

AKILLI SİSTEMLER VE DİJİTALLEŞEN GELECEK:

Sosyo-Teknik Bir Analiz

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Serkan GÜLDAL



IKSAD
Publishing House

AKILLI SİSTEMLER VE DİJİTALLEŞEN GELECEK:

Sosyo-Teknik Bir Analiz

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Serkan GÜLDAL

Yazarlar

Doç. Dr. Abdullah BAYCAR

Doç. Dr. Ebru AKKEMİK

Doç. Dr. Önder KABAŞ

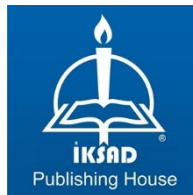
Dr. Öğr. Üyesi Şule Azime YENİÇERİ

Arş. Gör. İrem Nur İLBAŞ

Arş. Gör. Yeşim ALTAY

Arş. Gör. Ayşe PAKSOY

Alperen ÜNLÜ



Copyright © 2026 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed
or transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or
mechanical methods, without the prior written permission of the publisher,
except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial
uses permitted by copyright law. Institution of Economic Development and
Social

Researches Publications®
(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)
TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75
USA: +1 631 685 0 853
E mail: iksadyayinevi@gmail.com
www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.
Iksad Publications – 2026©

ISBN: 978-625-378-630-4
Cover Design: İbrahim KAYA
April / 2026
Ankara / Türkiye
Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....1

CHAPTER 1

DIGITAL TWIN AND INDUSTRY 4.0 APPLICATIONS IN SMART AGRICULTURE:

A BIBLIOMETRIC ANALYSIS

Res. Assist. İrem Nur İLBAŞ

Res. Assist. Yeşim ALTAY

Res. Assist. Ayşe PAKSOY.....5

CHAPTER 2

FORECASTING ECONOMIC INEQUALITY IN THE UNITED KINGDOM USING MACHINE LEARNING: A DUAL- SCENARIO ANALYSIS BASED ON GINI COEFFICIENT

Res. Asst. Ayşe PAKSOY

Res. Asst. Yeşim ALTAY

Res. Asst. İrem Nur İLBAŞ.....33

BÖLÜM 3

AIR FRYER (HAVA FRİTÖZÜ) İLE PIŞİRME YÖNTEMİNİN GIDALARIN FİZİKOKİMYASAL VE BESİNSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Doç. Dr. Ebru AKKEMİK

Dr. Öğr. Üyesi Şule Azime YENİÇERİ

Doç. Dr. Abdullah BAYCAR.....59

BÖLÜM 4

KENTSEL PLANLAMA VE YENİLENEBİLİR ENERJİ ENTEGRASYONU

Alperen ÜNLÜ

Doç. Dr. Önder KABAŞ.....71

ÖNSÖZ

21. yüzyılda teknolojik ilerleme, artık sadece izole bir mühendislik başarısı değil; toplumsal yaşamın her katmanına nüfuz eden, insan ve makine etkileşimini yeniden tanımlayan "sosyo-teknik" bir dönüşüm sürecidir. Günümüzde "akıllı" sistemler; tarladaki mahsulün verimliliğinden mutfağımızdaki pişirme yöntemlerine, ekonomik adaletsizliklerin bilimsel tahmininden kentsel enerji şebekelerinin otonom yönetimine kadar geniş bir yelpazede geleceğimizi şekillendirmektedir. Elinizdeki bu eser, "Akıllı Sistemler ve Dijitalleşen Gelecek: Sosyo-Teknik Bir Analiz" başlığı altında, bu karmaşık dönüşümü disiplinler arası bir perspektifle inceleyen dört temel sütun üzerine inşa edilmiştir:

Bölüm 1: Digital Twin and Industry 4.0 Applications in Smart Agriculture: A Bibliometric Analysis – Bu bölüm, hızla artan dünya nüfusu ve iklim değişikliği tehdidi karşısında tarımın geçirdiği dijital evrimi merkezine almaktadır. Yazarlar, Web of Science veri tabanından süzülen 234 öncü çalışmayı analiz ederek, alandaki bilimsel üretimin yıllık %35,11 gibi çarpıcı bir hızla büyüdüğünü ortaya koymaktadır. Çalışma; Dijital İkiz (Digital Twin) ve IoT teknolojilerinin sadece birer verimlilik aracı değil, aynı zamanda mahsul sağlığını gerçek zamanlı izleyen ve kaynak israfını minimize eden stratejik birer "dirençlilik" mekanizması olduğunu kanıtlamaktadır. Tarımın geleneksel yöntemlerden veriye dayalı akıllı endüstrilere dönüşümü, küresel gıda güvenliğinin teminatı olarak sunulmaktadır.

Bölüm 2: Forecasting Economic Inequality in The United Kingdom Using Machine Learning: A Dual-Scenario Analysis Based on Gini Coefficient – Sosyal refahın algoritmik öngörüsü teknolojinin sosyal adalet üzerindeki etkisini inceleyen bu bölümde, Birleşik Krallık'taki gelir eşitsizliği (Gini katsayısı) modern Makine Öğrenmesi (RF ve XGBoost) algoritmalarıyla mercek altına alınmaktadır. Geleneksel ARIMA modellerinin aksine, bu "akıllı" sistemlerin karmaşık ve doğrusal olmayan sosyal dinamikleri %1,33 gibi düşük hata paylarıyla tahmin edebildiği gösterilmektedir. 2030 projeksiyonları, mevcut politikaların eşitsizliği azaltmada yetersiz kalabileceğine dair bir "erken uyarı sistemi" sunarken, teknolojinin kanıta dayalı politika tasarımı için vazgeçilmez bir araç olduğu vurgulanmaktadır.

Bölüm 3: Air Fryer (Hava Fritözü) ile Pişirme Yönteminin Gıdaların Fizikokimyasal ve Besinsel Özellikleri Üzerindeki Etkileri – Mutfaktaki

görünmez devrim dijitalleşmenin ev içine ve bireysel sağlığa yansması, son on yılın popüler teknolojisi olan hava fritözleri (air fryer) üzerinden analiz edilmektedir. RUSH (Radiant and Upstream Heating) teknolojisinin derin yağda kızartmaya kıyasla yağ içeriğini %80, kanserojen bir bileşen olan akrilamid oluşumunu ise %90 oranında azaltabildiği bilimsel verilerle ortaya konmaktadır. Bölüm, bu dijital mutfak aletlerinin sadece birer konfor nesnesi olmadığını, besin değerlerini koruyarak halk sağlığına nasıl katkı sunduğunu bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmektedir.

Bölüm 4: Kentsel Planlama ve Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu –

Kitabın son bölümü, tüm bu akıllı sistemleri Akıllı Şehir vizyonu altında birleştirmektedir. Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Yapay Zekâ destekli kentsel altyapıların, yenilenebilir enerji entegrasyonu için nasıl bir omurga oluşturduğu tartışılmaktadır. Vatandaşların "pasif tüketici" olmaktan çıkıp "aktif üretici-tüketici" (prosumer) haline geldiği Yenilenebilir Enerji Toplulukları modeli, karbon nötr bir gelecek için stratejik bir zorunluluk olarak sunulmaktadır. Yazarlar, geleneksel metriklerin ötesine geçerek, şehirlerin aşırı iklim olaylarına karşı hızla toparlanabilmesini sağlayan "iklim dirençliliği" (resilience) kavramını geleceğin planlama felsefesi olarak tanımlamaktadır.

Bu kitabın içeriği, katkı sunan yazarlar tarafından hazırlanmış olup her türlü bilgi, kaynak ve sorumluluk uzman yazarların kendilerine aittir. Yazarlar, çalışmalarını ve araştırmalarını özgün ve güvenilir bir içerik olarak sunmaya özen göstermiş; her bir bölüm ilgili uzmanlık alanında deneyimli isimler tarafından bilimsel kaynaklara dayalı olarak hazırlanmıştır. Bu nedenle, sunulan bilgilerin doğruluğu ve güvenilirliği yazarlar tarafından sağlanmaktadır. Ayrıca, kitapta ifade edilen fikirler ve görüşler, yazarların araştırmalarına dayalı kişisel değerlendirmeleridir; editör veya yayınevinin resmi görüşlerini yansıtmaz. Editör ve yayınevi, içerik oluşturma ve düzenleme sürecinde rehberlik etmiş olabilir; ancak kitapta yer alan her fikir ve yorum yazarlara aittir.

Bu kitap projesi, farklı disiplinlerden uzmanların bilgi ve deneyimlerini bir araya getiren, yoğun emek ve titiz bir editöryal sürecin ürünüdür. Bu çalışmanın yayımlanmasını mümkün kılan İKSAD Yayınevi'ne, profesyonellikleri için en içten teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca katkı sunan tüm yazar ve hakemlere, bilimsel titizlikleri için müteşekkirimiz.

Bu eser, ortak aklın bir sonucu olarak hem bugünün sorunlarına çözüm üretmeyi hem de yarının olanaklarını etik ve kapsayıcı bir çerçevede keşfetmeyi amaçlamaktadır. Dileriz ki bu kitap, yeni projelere ve nitelikli bilimsel tartışmalara kapı aralar.

Dr. Öğr. Üyesi Serkan Güldal
Editör

CHAPTER 1

**DIGITAL TWIN AND INDUSTRY 4.0 APPLICATIONS IN
SMART AGRICULTURE:
A BIBLIOMETRIC ANALYSIS**

Res. Assist. İrem Nur İLBAŞ¹

Res. Assist. Yeşim ALTAY²

Res. Assist. Ayşe PAKSOY³

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.19497082>

1 Istanbul University-Cerrahpasa, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, İstanbul, Türkiye. irem.ilbas@iuc.edu.tr, ORCID ID: 0009-0009-1004-0229

2 Istanbul University-Cerrahpasa, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, İstanbul, Türkiye. yesim.altay@iuc.edu.tr, ORCID ID: 0009-0002-0964-3099

3 Istanbul University-Cerrahpasa, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, İstanbul, Türkiye. ayse.paksoy@iuc.edu.tr, ORCID ID: 0009-0003-6104-2693

INTRODUCTION

Technological progress, changing food needs, and the growing need for efficient resource use have all had a big impact on farming practices. The world is still dealing with big problems like climate change, a rapidly growing population, and worries about food security. The agricultural techniques have to be improved to make them more resilient. Smart agriculture emphasizes the application of digital technologies within the agricultural sector. It possesses the capacity to tackle the above described issues. Data can assist an individual in making more informed judgments. It aids in enhancing decision-making for the effective allocation of resources (Beddington et al., 2012; Sahu et al., 2020; Safdar et al., 2024).

With the use of advanced agricultural technologies such as sensors, artificial intelligence, robotics, and cloud computing, farmers are now able to monitor crop conditions in real time and automate various farming operations. These technologies enable continuous data collection and analysis, allowing farmers to detect potential issues such as pests, diseases, or water stress at an early stage. Moreover, the integration of these digital tools supports precision agriculture practices by optimizing resource use, reducing waste, and increasing productivity. As a result, farming processes become more efficient, sustainable, and less dependent on manual intervention.

The agriculture sector is getting digital quite quickly, mostly because Industry 4.0 technology is growing so quickly. Industry 4.0 technologies encompass a variety of advanced tools and systems, including artificial intelligence, cyber-physical systems, big data analytics, and internet-connected devices. Industry 4.0 technology can change several businesses so much that they can create smart industries (Sharma et al., 2024). Industry 4.0 technology helps in precision agriculture, the creation of autonomous irrigation systems, and the creation of models for predicting crop yields, among other methods. The integration of Industry 4.0 technology with agricultural activities has helped in the management of agricultural activities and the creation of sustainable environments through the reduction of waste and the optimization of agricultural activities (Balyan et al., 2024; Dilshad et al., 2025).

The use of digital twin technology has become very popular in recent times, and this is mainly due to the ability of the technology to create digital models of real-world systems. Digital twin technology creates digital models

that are able to receive data from various sources and use the data to improve the performance of real-world systems (Nasirahmadi & Hensel, 2022). Digital twin technology has the ability to create digital models of farms, crops, livestock, and the equipment used by farmers. The ability to create digital models of farms, crops, and the equipment used by farmers has allowed the use of predictive analytics, scenario modeling, and the monitoring of agricultural activities (Peladarinos et al., 2023; Escribà-Gelonch et al., 2024). Digital twin technology has the ability to improve the optimization of agricultural activities, the management of pests, the optimization of irrigation systems, the monitoring of soil, and the management of livestock (Jeong et al., 2023; Ghazvini et al., 2024).

There has been a clear rise in research on digital twin systems and Industry 4.0 applications in agriculture in the last several years. The main reason for this increased interest is the rapid progress of technology. The growing volume of research has resulted in an extensive array of books and papers across various disciplines, including computer science, environmental science, agricultural engineering, and data analytics. As the volume of studies increases, it is imperative to systematically examine the framework of this discipline to identify the principal contributors, their collaborative dynamics, emerging themes, and prospective research directions.

Bibliometric analysis has emerged as an effective method for examining scientific literature and identifying research trends in rapidly evolving disciplines. Bibliometric studies provide a comprehensive analysis of the intellectual framework and topic evolution within a research domain by examining publishing patterns, citation structures, collaboration networks, and keyword co-occurrences (Leong et al., 2020; Wang, 2025). Bibliometric approaches assist scholars in identifying novel concepts, significant authors, institutions, and journals, while also elucidating the interconnections within knowledge. These findings augment our understanding of the progression of scientific knowledge and aid researchers and policymakers in recognizing new research possibilities.

A thorough bibliometric study that concurrently encompasses Industry 4.0 technologies, digital twin systems, and smart agricultural research trends is currently lacking, despite certain review studies examining smart agriculture technology and digital twin applications. Recent studies mostly focus on

individual technologies, such as precision agriculture, IoT-based farming systems, and digital twin applications, in isolation (Dawn et al., 2023; Peladarinos et al., 2023). However, the integration of these technologies within the overarching framework of Industry 4.0 and smart agriculture has not been sufficiently analyzed using rigorous bibliometric methods.

This study aims to thoroughly analyze research on digital twin and Industry 4.0 applications in smart agriculture by examining publishing trends, collaboration patterns, citation links, and keyword relationships. The analysis clarifies the development of this interdisciplinary research field and highlights potential directions for future studies.

This research provides several significant contributions to the field. Initially, it provides a synopsis of the extensive research conducted on digital twins and Industry 4.0 within the framework of smart agriculture. Secondly, it identifies the authors, publications, nations, and organizations that have significantly influenced this area of research. Third, it examines the evolution of the field's intellectual framework by analyzing issue clusters and collaborative research networks. The paper identifies novel research domains and potential future directions that may enhance the intelligence and sustainability of agricultural systems.

1. METHODOLOGY

Bibliometric analysis can also be used as a quantitative method to study the evolution of the literature in a given area. Bibliometric analysis is different from the traditional literature review method in that a quantitative methodological approach is used to study and evaluate the literature in a given area. Indicators help in the assessment and monitoring of the evolution over time in a given area of study, the identification of important contributions, and the discovery of new areas of research interests. Bibliometric analysis is a fundamental approach for understanding the comprehensive structure and development of scientific research (Quesado et al., 2025).

Most often, the bibliometric method relies on the use of extensive databases containing academic information in a systematic order. The databases that are mostly used are the Web of Science and the Scopus databases, as these databases contain a wide range of information and are more reliable in terms of citations (Caputo & Kargina, 2022). Clarivate Analytics developed the Web of

Science database, which includes a number of citation indexes. The Web of Science platform integrates numerous citation indexes covering a wide range of disciplines in the academic world. These citation indexes include the Emerging Sources Citation Index, Conference Proceedings Citation Index, Books Citation Index, Arts and Humanities Citation Index, Social Sciences Citation Index, and the Science Citation Index Expanded. Another significant bibliographic database used in the scientific research community is Scopus. The database was developed by Elsevier in 2004 and provides comprehensive coverage of academic papers by integrating the indexing technology in a single system (Pranckute, 2021).

The aim of the present paper is to identify the existing research in the area of digital twin technology and Industry 4.0 in smart agriculture. The main source for the data collection was the Web of Science Core Collecting Database. The results of the topic-based search (TS) query showed the presence of 234 relevant publications. The obtained results were exported in BibTeX format and analyzed using the Bibliometrix R package in R Studio environment version 4.2.2. Additionally, VOS viewer software was used for the creation of the bibliometric networks and the analysis of the collaboration in the scientific literature.

2. RESULTS AND DISCUSSION

2.1. Data Analysis

Table 1 presents the fundamental descriptive statistics of the final dataset utilized for the bibliometric analysis. The cumulative sum of documents published from 2017 to 2026 is 234. The study utilized 121 separate sources. The yearly growth rate of documents published in this field is 35.11%. This indicates that the research domain is rapidly expanding. The mean age of the published materials utilized in the study is 2.82 years. This indicates that the research domain is quite nascent and continuously developing. The study utilized a total of 19,646 references. The survey included 539 Keywords Plus and 929 author keywords. There are 1,201 authors of the recognized publications. Only eight documents have single authors, while the others feature numerous contributors. The mean number of co-authors per document is 5.58. The rate of international co-authorship is 38.46%.

It primarily consists of journal papers, amounting to 153 documents. The majority comprises review pieces, amounting to 77 items. It consists of a finite number of book chapters, amounting to 4 documents. The mean citation rate is significantly elevated at 41.3 citations per document. This signifies that the academic discipline is increasing in prominence within the scholarly community.

Table 1. Main Information About the Data

DESCRIPTION	RESULTS
Timespan	2017:2026
Sources (Journals, Books, etc.)	121
Documents	234
Annual Growth Rate (%)	35.11
Document Average Age	2.82
Average citations per doc	41.3
References	19,646
Document Contents	
Keywords Plus (ID)	539
Author's Keywords (DE)	929
Authors	
Authors	1,201
Authors of single-authored docs	8
Authors Collaboration	
Single-authored docs	8
Co-Authors per Doc	5.58
International co-authorships (%)	38.46
Document Types	
Article	153
Book Chapter	4
Review	77

2.2. Annual Scientific Production

As shown in Figure 1, scientific productivity in the field displays a distinctive upward trajectory between 2019 and 2025. Publication volume was initially modest in 2019 and 2020, reflecting the early exploratory stage of research related to Industry 4.0 and digital transformation in smart agriculture. A steady increase emerged beginning in 2021, suggesting growing academic interest and broader recognition of the research topic. A more pronounced acceleration is observed from 2022 onward, marking a period of intensified scholarly activity.

The growing body of research in this field is mainly due to the growing use of data-driven farming systems and advanced digital technology. Digital twin models, Internet of Things frameworks, and artificial intelligence are just a few of the new technologies that are part of Industry 4.0. These have had a big impact on how farms work today.

The sharp rise in publication output between 2023 and 2025 indicates that the field has transitioned from an emerging research niche toward a more established and actively expanding area of inquiry. The higher trend observed in the annual distribution of publications underscores the dynamic and swiftly evolving nature of research on digital transformation and smart agriculture.

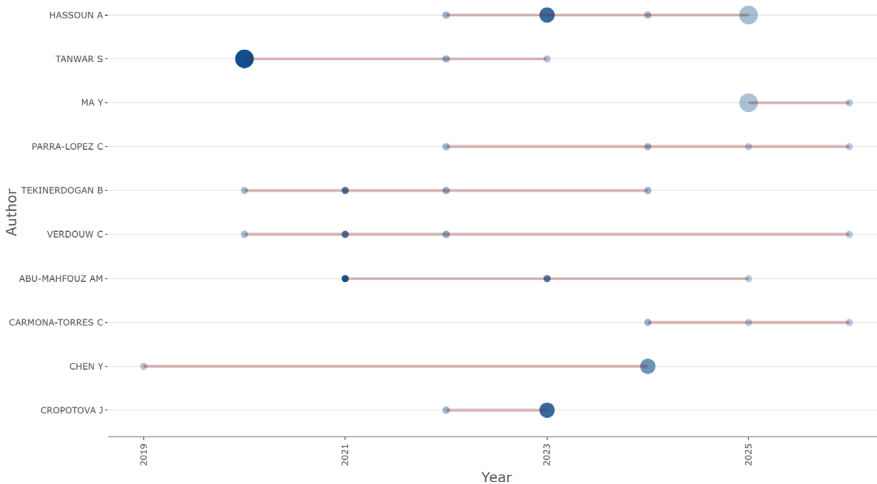


Figure 1. Distribution of Scientific Publications Over Time

2.3. Most Relevant Sources

Table 2 indicates that the journals IEEE Access and Sensors are the most productive sources in the field, with both publishing 16 articles focusing on the research topic. The table highlights the ten most relevant sources overall. IEEE Access is an open-access journal that publishes research from many different topics. It covers a wide range of new technology areas, including artificial intelligence, the Internet of Things (IoT), and current digital communication systems. The journal Sensors also mostly publishes articles about sensor technologies, sensing systems, and smart monitoring applications. These technology parts are very important for the growth of smart agriculture and precision farming methods.

Computers and Electronics in Agriculture and Smart Agricultural Technology have both contributed 13 articles based on the research topic. The journal "Agriculture-Basel" has contributed 12 articles, and the journal "Sustainability" has contributed 9 articles. The remaining sources in the top ten have each contributed between 4 and 6 publications. This distribution indicates that research on Industry 4.0 and digital transformation in smart agriculture spans multiple scientific areas that jointly contribute to the advancement of intelligent agricultural systems.

Table 2. The Top 10 Most Relevant Sources

#	Name of Journal	Number of Publications
1	IEEE Access	16
2	Sensors	16
3	Computers And Electronics In Agriculture	13
4	Smart Agricultural Technology	13
5	Agriculture-Basel	12
6	Sustainability	9
7	Agronomy-Basel	6
8	Applied Sciences-Basel	4
9	Foods	4
10	Future Internet	4

2.4. Most Relevant Institutions

As part of the bibliometric analysis, Table 3 lists the top ten institutions in terms of the number of publications. The institution that has made the most scholarly contribution in terms of articles in this field is Wageningen University & Research, with a total of 24 publications. Jiangsu University and China Agricultural University rank second and third, with a total of 20 and 17 publications, respectively. In addition to the above-discussed top universities, there are a few other top universities that have made a significant contribution to the research domain. Some such universities are the University Putra Malaysia, the University of Johannesburg, Sustainable AgriFoodtech Innovation and Research (SAFiR), Nirma University, the University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Asia University, and the University of Parma. The universities are from a diverse geographical distribution across Europe, Asia, Africa, and Southeast Asia.

Table 3. The Top 10 Most Relevant Institutions

#	Name of Institution	Number of Publications
1	Wageningen University & Research	24
2	Jiangsu University	20
3	China Agricultural University	17
4	University Putra Malaysia	13
5	University of Johannesburg	12
6	Sustainable AgriFoodtech Innovation and Research (SAFiR)	11
7	Nirma University	10
8	University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna	10
9	Asia University	8
10	University of Parma	8

2.5. Most Relevant Authors and Production Over Time

Table 4 presents the ten most productive authors in the field based on the number of publications. The highest productive author is Hassoun A., who has published 7 articles, while Tanwar S. has the second-highest productivity with 5 articles. The authors Ma Y., Parra-Lopez C., Tekinerdogan B., and Verdouw

C. are jointly the third highest productive authors with 4 publications each. The rest of the authors have contributed 3 publications each, showing a consistent level of productivity from a number of the researchers in the field. A closer examination indicates that research productivity is distributed across institutions located in Asia, Europe, and North America.

Table 4. The Top 10 Most Relevant Authors

#	Name of Author	No. of Pubs	Institution
1	Hassoun A.	7	Beijing University of Posts and Telecommunications
2	Tanwar S.	5	Sungkyunkwan University
3	Ma Y.	4	Jilin University
4	Parra-Lopez C.	4	Hainan University
5	Tekinerdogan B.	4	Huazhong University of Science and Technology
6	Verdouw C.	4	North Carolina State University
7	Abu-Mahfouz Am.	3	Kyung Hee University
8	Carmona-Torres C.	3	Chongqing University
9	Chen Y.	3	King Mongkut's University of Technology
10	Wang Y.	3	Hong Kong University

To evaluate the production and impact of authors in the field, it is essential to consider both the number of publications and the extent of citations received. Citation metrics help determine the significance and quality of published work.

As shown in Figure 2, Hassoun A. demonstrates the highest scholarly impact, with an H-index of 6, indicating that at least six of the author's publications have each received six or more citations. This reflects both a notable research contribution and a measurable citation influence within the field.

In comparison, Tanwar S. and Tekinerdogan B. also exhibit strong impact, with H-index values of 5 and 4, respectively, suggesting consistent citation performance among leading contributors. Several other authors, including Chen Y., Parra-Lopez E., Kumar N., Verdouw C., and Wang Y.,

present H-index values of 3, indicating moderate but stable scholarly influence. Finally, Abu-Mahfouz A.M. and Adu-Mahfouz A.M. show H-index values of 2, reflecting emerging citation impact within the research area.

The results show that even while the top authors have different numbers of publications, their citation rates are still rather similar. This indicates the existence of a cohort of prominent scholars significantly advancing Industry 4.0 and digital transformation in smart agriculture.

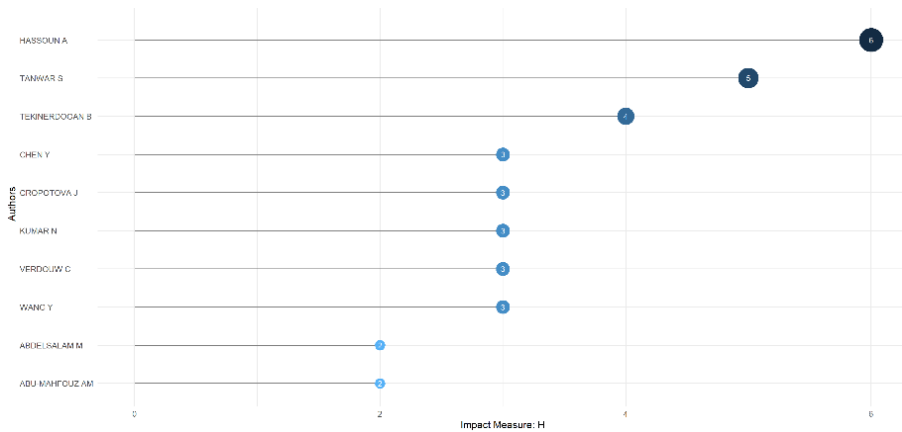


Figure 2. Local Impact of Authors by H Index

Figure 3 indicates the publication trends of the most productive authors over the years. The diameter of each dot shows the measure of the number of publications for a particular year, hence facilitating comparison. Hassoun A. shows a strong level of commitment to research through his published works over the years, coupled with an increase in the rate of publication.

Conversely, distinguished authors including Tanwar S., Ma Y., Parra-Lopez C., Tekinerdogan B., and Verdouw C. have significantly contributed to the field. These authors exhibit varying publication trends, with some commencing their contributions in 2020 or 2021.

The temporal distribution shows that the number of publications has significantly increased after 2021, which means the field has gained significant momentum in recent years. It is clear that the field has attracted significant attention from the academic community with regard to Industry 4.0 and digital transformation in smart agriculture.

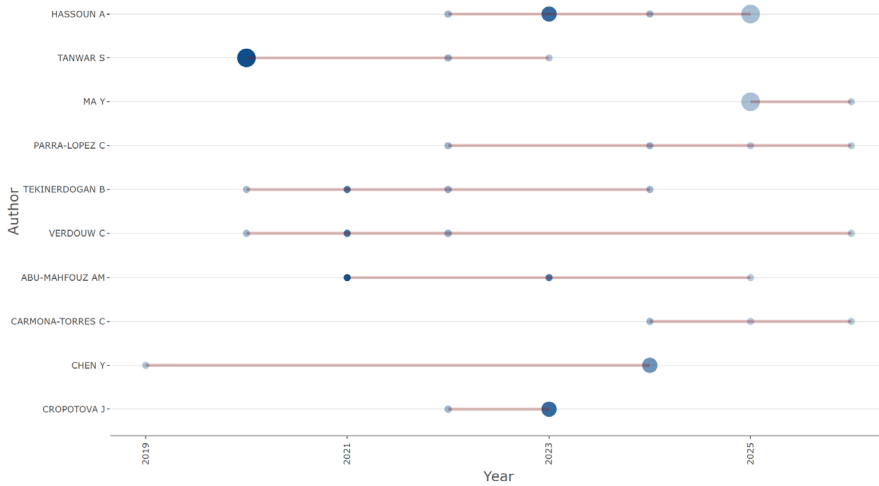


Figure 3. Productivity of Authors Over Time

2.6. Corresponding Author's Countries

In the following analysis, the concept of Corresponding Authors is explored in terms of the difference between Multi-Country Publications (MCP) and Single-Country Publications. MCP denotes manuscripts authored by researchers from multiple countries, thereby illustrating international collaboration. SCP denotes papers authored by researchers from a specific country, reflecting the research activity within that nation.

As indicated in Figure 4, China has become the leading country in terms of leadership in SCP and MCP publications. India, Italy, and the United States have also made notable contributions to the research domain. Other countries, such as the Netherlands, Brazil, France, Spain, and Germany, have also made notable contributions.

Additionally, various countries such as Greece, Malaysia, Colombia, Canada, South Korea, and South Africa are also represented with moderate publication counts. The presence of both SCP and MCP from various countries indicates the global nature of this research theme and the strengthening of global research collaboration networks.

On the whole, the global spread of publications from various countries indicates that the research theme of Industry 4.0 and digital transformation in smart agriculture does not remain localized to any particular geographical location but has evolved into a global interconnected research theme.

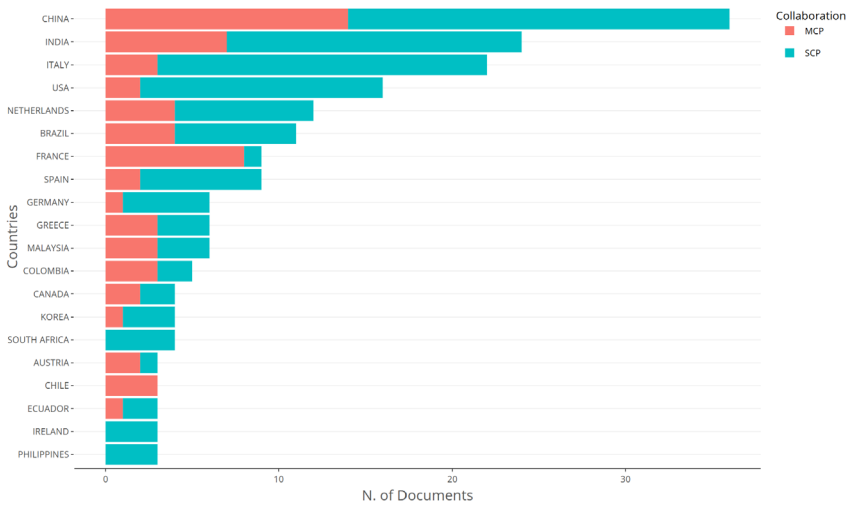


Figure 4. Corresponding Author's Countries

2.7. Scientific Production by Country

As presented in Figure 5, the density map uses the intensity of the color to represent the distribution of scientific production on a global level. As depicted in the figure, the most prominent country in terms of scientific output in the field is China, represented by the darkest shade of blue. Countries like the United States, India, Italy, the Netherlands, Brazil, France, Spain, and Germany have been represented in lighter shades of blue, indicating moderate levels of scientific productivity.

The map also indicates that there have been research contributions from other regions around the world, including Canada, South Korea, Malaysia, Greece, South Africa, and Austria. From the above map, it is clear that although this field of research has attracted significant attention from only a few technologically advanced nations, it has evolved into a globally relevant research field. Despite lower representation in certain regions, the rising global interest in this topic may foster stronger international collaboration and broader research participation in the future.

Figure 6 is a word cloud representing the frequency of use of the most prevalent keywords in a given dataset. The visualization indicates various prominent terms, including "precision agriculture," "internet of things," "smart agriculture," "digital twin," "artificial intelligence," and "industry 4.0." The repeated use of terms like "smart farming," "machine learning," "blockchain," "big data," "sustainability," and "cyber physical systems" suggests that the literature in this research area is focused on the amalgamation of digital technologies with sustainable technologies in agriculture. The use of terms like "sensors," "networks," "systems," and "management" suggests that the literature in this context is focused on the technological aspects of the research.

2.9. Trend Topic Analysis

As shown in Figure 7, the temporal trend of prominent research keywords and their relative frequency can be depicted. This type of trend analysis can be very useful for identifying the thematic changes in research and determining the time periods when certain issues have been receiving particular attention. According to Figure 7, keywords such as "simulation," "precision," and "artificial intelligence" have gained prominence in the most recent time periods.

At the same time, the continued use of terms such as "precision agriculture," "smart agriculture," and "agriculture" indicates that these terms are crucial in the new scientific area. In addition, the research carried out between 2020 and 2021 seems to have concentrated more on basic technical terms such as "cyber physical systems," "industry 4.0," "big data analytics," and "internet of things."

It appears that over time, the themes may have broadened to include data-driven agricultural management, intelligent agricultural systems, and Internet of Things-related agricultural infrastructure. This may indicate that the research field has developed from more conceptual themes of digital transformation to more practical applications of smart agriculture technologies and precision farming.

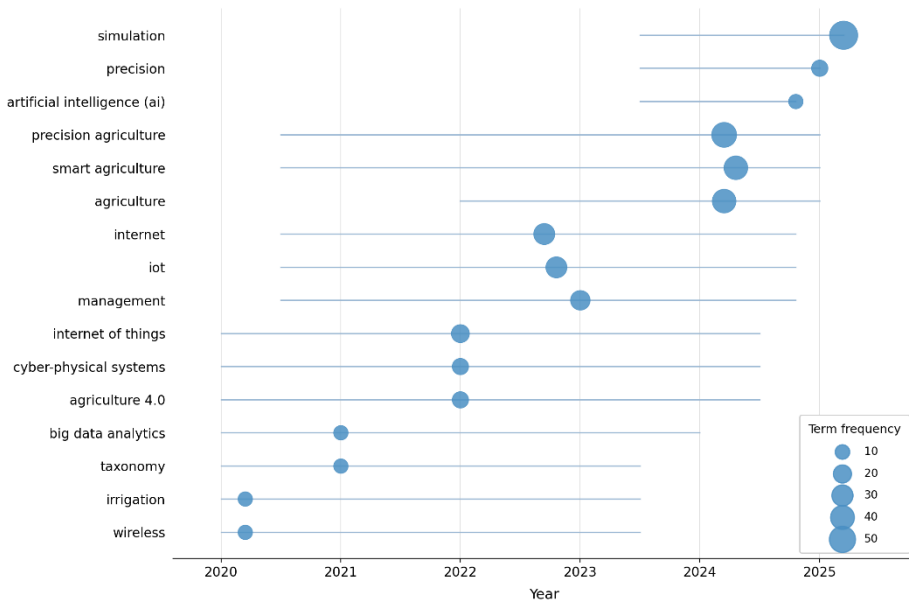


Figure 7. Trend Topics in Scientific Literature and Conceptual Evolution

2.10. Thematic Map

Figure 8 presents a thematic map that provides a structured visualization of the conceptual organization of the research field based on centrality and density measures. Centrality reflects the degree of interaction of a theme with other themes in the field, indicating its importance, while density represents the internal development of a theme, reflecting its level of maturity.

The upper-right quadrant, labeled as Motor Themes, includes highly developed and central topics that play a driving role in the research domain. In this quadrant, keywords such as internet, internet of things, and IoT are prominently positioned. This indicates that IoT-based technologies constitute the technological backbone of smart agriculture, enabling real-time data acquisition, communication between devices, and integration of cyber-physical systems.

In contrast, the lower-right quadrant, referred to as Basic Themes, contains topics with high centrality but relatively low density, such as smart agriculture, digital twin, and artificial intelligence. These themes are fundamental to the research field; however, their relatively lower density suggests that they are still evolving and require further in-depth exploration.

Particularly, the positioning of digital twin highlights its emerging integration into agricultural systems, despite not yet reaching full maturity.

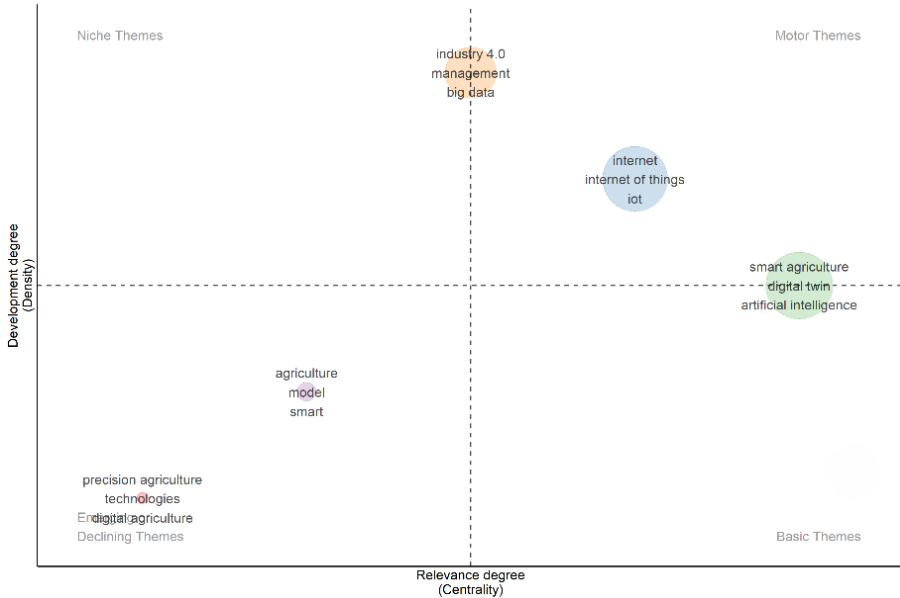


Figure 8. Thematic Map

The upper-left quadrant, known as Niche Themes, includes industry 4.0, management, and big data. These themes are well-developed internally but exhibit limited interaction with the broader research field. This suggests that while these topics have been studied in depth, their application within smart agriculture remains relatively specialized and not yet fully integrated into the mainstream research agenda.

The lower-left quadrant represents Emerging or Declining Themes, where topics such as precision agriculture and digital agriculture are located. The position of these themes indicates either a declining research interest or, more plausibly, a transitional phase where traditional concepts are being reshaped and absorbed into broader frameworks such as IoT-driven smart agriculture and AI-based systems.

Thematic map reveals a clear transition in the research landscape from traditional agricultural approaches toward digitally integrated, data-driven systems, where IoT and related technologies act as central enablers of this transformation.

2.11. Conceptual Networks

Analysis of co-occurrence (also called co-word analysis) is a technique often employed in the analysis of the intellectual structure of a particular domain of study. This technique is based on the analysis of the frequency of the keywords in the same document. In the present study, a total of 234 documents were used to perform the co-occurrence analysis of the keywords. This dataset was retrieved from the Web of Science (WoS) database and imported into the VOSviewer software. The "Author Keywords" option was chosen. In total, 929 author keywords were identified in the dataset.

To improve the clarity of the visualization, a threshold value was applied in VOSviewer. The minimum number of occurrences for the keyword was set at 7, implying that only those keywords that occurred at least seven times in the data set would be part of the network analysis. The number of keywords that met the threshold was 165. After calculating the total link strength values, the most significant concepts within the research domain were determined. Table 5 delineates the 10 most prevalent terms, determined by their frequency of occurrence and cumulative link strength values.

Table 5. Most Commonly Used Keywords

Keyword	Occurrences	Total Link Strength
Artificial Intelligence	38	118
Precision Agriculture	41	91
Smart Agriculture	47	88
Internet Of Things	39	88
Smart Farming	35	87
Machine Learning	27	79
IoT	26	74
Digital Twin	36	55
Cyber-Physical Systems	15	51
Blockchain	15	45

In order to view the relationships between the most frequently addressed concepts, the network visualization was used. In this study, the network visualization produced six clusters consisting of 165 keywords that met the

minimum occurrence threshold. The size of each node represents the frequency with which the corresponding keyword appears, while the node colors indicate the different thematic clusters within the research field.

The overall picture from the diagram is that the research domain is influenced by several dominant themes. The most central keywords, such as "smart farming," "precision agriculture," "internet of things," "artificial intelligence," and "digital twin," are the most connected nodes in the diagram. These are the conceptual entities that are used as bridges between the various thematic clusters and demonstrate the high degree of integration of digital technology with modern agricultural systems.

Overall, the keyword co-occurrence network reveals that the research field is centered around the combination of smart agriculture, IoT-based systems, artificial intelligence, and Industry 4.0 technologies, showing an interdisciplinary research field that is driven by digitalization in agriculture.

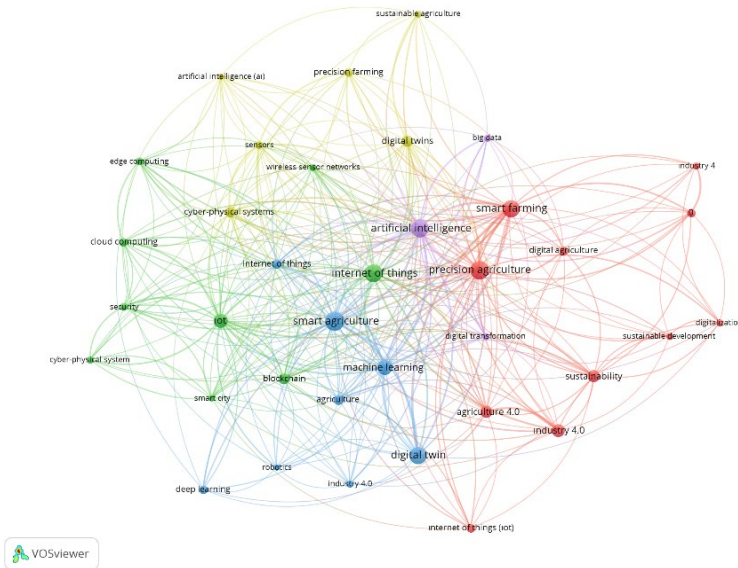


Figure 11. Co-occurrence network of authors' keywords

The five most frequently used words for each of the six clusters in Figure 11 are given in Table 6.

Table 6. Top Five Keywords in Each Cluster

Cluster No/Color	First Five Keywords
1 / Red	Smart Farming, Precision Agriculture, Digital Agriculture, Agriculture 4.0, Sustainability
2 / Green	Internet Of Things, IoT, Cloud Computing, Edge Computing, Security
3 / Blue	Machine Learning, Digital Twin, Deep Learning, Robotics, Agriculture
4 / Yellow	Artificial Intelligence (AI), Sensors, Wireless Sensor Networks, Precision Farming, Sustainable Agriculture
5 / Purple	Artificial Intelligence, Big Data, Digital Transformation

The density visualization feature of the VOSviewer software was used to identify the most frequently addressed concepts within the dataset. In Figure 12, colors represent the frequency and intensity of keyword usage. Areas displayed in red and yellow indicate higher keyword density, meaning that these concepts appear more frequently in the literature, whereas areas shifting toward green and blue represent lower frequency levels.

The density visualization indicates that the most influential concepts are positioned near the central part of the network. In particular, such keywords as smart farming, precision agriculture, Internet of Things, artificial intelligence, and digital twin are placed at the center of the map, implying their significance in the formation of the research landscape.

The clustering analysis further highlights several thematic research directions within the field. The first cluster (red) includes themes such as smart farming, precision agriculture, digital agriculture, Agriculture 4.0, and sustainability. The second cluster (green) includes technology infrastructure such as Internet of Things, IoT, cloud computing, edge computing, and security. The third cluster (blue) includes intelligent technology such as machine learning, digital twin, deep learning, robotics, and agriculture. The fourth cluster (yellow) emphasizes sensing and monitoring technologies. The fifth cluster (purple) relates to generic concepts of digital transformation.

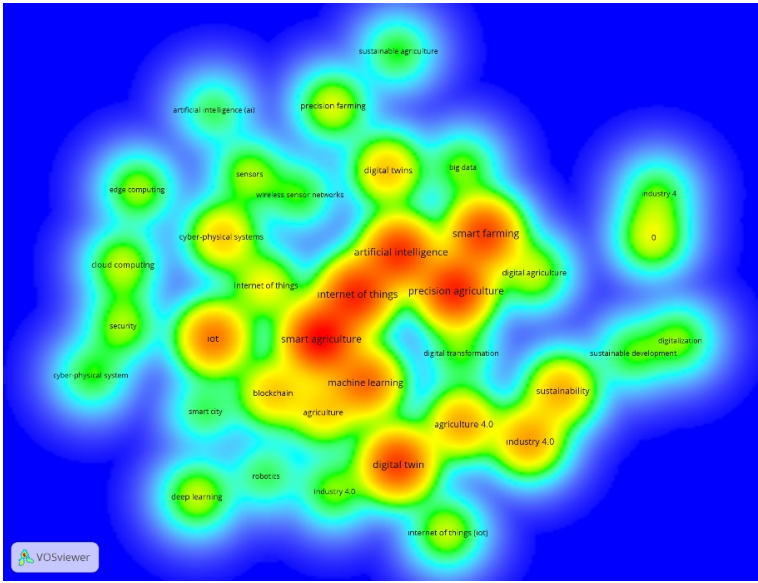


Figure 12. Density map of the authors' keyword co-occurrence network.

2.12. Collaboration Networks

In this study, collaboration networks were examined at the country level using the dataset. For this purpose, a co-authorship analysis of countries was conducted using the VOSviewer software. This analysis does not directly measure the most productive countries; instead, it illustrates the structure of international scientific collaboration and the relationships between countries within the research field.

Figure 13 illustrates the international collaboration network for the countries that are involved in the research field. In the figure, the size of each node corresponds to the level of collaboration, whereas the distance between the nodes represents the level of interaction between the countries. As illustrated in Figure 13, the People's Republic of China and the United States are identified as the most central entities within the collaboration network. Aside from these two prominent contributors, there are other countries such as India, Germany, Italy, Spain, and the Netherlands that are also prominent within the network.

This visualization further illustrates that the countries are divided into six different collaboration clusters, implying that there are some regional or thematic partnerships present in the field. Within these collaboration clusters,

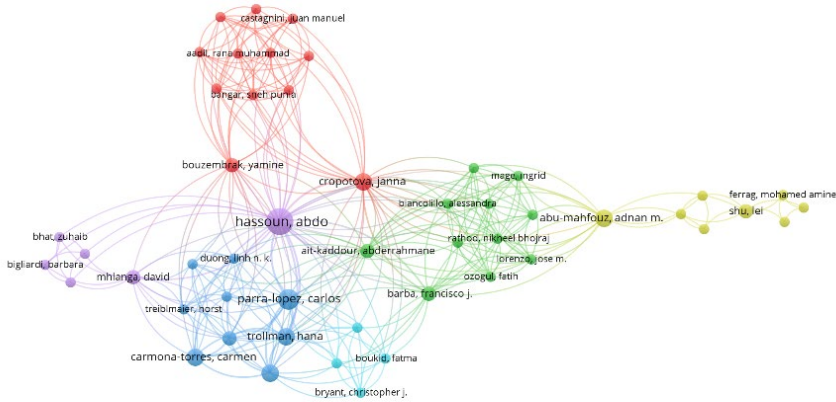


Figure 14. Collaboration network of authors.

3. CONCLUSION

This study employed bibliometric analysis to examine the literature on digital twin technologies and Industry 4.0 applications in smart agriculture. The analysis employed a dataset including 234 scientific papers sourced from the Web of Science database. The indicators used for the analysis include the yearly distribution of the literature, the authors who have made the greatest contributions to the literature, the contributions of different countries to the literature, and the major themes of the literature that have influenced the growth of this particular research domain.

From the results obtained from the analysis of the literature, there is a notable increase in the growth of the literature over the years. This trend indicates a growing scholarly interest in the incorporation of digital technologies within the agricultural sector. The rapid development of Industry 4.0 technologies, including IoT-based systems, sensing technologies, and data-oriented decision-making tools, has contributed to the growing body of literature on digital transformation in agriculture. As a result, smart agriculture is increasingly viewed as a key strategy for increasing productivity, supporting

sustainable practices, and optimizing resource utilization in agricultural production.

Moreover, it can be clearly understood that these clustering and conceptual structure analysis results point towards the fact that there exist many thematic areas that have been addressed in the literature. In particular, research streams related to smart farming technologies, digital agriculture systems, and Industry 4.0-based agricultural practices have emerged as key thematic areas in this field of research. The identified themes suggest that digital technologies are playing a progressively significant role in supporting more effective decision-making.

It is anticipated that upcoming studies will increasingly investigate how digital twin technologies can be integrated with emerging tools such as artificial intelligence, big data analytics, and sensor networks to enhance the efficiency of agricultural systems. Moreover, it is also expected that more research will be carried out from different agricultural contexts, which will provide more insights into developing more efficient agricultural systems through the integration of digital technologies.

REFERENCES

- Balyan, S., Jangir, H., Tripathi, S. N., Tripathi, A., Jhang, T., & Pandey, P. (2024). Seeding a sustainable future: Navigating the digital horizon of smart agriculture. *Sustainability*.
- Beddington, J. R., Asaduzzaman, M., Clark, M., Bremauntz, A. F., Guillou, M., Jahn, M., Lin, E., Mamo, T., Negra, C., Nobre, C. A., Scholes, R. J., Sharma, R., Bo, N. V., & Wakhungu, J. W. (2012). The role for scientists in tackling food insecurity and climate change. *Agriculture & Food Security*, 1, 10.
- Caputo, A., & Kargina, M. (2022). A user-friendly method to merge Scopus and Web of Science data during bibliometric analysis. *Journal of Marketing Analytics*, 10(1), 82-88.
- Dawn, N., Ghosh, S., Saha, A., Chatterjee, S., Ghosh, T., Guha, S., Sarkar, S., Mukherjee, P., & Sanyal, T. (2023). A review on digital twins technology: A new frontier in agriculture. *Artificial Intelligence and Applications*.
- Dilshad, M., Tahir, A., Zaidi, R., Ul Din, M. S., Afzal, A., Zafar, N., Abbasi, Z. A., Duhis, M., Sidra, S., & Gohar, M. (2025). Integrating precision agriculture and smart farming for climate-resilient crop production: Innovations, challenges, and future prospects. *Scholars Journal of Agriculture and Veterinary Sciences*, 12(4).
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of business research*, 133, 285-296.
- Escribà-Gelonch, M., Liang, S., van Schalkwyk, P., Fisk, I. D., Nguyen, V. D. L., & Hessel, V. (2024). Digital twins in agriculture: Orchestration and applications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*.
- Ghazvini, A., Sharef, N. M., Balasundram, S. K., & Lee, L. S. (2024). A concentration prediction-based crop digital twin using nutrient co-existence and composition in regression algorithms. *Applied Sciences*, 14(8), 3383.
- Jeong, D.-Y., Jo, S.-K., Lee, I.-B., Shin, H., & Kim, J.-G. (2023). Digital twin application: Making a virtual pig house toward digital livestock farming. *IEEE Access*.

- Leong, L.-Y., Hew, T.-S., Tan, G. W.-H., Ooi, K.-B., & Lee, V.-H. (2020). Tourism research progress - A bibliometric analysis of tourism review publications. *Tourism Review*.
- Nasirahmadi, A., & Hensel, O. (2022). Toward the next generation of digitalization in agriculture based on digital twin paradigm. *Sensors*, 22(2), 498.
- Pranckute, R. (2021). Web of Science (WoS) and Scopus: The titans of bibliographic information in today's academic world. *Publications*, 9(1), 12.
- Peladarinos, N., Piromalis, D., Cheimaras, V., Tserepas, E., Munteanu, R., & Papageorgas, P. (2023). Enhancing smart agriculture by implementing digital twins: A comprehensive review. *Sensors*, 23(16), 7128.
- Quesado, P., Costa Oliveira, H., & Silva, R. (2025). Integrating sustainability goals into the balanced scorecard: a bibliometric analysis of the sustainability balanced scorecard. *Measuring Business Excellence*.
- Safdar, M., Shahid, M. A., Yang, C., Rasul, F., Tahir, M., Raza, A., & Sabir, R. M. (2024). Climate smart agriculture and resilience. In *Climate smart agriculture and resilience*.
- Sahu, G., Rout, P. P., Mohapatra, S. D., Das, S. P., & Pradhan, P. P. (2020). Climate smart agriculture: A new approach for sustainable intensification. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 39(23).
- Sharma, A., Singh, S. K., Kumar, S., Thakur, R., Gupta, B. B., & Arya, V. (2024). IoT-enabled smart farming with Industry 5.0. *Journal of High Speed Networks*.
- Wang, T. (2025). Research trends in evaluation of crop water use efficiency in China: A bibliometric analysis. *Agronomy*, 15(11), 2549.

CHAPTER 2

FORECASTING ECONOMIC INEQUALITY IN THE UNITED KINGDOM USING MACHINE LEARNING: A DUAL-SCENARIO ANALYSIS BASED ON GINI COEFFICIENT

Res. Asst. Ayşe PAKSOY¹

Res. Asst. Yeşim ALTAY²

Res. Asst. İrem Nur İLBAŞ³

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.19497130>

1 Istanbul University-Cerrahpasa, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, İstanbul, Türkiye. ayse.paksoy@iuc.edu.tr, ORCID ID: 0009-0003-6104-2693

2 Istanbul University-Cerrahpasa, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, İstanbul, Türkiye. yesim.altay@iuc.edu.tr, ORCID ID: 0009-0002-0964-3099

3 Istanbul University-Cerrahpasa, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, İstanbul, Türkiye. irem.ilbas@iuc.edu.tr, ORCID ID: 0009-0009-1004-0229

1. INTRODUCTION

Income inequality has emerged as a vital structural issue influencing the stability and sustainability of the economy and society in many countries in the 21st century. The persistent gaps in income and wealth inequality are threatening the social fabric and potentially undermining the sustainability and growth of the economy (Atkinson, 2015; Stiglitz, 2012). A number of thorough and exhaustive research studies on the issue have confirmed through robust findings and evidence that inequality has a negative relationship with human capital accumulation, trust and social polarisation in society (OECD, 2015; Chetty et al., 2014). The allocation of income across households has become a prominent issue within the UK context since the 1980s as both a persistent and important theme in policy discourse; dramatically visible through large, structural changes in how income is spread. The changes have been felt especially strongly since de-industrialization and total welfare reform came hand in hand with large scale financial liberalisation (Hood and Waters 2017; Blundell et al. 2022).

The unprecedented COVID-19 pandemic brought both severe and asymmetric consequences in the labor market, as well as complex policies which further widened existing differences within our societies, putting an even greater strain on low-income families who were already struggling to make ends meet (Brewer and Patrick, 2021; Palomino et al., 2020).

In this context, the need for effective forecasting strategies to track inequality now and in a predictive manner has never been clearer. The Gini coefficient is just one of the many indicators that have undergone extensive development in order to allow for an assessment of how income is distributed within a society, and it is fortunately also one of the most popular both in academia and public policy. The coefficient yields a scalar value bounded between 0 and 1, where 0 denotes perfect equality and 1 represents absolute concentration of income in a single individual (Gini, 1912; Lorenz, 1905). Its computational simplicity and capacity to facilitate inter-country comparisons, as well as its easy interpretation, have ensured that it is the yardstick used to evaluate inequality based on international databases from the World Bank, OECD, and Eurostat (World Bank, 2022; OECD, 2021). However, it has also been argued that the coefficient is not sensitive to changes in the extremes of the distribution and that it does not take into account the multidimensionality

of socio-economic disadvantage (Sen, 1997; Atkinson, 1970). Nevertheless, it is the center of gravity in empirical research on inequality and the main focus in terms of the objectives set in predictive modeling research (Koç and Akın, 2021; Pierdzioch et al., 2022).

For the purpose of this study, the after-housing-costs Gini coefficient for the United Kingdom, as found in internationally recognized databases, has been used as the main outcome variable, particularly because of its relevance to the material standard of living and its availability as a longitudinal time series. Historically, structural econometric models, micro-simulation approaches, and classical time series methods have been predominantly used in estimating macroeconomic and social indicators, particularly measures such as the Gini coefficient. One of the most common of these methods is the Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) model family (Box and Jenkins, 1970; Gindelsky, 2018; Hood and Waters, 2017). In fact, there are very logical reasons why ARIMA and its derivatives like SARIMA or ARIMAX are so frequently preferred. Firstly, they are backed by a very robust statistical theory; secondly, they can provide transparent results that conform to standard tests without needing massive amounts of data (Box et al., 2015).

However, these models generally assume that everything is linear and stable, meaning that no structural break will occur. However, when dealing with complex social issues such as income inequality, these assumptions often do not hold true in real life (Clements and Hendry, 1999; Stock and Watson, 2002). On the other hand, while micro-simulation models offer excellent scenarios for policy analysis, they are heavily reliant on data and survey results. This significantly slows down the process and makes it nearly impossible to keep up to date with current developments in real time (Bourguignon and Spadaro, 2006; Gindelsky, 2018).

Structural macroeconomic models often include a priori theoretical constraints that may not accurately represent the changing dynamics of income distribution, especially during times of technological disruption, demographic changes, or policy shifts (Cornwall and Gindelsky, 2024; Mullainathan and Spiess, 2017). The constraints have resulted in a tendency within forecasting literature favoring flexible and data-adaptive methodologies capable of managing nonlinear relationships and interactions without predefining functional forms.

Under these circumstances, community-based machine learning techniques, especially XGBoost and RF, have become very popular in estimating complex socioeconomic indicators. RF is a machine learning method introduced by Breiman (2001), wherein a number of decision trees are combined in a way that they are not highly correlated with each other through the bagging approach and random selection of features. This approach not only prevents the problem of overfitting but also allows the machine learning model to provide robust predictions in the domain of high-dimensional and nonlinear features (Breiman, 2001; James et al., 2021).

XGBoost is a method that takes the gradient boosting approach a step further, as proposed by Chen and Guestrin (2016). The distinctive feature of this model is the application of the second-order Taylor expansion of the loss function and the incorporation of regularization terms that regulate the complexity of the tree structure, as well as the parallel structure of the computation that facilitates the fast training of the model on big data sets. Research in many fields has indicated that the application of the XGBoost method has higher prediction success compared to traditional statistical methods and other machine learning methods. The superiority of the method has been indicated in many fields, including economic prediction (Chu and Qureshi, 2023), financial risk prediction (Wang et al., 2022), and prediction in the social sphere (Pierdzioch et al., 2022; Koç and Akin, 2021). Although the application of these methods in the field of inequality prediction is not common, the results obtained so far show a very promising picture.

Despite the fact that there has been a significant rise in the number of studies on the application of machine learning in economic forecasting in recent years, there are still some significant gaps in the literature in this regard. Firstly, there are limited studies that compare classical time series methods and current ensemble methods, including those related to inequality measurement (Pierdzioch et al., 2022; Ali et al., 2024). Secondly, whereas ARIMA models are widely applied for macroeconomic time series analysis, there are limited studies that compare their applications for estimating the Gini coefficient with other nonlinear methods (Gindelsky, 2018; Cornwall and Gindelsky, 2024). Thirdly, it has been observed that more attention has been paid to cross-sectional and short-run rather than medium- and long-run economic forecasts in the literature (Koç and Akin, 2021; Pradhan and Agrawal, 2025).

This study attempts to fill these gaps. In order to fulfill the purpose of the study, three different algorithms; ARIMA, XGBoost, and RF are compared in terms of their performance in estimating the Gini coefficient for the UK from 2024 to 2030. In order to conduct the study, two different scenarios were developed.

2. LITERATURE REVIEW

Income inequality is a term that defines unequal income distribution among individuals or households in society. This is analyzed based on the distributive justice concept and shows the disparities in the availability of resources among the population (Kaloga, 2021; Manseau, 2014; Ghatak, 2019).

Quantitative indicators such as the Gini coefficient and the Lorenz curve are commonly used to measure these differences in income distribution. These indicators can be used to analyze the structure of income distribution and can be used to compare countries as well (Manseau, 2014; David, 2019). On the other hand, income inequality is not just about the level of income that individuals receive. The level of wealth distribution and the level of taxation and transfer policies also have a significant role to play in the development and continuation of income inequality (Ermakova & Ilyakova, 2022; Manseau, 2014). The notion that the level of the Gini coefficient that is "optimal" for economic growth is not fixed over time has also received empirical support from the studies carried out in different countries. The studies carried out in the Turkish and Russian economies have found that the coefficient can affect economic growth through different channels and that the effects can change over time (Davidson et al., 2021; Yue et al., 2023).

In the last few years, there has been a notable increase in the application of machine learning (ML) methods in the estimation of income inequality, especially the Gini index. In fact, classical methods of econometric modeling are mostly based on linear relationships, as they are analyzed with a small number of variables. On the other hand, ML methods are capable of handling complex relationships. This increase in the application of ML methods is due to some of the limitations of the methods used during previous periods, such as macro-economic simulations and micro-simulation models, which are based on strong assumptions and show low sensitivity to structural changes (Hood and Waters, 2017; Gindelsky, 2018; Cornwall and Gindelsky, 2024).

The primary objective of employing machine learning is to get insights into the temporal and spatial variations of the Gini coefficient. In this context, decision tree and random forests can be utilized to identify non-linear relationships in income distribution data (Prendergast & Staudte, 2016; Ahmed et al., 2025). This enables a more flexible approach to data analysis compared to conventional panel data analysis and mean-based econometric analysis.

Ensemble-based analytical approaches are frequently employed to explore complex relationships among multiple data variables and to estimate the Gini coefficient. Due to their ability to process multidimensional datasets, these methods enable a deeper examination of income distribution patterns. In this context, machine learning techniques such as classification and regression models provide improved predictive performance compared to traditional approaches used in Gini coefficient estimation (Ahmed et al., 2025; Jenkins, 2016).

Table 1. A Summary of Selected Studies in Literature

Authors (Year)	Data / Context	ML Method(s)	Key Findings
Koç and Akın (2021)	OECD countries, annual panel (2000s)	RF; SVR; Linear reg.	RF outperformed linear models in predicting Gini with nonlinear effects captured.
Pierdzioch et al. (2022)	United Kingdom, quarterly 1975–2016	L2-Boosting (gradient boosting)	Boosting improved forecast accuracy over traditional models.
Ali et al. (2024)	Malaysia, annual 1987–2015	Nonlinear Autoregressive MLP (neural network)	Neural network closely fit historical Gini data.
Zhang (2022)	Simulation / conceptual study	Deep Neural Network	Proposed DNN model outperformed baseline econometric approaches.
Garbasevschi et al. (2023)	Germany, cross-sectional (97% of municipalities)	RF (spatial features)	Built environment and demographics explained ~54% of Gini variance.
Pradhan and Agrawal (2025)	India, subnational (DHS clusters, 2015–2021)	RF; XGBoost	Combined surveys and satellite data to estimate regional Gini.
Cornwall and Gindelsky (2024)	United States, national nowcast (2000–2022)	Elastic Net (penalized regression)	Anticipated Gini 11 months ahead; captured 95% of trend shifts.

Ji (2024)	United States, state-level panel	Extreme Gradient Boosting (XGBoost)	Education and race were key predictors of inequality.
Swapna and Sankararaman (2024)	India, 1970–2020 (time series)	Nonlinear time-series (Econophysics)	Forecast suggests India's Gini may stabilize or decline as GDP grows.
Gindelsky (2018)	United States, long-run (1913–2015)	Dynamic regression models	Technological change was the strongest inequality driver.
Hood and Waters (2017)	United Kingdom, simulation to 2022	Microsimulation	Gini projected to rise modestly under current policies.
Chong and Ka (2019)	Cross-country projection (population scenarios)	Demographic projection + econometric forecast	Demographic change projected to raise inequality; ML aids complexity.
Pokhriyal and Jacques (2017)	Uganda, regional poverty/inequality mapping (2011)	RF (multi-source data)	Combined satellite and mobile data for accurate inequality mapping.
Sapena et al. (2020)	Multiple countries (urban areas, cross-sectional)	Regression & ML on spatial metrics	Spatial features linked to economic inequality.

As summarized in Table 1, a comprehensive evaluation of the literature indicates that learning algorithms and neural network models consistently outperform traditional techniques in estimating the Gini coefficient. The flexibility of these approaches in handling heterogeneous datasets and capturing non-linear relationships constitutes a significant methodological advantage in the analysis of income inequality. These findings strongly support the integration of machine learning techniques into the analytical and methodological framework of this study.

3. DATA AND METHODOLOGICAL FRAMEWORK

The present study aims at developing a data-driven machine learning (ML) model for estimating the value of the Gini coefficient in the United Kingdom during the period from 2024 to 2030. The estimation of the Gini coefficient has gained much more prominence in the recent past as the indicators of income distribution are increasingly being recognized as vital determinants in the formulation and implementation of economic policies.

Therefore, the estimation of the Gini coefficient makes a vital contribution in the prediction and projection of socioeconomic outcomes in the future. The primary objective of this study is to illustrate the systematic application of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) in the estimation and prediction of the Gini coefficient in the United Kingdom during the stated period.

The analysis in the present study is based on the data collected during the period from 1961 to 2023 and is based on two different scenarios of prediction. In the first scenario, the estimation is based on the autoregressive characteristics of the Gini coefficient. In the second scenario, the estimation is based on the simulation of the policy scenarios and the integration of the multivariate structure in the model. In the second scenario, the estimation of the macroeconomic variables is done through the recursive model.

The analysis in the present study is based on the application of the RF and XGBoost algorithms as they are robust enough to capture complex dependencies in the time series data. To ensure the validation of the results obtained through the prediction model, the precision of the model was assessed through the application of a number of performance measures such as the Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), and Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Figure 1 below illustrates the prediction frame.

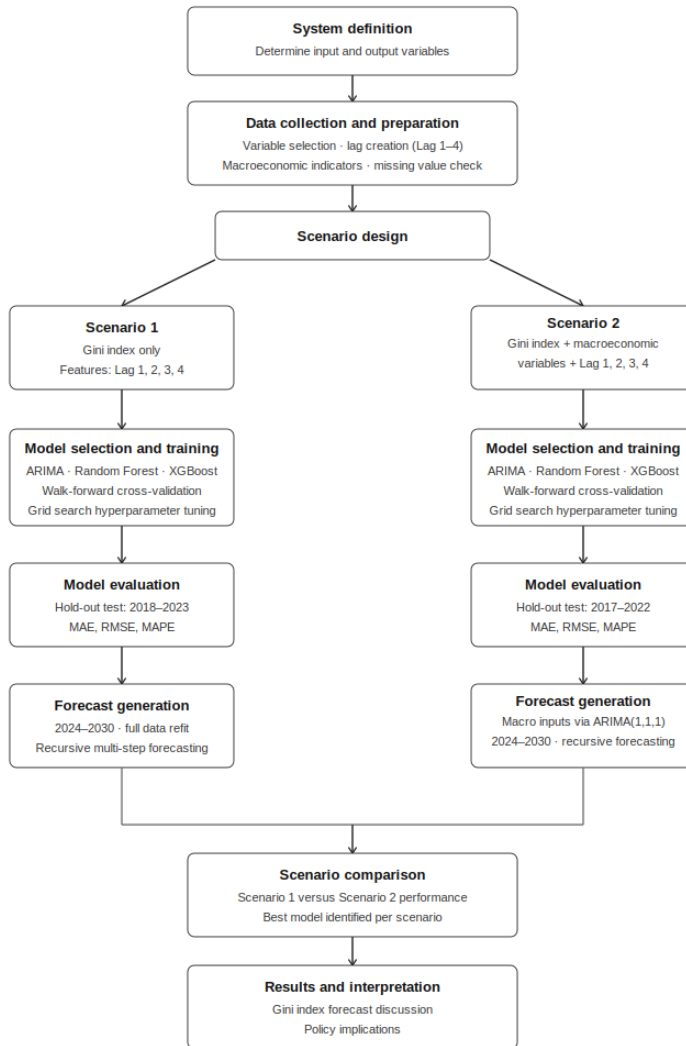


Figure 1. Process Diagram of the Dual-Scenario Gini Prediction Methodology

3.1. Data Description

The dataset for this research includes the following years and country : the United Kingdom from 1961 to 2023. The dataset was collected from internationally recognized sources such as the Federal Reserve Bank of St. Louis (FRED), the World Bank, and the OECD. The main variables and their

definitions are shown in Table 2. The input variables are inflation, interest rates, unemployment rates, annual growth in GDP, population growth rates, and public social expenditure. The output variable is the Gini coefficient minus housing costs.

Table 2. Variable Definitions and Data Sources.

Variable Name	Description	Source
Inflation (%)	Annual inflation rate	World Bank
Interest Rates	Bank of England base interest rate (%)	FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis
Unemployment Rate (%)	Share of the labor force without employment	World Bank
GDP Growth (annual %)	Annual percentage growth rate of Gross Domestic Product	World Bank
Population Growth (%)	Annual change in population	World Bank
Public Social Expenditure (% of GDP)	Government spending on social services as a share of GDP	OECD
Gini coefficient (after deducting housing costs)	Income inequality indicator (after housing costs)	World Bank / OECD

3.2. The Extreme Gradient Boosting (XGBoost) Algorithm

XGBoost is a gradient boosting method that works by combining the outputs of sequentially trained decision trees and includes regularization (Li et al., 2023). The aim of this approach is to define the \hat{y}_i function, which predicts the target variable from the input variables, as the sum of the f_k components, each representing a decision tree:

$$\hat{y}_i = \sum f_k(x_i), f_k \in F \quad (1)$$

In this context, F represents the space of all possible regression trees. XGBoost adds a new tree to the model in each iteration (boosting round) to improve its accuracy. The model is optimized by applying a regularized objective function that can simultaneously minimize both prediction error and model complexity.

$$L(\varphi) = \sum l(y_i, \hat{y}_i) + \sum \Omega(f_k) \quad (2)$$

In this mathematical framework, the loss function $l(y_i, \hat{y}_i)$ is used to measure prediction errors, while the regulation component $\Omega(f_k)$ acts as a

penalty mechanism to limit model complexity. The specific formulation of this regulation function is described in detail below:

$$\Omega(f) = \gamma T + \frac{1}{2}\lambda \|w\|^2 \quad (3)$$

In this analytical framework, the tree's structural complexity is denoted by T , which represents the total number of leaves, while w signifies the corresponding weights of these leaves (Förster et al., 2022). To prevent overfitting, the model includes γ as a penalty for leaf duplication and λ as the L2 adjustment constant. Mechanistically, the ensemble evolves through an additive learning paradigm where the prediction output is iteratively improved by integrating an additional tree into the prediction.

$$\hat{y}_i^{(t)} = \hat{y}_i^{(t-1)} + f_i(x_i) \quad (4)$$

This framework optimizes the objective function using second-order Taylor expansion. The use of second-order derivatives speeds up the optimization process (Grotti et al., 2024).

$$L^{(t)} \approx \sum [g_i f_i(x_i) + \frac{1}{2} h_i f_i^2(x_i)] + \Omega(f_i) \quad (5)$$

The model's optimization process involves the concurrent utilization of gradient g_i and Hessian h_i vectors. By leveraging a second-order Taylor series for the objective function, XGBoost overcomes the constraints typical of first-order gradient descent frameworks. This quadratic approximation facilitates a more refined navigation of the loss landscape, resulting in heightened predictive consistency and optimized processing speeds. According to the study by Chen and Guestrin (2016), the model's scalability is primarily based on its parallel processing capability and advanced regularization techniques. The empirical robustness of XGBoost has been extensively documented in various scientific fields.

3.3. Random Forest (RF)

RF is a widely utilized ensemble learning method for classification and regression in data mining and artificial intelligence (Salman et al., 2024). The model operates through the construction of numerous decision trees, with the subsequent combination of their outputs to formulate a definitive prediction (Yamashita et al., 2025). As asserted by Salman et al. (2024), this methodology has been demonstrated to yield more reliable outcomes when compared to the

utilization of standalone models in intricate datasets. Makariou et al. (2021) demonstrated that the amalgamation of multiple tree outputs can enhance prediction accuracy and consistency.

$$\hat{Y} = (1/B) \sum T_{\beta}(x) \quad (6)$$

In this context, the symbol \hat{Y} denotes the final Gini estimate, the symbol B denotes the total number of trees, and the symbol $T_{\beta}(x)$ denotes the individual estimate generated by each tree on the input set x (Bierlaire et al., 2025). The "bagging" principle, which serves to reduce variance, has been demonstrated to produce results that are more stable and accurate in comparison to those of individual decision trees.

3.4. Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)

ARIMA is a statistical model that generates future predictions by analyzing internal dependencies and trends in time series data (Newbold, 1983). Its fundamental importance in prediction processes lies in its ability to eliminate non-stationarity in the data through integration and to combine the relationship between historical values (AR) and historical prediction errors (MA) into a single structure (Rizkya et al., 2019).

The model's predictive power comes from the combination of autoregressive ϕ parameters, which determine the weight of the series' historical values, and moving average θ components, which regulate the effect of historical error terms. Calculations on Y'_t , the stationary form of the series obtained by taking the difference of order d , including error terms called white noise ε_t , are expressed by the following general equation:

$$Y'_t = c + \phi_1 Y'_{t-1} + \dots + \phi_p Y'_{t-p} + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (7)$$

This mathematical framework provides reliable fundamental forecasting by capturing linear relationships, especially in series that follow a specific trend, such as economic data.

4. ANALYSIS RESULTS

In the following section, we will present the results obtained from the forecasting models used in our study. In order to understand the reliability of the forecasting models in different conditions, we have divided the results into two scenarios. In the first scenario, our predictions have been based on the past

values of the Gini coefficient. In the second scenario, we have taken a slightly broader approach by adding the macroeconomic factors that represent the general trend of the economy. In order to measure the success of the forecasting models used in our study, we have taken into consideration the results obtained from the conventional statistical methods as well as the machine learning approach. In order to understand the results obtained from the forecasting models used in our study, we have used the conventional error measures MAE, RMSE, and MAPE.

4.1. Scenario 1: Gini-Only Forecasting Using Lagged Features

In Scenario 1, a univariate modeling approach based on only the historical values of the Gini Index was used for predicting its trend over time. In this regard, a supervised learning approach was adopted by converting the dataset into a supervised learning format by using lagged variables, where the Gini Index for a given period was predicted by using the lag values of one, two, three, and four periods. A walk-forward cross-validation approach was adopted for evaluating the model's performance in an unbiased manner by using the training set, where the best combinations for hyperparameters were determined during this approach. The ARIMA model represents a classical approach for time series analysis, while the Random Forest model and XGBoost model represent a machine learning approach based on lag variables. Following hyperparameter optimization, the models were reconstructed on the training data with the best parameters. To measure the generalization ability of the algorithms, a final performance evaluation was conducted using an independent test set not used in training; MAE and MAPE metrics were used as success criteria.

Table 3. Predictive Performance Metrics for Scenario 1

Model	MAE	RMSE	MAPE
Random Forest	0.005045	0.006243	1.304319
ARIMA	0.006694	0.007037	1.734902
XGBoost	0.007106	0.008668	1.840644

When Table 3 is considered as a whole, the performance metrics point to a consistent predictive structure across models, characterized by broadly

comparable statistical patterns over the test horizon. However, it has been determined that machine learning algorithms are one step ahead of statistical approaches in deciphering patterns in the data and achieve a higher agreement with the actual values. In particular, the Random Forest model achieved the lowest error rate by modeling the structural fluctuations of the Gini index in the test period more consistently and calmly. On the other hand, the XGBoost model, despite the increased sensitivity of its deviations towards extreme values in some sub-periods, continued to succeed in the general trend. The ARIMA model, which is based on the classical approach, was noted to provide a linear and mean-reverting type of projection rather than focusing on the micro-movements of the series.

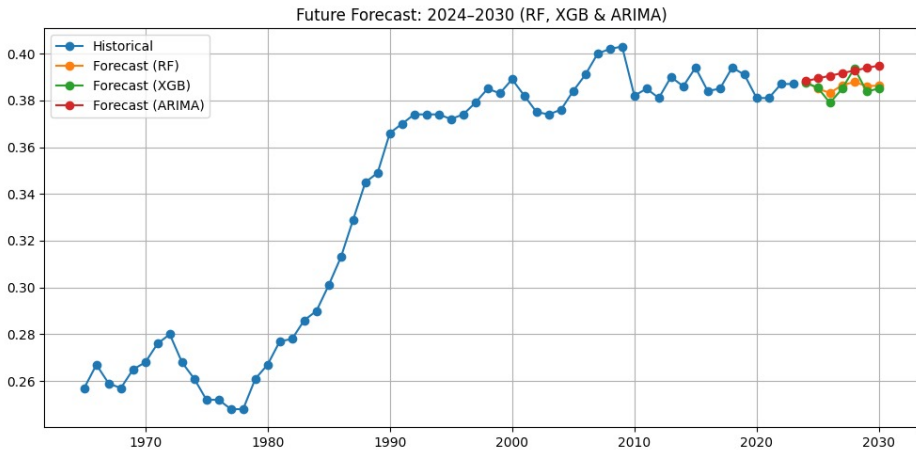


Figure 2. Future Forecasts for Scenario 1 (2024–2030)

When Figure 2 is examined, all three models (RF, XGBoost and ARIMA) are able to capture the general trend. However, it is observed that machine learning-based models are better able to track short-term changes in the series. This is due to the ability of RF and XGBoost models to capture nonlinear relationships.

A numerical comparison of the actual and predicted values for the test period is presented in Figure 3.

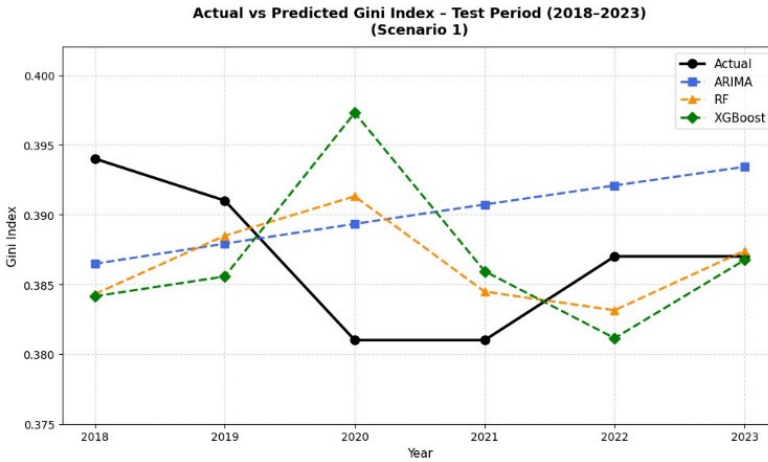


Figure 3. Actual and Predicted Values of the Model During Test Period for Scenario 1

Figure 3 shows that the models generally predicted values during the test period successfully. The prediction results indicate that the models were particularly successful in capturing the general trend of the series.

Following the evaluation of model performance, projections for the future period were created. At this stage, the models were retrained using the entire dataset, and a multi-step recursive forecasting method was applied for the 2024–2030 period. Future period predictions were obtained using RF and XGBoost models. The predictions for the future period are shown in Table 4.

Table 4. Predicted Gini Coefficient Values for Scenario 1 (2024–2030)

Model	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
RF Forecast	0.38787	0.38507	0.38314	0.38653	0.38783	0.38611	0.38627
XGBoost Forecast	0.38759	0.38543	0.37892	0.38501	0.39374	0.38378	0.38507
ARIMA Forecast	0.38820	0.38937	0.39052	0.39165	0.39275	0.39383	0.39488

From the projections provided in Table 4 for the years 2024–2030, it is evident that the Gini index does not foresee any major changes in the near future. Moreover, the predictions provided by the RF model vary within the range of 0.383 and 0.388, which signifies the consistent nature of the trends. However, the predictions provided by the XGBoost model show a slight

increase in the year 2028 and are consistent throughout the other years. Moreover, the predictions provided by the ARIMA model show a consistent and steady increase in the Gini index throughout the years. It is evident from the predictions provided by the ARIMA model that the value increases incrementally from 0.388 in the year 2024 and continues until 2030 when the value is 0.395. Notwithstanding these methodological discrepancies, the analogous estimates generated by all three models bolster the credibility of the overall conclusions. The results indicate that income inequality is expected to continue at its current level in the near future, unless there are significant changes to the current structure.

4.2. Scenario 2: Dynamic Multivariate Forecasting with Recursive Structure

In this phase of the study, Scenario 2, which is based on an advanced forecasting structure to test the models' capacity to adapt to dynamic economic changes, was applied. In this scenario, the Walk-Forward Validation method, adopted as the basic validation strategy, allows the models to learn from past errors and capture current trends by updating them with new data at each step.

The dataset design is methodologically based on the $t \rightarrow t+1$ shift principle. In this context, the current year's t macroeconomic indicators such as inflation, GDP growth, unemployment, and social expenditures, along with the four-year lagged values (Lag 1–4) of the Gini coefficient, were used as input to predict the Gini value of the following year $t+1$. In the training and testing phases of the model, the dataset was chronologically divided into two parts: data before 2017 was designated as the initial training set, and the 2017–2022 period was designated as the walk-forward test period where the performance of the models was measured. During the training process, cross-validation was performed using the TimeSeriesSplit method to determine the best hyperparameter set for each model, and hyperparameter optimization (Grid Search) was carried out.

In the future projections phase, the Recursive Forecasting strategy was applied. The necessary macroeconomic antecedents for the 2024–2030 period were derived using the ARIMA (1,1,1) model, and then these values were fed into the optimized RF, XGBoost, and ARIMA models. In the recursive forecasting process, the forecasted Gini coefficient for each year is used as a

lagged input in the model for the next iteration. This process results in a dynamic forecasting sequence, which is continued up to the year 2030. Through the use of this recursive model, complex nonlinear relationships can be effectively modeled by using machine learning methodologies, along with the temporal correlations that are inherently present in the data.

Table 5. Predictive Performance Metrics for Scenario 2

Model	MAE	RMSE	MAPE (%)
Random Forest	0.0051714	0.0059016	1.3336529
XGBoost	0.0065717	0.0082054	1.6979968
ARIMA	0.0157022	0.0180898	4.0603649

Based on the walk-forward validation performance metrics presented in Table 5, the RF model has the highest prediction accuracy compared to the other two models with an MAE value of 0.0052, RMSE value of 0.0059, and MAPE value of 1.33%. The prediction results obtained through the application of machine learning algorithms have been significantly higher compared to the results obtained through traditional methods in income inequality prediction.

The performance of the XGBoost model, with an MAE value of 0.0066, RMSE value of 0.0082, and MAPE value of 1.70%, is found to be relatively close to the RF model's performance. The two models have achieved a high accuracy rate with the predicted value of the Gini coefficient within an error margin of less than 2%. However, the performance of the ARIMA model with an MAE value of 0.0157 and MAPE value of 4.06% is found to be low compared to the performance of the modern algorithms in terms of accuracy in prediction results. The value of the MAE is found to be 3 times that of the RF model, and the value of the RMSE is found to be 3.1 times that of the RF model.

This result shows that linear time series models fail to adequately represent the nonlinear pattern in inequality dynamics and therefore confirms the effectiveness of machine learning techniques.

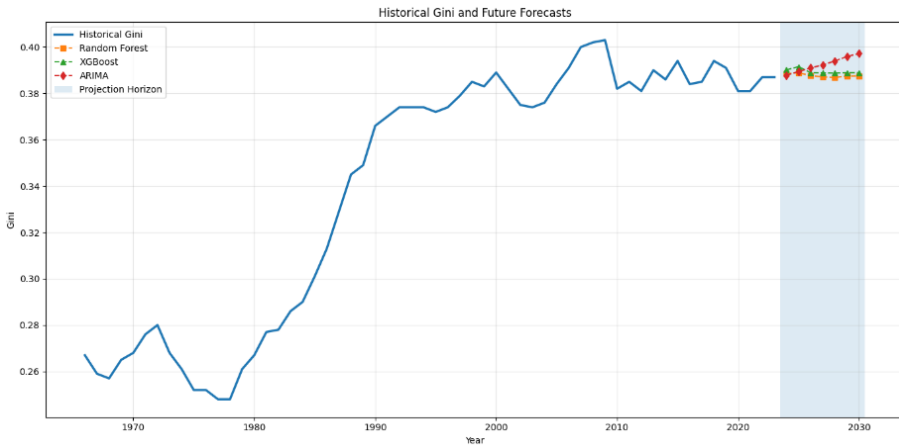


Figure 4. Future Forecasts for Scenario 2 (2024–2030)

From the projections offered in Figure 4 above, it is evident that there is a great level of agreement among the models until the year 2030. Although the RF and XGBoost algorithms agree on the fact that there is a stable structure in income inequality, the ARIMA model indicates that there is a trend that deviates from the stable structure at the micro level. This indicates that the horizontal trend that was formed after the year 2010, following the sharp increase in the 1980s, may continue with resistance in 2030 perspective.

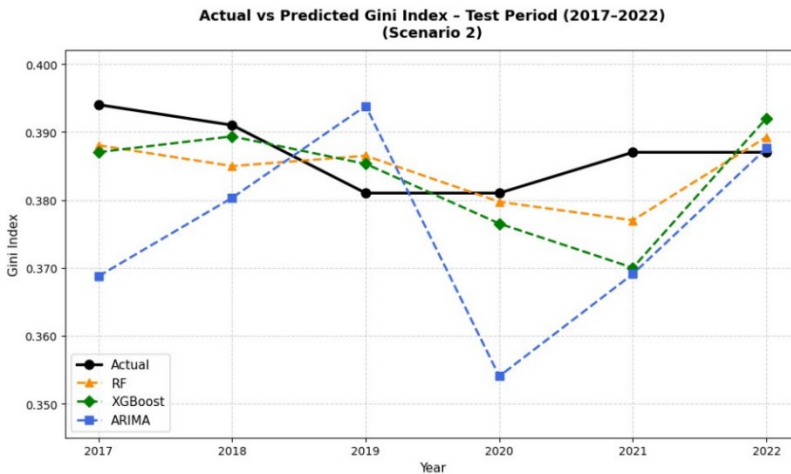


Figure 5. Actual and Predicted Values of the Model During Test Period for Scenario 2

From Figure 5 above, the results from the prospective validation show that the RF and XGBoost models are more aligned with the actual Gini value

than the underlying models. The two machine learning algorithms had slight variations during the 2017–2022 period. The ARIMA model was unable to cope with the rapid changes in 2019 and 2020. This is because the model is linear and does not capture the complexity in the economy. It is therefore evident that the results show the robustness of the machine learning model in analyzing the complexity of income inequality.

Table 6. Predicted Gini Coefficient Values for Scenario 2 (2024–2030)

Model	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
RF Forecast	0.38849	0.38891	0.38764	0.38709	0.38686	0.38743	0.38753
XGBoost Forecast	0.39014	0.39152	0.38891	0.38883	0.38875	0.38891	0.38891
ARIMA Forecast	0.38784	0.38942	0.39098	0.39228	0.39398	0.39590	0.39720

According to the 2024–2030 projection results in Table 6, XGBoost and RF yield more consistent results with each other. On the other hand, ARIMA obtained more divergent values. However, considering the results of all three algorithms, it appears that not much change is expected.

Table 7. Comparison of ARIMA, RF and XGBoost Performance Across Scenarios 1 and 2

	Model	MAE	RMSE	MAPE (%)
Scenario 1	RF	0.005045	0.006243	1.304319
Scenario 2	RF	0.005171	0.005902	1.333653
Scenario 1	XGBoost	0.007106	0.008668	1.840644
Scenario 2	XGBoost	0.006572	0.008205	1.697997
Scenario 1	ARIMA	0.006694	0.007037	1.734902
Scenario 2	ARIMA	0.015702	0.018090	4.060365

According to data in Table 7, both RF and XGBoost models offer stable predictions with low error margins. In error analysis, RF was observed to achieve the highest accuracy with the lowest MAE and RMSE values in both scenarios. ARIMA experienced a significant performance loss, particularly in the second scenario, with a MAPE rate exceeding 4%. According to the 2030 projections, machine learning models suggest that income inequality will

largely maintain its current levels, whereas the ARIMA model predicts a steady upward trend. Given the significantly lower error rates and consistency of RF and XGBoost in both scenarios, their stable outlook appears to be a more reliable indicator for future policy planning.

5. CONCLUSION

This study aims to examine the changes in income inequality in the United Kingdom by employing both conventional statistical modeling and modern machine learning modeling. The results show a remarkable superiority in the performance of the RF and XGBoost algorithms over the conventional ARIMA model. This superiority is more evident when the algorithms are applied to the significant economic volatility in the years 2019 and 2020. This performance gap in the results confirms the effectiveness and power of employing machine learning algorithms in modeling the complex and nonlinear behavior commonly found in socioeconomic datasets, including income inequality. The results of this research are in direct alignment with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly the 10th SDG, which focuses on reducing inequality. The projections for the year 2030 show that inequality is expected to remain at the same level. This indicates that the current economic and social welfare systems are not enough to address the issue and bring the desired change. It is therefore considered a strategic imperative for the United Kingdom to adopt structurally transformative measures beyond the current conventional market systems in order to achieve the 2030 targets and remain true to the spirit of "leaving no one behind."

The results obtained from the variable importance tests carried out in the above analysis confirm the significant role that public expenditure and unemployment rates play in the determination of the Gini coefficient. In this respect, the proposed models can be seen not only as tools that can be used by the decision-maker to predict the evolution of the phenomenon, but also as an early warning system that can be used to determine the periods in which the risks related to inequality are likely to be intensified. In conclusion, the significant predictive capacity that can be achieved through the application of the methods proposed in the machine learning approach can be seen as an invaluable opportunity for the development of evidence-based and proactive policies in the social sphere.

REFERENCES

- Ahmed, F., Islam, M., & Moniruzzaman, M. (2025). The impact of returnee migrants' remittances on reducing household inequality and poverty in Bangladesh: A micro-level study. *Review of Development Economics*, 29(3), 1393–1415. <https://doi.org/10.1111/rode.132504>
- Ali, M. S. A. M., Aziz, A. S. A., Norrulashikin, S. M., Norkahfi, M. F., & Haron, K. (2024). Short-term Gini coefficient estimation using nonlinear autoregressive MLP model. *Heliyon*, 10(4), e026438.
- Atkinson, A. B. (1970). On the measurement of inequality. *Journal of Economic Theory*, 2(3), 244–263.
- Atkinson, A. B. (2015). *Inequality: What Can Be Done?* Harvard University Press.
- Biau, G., & Scornet, E. (2016). A random forest guided tour. *TEST*, 25(2), 197–227.
- Blundell, R., Joyce, R., Keiller, A. N., & Ziliak, J. P. (2022). Income inequality and the labour market in Britain and the US. *Journal of Public Economics*, 162, 48–62.
- Bourguignon, F., & Spadaro, A. (2006). Microsimulation as a tool for evaluating redistribution policies. *Journal of Economic Inequality*, 4(1), 77–106.
- Box, G. E. P., & Jenkins, G. M. (1970). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden-Day.
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time Series Analysis: Forecasting and Control* (5th ed.). Wiley.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32.
- Brewer, M., & Patrick, R. (2021). *Pandemic Pressures: Why Families on a Low Income Are Feeling the Strain of COVID-19*. Resolution Foundation.
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 785–794).
- Cherif, I. L., & Kortebi, A. (2019). On using extreme gradient boosting (XGBoost) machine learning algorithm for home network traffic classification. In *2019 Wireless Days (WD)* (pp. 1–6). IEEE.

- Chetty, R., Hendren, N., Kline, P., & Saez, E. (2014). Where is the land of opportunity? *Quarterly Journal of Economics*, 129(4), 1553–1623.
- Chong, T. T., & Ka, Y. T. (2019). Forecasting Income Inequality with Demographic Projections. *Munich Personal RePEc Archive*.
- Chu, B., & Qureshi, S. (2023). Comparing out-of-sample performance of machine learning methods to forecast U.S. GDP growth. *Computational Economics*, 62(4), 1567–1609.
- Clements, M. P., & Hendry, D. F. (1999). *Forecasting Non-Stationary Economic Time Series*. MIT Press.
- Cornwall, G., & Gindelsky, M. (2024). Nowcasting Distributional National Accounts for the United States: A Machine Learning Approach. *BEA Working Paper WP2024-6*.
- David, P. (2019). Optimization of Gini coefficient affected by imperfect input data. *European Journal of Business Science and Technology*, 5(1), 21–29. <https://doi.org/10.11118/ejobsat.v5i1.160>
- Davidson, N., Bakhteyev, S., & Turkanova, S. (2021). Impact of industrial specialization and economic development on income inequality in the regions of Russia. *E3S Web of Conferences*, 301, 04004.
- Ermakova, E., & Ilyakova, I. (2022). Income and wealth distribution in the European Union and Russia: Comparative analysis. *Finance Theory and Practice*, 26(1), 24–40.
- Förster, Y. P., Annibale, A., Gamberi, L., Tzanis, E., & Vivo, P. (2022). Information retrieval and structural complexity of legal trees. *Journal of Physics: Complexity*, 3(3), 035008.
- Ghatak, S. (2019). Bihong Huang, Peter J. Morgan, and Naoyuki Yoshino (Eds.), *Demystifying Rising Inequality in Asia* [Review]. *Journal of Asian Economic Integration*, 1(2), 283–286.
- Gindelsky, M. (2018). Modeling and Forecasting Income Inequality in the United States. *BEA Working Paper WP2018-7*.
- Gini, C. (1912). Variabilità e mutabilità. *Tipografia di Paolo Cuppini*.
- Grotti, E., Santana, P. B., Filho, J. G. P., & Gomes, H. M. (2024). Multiobjective robust optimization framework based on first and second order Taylor expansion applied to a vehicle suspension design. *Optimization and Engineering*, 25(2), 637–668.

- Hood, A., & Waters, T. (2017). Living Standards, Poverty and Inequality in the UK: 2017. IFS Report R129.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2021). An Introduction to Statistical Learning (2nd ed.). Springer.
- Jenkins, S. (2016). Pareto models, top incomes and recent trends in UK income inequality. *Economica*, 84(334), 261–289.
- Ji, J. (2024). Machine learning-based income inequality prediction: A case study. *AISNA 2024*, 34–39.
- Kaloga, M. (2021). Social work and economic justice in Aotearoa New Zealand. *Aotearoa New Zealand Social Work*, 33(4), 5–13.
- Koç, T., & Akın, P. (2021). Comparison of machine learning methods in predicting the Gini coefficient for OECD countries. *International Journal of Data Science and Applications*, 4(1), 16–20.
- Li, L., Zhao, Y., Yu, H., Wang, Z., Zhao, Y., & Jiang, M. (2023). An XGBoost algorithm based on molecular structure and molecular specificity parameters for predicting gas adsorption. *Langmuir*, 39(19), 6756–6766.
- Lorenz, M. O. (1905). Methods of measuring the concentration of wealth. *Publications of the American Statistical Association*, 9(70), 209–219.
- Makariou, D., Barriou, P., & Chen, Y. (2021). A random forest based approach for predicting spreads in the primary catastrophe bond market. *Insurance: Mathematics and Economics*, 101, 140–162.
- Manseau, M. (2014). Economic inequality and poverty as social determinants of mental health. *Psychiatric Annals*, 44(1), 32–38.
- Mullainathan, S., & Spiess, J. (2017). Machine learning: An applied econometric approach. *Journal of Economic Perspectives*, 31(2), 87–106.
- Newbold, P. (1983). ARIMA model building and the time series analysis approach to forecasting. *Journal of Forecasting*, 2(1), 23–35.
- OECD (2015). In It Together: Why Less Inequality Benefits All. OECD Publishing.
- OECD (2021). Income Inequality (indicator). <https://doi.org/10.1787/459aa7f1-en>
- Palomino, J. C., Marrero, G. A., & Rodríguez, J. G. (2020). Wealth inequality and COVID-19: Evidence from the Forbes rich list. *Applied Economics Letters*, 29(3), 240–244.

- Pierdzioch, C., Gupta, R., Hassani, H., & Silva, E. S. (2022). Forecasting changes of economic inequality: A boosting approach. *The Social Science Journal*, 59(4), 472–483.
- Pokhriyal, N., & Jacques, D. C. (2017). Combining disparate data sources for improved poverty prediction and mapping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(46), E9783–E9792.
- Pradhan, N., & Agrawal, A. (2025). Mapping fine-scale socioeconomic inequality using ML and remotely sensed data. *PNAS Nexus*, 4(2), pgaf040.
- Prendergast, L., & Staudte, R. (2016). Quantile versions of the Lorenz curve. *Electronic Journal of Statistics*, 10(2).
- Rizkya, I., Syahputri, K., Sari, R. M., Siregar, I., & Utaminigrum, J. (2019). Autoregressive integrated moving average (ARIMA) model of forecast demand in distribution centre. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 598, No. 1, p. 012071). IOP Publishing.
- Salman, H. A., Kalakech, A., & Steiti, A. (2024). Random forest algorithm overview. *Babylonian Journal of Machine Learning*, 2024, 69–79.
- Sapena, M., Wurm, M., Taubenböck, H., Tuia, D., & Ruiz, L. A. (2020). Estimating quality of life dimensions from urban spatial pattern metrics. *Computers, Environment and Urban Systems*, 85, 101549.
- Sen, A. (1997). *On Economic Inequality* (Expanded ed.). Clarendon Press.
- Stiglitz, J. E. (2012). *The Price of Inequality*. W. W. Norton & Company.
- Tarwidi, D., Pudjaprasetya, S. R., Adytia, D., & Apri, M. (2023). An optimized XGBoost-based machine learning method for predicting wave run-up on a sloping beach. *MethodsX*, 10, 102119.
- Wang, R., Zhang, J., Shan, B., He, M., & Xu, J. (2022). XGBoost machine learning algorithm for prediction of outcome in aneurysmal subarachnoid hemorrhage. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 18, 659.
- Wang, S., & Luo, B. (2024). Academic achievement prediction in higher education through interpretable modeling. *Plos One*, 19(9), e0309838.
- World Bank (2022). Gini Index (World Bank Estimate). <https://data.worldbank.org/indicator/SI.POV.GINI>
- Yamashita, Y., Taya, A., Wada, T., & Tobe, Y. (2025). Decision-tree-based distributed learning for IoT devices. *Journal of Reliable Intelligent Environments*, 11(2), 9.

Yue, J., Zhang, R., Wu, C., & Xu, Y. (2023). A heterogeneity study on the impact of sustainable economic growth on environmental pollution: The case of Shandong Province.

BÖLÜM 3

AIR FRYER (HAVA FRİTÖZÜ) İLE PIŞİRME YÖNTEMİNİN GIDALARIN FİZİKOKİMYASAL VE BESİNSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Doç. Dr. Ebru AKKEMİK¹
Dr. Öğr. Üyesi Şule Azime YENİÇERİ²
Doç. Dr. Abdullah BAYCAR³

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.19497178>

¹Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye. eakkemik@siirt.edu.tr, orcid id: 0000-0002-4177-4884

²Siirt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Gıda İşleme Bölümü, Siirt, Türkiye. sulezengin@siirt.edu.tr, orcid id: 0000-0003-4014-5274

³ Siirt Üniversitesi, Turizm ve Otelcilik Yüksek Okulu, Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü, Siirt, Türkiye. abaycar@siirt.edu.tr, orcid id: 0000-0003-4995-2275

Giriş

Hava fritözleri yaklaşık yüz yıllık bir geçmişe sahip olsa da, günlük yaşamdaki yaygın kullanımları nispeten kısa bir süreye, son on yılı aşmayan bir döneme dayanmaktadır (Çelik, 2024). Son yıllarda bu cihazların en önemli katkılarından biri, yağ tüketimine bağlı sağlık sorunları yaşayan bireyler için daha düşük yağ içerikli yiyecekler hazırlamaya olanak sağlamalarıdır (Jiménez Vera vd., 2025). Artan sağlık bilinci ve düşük yağlı beslenme eğilimlerinin güçlenmesiyle birlikte hava fritözleri, evlerde en çok tercih edilen pişirme yöntemlerinden biri hâline gelmiştir. Çok az yağ kullanarak yiyecekleri pişirebilen bu cihazlar, tat ve aroma açısından geleneksel derin yağda kızartma yöntemine yakın sonuçlar sunabilmektedir.

Hava fritözleri günümüzde dünyanın birçok bölgesinde geleneksel pişirme yöntemlerine alternatif sunan mutfak aletleri olarak yaygınlaşmıştır (Şekil 1). Bu yöntemin en önemli avantajlarından biri ise, pişirme süresi ve sıcaklığı gibi işlem parametrelerine bağlı olarak gıdaların mikrobiyolojik güvenliğinin ve duyuşal özelliklerinin korunabilmesidir (Jiménez Vera vd., 2025). Bu özellikler sayesinde hava fritözleri, 2016 yılından itibaren hızla artan bir pazar payı elde etmiş ve kullanıcı beklentilerini karşılamak amacıyla üreticiler tarafından teknolojik açıdan sürekli geliştirilmeye devam etmiştir (Anonim 2022a; Anonim 2019).



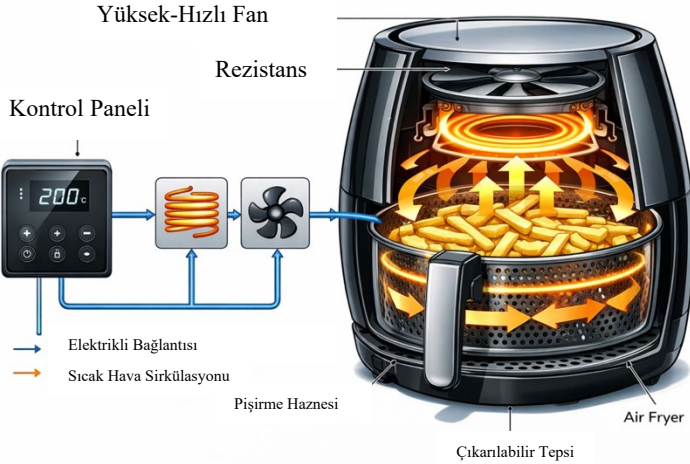
Şekil 1. Temsili hava fritözü (Google Gemini, 2024 ile üretildi)

Son yılların en popüler küçük ev aletlerinden biri hâline gelen hava fritözleri, bu kitap bölümünün odak noktası olarak ele alınmıştır. Bu bölümde, hava fritözlerinin çalışma prensipleri, gıdalar üzerindeki kimyasal ve fiziksel etkileri, sağlık açısından değerlendirilmesi ve farklı gıda gruplarında

kullanımına ilişkin bilgiler derlenmiştir. Her ne kadar hava fritözleri üzerine yapılmış çok sayıda çalışma bulunsa da bu çalışmaların bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirildiği kapsamlı bir derlemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kitap bölümünün, söz konusu literatür boşluğunu doldurma açısından önemli bir katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

Hava Fritözlerin Çalışma Prensibi

Teknolojik yeniliklerin pazar büyümesini yönlendiren önemli unsurlarından biri hâline gelen hava fritözleri, kızartma etkisini sıcak yağ yerine ısıtılmış hava kullanarak elde eden ve son yıllarda ortaya çıkan yeni bir pişirme teknolojisidir (Anonim 2022a; Boz, 2022). Tewari ve ark. (2015), hava fritözlerinin çalışma prensibini; cihaz tarafından üretilen sıcak havanın mekanik bir fan yardımıyla gıdanın etrafında dolaştırılması ve bu sayede yiyeceklerde kızarma ile gevrek bir yapının oluşmasının sağlanması şeklinde özetlemektedir (Şekil 2).



Şekil 1. Airfryer'ın çalışma prensibinin şematik gösterimi (OpenAI ChatGPT, GPT-5.3 modeli kullanılarak oluşturulmuştur, 2026)

Hava fritözlerinde kızartma işleminin gerçekleştirildiği bölüm genellikle beş temel bileşenden oluşur: pişirme haznesi, elektrığe dayanıklı ısıtıcı, elektrikli fan, hava yönlendiriciler ve sıcaklık sensörleri. Bu sistemde elektrığe dayanıklı ısıtıcı, pişirme haznesinin sıcaklığını artırırken; elektrikli fan ve hava yönlendiriciler, ısının haznenin her yerine homojen biçimde dağıtılmasını sağlar. Böylece hem enerji tasarrufu sağlanmakta hem de daha eşit ve yeknesak bir pişirme elde edilmektedir (Arslan vd., 2018).

Günümüzde birçok modelde kullanılan RUSH teknolojisi (Radiant and Upstream Heating), gıdanın üzerindeki ısıtma elemanından yayılan radyant ısının, cihazın içindeki fan tarafından oluşturulan konvektif ısı akışıyla birleşmesini sağlayarak yoğun ısı enerjisinin gıdaya etkin bir şekilde aktarılmasını mümkün kılmaktadır (Anonim 2022b).

Literatürde hava fritözlerinin kullanımına ilişkin bazı çevresel kaygılar da dile getirilmektedir. Örneğin, Wang ve Chan (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, hava fritözlerinin çalışması sırasında iç mekâna salınan hava kirletici seviyelerinin dikkat çekici düzeyde olabileceği belirtilmiştir. Bu yeni konvektif ısı transferi modunun, iç mekân hava kalitesi üzerindeki potansiyel etkileri nedeniyle ek değerlendirmelere ihtiyaç duyulduğu vurgulanmaktadır (Anonim 2022c).

Hava Fritözü ile Pişirmenin Yiyecekler Üzerinde Etkisi

Sıcak hava ile kızartma, kızarmış gıda üretiminde kullanılan nispeten yeni bir yöntemdir. Téllez-Morales ve ark. (2024), hava fritözlerinde pişirilen yiyeceklerin kalite özelliklerine dair bulguları şu şekilde özetlemektedir:

- Hava fritözlerinde pişirilen gıdaların nihai nem içeriği, geleneksel kızartmaya kıyasla genellikle daha yüksektir.
- Yağ kullanımını azaltmada önemli avantajlar sunarak lipit oksidasyonunu düşürmektedir.
- Geleneksel kızartmaya göre daha düşük akrilamid oluşumuna neden olabilmektedir.
- Bazı ürünlerde raf ömrünün kısalmasına yol açabilmektedir.
- Tekstürel özellikler, gıdanın türüne ve işlem parametrelerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.
- Renk ve parlaklık değerleri, işlem süresi ve sıcaklığa bağlı olarak azalabilmektedir.
- Ürünlerin yapısal ve morfolojik özelliklerinde, özellikle gözenek oluşumu açısından iki kızartma yöntemi arasında belirgin farklılıklar görülebilmektedir.
- Genel olarak hava fritözünde pişirilen ürünler kabul edilebilir düzeyde duyu özellikler sergilemektedir.

Farklı renklerdeki 15 havuç (*Daucus carota* L.) çeşidinin karotenoid stabilitesinin hava kurutma, hava fritözü ve derin kızartma yöntemleriyle nasıl değiştiğinin incelendiği çalışmada, 18-25 dakika süren hava fritözü ve 10 dakika süren derin kızartma işleminden sonra toplam karotenoid içeriğinde önemli bir azalma tespit edildiği belirtilmiştir (Schmiedeskamp vd. 2022). Söz

konusu çalışmada tek bir türün farklı çeşitleri incelenmiş olsa da sadece karotenoid özelliği araştırılmıştır. Bu nedenle, tek bir parametreye dayalı veriler, fenolik bileşik profili ve antioksidan metabolizmayı bütünüyle yansıtmamaktadır.

Hava fritözleri, geleneksel derin yağda kızartmaya kıyasla %80'e varan yağ azaltımı sağlayarak önemli bir beslenme avantajı sunmakta ve bu özelliği ile geleneksel kızartmanın sınırlılıklarına alternatif olarak öne çıkmaktadır (Zaghi, vd., 2019).

Hava Fritöz ile Hazırlanan Yiyeceklerin Sağlık Açısından Değerlendirilmesi

Hava fritözünü, kızartma işlemini gerçekleştirmek için sıcak yağ yerine ısıtılmış hava kullanır; böylece yemeklik yağda olan gereksinimi ortadan kaldırarak geleneksel kızartma ve fırınlamaya kıyasla daha sağlıklı bir pişirme yöntemi sunar. Ancak, hava fritözünün gıdada oluşan kanserojen bileşenleri etkili bir şekilde azaltılabileceğine dair kanıtlar sınırlıdır. Hava fritözünü ve fırın kullanılarak pişirilen dana köftelerindeki tipik bir kanserojen olan Benzo[a]piren (BaP) konsantrasyonları karşılaştırıldığında fırında pişirilen etlerdeki BaP konsantrasyonunun, hava fritözünde pişirilenlere kıyasla daha yüksek olduğunu görülmekle birlikte pişirme sıcaklığı arttıkça fırında pişirilen etlerde BaP seviyesinin arttığı belirlenmiştir. Ancak hava fritözünde ne pişirme sıcaklığının ne de süresinin BaP konsantrasyonu üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir (Chen vd. 2024). Hava fritözünde pişirilen mersin balığı bifteklerinin, geleneksel derin yağda kızartmaya göre daha fazla nem koruduğu, daha yumuşak ve elastik bir dokuya sahip olduğu, daha zengin aroma bileşenleri içerdiği ve sindiriminin daha hızlı gerçekleştiği belirlenmiştir. Genel olarak hava fritözünde pişirme yöntemi, mersin balığı bifteklerinde çıtır bir doku, çekici bir aroma ve düşük yağ içeriği sunmaktadır (Liu vd, 2022). Tayvan Kapalı Çevre Hava Kalitesi Derneği tarafından 2020 yılında yapılan bir çalışma, diğer pişirme yöntemleriyle karşılaştırıldığında, hava fritözünün pişirme sırasında daha fazla kapalı hava kirliliği riski oluşturduğunu göstermiştir (Anonim 2022c). Hava fritözünden kaynaklanan parçacıkların, tespit yerine bağlı olarak derin yağda kızartmadan kaynaklanan parçacıkları 13 kata kadar aşabileceği ifade edilmektedir (Anonim 2022d). Tüm bu endişeler dahilinde son zamanlarda hava fritözleri ile ilgili bilimsel çalışmalar hız kazanmıştır. Mevcut çalışmalara göz attığımızda hava fritözlerinin olumlu ve olumsuz etkileri tespit edilmiştir.

İlk olarak literatürdeki hava fritözlerinin olumlu etkilerini içeren çalışmalar incelendiğinde, kızarmış patateslerin akrilamid oluşumunun araştırıldığı çalışmada, hava fritözü ile elde edilen patates kızartmalarında, ön işlem uygulanmasına gerek kalmadan geleneksel derin yağda kızartmaya kıyasla akrilamid içeriğinin yaklaşık %90 oranında daha az olduğunun tespit edildiği belirtilmiştir (Sansano vd. 2015). Ayrıca farklı bir çalışmada zencefil, hodan ve rezene özütünün patates kızartmalarındaki akrilamid (AA) içeriği üzerindeki etkisini değerlendirmek ve hava fritözü (AF) ile derin kızartma (DF) tekniklerinin AA oluşumuna karşı etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, akrilamid oluşumunu azaltmada bitki ekstraktlarının kullanımının faydalı bir ön işlem olduğu, kızartma tekniği olarak da hava fritözünün etkili bir yöntem olduğu belirtilmiştir (Haddarah vd. 2021). Hava fritözü işlemlerinin kızartma işlemi için daha uygun olduğu ve diğer geleneksel kızartma yöntemlerinden daha sağlıklı kızarmış yiyecekler ürettiği başka bir çalışmada açıkça belirtilmiştir (Shaker, 2015). Yapılan bu çalışmalarda genel olarak patates ve kızartma işlemi analiz edilerek akrilamid üzerinden hava fritözlerinin olumlu etkileri dile getirilmiştir. Ancak hava kurutucuların akrilamid oluşumuna nispeten daha az yol açması antioksidan metabolizma üzerindeki etkisini açıklamak için yeterli değildir.

Hava fritözlerinin olumsuz etkilerini içeren çalışmalar incelendiğinde ise hava fritözü ile kavurma sırasında farklı baklagil türlerinin ve kavurma sürelerinin akrilamid oluşumunu nasıl etkilediğini araştırmayı amaçlayan çalışmada en yüksek akrilamid içeriğinin sırasıyla kavrulmuş Wandu kong (bahçe bezelyesi), Ultari kong (börülce) ve Heoktae (siyah soya fasulyesi) takip ettiği belirtilmiştir. Hava fritözünde daha uzun süre kavru lan fasulyelerin, önemli ölçüde daha yüksek akrilamid seviyeleri içerdiği belirtilirken, akrilamid içeriği ve sürenin doğrusal bir regresyon içerdiği ifade edilmiştir (Jung vd. 2024). İlgili çalışma kullanılan ürünün içeriğine göre hava fritözlerinin etkisinin değişebileceğini ifade etmektedir.

Farklı Gıda Gruplarında Hava Fritöz Kullanımı

Hava fritözü teknolojisinin, yağ azaltımı, lipid bozunumu ve oksidasyon olasılığı sayesinde daha sağlıklı kızarmış yiyecekler elde etmek için pratik bir alternatif olarak, geleneksel kızartmaya kıyasla daha yüksek besin kalitesi sunduğu genel bir kanıdır (Zaghi, vd., 2019).

Tavuk kanatlarındaki *Salmonella'nın* termal inaktivasyonu için ev aletlerinin (konveksiyon ve hava fritözlü fırınlar) kullanımının doğruluğunun araştırıldığı çalışmada, üreticiler ve çevrimiçi tarifler tarafından önerilen

sıcaklık-zaman kombinasyonlarında pişirme, her iki cihazda da tam mikrobiyal eliminasyona ulaşılmasına yardımcı olduğunun belirlendiği ifade edilmiştir (Cano vd. 2022). Önerilen sıcaklık ve zaman şartlarında konveksiyon ve hava fritözlü fırınların kullanılması mikrobiyal etkinliği azaltabilmesi antioksidan açıdan yeterli olduğu anlamına gelmemektedir. Mevcut ısı ve zaman koşulları tüm antioksidan sürece zarar verebilir. Benzer bir çalışmada ise sıcaklık, zaman, ön ıslatma ve ön baharatlama işlemleri gibi çeşitli pişirme parametrelerinin etkisini inceleyerek hava fritözünde kızartılmış lotus kökü cipslerinde akrilamid oluşumu için yüksek risk faktörlerini ve azaltma stratejilerini belirlemek amacıyla bir çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmada, kısa pişirme süresine sahip yüksek bir sıcaklık (170°C/13 dakika), uzun pişirme süresine sahip düşük bir sıcaklık (150°C/19 dakika) ile kıyaslandığında süre kısaltılması ve sıcaklık artışının akrilamid azaltılmasın da büyük ölçüde faydalı olduğu belirtilmiştir (Lee vd. 2024).

Hava fritözü ve fırın kullanılarak pişirilen dana köftelerinde, tipik bir kanserojen olan Benzo[a]piren (BaP) konsantrasyonunu farklı pişirme koşulları altında, incelendiği çalışmada sığır etini hava fritözünde pişirmenin, özellikle yağsız pişirme avantajı nedeniyle BaP konsantrasyonunu etkili bir şekilde azaltabileceği ve hava fritözünün yüksek sıcaklıklarda et hazırlayan kişiler için üstün bir seçenek olduğu belirtilmektedir (Chen vd. 2024). Aynı zamanda hava fritözünde patateslerde derin kızartmaya kıyasla önemli ölçüde daha düşük miktarda trans yağ asidi oluştuğu tespit edildiği ifade edilmiştir (Santos vd. 2017). Her iki çalışmada da elde edilen ürünlerde oluşabilecek toksik içerik analiz edilmeye çalışılmıştır. Ancak mevcut besin içeriğini koruması analiz edilmemiştir.

Airfryer pişirme işleminde kullanılan ayçiçeği ve mısır yağlarının, pişirme türü, süresi ve sıcaklığına bağlı olarak serbest yağ asidi, peroksit sayısı, özgül absorbans, tokoferol, yağ asit kompozisyonu analizleri yapılarak ortaya çıkan değişiklikler araştırılmıştır. Hem derin yağ hem de airfryer kızartma işlemleri sonrasında elde edilen ayçiçeği ve mısır yağları üzerinde yapılan analizle neticesinde mısır ve ayçiçek yağlarının kızartma tekniğine bağlı olarak farklı sonuçlar verdiği, ancak her iki yöntemde de tokoferol içeriğinin azaldığı ifade edilmiştir (Yıldırım, 2024).

Sonuç ve Öneriler

Hava fritözleri, geleneksel derin yağda kızartma yöntemlerine kıyasla daha az yağ kullanımı sağlayarak hem beslenme açısından avantaj sunmakta hem de yiyeceklerin tat ve tekstürel özelliklerini büyük ölçüde korumaktadır.

Yapılan çalışmalar, hava fritözünde pişirilen ürünlerde akrilamid ve trans yağ asidi gibi potansiyel olarak zararlı bileşiklerin derin yağda kızartmaya kıyasla belirgin şekilde azaldığını göstermektedir. Ayrıca, düşük yağ kullanımı, lipit oksidasyonunu ve bazı durumlarda kanserojen madde oluşumunu azaltma potansiyeline sahiptir.

Hava fritözünde farklı gıda gruplarının antioksidan ve fenolik içeriklerinin kapsamlı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Pişirme süresi ve sıcaklık, besin değerini koruyacak ve zararlı bileşik oluşumunu minimize edecek şekilde optimize edilmelidir. Ayrıca, hava fritözlerinin çevresel etkileri ve kapalı alan hava kalitesi üzerindeki etkileri dikkate alınarak güvenli kullanım önerileri geliştirilmelidir. Kullanılan yağ türlerine bağlı fiziko-kimyasal değişiklikler ve antioksidan kayıplar sistematik olarak araştırılmalı, elde edilen bulgular ışığında optimum pişirme koşulları belirlenerek hem sağlık hem de duyuşsal kalite açısından faydalı gıdalar hazırlanmalıdır.

Kaynakça

- Anonim 2019 Air Fryers US Retail Sales 2015-2019 | Statista. <https://www.statista.com/statistics/1209461/us-retail-sales-air-fryers/>. (accessed July 12, 2022).
- Anonim 2022a Air Fryer Market Size, Share & Review | Global Industry Report2027 <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/air-fryer-market>. (accessed July 12, 2022).
- Anonim 2022b What is Rapid Air Technology? - APDS. <http://apds.nl/development-en/what-is-rapid-air-technology/>. (accessed July 12,2022).
- Anonim 2022c Air Fryers Threaten Indoor Air Quality, Study Shows, TaipeiTimes. <https://www.taipeitimes.com/News/taiwan/archives/2020/10/25/2003745771>. (accessed July 12, 2022).
- Anonim 2022d Press Conference on Indoor Environmental Quality and Health: Discussion and Promotion of Hazardous Factor. http://www.wjytrust.org.tw/j20w/cus/art/Cc1ar06.do?dc_btn_0=Func_NewsDetail&dc_xuid_0=5IWNXWGV4Y1500. (accessed July 12,2022).
- Arslan, M., Xiaobo, Z., Shi, J., Rakha, A., Hu, X., Zareef, M., & Basheer, S. (2018). Oil uptake by potato chips or French fries: A review. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 120(10), 1800058.
- Boz, H., (2022). Sıcak havada pişirilmiş (airfrying) ürünlerin özellikleri. *Gastro-Dünya Dergisi*, 1(1),41-49.
- Cano, C., Wei, X., Etaka, C. A., & Chaves, B. D. (2022). Thermal inactivation of Salmonella on chicken wings cooked in domestic convection and air fryer ovens. *Journal of Food Science*, 87(8), 3611-3619.
- Chen, X., Liao Y., Lin B.,He X., Li S.,Zhong C., Li, S., Zhou Y., and Fan L. (2024). "The Concentration of Benzo[a]pyrene in Food Cooked by Air Fryer and Oven: A Comparison Study" *Toxics* 12(6), 416. <https://doi.org/10.3390/toxics12060416>
- Çelik, S. (2024). Air fryer: Reflections on working class objects of desire and changing food culture. *Toros University Journal of Food Nutrition and Gastronomy*, 3(1), 1-16.
- Google. (2024). *Gemini: İşbirlikçi Yapay Zeka Modeli* [Yapay Zeka Aracı]. <https://gemini.google.com/> adresinden erişildi 24.03.2026.

- Haddarah, A., Naim, E., Dankar, I., Sepulcre, F., Pujolà, M., & Chkeir, M. (2021). The effect of borage, ginger and fennel extracts on acrylamide formation in French fries in deep and electric air frying. *Food Chemistry*, 350, 129060.
- Jiménez Vera, R., González Cortés, N., & Luna-Jiménez, A. L. (2025). Quality of foods processed in the air fryer.
- Jung, M.Y., Baek, C.H., Ma, Y., Lee, H. W. Acrylamide formation in air-fryer roasted legumes as affected by legume species and roasting degree: the correlation of acrylamide with asparagine and free sugars. *Food Sci Biotechnol* **33**, 2333–2342 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10068-024-01633-w>
- Lee HW, Baek CH, Ma Y, Lee J, Moon B, Lee KW, Jung MY. 2024. Identifying high-risk factors and mitigation strategies for acrylamide formation in air-fried lotus root chips: Impact of cooking parameters, including temperature, time, presoaking, and seasoning. *J Food Sci. Mar*;89(3):1473-1484. doi: 10.1111/1750-3841.16939. Epub 2024 Jan 23. PMID: 38258947.
- Liu, L., Huang, P., Xie, W., Wang, J., Li, Y., Wang, H., Xu H., Bai F., Zhou X., Gao R., & Zhao, Y. (2022). Effect of air fryer frying temperature on the quality attributes of sturgeon steak and comparison of its performance with traditional deep fat frying. *Food Science & Nutrition*, 10(2), 342-353.
- OpenAI. (2026). ChatGPT (GPT-5.3) [Large language model. <https://chat.openai.com>, 24.03.2026.
- Sansano, M.; Juan-Borrás, M.; Escriche, I.; Andrés, A.; Heredia, A. 2015. Effect of pretreatments and air-frying, a novel technology, on acrylamide generation in fried potatoes. *J. Food Sci.*, 80, T1120–T1128.
- Santos, C. S. P.; Cunha, S. C.; Casal, S. 2017 Deep or air frying? A comparative study with different vegetable oils. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, 119, 1600375.
- Schmiedeskamp, A., Schreiner, M., & Baldermann, S. (2022). Impact of cultivar selection and thermal processing by air drying, air frying, and deep frying on the carotenoid content and stability and antioxidant capacity in carrots (*Daucus carota* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(5), 1629-1639.
- Shaker, M. A. Comparison between traditional deep-fat frying and air-frying for production of healthy fried potato strips. *Int. Food Res. J.* 2015, 22, 1557–1563.

- Télléz-Morales, J. A., Rodríguez-Miranda, J., & Aguilar-Garay, R. (2024). Review of the influence of hot air frying on food quality. *Measurement: Food*, 14, 100153.
- Tewari, A., Israni, K., & Tolani, M. (2015). Air Fryer using Fuzzy Logic. *International Journal of Computer Applications*, 975, 8887.
- Wang, X., & Chan, A. W. (2023). Particulate Matter and Volatile Organic Compound Emissions Generated from a Domestic Air Fryer. *Environmental Science & Technology*, 57(45), 17384-17392.
- Yıldırım, S. (2024). Airfryer pişirme tekniğinin bitkisel yağlar üzerindeki etkilerin incelenmesi (Master's thesis, Konya Teknik Üniversitesi). 104 s
- Zaghi, A. N., Barbalho, S. M., Guiguer, E. L., & Otoboni, A. M. (2019). Frying process: From conventional to air frying technology. *Food Reviews International*, 35(8), 763-777.

BÖLÜM 4

KENTSEL PLANLAMA VE YENİLENEBİLİR ENERJİ ENTEGRASYONU

Alperen ÜNLÜ¹

Doç. Dr. Önder KABAŞ²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.19497221>

¹ Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü , Yenilenebilir Enerji Teknolojileri Anabilim Dalı, Antalya, Türkiye. Alperennl6@hotmail.com, orcid id: 0009-0001-4147-4339

² Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu , Makine Ve Metal Teknolojileri Bölümü, Antalya, Türkiye. okabas@akdeniz.edu.tr, orcid id: 0000-0003-0703-4804

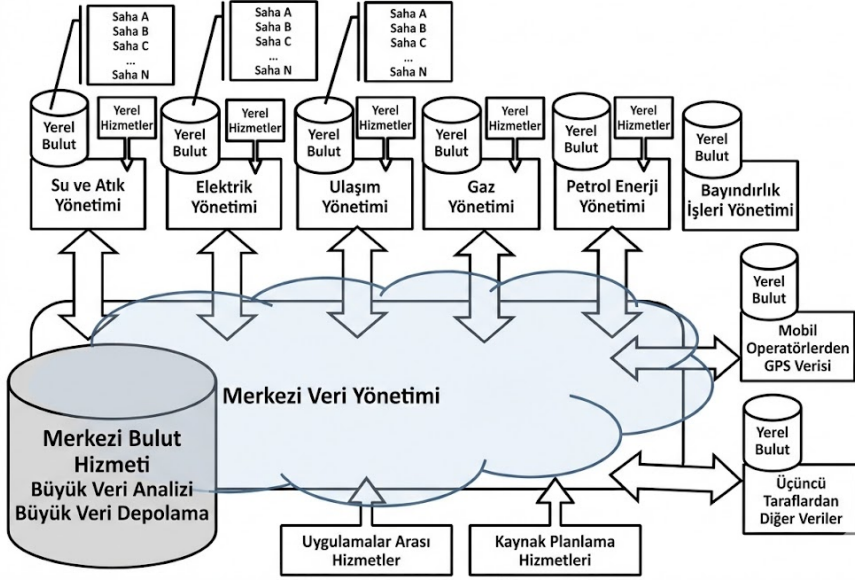
GİRİŞ

Hızlı kentleşme ve iklim değişikliği baskısı altında, kentsel enerji sistemlerinin dönüşümü küresel bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu çalışma, kentsel alanlarda yenilenebilir enerji entegrasyonunu; teknolojik altyapı, mekânsal planlama, sosyal katılım ve yönetim çerçeveleri ekseninde çok boyutlu bir yaklaşımla ele almaktadır.

Çalışma öncelikle, IoT, Yapay Zeka ve akıllı şebekelerin kentsel verimliliği artırmadaki rolünü ve sınırlarını analiz etmektedir. İkinci olarak, kentsel formun enerji talebi üzerindeki belirleyici etkisi ve yoğunlaşma paradoksu, mekânsal planlama araçlarının etkinliği üzerinden tartışılmaktadır. Üçüncü olarak, teknolojik çözümlerin ötesinde, Yenilenebilir Enerji Toplulukları (YET) ve "türetici" (prosumer) kavramları üzerinden sosyal kabul ve vatandaş katılımının stratejik önemi vurgulanmaktadır. Dördüncü bölümde, çevresel etki analizlerinde geleneksel metriklerden, geleceğin belirsiz şoklarına karşı "iklim dirençliliği" (climate resilience) paradigmasına geçiş ihtiyacı ortaya konmaktadır. Son olarak, politika ve yönetim mekanizmaları incelenerek, finansal risklerin baskılayıcı rolüne ve bağlama duyarlı politika tasarımlarının gerekliliğine dikkat çekilmektedir. Sonuç olarak bu çalışma, başarılı bir enerji dönüşümünün tekil teknolojik müdahalelerle değil; planlama, toplum ve yönetimi bütünleştiren holistik bir stratejiyle mümkün olacağını savunmaktadır.

1. AKILLI ŞEHİRLER VE TEKNOLOJİK ENTEGRASYON

Nesnelerin İnterneti (IoT), Yapay Zeka (AI) ve büyük veri gibi teknolojilerle desteklenen "Akıllı Şehir" girişimlerinin yükselişi, kaynak tükenmesi ve iklim değişikliği gibi artan kentleşme sorunlarına yönelik dönüştürücü bir yol sunmaktadır. Literatürdeki temel argüman, akıllı şehir teknolojilerinin kentsel sistemleri sürdürülebilirlik ekseninde optimize etme potansiyeli taşıdığıdır (Zhao, 2025; Aziz et al., 2024) (Şekil 1). Bu bağlamda, bir şehrin "sürdürülebilir" olmadan gerçekten "akıllı" olamayacağı tezi kritik bir önem kazanmaktadır.



Şekil 1: Akıllı Şehir Teknolojilerinin Entegrasyonu (N.Zakaria & N.J., 2015)

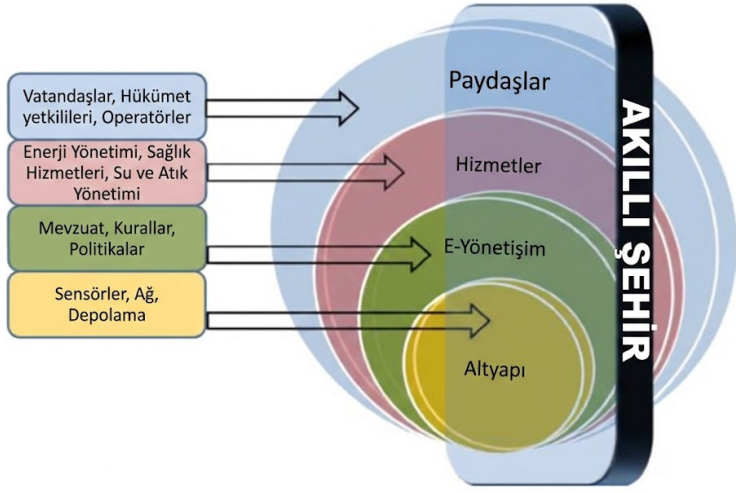
Bu vizyon, teknolojik entegrasyonu kendi başına bir amaç olarak değil; çevresel sorumluluğu, sosyal eşitliği ve ekonomik dayanıklılığı artırmanın bir aracı olarak konumlandırmaktadır (Cortese et al., 2022; Esfandi et al., 2024). Ancak bu dönüşüm sadece gelişmiş ekonomilerle sınırlı değildir; düşük gelirli gelişmekte olan ülkelerde de (LID) enerji entegrasyonunun kentsel planlama süreçlerine dahil edilmesi, ulusal bir vizyon ve yasal çerçeve (Action-Plan-Policy-Law) gerektiren kritik bir güvenlik ve kalkınma meselesi olarak ele alınmaktadır (Sabory et al., 2025).

1.1. Akıllı Şehirlerin Teknolojik Temelleri

Akıllı şehir fonksiyonlarını mümkün kılan temel teknolojiler, kentsel yönetimde stratejik bir öneme sahiptir. Nesnelerin İnterneti (IoT), Bilgi ve İletişim Teknolojileri (ICT) ve büyük veri analitiği, gerçek zamanlı izleme ve veriye dayalı kentsel yönetim için teknolojik bir omurga oluşturmaktadır. Bu altyapı, şehirlerin daha verimli, yaşanabilir ve sürdürülebilir hale gelmesini sağlayan temel katmanları destekler.

Literatür, akıllı bir şehrin temel teknolojik katmanlarını şu şekilde tanımlamaktadır (Şekil 2):

- **Altyapı (Infrastructure):** Bu temel katman, kentsel verileri büyük ölçekte toplayan sensörler, ağlar ve veri depolama sistemlerini içerir (Aziz et al., 2024). Örneğin, hava kalitesini, enerji tüketimini ve su kullanımını izlemek için kullanılan IoT özellikli sensörler bu katmanın pratik bir uygulamasını oluşturur (Zhao, 2025).
- **Yönetişim ve Veri Analitiği (Governance and Data Analytics):** Bu katman, toplanan verileri büyük veri analitiği ve yapay zeka kullanarak işler. Çin'deki 224 şehir üzerinde yapılan kapsamlı bir çalışma, akıllı şehir pilot uygulamalarının (SCP) enerji tüketimini %3,3 ve enerji yoğunluğunu %5,3 oranında azalttığını ampirik olarak kanıtlamıştır (Xue et al., 2023). Bu tasarrufun temel mekanizması, sadece teknoloji kullanımını değil, "akıllı endüstriyel dönüşüm" yoluyla sağlanan verimlilik artışıdır.
- **Hizmetler (Services):** Entegre veriler; enerji yönetimi, trafik kontrolü ve atık yönetimi gibi kentsel hizmetlerin optimizasyonunu sağlar (Aziz et al., 2024; Esfandi et al., 2024).
- **Paydaşlar (Stakeholders):** Vatandaşlar, hükümet yetkilileri ve özel sektör operatörleri, teknolojik olarak geliştirilmiş bu hizmetlerin nihai kullanıcılarıdır (Aziz et al., 2024). Ancak gelişmekte olan ülkelerde paydaş koordinasyonu ve yasal çerçevelerin eksikliği, bu teknolojilerin entegrasyonunda en büyük engel olarak öne çıkmaktadır (Sabory et al., 2021).



Şekil 2: Bir Akıllı Şehrin Katmanları (N.Zakaria & N.J., 2015)

Bu teknolojik altyapının en kritik uygulamalarından biri, kentsel enerji sistemlerinin akıllı şebekeler aracılığıyla modernizasyonudur.

1.2. Akıllı Şebekeler ve Enerji Verimliliği

Akıllı şebekeler, kentsel enerji sürdürülebilirliğine ulaşmada stratejik bir rol oynamaktadır. Bu teknolojik sistemler, elektrik üretimi ve dağıtımının verimliliğini, güvenilirliğini ve güvenliğini artırırken, aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu da mümkün kılar (Cortese et al., 2022; Zreik & Jiao, 2025).

Geleneksel merkezi sistemlerin ölçeklenebilirlik sorunlarına karşı, son dönemde geliştirilen merkeziyetsiz çerçeveler dikkat çekmektedir. Özellikle Federe Öğrenme (Federated Learning) ve Çok Ajanlı Pekiştirmeli Öğrenme (MARL) kullanan yeni yaklaşımlar, veri gizliliğini koruyarak şebeke güvenilirliğini %20 oranında artırabilmektedir (Khan et al., 2025).

Shenzhen vaka incelemesi ve diğer güncel kaynaklardan elde edilen veriler, akıllı şebeke uygulamalarının başarılarını ve karşılaştığı zorlukları net bir şekilde ortaya koymaktadır:

Tablo 1: Başarılar ve Potansiyeller & Zorluklar ve Riskler karşılaştırması

Başarılar ve Potansiyel	Zorluklar ve Riskler
<p>Enerji Verimliliği: Shenzhen'de 2.1 milyon akıllı sayaç kurulumuyla yıllık %15 enerji tasarrufu (1.6 TWh) sağlandı (Zhao, 2025). Çin genelinde SCP politikaları enerji yoğunluğunu %5,3 düşürmüştür (Xue et al., 2023).</p>	<p>Yüksek Uygulama Maliyetleri: Akıllı şebeke altyapısının kurulumu, özellikle mevcut sistemlerin yenilenmesi, önemli bir yatırım gerektirmektedir (Zhao, 2025; Esfandi et al., 2024).</p>
<p>Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu: Arz ve talebi dinamik olarak dengeleyerek güneş ve rüzgar gibi kesintili kaynakların entegrasyonunu kolaylaştırır. Merkeziyetsiz algoritmalarla yenilenebilir enerji kullanımında %25 artış sağlanabilmektedir (Khan et al., 2025).</p>	<p>Veri Güvenliği ve Siber Tehditler: Shenzhen'de 2023'te 47 akıllı şebeke ihlali yaşanması, sistemlerin siber saldırılara karşı savunmasızlığını göstermektedir (Zhao, 2025). Bu sistemlerin korunması için gelişmiş siber güvenlik önlemleri zorunludur (Esfandi et al., 2024).</p>
<p>Operasyonel Optimizasyon: Gerçek zamanlı izleme ve talep-yanıt mekanizmaları sayesinde şebeke operasyonları optimize edilir ve kesintiler azalır (Zhao, 2025; Esfandi et al., 2024).</p>	<p>Yasal ve Politik Boşluklar: Özellikle düşük gelirli ülkelerde (LID), enerji ve kentsel planlamayı bütünleştirecek yasal çerçevelerin ve yetkili kurumların eksikliği büyük bir engeldir (Sabory et al., 2021).</p>
<p>Ekonomik Faydalar: Toplam 2.8 milyar dolarlık yatırıma karşılık yıllık 420 milyon dolar tasarruf ve 6.7 yıllık geri ödeme süresi gibi önemli ekonomik verimlilikler sunar (Zhao, 2025).</p>	<p>Sosyal Eşitlik Sorunları: Shenzhen'deki yatırımın sadece %0.4'ünün (12 milyon dolar) düşük gelirli sübvansiyonlara ayrılması, faydaların eşit dağılmadığını göstermektedir (Zhao, 2025).</p>

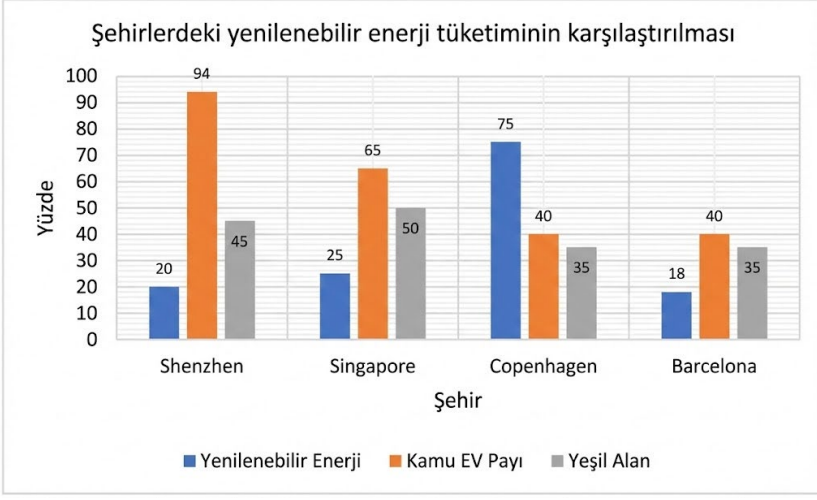
Enerji sistemlerindeki bu gelişmeler, mobilitenin elektrifikasyonu ile birlikte ulaşım sektörüne yeni talepler getirerek akıllı şebekelerin önemini daha da artırmaktadır.

1.3. Elektrikli Araçlar (EV'ler) ve Akıllı Mobilite

İleri teknolojinin kentsel ulaşımına entegrasyonu, akıllı şehir konseptinin temel taşlarından biridir. Bu entegrasyon, özellikle elektrikli mobilite ve akıllı

trafik yönetimi aracılığıyla emisyonları ve enerji tüketimini azaltmaya odaklanmaktadır. Shenzhen vaka incelemesi, bu alandaki başarıları ve zorlukları somut bir şekilde gözler önüne sermektedir (Şekil 3).

- **Toplu Taşımada Elektrifikasyon Başarısı:** Shenzhen, toplu taşıma filosunu (16,500 otobüs) %100 ve taksilerini (22,000 taksit) %94 oranında elektrikli hale getirerek bu alanda küresel bir model oluşturmuştur (Zhao, 2025).
- **Bireysel Araçlarda Benimseme Zorlukları:** Toplu taşıma alanındaki bu başarıya karşın, özel otomobillerde elektrikli araç benimseme oranı %35 (1.23 milyon EV) gibi daha düşük bir seviyede kalmıştır (Zhao, 2025).
- **V2G ve Emisyon Azaltımı:** V2G teknolojisi, EV'lerin mobil enerji depolama birimleri olarak hareket etmesini sağlar. Gelişmiş optimizasyon algoritmaları (MPC ve MARL) kullanıldığında, bu teknoloji sadece şebekeyi dengelemekle kalmaz, aynı zamanda yenilenebilir enerji kullanımını artırarak fosil yakıt bağımlılığını düşürür (Khan et al., 2025).
- **Destekleyici Teknolojiler:** Şebekeden Araca (G2V) ve Araçtan Şebekeye (V2G) gibi teknolojiler, elektrikli araçların mobil enerji depolama birimleri olarak hareket etmesini sağlayarak şebeke istikrarını artırmaktadır. Ayrıca, akıllı şarj istasyonları dinamik fiyatlandırma ile yoğun olmayan saatlerde şarjı teşvik etmektedir (Esfandi et al., 2024).
- **Sürdürülebilirlik ve Döngüsel Ekonomi Sorunları:** Elektrikli araç batarya atıkları yeni bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Shenzhen'de 2023 yılında 12,000 ton kullanılmış batarya atığı oluşmuş ve bunların sadece %35'i geri dönüştürülmüştür (Zhao, 2025).
- **Sosyo-Ekonomik Eşitsizlikler:** Elektrikli araçların benimsenmesinde önemli eşitlik sorunları gözlemlenmektedir. Shenzhen'deki sübvansiyonlu EV kiralama programları, yüksek gelirli grupların %62'sine ulaşırken, düşük gelirli hanelerin yalnızca %12'sine ulaşabilmiştir. Bu durum, belirgin bir "dijital uçurum" ve erişim eşitsizliğine işaret etmektedir (Zhao, 2025).



Şekil 3: Bazı şehirlerin yenilenebilir enerji tüketim oranı (Zhao, 2025)

Hem elektrikli araç entegrasyonunun hem de genel trafik akışının optimizasyonu, giderek daha fazla yapay zekaya dayanmaktadır.

1.4. Yapay Zeka ve Makine Öğreniminin Rolü

Yapay Zeka (AI) ve Makine Öğrenimi (ML), enerjiden mobiliteye kadar çeşitli akıllı şehir alanlarında performansı optimize etmek için büyük veri setlerini analiz eden kişiselsel kolaylaştırıcılar olarak stratejik bir rol oynamaktadır. Bu teknolojiler, kentsel sistemlerin verimliliğini artırmada ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada merkezi bir konuma sahiptir.

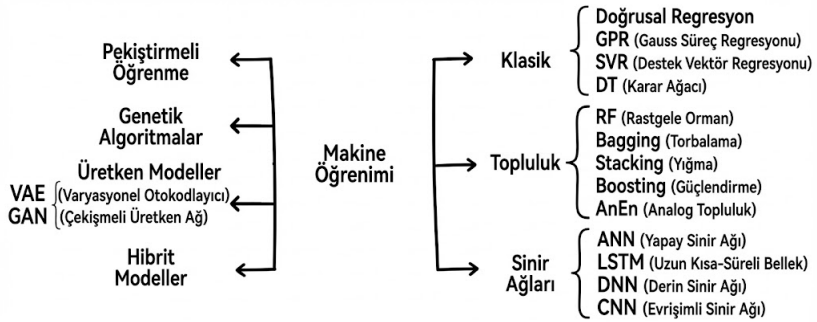
- *AI Destekli Kentsel Optimizasyon (AI-Powered Urban Optimization):* Yapay zeka destekli yönetim sistemleri, çevresel faydaları somut çıktılara dönüştürebilmektedir. Örneğin Shenzhen'de uygulanan AI destekli trafik yönetimi, CO₂ emisyonlarında %20'lik bir düşüş sağlamıştır (Zhao, 2025). Benzer şekilde, Çin'deki akıllı şehir pilotları (SCP) üzerine yapılan kapsamlı bir çalışma, dijital teknolojilerin entegrasyonunun "akıllı endüstriyel dönüşümü" tetiklediğini ve bu sayede enerji yoğunluğunun %5,3, enerji tüketiminin ise %3,3 oranında azaldığını ortaya koymuştur (Xue et al., 2023). Bu durum, AI teknolojilerinin sadece operasyonel verimliliği değil, aynı zamanda yapısal ekonomik dönüşümü de hızlandırdığını göstermektedir.

- *Gizlilik Odaklı Yeni Nesil Algoritmalar (Federated Learning & MARL):*

Geleneksel merkezi veri toplama yöntemlerinin yarattığı gizlilik ve ölçeklenebilirlik sorunlarına karşı, yeni nesil merkeziyetsiz algoritmalar geliştirilmiştir. Khan et al. (2025) tarafından önerilen çerçeve, Federe Öğrenme (Federated Learning - FL) ve Çok Ajanlı Pekiştirmeli Öğrenme (MARL) tekniklerini kullanmaktadır (Khan et al., 2025). Bu yaklaşım, ham verileri merkezi bir sunucuda toplamak yerine, veriyi yerel cihazlarda işleyerek sadece model güncellemelerini paylaşır. Diferansiyel gizlilik (differential privacy) ile güçlendirilen bu yöntem, veri güvenliğini sağlarken şebeke güvenilirliğini %20 oranında artırabilmektedir (Khan et al., 2025).

- *Yapay Zekanın Zorlukları ve Etik Boyutları (Challenges and Ethics of AI):*

Yapay zeka modellerinin başarısı, kullanılan verinin kalitesine ve algoritmik tasarımın doğruluğuna bağlıdır. Yanlı tasarlanmış algoritmalar toplumsal eşitsizlikleri derinleştirebilir; nitekim ticari bölgelere öncelik veren trafik sistemleri, banliyö sakinlerinin ulaşım süresini uzatarak mekansal adaletsizliğe yol açmıştır (Zhao, 2025). Ayrıca, tüm makine öğrenimi modelleri (Yapay Sinir Ağları, Rastgele Orman vb.), eğitilmek ve doğrulanmak için hassas ve yüksek kaliteli gözlemsel verilere kritik düzeyde bağımlıdır (Canché-Cab et al., 2024) (Şekil 4).



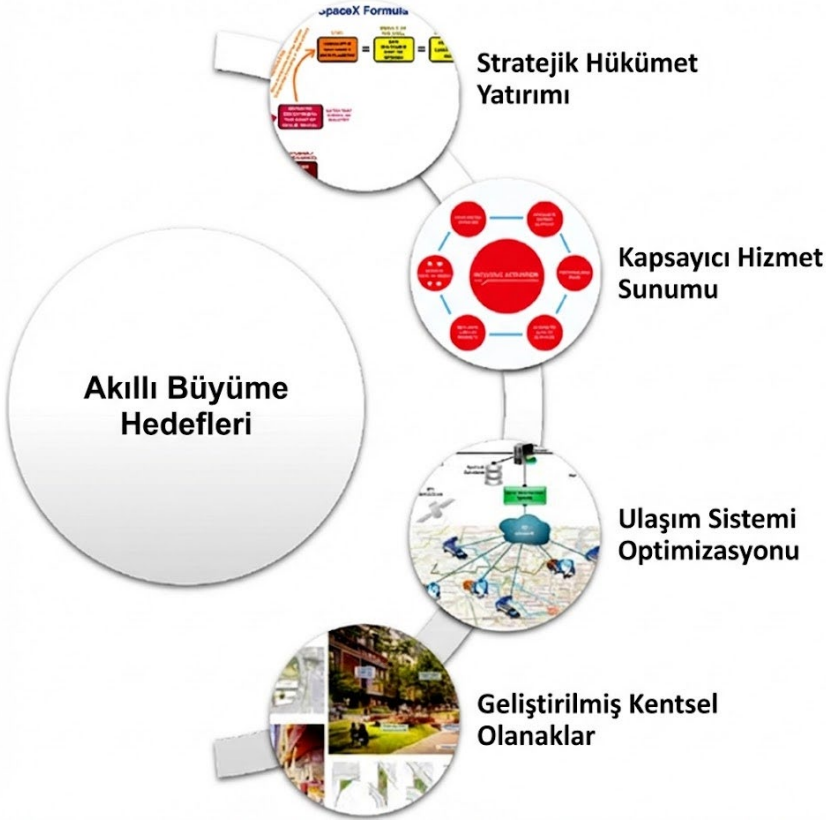
Şekil 4: En çok kullanılan makine öğrenmesi fonksiyonları (Canché-Cab et al., 2024)

2. MEKANSAL PLANLAMA, ARAZİ KULLANIMI VE KENTSEL TASARIM

Modern kentler, biri demografik, diğeri ekolojik olmak üzere iki temel ve birbiriyle ilişkili baskıyla karşı karşıyadır: bir yandan artan nüfuslarını barındırmak için yoğunlaşma ihtiyacı, diğeri yandan iklim değişikliğiyle mücadele hedeflerine ulaşmak için fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına (RES) geçiş yapma zorunluluğu. Bu ikili dinamik, kentsel alanları, enerji sistemleri ve mekansal yapılar arasındaki karmaşık etkileşimlerin yönetilmesi gereken kritik arenalara dönüştürmektedir.

Bu bağlamda, mekansal planlama, arazi kullanımı politikaları ve kentsel tasarım pratikleri, yenilenebilir enerji altyapısını mevcut ve gelecekteki kentsel dokuya entegre etmede merkezi bir rol oynamaktadır. Bu disiplinler, enerji üretim ve tüketim modellerini temelden şekillendiren, çatışmaları yöneten ve sürdürülebilir bir kentsel geleceğin fiziksel çerçevesini oluşturan araçları sunmaktadır. Bu çalışmanın amacı, mevcut akademik literatürü sentezleyerek kentsel planlama ve yenilenebilir enerji entegrasyonu arasındaki temel dinamikleri, arazi kullanım çatışmalarını, planlama araçlarını ve stratejik yaklaşımları analiz etmektir.

Sürdürülebilir kentsel habitatların yeniden hayal edilmesi sürecinde, sadece çevresel girişimler yeterli olmayıp, sosyo-teknojik gelişmelerin bütünlüklü bir çerçevede ele alınması kentsel dirençliliğin artırılması açısından kritiktir (Almusaed vd., 2025)(Şekil 5). Bu bütünlüklü yaklaşım, enerji sistemlerinin toplumsal ve teknik altyapıyla uyumunu zorunlu kılmaktadır.



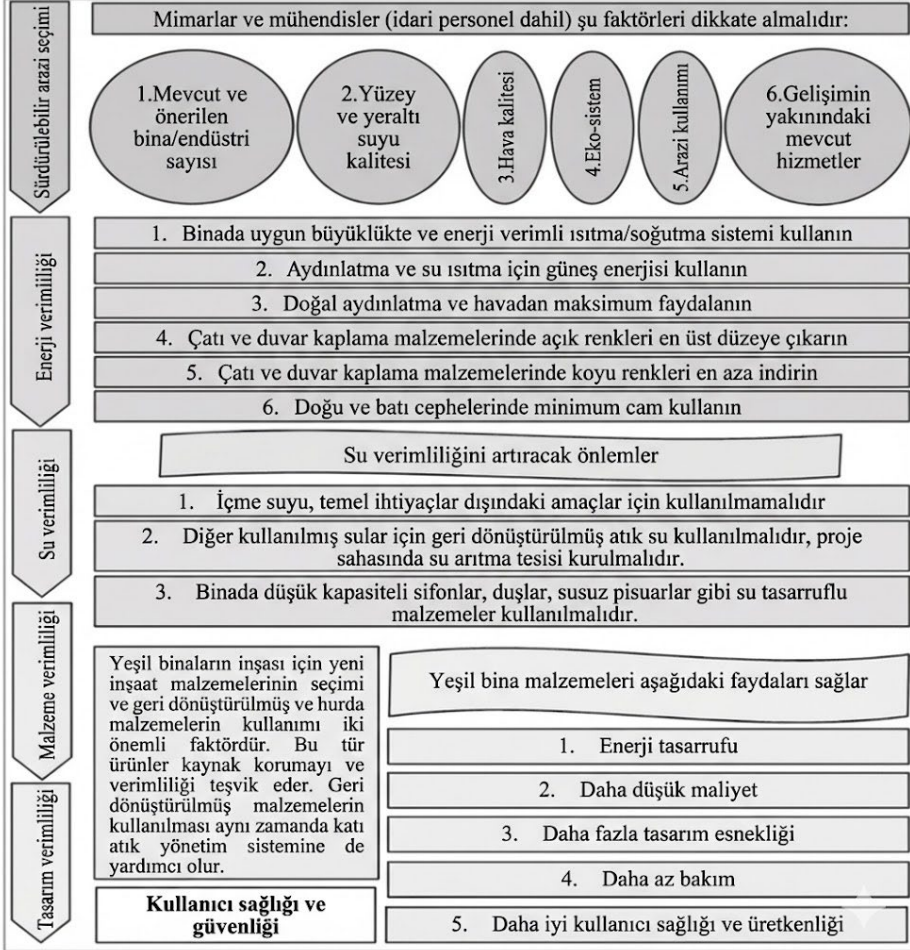
Şekil 5: Akıllı büyüme hedefleri (Almusaed vd., 2025)

2.1. Kentsel Form ve Enerji Tüketimi Arasındaki Nedensel İlişki

Kentsel form, bir şehrin enerji metabolizmasını belirleyen temel bir değişkendir. Yoğunluk, kompaktlık ve arazi kullanım dağılımı gibi mekansal kararlar, yalnızca estetik ve işlevsel sonuçlar doğurmakla kalmaz, ayak izini de temelden şekillendirir. Nitekim Sabory vd. (2021) tarafından Kabil örneğinde vurgulandığı üzere, düzenlemelerden yoksun hızlı yapılaşma, binaların sürdürülebilirlik performansını doğrudan düşürerek kentsel enerji verimliliği önünde ciddi bir engel teşkil etmektedir. (Şekil 6)

Özellikle gelişmekte olan kentlerdeki bu kontrolsüz büyüme, enerji metabolizmasının optimize edilmesini imkansız hale getirmekte; binaların

ısıtma-soğutma ihtiyaçlarından ulaşım modellerine kadar geniş bir yelpazede enerji tüketimini etkilemektedir.



Şekil 6: Sürdürülebilir ve yeşil binaların ilkeleri (Sabory vd., 2021)

Bu kararlar, binaların ısıtma-soğutma ihtiyaçlarından ulaşım modellerine kadar geniş bir yelpazede enerji tüketimini doğrudan ve dolaylı olarak etkiler. Kentsel formun bu belirleyici rolü, yenilenebilir enerjiye geçiş sürecinde hem fırsatlar hem de zorluklar sunan karmaşık ve paradoksal ilişkiler barındırmaktadır.

2.1.1 Yoğunlaşma Paradoksu:

Kentsel yoğunlaşma, enerji verimliliği açısından sıklıkla olumlu bir strateji olarak görülse de, Rozhkov (2024) tarafından sunulan nedensel döngü diyagramları bu ilişkinin paradoksal bir doğası olduğunu ortaya koymaktadır.

- **Olumlu Etki:** Yoğunlaşma, genellikle daha küçük yaşam alanlarına yol açar. Bu durum, birim alan başına düşen enerji kullanım yoğunluğunun ve dolayısıyla hane başına ortalama elektrik tüketiminin azalmasını sağlar. Rozhkov'a (2024) göre, daha az alana sahip konutlar, ısıtma, soğutma ve aydınlatma için daha az enerji gerektirir.
- **Olumsuz Etki:** Öte yandan, yoğun kentsel formlar, yapılaşmış yüzeylerin ve insan faaliyetlerinin artması nedeniyle kentsel ısı adası etkisini şiddetlendirir (Rozhkov, 2024). Artan sıcaklıklar, aşırı hava olaylarının sıklığını ve şiddetini artırarak özellikle yaz aylarında soğutma için enerji talebini dolaylı olarak yükseltir. Bu durum, yoğunlaşmanın getirdiği verimlilik kazanımlarını kısmen dengeleyebilecek bir geri besleme döngüsü yaratır.

2.1.2 Kompakt ve Dağınık Kentsel Formların Karşılaştırılması

Kentsel formun enerji üzerindeki etkileri, kompakt ve dağınık yerleşim modelleri karşılaştırıldığında daha da netleşmektedir. Bu iki model, enerji verimliliği ve arazi kullanımı açısından önemli farklılıklar sergiler.

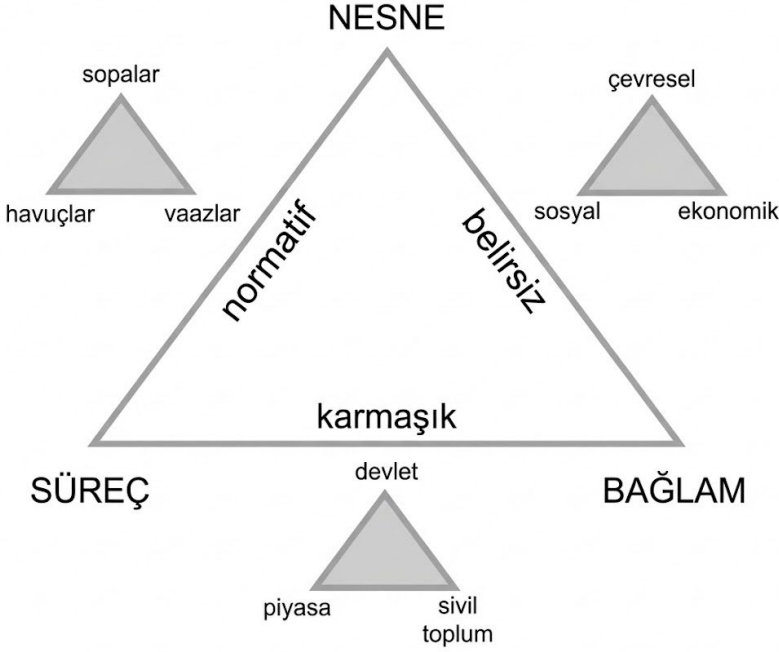
- **Dağınık Kentsel Form:** Düşük nüfus yoğunluğu ve genellikle daha büyük müstakil konutlarla karakterize edilen dağınık kentsel form, ısıtma, soğutma ve aydınlatma için daha yüksek enerji gereksinimlerine yol açar (Rozhkov, 2024). Rozhkov (2024), yürünebilirliği ve toplu taşımaya yönelik gelişimi teşvik eden politikaların bu talebi azaltabileceğini belirtmektedir.
- **Kompakt Kentsel Form:** Kompakt form, genellikle daha düşük bir çevresel ayak izine sahiptir (Rozhkov, 2024). Bu modelin pratik uygulamalarına bakıldığında, Şarika Sürdürülebilir Kenti (SSC) vakası, enerji verimli bina tasarımı ve toplu taşıma odaklı gelişimin planlama öncelikleri arasında yer almasının başarısını kanıtlamaktadır (Jung & Awad, 2023) (Şekil 7).



Şekil 7: Şarika Sürdürülebilir Kenti Nazım Planı (Jung & Awad, 2023)

Ancak bu tür teknolojilerin mevcut yapı stoklarına (örneğin üniversite kampüslerine) entegrasyonu, sadece fiziksel kısıtlarla değil, aynı zamanda karmaşık ekonomik ve idari bariyerlerle de sınırlanmaktadır (Fuentes-del-Burgo vd., 2021). Ayrıca kompakt modelin genelinde, yüksek yapı yoğunluğundan kaynaklanan gölgelenme ve yeşil alan kaybı gibi yapısal zorluklar devam etmektedir. Ancak bu modelin de kendine özgü zorlukları vardır.

Yüksek yapı yoğunluğu, kentsel yeşil alanları ve dolayısıyla doğal gölgelendirme ve soğutma potansiyelini azaltabilir (Rozhkov, 2024). Ayrıca, binaların birbirini gölgelemesi, çatı üstü bireysel güneş sistemlerinin (fotovoltaik paneller) kurulumunu ve verimliliğini olumsuz etkileyebilir (Rozhkov, 2024). Bu durum, Koelman vd. (2024) tarafından da vurgulandığı gibi, sınırlı kentsel arazide konut, yeşil alan ve enerji altyapısı arasında ciddi arazi kullanım çatışmalarına yol açmaktadır. (Şekil 8)

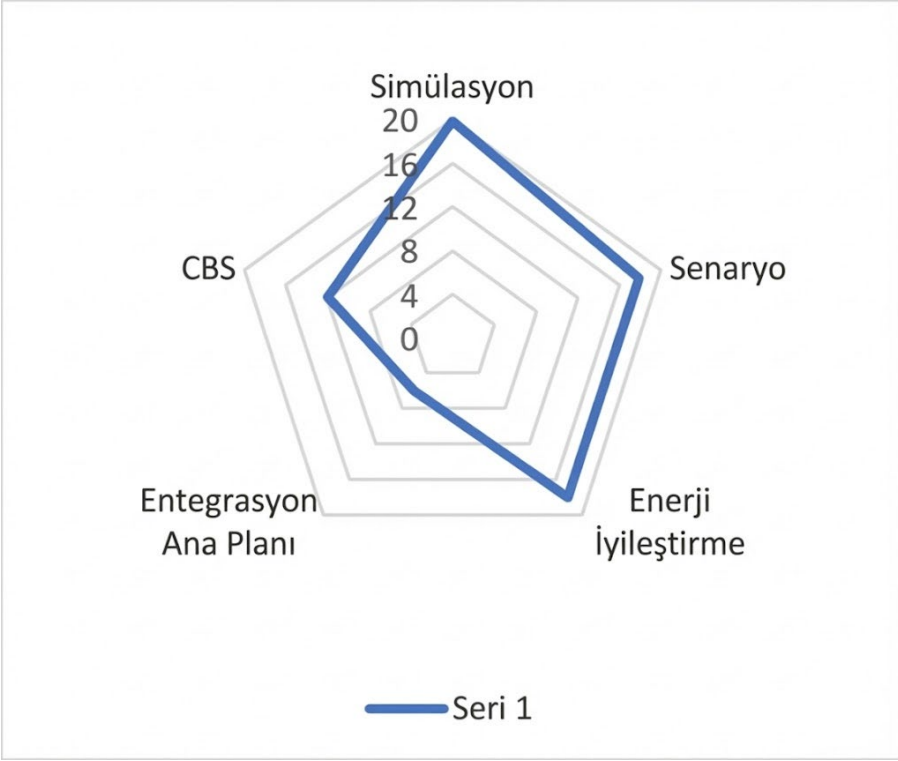


Şekil 8: Planlama üçgeni ve eklentileri (Witte & Hartmann, 2022)

Kentsel formun enerji performansı üzerindeki bu çok katmanlı ve çelişkili etkileri, söz konusu dinamikleri yönetebilecek, olumsuz sonuçları hafifletip fırsatları maksimize edebilecek sofistike planlama araçlarına olan kritik ihtiyacı göstermektedir.

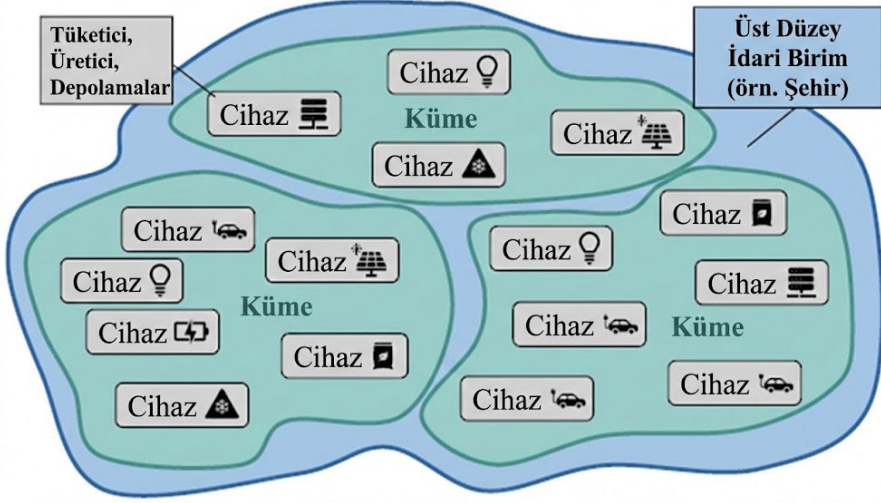
2.2. Yenilenebilir Enerji Entegrasyonunda Mekansal Planlama Araçları ve Yöntemleri

Yenilenebilir enerji entegrasyonu, birbiriyle tezat oluşturan iki planlama paradigmasının kesişiminde yer alır: bir yanda Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) gibi modern, veri odaklı analitik araçların sunduğu muazzam potansiyel, diğer yanda ise yerel mekansal planlar gibi geleneksel, metin tabanlı yasal enstrümanların kalıcı ve çoğu zaman göz ardı edilen gücü. Bu etkileşimi yönetmede CBS tabanlı araçlar, estetik ve ölçek kaynaklı çatışmaları minimize etmede etkin rol oynamaktadır (Castro vd., 2021)(Şekil 9).



Şekil 9: Araçların işlevsellik sayısı (Castro vd., 2021).

Karar verme aşamasında ise Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) gibi çok kriterli yöntemler, stratejik önceliklerin sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlaştırılmasında güçlü bir metodolojik temel sunar (Aldossary vd., 2023). Bu yöntemler aynı zamanda, 'Pozitif Enerji Bölgeleri' gibi yeni bölge kavramlarının (NDCs) disiplinler arası bir terminoloji ve 'cihaz kümeleme' (device clustering) yaklaşımıyla yönetilmesine olanak tanır (Galenzowski vd., 2025)(Şekil 10).



Şekil 10: Cihaz kümeleri (Galenzowski vd., 2025)

Bu bölüm, bu araçların potansiyelini, metodolojik boşluklarını ve pratikteki rollerini inceleyerek, teknik kapasite ile yasal-idari çerçevenin entegrasyon sürecini nasıl şekillendirdiğini analiz etmektedir.

2.2.1. Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Çok Kriterli Karar Analizi

Modern teknolojiler, kentsel ölçekte RES potansiyelini değerlendirmek için güçlü analitik yetenekler sunmaktadır. Dimitriou vd. (2024) tarafından Riga'da yapılan vaka çalışması, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Çok Kriterli Karar Analizi (ÇKKA) yöntemlerinin birleşiminin bu alandaki etkinliğini göstermektedir.

- Bu bütünlük yaklaşım, çatı yönelimi, yakındaki yapılardan kaynaklanan gölgeleme ve eğim gibi mekansal faktörleri yüksek çözünürlükte analiz ederek fotovoltaik (PV) panel performans tahminlerinin doğruluğunu önemli ölçüde artırmaktadır (Dimitriou vd., 2024)(Şekil 11).
- Metodoloji, yalnızca teknik potansiyeli değerlendirmekle kalmaz, aynı zamanda sosyo-ekonomik faktörleri de karar verme sürecine entegre eder. Bu sayede, kentsel bölgeler PV kurulum uygunluğuna

göre sıralanırken, farklı sosyo-ekonomik arka plana sahip vatandaş grupları arasındaki fırsat eşitliği de gözetilir ve böylece enerji adaletinin artırılması hedeflenir (Dimitriou vd., 2024).



Şekil 11: Dimitriou ve arkadaşlarının ÇKKA metodolojisi (Dimitriou vd., 2024)

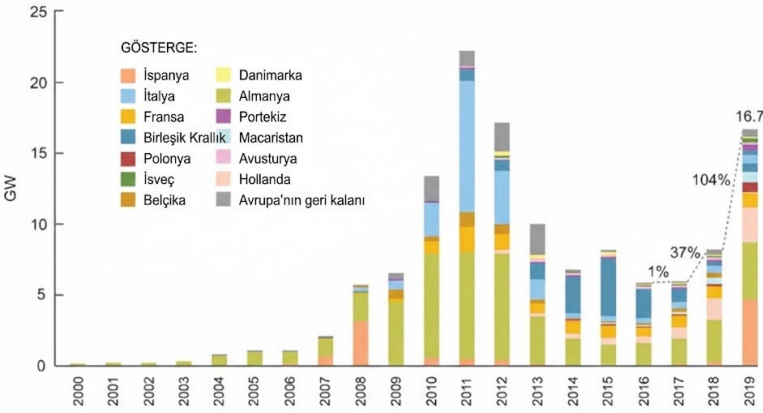
2.2.2. Yerel Mekansal Planların Rolü ve Uluslararası Karşılaştırmalar

Yasal ve idari bir araç olan yerel mekansal planlar, hane halkı düzeyinde yenilenebilir enerji yatırımlarını teşvik etme veya sınırlama gücüne sahiptir. Solarek ve Kubasińska (2022) tarafından yapılan uluslararası karşılaştırmalı araştırma, bu planların rolünü açıkça ortaya koymaktadır.(Şekil 12)

- Teşvik Edici Düzenlemeler: Almanya ve Hollanda gibi ülkelerde yerel planlar, konut ve hizmet binalarında RES kurulumunu teşvik eden açık hükümler içermektedir. Örneğin, bir planda, "binaların

tasarım ve konumlandırılmasında güneş ve rüzgar enerjisinden pasif ve aktif olarak en iyi şekilde yararlanılmasını" zorunlu kılan hükümler bulunabilmektedir (Solarek & Kubasińska, 2022). Bu tür düzenlemeler, yatırımcılar için net bir yol haritası sunar.

- b) Sınırlayıcı Düzenlemeler: Buna karşılık, Polonya örneğinde olduğu gibi, bazı planlar RES gelişimini dolaylı olarak engelleyebilmektedir. Güncel yasalara ve teknolojik ihtiyaçlara uygun olmayan hükümler içermesi veya katı yakıtlı ısıtma sistemleri gibi çevreye zararlı teknolojilere yönelik yasaklar getirmemesi, RES'e geçişi yavaşlatan faktörler olarak öne çıkmaktadır (Solarek & Kubasińska, 2022).



Şekil 12: 2000-2019 yılları arasında kurulan GES'leri (Solarek & Kubasińska, 2022)

2.2.3. Planlama Araçlarındaki Metodolojik Boşluklar

Mevcut planlama araçları ve modelleri, RES entegrasyonunun tüm boyutlarını kapsama konusunda henüz yetkin değildir. Yazdanie ve Orehounig (2023) tarafından yapılan kapsamlı derleme, mevcut Kentsel Enerji Sistemi Planlama Modellerinin (UEPM'ler) önemli bir eksikliğine işaret etmektedir. Bu modeller, genellikle CBS tabanlı bina modelleri gibi daha özel ve yüksek çözünürlüklü araçlarla değerlendirilen mekansal kısıtları ve şebeke topolojisini temsil etmede yetersiz kalmaktadır. Bu durum, planlama süreçlerinde stratejik bir boşluk yaratmakta ve modellerin gerçek dünya koşullarını tam olarak yansıtmasını engellemektedir (Yazdanie & Orehounig, 2023).

Ancak, en gelişmiş planlama araçları dahi, paydaşlar arasındaki çıkar çatışmaları ve parçalı yönetim yapılarından kaynaklanan temel arazi kullanım uyumsuzluklarını çözmeye yetersiz kalır. Bu durum, teknik kapasiteden ziyade yönetimsel engellerin, entegrasyon sürecindeki asıl darboğaz olduğunu ortaya koymaktadır.

2.3. Arazi Kullanım Çatışmaları ve Yönetişim Zorlukları

Kentsel alanlarda yenilenebilir enerjiye geçiş, teknik bir optimizasyon probleminden ziyade, temelde bir yönetim ve arazi kullanım tahsisi sorunudur. Sınırlı kentsel arazide konut, yeşil alan, ulaşım ve enerji altyapısı gibi farklı işlevlerin rekabeti, yalnızca mekansal değil; aynı zamanda farklı paydaşların değerlerini, önceliklerini ve sorumluluklarını yansıtan normatif, idari ve yasal çatışmaları da beraberinde getirir. Bu bölüm, entegrasyon sürecinin önündeki asıl engellerin teknolojik yetersizliklerden değil, çıkar çatışmaları ve parçalı yönetim yapılarından kaynaklandığını ortaya koymaktadır.

2.3.1. Çıkar Çatışmaları ve Parçalı Sorumluluklar

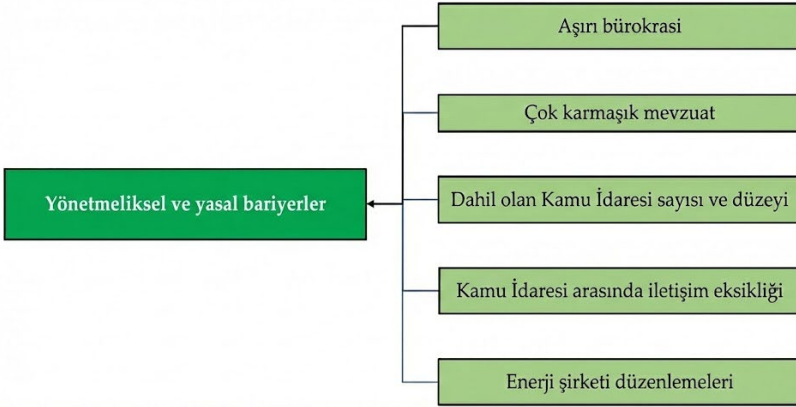
Farklı paydaşların farklı önceliklere sahip olması, arazi kullanım anlaşmazlıklarının temel nedenlerinden biridir. Koelman vd. (2024) tarafından Amsterdam'da yapılan vaka çalışması, bu durumu somut bir şekilde ortaya koymaktadır.

- a) Farklı Öncelikler: Çalışmada, belediye planlamacılarının öncelikli olarak mekansal kaliteyi artırma ve CO2 emisyonlarını azaltma hedeflerine odaklandığı görülmüştür. Buna karşılık, dağıtım sistemi operatörü (DSO) gibi teknik paydaşlar, şebeke güvenilirliği ve operasyonel fizibilite gibi konuları öncelemektedir (Koelman vd., 2024). Bu farklı bakış açıları, altyapı yerleşimi ve tasarımı konusunda anlaşmazlıklara yol açabilmektedir.
- b) Yönetişim Boşlukları: Enerji altyapısının geleneksel olarak kentsel planlama süreçlerinden ayrı, sektörel bir konu olarak ele alınması, önemli bir yönetim boşluğu yaratmaktadır. Bu parçalı yaklaşım, entegre ve alan bazlı bir planlama anlayışının eksikliğine neden olmakta ve şebeke tıkanıklığı gibi sorunları daha da şiddetlendirmektedir (Koelman vd., 2024).

2.3.2. Mevzuat ve Kentsel Kısıtlamalardan Doğan Engeller

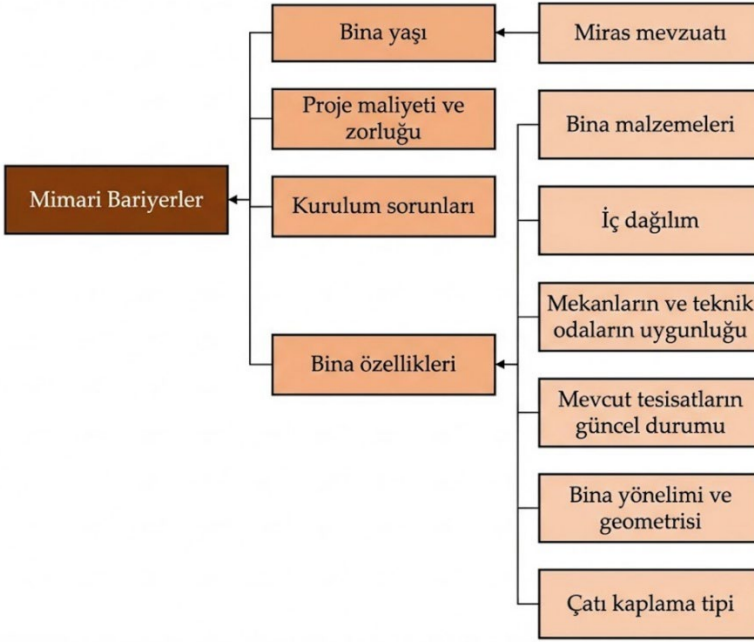
Yenilenebilir enerji entegrasyonu, mevcut yasal çerçeve ve kentsel dokunun fiziksel kısıtlamaları tarafından da engellenmektedir. Bu engeller, hem idari süreçleri yavaşlatmakta hem de teknik uygulamaları zorlaştırmaktadır.

- a) Kentsel Yönetmelikler: Belediye yönetmeliklerinin "katı" olması, idari engeller yaratabilmektedir. (Şekil 13) Fuentes-del-Burgo vd. (2021), estetik kaygılar, gürültü standartları veya güvenlik endişeleri gibi faktörlerin yerel kurumlar tarafından birer kısıt olarak ele alındığını ve bu durumun RES projelerini yavaşlattığını vurgulamaktadır.



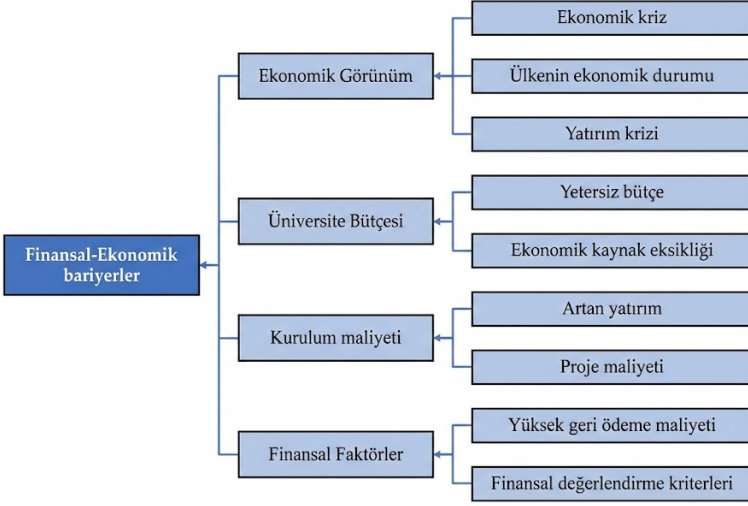
Şekil 13: Yönetmeliksel ve yasal bariyerler (Fuentes-del-Burgo vd., 2021)

- b) Miras Statüsündeki Binalar: Tarihi veya miras statüsündeki binalarda RES entegrasyonu, özel zorluklar barındırır. Bu binaların özgün karakterini ve estetik bütünlüğünü koruma zorunluluğu, güneş panelleri veya diğer teknolojilerin uygulanmasında önemli sınırlamalarla karşılaşılmasına neden olur (Fuentes-del-Burgo vd., 2021)(Şekil 14).



Şekil 14: Mimari bariyerler (Fuentes-del-Burgo vd., 2021)

- c) Altyapı Yetersizliği: Bazı durumlarda en büyük engel, mevcut altyapının kendisidir. Solarek ve Kubasińska (2022) tarafından Polonya'da yapılan çalışma, mevcut elektrik altyapısının çok sayıda dağıtık fotovoltaik kurulumunu şebekeye bağlamaya uygun olmadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, gelecekteki RES gelişimini tehdit eden ciddi bir altyapısal darboğaz oluşturmaktadır.



Şekil 15: Finansal-Ekonomik bariyerler (Fuentes-del-Burgo vd., 2021)

Bu yönetişimsel ve yasal engellerin aşılması, soyut politika hedeflerinin ötesine geçerek, bina ve bölge ölçeğinde geliştirilen, yerel bağlama duyarlı somut entegrasyon stratejilerinin incelenmesini zorunlu kılar.(Şekil 15)

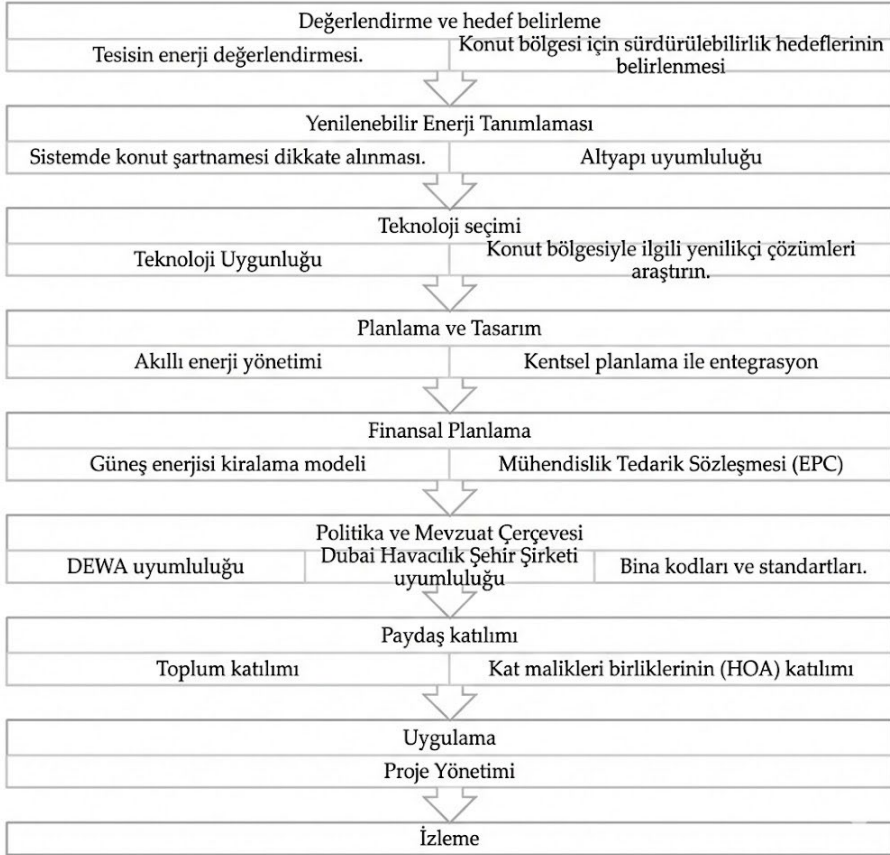
2.4. Bina ve Bölge Ölçeğinde Entegrasyon Stratejileri ve Uygulamaları

Önceki bölümlerde analiz edilen yönetişimsel ve mekansal zorluklar, dünya genelinde farklı kentsel bağlamlarda geliştirilen pratik ve yenilikçi stratejilerle aşılmaktadır. Bu bölüm, teorik tartışmalardan somut uygulamalara geçerek, yerel iklim koşulları, kentsel tipolojiler ve sosyo-ekonomik dinamiklere göre uyarlanmış başarılı entegrasyon modellerini vaka çalışmaları üzerinden incelemektedir.

2.4.1. Çok Sektörlü Kentsel Gelişim Alanları

Karmaşık ve çok işlevli kentsel alanlar, entegre enerji stratejileri için özel bir zorluk teşkil eder. AlMheri ve Weraikat (2024) tarafından sunulan Dubai South "aerotropolis" vaka çalışması, bu tür bir ortam için geliştirilen kapsamlı bir yenilenebilir enerji stratejisini detaylandırmaktadır. (Şekil 16) Havacılık, lojistik, ticari ve konut gibi farklı sektörleri bir araya getiren bu mega proje, aşağıdaki başarıları sergilemektedir:

- Proje kapsamındaki Sakany konut bölgesinde uygulanan çatı üstü güneş enerjisi sistemi, şebeke elektriği tüketiminde %46'lık bir azalma sağlamıştır. Bu başarı, stratejinin sadece ticari alanlarda değil, konut gibi farklı sektörlerde de ölçeklenebilirliğini ve etkinliğini doğrulamaktadır (AlMheri & Weraikat, 2024).
- Stratejinin başarısı, yerel koşullara özel tasarıma verilen öneme dayanmaktadır. Güneş paneli ve inverter gibi sistem bileşenleri, bölgenin kurak ve yüksek sıcaklıktaki iklim koşullarında uzun vadeli güvenilirlik ve performans kriterlerine göre titizlikle seçilmiştir (AlMheri & Weraikat, 2024).



Şekil 16: Konut bölgelerinde yenilenebilir enerji entegrasyonu yol haritası (AlMheri & Weraikat, 2024)

2.4.2. Özel İklim Koşullarında Kentsel Tasarım

Yenilenebilir enerji entegrasyonu, yalnızca sıcak iklimler için değil, aynı zamanda zorlu iklim koşullarına sahip bölgeler için de kritik bir konudur. Stoyanov ve Sakharova (2023) tarafından yapılan çalışma, Arktik şehirlerdeki yenilikçi yaklaşımları incelemektedir. (Şekil 17)

- İsveç'in Kiruna şehrinde, belediye, Luleå Üniversitesi ve inşaat şirketleri arasındaki iş birliğiyle "pasif evler" projesi hayata geçirilmiştir. Bu proje, binaların enerji açısından kendi kendine yeterli olmasını hedefleyen ve kentsel tasarım ilkeleriyle bütünleşen bir strateji örneğidir (Stoyanov & Sakharova, 2023).
- Buna karşılık, Utqiagvik (ABD) gibi coğrafi olarak izole şehirlerin kapalı ve bağımsız enerji sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu için özel mekansal ve altyapısal zorluklar sunmaktadır. Bu tür yerleşimler, standart şebeke bağlantılı çözümlerin ötesinde, yerel koşullara özgü mikro şebeke ve depolama sistemleri gerektirir (Stoyanov & Sakharova, 2023).



Şekil 17: Bahse konu çalışmada ele alınan Arktik çember (Stoyanov & Sakharova, 2023)

2.4.3. Güneş Enerjisine Erişimin Planlanması

Yenilenebilir enerji entegrasyonu sadece teknoloji kurulumundan ibaret değildir; aynı zamanda kentsel tasarım yoluyla enerji kaynaklarına erişimin güvence altına alınmasını da içerir. Fuentes-del-Burgo vd. (2021) tarafından yapılan çalışma, bu konunun önemini vurgulamaktadır. Özellikle yoğun kentsel alanlarda, komşu binaların yarattığı gölgeleme etkisi, fotovoltaik (PV) sistemlerinin verimliliği için kritik bir kentsel tasarım sorunudur. Bu durum, Rozhkov (2024) tarafından da belirtildiği üzere, kompakt kent formlarının doğal bir sonucu olarak ortaya çıkan ve yenilenebilir enerji potansiyelini doğrudan kısıtlayan bir mekansal çatışma örneğidir. Bu nedenle, binaların güneş enerjisine erişim hakkının, imar yönetmeliklerine ve kentsel gelişim planlarına dahil edilmesi, RES potansiyelinin en üst düzeye çıkarılması için temel bir gerekliliktir (Fuentes-del-Burgo vd., 2021).

Farklı coğrafi ve iklimsel bağlamlarda incelenen bu uygulamalar, tek bir çözüm formülü olmamakla birlikte, başarılı bir enerji dönüşümünün dayandığı ortak ilkeleri aydınlatmaktadır. Bu ilkelerin sentezi, sonuç bölümünde ele alınacak olan bütünleşik planlama felsefesinin temelini oluşturur.

3. YENİLENEBİLİR ENERJİ TOPLULUKLARI VE SOSYAL KATILIM

Küresel enerji geçişi, iklim değişikliğiyle mücadelede merkezi bir rol oynarken, bu dönüşümün başarısı giderek artan bir şekilde merkeziyetçi ve büyük ölçekli projelerden, yerel ve kolektif eylemlere doğru kaymaktadır. Son yıllarda yapılan bibliyometrik analizler, enerji tüketimi, ekonomik büyüme ve kirlilik arasındaki etkileşimlerin giderek daha disiplinler arası bir perspektifle ele alındığını ve yenilenebilir enerjiye geçişin kentsel planlama ve kamu yönetimi için pragmatik bir çözüm haline geldiğini göstermektedir (Grigore vd., 2024).

Bu bağlamda, vatandaşların enerji üretim ve tüketim süreçlerine aktif olarak katıldığı topluluk temelli modeller, kentsel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada stratejik bir önem kazanmaktadır. Bu çalışmanın temel tezi, Yenilenebilir Enerji Toplulukları (YET) için çeşitli modeller ortaya çıkarken, bu yapıların kentsel dokuya başarılı entegrasyonunun, tek bir 'en iyi' yaklaşıma değil, optimal bölgeleri belirleyen yukarıdan aşağıya mekansal planlama ile sosyal meşruiyet sağlayan ve benimsemeyi teşvik eden aşağıdan yukarıya

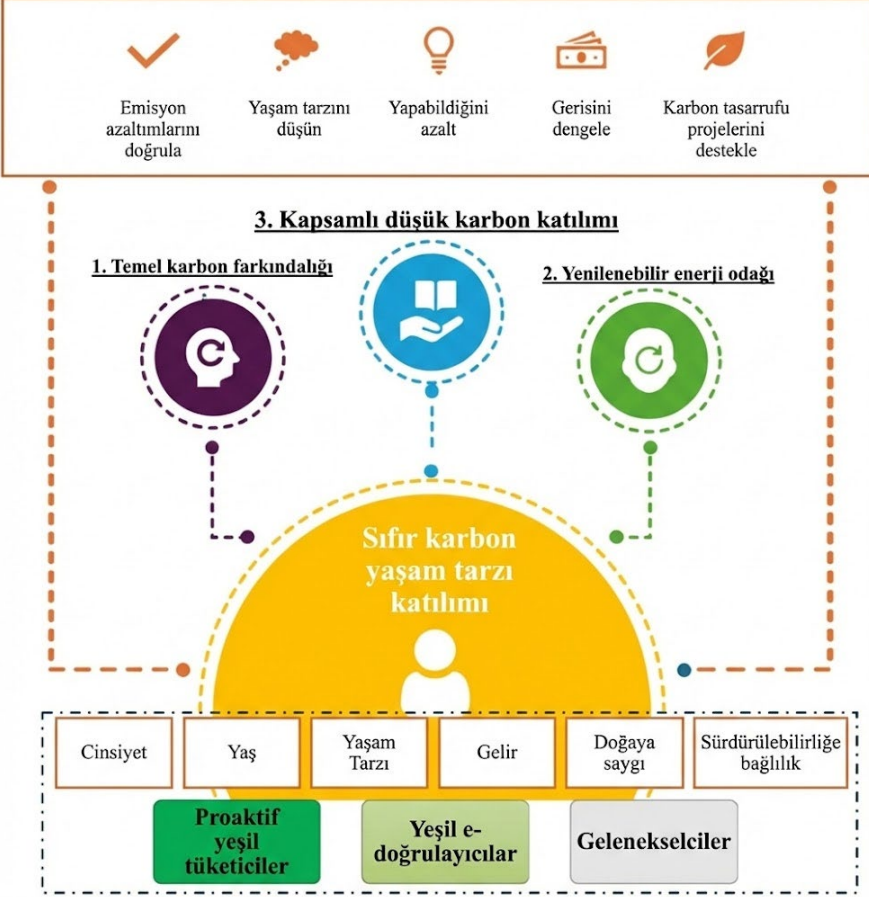
topluluk girişimleri arasındaki dinamik bir sinerjiye bağlı olduğudur. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji potansiyelinin doğru tahmin edilebilmesi için yalnızca teknolojik ve ekonomik verilerle yetinilmemeli; yerel düzeydeki sosyo-psikolojik parametreler ve sosyal kabul unsurları da potansiyel analizlerine sistematik olarak entegre edilmelidir (Offermann vd., 2026).

Bu yeni paradigmanın merkezinde "Yenilenebilir Enerji Topluluğu (YET)" ve "Kolektif Enerji Girişimi (KEG)" gibi kavramlar yer almaktadır. YET'ler, üyelerinin prosumer (üretici-tüketici) veya sadece tüketici olabildiği, aktif vatandaş katılımına dayalı yasal ve sosyal yapılar olarak tanımlanmaktadır (Tarpani vd., 2025). Daha geniş bir çerçeve sunan KEG'ler ise, prosumer'lar tarafından başlatılan ve enerji geçişini yerel düzeyde hızlandırmayı amaçlayan tüm kolektif girişimleri kapsamaktadır (Pezzagno vd., 2024). Avrupa Birliği 'Temiz Enerji Paketi' çerçevesinde tanımlanan Vatandaş Enerji Toplulukları (CEC) ve Yenilenebilir Enerji Toplulukları (YET), tüketicileri enerji geçişinin merkezine yerleştirerek onları pasif kullanıcılardan aktif 'prosumer'lara (üretici-tüketici) dönüştürmeyi amaçlamaktadır (De Lotto vd., 2022). Bu topluluklar, karbon nötrlüğü hedeflerine ulaşma ve özellikle kentsel alanlarda önemli bir sorun olan enerji yoksulluğunu azaltma konusunda büyük bir potansiyel taşımaktadır (Gerundo & Marra, 2022).

YET'lerin sunduğu faydalar çok boyutludur ve üç ana başlık altında sentezlenebilir:

- Çevresel Faydalar: Fosil yakıtların yerini alan yerel yenilenebilir enerji üretimi sayesinde karbondioksit (CO₂) emisyonlarının azaltılması (Tarpani vd., 2025).
- Ekonomik Faydalar: Enerji faturalarında önemli ölçüde tasarruf sağlanması ve kendi kendine tüketimden elde edilen ekonomik kazançlar (Tarpani vd., 2025).
- Sosyal Faydalar: Vatandaşlar arasında artan sosyal uyum, yerel düzeyde yeni iş olanaklarının yaratılması, enerji konularında bilgi birikiminin ve becerilerin geliştirilmesi ve en önemlisi, vatandaşların enerji politikalarına aktif katılımının teşvik edilmesi (Pezzagno vd., 2024). Yapılan araştırmalar, kentsel alanlarda yaşayanların yenilenebilir enerji teknolojilerini benimseme ve bu süreçlere katılma konusunda yüksek bir 'Katılım İçin Marjinal İsteklilik' (MWTP) gösterdiğini ve eğitim faaliyetleri ile teknoloji entegrasyonuna günlük

ortalama 22.60 dakika gibi önemli bir süre ayırmaya hazır olduklarını ortaya koymaktadır (Suryawan vd., 2026)(Şekil 18).



Şekil 18: Sıfır karbonlu yaşam tarzı çerçevesi tercih analizi (Suryawan vd., 2026)

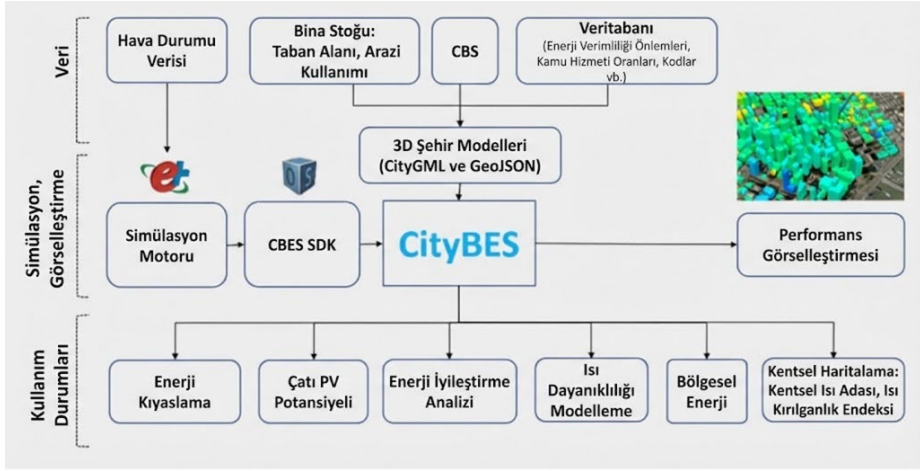
Bu toplulukların başarılı bir şekilde yaygınlaşması, "aşağıdan yukarıya" gelişen vatandaş inisiyatifleri ile "yukarıdan aşağıya" işleyen kentsel planlama mekanizmaları arasında kurulacak güçlü bir bağa bağlıdır. Kentsel planlama, YET'lerin teşvik edilmesi ve doğru alanlarda konumlandırılması için ihmal edilemez kurumsal bir araç olarak öne çıkmaktadır (Gerundo & Marra, 2022). Bu toplulukların potansiyelini anlamak, benimsedikleri spesifik teknolojik ve organizasyonel modellerden, içinde hareket etmek zorunda oldukları karmaşık sosyal ve politik manzaralara kadar çok ölçekli bir analiz gerektirmektedir.

3.1. Enerji Topluluklarının Modelleri ve Uygulama Örnekleri

Farklı kentsel bağlamlar, mevcut altyapılar ve düzenleyici çerçeveler, standart bir çözüm yerine yerel ihtiyaçlara ve kısıtlara göre şekillenen çeşitli enerji topluluğu modellerinin ortaya çıkmasını teşvik etmektedir. Bu modeller, yalnızca farklı uygulama örnekleri olarak değil, aynı zamanda enerji geçişi sorunlarına yönelik farklı felsefeleri temsil eden yaklaşımlar olarak da analiz edilebilir. Bu bölümde üç farklı model türü incelenmektedir: miras kısıtları gibi spesifik bir mekansal sorunu çözmek için tasarlanmış bir tekno-ekonomik simülasyon modeli (Tarpani vd., 2025); vatandaş öncülüğündeki hareketlerin olgunluğunu ve yapısını kategorize eden bir sosyo-organizasyonel çerçeve (Pezzagno vd., 2024); ve mevcut mikro-üretim donanımlarını envanterleyen bir teknolojik derleme (Saba vd., 2024).

3.1.1. Kentsel Kısıtlara Çözüm Olarak Enerji Paylaşımı Modeli

Tarihi kent merkezleri gibi kültürel mirasın korunması gereken alanlar, genellikle yenilenebilir enerji sistemlerinin kurulumuna yönelik ciddi kısıtlamalarla karşı karşıyadır. Bu soruna yönelik yenilikçi bir çözüm, Tarpani ve arkadaşları (2025) tarafından İtalya'nın Perugia kenti için önerilen enerji paylaşımı modelidir. Bu tekno-ekonomik model, yenilenebilir enerji kurulumunun mümkün olduğu banliyölerde üretilen temiz enerjinin, kurulum kısıtlamaları olan tarihi merkezdeki tüketicilerle paylaşılmasını esas alır. Araştırmacılar, bu modelin fizibilitesini test etmek için CityBES adlı kent ölçeğinde enerji simülasyonu aracını kullanarak farklı senaryoları analiz etmişlerdir.(Şekil 19) Çalışmanın en önemli bulgusu, yalnızca konut veya yalnızca ticari binalardan oluşan topluluklara kıyasla, **karma (konut ve ticari) yapılandırmaların** öz yeterlilik ile şebekeye ihraç edilen enerji arasında en uygun dengeyi sağladığıdır (Tarpani vd., 2025). Bu model, kentsel mirasın korunması ile enerji verimliliği hedefleri arasındaki boşluğu dolduran, ölçeklenebilir bir yaklaşım sunmaktadır.



Şekil 19: CityBES sistemi (Tarpani vd., 2025)

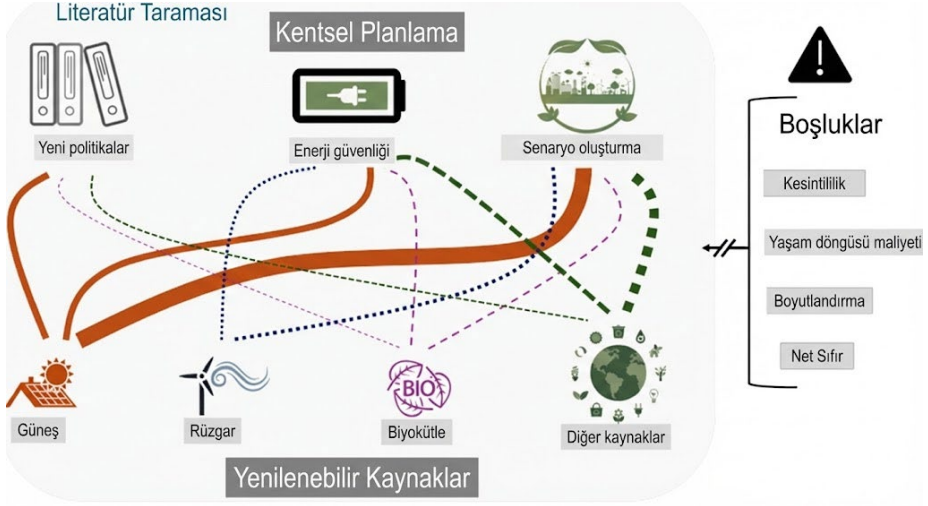
3.1.2. Kolektif Enerji Girişimleri ve Koalisyonları Modeli

Enerji toplulukları, Avrupa Birliği (AB) direktifleriyle tanımlanan resmi YET yapılarından daha geniş bir spektrumu kapsayabilir. Pezzagno ve arkadaşları (2024), prosumer'lar tarafından başlatılan tüm kolektif eylemleri kapsayan "Kolektif Enerji Girişimleri (KEG)" kavramını ve bu girişimlerin zamanla daha olgun ve yapılandırılmış hale gelerek oluşturduğu "Kolektif Enerji Koalisyonları (KEK)" modelini tanımlayan sosyo-organizasyonel bir çerçeve sunmaktadır. KEK'ler, ortak hedefler doğrultusunda kaynakları harekete geçirme ve politika süreçlerini etkileme kapasitesine sahip, daha gelişmiş iş birliği yapılarıdır. Bu modelin somut uygulama örnekleri arasında, İsviçre'deki "Erlenmatt Ost" projesi (600 sakinin kendi ürettiği fotovoltaik (PV) elektriği kullandığı bir kooperatif) ve Danimarka'daki Termonet girişimi (ısı pompaları ile bölgesel ısıtma ağları kuran vatandaş kooperatifleri) yer almaktadır (Pezzagno vd., 2024).

3.1.3. Kentsel Mikro-üretim ve Dağıtık Enerji Ağları Modeli:

Kentlerde enerji üretiminin merkezi santrallerden bağımsızlaşarak dağıtık bir yapıya kavuşması, mikro-üretim teknolojilerinin entegrasyonu ile mümkündür. Saba ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan kapsamlı literatür taraması, kentsel alanlarda uygulanabilir mikro-üretim teknolojilerinin başında güneş, rüzgar (mini-türbinler) ve biyokütle (kentsel atıklardan enerji üretimi) geldiğini göstermektedir. Bu teknolojilerin bir araya gelerek oluşturduğu

dağıtık enerji ağları, kentsel enerji talebini yerinde karşılayarak şebeke kayıplarını azaltabilir ve enerji güvenliğini artırabilir. (Şekil 20) Bu yaklaşımın başarılı bir örneği, Çin'deki Sino-German Eko-Parkı'dır. Bu park, yenilenebilir kaynakları ve kojenerasyon ünitelerini birleştiren dağıtık bir enerji ağı sayesinde kentsel enerji talebini optimize ederek sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır (Saba vd., 2024).

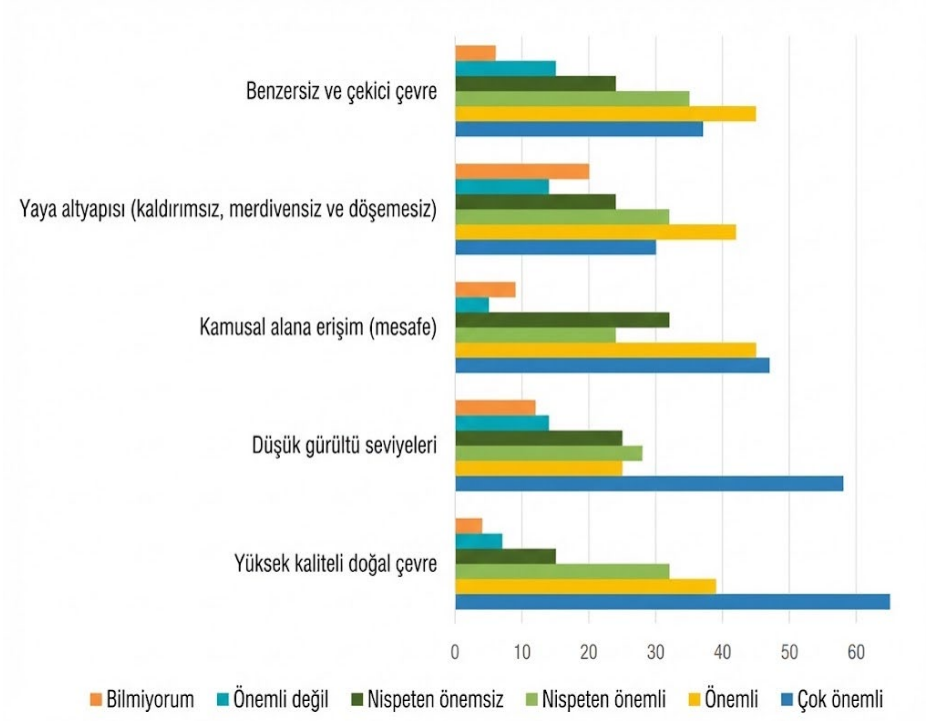


Şekil 20: Kentsel planlamada yenilenebilir enerji mikroüretimi temsili (Saba vd., 2024)

Bu teknolojik ve organizasyonel modellerin hayata geçirilmesi ve yaygınlaşması, yalnızca teknik ve ekonomik fizibiliteye değil, aynı zamanda bu teknolojileri benimseyecek olan toplumun algılarına ve katılım düzeyine de derinden bağlıdır. Bu nedenle, bir sonraki bölümde sosyal kabul ve vatandaş katılımı dinamikleri ele alınacaktır.

3.1.4. Akıllı Şehir ve Kamu Dinlenme Alanları Entegrasyon Modeli

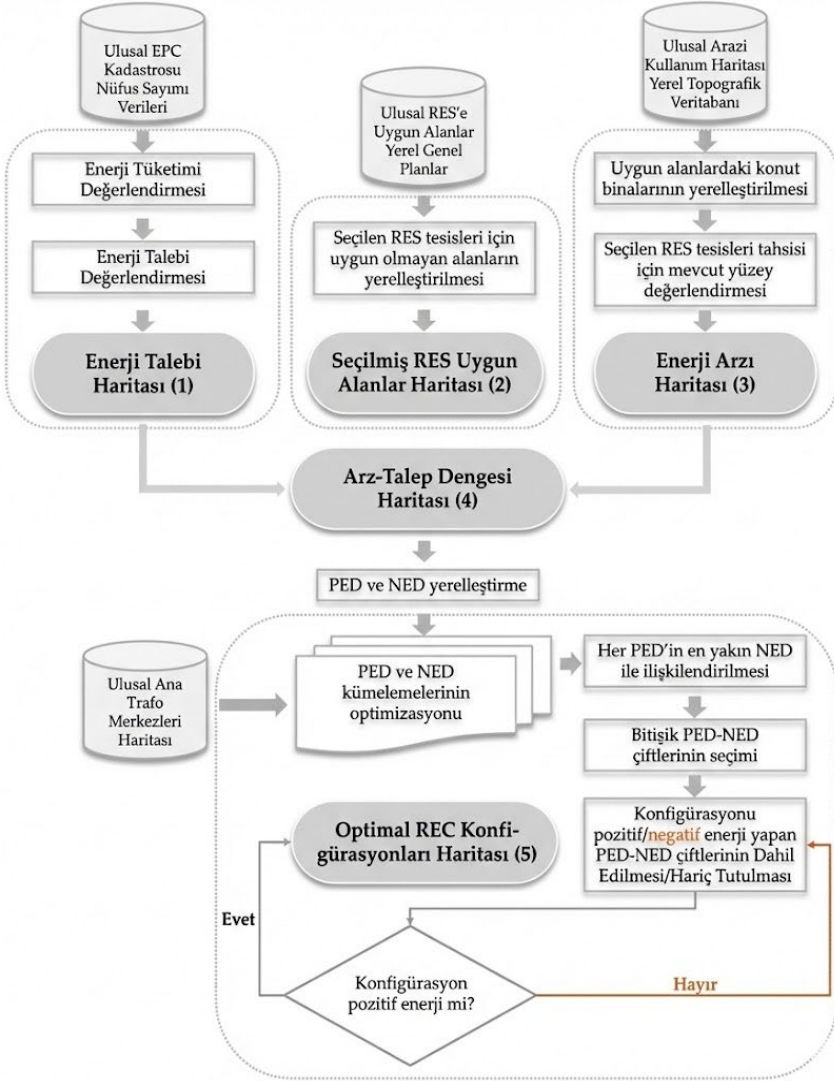
Sürdürülebilir kentsel gelişimde, kamu dinlenme alanlarının (PRS) yenilenebilir enerji kaynaklarıyla (güneş panelli sokak lambaları, akıllı banklar vb.) donatılması, hem yaşam kalitesini artırmakta hem de yerel topluluğun ihtiyaçlarını karşılamaktadır (Zysk & Zalewska, 2024). Bu model, 15 dakikalık şehir konseptiyle uyumlu olarak, sosyal etkileşimi teşvik eden ve karbon ayak izini azaltan çevre dostu kamusal alanlar yaratılmasını esas alır.(Şekil 21)



Şekil 21: Kamusal kentsel alanlarda yaşam kalitesini artıran özellikler (Zysk & Zalewska, 2024)

3.1.5. Mekansal Konfigürasyon ve Pozitif Enerjili Bölgeler Modeli

YET'lerin başarılı bir şekilde konumlandırılması için binaların enerji talebi ile çatı üstü güneş paneli arzının haritalanması kritik önem taşır. Grimaldi ve Marra (2025) tarafından önerilen modelde, enerji fazlası olan Pozitif Enerji Bölgeleri (PED) ile enerji açığı olan Negatif Enerji Bölgelerinin (NED) yakınlık kriterlerine göre bir araya getirilmesi, enerji öz yeterliliğini maksimize eden optimal bir mekansal yapı sunmaktadır. (Şekil 22)

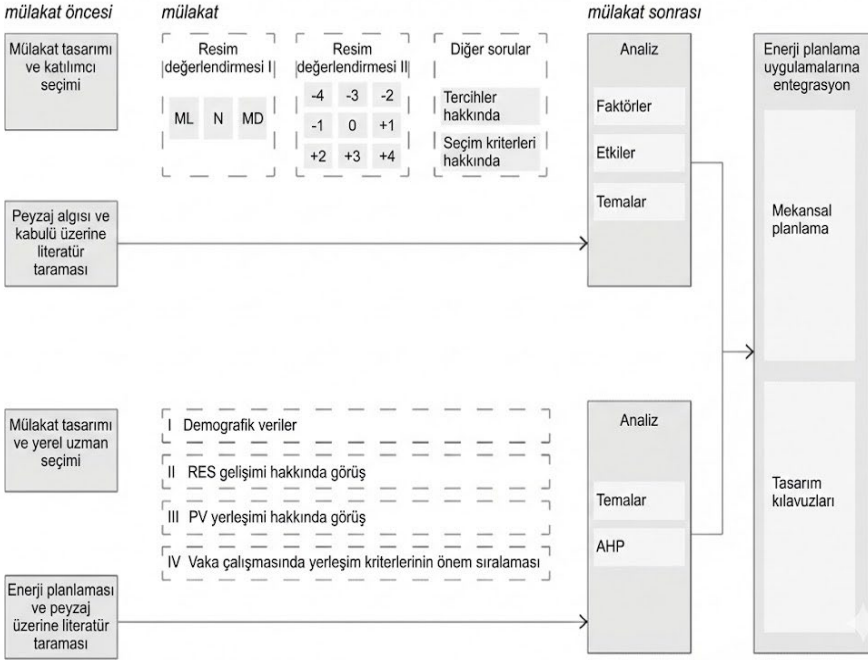


Şekil 22: Bahse konu çalışmadaki önerilen model (Grimaldi & Marra, 2025)

3.2. Sosyal Kabul, Vatandaş Katılımı ve Algı Yönetimi

Yenilenebilir enerji topluluklarının başarısı, teknolojik ve finansal fizibilitenin ötesinde, büyük ölçüde sosyal dinamiklere bağlıdır. Vatandaşların bu projelere yönelik algıları, katılım düzeyleri ve projelerin yerel dokuyla ne kadar uyumlu olduğu, bu girişimlerin uzun vadeli sürdürülebilirliği için en az teknik verimlilik kadar kritik öneme sahiptir.

Yenilenebilir enerji projelerinin, özellikle de fotovoltaik (PV) santrallerin halk tarafından nasıl algılandığını ve sosyal kabulü nelerin etkilediğini anlamak amacıyla Codemo ve arkadaşları (2024) tarafından İspanya'da yürütülen çalışma, bu konuda önemli bulgular sunmaktadır. Araştırmacılar, hem uzmanların hem de uzman olmayan vatandaşların görüşlerini ortaya çıkarmak için nitel bir yaklaşım olan **Q-metodolojisini** kullanmışlardır. (Şekil 23)



Şekil 23: Genel şema (ML: en çok beğenilen; N: nötr; MD: en az beğenilen) (Codemo vd., 2024)

Bu metodoloji kapsamında katılımcılar önce, farklı PV kurulumlarını gösteren 36 resmi "en çok beğenilen", "nötr" ve "en az beğenilen" olmak üzere üç gruba ayırmış, ardından bu resimleri -4'ten (en az beğenilen) +4'e (en çok beğenilen) uzanan bir tablo üzerinde sıralayarak daha ayrıntılı bir "Q-sıralaması" gerçekleştirmişlerdir. (Şekil 24)



Şekil 24: Q örneğinin faktöriyel tasarımı (Codemo vd., 2024)

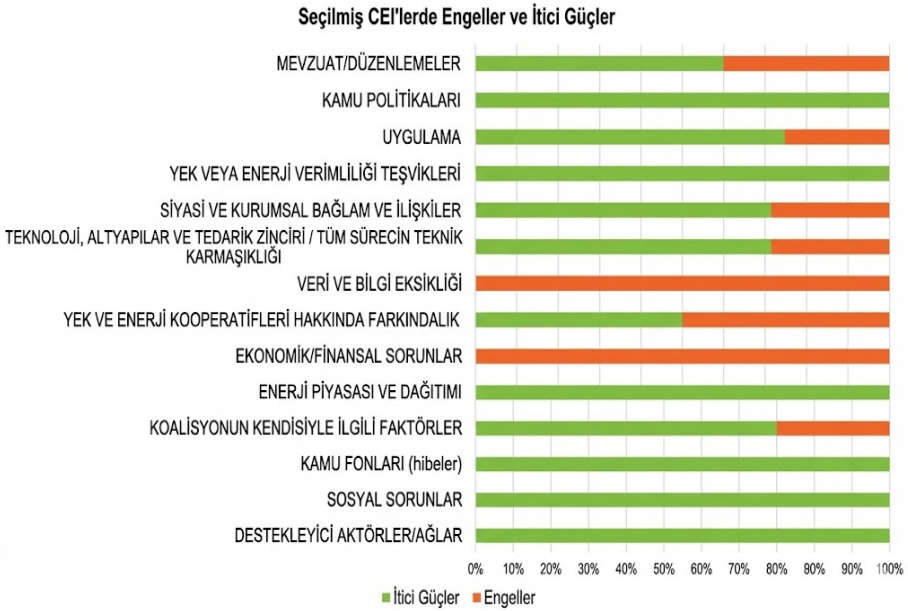
Çalışmanın temel bulguları şunlardır (Codemo vd., 2024):

- Vatandaşlar ve uzmanlar, zemine monte edilen büyük ölçekli sistemler yerine, binaların çatı ve cephelerine entegre edilmiş (bina entegre) PV uygulamalarını açıkça tercih etmektedir.
- Sosyal kabulü etkileyen en önemli faktörlerin başında, PV kurulumlarının mevcut manzara karakteriyle uyumu ve görsel olarak rahatsız edici olmaması gelmektedir.

Vatandaş katılımı, bu girişimlerin sahiplenilmesi ve yaygınlaşması için bir diğer temel unsurdur. Pezzagno ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan çok uluslu analiz, özellikle İspanya ve Hollanda'da, enerji son kullanıcılarını içeren **katılımcı bir yönetim modelinin** benimsenmesinin, Kolektif Enerji Girişimlerinin (KEG) büyümesini sağlayan en önemli itici güçlerden biri olduğunu ortaya koymuştur. Bu, karar alma süreçlerine dahil olan vatandaşların projeleri daha fazla benimsediğini ve desteklediğini göstermektedir. Bu bağlamda, enerji sistemlerinde pasif bir tüketici olmaktan çıkıp aktif bir üretici-tüketici haline gelen "prosumer" kavramı giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Ancak, prosumer faaliyetlerinin artması, yeni düzenleyici zorlukları da beraberinde getirmektedir. Saba ve arkadaşları (2024), prosumer'ların faaliyetlerini denetlemek, enerji dağıtımında adaleti sağlamak

ve şebeke güvenliğini korumak için sağlam düzenleyici çerçevelere ve izleme sistemlerine duyulan ihtiyacın altını çizmektedir.

Bu konuyu araştıran çalışmaların metodolojileri de birbirini tamamlayan farklı içgörüler sunmaktadır. Codemo ve arkadaşlarının (2024) kullandığı Q-metodolojisi, sosyal kabulün *estetik ve algısal itici güçlerine* ilişkin derin, bağlama özgü bilgiler sağlayarak vatandaşların belirli çözümleri *neden* tercih ettiğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, Pezzagno ve arkadaşlarının (2024) çok ülkeli anketi, yapısal itici güçler ve engellerin (yasal, politik, finansal) geniş, sistemik bir genel görünümünü sunarak ulusötesi kalıpları belirlemektedir. (Şekil 25) Bu metotlar birbirini tamamlayıcı niteliktedir: biri mikro düzeyde "kalp ve zihin" kabulünü açıklarken, diğeri makro düzeydeki "oyunun kurallarını" aydınlatmaktadır.



Şekil 25: İtici güçler ve engeller (Pezzagno vd., 2024)

Sonuç olarak, halkın algısını anlamak ve yönetmek, bu girişimleri şekillendiren daha geniş çaplı engelleri ve fırsatları belirlemenin ilk adımındır. Bu sosyal dinamikler, bir sonraki bölümde ele alınacak olan yasal, politik ve teknik faktörlerle yakından ilişkilidir.

3.3. Enerji Topluluklarını Şekillendiren İtici Güçler ve Engeller

Yenilenebilir enerji topluluklarının gelişimi, hem yerel girişimleri kolaylaştıran hem de engelleyen karmaşık bir faktörler ağı tarafından şekillendirilmektedir. Pezzagno ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan önemli bir tespit, aynı kategorilerin yerel bağlama ve uygulama biçimine göre hem bir itici güç hem de bir engel olarak işlev görebileceğidir. Bu ikilik, enerji topluluklarının gelişim dinamiklerinin ne kadar hassas olduğunu göstermektedir.

3.3.1. Karşılaşılan Temel Engeller

Araştırmalar, enerji topluluklarının önündeki engellerin çeşitli alanlarda yoğunlaştığını ortaya koymaktadır:

- **Yasal ve Bürokratik Engeller:** Mevzuat ve düzenlemeler, enerji topluluklarının karşılaştığı en önemli dışsal engel olarak öne çıkmaktadır (Pezzagno vd., 2024). Estonya ve Slovenya gibi bazı ülkelerde enerji topluluklarını destekleyen ulusal bir yasal çerçevenin bulunmaması, bu girişimlerin ortaya çıkmasını baştan kısıtlamaktadır. Yasal çerçevenin bulunduğu İsviçre ve Yunanistan gibi ülkelerde ise yavaş işleyen izin süreçleri ve aşırı bürokrasi, projelerin hayata geçmesini geciktirmektedir (Pezzagno vd., 2024). Bu duruma, mikro-üretim faaliyetlerini denetlemeye yönelik düzenleyici karmaşıklıklar da eklenmektedir (Saba vd., 2024).
- **Teknik ve Altyapısal Zorluklar:** Yenilenebilir kaynakların en büyük teknik zorluklarından biri, güneş ve rüzgar gibi kaynakların kesintili ve değişken doğasıdır (Saba vd., 2024). Bu durum, şebeke dengesi ve enerji depolama ihtiyacı gibi sorunları beraberinde getirir. Ek olarak, ekipmanların yüksek yaşam döngüsü maliyetleri (Saba vd., 2024) ve tedarik zincirinde yaşanan sorunlar (örneğin İsviçre'de yaşanan malzeme teminindeki gecikmeler ve vasıflı işgücü eksikliği) projelerin zamanında tamamlanmasını zorlaştırmaktadır (Pezzagno vd., 2024).

3.3.2. Gelişimi Destekleyen İtici Güçler

Engellerin yanı sıra, enerji topluluklarının büyümesini teşvik eden güçlü itici güçler de mevcuttur:

- **Politika ve Teşvikler:** Kamu politikaları, finansal teşvikler ve hibeler, birincil kurumsal itici güçler olarak kabul edilmektedir (Pezzagno vd., 2024). Hükümetlerin bu sürece aktif katılımı kritik bir rol oynamaktadır. Hollanda'da bakanlıklar, yerel yönetimler, proje ortakları ve fon sağlayıcılar arasında kurulan iş birliği, Kolektif Enerji Girişimlerinin (KEG) hayata geçirilmesinde önemli bir başarı örneği olarak gösterilmektedir (Pezzagno vd., 2024).
- **Sosyal ve Topluluk Temelli Faktörler:** Toplulukların gelişiminde en önemli kurumsal olmayan itici güçler, "destekleyici aktörler/ağlar" ve "sosyal meseleler" olarak tespit edilmiştir (Pezzagno vd., 2024). Vatandaşlar arasında yenilenebilir enerji ve sürdürülebilirlik konularında artan farkındalık ve bu projelere katılım isteği, bu girişimlerin tabanını oluşturmaktadır. Nitekim, Kolektif Enerji Koalisyonlarının (KEK) en önemli etkilerinden birinin, vatandaşların katılımını ve farkındalığını artırması olduğu bulgusu, bu noktayı güçlendirmektedir (Pezzagno vd., 2024).

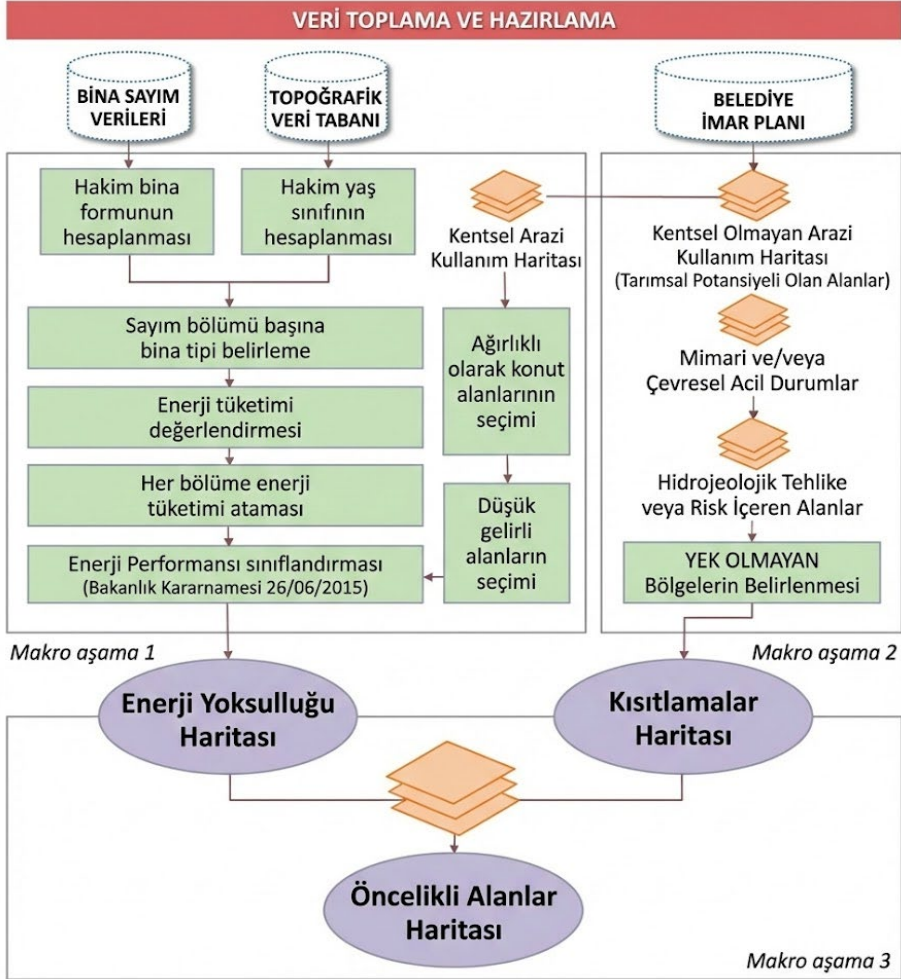
Bu karmaşık engeller ve fırsatlar ağı, enerji topluluklarının potansiyelini tam olarak gerçekleştirebilmesi için sağlam planlama yaklaşımları ve entegre politika çerçevelerinin ne denli zorunlu olduğunu ortaya koymaktadır.

3.4. Kentsel Planlama Araçları ve Politika Entegrasyonu

Kentsel planlama, enerji topluluklarının gelişiminde yalnızca kısıtlamaları belirleyen tepkisel bir rol oynamak yerine, proaktif, kolaylaştırıcı ve yönlendirici bir işlev üstlenebilir. Planlama araçları, bu "aşağıdan yukarıya" gelişen girişimlerin en verimli ve sosyal açıdan en faydalı olacağı alanlarda yeşermesi için stratejik bir zemin hazırlayabilir.

Gerundo ve Marra (2022), kentsel planlamanın Yenilenebilir Enerji Topluluklarının (YET) gelişimini nasıl aktif olarak destekleyebileceğini ortaya koyan önemli bir metodoloji sunmaktadır. Bu "yukarıdan aşağıya" kurumsal yaklaşım, YET'lerin kurulması için "öncelikli alanları" belirlemeyi amaçlar. Metodoloji, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı bir analizle çalışarak öncelikle yenilenebilir enerji kurulumuna uygun olmayan alanları (korunan

alanlar, tehlike bölgeleri vb.) haritadan çıkarır. Ardından, kalan uygun alanlar içinde, YET'lerin özellikle enerji yoksulluğunu azaltma potansiyelinin en yüksek olduğu bölgeleri önceliklendirir (Gerundo & Marra, 2022)(Şekil 26)



Şekil 26: Bahse konu paragrafta geçen ilgi metodoloji (Gerundo & Marra, 2022)

En başarılı strateji, bu "yukarıdan aşağıya" ve "aşağıdan yukarıya" yaklaşımların birleştirilmesinden doğar. Gerundo ve Marra'nın (2022) GIS tabanlı metodolojisi, YET'lerin nerede maksimum sosyal etki yaratabileceğini belirleyerek temel "yukarıdan aşağıya" stratejik zekayı sağlar ve adeta "oyun alanını" oluşturur. Diğer yandan, Pezzagno ve arkadaşlarının (2024) "aşağıdan yukarıya" girişimler üzerine yaptığı analiz, bu alandaki "oyuncuları" – yani

harekete geçmek için gerekli sosyal sermayeye ve motivasyona sahip topluluk gruplarını ve ağlarını – tanımlar. Etkili bir kentsel politika, bu iki yaklaşımdan birini seçmek yerine, planlama araçlarını kullanarak organik topluluk enerjisini bu stratejik olarak hayati bölgelere yönlendirir ve destekler.

Bu entegrasyonun önündeki en büyük engellerden biri, birçok ülkede enerji planlaması ile şehir planlamasının birbirinden kopuk ilerlemesidir. Gerundo ve Marra'nın (2022) İtalya için belirttiği "enerji planlaması ile şehir planlaması arasındaki zor entegrasyon" sorunu, bu alanda politika düzeyinde atılması gereken adımların aciliyetini göstermektedir.

Kentsel planlama, sadece konum belirlemekle kalmayıp, projelerin sosyal kabulünü artırmak amacıyla olumsuz görsel ve peyzaj etkilerini azaltmaya yönelik tasarım ilkelerini de şekillendirebilir. Codemo ve arkadaşları (2024), halkın görsel ve estetik beklentilerini karşılayacak somut mekansal planlama ve tasarım stratejileri önermektedir. Aşağıdaki tablo, bu stratejilerden derlenen bazı somut önerileri özetlemektedir:

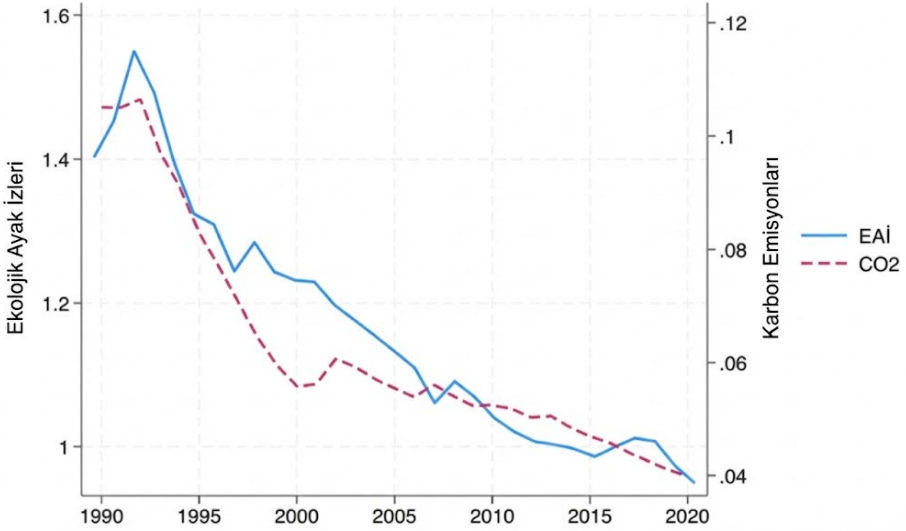
Tablo 2: Stratejiler ve Öneriler

<i>Strateji Kategorisi</i>	<i>Öneri</i>	<i>Kaynak</i>
<i>Konumlandırma</i>	Bozulmuş ve kirlenmiş alanların yeniden kullanılması	Codemo vd., 2024
	Verimli tarım arazilerinin korunması	Codemo vd., 2024
	Tarihi ve doğal olarak iyi korunmuş alanlardan kaçınılması	Codemo vd., 2024
<i>Tasarım</i>	PV paneli boyutlarının peyzaj unsurlarıyla uyumlu olması	Codemo vd., 2024
	Renk ve dokunun arka planla uyumlu olması	Codemo vd., 2024
<i>Çok İşlevlilik</i>	Modüllerin altında veya arasında ekolojik özellikler, sebze bahçeleri veya hayvancılık yapılması	Codemo vd., 2024

Sonuç olarak, politika entegrasyonu ve gelişmiş planlama araçları, YET'leri niş projeler olmaktan çıkarıp kentsel enerji dönüşümünün temel bir bileşeni haline getirmek için zorunludur.

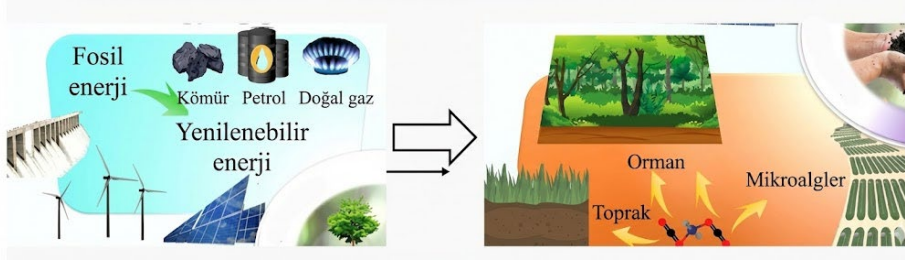
4. ÇEVRESEL ETKİ, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK METRİKLERİ VE EKOLOJİK AYAK İZİ

Kentsel alanlar, küresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma yolunda hem en büyük zorlukların hem de en yenilikçi çözümlerin merkezinde yer almaktadır. Dünya nüfusunun giderek kentlerde yoğunlaşması, bu alanların enerji tüketimi, kaynak kullanımı ve çevresel bozulma üzerindeki etkisini kritik bir seviyeye taşımıştır. Gelişmekte olan ekonomilerde, Somali örneğinde olduğu gibi, hızlı kentselleşme ve tarımsal faaliyetlerin yarattığı baskıya rağmen, yenilenebilir enerjiye geçişin ekolojik ayak izini azaltan en temel faktör olduğu kanıtlanmıştır (Abdi vd., 2024)(Şekil 27).



Şekil 27: Yıllara göre ekolojik ayak izi ve karbon emisyonu değişimi (Abdi vd., 2024)

Bu bağlamda, CO2 emisyonları ve Ekolojik Ayak İzi gibi metrikler, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve kentsel planlama stratejilerinin başarısını ölçmek ve yönlendirmek için vazgeçilmez analitik araçlar haline gelmiştir. Ekolojik ayak izi ve emisyon analizlerinde, Cross-Sectional Distributed Lag



Şekil 29: Fosil enerjiden yenilenebilir enerjiye ve doğal karbon yakalama yöntemlerine geçiş (Ramalingam vd., 2025)

4.1. Temel Metrikler ve Kavramsal Çerçevesel

Kentsel çevresel etkiyi ölçmek, yönetmek ve iyileştirmek için sağlam teorik çerçevesel ve nicel metrikler gereklidir. Bu bölümde incelenen kavramlar, politika yapıcılarının ve şehir plancılarının sürdürülebilirlik hedeflerini nasıl şekillendirdiğini ve bu hedeflere ulaşma yolundaki ilerlemeyi nasıl değerlendirdiğini anlamak için stratejik bir temel oluşturmaktadır. Ekolojik Ayak İzi'nden Çevresel Kuznets Eğrisi'ne kadar uzanan bu çerçevesel, ekonomik faaliyetler ile çevresel sonuçlar arasındaki karmaşık ilişkileri aydınlatmaya hizmet eder.

4.1.1. CO2 Emisyonları ve Ekolojik Ayak İzi

Ekolojik Ayak İzi (EF), belirli bir nüfusun veya ekonominin kaynak tüketimini ve atık üretimini karşılamak için gereken biyolojik olarak verimli toprak ve su alanını ölçen kapsamlı bir sürdürülebilirlik göstergesidir (Wu vd., 2025). Bu metrik, insan faaliyetlerinin gezegenin yenilenme kapasitesi üzerindeki baskısını nicel olarak ifade eder. CO2 emisyonları ise, özellikle fosil yakıtların yanması sonucu atmosfere salınan karbondioksit miktarını ifade eder ve iklim değişikliğinin en temel itici gücüdür. İki metrik arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır; zira CO2 emisyonlarının emilimi için gereken ormanlık alan, toplam ekolojik ayak izinin önemli bir bileşenini oluşturur (Wu ve diğerlerinin çalışmasındaki 0.993'lük güçlü pozitif korelasyonun da gösterdiği gibi). Yapılan çalışmalar, karbon salınımının genel ekolojik bozulmanın ana itici güçlerinden biri olduğunu doğrulamaktadır (Wu vd., 2025).

4.1.2. Ekonomik Büyüme ve Çevresel Ayrışma

"Ayrışma" (decoupling), ekonomik büyümenin çevresel baskılardan veya kaynak kullanımından ayrıştırılması sürecini ifade eder (Tlili vd., 2025).

Bu kavram, sürdürülebilir kalkınmanın temel hedeflerinden biridir ve genellikle iki kategoriye ayrılır:

- **Güçlü Ayırışma:** Ekonomik büyüme devam ederken, çevresel baskının (örneğin, CO2 emisyonları) mutlak olarak azalmasıdır. Bu, Paris Anlaşması gibi küresel iklim hedeflerine ulaşmak için gerekli olan ideal senaryodur.
- **Zayıf Ayırışma:** Ekonomik büyüme hızından daha yavaş bir oranda da olsa çevresel baskının artmaya devam etmesidir. Bu durum, emisyon yoğunluğunun (GSYİH birimi başına emisyon) azaldığı, ancak toplam emisyonların artmaya devam ettiği anlamına gelir.

Bu ayırım, özellikle Suudi Arabistan gibi fosil yakıtlara dayalı ekonomiler için politika hedeflerinin belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu tür ekonomiler için güçlü ayırışmayı başarmak, ekonomik yapının köklü bir şekilde dönüştürülmesini gerektirir (Tlili vd., 2025). Bu ayırım, Suudi Arabistan bağlamında çarpıcı bir şekilde görülmektedir: Petrole dayalı büyüme emisyonlarla güçlü bir birliktelik sergilerken (%1'lik GSYİH artışı %1.34'lük emisyon artışına yol açarken), petrol dışı sektör büyümesi güçlü bir ayırışma göstermektedir (%1'lik büyüme %0.86'lık emisyon *azalışı* sağlamaktadır).

4.1.3. Çevresel Kuznets Eğrisi Hipotezi:

Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC) Hipotezi, bir ülkenin ekonomik gelişiminin ilk aşamalarında çevresel bozulmanın arttığını, ancak kişi başına düşen gelirin belirli bir eşik seviyesini aşmasının ardından teknolojik ilerleme, artan çevresel farkındalık ve daha temiz endüstrilere geçiş sayesinde çevresel bozulmanın azalmaya başladığını öne süren bir teoridir. Bu hipotez, ekonomik büyüme ile çevresel kalite arasında ters "U" şeklinde bir ilişki öngörür. Wu ve diğerlerinin (2025) Çin üzerine yaptığı çalışma, bu hipotezin kısmen doğrulandığını göstermektedir. Bulgular, artan gelir seviyelerinin belirli çevresel iyileşmelere yol açabileceğine işaret etse de, Çin'in genel GSYİH artışının hala büyük ölçüde karbon yoğun endüstrilere dayandığını ve bu durumun emisyonları artırmaya devam ettiğini ortaya koymaktadır (Wu vd., 2025).

Bu kavramsal çerçeveler, çevresel etkinin altında yatan dinamikleri anlamak için bir temel sunmaktadır. Bir sonraki bölüm, bu kavramların farklı

kentsel ve ekonomik bağlamlarda nasıl tezahür ettiğini ekonometrik kanıtlar üzerinden inceleyecektir.

4.2. Çevresel Etkinin Ekonometrik Analizi

Çevresel etkiyi şekillendiren temel sosyo-ekonomik faktörleri analiz etmek, etkili sürdürülebilirlik politikaları geliştirmek için hayati önem taşır. Ekonomik büyüme, kentleşme ve nüfus artışı gibi faktörlerin emisyonlar üzerindeki etkileri evrensel değildir; aksine, yerel ekonomik yapı, planlama kalitesi ve yönetim gibi bağlamsal faktörlere göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bu kısmın ana hedeflerinden biri, farklı ülkelerdeki çalışmaların bulgularını karşılaştırarak bu farklılıkları ortaya koymaktır.

4.2.1. Ekonomik Büyümenin Etkisi

İncelenen tüm çalışmalarda, ekonomik büyüme (GSYİH) ile CO2 emisyonları arasında güçlü ve pozitif bir ilişki olduğu tutarlı bir şekilde ortaya konmuştur.

- Genel Eğilim: Çin (Wu vd., 2025), Suudi Arabistan (Tlili vd., 2025) ve Finlandiya (Nica vd., 2024) gibi birbirinden farklı ekonomik yapıya sahip ülkelerde GSYİH artışının emisyonları artırdığı bulgusu, ekonomik faaliyetin mevcut haliyle doğası gereği karbon yoğun olduğunu göstermektedir.
- Bağlamsal Farklılık: Bu genel eğilime rağmen, ekonomik yapının niteliği belirleyici bir rol oynamaktadır. Tlili ve diğerlerinin (2025) Suudi Arabistan üzerine yaptığı analiz, bu noktayı çarpıcı bir şekilde ortaya koymaktadır: Petrole dayalı GSYİH artışı emisyonları yoğun bir şekilde artırırken, petrol dışı sektörlerdeki büyüme emisyonları *azaltmaktadır*. Bu bulgu, ekonomik çeşitlendirmenin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmadaki stratejik önemini vurgulamaktadır.

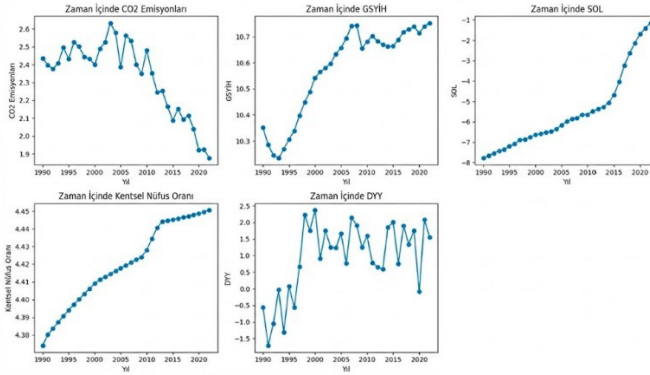
4.2.2. Kentleşmenin Çift Yönlü Etkisi

Kentleşme, çevresel etki üzerinde karmaşık ve genellikle çelişkili bir rol oynamaktadır. Etkisi, kentsel gelişimin hızı, niteliği ve planlama kalitesine bağlı olarak pozitif veya negatif olabilir.

- Negatif Etki (Kısa Vade): Özellikle hızlı ve sanayileşme odaklı kentleşme süreçlerinde, artan enerji talebi, endüstriyel faaliyetler ve

altyapı inşaatları nedeniyle emisyonlar artmaktadır. Bu durum Çin (Wu vd., 2025) ve Suudi Arabistan'da (Tlili vd., 2025) kısa vadede gözlemlenmiştir. Ayrıca, Aldossary ve diğerleri (2023), Suudi Arabistan'daki plansız kentsel yayılmanın biyolojik çeşitlilik ve doğal yaşam alanları üzerinde ciddi olumsuz etkilere yol açtığı konusunda uyarıda bulunmaktadır. Ancak aynı çalışma, uzun vadede sürdürülebilir kentsel planlamanın bu eğilimi tersine çevirebileceğini ve net bir emisyon azalmasına yol açabileceğini ortaya koymaktadır.

- **Pozitif Etki (Uzun Vade ve Planlı Gelişim):** Uzun vadede, kentleşme sürdürülebilirliğe önemli katkılar sunma potansiyeline sahiptir. Modern ve verimli altyapı, hizmetlere daha kolay erişim ve ölçek ekonomileri, kaynak kullanımını daha verimli hale getirebilir. Çin ve Suudi Arabistan'daki çalışmalarda, uzun vadede kentleşmenin sürdürülebilirliğe katkı sağlayabileceği belirtilmiştir (Wu vd., 2025; Tlili vd., 2025). Bu potansiyelin en somut örneği Finlandiya'da görülmektedir. Nica ve diğerlerinin (2024) çalışması, Finlandiya'da kentleşmenin gelişmiş planlama, etkin toplu taşıma sistemleri ve yoğunluktan kaynaklanan verimlilikler sayesinde CO2 emisyonları üzerinde *net bir negatif* etkiye sahip olduğunu göstermektedir. (Şekil 30) Bu karşılaştırma, kentleşmenin kendisinden ziyade, kentsel planlamanın kalitesinin çevresel sonuçlar üzerindeki belirleyici rolünü açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 30: Finlandiya için CO2, GSYİH, SOL (Güneş Enerjisi), Kentsel Nüfus Oranı ve Doğrudan Yabancı Yatırımların (DYY) evrimi (1990–2022). (Nica vd., 2024)

4.2.3. Nüfus Artışı ve Yönetişimin Rolü

Wu ve diğerlerinin (2025) Çin üzerine yaptığı çalışma, nüfus artışının artan konut, ulaşım ve tüketim talebi yoluyla enerji kullanımını ve dolayısıyla çevresel baskıyı artırdığını göstermektedir. Aynı çalışmada yönetim etkinliğinin (GE) rolü de incelenmiş ve şaşırtıcı bir bulguya ulaşılmıştır: Yönetişim etkinliğinin emisyonları azaltmadaki rolü sınırlı kalmış, hatta CO2 ile pozitif bir korelasyon sergilemiştir. Bu durum, Çin'deki kurumsal reformların ve kağıt üzerindeki politikaların sahada somut çevresel sonuçlara dönüşmesindeki zorlukları ve gecikmeleri yansıtmaktadır. Bu bulgu, özellikle gelişmiş ekonomilerde daha iyi yönetişimin emisyonları azalttığını gösteren çalışmalarla bir çelişki oluşturmaktadır. Bu durum, kaynak metnin de ima ettiği gibi, Çin'in hızlı kalkınma döneminde idari modernizasyonun, çevresel düzenlemeleri uygulamaktan ziyade –halen karbon yoğun olan– ekonomik faaliyeti kolaylaştırmada daha etkili olduğunu, bunun da süregelen kurumsal sınırlılıkları ve uygulama gecikmelerini yansıttığını düşündürmektedir.

4.3. Metodolojik Yaklaşımların Karşılaştırılması

Çevresel etkiyi analiz etmek için kullanılan araştırma yöntemlerinin çeşitliliği, konunun çok boyutlu doğasını yansıtmaktadır. Her metodolojinin kendine özgü güçlü yönleri ve sınırlılıkları vardır. Bu yöntemleri anlamak, çalışmaların bulgularını doğru bir şekilde yorumlamak, nedensellik iddialarını değerlendirmek ve politika önerilerinin sağlamlığını sorgulamak için kritik öneme sahiptir. Bu bölümde, incelenen çalışmalarda kullanılan temel kantitatif ve kalitatif yaklaşımlar karşılaştırılmaktadır.

4.3.1. Kantitatif Zaman Serisi Modelleri

İncelenen çalışmalarda, değişkenler arasındaki dinamik ilişkileri analiz etmek için çeşitli ekonometrik modeller yaygın olarak kullanılmıştır. Bu modeller, tarihsel veriler üzerinden istatistiksel olarak anlamlı ilişkiler kurmayı amaçlar.

Tablo 3: Metodolojiler ve Katkıları

Metodoloji	Kullanan Çalışmalar	Temel Amacı ve Katkısı
ARDL NARDL	Tlili vd. (2025), Nica vd. (2024), Wu vd. (2025)	Değişkenler arasındaki kısa ve uzun dönemli dinamikleri ve asimetrik şokların (pozitif/negatif) etkilerini ortaya koyar.
VECM FMOLS	Wu vd. (2025)	Değişkenler arasındaki uzun dönemli denge ilişkisini ve kısa dönemli sapmaların dengeye ne kadar sürede düzeldiğini modeller.
Granger Nedensellik Testi	Wu vd. (2025), Nica vd. (2024)	Değişkenler arasındaki nedensellik ilişkisinin yönünü (örneğin, kentleşme mi emisyonları etkiliyor, yoksa tersi mi?) belirler.

4.3.2. Kalitatif ve Çerçeve Bazlı Yöntemler

Kantitatif modellerin "ne" sorusuna yanıt verirken, kalitatif yaklaşımlar genellikle "neden" ve "nasıl" sorularına odaklanır. Bu yöntemler, sayısal verilerin arkasındaki sosyal, politik ve kurumsal bağlamı anlamada kritik bir rol oynar.

- PESTLE Analizi: Nica ve diğerleri (2024), Finlandiya'daki güneş enerjisi potansiyelini incelerken, Politik, Ekonomik, Sosyal, Teknolojik, Legal (Yasal) ve Environmental (Çevresel) faktörleri analiz eden PESTLE çerçevesini kullanmıştır. Bu yaklaşım, sadece ekonometrik değişkenlerin ötesinde, Finlandiya'nın yenilenebilir enerjiye geçişini destekleyen veya engelleyen daha geniş bağlamsal dinamikleri anlamalarını sağlamıştır; bu çerçeve ile Finlandiya'nın "uluslararası iklim anlaşmalarına olan siyasi bağlılığı" ve "destekleyici yasal düzenlemeleri" gibi faktörlerin güneş enerjisi adaptasyonu için kritik kolaylaştırıcılar olduğu belirlenmiştir.
- Odak Grup Görüşmeleri: Aldossary ve diğerleri (2023), Suudi Arabistan'ın güneybatı bölgeleri için sürdürülebilir bir kalkınma

çerçevesi geliştirmek amacıyla akademisyenler, politika yapımcılar ve endüstri profesyonellerinden oluşan uzmanlarla odak grup görüşmeleri düzenlemiştir. Bu yöntem, yenilenebilir enerji ihtiyacı ve yaban hayatı habitatlarının korunması gibi temel bölgesel kalkınma zorluklarını belirlemek ve sıralamak için kullanılmış, böylece ortaya çıkan çerçevenin yerel uzman bilgisine dayandırılması sağlanmıştır. (Şekil 31)



Şekil 31: Çevre ve ekosistemin korunması için çerçeve (Aldossary vd., 2023)

4.3.3. Metodolojik Sınırlılıklar

Ekonometrik modeller, tarihsel verilere dayalı olarak değişkenler arasındaki ilişkiler hakkında güçlü içgörüler sunsa da, önemli sınırlılıklara sahiptirler. Bu modellerin en temel zayıflığı, gelecekteki yapısal değişimleri ve benzeri görülmemiş olayları öngörmedeki yetersizlikleridir. Nik ve diğerlerinin (2021) de vurguladığı gibi, bu modeller, gelecekteki *aşırı iklim olaylarını* (örneğin, şiddetli sıcak hava dalgaları, seller, kuraklıklar) ve bunların kentsel enerji sistemleri üzerindeki şok etkilerini genellikle hesaba katmaz. Geçmiş verilerde nadiren görülen veya hiç görülmeyen bu tür olaylar, geleneksel zaman

bırakmaktadır. Bu bağlamda, "iklim dirençliliği" (climate resilience) kavramı, kentsel sistemlerin, özellikle de enerji altyapılarının tasarım ve planlamasında merkezi bir rol oynamaya başlamıştır.

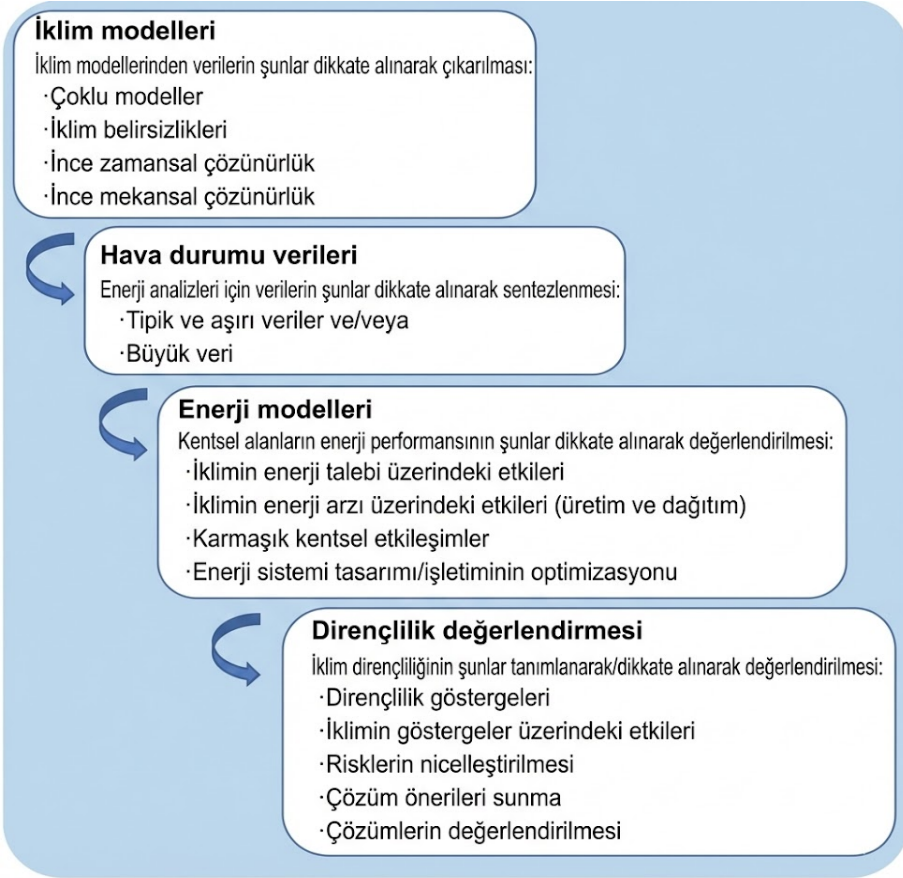
Nik ve diğerlerinin (2021) derlemesine dayanarak iklim dirençliliği, bir kentsel sistemin gelecekteki aşırı iklim olaylarına (şiddetli sıcak hava dalgaları, seller, fırtınalar vb.) karşı dayanma, bu olaylara uyum sağlama ve sonrasında hızla toparlanarak işlevselliğini sürdürme kapasitesi olarak tanımlanabilir. Bu kavram, tarihsel verilere dayanan geleneksel risk analizlerinden temelden ayrılır. Bunun yerine iklim dirençliliği, iklim modelleri tarafından öngörülen 'eşi benzeri görülmemiş' ancak fiziksel olarak 'mümkün' gelecekteki aşırı senaryoları dikkate alarak sistemin sağlamlığını artırmayı hedefler. (Şekil 33)



Şekil 33: Dirençliliğin (siyah renkteki metin) belirli özellikleri ve istikrar, güvenilirlik, sağlamlık ve esneklik ile benzerlikleri (yeşil ve sarı renkteki metin) ve farklılıkları (kırmızı renkteki metin) ve farklılıkları (Nik vd., 2021)

İklim dirençliliği, özellikle kentsel enerji altyapısı için hayati önem taşımaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına (güneş, rüzgar vb.) artan bağımlılık, enerji arzını iklim koşullarına daha duyarlı hale getirmektedir. Örneğin, uzun süren bulutlu veya rüzgarsız dönemler, aşırı sıcaklıkların enerji iletim hatlarının verimliliğini düşürmesi veya fırtınaların altyapıya fiziksel zarar vermesi gibi riskler, enerji güvenliğini tehdit edebilir (Nik vd., 2021). Bu nedenle, geleceğin kentsel enerji sistemleri sadece düşük karbonlu değil, aynı

zamanda iklim şoklarına karşı dirençli olacak şekilde tasarlanmalıdır. Ancak bu kavramı nicel olarak ölçmek ve iklim modellerinin çıktılarını enerji sistemi modelleriyle etkin bir şekilde entegre etmek, farklı zamansal ve mekansal ölçekler arasındaki uyumsuzluklar nedeniyle önemli metodolojik zorluklar içermektedir (Nik vd., 2021)(Şekil 34).



Şekil 34: Gelecekteki iklim koşullarına karşı kentsel enerji sistemlerinin iklim direncini değerlendirmek için genel bir çerçeve (Nik vd., 2021)

5. POLİTİKA, YÖNETİŞİM VE EKONOMİK ÇERÇEVELER

Kentsel alanlarda yenilenebilir enerjiye geçişin başarısı, büyük ölçüde etkin politika araçları, sağlam yönetim yapıları ve destekleyici ekonomik çerçevelerin birleşimine bağlıdır. Ancak, bu unsurların etkileşimi evrensel bir

formül sunmaktan uzaktır; aksine, her ülkenin özgün kalkınma seviyesi, kurumsal kapasitesi ve sosyo-ekonomik yapısı tarafından derinden şekillendirilmektedir. Bu incelemenin temel tezi, yenilenebilir enerji entegrasyonuna yönelik "tek beden herkese uyar" bir yaklaşımın olmadığını, başarının bağlama duyarlı stratejiler geliştirilmesine bağlı olduğunu ortaya koymaktır. Bu amaçla, Nijerya, Yeni Sanayileşen Ülkeler (NICs), Çin ve OECD ülkeleri gibi farklı ekonomik, coğrafi ve kurumsal bağlamlardaki akademik çalışmaları sentezleyerek bu alandaki temel politika araçlarını, yönetim zorluklarını ve ekonomik dinamikleri karşılaştırmalı olarak analiz etmekteyiz. İncelenen çalışmalar, finansal risklerin yenilenebilir enerji tüketimini baskılayabildiğini (Li vd., 2025), yönetim eksikliklerinin ulusal hedeflere ulaşmayı engelleyebildiğini (Shao vd., 2025)(Şekil 35) ve hedef odaklı kentsel programların teknoloji yayılımını hızlandırabildiğini (Ge vd., 2024) ortaya koymaktadır. Bu değerlendirme, doğrudan politika araçlarının etkinliğini, yönetim ve kurumsal çerçevelerin kritik rolünü, makroekonomik ve finansal güçlerin etkisini ve son olarak sosyo-ekonomik bağlamın bu ilişkiler üzerindeki düzenleyici etkilerini bütüncül bir bakış açısıyla ele almaktadır.



Şekil 35: Sürdürülebilir gelişim hedefleri ve bağlantıları (Shao vd., 2025)

5.1 Doğrudan Politika Araçları ve Teşvik Mekanizmaları

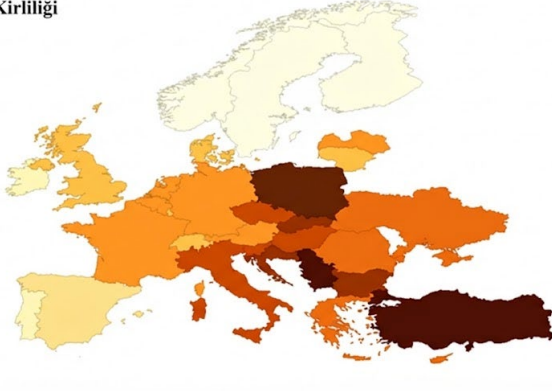
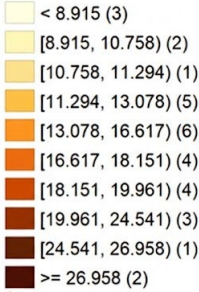
Hükümetlerin yenilenebilir enerjiye geçişi hızlandırmak için kullandığı politika araçlarının çeşitliliği, kentsel enerji sistemlerinin dönüşümünde stratejik bir rol oynamaktadır. Mali düzenlemelerden piyasa tabanlı destek mekanizmalarına ve ulusal ölçekli stratejik planlara kadar uzanan bu araçlar, yatırımcı davranışlarını yönlendirir, teknolojik inovasyonu teşvik eder ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmayı hedefler. Bu bölüm, farklı coğrafyalarda uygulanan mali, piyasa tabanlı ve programatik politika araçlarını ve bunların kentsel enerji sistemlerini nasıl şekillendirdiğini incelemektedir.

5.1.1 Mali Mekanizmalar

Mali mekanizmalar, hükümetlerin yenilenebilir enerjiye geçişi yönlendirmek için kullandığı en doğrudan araçlardan biridir. Bu araçlar genellikle iki temel felsefeye dayanır: istenmeyen davranışları cezalandırmak veya istenen davranışları ödüllendirmek.

- Çevresel Vergiler: OECD ülkelerinde yapılan bir analiz, çevresel vergilerin karbondioksit (CO2) emisyonlarını azaltmada önemli bir rol oynadığını göstermektedir (He, 2024). Bu vergiler, yüksek karbonlu faaliyetlerin maliyetini artırarak ekonomik bir caydırıcı olarak işlev görür ve işletmeleri daha temiz üretim süreçlerine ve teknolojilere yatırım yapmaya teşvik eder. Nitekim 31 Avrupa ülkesini kapsayan güncel bir analiz, çevresel vergilerin sadece emisyonları değil, hava kirliliğinin (PM2.5) dışsal maliyetlerini de içselleştirerek kirlilik seviyelerini düşürmede oldukça etkili olduğunu ve firmaları yeşil teknoloji inovasyonuna yönlendirdiğini doğrulamaktadır (Abbas, 2025)(Şekil 36).

Ortalama PM 2.5 Hava Kirliliği



Şekil 36: Ortalama PM2.5 hava kirliliği haritası (Abbas, 2025)

- Vergi Teşvikleri: Cezalandırıcı yaklaşımın aksine, vergi teşvikleri ödüllendirici bir mekanizma sunar. Bireyler için hibrit veya elektrikli araç alımlarında uygulanan vergi indirimleri ve işletmeler için alternatif enerji kaynakları (güneş, rüzgar, jeotermal vb.) kullanımını teşvik eden vergi kredileri bu kategoriye girer (Revinova vd., 2023)(Tablo 4).

Tablo 4: Çalışma kapsamındaki ülkelerin enerji verimliliği politika sayıları (Revinova vd., 2023).

Grup	Politika Türü	ABD	Çin	Hindistan
İdari Politikalar	Düzenleme	215	74	73
	Düzenleme	41	-	-
	Hükümet Tarafından Sağlanan Tavsiye	-	19	-
	Stratejik Planlar	-	23	-
	Hedefler, Planlar ve Çerçeve Mevzuatı	-	-	-
	Hedefler	-	11	-
	Toplam*	239	91	73
Ekonomik Politikalar	Ödemeler, Finans ve Vergilendirme	115	31	34
	Ödemeler ve Transferler	72	22	26
	Hibeler	-	12	-
	Toplam*	116	31	37
Üretim/Sanayi Politikaları	Asgari Enerji Performans Standartları	38	24	30
	Enerji/CO2 Performans Etiketleri	-	-	29
	Performansa Dayalı Politikalar	55	-	28
	Kodlar ve Standartlar	71	40	24
	Karşılaştırma Etiketleri	-	-	24
	Bina Kodları ve Standartları	79	-	-
	Toplam*	186	48	65
Bilgi Politikaları	Tüketici Bilgisi	-	-	27
	Bilgi ve Eğitim	67	13	39
	Kamu Bilgisi	54	-	-
	Toplam*	90	13	47

Bu iki yaklaşım, politika tasarımındaki farklılıkları açıkça ortaya koymaktadır. Vergiler, piyasaya "kirleten öder" prensibini dahil ederken; teşvikler, yüksek başlangıç maliyetlerine sahip yeşil teknolojilerin pazara girişini kolaylaştırmayı amaçlar.

5.1.2 Piyasa Destek Politikaları

Piyasa tabanlı politikalar, yenilenebilir enerji üretimini doğrudan düzenlemek ve pazarda rekabet gücü kazandırmak için tasarlanmıştır. Bu alandaki en yaygın iki politika aracı Besleme Tarifeleri (Feed-in Tariffs "FIT") ve Yenilenebilir Enerji Portföy Standardı (Renewable Portfolio Standard "RPS") sistemleridir (Li vd., 2025).

- Besleme Tarifeleri (FIT): Bu sistemde, hükümetler yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretenlere belirli bir süre için sabit bir alım fiyatı garantisi verir. Bu garanti, yatırımcılar için gelir belirsizliğini ortadan kaldırarak projeleri finansal olarak daha çekici hale getirir.
- Yenilenebilir Enerji Portföy Standardı (RPS): Bu sistem ise elektrik tedarikçilerine, sattıkları elektriğin belirli bir yüzdesini yenilenebilir kaynaklardan sağlama zorunluluğu getirir. Bu kota sistemi, yenilenebilir enerji için garantili bir pazar yaratarak talebi artırır.

Li ve arkadaşlarının (2025) çalışmasında aktarıldığı üzere, Sun ve Nie (2015) tarafından yapılan bir araştırma, FIT politikalarının yenilenebilir enerji kurulu kapasitesini artırmada ve maliyetleri düşürmeye yönelik Ar-Ge yatırımlarını teşvik etmede RPS sistemlerine göre daha etkili olduğunu bulmuştur. Her iki politikanın yanı sıra, yenilenebilir enerji projelerine yönelik doğrudan sübvansiyonlar da geçiş sürecini katalize etmede kritik bir rol oynamaktadır (Shao vd., 2025; He, 2024).

5.1.3 Ulusal Stratejiler ve Kentsel Ölçekli Pilot Programlar

Devlet müdahaleleri, geniş kapsamlı ulusal planlardan hedef odaklı kentsel programlara kadar farklı ölçeklerde gerçekleştirilebilir. Bu iki modelin karşılaştırılması, politika uygulamasındaki farklı yaklaşımları gözler önüne sermektedir:

- Geniş Kapsamlı Ulusal Stratejiler: Nijerya'nın Yenilenebilir Enerji Master Planı (Renewable Energy Master Plan) gibi ulusal stratejiler, ülkenin enerji geleceği için kapsamlı hedefler belirler. Ancak bu tür planlar, genellikle dağıtık yönetim yapıları, finansman eksikliği ve

politika istikrarsızlıkları gibi nedenlerle uygulama aşamasında ciddi zorluklarla karşılaşabilmektedir (Shao vd., 2025).

- Hedef Odaklı Kentsel Pilot Programlar: Çin'in Akıllı Şehir Pilot Programı (Smart City Pilot Program), daha odaklanmış bir yaklaşım sunar. Bu program, belirli şehirleri teknoloji ve inovasyon merkezleri olarak hedefleyerek, akıllı şebekeler, dijital altyapı ve veri analitiği gibi araçlarla yenilenebilir enerji yayılımını hızlandırmıştır. Programın özellikle kaynak zengini ve kıyı şehirlerinde yenilenebilir enerji entegrasyonunu önemli ölçüde teşvik ettiği gözlemlenmiştir; bu bulgu, çalışmanın nedensel etkiyi ölçmek için kullandığı Farklar-İçinde-Farklar (DID) metodolojisi sayesinde özellikle güçlü bir kanıt niteliği taşımaktadır (Ge vd., 2024).

Bu örnekler, politika araçlarının başarısının sadece tasarımlarına değil, aynı zamanda uygulandıkları yönetim yapılarının etkinliğine de bağlı olduğunu göstermektedir. Bu durum, iyi tasarlanmış politika araçlarının bile sağlam kurumsal yapılarla desteklenmediği takdirde başarısız olabileceğini göstermekte ve gelişmekte olan ülkeler bağlamında ele alınacak olan yönetim temasının önemini vurgulamaktadır.

5.2. Yönetişim Zorlukları ve Kurumsal Çerçevesel

Politika araçlarının tasarlanması ne kadar önemliyse, bunların etkin bir şekilde hayata geçirilmesi de o kadar kritiktir. Yönetişim kalitesi, kurumsal kapasite ve paydaşlar arası işbirliği, politikaların kağıt üzerinde kalması ile gerçek dünyada somut sonuçlar üretmesi arasındaki farkı belirler. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde karşılaşılan yönetim zorlukları, yenilenebilir enerjiye geçişin önündeki en büyük engellerden birini oluşturmaktadır.

5.2.1 Gelişmekte Olan Ülkelerde Yönetişim Eksiklikleri

Nijerya örneği, gelişmekte olan ülkelerdeki yönetim eksikliklerinin yenilenebilir enerji hedeflerini nasıl baltaladığına dair çarpıcı bir vaka sunmaktadır. Ülkenin zengin yenilenebilir enerji potansiyeline rağmen, bu potansiyelin hayata geçirilememesinin altında yatan temel nedenler arasında şunlar bulunmaktadır:

- Dağınık Yönetişim ve Koordinasyon Eksikliği: Farklı bakanlıklar ve kurumlar arasında net bir görev dağılımının ve

koordinasyonun olmaması, politikaların bütüncül bir yaklaşımla uygulanmasını engellemektedir (Shao vd., 2025).

- İstikrarsız Politika Uygulaması: Hükümet değişiklikleri veya önceliklerin değişmesiyle birlikte enerji politikalarında sıkça yaşanan tutarsızlıklar, yatırımcı güvenini zedelemekte ve uzun vadeli projelerin finansmanını zorlaştırmaktadır (Shao vd., 2025).

Bu yapısal sorunlar, Nijerya'nın sahip olduğu 21.250 MW'lık büyük hidroelektrik potansiyelinin yalnızca yaklaşık %9,1'ini (1.938 MW) kullanabilmesine ve diğer yenilenebilir kaynakların neredeyse hiç değerlendirilememesine yol açmaktadır (Shao vd., 2025).

5.2.2 Siyasi İrade ve Kamu-Özel Sektör Ortaklıklarının Rolü

Yönetişim zorluklarının üstesinden gelmek için güçlü siyasi irade ve yenilikçi işbirliği modelleri gereklidir. Sağlam bir yasal ve düzenleyici çerçevenin varlığı, özel sektörün yenilenebilir enerji altyapı geliştirme sürecine katılımını teşvik eden en temel unsurdur (Shao vd., 2025).

Bu noktada, Kamu-Özel Sektör Ortaklıkları (KÖİ), özellikle Nijerya gibi finansal ve teknik kapasite sınırlılıkları olan ülkeler için hayati bir mekanizma olarak öne çıkmaktadır. KÖİ'ler, kamunun düzenleyici rolü ile özel sektörün finansal gücünü, teknik uzmanlığını ve operasyonel verimliliğini bir araya getirir. Bu ortaklıklar, yüksek başlangıç maliyetlerine sahip büyük ölçekli yenilenebilir enerji projelerinin hayata geçirilmesindeki yatırım boşluklarını doldurabilir ve projelerin zamanında ve bütçesinde tamamlanmasına yardımcı olabilir (Shao vd., 2025; He, 2024).

Dolayısıyla, sağlam yönetim çerçeveleri yalnızca operasyonel bir ön koşul değil, aynı zamanda bir ülkenin enerji dönüşümünü rayından çıkarabilecek makroekonomik ve finansal dalgalanmalara karşı gerekli bir kalkan görevi görmektedir ki bu konu bir sonraki bölümde analiz edilecektir.

5.3. Makroekonomik ve Finansal Çerçevelerin Etkisi

Yenilenebilir enerjiye geçiş, yalnızca bir teknoloji veya politika meselesi değildir; aynı zamanda finansal istikrar, yatırım akışları ve küresel ekonomik entegrasyon gibi daha geniş ekonomik faktörlerden derinden etkilenen karmaşık bir süreçtir. Makroekonomik ve finansal çerçeveler, bir ülkenin yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşma kapasitesini ya destekleyebilir ya da köstekleyebilir.

5.3.1 Finansal Risklerin Baskılayıcı Rolü:

Finansal piyasalardaki istikrarsızlık ve risk algısı, yenilenebilir enerji yatırımlarının önündeki en önemli engellerden biridir. Li ve arkadaşlarının (2025) 112 ülkeyi kapsayan panel veri analizine dayanan temel bulgusu bu durumu net bir şekilde ortaya koymaktadır: finansal risk, yenilenebilir enerji tüketimini önemli ölçüde baskılamaktadır. Nijerya örneğinde görülen "dağınık yönetim" ve "politika istikrarsızlıkları" (Shao vd., 2025), tam da Li ve arkadaşlarının (2025) küresel ölçekte yenilenebilir enerji yatırımlarının önündeki en büyük engellerden biri olarak tanımladığı "finansal risk" faktörünü artıran temel unsurlardır. Bu durum, özellikle gelişmekte olan ekonomilerde yatırımları caydıran bir kısır döngü yaratmaktadır.

5.3.2 Finansta Risk Azaltma ve Fırsat Yaratma

Finansal risklerin baskılayıcı rolüne karşın, finans sektörü aynı zamanda yenilenebilir enerjiye geçişi kolaylaştıran güçlü bir kaldıraç olabilir. Finansal sistemlerin doğru araçlarla donatılması, riskleri azaltabilir ve yeni fırsatlar yaratabilir.

- Kapsayıcı ve Yeşil Finansman: Çin'deki akıllı şehirlerde, kapsayıcı finansman (inclusive finance) mekanizmalarının, küçük ve orta ölçekli yenilenebilir enerji projeleri için finansmana erişimi kolaylaştıran bir aracı görevi gördüğü tespit edilmiştir (Ge vd., 2024). Benzer şekilde, OECD ülkelerinde yeşil finansman (green finance) araçları (örneğin yeşil tahviller), sürdürülebilir projelere sermaye akışını yönlendirerek emisyonların azaltılmasına önemli katkılar sağlamaktadır (He, 2024).

5.3.3 Ekonomik Açıklık

Küresel ekonomiye entegrasyon ve ticaretin serbestleşmesi, ülkelerin kalkınma seviyelerine bağlı olarak yenilenebilir enerji geçişi üzerinde zıt etkiler yaratabilmektedir.

Bir yanda, Yeni Sanayileşen Ülkelerde (NICs), ticaret serbestleşmesinin sanayileşmeyi hızlandırdığı ve bu süreçte enerji yoğun endüstrilerin büyümesiyle birlikte fosil yakıt tüketimini artırdığı bulgulanmıştır (Asghar vd., 2024)(Şekil 37).



Şekil 37: Asghar'ın önerdiği model (Asghar vd., 2024)

Diğer yanda, OECD ülkelerine yönelik Doğrudan Yabancı Yatırımların (DYY), genellikle daha sıkı çevresel standartlara ve gelişmiş teknolojilere sahip şirketler tarafından yapıldığından, yeşil teknoloji ve sürdürülebilir üretim pratiklerinin transferini sağlayarak emisyonların düşürülmesine katkıda bulunduğu görülmektedir (He, 2024).

Bu zıtlık, gelişmekte olan ülkeler için "kirlilik sığınağı" hipotezini (emisyon yoğun sanayilerin daha gevşek düzenlemelere sahip ülkelere kayması) ve OECD ülkeleri için ise genellikle daha yüksek çevresel standartlar ve verimli teknolojiler getiren "yeşil teknoloji transferi" etkisini yansıtmaktadır. Ancak ticaretin etkisi ülkelerin gelir seviyelerine göre farklılık gösterebilir; yüksek gelirli Avrupa ve Asya ekonomilerinde ticaret açıklığının uzun vadede çevresel bozulmayı artıran bir faktör olarak kalabildiği gözlemlenmektedir (Tunio vd., 2025).

Öte yandan, Şanghay İşbirliği Örgütü (ŞİÖ) ülkeleri üzerine yapılan araştırmalar, ticaretin teknolojik verimliliği artırarak emisyonları düşürebileceğini, fakat bu avantajın ancak ticaretin çeşitlendirilmesi ve sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesiyle kalıcı hale geldiğini vurgulamaktadır (Rehman vd., 2025)(Şekil 38).



Şekil 38: Şanghay İşbirliği Örgütü ekonomileri için değişkenlerin etkileşim mekanizması. (Rehman vd., 2025)

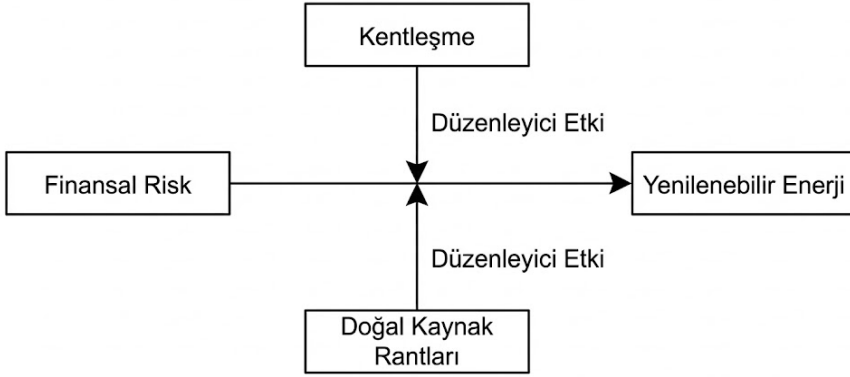
5.4. Sosyo-Ekonomik Bağlamın Düzenleyici (Moderatör) Etkisi

Yenilenebilir enerji politikaları ve ekonomik çerçeveler, "tek beden herkese uyar" doğasına sahiptir. Bir ülkede başarılı olan bir politika, başka bir ülkede aynı sonuçları vermeyebilir. Kentleşme seviyesi, demografik yapı ve doğal kaynak zenginliği gibi yapısal faktörler, politika müdahalelerinin ve makroekonomik güçlerin sonuçlarını önemli ölçüde değiştirebilen düzenleyici (moderatör) bir rol oynar. Kentsel alanlardaki hızlı büyüme ve artan enerji talebi çevresel baskıyı ve ekolojik ayak izini kaçınılmaz olarak artırsa da (Tunio

vd., 2025) , yeşil altyapıların entegrasyonu ve akıllı kentsel tasarım stratejileri ile kentleşmenin getirdiği bu olumsuz etkilerin dengelenmesi ve karbon nötrlüğü hedeflerine ulaşılması mümkündür (Rehman vd., 2025) .

5.4.1 Kentleşmenin İkili Rolü

Literatür, kentleşmenin yenilenebilir enerji entegrasyonu üzerindeki etkilerine dair karmaşık bir tablo sunmaktadır. Bir yandan, plansız ve hızlı kentleşme net bir negatif güç olarak ortaya çıkmaktadır. Araştırmalar, kentleşmenin finansal riskin yenilenebilir enerji tüketimi üzerindeki baskılayıcı etkisini daha da kötüleştirdiğini (Li vd., 2025)(Şekil 39) ve hem NIC'lerde hem de OECD ülkelerinde artan enerji talebi, ulaşım ihtiyacı ve sanayi faaliyetleri nedeniyle emisyonları ve fosil yakıt kullanımını doğrudan artırdığını göstermektedir (Asghar vd., 2024; He, 2024).



Şekil 39: Finansal risk, kentleşme, doğal kaynak gelirleri ve yenilenebilir enerji arasındaki ilişki (Li vd., 2025)

Öte yandan, bu olumsuz eğilim kaçınılmaz değildir. Çin'in Akıllı Şehir Pilot Programı (SCPP) örneği, politikanın kritik bir aracı faktör olduğunu kanıtlamaktadır. Teknoloji odaklı ve iyi planlanmış kentsel politikalar, akıllı şebekeler, enerji verimli binalar ve entegre ulaşım sistemleri gibi çözümlerle şehirleri yenilenebilir enerji benimsemenin motorlarına dönüştürebilir (Ge vd., 2024). Bu durum, kentleşmenin sonuçlarının büyük ölçüde uygulanan politika çerçevesinin niteliğine bağlı olduğunu göstermektedir.

5.4.2 Doğal Kaynak Gelirlerinin Tampon Etkisi

Doğal kaynakların varlığı genellikle "kaynak laneti" olarak anılsa da, bu kaynaklardan elde edilen gelirler doğru yönetildiğinde yenilenebilir enerji geçişi için bir tampon görevi görebilir. Li ve arkadaşlarının (2025) çalışması, doğal kaynaklardan elde edilen gelirlerin (natural resource rents), finansal riskin yenilenebilir enerji tüketimi üzerindeki olumsuz etkisini kısmen hafifletebildiğini ortaya koymuştur. Bu gelirler, hükümetlerin yenilenebilir enerji projelerine kamu finansmanı sağlamasına, sübvansiyonlar sunmasına ve finansal dalgalanmalara karşı bir güvence oluşturmasına olanak tanıyarak yatırım ortamını daha istikrarlı hale getirebilir.

Bu karmaşık ilişkilerin farklı metodolojik yaklaşımlarla incelenmesi, politika, ekonomi ve sosyo-ekonomik bağlam arasındaki çok katmanlı etkileşimleri anlamada kritik bir değere sahiptir.

5.5. Metodolojik Yaklaşımlar ve Bulguların Sentezi

Bu değerlendirmede incelenen çalışmalar, yenilenebilir enerji entegrasyonunun çok boyutlu doğasını analiz etmek için çeşitli ekonometrik ve analitik yöntemler kullanmaktadır. Literatürün bu metodolojik zenginliği, farklı araştırma sorularına özelleşmiş yanıtlar üretilmesini sağlamış ve politika, yönetim ve ekonomi arasındaki karmaşık ilişkilerin daha derinlemesine anlaşılmasına olanak tanımıştır. Aşağıdaki tablo, incelenen altı temel çalışmanın metodolojik yaklaşımlarını ve temel bulgularını özetlemektedir.

Tablo 5: Yazarların coğrafi odakları, metodolojileri ve bulguları

<i>Çalışma (Yazar, Yıl)</i>	<i>Coğrafi Odak</i>	<i>Temel Metodoloji</i>	<i>Politika ve Yönetişime İlişkin Anahtar Bulgu</i>
<i>He (2024)</i>	OECD Ülkeleri	Kesitler Arası Otoresif Dağıtılmış Gecikme (CS-ARDL)	Çevresel vergiler ve yenilenebilir enerji tüketimi CO2 emisyonlarını azaltırken, DYY yeşil teknoloji transferini kolaylaştırır.
<i>Shao vd. (2025)</i>	Nijerya	Çoklu Yöntem (Literatür Taraması,	Dağınık yönetim ve politika istikrarsızlığı, Nijerya'nın yenilenebilir enerji hedeflerine

		Senaryo Analizi)	ulaşmasını engellemektedir; KÖİ'ler kritiktir.
<i>Li vd. (2025)</i>	112 Ülke (Küresel)	Sabit Etkiler, Moderasyon ve Panel Eşik Modelleri	Finansal risk yenilenebilir enerji tüketimini baskılar; kentleşme bu etkiyi artırır, doğal kaynak gelirlere ise hafifletir.
<i>Asgar vd. (2024)</i>	Yeni Sanayileşen Ülkeler (NICs)	Panel Düzeltilmiş Standart Hatalar (PCSE) ve Kantil Regresyon	Kentleşme ve ticaret serbestleşmesi, yenilenebilir enerji kullanımını azaltırken, fosil yakıt tüketimini artırmaktadır.
<i>Ge vd. (2024)</i>	Çin	Farklar-içinde-Farklar (DID)	Çin'in Akıllı Şehir Pilot Programı, özellikle kaynak zengini ve kıyı şehirlerinde yenilenebilir enerji yayılımını önemli ölçüde teşvik etmiştir.
<i>Revinova vd. (t.y.)</i>	Genel (Belirtilmemiş)	Literatürden Politika Örneklerinin Derlenmesi	Bireyler ve işletmeler için uygulanan vergi teşvikleri, alternatif enerji ve temiz ulaşım teknolojilerinin benimsenmesini hızlandırır.

Bu tablodaki metodolojik çeşitlilik, bulguların güvenilirliğini ve geçerliliğini artırmaktadır. Örneğin, Ge ve arkadaşlarının (2024) kullandığı Farklar-içinde-Farklar (DID) modeli, Çin'in Akıllı Şehir Pilot Programı gibi belirli bir politika müdahalesinin nedensel etkisini, programın uygulandığı ve uygulanmadığı şehirleri zaman içinde karşılaştırarak ölçmek için ideal bir yöntemdir. Buna karşılık, He'nin (2024) kullandığı CS-ARDL yaklaşımı, ülkeler arasında ekonomik bağımlılıkların (kesitler arası bağımlılık) bulunduğu panel verilerde, değişkenler arasındaki uzun dönemli

ilişkileri ve kısa dönemli dinamikleri analiz etmek için daha uygundur. Bu farklı yaklaşımlar, literatürün hem belirli politika etkilerini izole etme hem de karmaşık makroekonomik eğilimleri anlama kapasitesini göstermektedir.

6. SONUÇ

Kentsel alanlarda sürdürülebilir enerji dönüşümü ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu; teknolojik altyapıdan mekânsal planlamaya, sosyal katılım dinamiklerinden politik ve ekonomik çerçevelere kadar uzanan, son derece karmaşık ve çok boyutlu bir süreci temsil etmektedir. Bu çalışma kapsamında incelenen literatürün sentezi, kentsel enerji geçişinin yalnızca teknolojik bir optimizasyon meselesi olmadığını; başarının, teknolojik yeniliklerin kapsayıcı yönetim modelleri, proaktif mekânsal planlama felsefesi ve sağlam politika çerçeveleriyle ne ölçüde bütünleştirildiğine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Teknoloji, kentsel sistemlerin sürdürülebilirlik ekseninde optimize edilmesi için güçlü araçlar sunsa da, etkinliği her ülkenin özgün kalkınma seviyesi, kurumsal kapasitesi ve yönetim bağlamı tarafından belirlenmektedir. Bu doğrultuda, enerji altyapısının artık sektörel bir hizmet olmaktan çıkarılıp, kentsel formun ve kamusal mekânın temel bir bileşeni olarak yeniden tanımlandığı köklü bir paradigma değişimine ihtiyaç duyulmaktadır.

Mekânsal boyutta, kentsel formun (yoğunluk, kompaktlık vb.) enerji talebini doğrudan şekillendirdiği görülmekle birlikte, yoğunlaşmanın getirdiği verimlilik kazanımlarının kentsel ısı adası etkisi veya binaların birbirini gölgelemesi gibi paradokslarla dengelendiği analiz edilmiştir. Sosyal perspektiften bakıldığında, yenilenebilir enerji topluluklarının (YET) başarısının; optimal bölgeleri belirleyen "yukarıdan aşağıya" mekânsal planlama ile sosyal meşruiyet sağlayan "aşağıdan yukarıya" topluluk girişimleri arasındaki dinamik sinerjiye bağlı olduğu saptanmıştır. Çevresel açıdan ise kentsel sürdürülebilirlik paradigması, artık yalnızca tarihsel emisyon verilerini yönetmekle sınırlı kalmamalı; geleceğin belirsiz ve şiddeti artan iklim şoklarına karşı dayanabilen ve hızla toparlanabilen dirençli sistemler (resilient systems) inşa etmeye doğru evrilmelidir. Sonuç olarak, finansal risklerin baskılayıcı rolü ve dağınık yönetim yapıları gibi sistemik engellerin aşılması için; çevresel vergiler, yeşil finansman araçları ve kamu-özel sektör iş birlikleriyle (KÖİ) desteklenen bağlama duyarlı ve bütünleşik bir politika tasarımı kaçınılmazdır

6.1. Akıllı Şehirler ve Teknolojik Entegrasyon Sonuç ve Değerlendirme

Teknoloji güçlü araçlar sunsa da, etkinliği uygulandığı stratejik ve yönetim bağlamı tarafından belirlenmektedir. Bu nedenle, akıllı şehir gelişim modellerini karşılaştırmak, bütüncül bir bakış açısı kazanmak için zorunludur.

Literatürde sunulan akıllı şehir geliştirme modelleri incelendiğinde farklı yaklaşımlar öne çıkmaktadır:

- a) *Teknoloji Odaklı Merkezi Model*: Büyük ölçekli altyapı yatırımlarına ve merkezi veri yönetimine dayanır. Shenzhen enerji tasarrufunda %15 ve emisyon azaltımında %20 gibi önemli nicel başarılar elde etmesine rağmen, sosyal eşitlik ve veri gizliliği konularında ciddi zorluklar barındırmaktadır (Zhao, 2025).
- b) *Reforma Dayalı Model*: Bu model, mevcut kentsel yapılar içinde yüksek verimlilik, kusursuz teknolojik entegrasyon ve güçlü düzenleyici çerçevelere odaklanmıştır. Bu yaklaşım, önemli ekonomik büyüme ve karbon yoğunluğunda azalma sağlamıştır (Zreik & Jiao, 2025; Aziz et al., 2024).
- c) *Politika ve Yasa Öncelikli Model*: Afganistan örneği üzerinden geliştirilen bu çerçeve, düşük gelirli ülkelerde (LID) teknolojiye önce yasal ve kurumsal altyapının kurulması gerektiğini savunur. Sabory et al. (2021), enerji entegrasyonunun sağlanabilmesi için "Eylem-Plan-Politika-Yasa" (APPL) adı verilen, devlet başkanlığı seviyesinde koordine edilen yukarıdan aşağıya bir mekanizma önermektedir (Sabory et al., 2021). Bu modelde, teknoloji bir amaç değil, kurumsal kapasiteyle desteklenen bir araçtır.
- d) *Yenilenebilir Enerji Altyapı Modeli*: Birleşik Arap Emirlikleri yaklaşımı, güneş parkları gibi büyük ölçekli yenilenebilir enerji altyapısına yapılan devasa sermaye yatırımlarına dayanmaktadır. Bu sayede yenilenebilir kapasite hızla artmış, ancak enerji verimliliği önlemleri henüz tam olarak entegre edilememiştir (Zreik & Jiao, 2025).
- e) *Endüstriyel Dönüşüm Modeli*: Bu yaklaşım, akıllı şehirleşmeyi bir ekonomik kaldıraç olarak kullanır. Xue et al. (2023), akıllı şehir politikalarının (SCP) enerji tüketimini doğrudan teknoloji kullanımıyla değil, daha çok geleneksel sanayiden akıllı endüstrilere

geçişini teşvik ederek (yapısal etki) azalttığını kanıtlamıştır (Xue et al., 2023).

- f) *Gizlilik Odaklı Merkeziyetsiz Model*: Khan et al. (2025) tarafından sunulan bu model, büyük altyapı yatırımları yerine mevcut şebekeyi gelişmiş algoritmalarla (MARL, FL) optimize etmeye odaklanır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına öncelik veren ve Araçtan Şebekeye (V2G) teknolojisini kullanan bu yaklaşım, %40 karbon emisyonu azaltımı ve %25 daha yüksek yenilenebilir enerji kullanımı vaat ederek, hem gizliliği hem de sürdürülebilirliği önceleyen modern bir alternatif sunar (Khan et al., 2025).



Şekil 40: Akıllı şehirler bağlamında sürdürülebilir enerjiye ilişkin temel kategoriler (Cortese et al., 2022)

6.2. Mekansal Planlama, Arazi Kullanımı ve Kentsel Tasarım Sonuç ve Değerlendirme

Literatürdeki bu farklı yaklaşımların sentezi, tek tip bir "akıllı şehir" reçetesi olmadığını göstermektedir. (Şekil 41) Gelişmiş ekonomilerde teknolojik optimizasyon ve merkeziyetsizleşme (Khan et al., 2025) ön plandayken; gelişmekte olan ekonomilerde yasal çerçevelerin oluşturulması (Sabory et al., 2021) ve endüstriyel dönüşüm stratejileri (Xue et al., 2023) başarının anahtarıdır. Sürdürülebilir bir kentsel gelecek; teknolojik yeniliklerin,

kapsayıcı yönetim modelleri ve sağlam politika çerçeveleriyle bütünleştirilmesine bağlıdır (Zhao, 2025; Esfandi et al., 2024).

Bu kısımda sunulan çalışmalar, kentsel alanlarda yenilenebilir enerji entegrasyonunun çok boyutlu ve karmaşık bir süreç olduğunu ortaya koymaktadır. Başarılı bir enerji dönüşümü, yalnızca teknolojik yeniliklere değil, aynı zamanda kentsel formun dikkatli şekillendirilmesine, etkin planlama araçlarının kullanılmasına ve bütünleşik yönetim mekanizmalarının kurulmasına bağlıdır. Sentezlenen bulgular, üç ana tema etrafında özetlenebilir:

- a) **Kentsel Formun Belirleyiciliği:** Kentsel formun (yoğunluk, kompaktlık vb.) enerji talebini doğrudan şekillendirdiği açıktır. Ancak bu ilişki doğrusal değildir ve paradokslar içermektedir. Örneğin, yoğunlaşma hane başına enerji tüketimini azaltabilirken, aynı zamanda kentsel ısı adası etkisini artırarak soğutma talebini yükseltebilmektedir. Benzer şekilde, kompakt şehirler daha verimli olmakla birlikte, çatı alanı kısıtlamaları ve binaların birbirini gölgelemesi gibi nedenlerle bireysel güneş enerjisi sistemlerinin potansiyelini sınırlayabilmektedir (Rozhkov, 2024). Bu durum, kentsel tasarım kararlarının enerji sonuçlarının dikkatle analiz edilmesi gerektiğini göstermektedir.
- b) **Planlama Araçlarının Rolü ve Sınırları:** Yerel mekansal planlar, RES gelişimini teşvik etme veya engelleme konusunda güçlü bir yasal araçtır. Ancak bu araçların başarısı, plan hükümlerinin kalitesine, güncelliğine ve etkin bir yönetimle desteklenmesine bağlıdır (Solarek & Kubasińska, 2022). CBS ve ÇKKA gibi modern analitik teknolojiler, potansiyel değerlendirme ve karar verme süreçlerinde önemli fırsatlar sunmaktadır (Dimitriou vd., 2024). Buna rağmen, mevcut Kentsel Enerji Sistemi Planlama Modelleri gibi üst ölçekli araçların, mekansal kısıtları ve şebeke dinamiklerini yeterince temsil edememesi, planlama ve uygulama arasında metodolojik bir boşluk yaratmaktadır (Yazdanie & Orehounig, 2023).
- c) **Yönetişim ve Paydaş İşbirliğinin Önemi:** İncelenen vakalar, yenilenebilir enerji entegrasyonundaki temel zorlukların genellikle teknik olmaktan ziyade yönetsimsel olduğunu göstermektedir. Farklı paydaşlar (belediyeler, enerji operatörleri, geliştiriciler) arasındaki çıkar çatışmaları, parçalı idari sorumluluklar ve mevzuattan

kaynaklanan engeller, sürecin önündeki en büyük bariyerlerdir (Koelman vd., 2024; Fuentes-del-Burgo vd., 2021). Bu nedenle, etkili bir enerji dönüşümü için kentsel planlama ve enerji yönetimi arasında yalnızca daha proaktif ve bütünlük bir işbirliği yeterli değildir; enerji altyapısının artık sektörel bir hizmet olmaktan çıkarılıp, kentsel formun ve kamusal mekanın temel bir bileşeni olarak yeniden tanımlandığı köklü bir paradigma değişimine ihtiyaç vardır. Geleceğin sürdürülebilir şehirleri, ancak bu bütüncül ve mekansal temelli planlama felsefesiyle inşa edilebilir.

6.3. Yenilenebilir Enerji Toplulukları ve Sosyal Katılım Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışma kapsamında, kentsel alanlarda sürdürülebilir enerji geçişinin önemli bir unsuru olarak yükselen yenilenebilir enerji topluluklarını, çok boyutlu bir perspektifle ele almıştır. Analiz edilen çalışmalar, bu toplulukların başarısının, optimal bölgeleri belirleyen yukarıdan aşağıya mekansal planlama ile sosyal meşruiyet sağlayan aşağıdan yukarıya topluluk girişimleri arasında kurulacak dinamik bir sinerjiye bağlı olduğunu göstermektedir.

Temel bulgular, Yenilenebilir Enerji Topluluklarının (YET), enerji geçişi için hayati önem taşıyan çeşitli sosyo-tekniik modellerle hayata geçirilebileceğini ortaya koymuştur (Tarpani vd., 2025; Pezzagno vd., 2024). Ancak bu modellerin başarısı, teknolojik fizibilitenin ötesinde, büyük ölçüde sosyal kabule, vatandaşların karar alma süreçlerine aktif katılımına ve projelerin yerel peyzajla bütünlük düzeyine bağlıdır (Codemo vd., 2024).

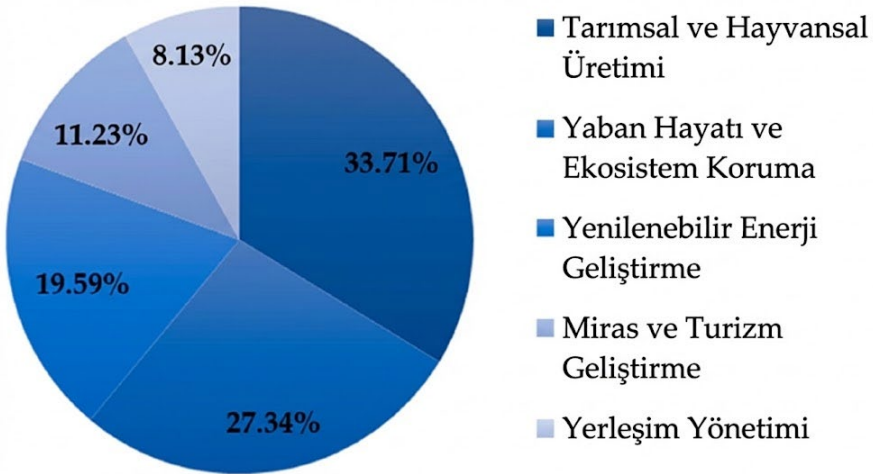
Çalışmalar boyunca tespit edilen ana zorluklar (düzenleyici, teknik) ve itici güçler (politik destek, topluluk ağları), bu sinerjinin kurulmasının önemini pekiştirmektedir (Pezzagno vd., 2024; Saba vd., 2024). Bu karmaşık denklemde kentsel planlamanın rolü kritik bir önem taşımaktadır. Planlama, enerji yoksulluğunun azaltılması gibi sosyal faydaları maksimize edecek öncelikli müdahale alanlarını proaktif bir şekilde tespit etmeli (Gerundo & Marra, 2022) ve sosyal kabulü artıracak tasarım ilkelerini yerel düzenlemelere entegre etmelidir (Codemo vd., 2024).

Sonuç olarak, yenilenebilir enerji topluluklarının potansiyelini tam anlamıyla ortaya çıkarmak ve onları kentsel enerji sistemlerinin ana akım bir parçası haline getirmek, ancak enerji politikası, kentsel planlama ve topluluk

eylemi arasındaki boşluğu dolduracak disiplinler arası bir iş birliği ile mümkün olacaktır. Bu entegrasyon, kentsel enerji dönüşümünün adil, etkili ve sürdürülebilir bir şekilde gerçekleştirilmesinin anahtarıdır.

6.4. Çevresel Etki, Sürdürülebilirlik Metrikleri ve Ekolojik Ayak İzi Sonuç ve Değerlendirme

Elde edilen veriler kentsel sürdürülebilirliğin çok boyutlu doğasını, farklı coğrafi ve ekonomik bağlamlardaki temel çalışmaları sentezleyerek ortaya koymuştur. Analizler, kentleşme, ekonomik büyüme ve çevresel etki arasındaki ilişkinin tek yönlü ve basit olmadığını, aksine son derece bağlama özgü olduğunu göstermiştir. Finlandiya'nın planlı ve verimlilik odaklı kentleşme modelinin emisyonları azaltması, Çin'in hızlı sanayileşme sürecinde kentleşmenin kısa vadede emisyonları artırması ve Suudi Arabistan'da petrole dayalı ekonomik yapının çevresel baskıyı yoğunlaştırması, politika ve planlama kararlarının nihai sonuçlar üzerindeki belirleyici rolünü kanıtlamaktadır. Özellikle Güneybatı Suudi Arabistan gibi bölgelerde, ekosistem koruması ile kentsel büyüme arasındaki dengeyi kuracak kritik göstergelerin (critical indicators) belirlenmesi, sürdürülebilir kalkınma için pratik bir çerçeve sunmaktadır (Aldossary vd., 2023)(Şekil 41).



Şekil 41: Uzmanlar Tarafından Belirlenen Başlıca Kentsel Gelişim Faktörlerinin Sıralaması (Aldossary vd., 2023)

Stratejik bir çıkarım olarak, incelenen tüm çalışmaların yenilenebilir enerjinin emisyon azaltımında merkezi bir çözüm olduğu konusunda hemfikir olduğu görülmektedir. Ancak bu çözümün başarısı, tek başına teknolojik bir geçişten ibaret değildir. Etkili yönetim mekanizmaları, akıllı ve kompakt kentsel planlama stratejileri ve en önemlisi, fosil yakıtlara olan yapısal ekonomik bağımlılığın kararlılıkla kırılması gibi tamamlayıcı faktörlere sıkı sıkıya bağlıdır. Kurumsal reformların çevresel sonuçlara dönüşmesindeki gecikmeler ve zorluklar, bu entegre yaklaşımın ne denli kritik olduğunu göstermektedir.

En önemli argüman ise geleceğe yöneliktir: Kentsel sürdürülebilirlik paradigması, artık yalnızca tarihsel çevresel etkileri (CO2 emisyonları, Ekolojik Ayak İzi) ölçmek ve yönetmekle sınırlı kalmaz. Asıl hedef, geleceğin belirsiz ve şiddeti artan iklim şoklarına karşı dayanabilen, uyum sağlayabilen ve hızla toparlanabilen dirençli sistemler (resilient systems) inşa etmeye doğru evrilmelidir (Nik vd., 2021). Bu vizyon, geçmişin verilerine dayalı reaktif politikalarından, geleceğin olası senaryolarına hazırlıklı proaktif stratejilere geçişi zorunlu kılmaktadır. Dolayısıyla, iklim dirençliliği, geleceğin kentsel planlama ve enerji politikaları için temel bir yol gösterici ilke olarak benimsenmelidir.

6.5. Politika, Yönetişim ve Ekonomik Çerçevesel Sonuç ve Değerlendirme

Bu inceleme, kentsel alanlarda yenilenebilir enerji entegrasyonu için politika, yönetim ve ekonomik çerçevelerin başarısının evrensel bir formülü olmadığını açıkça ortaya koymaktadır. Başarı; bir ülkenin kalkınma seviyesi, yönetim kapasitesi, finansal piyasalarının derinliği, kentleşme dinamikleri ve doğal kaynak yapısı gibi bağlamsal faktörlere derinden bağlıdır. Finansal risklerin yenilenebilir enerji tüketimini baskıladığı (Li vd., 2025), ancak yeşil finansmanın bu baskıyı hafifletebildiği (He, 2024); kentleşmenin genellikle emisyonları artırdığı (Asghar vd., 2024), ancak teknoloji odaklı kentsel planlamanın bu eğilimi tersine çevirebildiği (Ge vd., 2024); ve dağınmık yönetişimin en iddialı ulusal planları bile işlevsiz kılabildiği (Shao vd., 2025) görülmüştür. Bu bulgular ışığında, politika yapıcılar için aşağıdaki sentezlenmiş öneriler sunulmaktadır:

- **Bütünleşik Politika Tasarımı:**
 - Tek bir politika aracına güvenmek yerine, farklı mekanizmaları birleştiren bütüncül bir yaklaşım benimsenmelidir.
 - Karbon emisyonlarını caydırmak için çevresel vergiler (He, 2024), piyasayı canlandırmak için tarife garantileri (FIT) veya kotalar (RPS) (Sun ve Nie, 2015, aktaran Li vd., 2025) ve altyapı gelişimini hızlandırmak için doğrudan kamu yatırımları ve teşvikleri bir arada kullanılmalıdır.
- **Yönetişim Reformu ve Kurumsal Kapasite:**
 - Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, kurumlar arası koordinasyonu güçlendiren, şeffaf ve istikrarlı düzenleyici çerçeveler oluşturulmalıdır.
 - Politika belirsizliğini azaltmak ve yatırımcı güvenini artırmak esastır. Finansal ve teknik kapasite boşluklarını doldurmak için kamu-özel sektör işbirliklerini (KÖİ) teşvik eden yasal ve idari altyapı güçlendirilmelidir (Shao vd., 2025).
- **Finansal Dirençlilik ve Yeşil Yatırımların Teşviki:**
 - Finansal risklerin yenilenebilir enerji yatırımları üzerindeki baskılayıcı etkisini yönetmek için makroekonomik istikrar politikaları önceliklendirilmelidir (Li vd., 2025).
 - Yeşil ve kapsayıcı finansman mekanizmaları (örneğin, yeşil tahviller, risk paylaşım fonları) geliştirilerek sürdürülebilir projelere sermaye akışı sağlanmalıdır (Ge vd., 2024; He, 2024).
 - Yeşil teknoloji transferini teşvik eden Doğrudan Yabancı Yatırımları (DYY) çekmek için elverişli bir yatırım ortamı yaratılmalıdır (He, 2024).
- **Bağlama Duyarlı Kent Planlaması:**
 - Kentleşmenin getirdiği artan enerji talebi ve emisyon baskısını yönetmek için sürdürülebilirlik ilkeleri kentsel planlamanın merkezine yerleştirilmelidir.
 - Akıllı şebekeler, yeşil bina standartları, dağıtık enerji sistemleri ve sürdürülebilir toplu ulaşım gibi çözümler,

şehirleri daha verimli ve daha az karbon yoğun hale getirmek için entegre edilmelidir (Li vd., 2025; Ge vd., 2024).

- Politika tasarımları, şehirlerin kaynak yapısı (örneğin, kaynak zengini, kıyı) ve büyüklüğü gibi yerel özelliklere göre uyarlanmalıdır.

KAYNAKÇA

- Abbas, S. (2025). Spatial Analysis of Research & Development and Environmental Taxation Impacts on Air Pollution in Europe. *SAGE OPEN*, 15(3). (WOS:001567982700001). <https://doi.org/10.1177/21582440251367581>
- Abdi, A., Sheikh, S., & Elmi, S. (2024). Pathways to sustainable development in Somalia: Evaluating the impact of agriculture, renewable energy, and urbanisation on ecological footprints and CO2 emissions. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SUSTAINABLE ENERGY*, 43(1). (WOS:001328870900001). <https://doi.org/10.1080/14786451.2024.2411832>
- Aldossary, N., Alghamdi, J., Alzahrani, A., Alqahtany, A., & Alyami, S. (2023). Evaluation of Planned Sustainable Urban Development Projects in Al-Baha Region Using Analytical Hierarchy Process. *SUSTAINABILITY*, 15(7). (WOS:000969216100001). <https://doi.org/10.3390/su15076020>
- Aldossary, N., Alzahrani, A., Alghamdi, J., Alqahtany, A., Jamil, R., & Alyami, S. (2023). A Procedural Framework to Identify Critical Indicators for the Protection of Environment and Ecosystem during Sustainable Urban Development in South-Western Saudi Arabia. *SUSTAINABILITY*, 15(1). (WOS:000908883700001). <https://doi.org/10.3390/su15010195>
- AlMheri, O., & Weraikat, D. (2025). Integration of Renewable Energy Strategies: A Case in Dubai South. *SUSTAINABILITY*, 17(13). (WOS:001527603300001). <https://doi.org/10.3390/su17136093>
- Almusaed, A., Almssad, A., Alasadi, A., & Al-Asadi, F. (2025). Sustainable Reimagining of urban Habitats: Navigating Iraq's housing crisis through Socio-Technological and Environmental approaches. *AIN SHAMS ENGINEERING JOURNAL*, 16(2). (WOS:001423745000001). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103280>
- Asghar, M., Ali, S., Hanif, M., & Ullah, S. (2024). Energy transition in newly industrialized countries: A policy paradigm in the perspective of technological innovation and urbanization. *SUSTAINABLE FUTURES*, 7. (WOS:001184628600001). <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2024.100163>

- Aziz, S., Sharun, S., Wagiman, K., & Moorapun, C. (2024). Architectural Intelligence (ArcAI) Evolution and Progress on Sustainable Smartscapes Planning for the Cities of Tomorrow. *Universiti Malaysia Kelantan*, 9(29), 107-114. (WOS:001267249400006). <https://doi.org/10.21834/e-bpj.v9i29.6023>
- Canché-Cab, L., San-Pedro, L., Ali, B., Rivero, M., & Escalante, M. (2024). The atmospheric boundary layer: A review of current challenges and a new generation of machine learning techniques. *ARTIFICIAL INTELLIGENCE REVIEW*, 57(12). (WOS:001335057900005). <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10962-5>
- Codemo, A., Ghislanzoni, M., Prados, M., & Albatici, R. (2024). Incorporating public perception of Renewable Energy Landscapes in local spatial planning tools: A case study in Mediterranean countries. *APPLIED GEOGRAPHY*, 170. (WOS:001286759400001). <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2024.103358>
- Cortese, T., de Almeida, J., Batista, G., Storopoli, J., Liu, A., & Yigitcanlar, T. (2022). Understanding Sustainable Energy in the Context of Smart Cities: A PRISMA Review. *ENERGIES*, 15(7). (WOS:000780533300001). <https://doi.org/10.3390/en15072382>
- De Lotto, R., Micciche, C., Venco, E., Bonaiti, A., & De Napoli, R. (2022). Energy Communities: Technical, Legislative, Organizational, and Planning Features. *ENERGIES*, 15(5). (WOS:000771381900001). <https://doi.org/10.3390/en15051731>
- Dimitriou, I., Arsenopoulos, A., Trachanas, G., Sarmas, E., & Marinakis, V. (2024). Assessing the adoption level of solar PV installations, on district scale of urban environment. *RENEWABLE ENERGY*, 237. (WOS:001348727500001). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121676>
- Esfandi, S., Tayebi, S., Byrne, J., Taminiau, J., Giyahchi, G., & Alavi, S. A. (2024). Smart Cities and Urban Energy Planning: An Advanced Review of Promises and Challenges. *Smart Cities*, 7(1), 414-444. <https://doi.org/10.3390/smartcities7010016>
- Fuentes-del-Burgo, J., Navarro-Astor, E., Ramos, N., & Martins, J. (2021). Exploring the Critical Barriers to the Implementation of Renewable Technologies in Existing University Buildings. *SUSTAINABILITY*,

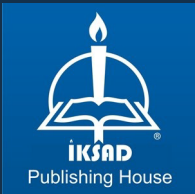
- 13(22). (WOS:000725729900001).
<https://doi.org/10.3390/su132212662>
- Galenzowski, J., Waczowicz, S., Çakmak, H., Tajalli-Ardekani, E., Beichter, S., Ekin, Ö., Mikut, R., & Hagenmeyer, V. (2025). Understanding novel district concepts: A structured exploration of interdisciplinary clustering in urban energy systems. *ENERGY REPORTS*, 14, 3673-3689. (WOS:001615393000001). <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.10.021>
- Ge, R., Xu, S., Ullah, M., & Mark, P. (2024). Assessing the impact of urban planning policies on renewable energy: A case a China using the DID estimation model. *HELIYON*, 10(5). (WOS:001201504500001). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27099>
- Georgescu, I., Nica, I., & Kinnunen, J. (2024). Towards Sustainability: Understanding Norway's Ecological Footprint Through the Framework of the Environmental Kuznets Curve. *ENERGIES*, 17(23). (WOS:001379508700001). <https://doi.org/10.3390/en17236074>
- Gerundo, R., & Marra, A. (2022). A Decision Support Methodology to Foster Renewable Energy Communities in the Municipal Urban Plan. *SUSTAINABILITY*, 14(23). (WOS:000897264400001). <https://doi.org/10.3390/su142316268>
- Grigore, G., Vladut, O., & Nicolae, S. (2025). Connections between Energy Consumption, Economic Growth, and Pollution: A Bibliometric Analysis from the Perspective of Climate Action and Public Awareness. *National University of Science & Technology POLITEHNICA Bucharest*, 19(1), 2047-2079. (WOS:001536652700012). <https://doi.org/10.2478/picbe-2025-0160>
- Grimaldi, M., & Marra, A. (2025). Optimizing the Spatial Configuration of Renewable Energy Communities: A Model Applied in the RECMOP Project. *SUSTAINABILITY*, 17(15). (WOS:001549787400001). <https://doi.org/10.3390/su17156744>
- He, Y. (2024). Promoting Environmental Sustainability: The Role of Renewable Energy Systems and Environmental Taxes. *APPLIED SCIENCES-BASEL*, 14(16). (WOS:001305242900001). <https://doi.org/10.3390/app14167404>

- Jung, C., & Awad, J. (2023). Sharjah Sustainable City: An Analytic Hierarchy Process Approach to Urban Planning Priorities. *SUSTAINABILITY*, 15(10). (WOS:000997811700001). <https://doi.org/10.3390/su15108217>
- Khan, B., Ullah, Z., & Mehmood, F. (2025). Advancing Sustainable Urban Mobility: A Decentralised Framework for Smart EV-Grid Integration and Renewable Energy Optimisation. *URBAN SCIENCE*, 9(11). (WOS:001624608600001). <https://doi.org/10.3390/urbansci9110443>
- Kinnunen, J., Georgescu, I., & Nica, I. (2024). Evaluating the Environmental Phillips Curve Hypothesis in the STIRPAT Framework for Finland. *SUSTAINABILITY*, 16(11). (WOS:001245497400001). <https://doi.org/10.3390/su16114381>
- Koelman, M., Hartmann, T., & Spit, T. (2024). Squeezing in—Land-use conflicts of urban energy transitions in densification. *DISP*, 60(3), 40-53. (WOS:001438341900010). <https://doi.org/10.1080/02513625.2024.2471168>
- L. F. C. Castro, B. B. Freitas, & P. C. M. Carvalho. (2024). A review on the integration between urban and energy planning considering the planning tools. *RE&PQJ*, 19(2). <https://doi.org/10.24084/repqj19.252>
- Li, R., Wang, Q., & Sun, J. (2025). Financial risk and renewable energy: Exploring the influence of urbanization and natural resource rents across 112 countries. *HUMANITIES & SOCIAL SCIENCES COMMUNICATIONS*, 12(1). (WOS:001416164900005). <https://doi.org/10.1057/s41599-025-04481-z>
- Luo, B., Rauf, A., Osei-Kusi, F., Sundas, R., & Mehmood, R. (2024). Exploring the impacts of agricultural emissions from natural gas on ecological footprint. *ECOLOGICAL PROCESSES*, 13(1). (WOS:001355102600003). <https://doi.org/10.1186/s13717-024-00558-w>
- Nica, I., Georgescu, I., & Kinnunen, J. (2024). Evaluating Renewable Energy's Role in Mitigating CO2 Emissions: A Case Study of Solar Power in Finland Using the ARDL Approach. *ENERGIES*, 17(16). (WOS:001306937800001). <https://doi.org/10.3390/en17164152>
- Nik, V. M., Perera, A. T. D., & Chen, D. (2021). Towards climate resilient urban energy systems: A review. *National Science Review*, 8(3), nwaa134. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa134>

- Offermann, J., Frank, M., Zaunbrecher, B., Reichartz, T., Wendorff, J., Blickwedel, L., Wendorff, L., Reicher, C., Schelenz, R., & Ziefle, M. (2026). Interdisciplinary optimization of potential analyses for renewable energies by integrating socio-psychological parameters. *RENEWABLE ENERGY FOCUS*, 56. (WOS:001566222600001). <https://doi.org/10.1016/j.ref.2025.100747>
- Pezzagno, M., Richiedei, A., Frigione, B., & Tira, M. (2024). Integrating energy strategies and urban planning: Overcoming challenges for collective energy initiatives. *INTERNATIONAL JOURNAL OF URBAN SUSTAINABLE DEVELOPMENT*, 16(1), 199-210. (WOS:001259617100001). <https://doi.org/10.1080/19463138.2024.2373068>
- Ramalingam, S., Hassan, W., Subramanian, M., Khan, M., Elkamchouchi, D., Tarakaramu, N., & Prashanth, K. (2025). Synergies for sustainability: Renewable energy, urban planning, and green industry in carbon emission reduction. *SUSTAINABLE FUTURES*, 10. (WOS:001564218100006). <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101222>
- Rehman, A., Liu, R., Ma, H., Ahmad, M., & Olah, J. (2025). Towards achieving carbon neutrality in SCO economies: Investigating the dilemma of renewable energy and environmental sustainability. *ENERGY STRATEGY REVIEWS*, 61. (WOS:001547330700001). <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101858>
- Revinova, S., & Gomonov, K. (2023). A Comparative Analysis of Government Policies to Promote Energy Efficiency in the US, China, and India. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 13(1), 291-306. <https://doi.org/10.32479/ijeep.13790>
- Rozhkov, A. (2024). Applying graph theory to find key leverage points in the transition toward urban renewable energy systems. *APPLIED ENERGY*, 361. (WOS:001197798600001). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122854>
- Saba, H., Brito, F., dos Santos, R., Borges, T., Fernandes, R., Araujo, M., Jorge, E., Panizio, R., Brito, P., Ferreira, P., & Nascimento, A. (2024). The Potential Related to Microgeneration of Renewable Energy in Urban Spaces and Its Impact on Urban Planning. *ENERGIES*, 17(23). (WOS:001377871500001). <https://doi.org/10.3390/en17236018>

- Sabory, N., Senjyu, T., Danish, M., Ahmadi, M., Zaheb, H., & Halim, M. (2021). A Framework for Integration of Smart and Sustainable Energy Systems in Urban Planning Processes of Low-Income Developing Countries: Afghanistan Case. *SUSTAINABILITY*, 13(15). (WOS:000682212500001). <https://doi.org/10.3390/su13158428>
- Sabory, N., Senjyu, T., Danish, M., Sayed, S., Ahmadi, A., & Saeedi, E. (2021). Post-2000 Building Industry in Kabul City from Sustainability Perspective. *SUSTAINABILITY*, 13(14). (WOS:000676926700001). <https://doi.org/10.3390/su13147833>
- Shao, Y., Yang, Z., Yan, YB, Yan, Y, Israilova, F., Khan, N., & Chang, L. (2025). Navigating Nigeria's path to sustainable energy: Challenges, opportunities, and global insight. *ENERGY STRATEGY REVIEWS*, 59. (WOS:001478891300001). <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101707>
- Solarek, K., & Kubasinska, M. (2022). Local Spatial Plans as Determinants of Household Investment in Renewable Energy: Case Studies from Selected Polish and European Communes. *ENERGIES*, 15(1). (WOS:000752818900001). <https://doi.org/10.3390/en15010126>
- Stoyanov, A., & Sakharova, A. (2023). Accessibility of Energy from Renewable Energy Sources for Inhabitants of Arctic Cities. *ECONOMY OF REGION*, 19(3), 860-869. (WOS:001087585000018). <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2023-3-18>
- Suryawan, I., Suhardono, S., Rahman, A., Nguyen, V., & Lee, C. (2026). Citizen low-carbon choices through zero carbon lifestyle frameworks. *SUSTAINABLE FUTURES*, 11. (WOS:001642258200001). <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101595>
- Tarpani, E., Hong, T., Pigliautile, I., Zhang, W., Sun, K., Pioppi, B., & Pisello, A. (2025). On renewable energy community implementation in historic cities: A city-scale validated model. *ENERGY AND BUILDINGS*, 338. (WOS:001470292000001). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115709>
- Tlili, H., Alhamad, S., & Turki, H. (2025). How growth, urbanization, and energy consumption affect CO2 emissions in Saudi Arabia (1970-2020)? An ARDL and NARDL approach to investigate the eco-environmental challenge. *ENERGY STRATEGY REVIEWS*, 59. (WOS:001447811000001). <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101691>

- Tunio, F., Nabi, A., Memon, R., Fraz, T., & Haluza, D. (2025). Sustainability in High-Income Countries: Urbanization, Renewables, and Ecological Footprints. *ENERGIES*, 18(7). (WOS:001465762900001). <https://doi.org/10.3390/en18071599>
- Wu, J., Yu, H., Cao, N., Zhang, J., Khan, J., & Lee, D. (2025). Ecological footprint analysis as a tool for advancing sustainable development goals (SDGs): Evidence from China. *ECOLOGICAL INDICATORS*, 176. (WOS:001505237900003). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113653>
- Xue, F., Zhou, M., & Liu, J. (2023). Are Cities Saving Energy by Getting Smarter? Evidence from Smart City Pilots in China. *Sustainability*, 15(4), 2961. <https://doi.org/10.3390/su15042961>
- Yazdanie, M., & Orehounig, K. (2023). A Review and Analysis of Energy Systems Planning Models and Tools for Renewable Energy Integration in Cities. *Journal of Physics: Conference Series*, 2600(4), 042007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/4/042007>
- Zhao, W. (2025). Smart city technologies for sustainable urban planning: Evidence and equity lessons from Shenzhen. *SUSTAINABLE FUTURES*, 10. (WOS:001565439900003). <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101198>
- Zreik, M., & Jiao, Y. (2025). Comparative Econometric Analysis of Renewable Energy Policies in Smart Cities: A Case Study of Singapore and the UAE. *Applied Sciences*, 15(22), 12168. <https://doi.org/10.3390/app152212168>
- Zysk, E., & Zalewska, K. (2024). THE VOICE OF SOCIETY IN DESIGNING PUBLIC RECREATIONAL SPACES (PRS) IN AN URBAN ENVIRONMENT. *ECONOMICS AND ENVIRONMENT*, 88(1). (WOS:001243803900027). <https://doi.org/10.34659/eis.2024.88.1.715>



ISBN: 978-625-378-630-4