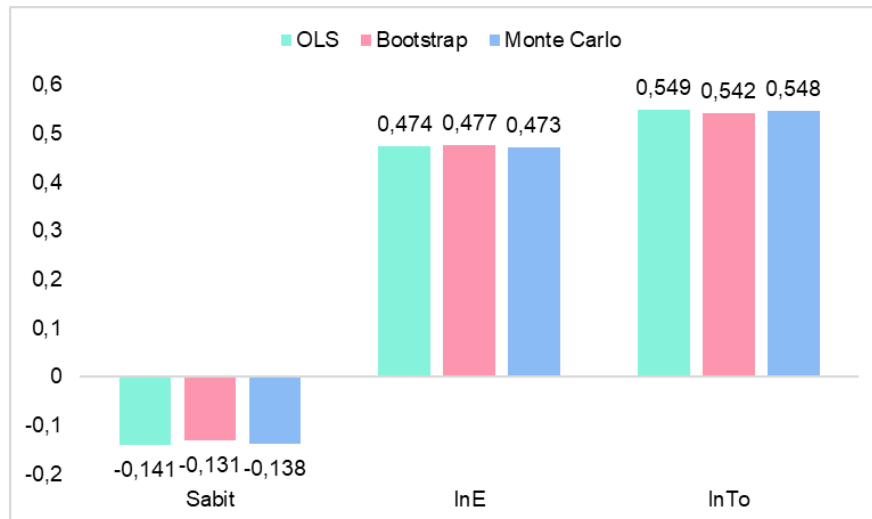
	Katsayı	Std. Hata	t	P> t	[0.025	0.975]
Sabit	-0,141	0,282	-0,501	0,628	-0,779	0,497
lnE	0,474	0,054	8,790	0,000	0,352	0,596
lnTo	0,549	0,064	8,638	0,000	0,405	0,693

Ekonometrik analizlerde farklı tahmin yöntemlerinin sonuçları karşılaştırılarak modelin güvenilirliği değerlendirilebilir. Bu bağlamda, Monte Carlo ve Bootstrap yöntemleri kullanılarak elde edilen katsayı tahminleri Tablo 4'te sunulmuştur. Sabit terim için her iki yöntemde de tahminler, OLS sonuçlarıyla tutarlılık göstermektedir. İstihdam değişkeni açısından her iki simülasyon yöntemi de OLS katsayı tahminleriyle uyumludur. Monte Carlo yöntemi, dar güven aralıkları sayesinde daha kesin tahmin sonuçları vermiştir. Bootstrap yöntemi ise daha geniş güven aralıkları üreterek tahminlerdeki belirsizliği ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, ürün ve teknoloji geliştirme harcamaları değişkeni için elde edilen simülasyon sonuçları da OLS tahminleriyle uyumludur ve her iki yöntemde de değişkenin etkisi istatistiksel olarak anlamlıdır.

Tablo 4. Monte Carlo ve Bootstrap simülasyon sonuçları (Model 1)

Yöntem	Parametre	Ortalama	Alt Sınır (%95)	Üst Sınır (%95)
Monte Carlo	Sabit	-0,138	-0,614	0,341
	lnE	0,473	0,384	0,564
	lnTo	0,548	0,440	0,656
Bootstrap	Sabit	-0,131	-0,792	0,539
	lnE	0,477	0,362	0,613
	lnTo	0,542	0,386	0,669

İki farklı yöntemin benzer sonuçlar vermesi, bulguların sağlam olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak hem Monte Carlo hem de Bootstrap tahminleri, OLS tahminlerini (Şekil 2) doğrulamakta ve parametre tahminlerinin güvenilirliğini artırmaktadır.

**Şekil 2. Model 1 için katsayı değerlerinin karşılaştırılması**

Model 2:

Her ölçüm sistemi, kendi içinde belirli sınırlamalara ve kısıtlamalara sahiptir. Bu durum, analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde kaçınılmaz olarak bir miktar sübjektiflik ortaya çıkarabilir. Özellikle karmaşık sistemlerde, tek bir faktöre odaklanmak yerine, sonuçları etkileyen tüm değişkenlerin bir arada değerlendirilmesi kritik önem taşır (KPMG, 2016). Bu kapsamda, sektörün performansını incelemek amacıyla geliştirilen ikinci modelde, sektörün cirosunu (lnY) etkileyebilecek üç temel faktör incelenmiştir: istihdam düzeyi (lnE), teknoloji geliştirme harcamaları (lnTD) ve ürün geliştirme harcamaları (lnPD). Tüm değişkenlerin logaritmik dönüşümleri kullanılarak, değişkenler arasındaki ilişkinin doğrusal olmayan yapısı kontrol altına alınmış ve esneklik yorumlamalarına olanak sağlanmıştır.

$$\ln Y_t = \ln A_t + \alpha \ln E_t + \beta \ln TD_t + \theta \ln PD_t + \varepsilon_t \quad (16)$$

Model 2 kapsamında, modelin tahmin edilen katsayıları, güven aralıkları ve istatistiksel anlamlılık düzeylerini gösteren sonuçlar Tablo 5, 6 ve 7'de sunulmuştur. Tablo 5'deki sonuçlara göre model yüksek açıklayıcı güce sahiptir. R^2 ve düzeltilmiş R^2 değerleri, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklamada oldukça güçlü olduğunu ve genel geçerliliğinin yüksek seviyede olduğunu işaret etmektedir. Modelin genel anlamlılığını ölçen F-istatistiği ve ilgili p-değeri istatistiksel olarak son derece anlamlıdır. Durbin-Watson testi sonuçları, modelde otokorelasyon sorunu olmadığını göstermektedir. Omnibus ve Jarque-Bera testleri, hata terimlerinin normal dağılıma yakın olduğunu göstermektedir. Çarpıklık ve basıklık değerleri de hata terimlerinin normal dağılıma uygunluğunu desteklemekte olup modelin tahminlerinin güvenilirliğini arttıran önemli bulgular sunmaktadır. Modelin veri uyumu Log-Olasılık değeri ile değerlendirilmiş ve modelin veriye oldukça iyi uyum sağlamıştır. Model karşılaştırmalarında kullanılan AIC ve BIC değerlerinin düşük çıkması, modelin uygun bir karmaşıklık düzeyine sahip olduğunu ve gereksiz parametre kullanımından kaçınıldığını göstermektedir (Weiß, ve Göker, 2011:168).

Tablo 5. Tanısal istatistikleri ve uyum iyiliği göstergeleri (Model 2)

Omnibus:	1,157	Durbin-Watson:	1,157			
Omnibus Olasılığı:	0,561	Jarque-Bera (IB):	0,735			
Çarpıklık:	0,164	Jarque-Bera Olasılığı:	0,692			
Basıklık:	1,833	Koşul Sayısı:	392			
R2	Düzeltilmiş R2	F-İstatistiği	F-İstatistiği Olasılığı	Log-Olasılık	AIC	BIC
0,975	0,950	500,4	1,94e-09	25,971	-43,94	-42,00

Tablo 6'daki katsayılar incelendiğinde, sabit terimin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı görülmektedir. Bu sonuç, sabit terimin bağımlı değişken üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını ortaya koymaktadır. İstihdam değişkeni dar bir güven aralığında, pozitif ve yüksek düzeyde anlamlı bir katsayıya sahiptir. Bu, istihdam seviyesindeki artışların bağımlı değişkeni pozitif yönde güçlü bir şekilde etkilediğini ortaya koymaktadır. Değişkenin yüksek t-istatistiği ve oldukça düşük p-değeri, modeldeki en güçlü açıklayıcı değişkenlerden biri olduğunu göstermektedir. Ürün geliştirme harcamaları değişkeni de benzer şekilde pozitif ve yüksek düzeyde anlamlı bir etkiye sahiptir. Dar güven aralığı ve güçlü istatistiksel göstergeler, bu değişkenin bağımlı değişken üzerinde istikrarlı ve önemli bir açıklayıcı güce sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Modelde, istihdam değişkeni ile birlikte en etkili açıklayıcı değişkenler arasında yer almaktadır. Teknoloji geliştirme harcamaları değişkeni ise diğer iki açıklayıcı değişkene göre daha düşük ve istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahiptir. Güven aralığının pozitif değerler içermesi ve anlamlılık testleri, bu değişkenin modelde önemli rol oynadığını göstermektedir. Bu değişken, modelin açıklayıcı gücüne katkı sağlayan üçüncü faktördür.

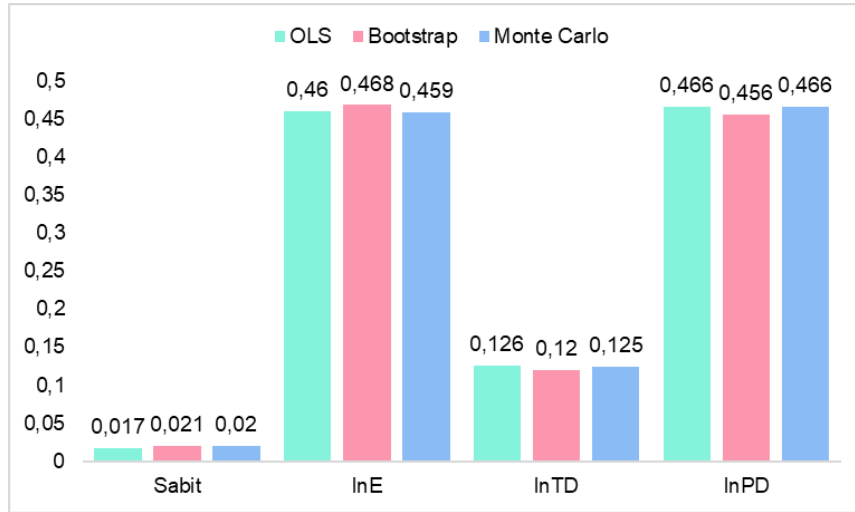
Tablo 6. Katsayı tahminleri ve istatistiksel anlamlılık düzeyleri (Model 2)

	Katsayı	Std. Hata	t	P> t	[0,025	0,975]
Sabit	0,017	0,273	0,064	0,951	0,611	0,646
lnE	0,460	0,051	9,059	0,000	0,343	0,578
lnTD	0,126	0,035	3,632	0,007	0,046	0,205
lnPD	0,466	0,050	9,258	0,000	0,350	0,582

Tablo 7'deki Monte Carlo ve Bootstrap simülasyon sonuçları incelendiğinde, her iki yöntemin de OLS tahminleriyle tutarlı bulgular ürettiği görülmektedir (Şekil 3). Sabit terim, istihdam, teknoloji geliştirme ve ürün geliştirme harcamaları için elde edilen güven aralıkları OLS katsayılarını kapsamaktadır. Yöntemler arasında küçük farklılıklar bulunsa da güven aralıklarının örtüşmesi, model katsayılarının güvenilirliğini ve tahminlerin tutarlılığını doğrulamaktadır. Bu bulgular, farklı tahmin yöntemlerinin tutarlı sonuçlar verdiğini ve modelin güvenilirliğini ortaya koymaktadır.

Tablo 7. Monte Carlo ve Bootstrap simülasyon sonuçları (Model 2)

Yöntem	Parametre	Ortalama	Alt Sınır (%95)	Üst Sınır (%95)
Monte Carlo	Sabit	0,020	-0,419	0,459
	lnE	0,459	0,377	0,540
	lnTD	0,125	0,070	0,180
	lnPD	0,466	0,387	0,547
Bootstrap	Sabit	0,021	-0,721	0,547
	lnE	0,468	0,366	0,652
	lnTD	0,120	0,027	0,211
	lnPD	0,456	0,318	0,567

**Şekil 3. Model 2 için katsayı değerlerinin karşılaştırılması**

Her iki model de bağımsız değişkenler tarafından oldukça yüksek açıklayıcılığa sahiptir. Hata terimleri normal dağılıma uygun olup, otokorelasyon sorunu bulunmamakta ve genel olarak güvenilir tahminler üretmektedir. Modelin elde edilen sonuçları, tahminleme açısından istatistiksel olarak sağlam ve tutarlı olup, ekonometrik modelleme için güvenilir bir çerçeve sunduğunu göstermektedir.

6. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen ekonometrik analiz ile savunma ve havacılık sanayisinde üretim faktörlerinin ciro üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bulgular, istihdam ile ürün ve teknoloji geliştirme harcamalarının sektörün büyümesinde kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır. Model 1’de, istihdam ile ürün ve teknoloji geliştirme harcamalarındaki %100’lük artış, cironun %102,3 oranında yükselmesine yol açmaktadır. Model 2’de ise istihdam, teknoloji geliştirme ve ürün geliştirme yatırımlarındaki %100’lük artış, cironun %105,2 oranında artmasını sağlamaktadır. Her iki modelin sonuçları da üretim faktörlerindeki artışın çıktıda daha yüksek bir artışa yol açtığını, yani ölçeğe göre artan getirinin savunma ve havacılık sanayisi için geçerli olduğunu göstermektedir.

Ölçeğe göre artan getiri karakteristiği, kapasite genişlemesi sürecinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Çünkü sektöre yapılan her yatırım yalnızca doğrusal bir çıktı artışı yaratmamakta, aynı zamanda sistem genelinde verimlilik kazanımları üretmektedir. Bu noktada, üretim faktörlerinin plansız değil, stratejik biçimde yönetilmesi belirleyici hale gelmektedir. Stratejik yönetim sayesinde ölçek ekonomisi avantajları en üst düzeye çıkarılabilir ve sektör küresel pazarda hem maliyet hem de teknolojik yetkinlik açısından rekabet avantajı elde edebilir.

Türkiye, ürün geliştirmeye dayalı bir büyüme modeli benimsenmiş olsa da günümüzde teknoloji geliştirme kapasitesinin güçlendirilmesi öncelikli bir ihtiyaç olarak öne çıkmaktadır. Katma değer yaratma süreci, yalnızca ürün sayısının artırılmasından değil, yüksek teknoloji ürünlerin geliştirilmesinden geçmektedir. Bu teknolojilerin sürdürülebilir şekilde ticarileştirilmesi, katma değer yaratmanın diğer kritik bileşenini oluşturmaktadır. Bu bağlamda, ürün ve teknoloji geliştirme harcamalarının optimal dengesinin sağlanması, uzun vadeli rekabet gücü açısından belirleyici olacaktır. Özellikle teknoloji geliştirme kapasitesinin güçlendirilmesi, hipersonik sistemler, yapay zekâ ve robotik gibi öncü alanlarda stratejik üstünlük kazanılmasında önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir.

Aynı zamanda savunma bütçelerinin teknoloji yatırımlarına yönlendirilmesi önemli bir zorunluluktur. Çok yıllık planlama yaklaşımı sayesinde öngörülebilir endüstriyel talep yaratılabilir ve özel sektör yatırımları teşvik edilebilir. Bununla paralel olarak, üçüncü ülkelerle stratejik ortaklıkların geliştirilmesi, iş birliği ve çok taraflı araştırma projeleri aracılığıyla uluslararası iş birliği kapasitesinin artırılmasını mümkün kılacaktır. Böylelikle, tedarik zinciri risklerinin azaltılması, kaynak çeşitlendirmesi ve stratejik bağımlılıkların minimize edilmesi, ulusal güvenlik ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından kritik bir politika kazanımı sağlayacaktır.

Ayrıca, savunma ve havacılık sanayisinde endüstriyel kapasite inşası, çok boyutlu ve sistematik bir yaklaşım gerektiren bir süreçtir. Bu bağlamda üç temel bileşenin ele alınması gerekmektedir. Bunlar nitelikli insan kaynağının geliştirilmesi ve korunması, araştırma ve geliştirme altyapısının tesis edilmesi ve güncellenmesi ile tedarik zincirinin kesintisiz işleyişinin güvence altına alınmasıdır (Hooke, 2005). Bu nedenle politika yapıcıların, uzun vadeli stratejilerinde nadir toprak elementleri ve kritik mineraller alanındaki çeşitlendirme politikaları ile tek kaynak bağımlılığının yaratacağı stratejik riskleri azaltacak gerekli önlemleri alması gerekmektedir.

Sonuç olarak, uzun vadeli planlama, tedarik güvenliği, stratejik ortaklıklar ve inovasyon ekosisteminin desteklenmesi yoluyla hem ulusal güvenlik ihtiyaçları hem de ekonomik kalkınma hedefleri eşzamanlı olarak güçlendirilebilecektir.

Çatışma Beyanı / Conflict of Interest

Yazar tarafından herhangi bir potansiyel çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No potential conflict of interest was declared by the author.

Fon Desteği / Funding

Bu çalışmada herhangi bir resmi, ticari ya da kâr amacı gütmeyen organizasyondan fon desteği alınmamıştır.

Any specific grant has not been received from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Etik Standartlara Uygunluk / Compliance with Ethical Standards

Yazar tarafından, çalışmada kullanılan araç ve yöntemlerin Etik Kurul izni gerektirmediği beyan edilmiştir.

It was declared by the author that the tools and methods used in the study do not require the permission of the Ethics Committee.



Yazarlar, Verimlilik Dergisi'nde yayımlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptirler ve çalışmaları CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayımlanmaktadır.

The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.

KAYNAKÇA

- Acemoglu, D., (2011). "Lectures in Labor Economics", MIT Economics Department, <https://economics.mit.edu>, (Erişim tarihi: 10.03.2025).
- Aristodemou, L., Tietze, F., O'Leary, E. and Shaw, M. (2019). "A Literature Review on Technology Development Process (TDP) Models", *Cambridge Working Papers in Economics*, 6, 1-30. <https://doi.org/10.17863/CAM.35692>
- Aslan, F. (2023). "Teknoloji Geliştirme Sürecinin Değerlendirilmesi İçin Olgunluk Modeli Önerisi: ARGE–500 Firmalarının Faaliyet ve Yaklaşımlarına Yönelik Bir Uygulama", Yayınlanmamış Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Elazığ.
- Başığmez, H. and Onalan, O. (2018). "Estimation of Economic Growth Using Grey Cobb-Douglas Production Function: An Application for US Economy", *Pressacademia*, 7(2), 178-190. <https://doi.org/10.17261/Pressacademia.2018.840>
- Belin, J. and Guille, M. (2019). "Innovation Dynamics in Defence Industries", *Disruptive Technology and Defence Innovation Ecosystems*, Editor: Barbaroux, P., Wiley, 1-30. <https://doi.org/10.1002/9781119644569.ch1>
- Belt, V., Ri, A. and Akinremi, T. (2021). "The UK's Business R&D Workforce: Skills, Sector Trends and Future Challenges", www.enterpriseresearch.ac.uk, (Erişim tarihi: 14.03.2025).
- Bond, S. and Söderbom, M. (2005). "Adjustment Costs and the Identification of Cobb-Douglas Production Functions", *Working Paper Series*, Institute for Fiscal Studies, London, <https://doi.org/10.1920/wp.ifs.2005.0504>
- Bower, J. (2018). "Resource Allocation Theory", *The Palgrave Encyclopedia of Strategic Management*, Editor: Augier, M. and Teece, D.J., Palgrave Macmillan, London, 1445-1448.
- Chen, Y. C. (2018). "STAT 516: Stochastic Modeling of Scientific Data, Lecture 7: Monte Carlo Methods", http://faculty.washington.edu/yenchic/18A_stat516/html, (Erişim tarihi: 10.06.2025).
- Diwan, R. K. (1968). "On The Cobb-Douglas Production Function", *Southern Economic Journal*, 34(3), 410. <https://doi.org/10.2307/1055504>
- Dritsaki, C. and Stamatiou, P. (2018). "Cobb-Douglas Production Function: The Case of Poland's Economy", *Advances in Time Series Data Methods in Applied Economic Research*, Editor: Tsounis, N. and Vlachvei, A., Springer International Publishing, Cham, 465-483.
- Durbin, J. and Watson, G.S. (1971). "Testing for Serial Correlation in Least Square Regression III", *Biometrika*, 58, 1-19.
- European Defence Agency. (2024). "Defence Data 2023-2024", www.eda.europa.eu, (Erişim tarihi: 14.03.2025).
- Fernandes, M. and Centrone, M. (2024). "Improving the Quality of European Spending on Defence: Cost of Non Europe Report", <https://data.europa.eu/doi/10.2861/2105737>, (Erişim tarihi: 14.03.2025).
- Fraser, I. (2002). "The Cobb-Douglas Production Function: An Antipodean Defence?", *Economic Issues*, 7(1), 39-58.
- Gaida, J., Wong-Leung, J., Robin, S. and Cave, D. (2023). "ASPI's Critical Technology Tracker – The Global Race for Future Power", <https://www.aspi.org.au/report/critical-technology-tracker/>, (Erişim tarihi: 14.03.2025).
- Hayami, Y. (1970). "On The Use of The Cobb-Douglas Production Function on The Cross-Country Analysis of Agricultural Production", *American Journal of Agricultural Economics*, 52(2), 327-329. <https://doi.org/10.2307/1237509>
- Hartley, K. (2012). "Defence-Industrial Issues: Employment, Skills, Technology and Regional Impacts", <https://basicint.org/publications/keith-hartley/2012/defence-industrial-issues-employment-skills-technology-and-regional>, (Erişim tarihi: 21.03.2025).
- Hoch, I. (1958). "Simultaneous Equation Bias in the Context of The Cobb-Douglas Production Function", *Econometrica*, 26(4), 566. <https://doi.org/10.2307/1907517>
- Hooke, R. (2005). "The Defence Industry in the 21st Century", https://www.pwc.pl/en/publikacje/defence-industry_ads.pdf, (Erişim tarihi: 21.03.2025).
- Jarque, C.M. and Bera, A.K. (1987). "A Test For Normality of Observations and Regression Residuals", *International Statistical Review/Revue Internationale de Statistique*, 163-172.
- Jermalavičius, T. (2009). "Defence Research & Development: Lessons from NATO Allies", www.icds.ee, (Erişim tarihi: 21.03.2025).
- Josheski, D., Lazarov, D. and Koteski, C. (2011). "Cobb-Douglas Production Function Revisited, VAR and VECM Analysis and a Note on Fischer/Cobb-Douglas Paradox", <https://mpira.ub.uni-muenchen.de>, (Erişim tarihi: 21.03.2025).
- Khatun, T. and Afroze, S. (2016). "Relationship Between Real GDP and Labour and Capital By Applying The Cobb-Douglas Production Function: A Comparative Analysis Among Selected Asian Countries", *Journal of Business Studies*, 37(1), 113-129.

- Kim, H. Y. (2013). "Statistical Notes for Clinical Researchers: Assessing Normal Distribution (2) Using Skewness and Kurtosis", *Restorative Dentistry & Endodontics*, 38(1), 52. <https://doi.org/10.5395/rde.2013.38.1.52>
- Kleyn, J., Arashi, M., Bekker, A. and Millard, S. (2017). "Preliminary Testing of the Cobb-Douglas Production Function and Related Inferential Issues", *Communications in Statistics—Simulation and Computation*, 46(1), 469-488. <https://doi.org/10.1080/03610918.2014.968724>
- KPMG. (2016). "The Role of Capital and Labour in Driving Economic Growth in Australia", <http://www.kpmg.com.au>, (Erişim tarihi: 21.03.2025).
- Kubicek, K. (2022). "Human Capital ROI: The Positive Impact on Business Performance", <https://www.forbes.com/councils/forbeshumanresourcescouncil/2022/09/09/humancapital-roi-the-positive-impact-on-business-performance>, (Erişim tarihi: 21.05.2025).
- Markowski, S., Hall, P. and Dessi, A. (1997). "Defence R&D and the Management of Australia's Defence Technology", *Prometheus*, 15(2). <https://doi.org/10.1080/08109029708632073>
- Mauro, F. and Thoma, K. (2016). "The Future of EU Defence Research", European Parliament. Brussels.
- McKean, R. N., Hitch, C. J., Enke, S., Enthoven, A. C., Hoag, M. W., McGuire, C. B. and Wohlsetter, A. (1960). "The Economics of Defense in the Nuclear Age", *Harvard University Press*. <https://doi.org/10.4159/harvard.9780674865884>
- Nobelius, D. (2002). "Managing R&D Processes: Focusing on Technology Development, Product Development, and Their Interplay", Unpublished Dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Oswald, W. A. (2014). "Understanding Technology Development Processes Theory & Practice", Unpublished Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Osti, D. (2023). "Returns to Scale with a Cobb-Douglas Production Function for Four Small Northern Italian Firms", <https://mpira.ub.uni-muenchen.de/116351>, (Erişim tarihi: 14.04.2025).
- Parham, D. and Segarajasekeran, P. (2016). "IT Use and Australia's Productivity: Where Are We Now?", <https://www.infrastructure.gov.au/sites/default/files/documents/BCR-Digital%20Productivity%20Report-FINAL-8-Feb.pdf>, (Erişim tarihi: 21.05.2025).
- Savunma Sanayi Başkanlığı. (2025). "Savunma Sanayimiz", <https://www.ssb.gov.tr/WebSite/contentlist.aspx?PageID=47&LangID=1>, (Erişim tarihi: 09.04.2025).
- Sheasley, W.D. (1999). "Leading the Technology Development Process", *Research-Technology Management*, 42(3), 49-55. <https://doi.org/10.1080/08956308.1999.11671284>
- Shuang-hong, B., Si-yong, Z. and Rui, S. (2006). "The Analysis on the Technological Advancement Effect in the Defence Industry", *International Conference on Management Science and Engineering (2006)*, Lille, France. <https://doi.org/10.1109/ICMSE.2006.314122>
- Srivastava, M.S., and Singh, B. (1989). "Bootstrapping in Multiplicative Models", *Journal of Econometrics*, 42(3), 287-297. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(89\)90054-7](https://doi.org/10.1016/0304-4076(89)90054-7)
- Stig, D. C. (2015). "Technology Platforms: Organizing and Assessing Technological Knowledge to Support its Reuse in New Applications", Unpublished Dissertation, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Torres, J.L. (2020). "The Production of National Defense and the Macroeconomy", *PLOS One*, 15(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240299>
- Ulrich, K. T. and Eppinger, S. D. (2016). "Product Design and Development", McGraw-Hill Education, New York.
- United Nations. (1990). "Projection Methods for Integrating Population Variables into Development Planning", New York.
- Vasyl'yeva, O. (2021). "Assessment of Factors of Sustainable Development of the Agricultural Sector Using the Cobb-Douglas Production Function", *Baltic Journal of Economic Studies*, 7(2), 37-49. <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2021-7-2-37-49>
- Walsh, V. (1992). "Winning by Design: Technology, Product Design and International Competitiveness", Blackwell Business, Oxford.
- Wang, J., Song, H., Tian, Z., Bei, J., Zhang, H., Ye, B. and Ni, J. (2021). "A Method for Estimating Output Elasticity of Input Factors in Cobb-Douglas Production Function and Measuring Agricultural Technological Progress", *IEEE Access*, 9, 26234-26250. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3056719>
- Wasserman, L. (2017). "Statistical Methods for Machine Learning", <https://www.stat.cmu.edu/~ryantibs/statml>, (Erişim tarihi: 21.05.2025).
- Wei, T. (2007). "Impact of Energy Efficiency Gains on Output and Energy Use With Cobb-Douglas Production Function", *Energy Policy*, 35(4), 2023-2030. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.08.009>
- Weiß, M., and Göker, M. (2011). "Molecular Phylogenetic Reconstruction", *The Yeasts*, 159-174. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-52149-1.00012-4>

- Yuan, C., Liu, S. and Wu, J. (2009). "Research on Energy-Saving Effect of Technological Progress Based on Cobb-Douglas Production Function", *Energy Policy*, 37(8), 2842-2846. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.04.025>
- Zhang, Q., Dong, W., Wen, C. and Li, T. (2020). "Study on Factors Affecting Corn Yield Based on the Cobb-Douglas Production Function", *Agricultural Water Management*, 228, 105869. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105869>

From Stress to Support: How Technostress Inhibitors Drive Task Productivity in Public Institutions

Esra Şahan¹ , Hatice Gökçe Demirel² 

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this study is to examine the effects of technostress creating factors (creators) and inhibitors on the task productivity of employees.

Method: In this study, the survey method, one of the quantitative research techniques, was used. The field application was conducted on academic and administrative staff of Fırat University (Elazığ). A total of 356 surveys suitable for data analysis were obtained. The data were analyzed in the SPSS statistics program.

Findings: According to the regression analysis findings, the effect of technostress creators on task productivity is statistically non-significant, and technostress creators explain only 2% of the variance in task productivity. However, it was observed that techno-uncertainty, which is one of the factors contributing to technostress, had a significant effect. The effect of technostress inhibitors on task productivity was significant and explained 21% of the variance. It has also been found that job satisfaction had the highest effect among technostress inhibitors and continuance commitment did not have a significant effect.

Originality: Studies in the literature mainly focus on the effects of technostress creators and inhibitors on motivation, burnout, productivity and performance. Our research examines the effects of technostress creators and inhibitors on task productivity.

Keywords: Technostress, Task Productivity, Digitalization, Organizational Behavior, Technology Management.

JEL Codes: D23, M12, M15.

Stresten Desteğe: Kamu Kurumlarında Teknostres İnhibitörlerinin Görev Üretkenliğe Etkisi

ÖZET

Amaç: Bu çalışmanın amacı, teknostres yaratan faktörlerin (yaratıcılar) ve engelleyicilerinin (inhibitörler) çalışanların görev verimliliği üzerindeki etkisini incelemektir.

Yöntem: Bu araştırmada nicel araştırma tekniklerinden anket yöntemi kullanılmıştır. Saha uygulaması Fırat Üniversitesi (Elazığ) akademik ve idari personellere yönelik yapılmıştır. Toplamda veri analizine uygun 356 anket elde edilmiştir. Veriler SPSS istatistik programında analiz edilmiştir.

Bulgular: Regresyon analizi bulgularına göre, teknostres yaratıcılarının görev üretkenliği üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamsızdır ve teknostres yaratıcıları görev üretkenliğindeki varyansın yalnızca %2'sini açıklamaktadır. Ancak, teknostrese katkıda bulunan faktörlerden biri olan tekno-belirsizliğin anlamlı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Teknostres inhibitörlerinin görev üretkenliği üzerindeki etkisi anlamlıdır ve varyansın %21'ini açıklamıştır. Ayrıca, teknostres inhibitörleri arasında iş memnuniyetinin en yüksek etkiye sahip olduğu ve devam bağlılığının anlamlı bir etkiye sahip olmadığı bulunmuştur.

Orijinallik: Literatürde çalışmalar ağırlıklı olarak teknostres yaratıcılarının ve engelleyicilerinin motivasyon, tükenmişlik, üretkenlik ve performans üzerindeki etkilerine odaklanmaktadır. Araştırmamız, teknostres yaratıcılarının ve engelleyicilerinin görev üretkenliği üzerindeki etkilerini incelemektedir.

Anahtar Kelimeler: Teknostres, Görev Üretkenliği, Dijitalleşme, Örgütsel Davranış, Teknoloji Yönetimi.

JEL Kodları: D23, M12, M15.

¹ Fırat University, Graduate Institute for Social Sciences, Elazığ, Türkiye

² Fırat University Faculty of Economics and Administrative Sciences, Elazığ, Türkiye

Corresponding Author: Hatice Gökçe Demirel, demirel@firat.edu.tr

DOI: 10.51551/verimlilik.1594897

Research Article | Submitted: 02.12.2024 | Accepted: 30.09.2025

Cite: Şahan, E. and Demirel, H.G. (2025). "From Stress to Support: How Technostress Inhibitors Drive Task Productivity in Public Institutions", *Verimlilik Dergisi*, 59(4), 1003-1018.

1. INTRODUCTION

Although technology and digital transformation have the potential to increase productivity and effectiveness in business processes, why is the effect of this transformation on employee productivity and task performance not realized at the expected level? King and Ehrenberg (2020) state that factors such as long learning curves and slow user adoption can delay productivity, and this is especially evident in complex innovations. Bowker (2019) argues that beliefs about IT and productivity create false impositions on employees. This contradictory situation draws attention to the phenomenon of technostress that has emerged with the proliferation of digital tools and systems. Studies by Boonjing and Chanvarasuth (2017), Tams et al. (2018), and Tarafdar et al. (2011) show that technostress has negative effects on performance. Technostress refers to the physical (Riedl, 2013), cognitive (Sagarin et al., 2003; Riedl and Leger, 2016: 35-43) and emotional loads (Brown et al., 2014) that employees encounter during the adaptation process to digital technologies, and these loads can cause decreases in task efficiency and productivity (Tarafdar et al., 2011; Karr-Wisniewski and Lu, 2010; Alam, 2016; Yang et al., 2017). Another negative effect of technology on performance can be traced to a new way of working environment and technology invasion. The transition from mainframes and desktop systems to mobile, cloud-based solutions and the rise of SMACIT technologies (Social, Mobile, Analytics, Cloud and Internet of Things), known for their adaptability and scalability (Westergen et al., 2024), are increasing the use of digital media technology in organizations and changing the traditional practices of organizations through these technologies.

The widespread use of technology, ranging from irregular phone calls and physical reminders to digital notifications such as instant messages, email notifications, meeting reminders, and task alerts sent continuously by a variety of technological devices, causes interruptions in the workflow of employees. In particular, the constant interruptions experienced by employees while using digital tools (Tams, 2017), information overload (Lee, 2016), technical problems (Tarafdar et al., 2014), role stress (Tarafdar et al., 2007) and difficulties in adapting to new skills (Thatcher and Perrewe, 2002) are among the main triggers of technostress. Since such technologies constantly interrupt employees' attention, they also cause a significant portion of the workday to be unproductive. In the literature, it is suggested that Information and Communication Technologies (ICT) make it difficult for employees to fulfill their basic job responsibilities, which can negatively affect employee well-being and productivity (Galluch et al., 2015; Tams and Dulipovici, 2019; Tams et al., 2020). In this context, the failure to realize the expected increase in productivity requires examining technostress as a factor that consumes employees' attention and resources.

This study aims to examine the effects of factors that cause technostress, such as work overload, technological invasion, technological complexity, uncertainty created by technology, and technological insecurity, on task productivity. While these factors create technostress, some factors such as technological literacy, job satisfaction, provision of technical support, organizational commitment, and ease of use of technology reduce the level of technostress. In this context, our research aims to examine the effects of these factors that create technostress on task productivity. Our research consists of the following sections: literature review, technostress, its creators, inhibitors, and task productivity conceptual framework, research methodology, results, and conclusion.

2. LITERATURE REVIEW

In the literature, stress sources related to technology and system performance have been examined in terms of security (Kwanya et al., 2012), usability (Sellberg and Susi, 2014), and system failures (Riedl et al., 2012). In addition to performance systems and non-performance factors, there are also studies examining technostress in terms of the mismatch between competences and needs (Kwanya et al., 2012; Al-Fudail and Mellar, 2008). Stress sources arising from technology use are uncertainty (Alam, 2016; Bucher et al., 2013; Zhao et al., 2020), complexity (Fuglseth and Sørenbø, 2014; Liu et al., 2019); work-family conflict (Ayyagari et al., 2011), flexibility (Kim et al., 2015; Yun et al., 2012), information overload (Karr-Wisniewski and Lu, 2010; Lee, 2016), communication overload (Hung et al., 2015, Sellberg and Susi, 2014), technological overload (Bucher et al., 2013; Norulkamar et al., 2012) have been examined.

The use of computer technologies affects users' emotional health by causing emotional exhaustion (Brown et al., 2014), anger and anxiety (Lee, 2016), job burnout (Kim et al., 2015; Turel and Gaudio, 2018), job and relationship anxiety (Kummer et al., 2017), technological exhaustion and technological anxiety (Yang et al., 2017; Carlotto et al., 2017). In addition to the effects of technostress on emotional health, it also has physical effects (Riedl, 2013), such as eye strain (Kwanya et al., 2012) and high cortisol levels (Riedl et al., 2012).

Studies addressing the effects of technostress on productivity show that this stress factor can negatively affect job performance. Jena (2015), who examined the effects of techno-stress on technology-enabled performance, stated that this stress factor creates negative effects on employees' technology-based work processes. Studies by Alam (2016), Hung et al. (2015), Karr-Wisniewski and Lu (2010), Tarafdar et al.

(2011) and Yang et al. (2017) indicate that technostress experienced by employees in work processes reduces their productivity. Studies conducted by Boonjing and Chanvarasuth (2017), Kim et al. (2015), Ragu-Nathan et al. (2008), Yin et al., (2018), Tak and Park, (2016) reveal that techno-stress can have a negative effect on job satisfaction. Okolo et al. (2018) and Jena (2015) studies show that techno-stress can also negatively affect employees' commitment to the organization. In the study conducted by Yun et al. (2012), it was stated that users' tendency to resist technological changes is related to the technostress effect. The effect of technostress on the intention to use information and communication technologies (ICT) was examined by Fuglseth and Sørenbø (2014) and Kummer et al. (2017), and it was shown that this stress factor can reduce the desire to use technology.

The organizational context (Wang et al., 2008) plays a significant role in the manifestation and management of technostress. Effective interventions at both organizational and individual levels are essential to reduce the negative effects of technostress. For example, increasing digital competence among employees has been shown to reduce technostress, as individuals who feel more competent in using technology experience lower levels of stress (Golz et al., 2021). Furthermore, organizational strategies that promote a healthy work-life balance and provide training in technology use can significantly reduce technostress creators (Berger et al., 2023).

3. THEORETICAL and CONCEPTUAL BACKGROUND

Cannon defined stress as threats to homeostasis (Cannon, 1935). Stressors are factors with the potential to directly challenge homeostasis. The stress response is a compensatory process aimed at restoring homeostasis. Stress effects are the biological consequences resulting from dealing with stressors, which can include restoring homeostasis that supports health (positive effects) or harming the body or even disease (negative effects) (Lu et al., 2021). Brod (1984: 53-54) defined technostress as a modern adaptation disease resulting from the inability to cope healthily with new computer technologies.

Technostress is the stress experienced by employees regarding the use of technology (Nisafani et al., 2020; Calvo-Porral and Pesqueira, 2022) due to reasons such as difficulty adapting to new technologies (Shu et al., 2011, Burke 2008), employees' lack of confidence in their own competence, data-based culture and performance pressure. Technostress has also been suggested to be related to reliance on technologies that fail, leading to excessive mental fatigue (Brillhart, 2004; Çoklar et al., 2016).

Factors or conditions that lead to the development of technostress in employees are excessive use of technology, constant connection to smartphones, computers and internet (Shotton, 2007; Weinstein and Lejoyeux, 2010; Cheng et al., 2015), complexity of technological tools and systems and difficulty learning these technologies, uncertainty created by the transition to new systems, constant pressure to adapt to technology, uncertainties in roles and expectations due to the use of technology and its rapid change. It encompasses a range of psychological (Sarabadani et al., 2020), behavioral, and organizational (Wang and Shu, 2008) effects that are influenced by various factors such as the type of technology (Tarafdar et al., 2011), the individual's ability to cope with it (Tuan, 2022), and the organizational environment (Wang et al., 2008). Technostress creators such as the need to constantly adapt to new technologies (Cannon, 1935; Selberg and Susi, 2014), information overload, and complex systems have been shown to reduce organizational commitment. This is especially prevalent in work environments where frequent technological changes create stress and hinder employee productivity (Tarafdar et al, 2007). The physical and psychological effects of technostress manifest as symptoms such as fatigue, headache, and increased anxiety (Arnetz and Wiholm, 1997; Small, 2009). These symptoms result from prolonged exposure to complex technologies and constant connectivity. Behavioral effects include compulsive technology use, particularly on mobile devices (Boonjing, and Chanvarasuth, 2017; Wang et al., 2023), which increases the stress experienced by individuals. The role of personality traits in compulsive technology use is also important (Hisao, 2017; Hisao et al., 2017), as certain traits may make individuals more prone to technostress (Sumiyana and Swiwidharmanely, 2020). In remote work environments, technostress is often associated with decreased job satisfaction as employees struggle to cope with the demands of remote technology use. Workplace environments lacking adequate support systems (Fuglseth and Sørenbø, 2021) tend to exacerbate the effects of technostress on employees.

Various stress factors such as techno-overload, techno-invasion, techno-complexity, techno-insecurity, and techno-uncertainty can lead to negative psychological outcomes in individuals such as burnout (Okolo et al. 2013), job dissatisfaction, and poor performance (Khuzaini and Zamrudi, 2021; Tarafdar et al., 2014; Sarabadani et al., 2020).

3.1. Technostress Creators

Techno-overload (TO) refer to the feeling of being overwhelmed by the amount of information and tasks that technology demands of users. This dimension is characterized by the perception that technology

requires excessive time and effort, leading to stress and burnout (Aziz and Yazid, 2021; Jena and Mahanti, 2014; Ibrahim and Othman, 2014).

Techno-invasion (TIV) describes the encroachment of technology into personal life, where individuals feel that work-life boundaries are blurred due to constant connectivity (Spira and Feintuch, 2005: 22; Estrada-Muñoz et al., 2020). This dimension highlights the stress resulting from the expectation to be available and responsive outside of traditional working hours, which can lead to family conflicts and increased anxiety (Harris et al., 2021).

Techno-complexity (TC) includes the difficulties and challenges users face when interacting with technology, including the need for advanced skills and knowledge to effectively use various digital tools (Saleem, 2023). This dimension can lead to frustration and feelings of inadequacy, especially among those who have not received adequate training or support (Kotek and Vranjes, 2022).

Techno-insecurity (TIS) reflects concerns about job security and fear of being displaced by technology. This dimension is particularly important in environments where automation and digitalization are rapidly changing job roles (Saka et al., 2020; Vallone, 2023). Employees may experience anxiety about future employment prospects, which may increase stress levels.

Techno-uncertainty (TU) relates to the unpredictability associated with technology use, including concerns about data privacy, security breaches, and the reliability of digital systems (Estrada-Muñoz et al., 2020; González-López et al., 2021). This dimension highlights the stress resulting from the lack of control over technological tools and the possible consequences of their failure.

3.2. Technostress Inhibitors

In the current literature, it is suggested that the different ways employees experience technostress can be explained by variables in certain conditions (Nisafani et al., 2020). In this context, researches reveal that individual, organizational and technological factors play a critical role in determining the impact of technostress on employees and the diversity of these effects.

Among the individual conditions, higher education level (Ragu-Nathan et al., 2008) and technology self-efficacy (Shu et al., 2011) contribute to the reduction of technostress, while low technology dependency (Liu et al., 2019) also reduces the technostress level of employees. Wang et al. (2008) suggested that high centralization of power and high innovation level at the organizational level increase the technostress level. In addition, the factors for the prevention of technostress are divided into two main categories as technology-related and non-technology-related inhibitors. Technology-related inhibitors are related to technical features such as technological literacy (Ragu-Nathan et al., 2008), provision of technical support (Kwanya et al., 2012; Norulkamar et al., 2012), participation and ease of use (Aygari et al., 2011; Hung et al., 2015). Some inhibitors arising from individual-organization interaction independent of technology in overcoming technostress are factors such as job satisfaction (Boonjing and Chanvarasuth, 2017; Kim et al., 2015), employee commitment (Okolo, et al., 2018), and culture (Yun et al., 2012).

3.3. Task Productivity

Task productivity, defined in the literature as the degree to which an application improves output per unit of time by the user (Braverman, 1974: 82-83; Danziger, 1985; Davis, 1989; Curley and Pyburn, 1982), stands out as two broad aspects of quantity of work output and quality of work produced. Braverman (1974: 146-150) emphasized the potential for automation to increase the productivity and management control of organizations. Kraut et al. (1989) reported that a customer inquiry system increased output by 50% in a large public service. Weick (1990) discussed the difficulties faced by information technology in improving productivity in post-industrial work environments. Zuboff (1988: 385) argues that information technology significantly increases productivity by changing the perception of reality, making productivity measures more abstract and difficult to define. Liff (1990) shows that office and secretarial workers believe that automation increases the interest in their jobs and the level of skill required, resulting in higher productivity. Davis (1991) argues that, in the context of information technology and white-collar productivity, an overemphasis on cost reduction and output growth may be counterproductive and therefore increasing productivity in serving internal and external customers is a more appropriate basis for evaluation. IT infrastructures are considered to be an important element of organizational success (Yates and Van Maanen, 1996) as a holistic structure encompassing hardware and software components as well as administrative roles, rules, and informal norms and behaviors that support these systems (Barley, 1990). These infrastructures provide a structure that connects different parts of the organization (Kling and Scacchi, 1982) and represents information processing capacity, increasing intra-organizational interactions and productivity (Yates, 1988: 21-22). Therefore, IT infrastructures should be evaluated not only as a technical system but also as a comprehensive whole that supports organizational processes.

4. METHODOLOGY

Technostress is the stress experienced by employees who have difficulty adapting to changing technology and digital applications. In other words, it is a concept that explains the disruption of the employee's biological and psychological balance due to technology. This study investigated whether factors such as techno-invasion, excessive workload, insecurity, complexity and uncertainty, which create technology-related stress, affect task efficiency. The assumption that these factors will negatively affect task efficiency (negative effect of technostress creators' hypothesis) was tested with regression analysis of the data in the SPSS 16 statistical program. In the literature, it has been found that some individual, organizational and work-related factors such as technology literacy, provision of technical support, job satisfaction, organizational commitment and continuance commitment reduce the resulting technostress. The assumption that task efficiency will increase if technostress decreases (positive effect of technostress inhibitors' hypothesis) was also tested with regression analysis of the collected data.

The population of this study consists of academic and administrative staff of Firat University. In the study; 1945 academic staff, 1600 administrative staff and a total of 3545 staff working at Firat University at the time the research was conducted constitute the total population size. In the case where the margin of error is 5%; the sample size is determined as 347 and above. The survey prepared in Google forms was sent via e-mail and 356 healthy surveys were evaluated.

4.1. Research Model

Assuming that technostress may vary according to demographic characteristics such as age, gender, education and income level, demographic characteristics were first included in the model. Then, the effect of technostress generators on task productivity was shown in the model. Finally, whether technostress inhibitors have a moderating effect on the effect of technostress on task productivity was added. The research model of this study is given in Figure 1.

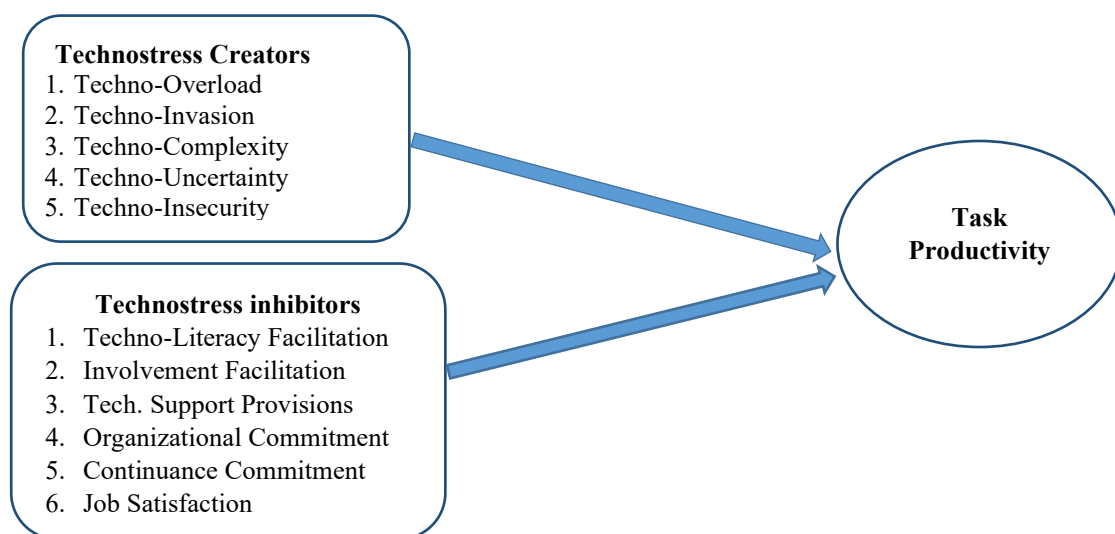


Figure 1. Theoretical model of the research

The hypotheses formulated for the research are presented below.

Hypothesis 1: Technostress creators have an effect on task productivity.

H1_a: Techno-overload has an effect on task productivity.

H1_b: Techno-invasion has an effect on task productivity.

H1_c: Techno-complexity has an effect on task productivity.

H1_d: Techno-uncertainty has an effect on task productivity.

H1_e: Techno-insecurity has an effect on task productivity.

Hypothesis 2: Technostress inhibitors have an effect on task productivity.

H.2_a: Techno-literacy facilitation has an effect on task productivity.

H. 2_b: Involvement facilitation has an effect on task productivity.

- H. 2_c: Job satisfaction has an effect on task productivity.
- H. 2_d: Organizational commitment has an effect on task productivity
- H. 2_e: Continuance commitment has an effect on task productivity.
- H. 2_f: Techno-support provisions have an effect on task productivity.

4.2. Scales

In the research, the Turkish adapted scales of Tاراftar et al. (2007) for technostress creators (reliability: 85.1), Ragu-Nathan (2008) for technostress inhibitors (reliability: 84.7) and Torkzadeh and Doll (1999) for task efficiency (reliability: 87.1) were used. Cronbach's Alpha of the scales collectively was 86.2. The research was conducted at Fırat University (main mass: 3545, sample: 356). A 5-point Likert scale was used in all scales used in the study, and there was a rating from the most negative to the most positive.

Table 1. Scales and the sources

<i>Variables</i>	<i>Scale Name</i>	<i>Number of Questions</i>	<i>Source</i>
Technostress Creators	Techno-overload	5	Tarafdar et al. (2007)
	Techno-Invasion	3	
	Techno Complexity	5	
	Techno-Uncertainty	4	
	Techno Insecurity	4	
Technostress Inhibitors	Techno- Literacy Facilitation	4	Ragu-Nathan et al. (2008)
	Support Provisions	3	
	Involvement Facilitation	4	
	Job Satisfaction	3	
	Organizational Commitment	4	
Task Productivity		4	Torkzadeh and Doll (1999)

5. ANALYSIS AND EVALUATION OF DATA

5.1. Demographic Characteristics

The demographic characteristics of the academic and administrative staff who participated in the study are shown in Table 2. When the relevant tables are examined, the majority of the academic and administrative staff of Fırat University who participated in the study sample and survey are male employees (% 68.5). When the marital status of the sample is examined, the majority (% 77.8) are married. The professional status of the employees who participated in the sample and survey consists of academics (82.9). When the level of education is considered, it is seen that the majority are postgraduate graduates (% 82.6).

Table 2. Demographic characteristics of the sample

<i>Demographic Characteristics</i>		<i>Count</i>	<i>%</i>
Gender	Female	112	31.5
	Male	244	68.5
Marital Status	Married	277	77.8
	Single	79	22.2
Professional Status	Academician	295	82.9
	Administrative	61	17.1
Educational Status	High School	8	2.2
	Graduate	54	15.2
	Postgraduate	294	82.6
Working Period	0-5	70	19.7
	6-10	42	11.8
	11-15	152	42.7
	16-20	92	25.8

The characteristics of the service periods of the academic and administrative staff participating in the study are shown in Table 2. When the tables are examined, it is seen that the majority of the academic and administrative staff participating in the study have a service period between 11-15 years (42.7%).

5.2. Factor Analysis

In order to determine the suitability of the scale used in the study for factor analysis, KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) sample suitability test and Bartlett's sphericity test were performed. When these factors obtained as a result of the analysis were compared with the original scale, it was seen that there were some partial changes. In the comparison made; it was concluded that the factors of excessive workload, invasion, and

uncertainty were the same in both scales, and the factor loadings of the sub-variables of complexity and insecurity factors were low (complexity 4 factor loading 0.43, insecurity 1 factor loading 0.44). In summary, the 5 main and 20 sub-variables that created technostress in the original scale were reduced to 5 main and 18 sub-variables as a result of the factor analysis.

Table 3. Factor analysis of technostress creators, inhibitors and task productivity

<i>Technostress Creators</i>	<i>Factor Loadings</i>
<i>Techno-Overload</i>	
Overload 2 I am forced by this technology to do more work than I can handle.	0.87
Overload 1 I am forced by this technology to work much faster	0.86
Overload 3 I am forced to work with very tight schedules.	0.83
Overload 4 I am forced to change my workload due to increased technology complexity	0.75
Overload 5 I have a higher workload due to increased technology complexity	0.63
<i>Techno-Complexity</i>	
Complexity 1 I do not know enough about this technology for my job.	0.76
Complexity 2 I need a long time to understand and use new technologies.	0.75
Complexity 3 I do not have time to upgrade my technology skills.	0.72
Complexity 4 New recruits know more about technology than I do.	0.70
<i>Techno-Insecurity</i>	
Insecurity 4 Less knowledge sharing due to fear of replacement.	0.77
Insecurity 3 I feel threatened by coworkers with newer skills.	0.73
Insecurity 2 I must constantly update my skills to avoid being replaced.	0.69
<i>Techno Invasion</i>	
Invasion 2 I sacrifice my vacation to keep up with new technologies.	0.79
Invasion 1 I have to be in touch with my work even during vacation.	0.73
Invasion 5 My personal life is invaded by this technology.	0.69
<i>Techno -Uncertainty</i>	
Uncertainty 2 Frequent network upgrades.	0.85
Uncertainty 4 Constant changes in software.	0.81
Uncertainty 1 There are always new developments in organizational technologies.	0.56
<i>Technostress Inhibitors</i>	
<i>Technical Support Provision</i>	
Technical Support 2 Help desk responsive to requests.	0.83
Technical Support 1 Help desk staffed with knowledgeable individuals.	0.80
Technical Support 3 Help desk is accessible.	0.79
<i>Techno-Literacy Facilitation</i>	
Literacy Facilitation 3 End-user training provided.	0.79
Literacy Facilitation 4 Clear documentation provided.	0.79
Literacy Facilitation 2 End-user training provided.	0.78
Literacy Facilitation 1 Teamwork emphasized for solving technology problems.	0.52
<i>Job Satisfaction</i>	
Job Satisfaction 2 I feel pride in my job.	0.82
Job Satisfaction 3 My job is enjoyable.	0.80
Job Satisfaction 1 I like doing the things I do at work.	0.78
<i>Continuance Commitment</i>	
Continuance Commitment 3 Too few options to leave.	0.81
Continuance Commitment 2 Staying is as much necessity as desire.	0.78
Continuance Commitment 4 It is very hard to leave even if I wanted to.	0.75
<i>Organizational Commitment</i>	
Organizational Commitment 3 Organization's problems are my own.	0.80
Organizational Commitment 4 Organization has personal meaning for me.	0.77
<i>Involvement Facilitation</i>	
Involvement Facilitation 2 End users consulted before new technology introduction.	0.82
Involvement Facilitation 1 End users rewarded for using new technologies.	0.75
Involvement Facilitation 3 End users involved in technology change/implementation.	0.61
<i>Task Productivity</i>	
Task Productivity 2 This technology increases my productivity.	0.88
Task Productivity 4 This technology assists me in performing my job better.	0.86
Task Productivity 3 This technology allows me to accomplish more work than would otherwise be possible.	0.85
Task Productivity 1 This technology improves the quality of my work.	0.79

KMO: 0,86; p=0,000<0,05;

Technostress Generators

a) Techno-Overload: Factor loadings range from 0.63 to 0.87, with items such as "I'm given more work due to technology" (0.87) and "I have to work faster" (0.86) standing out with particularly high loadings. This demonstrates that employees clearly perceive the pressures of speed and the workload-increasing effects of technology. The literature (Tarafdar et al., 2007; Karr-Wisniewski and Lu, 2010) also indicates that overload is the most typical source of technostress.

b) Techno-Complexity: Factor loadings range from 0.70 to 0.76. The statements "It takes a long time to learn technology" (0.75) and "I don't have time to update my knowledge" (0.72) are particularly prominent. This is directly linked to employees' feelings of inadequacy with technology. The perception that newcomers are more knowledgeable (0.70) also reveals comparison pressure among employees.

c) Techno-Insecurity: Factor loadings 0.69–0.77. "Reducing knowledge sharing for fear of being replaced" (0.77) and "feeling threatened by colleagues with new skills" (0.73) are prominent. These findings, in line with the literature, suggest that employees are concerned about career security during automation and digitalization processes (Saka et al., 2020).

d) Techno-Invasion: Factor loadings 0.69–0.79. The items "I sacrifice my vacation" (0.79) and "I am connected to my work even on vacation" (0.73) indicate that work-life balance is disrupted by technology. This is a significant technostress dimension that triggers family-work conflict, as emphasized in the literature (Spira and Feintuch, 2005: 12-13; Estrada-Muñoz et al., 2020).

e) Techno-Uncertainty: Factor loadings range from 0.56 to 0.85, with "frequency of network updates" (0.85) and "constant software changes" (0.81) being particularly noteworthy. As emphasized in the study, this dimension is the only significant source of technostress that negatively impacts task productivity. In other words, the constant flow of technological change further stresses employees.

Technostress Inhibitors

a) Technical Support Provision: Factor loadings range from 0.79 to 0.83. "Help desk accessibility" (0.79) and "knowledgeable staff" (0.80) stand out with high loadings. This result suggests that strong technical support mechanisms facilitate employee adaptation to technology and reduce stress.

b) Techno-Literacy Facilitation: Factor loadings range from 0.52 to 0.79. Providing training and documentation yielded the highest loadings (0.79), while "solving through teamwork" yielded lower loadings (0.52). This suggests that formal training and documentation are perceived as more important by employees, while social support mechanisms have limited impact.

c) Job Satisfaction: Factor loadings are quite high at 0.78 to 0.82. Items such as "I am proud of my job" (0.82) and "I enjoy my job" (0.80) stand out. The findings support the general conclusion of the article: job satisfaction is the strongest productivity-enhancing factor among technostress inhibitors.

d) Continuance Commitment: Factor loadings range from 0.75 to 0.81. This may be due to commitment being based on obligation rather than voluntariness.

e) Organizational Commitment: Factor loadings range from 0.77 to 0.80. Strong loadings, such as "Seeing the organization's problems as my own" (0.80), reflect employees' sense of organizational belonging.

f) Involvement Facilitation: Factor loadings range from 0.61 to 0.82. "Seeking users' opinions before implementing new technology" (0.82) stands out. This suggests that participation and rewards are important in reducing technostress.

Task Productivity

Factor loadings are quite high at 0.79 to 0.88. Items such as "This technology increases my productivity" (0.88) and "It allows me to do my job better" (0.86) are particularly prominent. This finding, as emphasized in the study, suggests that employees evaluate technology positively in terms of productivity, but this productivity is shaped more by inhibitors than technostress-generating factors.

Consequently, most factor loadings are above 0.70, supporting the scale's high reliability. While technostress generators have a conceptually strong factor structure, they cannot significantly explain task productivity. In contrast, inhibitors (especially job satisfaction and technical support) are decisive in increasing productivity. Table 3, supporting the study's main finding, shows that productivity is not enhanced by negative factors, but rather by protective factors.

5.3. Reliability Analysis

The reliability levels of the scales used in the study were tested using Cronbach's alpha coefficients. The results showed that $\alpha = 0.851$ for technostress creators, $\alpha = 0.847$ for technostress inhibitors, $\alpha = 0.871$ for

task productivity, and $\alpha = 0.862$ for the overall scale. Since $\alpha \geq 0.70$ is considered acceptable, $\alpha \geq 0.80$ is considered good, and $\alpha \geq 0.90$ is considered excellent in the literature (Bryman and Cramer, 1997: 77), these values indicate that the scales are highly reliable in terms of internal consistency. In terms of validity, the KMO value, which was 0.86 and fell within the range of 0.80-0.89, was found to be at a very good level. The Bartlett test result of $p = 0.000 < 0.05$ demonstrated that the data were suitable for factor analysis. Factor analysis results show that the vast majority of factor loadings exceed 0.70, with only a few items (e.g., 0.56 for "techno-uncertainty 1" and 0.52 for "techno-literacy 1") remaining relatively low. Despite this, the overall picture demonstrates that the scale's structural validity has been established. Furthermore, the fact that the scales used have been validated in the literature supports its content validity.

5.4. Participant Perceptions of Technostress Creators, Inhibitors and Task Productivity

According to the findings in Table 4, participants' perceptions of technostress creators were at a low-to-moderate level (Mean = 2.70). The highest mean values were seen in the techno-uncertainty (Mean = 3.55) and techno-invasion (Mean = 3.46) dimensions. This suggests that employees perceive factors such as constant network updates, software changes, and the disruption of work-life boundaries as the most significant sources of technostress. In contrast, the techno-insecurity (Mean = 2.20) and techno-overload (Mean = 2.26) dimensions were the most prominent with the lowest means. This result suggests that employees perceive the fear of losing their jobs or the increased workload caused by technology as relatively less threatening, which may be related to the high job security and routinized nature of tasks in public institutions.

Table 4. Participant perceptions of technostress creators, inhibitors and task productivity

<i>Variable</i>	<i>Mean</i>	<i>Standard Deviation</i>
Techno-Overload	2.26	1.09
Techno-Complexity	2.40	1.01
Techno-Uncertainty	3.55	1.04
Techno-Invasion	3.46	1.05
Techno-Insecurity	2.20	0.92
Techno-Stress Creators	2.70	0.68
Technical Support Provision	3.38	1.18
Techno-Literacy Facilitation	3.33	1.12
Involvement Facilitation	2.77	0.95
Job Satisfaction	4.26	0.76
Organizational Commitment	3.70	1.09
Continuance Commitment	3.47	1.06
Techno-Inhibitors	3.45	0.65
Task Productivity	4.26	0.91

Regarding technostress inhibitors, participants' perceptions were at a moderate-to-good level (Mean = 3.45). In particular, the dimensions of job satisfaction (Mean = 4.26) and organizational commitment (Mean = 3.70) stand out as strong factors that reduce employees' technostress. Employees' pride in their work and their perceived value in their work can be interpreted as a significant factor mitigating the negative effects of technostress. However, participation facilitation (Mean = 2.77) had the lowest mean, reflecting the perception that employees are not sufficiently involved in the implementation of new technologies. This result points to the need to strengthen participatory practices in the technology adoption process in organizations.

The task productivity dimension was rated high (Mean = 4.26). Employees stated that technology increases their productivity and allows them to perform their jobs more effectively. Overall, the low-to-moderate perception of technostress generators, while the high impact of inhibitors, particularly through job satisfaction and organizational commitment, suggests that task productivity is positively supported. These findings confirm the main conclusion of the article and reveal that the factors that increase productivity are protective factors such as employees' job satisfaction and organizational belonging, rather than negative stress factors.

5.5. Effect of Technostress Creators Dimensions on Task Productivity

A regression analysis was conducted to determine whether the factors (creators) that cause technostress among the academic and administrative staff in the institution have an effect on task productivity. Table 5 shows the results.

Table 5. Regression results of technostress creators dimensions on task productivity^b

<i>Variables</i>	<i>Beta</i>	<i>T Value</i>	<i>Sig</i>	<i>Zero-Order</i>	<i>Partial</i>	<i>Part</i>	<i>Tolerance</i>	<i>VIF</i>
Techno-Overload	-0.07	-1.15	0.24	0.03	-0,06	-0,06	0,62	1,58
Techno-Complexity	0.10	1.71	0.08	0.10	0,09	0,09	0,69	1,43
Techno-Uncertainty	0.10	2.01	0.04	0.11	0,10	0,10	0,94	1,05
Techno-Invasion	0.03	0.54	0.58	0.07	0,02	0,02	0,85	1,17
Techno-Insecurity	0.06	1.00	0.31	0.08	0,05	0,05	0,77	1,29
<i>Model</i>	<i>R</i>		<i>R²</i>		<i>F Value</i>		<i>Significance</i>	
Technostress-Creators	0.17 ^a		0.02		2.07		0.068 ^a	

a: Predictors: (Constant), Creators, b: Dependent Variable: Productivity Means

The findings according to Table 5 indicate that the overall model fit is not statistically significant ($F=2.07$; $p=0.068$; $R^2=0.02$). This result suggests that technostress creators explain only 2% of the total task productivity. In other words, employee-perceived technostress does not have a strong or significant effect on productivity. When the sub-dimensions are examined separately, only the techno-uncertainty dimension ($\beta=0.10$; $t=2.01$; $p=0.04$) has a significant effect. This finding suggests that factors such as constant software changes and network updates can negatively impact employee task productivity. The other dimensions—techno-overload ($\beta=-0.07$; $p=0.24$), techno-complexity ($\beta=0.10$; $p=0.08$), techno-invasion ($\beta=0.03$; $p=0.58$), and techno-insecurity ($\beta=0.06$; $p=0.31$)—were not found to be statistically significant. This suggests that employees' perceptions of workload, complexity, or work-life balance do not directly affect productivity. Consequently, this analysis supports the study's general finding: while technostress creators are conceptually strong dimensions, they do not have a significant impact on productivity. Only the instability created by technological uncertainty, that is, constant change and updates, appears to be a critical risk factor for task productivity. This highlights the importance of organizational stability, predictability, and user-friendly technology management for employee productivity.

5.6. Regression Results of the Effect of Technostress Inhibitor Dimensions on Task Productivity

Regression analysis was conducted to determine whether technostress inhibitors had an effect on the task productivity of the academic and administrative staff in the institution. Table 6 shows the results.

Table 6. Regression results of the effect of technostress inhibitor dimensions on task productivity^b

<i>Variable</i>	<i>Beta</i>	<i>T Value</i>	<i>Sig</i>	<i>Zero-Order</i>	<i>Partial</i>	<i>Part</i>	<i>Tol.</i>	<i>VIF</i>
Technology Support Provision	0.32	6.45	0.00	0.32	0.32	0.32	0.92	1.08
Literacy Facilitation	0.18	3.24	0.00	0.32	0.17	0.15	0.69	1.43
Involvement Facilitation	0.12	2.23	0.01	0.29	0.11	0.10	0.69	1.44
Job Satisfaction	0.22	4.32	0.02	0.32	0.22	0.20	0.85	1.17
Org. Commitment	0.11	2.24	0.02	0.29	0.11	0.10	0.80	1.25
Continuance Commitment	0.08	1.86	0.06	0.12	0.09	0.08	0.97	1.02
<i>Model</i>	<i>R</i>		<i>R²</i>		<i>F Value</i>		<i>Significance</i>	
Technostress Inhibitors	0.46 ^a		0.21		19.07		0.000 ^a	

a: Predictors: (Constant). Creators, b: Dependent Variable: Productivity Means

According to the regression analysis results showing the effect of technostress inhibitors on task productivity, presented in Table 6, the model is statistically significant ($F=19.07$; $p=0.000$), and inhibitors explain 21% of task productivity ($R^2=0.21$). This ratio is quite high compared to the only 2% explanatory power of technostress creators and reinforces the study's main finding: employee productivity is determined by protective factors rather than technostress-inducing factors.

When sub-dimensions are examined, technical support provision has the strongest effect ($\beta=0.32$; $t=6.45$; $p<0.001$). Elements such as help desk accessibility, availability of expert staff, and rapid response times directly increase employee productivity. This is followed by job satisfaction ($\beta=0.22$; $t=4.32$; $p<0.05$). Employees' pride in their work and their enjoyment of it stand out as critical factors mitigating the negative effects of technostress. Furthermore, technological literacy ($\beta=0.18$; $t=3.24$; $p<0.01$), participation facilitation ($\beta=0.12$; $t=2.23$; $p<0.05$), and organizational commitment ($\beta=0.11$; $t=2.24$; $p<0.05$) also significantly contribute to task productivity. Training, documentation, employee participation in technology processes, and identification with the organization are other factors that support productivity. Conversely, continuance commitment ($\beta=0.08$; $t=1.86$; $p=0.06$) was not statistically significant, indicating that employees' commitment to the organization out of necessity does not contribute to increased productivity.

Overall, these results suggest that technical support, job satisfaction, and technological literacy are the primary factors that increase productivity, offsetting the negative effects of technostress. The findings suggest that strong organizational support mechanisms and employee job satisfaction are critical to capitalizing on the productivity benefits of technology.

6. FINDINGS and DISCUSSIONS

The hypothesis test results reveal a clear distinction between the impact of technostress creators and inhibitors on task productivity. Among the technostress creators (H1a–H1e), only Techno-Uncertainty (H1c) was supported ($\beta = 0.10$; $p = 0.04$), indicating that constant technological changes such as frequent updates and software modifications significantly affect task productivity. However, other creator dimensions—Techno-Overload, Techno-Complexity, Techno-Invasion, and Techno-Insecurity—were all rejected, suggesting that employees did not perceive workload pressure, complexity, work-life intrusion, or job insecurity as significant predictors of productivity in this context.

Table 7. Hypotheses testing results for the technostress and inhibitors effects on task productivity

<i>Statement</i>	<i>Result</i>	<i>Justification</i>
H1a Techno-Overload → Task Productivity	✗ Rejected	$\beta = -0.07$; $p = 0.24$ (not significant)
H1b Techno-Complexity → Task Productivity	✗ Rejected	$\beta = 0.10$; $p = 0.08$ (not significant)
H1c Techno-Uncertainty → Task Productivity	✓ Accepted	$\beta = 0.10$; $p = 0.04$ (significant. $p < 0.05$)
H1d Techno-Invasion → Task Productivity	✗ Rejected	$\beta = 0.03$; $p = 0.58$ (not significant)
H1e Techno-Insecurity → Task Productivity	✗ Rejected	$\beta = 0.06$; $p = 0.31$ (not significant)
H2a Techno-Literacy Facilitation → Task Productivity	✓ Accepted	$\beta = 0.18$; $p = 0.00$ (significant. $p < 0.01$)
H2b Involvement Facilitation → Task Productivity	✓ Accepted	$\beta = 0.12$; $p = 0.01$ (significant. $p < 0.05$)
H2c Job Satisfaction → Task Productivity	✓ Accepted	$\beta = 0.22$; $p = 0.02$ (significant. strong)
H2d Organizational Commitment → Task Productivity	✓ Accepted	$\beta = 0.11$; $p = 0.02$ (significant)
H2e Continuance Commitment → Task Productivity	✗ Rejected	$\beta = 0.08$; $p = 0.06$ (not significant)
H2f Technical Support Provision → Task Productivity	✓ Accepted	$\beta = 0.32$; $p = 0.00$ (significant. strongest)

In contrast, technostress inhibitors (H2a–H2f) demonstrated a strong and consistent positive influence on task productivity. Technical Support Provision (H2f) emerged as the most influential factor ($\beta = 0.32$; $p = 0.00$), highlighting the critical role of accessible and knowledgeable support mechanisms in enhancing employee performance. Job Satisfaction (H2c) also showed a robust positive effect ($\beta = 0.22$; $p = 0.02$), confirming that employees' pride and enjoyment in their work significantly contribute to productivity. Similarly, Techno-Literacy Facilitation (H2a) ($\beta = 0.18$; $p = 0.00$), Involvement Facilitation (H2b) ($\beta = 0.12$; $p = 0.01$), and Organizational Commitment (H2d) ($\beta = 0.11$; $p = 0.02$) were all accepted, demonstrating that training, participatory approaches, and strong organizational identification play important roles in mitigating stress and promoting productivity. Conversely, Continuance Commitment (H2e) was rejected ($\beta = 0.08$; $p = 0.06$), suggesting that staying with the organization out of necessity rather than desire does not enhance productivity.

When the research results are evaluated alongside demographic findings, the sample is largely male (68.5%), married (77.8%), academic (82.9%), with a postgraduate degree (82.6%), and with a long tenure (42.7% with 11–15 years, 25.8% with 16–20 years), which explains the direction of the hypotheses. The high level of job security in public institutions, the routinized work processes brought about by institutionalized structures, and the fact that a significant portion of the participants have been working for 10–15 years, have increased employees' capacity to adapt to technology, leading to the insignificant impact of factors such as techno-overload and techno-complexity on productivity. However, while the experience of senior employees allows them to tolerate many stressors, techno-uncertainty stemming from constant change and updates stands out as the only significant creative factor. On the other hand, the strong effect of inhibitors such as job satisfaction, technical support and organizational commitment reveals that employees who have worked in the public sector for many years attach more importance to organizational support mechanisms and the psychological safety environment provided by job security in increasing productivity.

Overall, these findings confirm the study's central argument: task productivity is less influenced by the negative pressures of technostress creators and more significantly strengthened by the presence of supportive and motivational factors. This highlights the importance of building organizational environments that emphasize technical support, training, satisfaction, and commitment, rather than focusing solely on reducing stressors.

7. CONCLUSION

This study provides insights into the effects of technostress generating and inhibiting factors on task productivity. We predicted that technostress generating factors would reduce task productivity. However,

the findings show that technostress generators do not have a statistically significant effect on task productivity ($R^2 = 0.02$, $p = 0.068$). The lack of a significant effect can be explained by the fact that the tasks are routine and standardized; and that the technological and digital systems used have been in use for a long time. The fact that the tasks are routine and standardized and that the technology and digital systems have become familiar may have eliminated techno-complexity. At the same time, the good functioning of the organization's technical support systems may have eliminated this effect. This situation may indicate that the organization is highly institutionalized and that innovation is low. However, one of the sub-dimensions of technostress creators, techno-uncertainty, was found to have a significant effect ($\beta = 0.1$, $t = 2.01$, $p = 0.04$), highlighting its potential to impair task performance.

On the other hand, our prediction that technostress inhibitors would increase task productivity was supported by the findings. The effect of technostress inhibitors on task productivity was significant and explained 21% of the variance ($R^2 = 0.21$, $p < 0.001$). Among these inhibitors, job satisfaction emerged as the most effective factor ($\beta = 0.22$, $t = 4.32$), indicating that it has a critical role in reducing the negative effects of technostress and increasing task productivity.

In this study, we developed a hypothesis that technostress is a type of stress that can prevent employees from using their cognitive and mental resources efficiently and that it will negatively affect task efficiency. According to the findings of our study, this hypothesis was rejected. Since our study was conducted in the public sector, the study can be repeated in the private sector, especially in sectors that use intensive technology and whose technology is rapidly changing. Another reason for the rejection of our hypothesis may be that the number of employees with a digital mindset in the organization is high. Therefore, the digital mindset may have a role in reducing the effect of technostress on task efficiency. Future studies may examine whether the digital mindset has a mediating or moderating role.

Future research could further investigate the mechanisms by which technostress inhibitors operate and explore strategies to strengthen these protective factors in various organizational settings. Survey method was employed as the primary quantitative research method in this study. Qualitative research methods can provide deeper insights into the operating mechanisms of technostress creators and inhibitors.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest was declared by the authors.

Funding

Any specific grant has not been received from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Compliance with Ethical Standards

For this study, the approval of the Ethics Committee (Ethics Committee of Social and Human Sciences Research, Rectorate of Fırat University) was obtained with the decision dated (09.01.2020) and numbered (Meeting Number: 1, Decision Number: 16).

Ethical Statement

It was declared by the author that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.



The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.

REFERENCES

- Alam, M.A. (2016). "Techno-Stress and Productivity: Survey Evidence from the Aviation Industry", *Journal of Air Transport Management*, 50, 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2015.10.003>
- Al-Fudail, M. and Mellar, H. (2008). "Investigating Teacher Stress When Using Technology", *Computers and Education*, 51(3), 1103-1110. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2007.11.004>
- Arnetz, B.B. and Wiholm, C. (1997). "Technological Stress: Psychophysiological Symptoms in Modern Offices", *Journal of Psychosomatic Research*, 43(1), 35-42. [https://doi.org/10.1016/s0022-3999\(96\)00303-3](https://doi.org/10.1016/s0022-3999(96)00303-3)
- Ayyagari, R., Grover, V. and Purvis, R. (2011). "Technostress: Technological Antecedents and Implications", *MIS Quarterly*, 35(4), 831-858. <https://doi.org/10.2307/41409963>
- Aziz, N.N.A. and Yazid, Z.N.A. (2021). "Exploratory Factor Analysis of Technostress among University Students", *International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development*, 10(3), 161-175. <https://doi.org/10.6007/ijarped/v10-i3/10396>
- Barley, S. (1990). "Images of Imaging: Notes on Doing Longitudinal Field Work", *Organization Science*, 1(3), 220-249.
- Berger, M., Schäfer, R., Schmidt, M., Regal, C. and Gimpel, H. (2023). "How to Prevent Technostress at the Digital Workplace: A Delphi Study", *Journal of Business Economics*, 94, 1051-1113. <https://doi.org/10.1007/s11573-023-01159-3>
- Boonjing, V. and Chanvarasuth, P. (2017). "Risk of Overusing Mobile Phones: Technostress Effect", *Procedia Computer Science*, 111, 196-202. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.06.053>
- Bowker, G. (2019). "The Computerization Time Crunch", *IEEE Computer*, 52, 67-71.
- Braverman, H. (1974). *Labor and Monopoly Capital*, Monthly Review Press.
- Brillhart, P.E. (2004). "Technostress in the Workplace: Managing Stress in the Electronic Workplace", *Journal of American Academy of Business, Cambridge*, 5, 302-307.
- Brod, C. (1984). "Technostress: The Human Cost of the Computer Revolution", Addison-Wesley.
- Brown, R., Duck, J. and Jimmieson, N. (2014). "E-mail in the Workplace: The Role of Stress Appraisals and Normative Response Pressure in the Relationship between E-Mail Stressors and Employee Strain", *International Journal of Stress Management*, 21(4), 325-347.
- Bryman, A. and Cramer, D. (1997). "Quantitative Data Analysis with SPSS for Windows: A Guide for Social Scientists", Routledge.
- Bucher, E., Fieseler, C. and Suphan, A. (2013). "The Stress Potential of Social Media in the Workplace", *Information, Communication and Society*, 16(10), 1639-1667. <https://doi.org/10.1080/1369118X.2012.710245>
- Burke, M.K. (2008). "The Incidence of Technological Stress among Baccalaureate Nurse Educators Using Technology during Nurse Preparation and Delivery", *New Education Today*, 29(1), 57-64.
- Calvo-Porrà, C. and Pesqueira-Sanchez, R. (2022). "Does the Use of Technology Create Technology Engagement? Comparing Three Structural Models", *Spanish Journal of Marketing - ESIC*, 26(3), 385-404. <https://doi.org/10.1108/SJME-03-2022-0033>
- Cannon, W.B. (1935). "Stresses and Strains of Homeostasis", *American Journal of the Medical Sciences*, 189(1), 13-14. <https://doi.org/10.1097/00000441-193501000-00001>
- Carlotto, M.S., Wendt, G.W. and Jones, A.P. (2017). "Technostress, Career Commitment, Satisfaction with Life, and Work-Family Interaction among Workers in Information and Communication Technologies", *Actualidades en Psicología*, 31(122), 91-102. <https://doi.org/10.15517/ap.v31i122.22729>
- Cheng, C., Li, A.Y. and Zeng, C. (2015). "Internet Addiction and Psychosocial Maladjustment: Avoidant Coping and Coping Inflexibility As Psychological Mechanisms", *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 18(9), 561-568. <https://doi.org/10.1089/cyber.2015.0117>
- Curley, K.F. and Pyburn, P.J. (1982). "'Intellectual' Technologies: The Key to Improving White-Collar Productivity", *Sloan Management Review*, 23, 31-39.
- Çoklar, A.N. and Şahin, Y.L. (2011). "Technostress Levels of Social Network Users Based on ICTs in Turkey", *European Journal of Social Sciences*, 23(2), 171-182.
- Danziger, J.N. (1985). "Social Science and the Social Impacts of Computer Technology", *Social Science Quarterly*, 66(1), 3-21.
- Davis, F.D. (1989). "Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology", *MIS Quarterly*, 13(3), 319-342. <https://doi.org/10.2307/249008>
- Davis, T R.V. (1991). "Information Technology and White-Collar Productivity", *Academy of Management Executive*, 5(1), 55-67. <https://doi.org/10.5465/ame.1991.4274456>

- Estrada-Muñoz, C., Castillo, D., Vega-Muñoz, A. and Boada-Grau, J. (2020). "Teacher Technostress in the Chilean School System", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(15), 5280. <https://doi.org/10.3390/ijerph17155280>
- Fuglseth, A.M. and Sørensen, Ø. (2014). "The Effects of Technostress within the Context of Employee Use of ICT", *Computers in Human Behavior*, 40, 161-170. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.07.040>
- Galluch, P.S., Grover, V. and Thatcher, J.B. (2015). "Interrupting the Workplace: Examining Stressors in An Information Technology Context", *Journal of the Association for Information Systems*, 16(1), 1-47. <https://doi.org/10.17705/1jais.00387>
- Golz, C., Peter, K.A., Müller, T., Mutschler, J., Zwakhalen, S. and Hahn, S. (2021). "Technostress and Digital Competence among Health Professionals in Swiss Psychiatric Hospitals: Cross-Sectional Study", *JMIR Mental Health*, 8(11), e31408. <https://doi.org/10.2196/31408>
- González-López, Ó.R., Buenadicha-Mateos, M. and Hernández, M.I.S. (2021). "Overwhelmed by Technostress? Sensitive Archetypes and Effects in Times of Forced Digitalization", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(8), 4216. <https://doi.org/10.3390/ijerph18084216>
- Harris, K.J., Harris, R.B., Valle, M., Carlson, J.R., Carlson, D.S., Zivnuska, S. and Wiley, B. (2021). "Technostress and the Entitled Employee: Impacts on Work and Family", *Information Technology and People*, 35(3), 1073-1095. <https://doi.org/10.1108/itp-07-2019-0348>
- Hsiao, K.L. (2017). "Compulsive Mobile Application Usage and Technostress: The Role of Personality Traits", *Online Information Review*, 41(2), 272-295. <https://doi.org/10.1108/OIR-03-2016-0091>
- Hsiao, K.L., Shu, Y. and Huang, T.C. (2017). "Exploring the Effect of Compulsive Social App Usage on Technostress and Academic Performance: Perspectives from Personality Traits", *Telematics and Informatics*, 34(2), 679-690. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2016.11.001>
- Hung, W.H., Chen, K. and Lin, C.P. (2015). "Does the Proactive Personality Mitigate the Adverse Effect of Technostress on Productivity in the Mobile Environment?", *Telematics and Informatics*, 32(1), 143-157. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2014.06.002>
- Ibrahim, H. and Othman, N.Z. (2014). "The Influence of Techno Stress and Organizational-Related Support on User Satisfaction in Government Organizations: A Proposed Model and Literature Review", *Information Management and Business Review*, 6(2), 63-71. <https://doi.org/10.22610/imbr.v6i2.1101>
- Jena, R.K. and Mahanti, P.K. (2014). "An Empirical Study of Technostress among Indian Academicians", *International Journal of Education and Learning*, 3(2), 1-10. <https://doi.org/10.14257/ijel.2014.3.2.01>
- Karr-Wisniewski, P. and Lu, Y. (2010). "When More Is Too Much: Operationalizing Technology Overload and Exploring Its Impact on Knowledge Worker Productivity", *Computers in Human Behavior*, 26(5), 1061-1072. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2010.03.008>
- Khuzaini, K. and Zamrudi, Z. (2021). "Technostress among Marketing Employee during the COVID-19 Pandemic: Exploring the Role of Technology Usability and Presenteeism", *JEMA: Jurnal Ilmiah Bidang Akuntansi dan Manajemen*, 18(1), 36-50. <https://doi.org/10.31106/jema.v18i1.10050>
- Kim, H.J., Lee, C.C., Yun, H. and Shin, I.K. (2015). "An Examination of Work Exhaustion in the Mobile Enterprise Environment", *Technological Forecasting and Social Change*, 100, 255-266. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.009>
- King, J.L. and Ehrenberg, A.J. (2020). "The Productivity Vampires", *Information Systems Frontiers*, 22(1), 11-15. <https://doi.org/10.1007/s10796-019-09943-9>
- Kling, R. and Scacchi, W. (1982). "The Web of Computing: Computing Technology as Social Organization", *Advances in Computers*, 21, 1-90. [https://doi.org/10.1016/S0065-2458\(08\)60567-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2458(08)60567-7)
- Kotek, M. and Vranješ, I. (2022). "Exploring the Antecedents of Technostress at Work: A Meta-Analysis", *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1666834/v1>
- Kummer, T.F., Recker, J. and Bick, M. (2017). "Technology-Induced Anxiety: Manifestations, Cultural Influences, and Its Effect on the Adoption of Sensor-Based Technology in German and Australian Hospitals", *Information and Management*, 54(1), 73-89. <https://doi.org/10.1016/j.im.2016.04.002>
- Lee, J. (2016). "Does Stress from Cell Phone Use Increase Negative Emotions at Work?", *Social Behavior and Personality*, 44(5), 705-715. <https://doi.org/10.2224/sbp.2016.44.5.705>
- Liff, S. (1990). "Clerical Workers and Information Technology: Gender Relations and Occupational Change", *New Technology, Work and Employment*, 5(1), 4-28.
- Liu, C.F., Cheng, T.J. and Chen, C.T. (2019). "Exploring the Factors That Influence Physician Technostress from Using Mobile Electronic Medical Records", *Informatics for Health and Social Care*, 44(1), 92-104. <https://doi.org/10.1080/17538157.2017.1364250>

- Lu, S., Wei, F. and Li, G. (2021). "The Evolution of the Concept of Stress and the Framework of the Stress System", *Cell Stress*, 5(6), 76. <https://doi.org/10.15698/cst2021.06.250>
- Nisafani, A.S., Kiely, G. and Mahony, C. (2020). "Workers' Technostress: A Review of Its Causes, Strains, Inhibitors, and Impacts", *Journal of Decision Systems*, 29(sup1), 243-258. <https://doi.org/10.1080/12460125.2020.1796286>
- Norulkamar, U., Ahmad, U. and Amin, S.M. (2012). "The Dimensions of Technostress among Academic Librarians", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 65, 266-271. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.11.121>
- Okolo, D., Kamarudin, S. and Norulkamar, U. (2018). "An Exploration of the Relationship between Technostress, Employee Engagement and Job Design from the Nigerian Banking Employee's Perspective", *Management Dynamics in the Knowledge Economy*, 6(4), 511-530. <https://doi.org/10.25019/MDKE/6.4.01>
- Ragu-Nathan, T.S., Tarafdar, M., Ragu-Nathan, B.S. and Tu, Q. (2008). "The Consequences of Technostress for End Users in Organizations: Conceptual Development and Empirical Validation", *Information Systems Research*, 19(4), 417-433. <https://doi.org/10.1287/isre.1070.0165>
- Riedl, R. (2013). "On the Biology of Technostress: Literature Review and Research Agenda", *The Database for Advances in Information Systems*, 44(1), 18-55. <https://doi.org/10.1145/2436239.2436242>
- Riedl, R. and Léger, P.-M. (2016). "Fundamentals of Neurosis: Information Systems and the Brain", Springer.
- Riedl, R., Kindermann, H., Auinger, A. and Javor, A. (2012). "Technostress from A Neurobiological Perspective: System Breakdown Increases the Stress Hormone Cortisol in Computer Users", *Business and Information Systems Engineering*, 4(2), 61-69. <https://doi.org/10.1007/s12599-012-0207-7>
- Sagarin, B.J., Britt, M.A., Heider, J.D., Wood, S.E. and Lynch, J.E. (2003). Bartering Our Attention: The Distraction and Persuasion Effects of On-Line Advertisements. *International Journal of Cognitive Technology*, 8(2), 4-17.
- Saka, A.O., Alaba, A.O. and Hassan, O.A. (2020). "The Impact of Technostressors on the Job Productivity of Senior Secondary Teachers in Nigeria", *Journal of Teaching and Teacher Education*, 8(2), 106-113. <https://doi.org/10.12785/jtte/080205>
- Saleem, F. and Malik, M.I. (2023). "Technostress, Quality of Work Life, and Job Performance: A Moderated Mediation Model", *Behavioral Sciences*, 13(12), 1014. <https://doi.org/10.3390/bs13121014>
- Sarabadani, J., Comepeau, D.R. and Carter, M. (2020). "An Investigation of IT Users' Emotional Responses to Technostress Creators", *Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences* (Access: 01.10.2024).
- Sellberg, C. and Susi, T. (2014). "Technostress in the Office: A Distributed Cognition Perspective on Human-Technology Interaction", *Cognition, Technology and Work*, 16(2), 187-201. <https://doi.org/10.1007/s10111-013-0256-9>
- Shotton, M.A. (2007). "The Costs and Benefits of 'Computer Addiction'", *Behaviour and Information Technology*, 10(3), 219-230. <https://doi.org/10.1080/01449299108924284>
- Shu, Q., Tu, Q. and Wang, K. (2011). "The Impact of Computer Self-Efficacy and Technology Dependence on Computer-Related Technostress: A Social Cognitive Theory Perspective", *International Journal of Human-Computer Interaction*, 27(10), 923-939. <https://doi.org/10.1080/10447318.2011.55531>
- Spira, J.B. and Feintuch, J.B. (2005). "The Cost of Not Paying Attention: How Interruptions Impact Knowledge Worker Productivity", Basex.
- Sumiyana, S. and Sriwidharmanely, S. (2020). "Mitigating the Harmful Effects of Technostress: Inducing Chaos Theory in An Experimental Setting", *Behaviour and Information Technology*, 39(10), 1079-1093. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2019.1641228>
- Tak, S. and Park, S. (2016). "A Study of the Connected Smart Worker's Techno-Stress", *Procedia Computer Science*, 91, 725-733. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.07.065>
- Tams, S. (2017). "Linking User Age and Stress in the Interruption Era: The Role of Computer Experience", *Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences*, 5660-5667, Association for Information Systems.
- Tams, S. and Dulipovici, A. (2019). "The Creativity Model of Age and Innovation with IT: How to Counteract the Effects of Age Stereotyping on User Innovation", *Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, 6549-6558. <https://hdl.handle.net/10125/60089>
- Tams, S., Ahuja, M., Thatcher, J. and Grover, V. (2020). "Worker Stress in the Age of Mobile Technology: The Combined Effects of Perceived Interruption Overload and Worker Control", *The Journal of Strategic Information Systems*, 29(1), 101595. <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2020.101595>
- Tams, S., Thatcher, J.B. and Grover, V. (2018). "Concentration, Competence, Confidence, and Capture: An Experimental Study of Age, Interruption-Based Technostress, and Task Performance", *Journal of the Association for Information Systems*, 19(9), 857-908. <https://doi.org/10.17705/1jais.00511>
- Tarafdar, M., Pullins, E.B. and Ragu-Nathan, T.S. (2014). "Technostress: Negative Effect on Performance and Possible Mitigations", *Information Systems Journal*, 25(2), 103-132. <https://doi.org/10.1111/isj.12042>

- Tarafdar, M., Tu, Q., Ragu-Nathan, B.S. and Ragu-Nathan, T.S. (2007). "The Impact of Technostress on Role Stress and Productivity", *Journal of Management Information Systems*, 24(1), 301-328. <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240109>
- Tarafdar, M., Tu, Q., Ragu-Nathan, T.S. and Ragu-Nathan, B.S. (2011). "Crossing to the Dark Side: Examining Creators, Outcomes, and Inhibitors of Technostress", *Communications of the ACM*, 54(9), 113-120. <https://doi.org/10.1145/1995376.1995403>
- Thatcher, J.B. and Perrewé, P.L. (2002). "An Empirical Examination of Individual Traits As Antecedents to Computer Anxiety and Computer Self-Efficacy", *MIS Quarterly*, 26(4), 381-396. <https://doi.org/10.2307/4132314>
- Torkzadeh, G. and Doll, W. (1999). "The Development of a Tool for Measuring the Perceived Impact of Information Technology on Work", *Omega*, 27(3), 327-339. [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(98\)00049-8](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(98)00049-8)
- Tuan, L.T. (2022). "Employee Mindfulness and Proactive Coping for Technostress in the COVID-19 Outbreak: The Roles of Regulatory Foci, Technostress, and Job Insecurity", *Computers in Human Behavior*, 129, 107148. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2021.107148>
- Turel, O. and Gaudioso, F. (2018). "Techno-Stressors, Distress and Strain: The Roles of Leadership and Competitive Climates", *Cognition, Technology and Work*, 20(2), 309-324. <https://doi.org/10.1007/s10111-018-0461-7>
- Vallone, F., Galvin, J., Cattaneo Della Volta, M.F., Akhtar, A., Chua, S., Ghio, E. and Zurlo, M.C. (2023). "Technostress and Academic Motivation: Direct and Indirect effects on University Students' Psychological Health", *Frontiers in Psychology*, 14, 1211134. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1211134>
- Wang, K., Shu, Q. and Tu, Q. (2008). "Technostress under Different Organizational Environments: An Empirical Investigation", *Computers in Human Behavior*, 24(6), 3002-3013. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2008.05.007>
- Wang, Q., Zhong, Y., Zhao, G., Song, R., and Zeng, C. (2023). "Relationship among Content Type of Smartphone Use, Technostress, and Sleep Difficulty: A Study of University Students in China", *Education and Information Technologies*, 28(3), 1697-1714. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11222-1>
- Weick, K.E. (1990). "Technology As Equivoque: Sensemaking in New Technologies", , *Technology and Organizations*, (Editors: P.S. Goodman and L.S. Sproull), 1-44, Jossey-Bass.
- Weinstein, A. and Lejoyeux, M. (2010). "Internet Addiction or Excessive Internet Use", *American Journal of Drug and Alcohol Abuse*, 36(5), 277-283. <https://doi.org/10.3109/00952990.2010.491880>
- Westergren, U.H., Mähler, V. and Jadaan, T. (2024). "Enabling Digital Transformation: Organizational Implementation of the Internet of Things", *Information and Management*, 61(1), 103996. <https://doi.org/10.1016/j.im.2024.103996>
- Yang, R-J., Yang, J-Y., Yuan, H-R. and Li, J-T. (2017). "Techno-Stress of Teachers: An Empirical Investigation from China", *The 3rd International Conference on Education and Social Development (ICESD 2017)*, Xi'an, China.
- Yates, J. (1988). "Control Through Communication: The Rise of System in American Management", Johns Hopkins University Press.
- Yates, J. and Van Maanen, J.(1996). "Editorial Notes for the Special Issue", *Information Systems Research*, 7(4), 1-4.
- Yin, P., Ou, C.X.J., Davison, R.M. and Wu, J. (2018). "Coping with Mobile Technology Overload in the Workplace", *Internet Research*, 28(5), 1189-1212. <https://doi.org/10.1108/IntR-01-2017-0016>
- Yun, H., Kettinger, W.J. and Lee, C.C. (2012). "A New Open Door: The Smartphone's Impact on Work-to-Life Conflict, Stress, and Resistance", *International Journal of Electronic Commerce*, 16(4), 121-152. <https://doi.org/10.2753/JEC1086-4415160405>
- Zhao, X., Xia, Q. and Huang, W. (2020). "Impact of Technostress on Productivity from the Theoretical Perspective of Appraisal and Coping Processes", *Information and Management*, 57(8), 103265. <https://doi.org/10.1016/j.im.2020.103265>
- Zuboff, S. (1988). "In the Age of the Smart Machine: The Future of Work and Power", Basic Books.



T.C. SANAYİ VE
TEKNOLOJİ BAKANLIĞI

#MİLLİ
TEKNOLOJİ
HAMLESİ

STRATEJİK ARAŞTIRMALAR VE VERİMLİLİK GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

