



Bartın Üniversitesi  
Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi

# Akıllı Sistemler Dergisi

Journal of  
Smart Systems

Cilt: 4

Sayı: 1

Yıl: 2025

## BAŞ EDİTÖR

Doç. Dr. Eyüp Burak CEYHAN

## EDİTÖRLER

Doç. Dr. Ersin ALAYBEYOĞLU

Dr. Öğr. Üyesi Bayram DÜNDAR

## YAYIN KURULU

Prof. Dr. Nizamettin AYDIN

Prof. Dr. Mustafa BAYRAM

Prof. Dr. Bülent CENGİZ

Prof. Dr. Canan CENGİZ

Prof. Dr. Bojan CUKIC

Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK

Prof. Dr. Ayhan İSTANBULLU

Prof. Dr. Resul KARA

Prof. Dr. Moamar Sayed MOUCHAWEH

Prof. Dr. Handan UCUN ÖZEL

Prof. Dr. Yusuf ÖZTÜRK

Prof. Dr. Guangzhi QU

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Prof. Dr. Şükran ŞAHİN

Prof. Dr. Orhan UZUN

Prof. Dr. Ali YAZICI

Doç. Dr. Ersin ALAYBEYOĞLU

Doç. Dr. Selçuk BAŞ

Doç. Dr. Eyüp Burak CEYHAN

Doç. Dr. Azmi ERDOĞAN



Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin AKTAN

Dr. Öğr. Üyesi Pelin KEÇECİOĞLU DAĞLI

Dr. Öğr. Üyesi Bayram DÜNDAR

Dr. Öğr. Üyesi Ramazan SOLMAZ

Dr. Azizul AZİZAN

Dr. Oktay ADALIER

Dr. Dahaman ISHAK

Dr. Müslüm KAPLAN

Dr. Mohd Nazim MOHTAR

Dr. Fakhrol HAZMAN YUSOFF

#### **SEKRETERYA**

Dr. Öğr. Üyesi Pelin KEÇECİOĞLU DAĞLI

Arş. Gör. Mert TOK

#### **İLETİŞİM**

Doç. Dr. Eyüp Burak CEYHAN

Bartın Üniversitesi Kutlubeyyazıcılar Kampüsü

Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Oda:307

MERKEZ/BARTIN

E-posta: [eyupburak@gmail.com](mailto:eyupburak@gmail.com)

#### **TEKNİK DESTEK**

Doç. Dr. Eyüp Burak CEYHAN

E-posta: [eyupburak@gmail.com](mailto:eyupburak@gmail.com)



## İÇİNDEKİLER

**KARBON NÖTR GELECEĞE DOĞRU: AKILLI  
SİSTEMLERİN ENTEGRE  
UYGULAMALARIYLA KARBON AYAK  
İZİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

Derleme Makale

Yazar: Recep Önder Sürmeli

**YAPAY ZEKÂ VE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE ARITMA  
TESİSLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE  
SÜREÇ İYİLEŞTİRME POTANSİYELİNİN  
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Derleme Makale

Yazar: Niyazi Erdem Delikanlı

**AKILLI ŞEHİR YÖNETİMİ KRİTERLERİNİN ANP  
YÖNTEMİ İLE AĞIRLIKLANDIRILMASI**

Araştırma Makalesi

Yazarlar: Tamer Eren, Sude Kaya,

Yavuz Baran Kalemler, İrem

Gaferoğlu, Emel Güven

**THE EFFECTS OF AUTONOMOUS VEHICLES ON THE  
LOGISTICS SECTOR AND THE  
INNOVATIONS THEY BRING**

Derleme Makale

Yazarlar: Çınar Akın Ak, Hasan Şahin,

Koray Altun



Değerli Okurlarımız,

Akıllı Sistemler Dergisi'nin dördüncü cilt birinci sayısını yayınlamanın mutluluğunu yaşıyoruz. Gönderilen makaleler arasından bir makale bu sayımızda hakemler tarafından yayınlanmaya değer bulunmuştur.

Dergimizin bu sayısında Recep Önder Sürmeli tarafından yazılan “KARBON NÖTR GELECEĞE DOĞRU: AKILLI SİSTEMLERİN ENTEGRE UYGULAMALARIYLA KARBON AYAK İZİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ” adlı derleme çalışmasında, enerji verimliliği çerçevesinde akıllı sistemlerin karbon ayak izi üzerindeki etkisi ele alınmakta, sürdürülebilir gelecek vizyonuna katkıları değerlendirilmektedir. Niyazi Erdem Delikanlı tarafından kaleme alınan “YAPAY ZEKÂ VE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE ARITMA TESİSLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE SÜREÇ İYİLEŞTİRME POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ” adlı derleme türündeki çalışmada, mühendislik uygulamaları bağlamında enerji tasarrufu sağlayan yapay zekâ destekli süreç iyileştirme yöntemleri incelenmiştir. Tamer Eren, Sude Kaya, Yavuz Baran Kalemler, İrem Gaferoğlu, Emel Güven tarafından ortaklaşa hazırlanan “AKILLI ŞEHİR YÖNETİMİ KRİTERLERİNİN ANP YÖNTEMİ İLE AĞIRLIKLANDIRILMASI” başlıklı araştırma makalesinde, çok ölçütlü karar verme tekniklerinden ANP yöntemi ile akıllı şehir yönetimi kriterlerinin önceliklendirilmesi çalışılmıştır. Çınar Akın Ak, Hasan Şahin, Koray Altun imzalı “THE EFFECTS OF AUTONOMOUS VEHICLES ON THE LOGISTICS SECTOR AND THE INNOVATIONS THEY BRING” adlı derleme çalışmasında ise, yapay zekâ ve otonom araç sistemlerinin lojistik sektörü üzerindeki etkileri ve sektöre kazandırdığı yenilikler analiz edilmiştir.

Dergimize çalışmalarını gönderen değerli yazarlarımıza ve kıymetli vakitlerini ayırarak makaleleri değerlendiren hakemlerimize teşekkür ediyoruz. Sonraki sayılarda siz değerli okurlarımızın önerileriyle ve gönderecekleri makalelerle desteklerini esirgemeyeceklerinden eminiz. Bu vesileyle gelecek sayımızın Aralık 2025 tarihinde yayınlanması planlandığını hatırlatıyor, gelecek sayıya da çalışmalarınızı bekliyoruz. Akıllı Sistemler Dergisi'nin ilim dünyasına hayırlı olmasını diliyor, saygılarımızı sunuyoruz.  
05.07.2025

EDİTÖR



## THE EFFECTS OF AUTONOMOUS VEHICLES ON THE LOGISTICS SECTOR AND THE INNOVATIONS THEY BRING

**Cınar Akın AK<sup>1,a,\*</sup>, Hasan ŞAHİN<sup>1,b</sup>, Koray ALTUN<sup>1,c</sup>**

<sup>1</sup>Department of Industrial Engineering, Bursa Technical University, Bursa, Türkiye.

<sup>2</sup>Department of Industrial Engineering, Bursa Technical University, Bursa, Türkiye

<sup>3</sup>Department of Industrial Engineering, Bursa Technical University, Bursa, Türkiye

<sup>a</sup>cinarakin.ca@gmail.com, ORCID: [0009-0002-3676-0477](https://orcid.org/0009-0002-3676-0477)

<sup>b</sup>hasansahindr@gmail.com, ORCID: [0000-0002-8915-000X](https://orcid.org/0000-0002-8915-000X)

<sup>c</sup>koray.altun@btu.edu.tr, ORCID: [0000-0003-0357-9495](https://orcid.org/0000-0003-0357-9495)

**(Geliş/Received: 06.11.2024; Kabul/Accepted: 11.03.2025)**

### ABSTRACT

This study comprehensively addresses the role and impact of autonomous vehicles in the logistics sector. With the integration of intelligent systems, these vehicles not only reshape logistics operations but also play a critical role in urban digitization. The ability of autonomous vehicles to quickly adjust their routes based on real-time data enables the efficient and secure transportation of goods, from storage facilities to distribution centers and international logistics. This situation reduces costs and optimizes time management. However, the implementation of these technological advancements requires careful consideration of factors such as safety, legal regulations, and societal acceptance. The study also details our company's application of electric bus initiatives and the activities and needs associated with them. Therefore, this study highlights not only the role of autonomous vehicles in logistics but also their impact on society.

**Keywords:** Logistics, Autonomous vehicles, Smart transportation, Automotive, Industry 4.0

### OTONOM ARAÇLARIN LOJİSTİK SEKTÖRÜNE ETKİLERİ VE BERABERİNDE GETİRDİĞİ YENİLİKLER

### ÖZET

Bu çalışma, lojistik sektöründeki otonom araçların rolünü ve etkisini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Akıllı sistemlerin entegrasyonu sayesinde, bu araçlar yalnızca lojistik operasyonlarını yeniden şekillendirmekle kalmayıp, aynı zamanda kentsel dijitalleşmede de kritik bir rol oynamaktadır. Otonom araçların, anlık verilere dayanarak rotalarını hızlı bir şekilde değiştirebilme yeteneği, depolama tesislerinden dağıtım merkezlerine ve uluslararası lojistiğe kadar malların verimli ve güvenli bir şekilde taşınmasını mümkün kılmaktadır. Bu durum, hem maliyetleri azaltmakta hem de zaman yönetimini optimize etmektedir. Ancak, bu teknolojik ilerlemelerin hayata geçirilmesi için güvenlik, yasal düzenlemeler ve toplumsal kabul gibi çeşitli faktörlerin dikkate alınması gerekmektedir. Çalışmada, kendi firma uygulamamız olan elektrikli otobüs çalışması ve gerçekleştirilecek faaliyetler ile ihtiyaçlar da detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Dolayısıyla, bu

**\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)**

**Geliş (Received):06/11/2024**

**Atf (Citation):** AK, Ç.A., ŞAHİN, H., ALTUN, K., "The Effects Of Autonomous Vehicles On The Logistics Sector And The Innovations They Bring", Akıllı Sistemler Dergisi, 4(1): 1-24, 2025.

**Kabul (Accepted):11/03/2025**

**Yayın (Published):05/07/2025**

çalışma, otonom araçların lojistikteki rolünün yanı sıra, toplum üzerindeki etkilerini de vurgulamaktadır.

**AnahtarKelimeler:** Lojistik, Otonom Araçlar, Akıllı Ulaşım, Otomotiv, Endüstri 4.0

## 1. INTRODUCTION

Today, autonomous vehicles are increasingly important in the logistics sector. These vehicles are equipped with artificial intelligence and sensor technologies that are driverless and able to move automatically [12]. In logistics, autonomous vehicles are responsible for the process of transporting materials, products and services. These vehicles are used in a variety of logistics tasks, such as transporting materials from storage facilities, taking them to distribution centers and delivering them to final consumers. In addition, the impact of autonomous vehicles is not only limited to logistics companies, but also plays a decisive role in the digitization process of cities [8]. The concept of intelligent systems and digital organisms collects and analyzes large amounts of data in order to optimize the infrastructure and services of cities. This data provides important information about traffic density, weather, road conditions and other variables [6]. The analysis of the data collected is of great importance for the effective use of autonomous vehicles. This data allows autonomous vehicles to plan their routes more effectively, while helping them to identify potential obstacles both in advance and instantaneously [13]. In particular, thanks to artificial intelligence algorithms, these vehicles can choose the most suitable routes even in complex traffic conditions, thus minimizing travel times. In addition, driverless vehicles are capable of other than the definition of study, to safely transport their cargo during transport processes. This enables them to act based on data from intelligent systems, enabling them to react appropriately to instantaneous conditions [8]. For example, unexpected obstacles encountered when carrying a passenger or cargo are analyzed quickly by these systems, developing alternative routes or strategies. These developments offer groundbreaking potential in the logistics industry in terms of efficiency, safety and environmental impact. Autonomous vehicles not only transform existing logistics processes but also play an important role in shaping future city infrastructure and transportation systems.

- What steps need to be followed for logistics with autonomous vehicles?
- What requirements must be met for the use of autonomous vehicles in the logistics sector?
- What are the data obtained in the application of sample autonomous bus study?

The aim is to answer these three main questions, and case studies related to them will be provided. In this context, the effects of autonomous vehicles and enterprises in logistics will be examined in detail, and a perspective on the future will be presented.

## 1.1. History of Autonomous Vehicle Technologies

The concept of autonomous vehicles dates back to the 1920s. In 1925, a French electrical engineer came up with a radio controlled vehicle ride [12]. After this stage, in 1939, as a result of the joint research and development activities of General Motors and Sarnoff Laboratory of America, the idea of autonomous vehicles was presented to the public for the first time at the New York World Fair. The idea of the exhibited autonomous vehicle also included a highway system that would assist the vehicle. In 1958', testing of such vehicles was carried out for the first time and tests of a self managing autonomous car were carried out [5].

## 1.2. Earnings from Autonomous Vehicles

With the increase in transportation, negative situations such as pollution, accidents and human losses are also increasing. Autonomous vehicle technology may reduce some of these negative effects [14]. Autonomous vehicles can be used by all family members at the same time and can be used commercially in taxi, bus and transport services [4]. In addition, they can reduce parking demand in urban centers, contributing to the opening of these areas to other economic activities and increasing urban density. However, the factors of reliability, comfort and time can encourage long journeys and cause urban sprawl [5].

## 2. STRUCTURE OF AUTONOMOUS VEHICLES

### 2.1. Hardware Systems

Autonomous vehicles are often formed by the integration of a number of complex technologies. The hardware system is given below.

#### a) Motion Control;

In autonomous vehicles, the system regulates the vehicle's speed, direction, and position using sensors, actuators, and control systems. This technology enables the vehicle to move safely at the desired speed and accuracy by sensing environmental data. As shown in Figure 1, motion control is a key component that enables autonomous vehicles to travel efficiently and accurately.

- Motor Control Unit (MCU) : Controls the speed and torque of the electric motor. Regulates the electrical power to ensure the correct operation of the vehicle's engine. Optimizes the speed and power of the engine for an efficient drive.
- Electric Power Steering (EPS) : It is an electric steering system. The electric motor provides the steering wheel rotation. Provides a more precise and efficient driving experience.

- Electro Hydraulic Brake (EHB) : It is a combination of electronic and hydraulic systems. Manages braking processes more quickly and precisely. Charges the battery with regenerative braking and provides energy recovery.
- On Board Diagnostic (OBD) : Continuously monitors all electronic systems in the vehicle. Detects faults and sends a warning to the driver. Optimizes vehicle performance.
- Electronic Parking Brake (EPB) : It is an electronic parking brake. It replaces the manual parking brake and offers easy use. It uses the space in the vehicle efficiently thanks to its compact structure.
- Lithium Battery : It is the energy source of the electric vehicle. It provides energy with high energy density and long life. It offers fast charging and long range.
- Vehicle Control Unit (VCU) : It functions as the central brain of all motion control systems. It coordinates components such as MCU, EPS, EHB and battery. Optimizes the performance and safety of the vehicle.

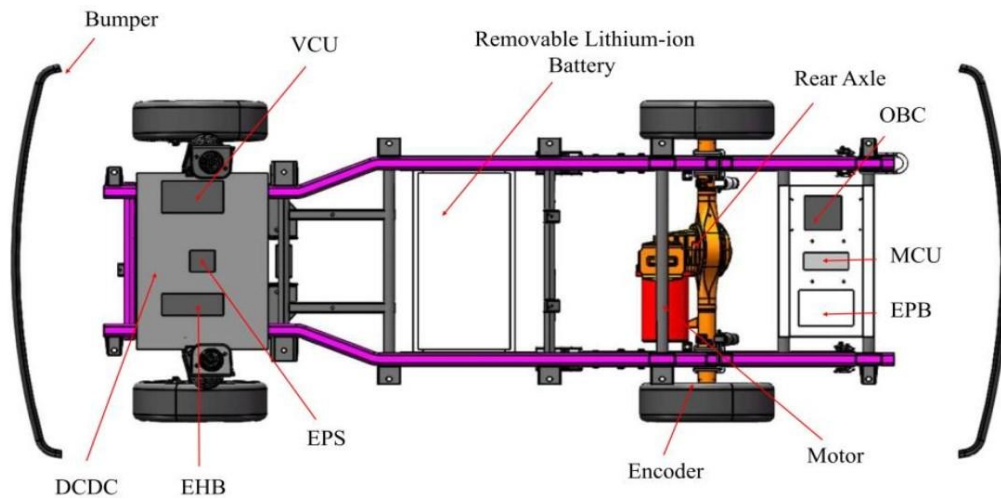


Figure 1. Mobile based (chassis) sensors and control units [2].

#### b) Task Manager;

Optimizing and monitoring the studies of robots plays a critical role in modern logistics systems. In this regard, the Task Manager has the ability to create optimized logistics routes based on delivery locations and time windows [7]. Not only does this process ensure that the shortest and most efficient roads are identified, but it also takes into account variables such as traffic situations, weather conditions and other external factors. The Task Manager continuously monitors each stage of the delivery processes and provides quick response in case of any glitches. Thus, the system can develop alternative solutions to deal with unexpected situations. In the event of a road closing or an increase in traffic intensity, it minimizes time loss by rescheduling the current route. It is critical to ensure that all deliveries

are working as expected. The Task Manager ensures that each delivery is delivered on time and safely, while also monitoring the effective use of resources. The integration of these systems increases the efficiency of logistics operations, reduces costs and increases customer satisfaction.

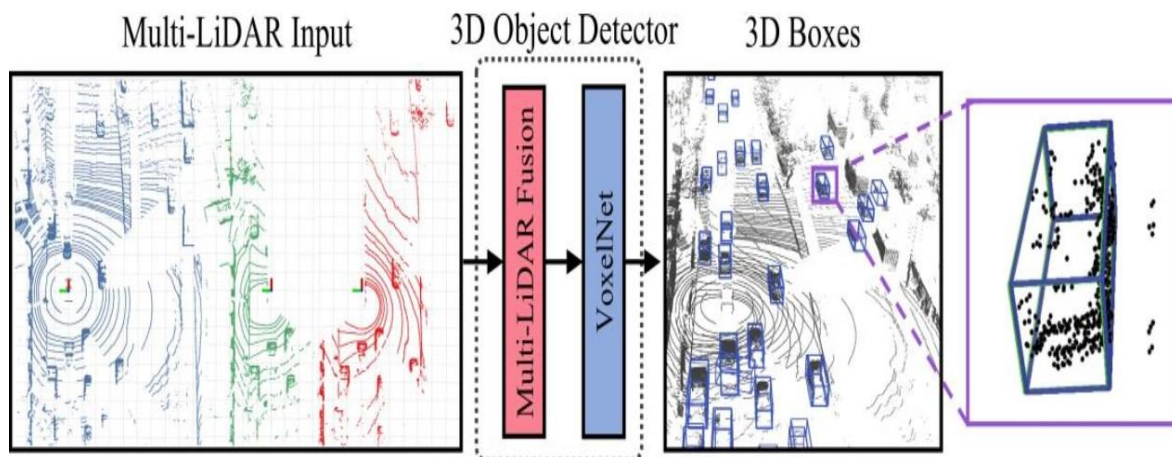
### c) System Control;

These systems continuously process and analyze the data necessary to control the movement of the vehicle. The information obtained through sensors, cameras and other data collecting devices allows the vehicle to detect the surrounding environment. The processed data is used to effectively manage the basic functions of the vehicle, such as steering, acceleration and stopping [13]. During the routing process, the system determines the optimal route, taking into account GPS data, map information and the location of surrounding obstacles.

Acceleration and stop study are performed by analyzing the current speed, road conditions and traffic situation. Thus, the system can detect in advance dangerous situations such as sudden stops or accelerations to ensure a safe ride. The integrated structure of these systems is capable of continuous learning and adaptation using advanced algorithms to improve driver and passenger safety. Therefore, the performance of the vehicle improves with time and can respond more quickly to changing conditions. These characteristics play a decisive role in the future of modern transport, increasing the efficiency and safety of autonomous vehicles.

### d) Sensors;

Autonomous vehicles use a variety of sensors to detect their surroundings [12]. These sensors are usually lidar (range detection by light), radar (range detection by radio waves), camera, and ultrasonic sensors, as shown in Figure 2. Lidar can calculate distance by sending light waves [2].

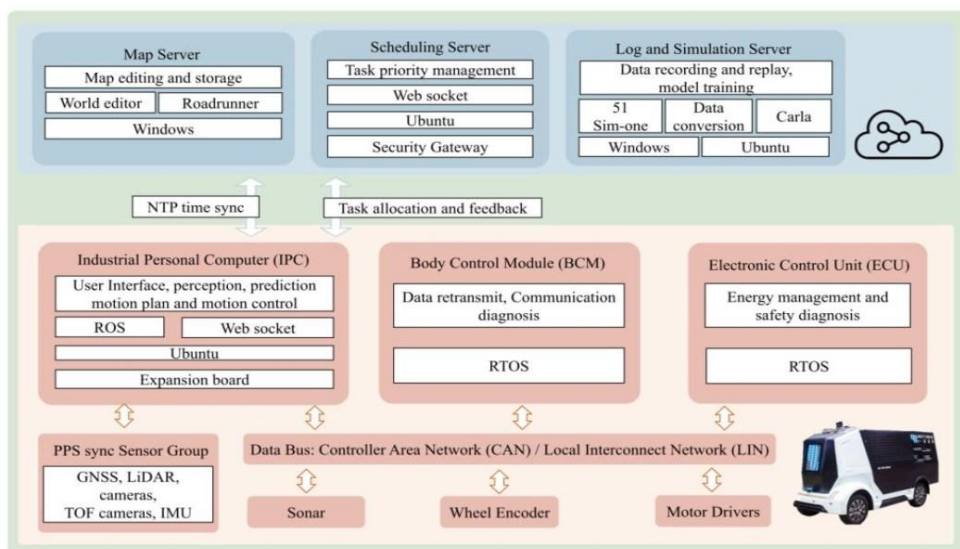


**Figure 2.** Overview of the 3D object detection module. Inputs are captured by multiple synchronized and well calibrated Lidars [2].

With the developing technology, multiple automation systems are being developed in vehicles. Vehicle infrastructure communication enables data flow between autonomous vehicles and road and traffic infrastructure [5]. Vehicle to vehicle communication is the situation in which the car communicates with other vehicles and transmits and receives data. Besides these communications, there are various technologies available to monitor vehicles by scanning the surrounding situation. Perimeter radar can operate at different ranges and detect objects. Lidar obtains 3D images using lasers [11]. Ultrasonic sensors are affordable and have limited range and are affected by weather conditions. These sensors are used in different areas and are integrated with GPS [12]. The vehicles are equipped with anti collision systems, which direct the vehicle in case of a possible accident [5]. While the GPS signal is used as a starting point, the HD map, Lidar and camera also contribute to positioning algorithms [2].

## 2.2. Software System

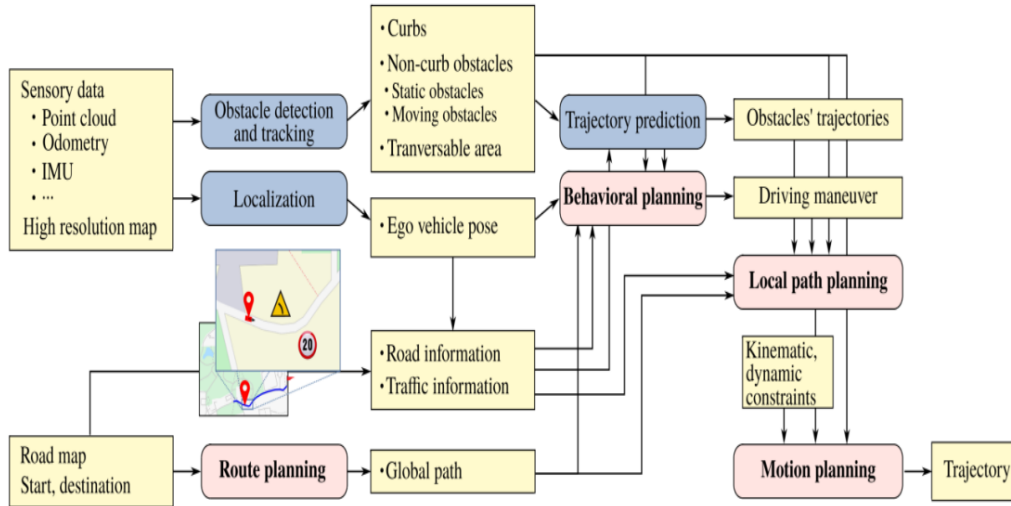
The software architecture of our autonomous vehicle is shown in Figure 3. It can be divided into two parts generally, These are data transfer on the vehicle and data transfer on the cloud. Map and timing servers are critical in the management of autonomous vehicles. The map server stores prebuilt maps and integrates them with sensor data [15]. The timing server performs task allocations, collects vehicle statuses and manages the access role. These integrations are vital for the safe and effective routing of vehicles [12]. Testing real world scenarios with simulations is a critical step in the development and improvement of autonomous vehicles [2]. Autonomous tools use artificial intelligence (AI) and complex software algorithms to process the information they perceive, understand environmental conditions, and make decisions.



**Figure 3.** Software architecture of our tool. The part shown in the yellow box is working on the vehicle, while the part shown in the blue box is working on the cloud [2].

### 3. PLANNING IN AUTONOMOUS VEHICLES

Planning to determine the movements of autonomous vehicles is a challenging process. Because traffic conditions are vague and dynamic, planners need to observe safety and traffic rules. Therefore, it is usually divided into four layers. These are given in Figure 4.



**Figure 4.** Schematic diagram of the planning of our autonomous vehicle [2].

#### a) Route Planning;

The route planner is used to determine a route when a road network is given. In structured environments, this planning process is usually done using open road maps. However, in places such as industrial parks or residential areas, vehicle routes are usually not registered in the road network. Also, some of the transition areas in these areas may be unstructured and not clearly defined [2].

#### b) Behavioral Planning;

Behavioral planning determines the manoeuvres of the vehicle and presents a general representation. It receives information from global maps and meets requirements in different environments. Information from traffic signs and other vehicles supports the decisions of the vehicle. This information enables the vehicle to understand its surroundings and move safely [2].

#### c) Local Road Planning;

Local road planning creates a geometric path from the start to the target position of the vehicle. This process is usually done in a limited range in real time as time complexity increases depending on the length of the path. Struggles to create collision free roads, taking into account the limitations of the car [2].

#### d) Motion Planning;

Motion planning allows the vehicle to determine an optimized trajectory with dynamic constraints. But the local planning process can be time consuming and require low updating. The motion planner optimizes the trajectory by considering information on obstacles. A higher update rate may be required for security [2].

## 4. AUTONOMOUS VEHICLE PILOT STUDIES

### 4.1. Autonomous Vehicle Hercules Study

Since the beginning of 2020, 2019 coronavirus disease (COVID 19) has spread rapidly around the world. To prevent transmission of the virus from person to person, a controllable approach is required by discontinuation of contact. To alleviate this situation, the idea of minimizing contact has emerged by using autonomous logistics tools. These types of vehicles reduce the risk of virus transmission with the need to contact drivers and customers. These demands have been a motivator for the development of the Hercules logistics autonomous vehicle. Within the scope of this study, tests in Table 1 were carried out in three different cities [2]. As a result of pilot studies, 9.6km of vegetable distribution in Zibo city, 1.2km of food in Suzhou city delivery and 1.6km of food delivery in Shenzhen city. With this work the future data to shed light on autonomous vehicle study have been obtained.

**Table 1.** Evaluation of the autonomous vehicle Hercules

Cities	Task	Distance (m)	Duration (min)	Load (kg)	Conditions
Zibo	Vegetable Delivery	9600	75	600	Light Traffic
Suzhou	Food Delivery	1200	30	80	Light Traffic
Shenzhen	Food Delivery	1600	20	64	Heavy Traffic

### 4.2. Logismile Study

Within the scope of the study, Pluto and Ona autonomous vehicles were tested in three different cities in different conditions. This study was conducted to examine different use cases and how autonomous vehicles can be integrated in different urban settings.

Pluto, is used to move high capacity packages from a warehouse to a specific service area, creating large scale economies. The long range and high travel speed of the autonomous vehicle (AV) make it possible to operate on metropolitan highways.

Ona, is responsible for making final deliveries to its recipients. Smaller capacity of about 1m<sup>3</sup> due to this vehicle, it is more flexible to busy city centers where access regulations can be for AV and it becomes appropriate. Unlike other current concepts, it includes different types of sensors for navigation multiple delivery tool [7].

#### **a) Pilot City in Germany : Hamburg**

Hamburg's goal is to quickly transition to a model city that focuses on making mobility safer, more efficient, more comfortable and climate neutral for everyone in and around the city centre. Thanks to its characteristics, Pluto is less dense and perfectly suited for rural areas. The Port Authority of Hamburg is used as a testing and development area of unmanned systems. The vehicle has successfully automated driving using proper planning algorithms to ensure the maneuverability required in a narrow driving environment. A total distance of more than 17 km has been covered, highlighting the use capabilities of Pluto in more complex scenarios [7].

#### **b) Pilot City in Spain : Esplugues**

The city divides municipal boundaries between a relatively flat region. This geographical distinction provides an advantage for testing autonomous robots within different urban settings. Part of the city is located within the Barcelona Low Emission Zone (LEZ), which may introduce some types of logistics vehicles in the future. City logistics focuses on reducing study costs, parking problems, emissions and traffic congestion, as well as providing more flexible and fast deliveries. The single lane 750 m track has been performed with a maximum speed of 30 km [7].

#### **c) Pilot City in Hungary : Debrecen**

The municipality of Debrecen aims to reduce vehicle traffic and promote sustainable transport. In particular, the focus is on the use of autonomous technologies such as Pluto and Ona to reduce the traffic of parcel service providers' vehicles. In the long term, it is aimed to remove traditional trucks from the city center. A 500 m test was carried out [7]. In the study phase, it was determined that deficiencies in the regulation of autonomous vehicles were a significant challenge. In particular, the issue of which transport category Ona will be classified creates uncertainty. This suggests that the decision making process is slow and complex.

### **4.3. Autonomous Truck Study**

South Korea is one of the countries with the highest level of preparation for autonomous vehicles and is autonomous significant research efforts are being made for trucks. Economic impact of autonomous trucks it has been studied and, in particular, the U. S. and the EU are expected to lack 800.000 drivers by 2030 years, which is it means labor costs will increase. Autonomous trucks, driver costs are significant it can reduce to a great extent, which accounts for about 40% of total costs. Using cost benefit analysis and scenario planning, the impact of

different types of autonomous trucks on operating costs and cost estimates of various scenarios has been investigated. The route is 57 km long with a speed limit of 90 km/h and includes intermittent and continuous flow intersections [9].

### Five Scenarios;

In the 1950's, Kahn pioneered the scenario planning approach. This work embraces scenario planning as a method of recreating the imagination of potential futures. The basic scenario focuses on the interpretation of the results, as it corresponds to the real world situation. Scenarios take place at a point where autonomous truck technology is widely available.

Some assumptions have been made for the analysis: it has been assumed that the connection between the cost components will remain stable, there will be no downtime in the transport or logistics processes, and the economic effects of autonomous trucks will be the same in different scenarios [9]. While the base case scenario is the expected optimum as shown in Table 2, the evaluation is made on the best and worst results.

**Table 2.** The overall change in the total operating cost caused by autonomous trucks

Variables	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
	The Most Pessimistic	Pessimistic	Main	Optimistic	The Most Optimistic
Vehicle Driver	-%100	-%100	-%100	-%100	-%100
Vehicle Acquisition	%25	%10	%5	-%10	-%25
Driver Insurance	-%100	-%100	-%100	-%100	-%100
Vehicle Insurance	%0	-%5	-%10	-%15	-%20
Vehicle Maintenance	%25	%10	%0	-%10	-%25
Fuel Consumption	-%10	-%15	%0	-%20	-%25

While driver cost is ignored in all scenarios, it has been acknowledged that autonomous trucks will require costs for new technologies. When making changes to the cost of vehicle acquisition, fuel consumption is assumed to decrease in all scenarios. While Autonomous Trucks will eliminate driver insurance and change maintenance costs, other expenditures are considered to remain constant [9]. The findings indicate that even if the process continues over the most pessimistic, autonomous trucks can contribute to cost reductions and economic productivity for logistics companies. A decrease of up to 47% in costs is foreseen.

#### 4.4. Autonomous Cargo Ship Study

Due to intense logistics competition, the recent rise in transport costs has led to a reduction in the number of crew members to ensure cost competitiveness, making it difficult for transport companies to manage. Also, the difficulty of the crew in providing poor working environment and sailors with professional capacity is so serious that 85% of the maritime accidents are due to man made disasters. Therefore, the demand for autonomous cruise and automatic control technology to operate the ship economically and safely is increasing [10]. The autonomous ship in Figure 5 is based on the periodically uncrewed ship (PUS), defined in the Norwegian autonomous ships forum.



**Figure 5.** Norwegian autonomous freighter [10].

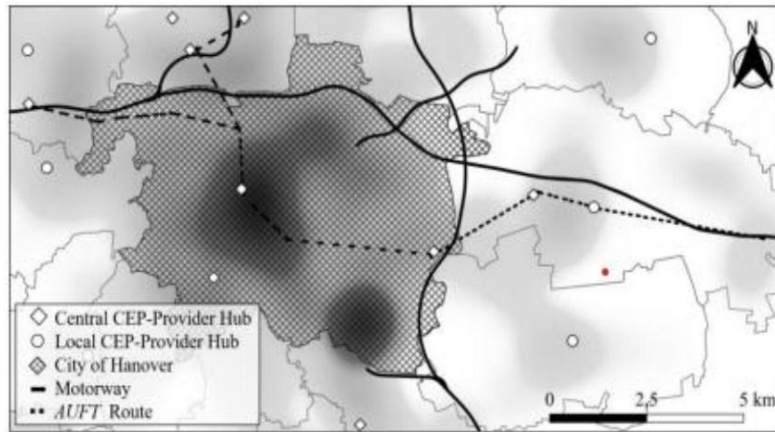
The methods of study and control of autonomous vessels can be broadly divided into three categories. The ship is located at the entrance and exit of the port by remote control with an operator. It travels autonomously through the entire process from the port exit to the next port. China has launched an unmanned freighter development association within CSIC and aims to establish technical standards under the leadership of CCS.

Japan is partnering with Smart Ship Application Platform equipment manufacturers, shipyards, shipping companies and ship classification organizations that it launched to set standards for information exchange between ships and coasts. In Europe, the creation of the concept of unmanned ships through automated maritime studies called Munin and the development of fully unmanned automated ships by 2035 are encouraged.

Rolls Royce encourages the development of a remote-controlled ship and an autonomous ship capable of navigating the ocean in 2035, while Yara Birkeland and Kongsberg are jointly promoting the commissioning of unmanned autonomous vessels aimed at replacing approximately 40,000 trucks per year in fertilizer transport on the Norwegian Coast [10].

#### 4.5. Autonomous Underground Vehicle Study

The rapid increase in the number of packages in urban areas and the delivery flights accordingly increased the importance of urban freight transport traffic. Agent based transport models have provided the opportunity to examine this increase in more detail. Automated underground freight transport systems can make the supply chain more efficient by reducing city traffic and road traffic. However, the effects of these systems on urban traffic flows have not yet been fully studied. This study analyzes the daily travel distances and kilometers of delivery traffic of a freight transport service through a simulation case study as shown in Figure 6 [4].

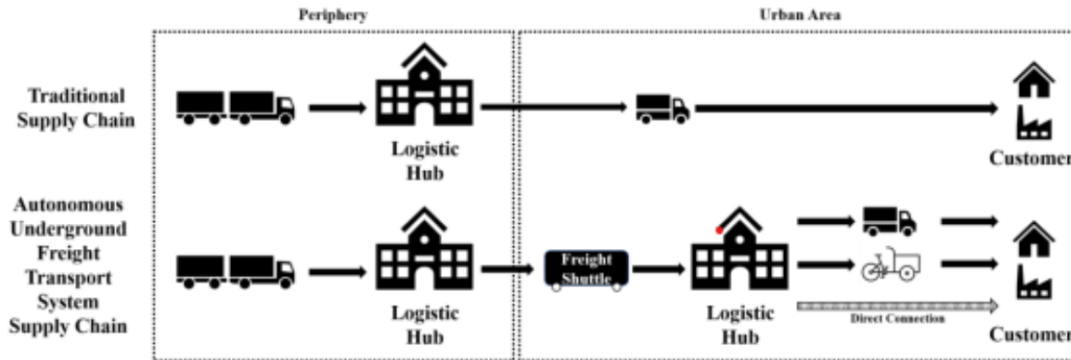


**Figure 6.** Planned Route of Autonomous Underground Cargo Handling (AUFT) System [4].

The Cargo Sous Terrain (CST) study from Switzerland has a modular, intermodal structure and uses autonomous vehicles as cores. CargoCap and Smart City Loop, one of the systems developed in Germany, also attract attention. Autonomous vehicles are independent, providing complete guidance in the tunnel system, separating the freight transport part from other traffic. Various loads are transported in tunnels using electric and autonomous vehicles. In centers located outside the city center, cargo is transferred from trucks to the underground system [4].

Autonomous vehicles contribute to the cargo handling service by carrying out cargo deliveries on time. The last mile carriers offer delivery requests to operators, and operators ensure that the cargo reaches the destination point in accordance with these requests. Industrial and retail studies are carried out directly with the freight forwarding service. Planned deliveries are arranged at specific time intervals, and last mile vehicles expect the cargo to reach the destination. Three separate simulation studies were performed for each scenario and average results were obtained. Simulations have demonstrated the advantages of autonomous logistics infrastructure in terms of traffic and operational planning compared to mixed traffic, as shown in Figure 7. Compared to passenger traffic, especially in the existing road infrastructure, it has been seen that the traffic density can be reduced with the autonomous logistics infrastructure

of Autonomous Logistics Infrastructure (OLA). However, it was determined that the impact on overall traffic was marginal and that a reduction of 1% to 5% in freight traffic volume was achieved.



**Figure 7.** Comparison between a traditional supply chain and an autonomous transport system supply chain [4].

Given that the loading and unloading studies are not included in the model, it can be considered that the actual impact of the saved trips may be higher than predicted. It has been estimated that operating costs may increase as the creation of new underground infrastructure will require significant investments. It has been calculated that the number of large vehicles used in OLA will not reduce operating costs, and may even reduce them by 0.5% to 1.2%. In the concept developed, it is stated that the use of relatively small capacity centers in the city center has small positive effects on traffic flow and volumes. However, it has been emphasized that whether these positive effects exceed high costs will be determined by economic studies. OLA is said to provide advantages in cooperation of different players in terms of environment and city life and increased use of cooperation with increasing efficiency. In future research studies, it is stated that the total architecture and processes of OLA will be discussed in more detail in the model [4].

#### 4.6. In Factory Autonomous Transport Vehicle Study

A North Portugal based automotive company that produces tires has focused on 3 action points in the study developed in line with the company's target on autonomous vehicles [1].

- Inspection of internal processes related to the transportation of products and semi products,
- To evaluate the different technologies available in the market for autonomous transport of goods,
- Evaluation of Autonomous vehicle application potential in one of the internal logistics areas of the company (pilot study),

The process began with the identification and examination of internal material flows. The starting and destination points, the tasks carried out for the characterization of the transport

system, the cargoes carried and other relevant data are defined, but not all logistics processes are suitable for autonomous vehicles. For this reason, it was determined which studies are most prone to and the following criteria for autonomous [1].

- There must be repetition and routine,
- Human error sensitive processes should be considered and safety improvements should be prioritized,
- Digital processes should be processed,
- Processes with high volume and high priorities should be taken into account,

After the evaluation, the warehouse, which is selected as the most suitable for the criteria, was selected as a case study and pilot study to prove the concept of autonomous transportation. A case study was conducted on the use of autonomous vehicles instead of forklifts used manually for transporting products. This study includes issues such as estimating the required number of autonomous vehicles, restructuring new logistics flows and layout plan. It is also necessary to identify the pre requisites for assessing the potential of autonomous vehicle suppliers flows [1].

- **Process** : Whether the process will lose its validity in the future. How long the investment can remain valid.
- **Infrastructure** : Based according to this system of the factory and the personnel.
- **Finance** : Autonomous vehicles require high initial investments, so the availability of this investment must be assessed.

Management of logistics flows directly affects the performance of the overall system. In the second step, it is aimed to select collection and delivery locations, which aims to reduce the distance traveled. However, due to the distance of the delivery location, the delivery point needs to be reevaluated. The delivery location is located about 83 m from the Workstation.

It has been noticed that autonomous vehicles move more slowly and generate traffic due to the failure of security systems to capture the process speed. In this case, the proposed solution is to create a different location for autonomous vehicles to distribute loads and to ensure smooth running of logistics flows by separating their routes from forklift routes. Thanks to the proposed new logistics flow for autonomous vehicles, the, autonomous vehicles will only travel 83 m instead of a distance of 16 m [1].

As shown in Figure 8, The number of autonomous vehicles was limited to 8 because more than that would disrupt proper functioning. It creates bottlenecks in the functioning of the system. The simulation allowed to determine that it would be impossible to drive only 1 vehicle due to the system efficiency. During the period of the study, it can be expected that at least 8 movements can be guaranteed in 216 hours of production. The number of 3, 5 and 8 autonomous vehicles has met the required efficiency and provided more movement than expected.



Scenario		Replications		Controls	Responses						
<input checked="" type="checkbox"/>	Name	Status	Required	Completed	NoAGVs	AGVs_UtilRate	C_Output	D_Output	E_output	F_Output	Total_Pallets_Moved
<input checked="" type="checkbox"/>	Scenario1	Idle	10	10 of 10	1	99,0678	33	33	31	29	126
<input checked="" type="checkbox"/>	Scenario2	Idle	10	10 of 10	3	88,0757	75	70	56	46	247
<input checked="" type="checkbox"/>	Scenario3	Idle	10	10 of 10	5	78,185	78	71	56	44	249
<input checked="" type="checkbox"/>	Scenario4	Idle	10	10 of 10	8	67,7711	81	72	56	44	253

**Figure 8.** Results obtained by simulating the autonomous vehicle system using Simio software for a period of 8 hours [1]. (NoAGVs: Number of vehicles, AGVs\_UtilRate: System utilization rate, C/D/E/F Output: Number of pallets carried, Total\_Pallets\_Moved: Total number of pallets carried)

However, the higher the number of autonomous vehicles, the higher the investment, and the less interesting the study is. So when we look at the usage rate, it seems that 3 autonomous vehicle scenarios 2 will be enough to perform the task [1]. As a result, this study identifies and synthesizes relevant literature on autonomous vehicles, providing an example from the real world.

## 5. MATERIAL AND METHOD

### 5.1. Electric Autonomous Bus Study

Today, more than one billion conventional vehicles have met the need for mobility and continue to be an important research topic due to their environmental impacts and the loss of life and property in traffic accidents. In this context, autonomous vehicles have emerged as an important innovation. Autonomous vehicles operate using sensors that can detect light and distance, high-frequency vibrations, and map their surroundings. These sensors provide the sensory input the vehicle needs and enable the data to be converted into a specific route through software applications. In this way, the vehicle's acceleration and braking systems are activated, allowing the autonomous vehicle to follow the desired route. Artificial intelligence algorithms have made it possible to perceive the environment and take action by making appropriate choices for various situations.

In the abstract of this work, the Güteryüz R&D Center aimed to produce 8.5 m electric autonomous buses, as seen in Figure 9. At this level, the system could manage emergencies independently, but could also request drivers to take over when necessary. Passengers could check their phones or watch a movie, knowing that the system could handle emergencies.



**Figure 9.** 28 feet (8.5 m) Electric autonomous bus

## **5.2. Identification of Requirements**

Autonomous vehicles are continuously improving in line with evolving technology and user needs. Autonomous driving is defined by five levels, with Level 4 vehicles providing high automation by determining their operational position. Equipped with features such as automatic lane changing, these vehicles ensure continuous driving even when the driver's eyes are closed. The potential benefits of autonomous vehicles include lower costs, increased safety, enhanced mobility, and higher customer satisfaction. Additionally, a reduction in traffic accidents and, consequently, lower insurance costs are expected. These vehicles are also anticipated to improve traffic flow and provide greater mobility for children, the elderly, and people with disabilities. However, challenges arise when artificial intelligence encounters complex scenarios, such as maintaining eye contact with drivers or dealing with suddenly appearing objects. Furthermore, there is a risk that sensors may fail to gather information in adverse weather conditions. Therefore, the development of sensors capable of adapting to harsh conditions is considered crucial for the future of autonomous vehicles.

## **5.3. Scope of Work Tasks and Actions**

### **a) Integration of Electric Components and Transfer Bodies;**

The parameter values of the electrical and mechanical components to be used in the vehicle were analyzed and the electric motor selection and integration were carried out. The powertrain was integrated with an axle suitable for the electric vehicle. The drive system

consisted of a combination of an electric motor, shaft and differential, and in this context, the connections between the electrical components were established.

#### **b) Energy Storage System;**

The electric autonomous vehicle management system and control unit worked in an integrated manner with the battery energy storage system. The energy consumption values of the existing internal combustion engine buses were analyzed, and energy consumption was measured along the vehicle route. In this context, 1 km of energy required 1.036 kWh therefore, a suitable storage system was designed. Battery capacity, vehicle weight, and range were determined by considering the requirements, and battery packaging design was realized in cooperation with battery manufacturers. Additionally, energy wiring design was created through current calculations, and the battery management system was communicated with the vehicle management system via CanBus protocols. The battery cooling system was designed using air conditioning R134A gas to cool the battery. The optimum position of the cooling system was determined to achieve maximum and long-term performance from the battery.

#### **c) Electric Vehicle Systems and Integration;**

The regenerative braking system is integrated with the hydraulic brake mechanism. In this system, the electric motor acts as both a motor and a generator, charging the batteries. When the pedal is released, the motor can switch to generator mode during the vehicle's deceleration and charge the batteries. An inverter system that can perform DC/AC and DC/DC conversion is needed to use the engine and other electrical systems in the vehicle. While electric motors provide an additional advantage by recovering energy during stopping, this requires an additional power pack to operate the hydraulic, pneumatic and air conditioning systems in the vehicle. For this reason, the integration of the vehicle's auxiliary systems has been carefully planned.

#### **d) Integrating the Systems Needed for Autonomous Driving;**

The Lidar system enables the vehicle to detect the distance of objects or surfaces in front of it using laser pulses. In this context, Lidar connections were established and detection accuracy was evaluated. The camera system is equipped with interior and exterior cameras to support the vehicle's surroundings and this system is integrated into the vehicle's CanBus system. The radar system, positioned at the front, rear, and sides of the vehicle, supports the Lidar system and contributes to the perception of environmental effects, as shown in Figure 10. Directional perception and vision screens were positioned and necessary integrations were made to display all detection and guidance systems integrated into the vehicle. With Drive by Wire integration, the electric motor was integrated into the steering box and the functions of the engine were determined. This system facilitated the vehicle's direction in sudden maneuvers. All these systems were evaluated in terms of in-vehicle wiring and positioning and the most applicable solutions were determined.



**Figure 10.** Integration of Lidar and Camera verse into vehicle superstructure (Camera at the top, Lidar at the bottom)

#### e) Electric Autonomous Vehicle Management System and Control Unit;

Data transfer between components enables instant communication and interactive operation of infrastructure elements such as engine, battery and vehicle management system via information communication technologies (CanBus). The driver's dashboard is programmed by determining Can addresses according to the functions of the electric vehicle and autonomous driving. The vehicle control unit is responsible for engine management and necessary controls. This unit constantly monitors the operating conditions of the engine, calculates the instantaneous battery status, performs its controls with the data it receives from the sensors and determines the parameters in the vehicle. The calculated data (vehicle speed, engine speed, battery status, etc.) is transferred to the multiplex system and reflected on the driver's dashboard. Using the data from the Lidar and radar systems integrated for autonomous driving, the system is programmed to decide which movements to make. The vehicle produced as a study output was tested on a specified route at the University of Buffalo campus in the USA and further developed throughout the process. The company aims to increase its exports by 10% in the American market and 15% in the European market with the purchase of this vehicle type. As a result of the study, it was planned to produce 8.5 m electric autonomous city buses that can compete at an international level.

## 6. FINDINGS AND DISCUSSION

### 6.1. Autonomous Driving Solution

In recent years, autonomous driving technologies have been extensively researched. However, conditions in irregular traffic environments are more challenging. In these environments, there are often various traffic participants, such as pedestrians, bicycles and cars, and these participants may not necessarily follow traffic rules. Due to the size of the urban population in China, urban residents often live in apartments. This means that the population density around apartment complexes is high. Autonomous vehicles such as those in Figure 12 may encounter

complex interactive objects such as automatic barrier gates, pedestrian crossings, bicycle riders in apartment environments [3].



**Figure 12.** Typical scenario reflecting the complexity of moving vehicles [3].

Figure 13 has various traffic participants such as bicycles, electric bikes, motorcycles on urban roads. Each has its own kinematic characteristics. Some drivers may use their vehicles in unusual, unsafe or illegal ways.



*a.*

*b.*

**Figure 13.** Typical scenarios reflecting the complexity of moving vehicles [3].

**a.** Crowd and irregular transportation   **b.** Dangerous and unsafe transport

Traffic congestion in cities such as Figure 14 has become inevitable with increased motor vehicle ownership. Autonomous driving technologies can solve this problem by focusing on complex traffic conditions [16]. However, existing solutions need to adapt to these challenging conditions. The safety of autonomous vehicles is a top priority in the

development and maintenance process, and specific safety standards for delivery vehicles must be set. Alternative solutions must be found without hindering traffic flow [3].



**Figure 14.** Typical traffic scenario reflecting the complexity of moving vehicles [3].

## 6.2. Challenges Local Governments Will Face in the Implementation Phase

Although smart transportation will take a big place in future urban transportation in Türkiye with its developing technology and information communication infrastructure, the applicability context needs to be handled carefully [13]. In an order where globalization and international competition are at the forefront, there are challenges that local governments will face in the implementation phase in the field of multimodal transportation that will be reconsidered with the smart mobility approach. To explain these challenges briefly [6].

- Legal and administrative deficiencies; in the field of smart transportation, the legal framework in Türkiye, especially in the field of autonomous vehicles, individual mobility and applicability in terms of legislation, insufficient institutional and individual awareness, moreover, the absence of a commonly defined terminology,
- Application problems; inadequacy in domestic production in software and hardware, lack of short term and long term planning, integration problems of smart vehicles and smart transportation infrastructure, etc,
- Problems of governance; lack of coordination between university industry institutions and organizations, absence of a common intelligent transportation system,
- Maintenance problems; due to high costs, the problem of acquiring maintenance repair and new products, dependent on the outside on technology,

- Lack of qualified human resources; lack of specialized personnel in institutions and insufficient R&D studies, as an example.

The question of which category of transport to classify autonomous vehicles creates uncertainty. This suggests that the decision making process is slow and complex. Current EU rules may be a starting point for different countries, but they may take time to adapt [7].

## 7. CONCLUSION

The combination of autonomous vehicles and intelligent transportation systems leads to fundamental changes in the transportation sector. Autonomous vehicles combine with advanced technology in intelligent transportation systems, allowing logistics activities between cities and countries to be carried out in a fully autonomous way. However, various challenges are being faced for the dissemination and successful application of these technologies. In this direction, what we should do and what should be taken are explained with 10 important steps.

- The future of transportation and the potential of autonomous vehicles and intelligent transportation systems are leading to fundamental changes in the transportation sector. These technologies offer significant opportunities in areas such as traffic management, safety and transportation efficiency. In order to fully realize the potential in this field, more investments must be made and advanced technological research should be supported. Integration of autonomous vehicles and smart systems can reduce traffic accidents, ease traffic congestion and improve transportation efficiency. However, further development is needed technologically and infrastructure to fully realize this potential.
- Data security and privacy, together with the use of autonomous vehicles, is the subject of the production and processing of large amounts of data. The security and confidentiality of this data is an important issue. Strong data protection policies need to be established. In addition, effective measures must be taken against data breaches and cyber attacks. However, in order to ensure the protection and confidentiality of users' personal data, legal regulations need to be updated and appropriate security measures should be taken. In this way, by reducing the concerns of autonomous vehicles about data security, users can be assured to trust this technology.
- The possibilities in the logistics sector can provide great benefits in the logistics industry with autonomous vehicles. This technology can shorten delivery times, reduce costs and allow deliveries to be carried out more efficiently and reliably. However, in order to fully evaluate this potential, necessary research and studies in the sector are required. These studies will guide the industry by determining how autonomous vehicles can be most effectively used in logistics processes.

- Its role in e-commerce, especially in the field of e-commerce, autonomous vehicles can play an important role in delivery services. However, more R&D work needs to be done in order for this technology to become widespread and to be used effectively. With these studies, the potential of autonomous vehicles in the e-commerce sector can be evaluated more effectively and delivery processes can be made faster, safer and more efficient.
- Future goals and responsibilities should focus on technological innovation and cooperation for a safer, more efficient and more sustainable future in the transportation sector. In order to achieve these goals with the decisions to be taken at both individual and institutional level, regular communication and cooperation between sector stakeholders must be ensured. In addition, research and development activities should be supported and incentives should be created for innovative solutions. In this way, more solid and sustainable steps can be taken towards the future of the sector.
- Reinforcement of legal infrastructure should include clear and consistent regulations on the use of autonomous vehicles, classification, driverless cruise permit and responsibilities. The creation and strengthening of these regulations are critical to the proliferation of technology. In this context, it is necessary to establish a clear and consistent framework by regulatory bodies and to strengthen the infrastructure, because the challenges faced with technological advances can only be overcome in this way.
- Considering environmental impacts, along with the proliferation of autonomous vehicles, it is important that environmental impacts are not ignored. The impact of these technologies on environmental sustainability needs to be assessed and minimized. In this context, various studies should be carried out to promote green transportation strategies. These include measures such as increasing the use of electric and hybrid vehicles, ensuring energy efficiency and reducing the carbon footprint. In this way, the environmental impact of autonomous vehicles can be minimized and a sustainable transportation system can be contributed.
- With the proliferation of education and awareness, autonomous vehicle technology, education and awareness are of great importance for the society to adapt to this technology in a proper way. In this context, accurate and safe use of technology should be encouraged through information and training programs for drivers and other road users. In this way, the potential benefits of autonomous vehicles can be realized more effectively and their acceptance in society can be increased.
- Setting safety standards, setting and implementing international standards for the safety of autonomous vehicles are extremely critical. It is necessary to support the necessary work to ensure the hardware and software security of these tools. Further research on the safety and reliability of autonomous vehicles is also important, as this research will lay the foundation for increasing the safety standards of the technology.
- It is important that society accepts and embraces this technology, along with the adoption of social acceptance and ethical issues, and the spread of autonomous

vehicles. For this reason, taking into account the ethical and social dimensions of autonomous vehicles, it is necessary to ensure social acceptance and address ethical issues. In this direction, communication and education should be carried out with the public.

- Public should be given clear and transparent information about the benefits and potential risks of autonomous vehicles, and awareness-raising activities should be organized on ethical standards and safety measures. In this way, the society can approach autonomous vehicle technology from a more positive perspective and use this technology with confidence.

As a result, autonomous vehicles and intelligent transportation systems are initiating a significant transformation in the transportation sector. However, in order for this transformation to be successful, many factors must be taken into account in terms of technological, regulatory, social and security. The steps in this direction can lead to significant progress towards a safer, more efficient and sustainable transportation future.

## **ACKNOWLEDGMENT**

This study includes research and development activities carried out within the scope of the 28FT electric autonomous bus R&D project supported by the Güteryüz Bus Factory. We thank them for the support provided by the R&D department in which the project is carried out.

## **CONFLICT OF INTEREST STATEMENT**

The authors acknowledge that there is no known conflict of interest or common interest with any institution/organization or person.

## **RESEARCHERS CONTRIBUTION RATE STATEMENT**

In determining conceptual processes, data collection, data analysis and drafting of articles, Çınar Akın AK, in the critical examination of intellectual content, Koray ALTUN, management of conceptual processes, and, Hasan ŞAHİN contributed to the final approval and full responsibility.

## **REFERENCES**

1. Costa, Ana Francisca, et al. "Strategy for the introduction of autonomous driving technologies: a case study in the logistics area of an automotive company." *Procedia Computer Science* 204, 337-345, 2022.
2. Liu, Tianyu, et al. "The role of the hercules autonomous vehicle during the covid-19 pandemic: An autonomous logistic vehicle for contactless goods transportation." *IEEE Robotics & Automation Magazine* 28(1), 48-58, 2021.
3. Li, Bai, et al. "Autonomous last-mile delivery vehicles in complex traffic environments." *Computer* 53(11), 26-35, 2020.

4. Bienzeisler, Lasse, Torben Lelke, and Bernhard Friedrich. "Autonomous Underground Freight Transport Systems--The Future of Urban Logistics?." arXiv preprint arXiv:2403.08841, 2024.
5. Akkaya, Sinem, and Harun Özbay. "Otonom araçların akıllı ulaşım politikaları üzerindeki etkileri." Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi 5(2), 200-210, 2022.
6. Önder, Hatice, and Mustafa Ulukavak. "Yerel yönetimler için çok modlu taşımacılıkta akıllı hareketlilik önerileri." Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi 2(2), 83-89, 2020.
7. Lemardelé, Clément ve diğerleri. "LogiSmile Projesi - Avrupa şehirlerinde Son Mil Lojistiği için Otonom Araçların Pilot Uygulaması." Ulaştırma Araştırmaları Bildirileri 71, 180-187, 2023.
8. Tektaş, Necla, and Mehmet Tektaş. "Dünyada akıllı ulaşım sistemlerinin gelecek hedefleri Japonya örneğinin incelenmesi." Paradoks Ekonomi Sosyoloji ve Politika Dergisi 15(2), 189-210, 2019.
9. Lee, Sangwan, et al. "Cost-Effectiveness of Introducing Autonomous Trucks: From the Perspective of the Total Cost of Operation in Logistics." Applied Sciences 13(18), 10467, 2023.
10. Im, Illkyun, Dongryeol Shin ve Jongpil Jeong. "Akıllı bilgi teknolojisine dayalı akıllı otonom gemi mimarisi için bileşenler." Procedia bilgisayar bilimi 134, 91-98, 2018.
11. Işlayem, Ruba, et al. "Hardware Accelerators for Autonomous Cars: A Review." arXiv preprint arXiv:2405.00062, 2024.
12. TAŞTAN, Yahya, and Habib Kaymaz. "Otonom Araçların Yaygınlaş-masının Önündeki Zorluklar." International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences 33(2), 2021.
13. Yiğit, Erkut, Ahmet Erdem Oner, and Orçun Yöntem. "Otonom Araçların Otomotiv Sektörüne Etkileri ve Beraberinde Getirdiği Yenilikler." Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 181-186, 2020.
14. Aslan, Haydar. "Otonom Araçlar ve Hukuki Sorumluluk." Legal Hukuk Dergisi 17(204), 2019.
15. Özarpa, Cevat, İsa Avcı, and Seyit Ali Kara. "Otonom araçlar için Siber güvenlik risklerinin Araştırılması ve Savunma Metotları." Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 31, 242-255, 2021.
16. Gürsoy, Oğuzhan. "Kamu Yönetimi Perspektifinden Otonom Araç Teknolojisi." Anadolu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 24(2), 364-386, 2023.



## AKILLI ŞEHİR YÖNETİMİ KRİTERLERİNİN ANP YÖNTEMİ İLE AĞIRLIKLANDIRILMASI

**Sude KAYA<sup>1,a,\*</sup>, Yavuz Baran KALEMLER<sup>1,b</sup>, İrem GAFEROĞLU<sup>1,c</sup>, Emel GÜVEN<sup>1,d</sup>**

<sup>1</sup>Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye.

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye.

<sup>3</sup>Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye.

<sup>4</sup>Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye.

<sup>a</sup>sudekayaa12@gmail.com, ORCID: [0009-0001-7944-8048](https://orcid.org/0009-0001-7944-8048)

<sup>b</sup>baran.kalemler45@gmail.com, ORCID: [0009-0005-1483-9004](https://orcid.org/0009-0005-1483-9004)

<sup>c</sup>iremgaferoglu@gmail.com, ORCID: [0009-0006-6363-6657](https://orcid.org/0009-0006-6363-6657)

<sup>d</sup>emel-gvn@hotmail.com, ORCID: [0000-0001-6106-9720](https://orcid.org/0000-0001-6106-9720)

**(Geliş/Received: 23.12.2024; Kabul/Accepted: 02.07.2025)**

### ÖZET

Akıllı şehirler, teknoloji kullanılarak oluşturulmuş öğelerle insanların yaşam kalitelerini artırıp sürdürülebilir yerleşim alanları oluşturmaktadır. Akıllı şehir yönetimi, ilgili hizmet alanlarında verimli ve sürdürülebilir çalışmalarla ilerleyebilmek için kamusal, özel ve sivil paydaşların ortaklaşmasını ifade etmektedir. Yönetişim, strateji, politika yönetimi, iş yönetimi ve bütüncül hizmet yönetimi gibi alt sistemlerin verimlerini artırıp şehrin ana sisteminde sürdürülebilirlik hedeflenmektedir. Problemin çok kriterli yapısı göz önünde bulundurularak önerilen modelde Analitik Ağ Süreci (ANP) yöntemi, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden biri olarak kullanılmıştır. Literatürde yapılan akıllı şehir yönetimi kriterlerinin değerlendirilmesi kapsamındaki sınırlı sayıda bulunan çalışmaları desteklemesi hedeflenmektedir. Ayrıca bu çalışma önerilen modelde kullanılan yöntem açısından probleme ve literatüre önemli bir katkı sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler: Akıllı Şehirler, ANP, Super Decisions, Akıllı Şehir Yönetimi, ÇKKV**

**WEIGHTING SMART CITY MANAGEMENT CRITERIA WITH ANP METHOD**

### ABSTRACT

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

Atf (Citation): S. Kaya, Y.B. Kalemler, İ. Gaferoğlu, E. Güven  
"Akıllı Şehir Yönetimi Kriterlerinin ANP Yöntemi ile Ağırlıklandırılması",  
Akıllı Sistemler Dergisi, 4(1): 25-41, 2025.

Geliş (Received): 23/12/2024

Kabul (Accepted): 02/07/2025

Yayın (Published): 05/07/2025

Smart cities aim to enhance quality of life and create sustainable urban environments through the integration of technology-based components. Smart city governance refers to the collaboration of public, private, and civil stakeholders to ensure efficient and sustainable practices across relevant service domains. Enhancing the efficiency of subsystems such as governance, strategy, policy management, business management, and integrated service delivery is crucial for achieving sustainability in the city's overall system. Considering the multi-criteria nature of the problem, the Analytic Network Process (ANP), one of the Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods, was employed in the proposed model. The number of studies in the literature that evaluate the prioritization of smart city management criteria remains limited. Therefore, this study is expected to serve as a reference for future research. Moreover, the proposed model contributes significantly to both the problem and the academic literature through the method it utilizes.

**Keywords:** Smart Cities, ANP, Super Decisions, Smart City Governance, MCDM

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Őehirlerdeki, ulaşım, sağlık, enerji, altyapı gibi belirtilen sorunlara çözüm aramak adına akıllı Şehir kavramı ortaya çıkmıştır. Bu kavramla beraber kaynakların optimum Şekilde kullanılması sonucunda verimlilik amaçlanmaktadır. Akıllı Şehir yaklaşımı, teknoloji sayesinde Şehirdeki problemlere çözüm bulmak amacıyla ortaya çıkmıŐ ve gelişme göstermiştir [22]. Akıllı Şehirler enerji, su ve gıda hizmeti, eğitim ve sağlık konularıyla ilgilenmektedir. Kaliteli bir yaşamın vazgeçilmezleri olarak ön plana çıkan enerji, su ve gıda hizmetleri, eğitim ve sağlık konuları; akıllı Şehirler kavramının başlıca temalarını oluşturmaktadır. Birçok konu ile bilgi iletişim teknolojileri birleŐtirilerek yaşamı kolaylaŐtırmaktadır. İleriki yıllarda da ihtiyaçların aktif halde karşılanması için Şehirlerin akıllı Şehir durumunda olması gerekmektedir [23]. Bu sebeple gelecekte ihtiyaç duyulanların karşılanabilmesi için Şehirlerin akıllı Şehir olabilmeleri önem arz etmektedir. Akıllı Şehirler alanında, Şehirler genelinde güçlü ve sürdürülebilir liderliği sağlamak: için paydaşlar arasındaki iş birliğini güçlendiren; etkili yönetim düzenlemeleri ve uygulamalar hayata geçirilmektedir [3].

Akıllı Şehir yönetimi kavramı, bilgi ve iletişim teknolojilerinin (BİT) Şehir hizmetlerine entegre edilmesiyle Şehirlerde yaşam kalitesini artırmayı hedeflemektedir. Dünya genelinde

yapılan yatırımlar da bu yönelimi doğrulamaktadır. Statista tarafından yayımlanan bir rapora göre 2024 yılı itibarıyla küresel akıllı şehir harcamalarının 124 milyar ABD dolarını aşması öngörülmektedir [18]. Bu bağlamda, akıllı şehir yönetiminde hangi kriterlerin öncelikli olduğu sorusu; hem yerel yönetimler hem de politika geliştiriciler için stratejik bir karar alanı haline gelmiştir. Bu çalışmada kullanılan Analitik Ağ Süreci (ANP) yöntemi ile kriterlerin bütüncül bir yaklaşımla ağırlıklandırılması, bu karar süreçlerine katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Akıllı şehir yönetiminin 5 ana kriteri bulunmaktadır. Bu kriterler; yönetim, strateji yönetimi, politika yönetimi, bütüncül hizmet yönetimi ve iş yönetimidir [9]. Kriterler Şekil 1’de gösterilmiştir.

Şekil 1: Akıllı Şehir Yönetimi Kriterleri



- Yönetişim; şehir genelinde liderliği güçlü, aktif ve sürdürülebilir olması ile gerçekçi çözümlerin bulunması hedefiyle gerçekleştirilen yönetime dair faaliyetlerdir. Yönetişim mekanizması, organizasyon yönetimi, paydaşlar arası eşgüdüm ve koordinasyon, sürdürülebilirlik alt kriterlerinden oluşmaktadır.
- Strateji Yönetimi; akıllı şehir planlarını yenilenip geliştirilerek şehrin yol haritalarına dönüştürülmesi ve uygulamaların bu şekilde yürürlüğe girmesine yönelik faaliyetlerdir. Strateji planlama, olgunluk değerlendirme, izleme, değerlendirme ve değişim, yol haritası oluşturma ve hayata geçirme alt kriterlerinden oluşmaktadır.
- Politika Yönetimi; akıllı şehir yönetimi ve uygulamalarına yol gösteren ilkeleri içeren yöntemlerin uygulanması faaliyetlerine denmektedir. Kimlik ve

mahremiyet yönetimi, yatırım ve finans yönetimi, bilgi güvenliği yönetimi alt kriterlerinden oluşmaktadır.

- Bütüncül Hizmet Yönetimi; akıllı Şehir yöntemlerinin Şehircilik hizmetleriyle bütüncül olarak aralarındaki etkileşimin kapsayıcı yollarla sunumu ve uygunluğunun artırılması olarak tanımlanmaktadır. Hizmet yönetimi ve dijital kapsayıcılık ve kanal yönetimi alt kriterlerinden oluşmaktadır.

- İş Yönetimi; akıllı Şehir yöntemlerinin uygulandığı Şehircilik hizmetlerinin yapılması için hizmet ve teknoloji bağıntısındaki iş katmanının yönetimine dair faaliyetlerdir[8]. Açıklanan her bir ana kriterin birden fazla alt kriteri vardır. Çözüm geliştirme, tedarik yönetimi, proje yönetimi, eğitim ve rehberlik, akıllı Şehir mimari yönetimi, veri sahipliği paylaşımı ile çalışılabilirlik, veri, güvence ve denetim ve süreç ve hizmetleri açık hale getirme alt kriterlerinden oluşmaktadır.

Bu çalışmada, akıllı Şehir yönetimi kriterlerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışma çözümünde ÇKKV yöntemi ANP kullanılmıştır. ANP yöntemi Super Decisions programı ile çözüme ulaştırılmıştır.

## 2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE REVIEW)

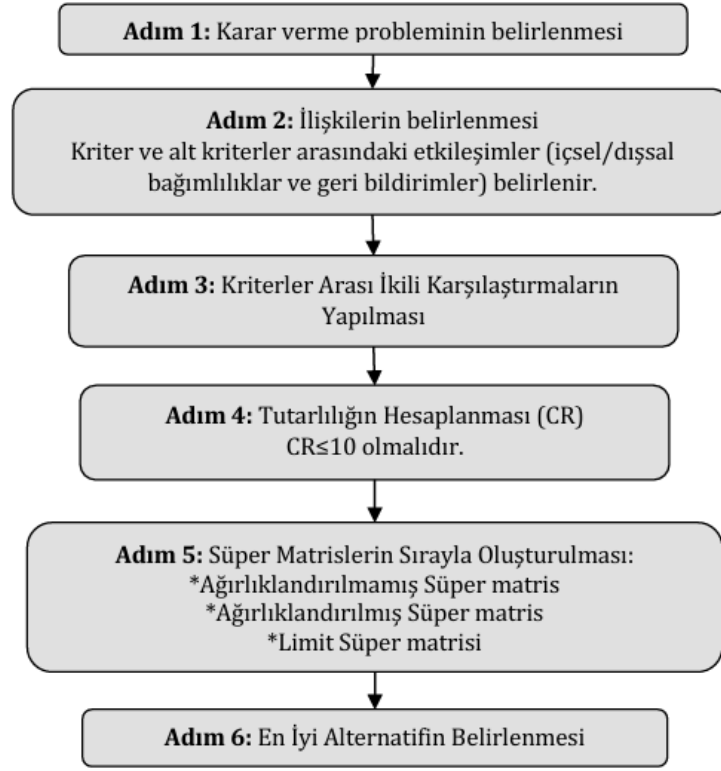
Akıllı Şehir yönetimi ve akıllı Şehir uygulamaları konusunda birçok literatür araştırması mevcuttur. Demirhan [6], çalışmasında akıllı Şehir bağlamında yerel yönetimlerin bir parçası olarak belediyelerin akıllı yönetim rolüne odaklanan görev ve sorumluluklarını ortaya koymayı amaçlamıştır. Akıllı Şehirlerin alt kriteri olan akıllı yönetişimin içindeki yerel yönetimin rolünden bahsetmiştir. Tunç vd. [2], çalışmalarında akıllı Őehirlerden ve yerel yönetimdeki kullanımını anlatmışlardır. Afet riskini azaltma konusunda birkaç örnek akıllı Şehir uygulamalarına yer vermişlerdir. Yerel yönetimlerde buna benzer konuların geliştirilebilmesi için faydalı bir uygulama olmuştur. Kocalar [10], çalışmasında akıllı Şehirlerin lojistik kısmında yer alan trafik/yol, kargo/araç durumunu Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) etkileşimini ön plana alan teknolojileri araştırıp; trafik/yol, kargo/araç, izleme/planlama ile bunun gibi diğer akıllı çözümlerdeki ilerleme ve gelişmeleri ilişkilendirip bütünsel bir bakış

açısıyla değerlendirmiştir. Afet durumunda insani yardım lojistiğinin zorluklarına değinmiştir. Çalışmasında önerdiği AUS çerçevesi, bütün izleme ve planlama sistemlerini desteklemektedir. Bu sayede ağ gecikmesi sorunu ihmal edilebilecek Şekilde Endüstri 5.0 ile artık sorun olmaktan çıkacağı belirtilmektedir. Bozkurt [5], çalışmasında e-belediyeçilik kapsamında akıllı Şehirlerde dijital yönetişim uygulamaları hakkında inceleme yapmıştır. Belediyeler akıllı Şehir olmak için günümüzde çok çaba sarf etmektedir. Çalışmada akıllı yönetişim bakış açısıyla e-belediyeçilik uygulamalarının değerlendirilmesi gibi önemli bir konu ele alınmıştır. Eren vd. [24], çalışmalarında Ankara ilindeki 7 ilçeyi akıllı Şehir kapsamında değerlendirmiştir. Deđerlendirmede ÇKKV yöntemlerinden olan ANP ve PROMETHEE kullanmışlardır. Bu çalışma seçilen 7 ilçenin akıllı Şehir uygulamaları açısından sıralanmasını amaçlamıştır. Sonuç olarak Çankaya ilçesi, akıllı Şehir uygulamaları kapsamında en gelişmiş Şehir olduğu bulunmuştur. Sancino vd. [17], çalışmalarında, akıllı Şehirlerin yönetişimi üzerine mevcut akademik çalışmaları analiz ederek, bu alandaki temel temaları ve yaklaşımları ortaya koymaktadır. Makalede akıllı Şehir yönetişiminin sadece teknolojik altyapılarla değil; aynı zamanda yönetişim modelleri, vatandaş katılımı ve kamu-özel sektör iş birlikleriyle Őekillendiđi vurgulanmaktadır. Çalışma, farklı yönetişim modellerinin etkinliğini değerlendirerek, akıllı Şehirlerin başarılı bir Şekilde yönetilmesi için gerekli olan stratejik yaklaşımları tartışmaktadır. Ően [20], çalışmasında dünyada ve ülkemizde gelişen dijitalleşme sürecinin neyi ifade ettiğini ve beraberinde gelen sonuçları, bu sonuçlar uygulandığında nasıl avantaj veya dezavantaj getireceğini ortaya koyup, akıllı Şehir uygulamalarına karşı eleştirel bir bakış açısı sunmuştur. Bu eleştirel bakış açısı gelecek makalelere örnek olmuştur. Kocaman [11], çalışmasında akademide yer alan çalışmaların “akıllı” tanımlarını incelemiş ve belirlenen kriterleri özetleyerek, uygun ve genel bir tanım içerisinde ifade edilmesini amaçlamıştır. Ayrıca, özgün kriterler ile hazırladığı ankette kriterlerin birbiri arasındaki ilişkisini kıyaslayarak tanımları oluşturmuş ve akıllı olmasını sağlayan özellikleri belirlemiştir. Üneş ve Közkürt [23] çalışmalarında, üniversite yerleşkelerin dağınık bir yapıya sahip olduğundan bahsetmiş ve bilimsel, teknolojik gelişime katkısı bağlamında, Şehirler arası uygunluğu sağlayacak akıllı ulaşım teknolojilerini anlatarak veya öneride bulunarak gelecekteki akıllı ulaşım sistemlerinin planlamasına ve teknolojik uygulamalara fayda oluşturmayı amaçlamışlardır. Meijer ve Bolívar [11] çalışmalarında, akıllı Şehirlerin yönetimi üzerine yapılan literatürü sistematik bir Şekilde

inceleyerek, farklı yaklaşımlar arasındaki çeşitliliği ortaya koymaktadır. Analiz edilen 51 yayının, akıllı Őehirleri tanımlarken "akıllı teknoloji", "akıllı insanlar" veya "akıllı iş birliği" gibi farklı unsurlara odaklandığı görölmektedir. Akıllı Şehir yönetiminin, bilgi ve iletişim teknolojileri (BİT) aracılığıyla yeni insan iş birliği biçimlerinin oluşturulmasıyla daha iyi sonuçlar ve daha açık yönetim süreçleri elde etmeyi amaçladığını savunmaktadırlar. Dashkevych ve Portnov [7] çalışmalarında, akıllı Şehir tanımlamasında kullanılan ölçütlerin kapsamlı bir analizini sunarak, Şehirlerin "akıllı" olarak sınıflandırılmasında daha dengeli ve insan odaklı yaklaşımların benimsenmesi gerektiğini vurgulamaktadırlar. Özellikle çevresel sürdürülebilirlik ve yaşam kalitesi gibi alanların değerlendirme süreçlerinde daha fazla dikkate alınmasını önermektedirler.

### 3.YÖNTEM (METHOD)

Akıllı Şehir yönetimi birden fazla kriter ve alt kriterlere sahiptir. Bu kriterler arasındaki tüm ilişkileri gözlemleyebilmek ve daha gerçekçi sonuca ulaşabilmek için ANP yöntemi kullanılmıştır. ANP yöntemi kriterler ile alt kriterler arasındaki tüm ilişkileri dikkate almaktadır. Bu sebeple yöntem, daha verimli sonuçlara ulaşma olanağı sağlamaktadır [13]. ANP, AHP yöntemine yapısal olarak benzerlik gösterse de kurulan model ağ modeli yapısındadır. Bu ağ yapısı kriterler arasındaki ilişkileri ortaya koymaktadır [15]. ANP yöntemi çözümde esneklik sağlar ve daha geniş kapsamlıdır. Niteliksel ve niceliksel faktörleri bir arada ele almaktadır. Ancak uygulama süreci AHP' ye göre daha karmaşık yapıdadır. AHP ile çözüme kavuşturulan karar verme problemlerinden çok daha karmaşık olanlarına uygulanabilmektedir. Super Decisions programı ile ANP yöntemi çözülmüştür. ANP yönteminin adımları Şekil 2'de verilmiştir [14] [9].



Şekil 2: ANP Yöntemi Adımları (ANP Method Steps)

## 4. UYGULAMA (APPLICATION)

### 4.1. Problemin Tanımı (Definition of the Problem)

Akıllı şehir yönetimi, hizmet alanlarında verimli ve sürdürülebilir çalışmalarla ilerleyebilmek için kamusal, özel ve sivil paydaşların ortaklaşmasını ifade etmektedir. Amaç; yönetim, strateji, bütüncül hizmet yönetimi, politika yönetimi ve iş yönetimi gibi alt sistemlerin performansında artış sağlayarak şehirdeki ana sistemin sürdürülebilirliğini ve verimliliğini sağlamaktır. Bu doğrultuda akıllı şehir sitesinde yer alan akıllı şehir yönetimi maddeleri kriterler olarak kabul edilmiş ve ANP yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Böylelikle akıllı şehir yönetimine etki eden kriterlerin önem derecesi belirlenmiştir.

### 4.2. Kriterler (Criteria)

Problemde kullanılan akıllı şehir yönetimi kriterleri ve açıklamaları Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1: Kriterler ve Kriterlerin Açıklamaları (Criteria and Descriptions of Criteria)**

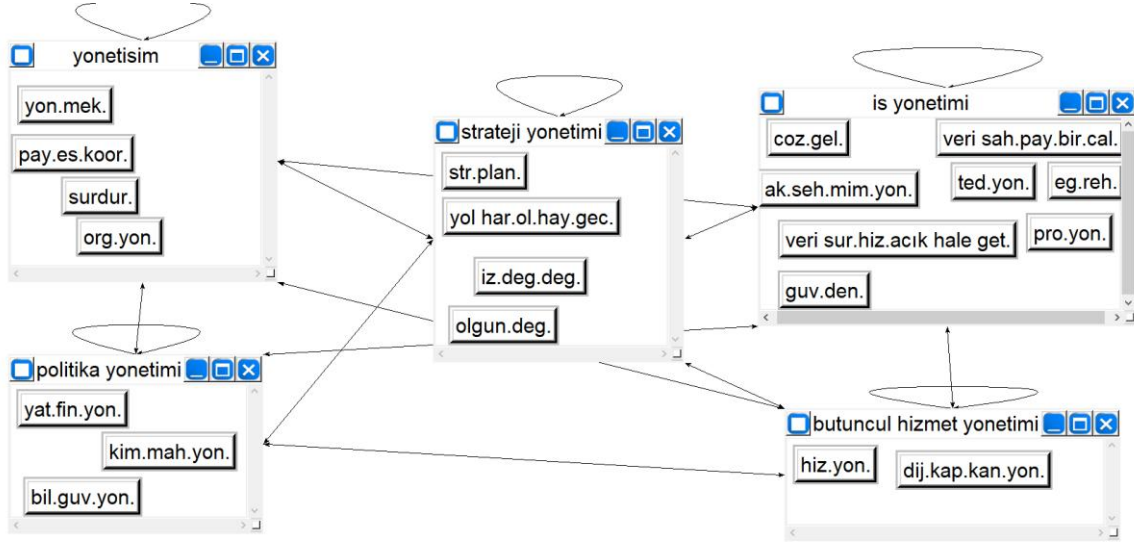
Ana Kriterler	Alt Kriterler	Açıklamalar
Yönetişim ( $C_1$ )	Yönetişim Mekanizması ( $C_{11}$ )	Akıllı yönetim bileşeninde şeffaflık, hesap verebilirlik, katılımcılık ve birlikte çalışabilirlik bulunmaktadır. Vatandaşlara sunulan hizmetlere yer verilmektedir [8].
	Organizasyon Yönetimi ( $C_{12}$ )	Yönetim süreçlerinin organizasyonunu toplumun ekonomik, sosyal ve siyasal aktörleri arasında etkileşim, eşgüdüm, iş bölümü ve uyum içerisinde gerçekleştiren bir bileşendir [8].
	Paydaşlar Arası Eşgüdüm ve Koordinasyon ( $C_{13}$ )	Şehir ortaklarından oluşan çok sayıda aktörün birlikte çalıştığı bir etkinliktir [6].
	Sürdürülebilirlik ( $C_{14}$ )	Şehirde yaşam kalitesini sürdürülebilir bir şekilde artırmak üzere kullanılan etkinliktir [6].
Strateji Yönetimi ( $C_2$ )	Strateji Planlama ( $C_{21}$ )	Üst mertebeden gelen kararlar ile alt mertebelerden gelecek veriler, tercihler, bilgiler ve talepleri buluşturan diğer şehirlere kıyasla şehrin kendisinin ulaşmak istediği özgün geleceğe taşımakla görevli olan bir yönetim aracıdır [6].
	Yol Haritası Oluşturma ve Hayata Geçirme ( $C_{22}$ )	Mekânsal, örgütsel ve teknolojik dönüşümlerdeki ilkeler, amaçlar, hedefler, normlar ve bunlar için belirlenen uygulama fikirlerinin hangi zaman, ne şekilde ve nerede hayata geçirileceğini belirten, bütünsel bir anlam taşıyan ve sürekli olarak güncellenmeye açık olan bir belgedir [8].
	Olgunluk Değerlendirme ( $C_{23}$ )	Akıllı Şehir bileşenlerini kapsayarak, bunları standartlara ve objektif kriterlere dayalı olarak ölçmek, değerlendirmek, birbirleriyle karşılaştırmak ve gelişimlerini destekleyecek bir yol haritası sunmak amacıyla ihtiyaçları temel olarak ölçümleyen bir değerlendirmedir [8].
	İzleme, Değerlendirme ve Değişim ( $C_{24}$ )	Planda ortaya konulan vizyona ulaşılması, eylemlerin ilerleme durumlarının takip edilmesi ve değerlendirilmesi ihtiyacının karşılanması için yürütülecek olan izleme, değerlendirme ve değişim yönetimi ile ilgili faaliyetlerdir [21].
Politika Yönetimi ( $C_3$ )	Yatırım ve Finans Yönetimi ( $C_{31}$ )	İşletmenin ihtiyaç duyduğu finansmanın en uygun şartlarla temin edilmesi, bu fonların güvence altına alınması ve doğru varlıklara yatırılarak verimli bir şekilde kullanılması sürecidir. Diğer bir deyişle, bir işletmenin finansal hedeflerine ulaşabilmesi için mali kaynaklarının etkin bir şekilde yönetilmesidir [4].
	Kimlik ve Mahremiyet Yönetimi ( $C_{32}$ )	Akıllı Şehir çerçevesinde toplanan ve kullanılan kişisel verilerin ile devlet sırlarının tanımlanarak, gizlilik ve mahremiyet açısından kritiklik düzeylerinin değerlendirilmesiyle bilginin yönetilmesidir [21].
	Bilgi Güvenliği Yönetimi ( $C_{33}$ )	Bilgi güvenliği yönetimi, bir organizasyonun bilgi varlıklarının güvenliğini, gizliliğini, bütünlüğünü ve erişilebilirliğini korumak amacıyla oluşturulmuş bir süreçtir [22].
Bütüncül Hizmet Yönetimi	Hizmet Yönetimi ( $C_{41}$ )	Hizmet yönetimi, müşteri tarafından nasıl algılandığına odaklanarak, işlerin yürütülmesinde hizmet kalitesini ön planda tutan ve bu kaliteyi birincil harekete geçirici güç olarak kabul eden toplu bir örgütsel yaklaşımdır [1].

(C <sub>4</sub> )	Dijital Kapsayıcılık ve Kanal Yönetimi (C <sub>42</sub> )	Web siteleri, sosyal medya platformları, e-posta pazarlama ve diğer dijital kanalların stratejik yönetimi ve iyileştirilmesi hedeflenmektedir. İçerik yönetimi, veri analizi, müşteri etkileşimi ve dijital pazarlama stratejileri gibi konularda rehberlik sunarak işletmelerin dijital varlıklarını en verimli şekilde kullanmalarına yardımcı olmaktadır [16].
İş Yönetimi (C <sub>5</sub> )	Çözüm Geliştirme (C <sub>51</sub> )	Belirli bir duruma yönelik etkin stratejilerin geliştirilmesini, bunlar arasından en uygun olanının seçilmesi ve uygulanmasını kapsayan süreçtir [20].
	Proje Yönetimi (C <sub>52</sub> )	İş, veri, uygulama ve teknoloji katmanlarını kapsayacak şekilde dijital, fiziki, mekânsal ve insani Akıllı Şehir çözümlerine yönelik projelerin planlanması, uygulanması ve izlenmesini içeren yönetim süreçleridir [21].
	Tedarik Yönetimi (C <sub>53</sub> )	Şehirlerde, kaynak edinimi ve tedarikçi yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi, tedarik süreçlerinin bütünleşmiş bir yaklaşımla değerlendirilmesi ve Akıllı Şehir tedarik prensipleri ile satın alma politikalarının belirlenip hayata geçirilmesine yönelik çalışmalardır [20].
	Eğitim ve Rehberlik (C <sub>54</sub> )	Akıllı şehir eğitimi, akıllı şehirlerin tasarımı, geliştirilmesi ve yönetimi konularında bilgi ve becerilerin kazanılmasını amaçlayan bir eğitim alanıdır [21].
	Veri Sahipliği Paylaşımı ve Birlikte Çalışılabilirlik (C <sub>55</sub> )	Akıllı Şehir alanında, verinin sahipliği ve paylaşım standartlarının tanımlanmasının yanı sıra, sistemlerin diğer Akıllı Şehir bileşenleri ve ilgili yapılarla semantik, yasal, organizasyonel ve teknik katmanlarda uyum içinde çalışmasını sağlamak amacıyla yürütülmesidir [21].
	Akıllı Şehir Mimari Yönetimi (C <sub>56</sub> )	Akıllı şehir mimarisi, farklı sistemlerin ve teknolojilerin bir araya getirilerek, şehirlerin daha akıllı, sürdürülebilir ve verimli olmasını sağlayan bir yaklaşımdır. Bu mimari yaklaşım, şehirlerin çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliğini artırmayı amaçlamaktadır [21].
	Veri, Süreç ve Hizmetleri Açık Hale Getirme (C <sub>57</sub> )	Şehire ait veri, süreç ve hizmet envanterlerinin paydaşlarla açık ve erişilebilir bir şekilde paylaşılmasıdır [21].
	Güvence Denetim (C <sub>58</sub> )	Akıllı Şehir projelerinde, mevcut süreçlerin doğru ve etkin bir şekilde yürütülmesini sağlamak hedefiyle yapılan denetimlerdir [21].

#### 4.3.Kriterlerin ANP Yönetimi ile Ağırlıklandırılması (Weighting of Criteria with ANP Method)

Akıllı şehir sitesinde bulunan akıllı şehir yönetimi kriterleri ANP yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Yöntem, modül içinde bulunan 5 ana kriter ile 22 alt kriterin birbirleriyle olan ilişkilerini gösteren bir ağ yapısı oluşturmuştur. Bu ağ yapısı ve problem sonucu “Super Decisions” programı ile elde edilmiştir. Oluşturulan ağ yapısının görüntüsü Şekil 3’te verilmiştir. 5 ana kriter için hücreler oluşturulmuş ve her birinin içerisine o ana kritere ait olan alt kriterler yerleştirilmiştir. Ağ yapısı, kriterler arasındaki ilişkileri oklar ile göstererek ve

hiyerarşik yapı kurularak oluşturulmuştur. Tablo 2’de bulunan kriter ağırlıkları verilmiştir. Uygulamadaki tutarlılık oranları  $CR < 10$  olarak bulunmuştur.



Şekil 3: Problem Ağ Yapısı (Problem Network Structure)

Tablo 2: Ana ve Alt Kriter Ağırlıkları (Main and Sub-Criteria Weights)

Ana Kriterler	Alt Kriterler	Alt Kriterlerin Dahil Olduğu Ana Kriter İçerisindeki Ağırlığı	Genel Alt Kriter Ağırlıkları
Yönetişim( $C_1$ ) (0.09205)	Yönetişim Mekanizması ( $C_{11}$ )	0.13954	0.1186
	Organizasyon Yönetimi ( $C_{12}$ )	0.26222	0.1534
	Paydaşlar Arası Eşgüdüm ve Koordinasyon ( $C_{13}$ )	0.17533	0.0262
	Sürdürülebilirlik ( $C_{14}$ )	0.42292	0.0318
Strateji Yönetimi ( $C_2$ )	Strateji Planlama ( $C_{21}$ )	0.16009	0.0194
	Yol Haritası Oluşturma ve Hayata Geçirme ( $C_{22}$ )	0.09543	0.0307

(0.25489)	Olgunluk Değerlendirme ( $C_{23}$ )	0.4673	0.0400
	İzleme, Değerlendirme ve Değişim ( $C_{24}$ )	0.27718	0.0337
Politika Yönetimi ( $C_3$ ) (0.12962)	Yatırım ve Finans Yönetimi ( $C_{31}$ )	0.31081	0.0260
	Kimlik ve Mahremiyet Yönetimi ( $C_{32}$ )	0.1958	0.0335
	Bilgi Güvenliği Yönetimi ( $C_{33}$ )	0.49339	0.0368
Bütüncül Hizmet Yönetimi ( $C_4$ ) (0.28146)	Hizmet Yönetimi ( $C_{41}$ )	0.666667	0.0727
	Dijital Kapsayıcılık ve Kanal Yönetimi ( $C_{42}$ )	0.333333	0.0450
İş Yönetimi ( $C_5$ ) (0.24198)	Çözüm Geliştirme ( $C_{51}$ )	0.08597	0.0485
	Proje Yönetimi ( $C_{52}$ )	0.21671	0.0552
	Tedarik Yönetimi ( $C_{53}$ )	0.18879	0.0479
	Eğitim ve Rehberlik ( $C_{54}$ )	0.05147	0.0499
	Veri Sahipliği Paylaşımı ve Birlikte Çalışılabilirlik ( $C_{55}$ )	0.11749	0.0321
	Akıllı Şehir Mimari Yönetimi ( $C_{56}$ )	0.08323	0.0349
	Veri, Süreç ve Hizmetleri Açık Hale Getirme ( $C_{57}$ )	0.17977	0.0254
	Güvence Denetim ( $C_{58}$ )	0.07657	0.0383

“Super Decisions” programı ile çözülen ANP Yöntemi Tablo 2’de verilen her bir ana kriterin alt kriterlerine göre 1-9 skalası ile puanlandırılmıştır. Örnek olarak Yönetişim kriterinin alt kriteri olan yönetim mekanizması ve sürdürülebilirlik alt kriterlerinin birbirleriyle karşılaştırılması Şekil 4’te verilmiştir. Şekil 5’te puanlama sonucu oluşan tutarlılık oranına yer verilmiş olup değeri “0.03626” bulunmuştur.

Şekil 4: Yönetişim Kriterinin Yönetişim Mekanizması Alt Kriterine Göre Karşılaştırma Çıktısı

Comparisons wrt "yon.mek." node in "yonetisim" cluster		surdur. is moderately more important than yon.mek.																			
1.	org.yon.	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No
2.	org.yon.	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No
3.	org.yon.	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No
4.	pay.es.koor.	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No
5.	pay.es.koor.	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No
6.	surdur.	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No

Şekil 5:Yönetişim Ana Kriteri Tutarlılık Oranı

Inconsistency: 0.03626		
org.yon.		0.30039
pay.es.ko~		0.15920
surdur.		0.44279
yon.mek.		0.09762

Şekil 5'te yer alan yönetim ana kriteri içerisindeki en yüksek ağırlığa sahip kriter 0.44279 ile sürdürülebilirlik ve ikinci olarak 0.30039 ile organizasyon yönetimi olmuştur. Bu durum, akıllı şehir yönetimde karar alıcıların yalnızca bugünü değil, geleceği de dikkate alan, uzun vadeli ve çevresel, sosyal ve ekonomik dengeyi gözeten politikalar geliştirmesi gerektiğini gösteriyor. Organizasyon yönetimine ikincil öncelik verilmesi, yönetim yapılarının esnek, etkin ve katılımcı bir biçimde tasarlanması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Uygulanabilirlik ve stratejik açıdan kritik bir öneme sahip olması bu kriteri tutarlı ve öncelikli kılmaktadır. Politika yönetimi ana kriteri için Saaty skalası kullanılarak gerçekleştirilen değerlendirmenin sonucu Şekil 6'da verilmiştir.

Şekil 6.Politika Yönetimi Ana Kriteri Tutarlılık Oranı

Inconsistency: 0.05156		
bil.guv.y~		0.31081
kim.mah.y~		0.19580
yat.fin.y~		0.49339

Şekil 6’da yer alan Politika yönetimi ana kriteri içerisindeki en yüksek ağırlığa sahip alt kriter 0.49339 ile yatırım ve finans yönetimidir. En düşük ağırlığa sahip kriter ise 0.1958 ile kimlik ve mahremiyet yönetimi olmuştur. Dijitalleşen şehirlerde veri güvenliği öneme sahiptir. Vatandaşların verilerinin korunmaması, uygulamalara olan güveni zedeler. Kimlik ve mahremiyet yönetiminin düşük çıkması ise risklidir; bu konunun göz ardı edilmemesi gerekir [22]. Akıllı şehir yönetimi ve uygulamalarına yön veren unsurları ortaya çıkaran politikalar stratejik kararların mali sürdürülebilirlik temelinde şekillendiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, kaynakların etkin kullanımı ve yatırım planlamasının politika başarısında belirleyici bir unsur olarak görüldüğünü göstermektedir. Bu sebeple ağırlığının en yüksek çıkması; uygulanabilirlik ve stratejik açıdan kritik bir öneme sahip olması, kriteri tutarlı ve öncelikli kılmaktadır. Strateji yönetimi ana kriteri içerisindeki en yüksek ağırlığa sahip kriter 0.4673 ile olgunluk değerlendirmedir. Akıllı şehir yönetimi uygulamalarının başarılı bir şekilde uygulanması; mevcut kapasite, altyapı ve teknolojik olgunluk düzeyinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini gerektirmektedir. Böylece akıllı şehir çerçevesinin çeşitli düzeylerinde uygulama için uygun stratejileri belirleyen ayrıntılı bir yol haritasını çıkarmak mümkün olacaktır [10]. Olgunluk değerlendirme kriterinin en yüksek ağırlıkta olması uygulanabilirlik ve stratejik açıdan kritik bir öneme sahip olması bu kriteri tutarlı ve öncelikli kılmaktadır. Bütüncül hizmet yönetimi ana kriterinde 0.666667 ile hizmet yönetimi en yüksek ağırlığa sahip kriter çıkmıştır. Akıllı şehirler, çok sayıda hizmetin (ulaşım, sağlık, güvenlik, çevre vb.) birbirine entegre çalıştığı sistemlerdir. Bu sistemlerin iyi yönetilmesi, vatandaş memnuniyeti ve operasyonel verimlilik açısından kritiktir [21]. Akıllı şehir çözümlerinin kullanıldığı hizmetlerin bütüncül ve birbiriyle etkileşim içerisinde olan faaliyetlerinde hizmet yönetimi çok önemli bir rol oynar. Bu sebeple hizmet yönetimi kriterinin ağırlığı en yüksek çıkmıştır. İş yönetimi ana kriteri içerisindeki en yüksek ağırlığa sahip kriter 0.21671 ile proje yönetimidir. Akıllı şehir yönetimi uygulamaları çoğunlukla proje bazlı yaklaşımlar üzerinden ilerler. Bu yüzden proje yönetimi becerileri, bütçelerin, kaynakların ve zamanın etkili yönetimi açısından önemlidir [16]. Ancak eğitim ve rehberlik alt kriteri çok düşük çıktığı için insanların geliştirilmesi ihmal ediliyor olabilir. İş yönetimi ana kriteri içerisindeki en düşük ağırlığa sahip kriter ise 0.05147 ile eğitim ve rehberliktir. Akıllı şehir yönetiminde her bir ana ve alt kriterlerin

ağırlığı belirlenerek yönetim mekanizmasının çalışmasında her kriterin önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir.

## 5.SONUÇ (RESULT)

Akıllı Şehir kavramı Türkiye’ de son zamanlarda önem kazanmaya başlamıştır. Akıllı Şehir teknoloji ve yenilikleri içinde bulundurarak Şehirlerin daha etkin ve sürdürülebilir olmasını sağlamaktadır. Günümüzde akıllı Şehir uygulamaları artmasına rağmen akıllı Şehir yönetimi ile akıllı Şehir yönetişimi kavramı karıştırılmakta ve anlaşılmamaktadır. Bu sebeple bu çalışmada akıllı Şehir yönetimi kriterlerinin ağırlıklandırılması yapılmıştır.

Akıllı Şehir yönetimi kentsel yönetimle ilgili hizmet alanlarında etkin ve verimli çalışma yürütülebilmesi için kamusal, özel ve sivil paydaşların bütünleşmesini ifade etmektedir. Hazırlanan çalışmada yönetişim, strateji yönetimi, politika yönetimi, bütüncül hizmet yönetimi, iş yönetimi kriterleri 2020-2023 Ulusal Akıllı Şehirler Stratejisi ve Eylem Planından ele alınmıştır ve bu kriterler ÇKKV yöntemlerinden ANP ile ağırlıklandırılmıştır. Yöntem uygulanırken tutarlık oranları  $CR < 0,10$  elde edilmiştir.

Uygulama sonucunda akıllı Şehir yönetiminin kriterleri ağırlıklandırıldığında en etkili ana kriter bütüncül hizmet yönetimi olurken en az etkiye sahip ana kriter ise yönetişim olmuştur. Alt kriterler için hem dahil oldukları ana kriter içerisindeki ağırlıklar hem de genel olarak tüm alt kriterler içindeki ağırlıkları hesaplanmıştır . En önemli kriter dijital kapsayıcılık ve kanal yönetimi olmuştur. Bu sonuç en etkili ana kriter olan bütüncül hizmet yönetiminin alt kriteridir ve tutarlıdır. Çözülen uygulamada son sıradaki ağırlık ise olgunluk değerlendirme çıkmıştır. Literatür de Dashkevych ve Portnov [7] tarafından yapılan benzer bir çalışmaya rastlanmaktadır. Ancak yapmış olunan bu çalışma 2020-2023 Ulusal Akıllı Şehirler Stratejisi ve Eylem Planında yer alan kriterlerin ağırlıklandırılması yönünden literatürdeki çalışmadan farklıdır. Bu çalışma ile akıllı Şehir yönetiminde sürdürülebilirlik, etkinlik, Şeffaflık ön plana çıkararak yönetsel anlamda stratejilerin yapılması mümkündür. Bu sayede vatandaşlara daha etkili sonuçların verilmesinde katkı sağlayabileceği düşünölmektedir.

Dünya genelinde, 2050 yılına kadar Şehir nüfusunun %68’e ulaşacağı tahmin edilmektedir ve bu da Şehir yönetiminde kaynakların etkin kullanımının önemini artırmaktadır. Türkiye’de

ise şehirleşme oranı %93,4 seviyesindedir [21]. Elde edilen sonuçlar, yönetim ve sürdürülebilirlik gibi temel alanların önceliklendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, insan kaynağı geliştirme ve proje yönetimi becerilerinin artırılması, akıllı şehir uygulamalarının başarısını doğrudan etkileyebilecek önemli unsurlardır. Gelecek çalışmalarda, daha kapsamlı analizlerin yapılması konunun akademik ve uygulama boyutundaki katkısını güçlendirecektir. Türkiye’de akıllı şehir geliştirmekte olan bir kavram olduğundan dolayı çalışma bu yönüyle yapılacak diğer uygulamalara yardımcı olması ön görülmektedir.

### ÇIKAR ÇATIŞMASI REDDİ

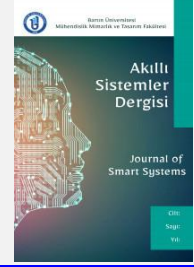
Bu çalışma ile hiçbir şekilde çıkar elde edilmemiştir.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Albrecht, K., “At America’s Service”, 1988.
2. Barış, Ş., Zülfikar, A. C., Korkmaz, M., Tunç, S., “Akıllı Şehirlerde Afet Riski Azaltılması Uygulamaları”, Şura Akademi, (2), 27-41, 2023.
3. Bayraktar, H., Bayar, D.Y., Kara, B., Akıllı Şehir Yönetimi, VIII. Uzaktan Algılama-Cbs Sempozyumu (Uzal-Cbs 2022), Ankara-Türkiye, 17-19 Kasım, 2022.
4. Bilişim A.Ş. Finans Yönetimi. <https://bilisim.com.tr>. Yayın Tarihi 2023. Erişim Tarihi 11/12/2024.
5. Bozkurt, A., “Akıllı Kentlerde Dijital Yönetişim: E-Belediyecilik Uygulamaları”, Urban 21 Journal, 1(1), 69-80, 2023.
6. Çakır Demirhan, D., “Akıllı Şehirler İçin Akıllı Yönetişim: Yerel Yönetimlerin Rolü”, Ombudsman Akademik, (20), 179-206, 2024.
7. Dashkevych, O., Portnov, B. A. “Criteria for smart city identification: a systematic literature review” Sustainability, 14(8), 4448, 2022.

8. Esenler Belediyesi. Akıllı Şehir Esenler. Prof. Dr. Sadettin Ökten Şehir Düşünce Merkezi Yayınları .<https://esenler.bel.tr/wp-content/uploads/2023/12/AKILLI-SEHIR-ESENLER.pdf>. Yayın Tarihi Kasım 2023. Erişim Tarihi 10/12/2024.
9. Güven, E., Eren, T., “İl Afet Risk Azaltma Planı Çerçevesinde Analitik Ağ Prosesi Yöntemi ile Kriter Ağırlıklandırma: Kırıkkale İli İçin Bir Örnek”, Afet ve Risk Dergisi, 6(2), 401-414, 2023.
10. Kocalar, A. C., “Akıllı Şehir Lojistiği Kapsamında Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) İçin Sistem Analizi”, Journal Of Transportation And Logistics, 8(1), 73-82, 2023.
11. Kocaman, M. S., “Akıllı Şehir Kriterleri ile Akıllı Kampüs İndeksi Oluşturulması”, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2(3), 1-6, 2021.
12. Meijer, A., & Rodríguez Bolívar, M. P., “Governing the smart city: A review of the literature on smart urban governance”, *International Review of Administrative Sciences*, 82(2), 392–408,2016.
13. Oral, N., Yumuşak, R., Eren, T., “AHP ve ANP Yöntemleri Kullanılarak Tehlikeli Madde Depo Yeri Seçimi: Kırıkkale İlinde Bir Uygulama”, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(1), 115-124, 2021.
14. Özcan, E. C., Ünlüsoy, S., Eren, T., “ANP ve TOPSIS Yöntemleriyle Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Yatırım Alternatiflerinin Değerlendirilmesi”, Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5(2), 204-219, 2017.
15. Özder, E. H., Özcan, E., Eren, T., “Staff Task-Based Shift Scheduling Solution With An ANP And Goal Programming Method İn A Natural Gas Combined Cycle Power Plant”, *Mathematics*, 7(2), 192, 2019.
16. PWC. Dijital Kanal Yönetimi. <https://www.pwc.com.tr/Dijital-Kanal-Yonetimi>. Yayın Tarihi 2024. Erişim Tarihi 11/12/2024.
17. Sancino, A., Turrini, A., Cristofoli, A., & Valotti, M., “The governance of smart cities: A systematic literature review. *Cities*”, 81, 1–9,2018.
18. Statista.2018’den 2024’e Kadar Dünya Çapında Akıllı Şehir Harcamaları. <https://www.statista.com/statistics/1095140/worldwide-smart-city-expenditure/>. Yayın Tarihi 10/01/2020. Erişim Tarihi 23/05/2025.

19. Şahin, Ç., “Problem Çözme Becerisinin Temel Felsefesi”, Atatürk Üniversitesi Kazım Karabekir Eğitim Fakültesi Dergisi, (10), 2010.
20. Ően, E., “Yerel Yönetimlerde Dijital Dönüşüm ve Akıllı Kent Uygulamaları: Eleştirel Bir Bakış”, Ekonomi İşletme Siyaset ve Uluslararası İlişkiler Dergisi, 9(2-1), 141-165, 2023.
21. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Olgunluk Değerlendirme Modeli. Akıllı Şehirler Portalı. <https://www.akillisehirler.gov.tr/egitim-akilli-yonetisim/>. Yayın Tarihi 2020-2023. Erişim Tarihi 10/12/2024.
22. T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. Türk Standartları Enstitüsü. Bilgi Güvenliği Yönetim Sistemi (BGYS) Belgelendirmesi. <https://www.tse.org.tr/bilgi-guvenligi-yonetim-sistemi-bgys-belgelendirmesi-ts-iso-iec-27001/>. Yayın Tarihi 16/10/2023. Erişim Tarihi 11/12/2024.
23. Üneş, M., Közkurt, C., “Üniversite Yerleşkesi Ulaşım Planlamasında Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Teknolojilerinin Kullanılması”, Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 4(2), 99-119, 2021.
24. Yaşar, S., Poyraz, Z., Yumuşak, R., Eren, T., “ANP ve PROMETHEE Yöntemleri ile Akıllı Şehir Analizi: Ankara’da Bir Uygulama”, GMBD, 8(1), 15–28, 2022.



# YAPAY ZEKÂ VE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE ARITMA TESİSLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE SÜREÇ İYİLEŞTİRME POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

**Niyazi Erdem DELİKANLI<sup>1,a,\*</sup>**

<sup>1</sup>Çevre Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Bartın Üniversitesi, Bartın, Türkiye.

<sup>a</sup>edelikanli@bartin.edu.tr, ORCID: [0000-0002-1322-3989](https://orcid.org/0000-0002-1322-3989)

(Geliş/Received: 28.04.2025; Kabul/Accepted: 10.06.2025)

## ÖZET

Bu çalışma, literatür derlemesi ve nicel analiz yöntemiyle, yapay zekâ (YZ) ve makine öğrenmesi (MÖ) modellerinin atıksu arıtma tesislerinde enerji verimliliği ve süreç optimizasyonu üzerindeki potansiyel faydalarını değerlendirmektedir. Küresel tam ölçekli uygulamalardan derlenen veriler, destek vektör regresyonu, yapay sinir ağları, dijital ikiz tabanlı gerçek zamanlı kontrol, konvolüsyonel sinir ağları ve derin pekiştirmeli öğrenme dâhil olmak üzere çoklu algoritmaların havalandırma enerjisini %25-35, toplam tesis enerjisini ise %10-25 oranında azaltabildiğini göstermektedir. Türkiye’de yılda yaklaşık 1,6 TWh elektrik harcayan arıtma sektöründe bu optimizasyonların %15-25 düzeyinde tasarruf potansiyeli bulunduğu; bunun da 0,9-1,5 milyar TL işletme maliyeti ve 110.000-180.000 t CO<sub>2</sub> eşdeğeri emisyon azaltımı sağlayabileceği hesaplanmıştır. Model başarısının yüksek nitelikli veri akışı, uygun algoritma-süreç eşleşmesi ve operatör eğitimine bağlı olduğu belirlenmiştir. Bulgular, standardize veri altyapısı ve ulusal teşvikler eşliğinde YZ/MÖ çözümlerinin Türkiye’nin sürdürülebilir su yönetimi hedeflerine güçlü bir ivme kazandırabileceğini ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** yapay zekâ, makine öğrenmesi, dijital ikiz, gerçek zamanlı kontrol, atıksu arıtma, enerji verimliliği.

## ASSESSMENT OF ENERGY-EFFICIENCY AND PROCESS-IMPROVEMENT POTENTIAL IN TREATMENT PLANTS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MACHINE LEARNING

### ABSTRACT

This study employs a literature review and quantitative analysis to assess the potential benefits of artificial-intelligence (AI) and machine-learning (ML) models for improving energy efficiency and process optimisation in wastewater treatment plants. Evidence drawn from full-scale international implementations shows that a range of algorithms—including support-vector regression, artificial neural networks, digital-twin-driven real-time control, convolutional neural networks and deep reinforcement learning—can reduce aeration energy by 25–35 % and total plant energy by 10–25 %. In Türkiye, where the sector consumes roughly 1.6 TWh of electricity per year, similar optimisation could yield 15–25 % savings, corresponding to 0.9–1.5 billion TRY in operating costs and 110 000–180 000 t CO<sub>2</sub> equivalent emission reductions. Model success is shown to depend on high-quality data streams, process-specific algorithm selection and adequate operator training. The findings indicate that, supported by standardised

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

Geliş (Received): 28/04/2025

Atıf (Citation): N. E. DELİKANLI, “Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi ile Arıtma Tesislerinde Enerji Verimliliği ve Süreç İyileştirme Potansiyelinin Değerlendirilmesi”, Akıllı Sistemler Dergisi 4(1):42-54, 2025.

Kabul (Accepted): 10/06/2025

Yayın (Published): 05/07/2025

data infrastructures and national incentives, AI/ML solutions could provide strong momentum toward Türkiye's sustainable water-management goals.

**Keywords:** artificial intelligence, machine learning, digital twin, real-time control, wastewater treatment, energy efficiency

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, küresel iklim değişikliği, kentleşme ve sanayileşme gibi dinamikler nedeniyle günümüzde kritik bir öncelik haline gelmiştir [1]. Artan su talebi ve kirlilik baskısı, yalnızca doğal su kaynaklarını tehdit etmekle kalmamakta, aynı zamanda su arıtma ve atıksu yönetimi sistemlerinin etkinliğini ve verimliliğini artırma zorunluluğunu da beraberinde getirmektedir [2,3]. Su arıtma tesisleri, bu bağlamda, yüksek enerji tüketimi, süreç karmaşıklığı ve değişken işletme koşulları nedeniyle modern teknolojik yaklaşımlara ihtiyaç duyan temel altyapı sistemleri arasında yer almaktadır [4].

Yapılan çalışmalar, su arıtma tesislerinde toplam enerji tüketiminin %50–60'ının havalandırma, %15–20'sinin çamur işleme ve %10–15'inin su pompalama sistemlerine ayrıldığını ortaya koymaktadır [5]. Bu oranlar, su arıtma tesislerinin enerji verimliliğinin iyileştirilmesinin ekonomik ve çevresel açıdan büyük bir fırsat sunduğunu göstermektedir. Ancak, su arıtım prosesleri, değişken yükler, kimyasal dengesizlikler ve mevsimsel değişiklikler gibi etmenler nedeniyle yüksek derecede karmaşıktır ve geleneksel kontrol yöntemleri bu karmaşıklığı yeterince yönetememektedir [6]. Atıksu arıtma tesisleri bu bağlamda enerji yoğun, dinamik ve karmaşık altyapı sistemleri olup süreç verimliliği ile maliyet baskıları arasında hassas bir denge kurmak zorundadır.

Bu doğrultuda, yapay zekâ (YZ) ve makine öğrenmesi (MÖ) teknikleri, su arıtım süreçlerinde verimliliği artırmak ve enerji tüketimini optimize etmek için güçlü araçlar olarak ortaya çıkmıştır [7,8]. Büyük veri analizi, model tabanlı tahmin, anomalilerin erken tespiti, gerçek zamanlı kontrol ve öngörülü bakım gibi uygulama alanları, YZ tekniklerinin su arıtma tesislerindeki başarısını desteklemektedir [8,9]. YZ tabanlı sistemler, oksijen dozajı optimizasyonundan kimyasal kullanımın minimize edilmesine, atıksu debisinin tahmininden çamur işleme süreçlerinin iyileştirilmesine kadar geniş bir yelpazede uygulanmaktadır [10,11].

Son yıllarda yapılan çalışmalar, yüksek tutarlılığa sahip veri analitiği, gelişmiş modelleme teknikleri ve otomatik kontrol sistemlerinin entegrasyonu ile su arıtma tesislerinde %10 ila %50 arasında enerji tasarrufu sağlanabileceğini ve süreç güvenilirliğinin artırılabilirliğini göstermektedir [12,13]. Özellikle destek vektör regresyonu (SVR), yapay sinir ağları (ANN), uzun kısa süreli bellek ağları (LSTM) ve derin pekiştirmeli öğrenme (DRL) gibi algoritmalar, su kalitesi parametrelerinin tahmini ve süreç optimizasyonu alanında öne çıkmaktadır [14,15].

Bu çalışma bir literatür taramasıdır ve uluslararası bulgulardan hareketle Türkiye senaryosuna özgü sayısal tasarruf öngörülerini sunması bakımından benzer çalışmalardan ayrılmaktadır. YZ/MÖ modellerinin kurulumu için gereken veri altyapısı, algoritma–proses eşleşmesi ve

kurumsal kapasite gereksinimleri de tartışılarak geleceğe yönelik araştırma ve politika önerileri sunulmaktadır. Böylece, su arıtma tesislerinin dijital dönüşüm süreçlerine ve sürdürülebilir yönetim stratejilerine akademik bir katkı sunulması hedeflenmektedir.

## 2. SU ARITMA TESİSLERİNDE YAPAY ZEKÂ UYGULAMALARI (ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATIONS IN WATER TREATMENT PLANTS)

Su arıtma tesisleri, yüksek enerji tüketimi, süreç dinamiklerindeki karmaşıklık ve değişkenlik gibi nedenlerle verimlilik optimizasyonuna ihtiyaç duyan kritik altyapı tesisleri arasında yer almaktadır [4,6]. Geleneksel kontrol ve izleme yöntemleri, bu karmaşıklığı yeterince yönetememekte ve sistem performansını sınırlı düzeyde artırabilmektedir [6]. Son yıllarda yapay zekâ (YZ) ve makine öğrenmesi (MÖ) tabanlı yöntemler, bu sınırlamaları aşmak ve su arıtım süreçlerini daha esnek, öngörülebilir ve verimli hale getirmek amacıyla önemli bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır [7,8,16].

YZ ve MÖ teknikleri, özellikle büyük veri analizi, süreç değişkenlerinin optimizasyonu, anomali tespiti ve ileri süreç kontrolü alanlarında etkili çözümler sunmaktadır [16,17,18]. Süreç verilerinin gerçek zamanlı analizi ve model tabanlı kontrol sistemlerinin uygulanması sayesinde enerji tüketiminin azaltılması, kimyasal kullanımının optimize edilmesi, arıza tahmini yapılması ve su kalitesi parametrelerinin daha hassas bir şekilde izlenmesi mümkün olabilmektedir [19,20,21]. Bu gelişmeler, su arıtma tesislerinin işletme maliyetlerini düşürmenin yanı sıra, çevresel etkilerini azaltarak sürdürülebilirlik hedeflerine de katkı sağlamaktadır [22,23].

Bu bölümde, su arıtma tesislerinde yapay zekâ uygulamalarının dünya genelindeki örnekleri ve Türkiye'deki mevcut durumu ele alınacaktır. Öncelikle uluslararası düzeyde uygulamaya alınmış başarılı projeler incelenecek, ardından Türkiye'deki uygulama potansiyeli ve geleceğe yönelik öneriler tartışılacaktır. Ayrıca, su arıtımında yaygın olarak kullanılan yapay zekâ modelleri ve bu modellerin seçim kriterleri değerlendirilecektir [24,25,26].

### 2.1 Dünya Genelinde Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi Uygulamaları (Artificial Intelligence and Machine Learning Applications Worldwide)

Dünya genelinde, su arıtma tesislerinde yapay zekâ (YZ) ve makine öğrenmesi (MÖ) teknolojilerinin uygulamaları hızla yaygınlaşmaktadır. Özellikle ABD, Avrupa ve Asya ülkelerinde enerji verimliliği, süreç optimizasyonu ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada YZ tabanlı sistemler kritik rol oynamaktadır.

ABD'de, yapay zekâ temelli kontrol sistemleri kullanılarak atıksu arıtma tesislerindeki havalandırma süreçlerinde enerji tüketiminin yaklaşık %30 azaltıldığı rapor edilmiştir [20]. Benzer şekilde, Avrupa'daki birçok su arıtma tesisi, gerçek zamanlı veri analizi ve tahmin modelleri sayesinde enerji maliyetlerini düşürmüş ve kimyasal kullanımını optimize etmiştir [17, 21, 23].

Fransa'da bulunan Purecontrol firması, su arıtma tesislerinde gerçek zamanlı YZ optimizasyonu uygulamalarıyla tesislerin enerji tüketimini ve süreç maliyetlerini önemli ölçüde azaltmıştır. Bu sistemler, tesislerdeki değişken süreç koşullarına dinamik yanıt vererek enerji kullanımını sürekli olarak optimize etmektedir [17].

Hollanda ve İskandinav ülkelerinde ise, YZ ve MÖ tabanlı algoritmalar özellikle çamur üretimi ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) gibi parametrelerin hassas tahmininde kullanılmaktadır [22, 25]. Bu yöntemler, tesislerdeki operasyonel verimliliği artırırken aynı zamanda atık üretimini ve çevresel yükü azaltmaktadır.

Asya'da ise Çin ve Güney Kore gibi ülkelerde YZ sistemleri özellikle büyük veri analizleri, derin öğrenme modelleri ve öngörücü kontrol sistemleri kullanılarak su kalitesi yönetimi ve süreç optimizasyonunda önemli başarılar elde edilmektedir [18, 19]. Çin'de geliştirilen bazı sistemler, atıksu arıtma tesislerinin enerji tüketimini yaklaşık %40 oranında azaltabilmiş ve tesislerin sürdürülebilirlik performanslarını geliştirmiştir [23, 24].

Bu uluslararası örnekler, yapay zekâ ve makine öğrenmesi teknolojilerinin su arıtma sektöründe küresel ölçekte güçlü ve etkili çözümler sunduğunu açıkça göstermektedir. Bu başarılı uygulamaların, Türkiye gibi ülkeler için de önemli referanslar oluşturabileceği ve benzer yöntemlerin adaptasyonu yoluyla sürdürülebilirlik hedeflerinin gerçekleştirilebileceği değerlendirilmektedir [21, 26].

Son beş yılda yayımlanan kapsamlı incelemeler, yapay zekâ destekli dijital ikizlerin havalandırma enerjisini %25-40 düzeyinde azalttığını ve gerçek-zamanlı optimizasyon ile kimyasal dozajının çift haneli oranlarda düşürülebildiğini göstermektedir [27, 28, 32]. Granüler çamur prosesleri için geliştirilen ML-SCADA entegrasyonları sahada %18'e varan enerji tasarrufu sağlamış, KOİ dalgalanmalarına karşı süreç kararlılığını artırmıştır [29]. Ayrıca, küresel ölçekte 150'den fazla araştırmanın derlendiği son incelemeler veri kalitesi, model genellenebilirliği ve siber güvenlik gibi yeni zorluklara da dikkat çekmektedir [30, 33]. Aşağıdaki tabloda kullanılan YZ/MÖ modellerine göre hedefler ve etkileri özetlenmiştir (Tablo 1).

YZ/MÖ çözümleri, atıksu arıtma süreçlerinde enerji tüketimini düşürürken (özellikle havalandırma kademesinde) karar destek işlevleri de sağlayarak proses kararlılığını artırmaktadır. Tablo 1 küresel çapta tam ölçek uygulamalardan seçili örnekleri özetlemekte; aerasyon enerjisinde %25-35 tasarruf ve çıkış suyu kalitesinde belirgin iyileşme sağlandığını göstermektedir. Vurgulamak gerekir ki modellerin performansı tesis ölçeği, veri çözünürlüğü ve operatör uyumuna göre farklılık gösterebilir.

Tablo 1. YZ/MÖ modellerine göre hedefler ve etkileri

Tesis / Çalışma	Kullanılan YZ/MÖ Tekniği	Ölçülen Etki	Kaynak
Cuxhaven WWTP – Xylem TSO	ML dijital ikiz + gerçek-zamanlı karar desteği	-30 % havalandırma enerjisi ( $\approx 1,1$ GWh $\text{yıl}^{-1}$ )	[20]
WWTP (İtalya) – Xylem	Dijital ikiz + set-point optimizasyonu	-30% pompalama enerjisi	[30]
Simülasyon (Kanada)	K-Nearest Neighbor (KNN) - Genetic Algorithm (GA)	havalandırma ihtiyacını %14 oranında azaltarak 2000 kW/gün tasarruf sağlamıştır.	[34]
Beloit WWTP (ABD)	AI temelli akış-DO mantık kontrolü	Modellemede ~12 % enerji tasarrufu potansiyeli	[35]
Küresel literatür – Digital Twin Review	Dijital ikiz + ML derlemesi	12 saha örneğinde -25 %–40 % biyolojik proses enerjisi	[36]
Brno WWTP (Çekya)	AI-dijital ikiz ‘Hubgrade’ pilotu	-15 % aerasyon enerjisi	[37]
Amsterdam West WWTP (Hollanda) – Aquasuite® Autopilot	Öngörülü kontrol & artımlı ML (Royal HaskoningDHV Aquasuite)	-20 % aerasyon enerjisi; -15 % kimyasal tüketimi	[38]
Elektrooksidasyon	Yapay zeka tabanlı tahmin modelleri, YSA, bulanık mantık ve ANFIS gibi	Optimal operating parameters	[39]
Elektrokoagülasyon	Genetik algoritmalar	Geliştirilmiş koagülasyon verimliliği	[41]
Elektrokimyasal Oksidasyon	Makine öğrenimi	Geliştirilmiş kirletici giderimi	[41]
Askıda büyüme süreci ve aktif çamur	Random forest ve Yapay Sinir ağları	%91-95 kirletici giderimi	[40]
Elektroflotasyon	Yapay Sinir ağları	Etkili AKM giderimi	[42]

## 2.2. Su Arıtma Tesislerinde YZ/MÖ Modellerinin Kullanımı – Seçim Kriterleri ve Öne Çıkan Uygulamalar (Use of AI/ML Models in Water Treatment Plants – Selection Criteria and Prominent Applications)

Veri kalitesi, model yorumlanabilirliği ve siber güvenlik hâlen başlıca sınırlılıklar olarak öne çıkmaktadır. Özellikle DRL ve dijital ikiz platformları, OT (operasyonel teknoloji) ağlarını açık

hale getirdiğinden ICS-CERT yönergelerine uygun sızma testleri kritik önem taşır. Ayrıca yüksek frekanslı sensör verisinin eksik veya tutarsız olduğu küçük ölçekli tesislerde, LSTM yerine PLS-R veya RF gibi daha düşük veri hassasiyetine sahip modeller tercih edilmelidir.

Sunulan küresel ve yerel bulgular, YZ/MÖ tabanlı optimizasyonun teknik potansiyelini ortaya koyarken veri standardizasyonu, personel eğitimi ve siber güvenlik konularında bütüncül stratejiler geliştirmenin önemini vurgulamaktadır.

Su arıtma süreçleri; değişken ham su kalitesi, mevsimsel yük dalgalanmaları ve enerji–kimyasal maliyet baskıları nedeniyle esnek, hataya dayanıklı ve yorumlanabilir veri-odaklı modeller gerektirir. Aşağıda sektörde en sık benimsenen yedi model ailesi, neden tercih edildikleri ve yakın tarihli saha/araştırma örnekleri özetlenmiştir (Tablo 2).

**Tablo 2. Yapay zekâ ve makine öğrenmesi modellerinin süreç etkileri, zayıf yanları**

Model	Neden Tercih Edilir?	Tipik Uygulama	Yakın Dönem Örnek	Zayıf Yanları
SVR	Küçük-orta veri setinde doğrusal-olmayan ilişkileri kernel'le öğrenir; aşırı öğrenmeye dirençli.	DO tahmini → blower enerjisi optimizasyonu	Minjiang AAT'inde SVR tabanlı DO kestirimiyle havalandırma enerjisi belirgin düşürüldü [43].	Kernel seçimine duyarlı
ANN (MLP, RBF)	Geniş, çok değişkenli veri için yüksek doğruluk; sensör gürültüsüne tolerans.	COD/BOD tahmini, günlük debi	Aksaray Endüstriyel AAT'te ANN, COD tahmin hatasını %20 azalttı [44].	“Kara kutu”, yüksek veri gereksinimi
CNN	Görsel/uzamsal veride otomatik özellik çıkarımı; manuel mühendislik gerekmez.	Drone/uydu görüntüsünden havza değişim takibi	Yüksek çözünürlüklü RS görüntülerinde arazi değişimi sınıflandırma doğruluğu %92 [45].	Büyük etiketli veri
PLS-R	Çoklu kolinear sensör değişkenlerinde hızlı + yorumlanabilir tahmin.	“Yumuşak sensör” BOD-COD	Petro-AAT çalışmasında COD tahmininde R <sup>2</sup> 0.87 [46].	Doğrusal varsayım
Random Forest / G-Boosting (RF / GBT)	Gürültülü heterojen veride yüksek doğruluk + değişken önemi analizi.	Şebeke kaçak-arıza tahmini, enerji profili	Limassol şebekesinde RF ile kaçak lokalizasyon doğruluğu %90 [47].	Bellek yoğunluğu
Isolation Forest	Etiketlenmemiş büyük veride seyrek anomaliyi hızlı yakalar; düşük işlem yükü.	Tüketim anomalisi, sensör hata alarmı	Saatlik talep verisinde IF modeli F-skor 0.86 [48].	Eşik ayarı hassas
Derin Pekiştirmeli Öğrenme (DRL)	Dinamik, çok değişkenli süreçlerde eş-zamanlı kontrol; ekonomik + çevresel hedefleri birlikte optimize eder.	DO & kimyasal dozaj gerçek-zamanlı kontrol	A2O prosesinde DRL, enerji tasarrufu ve DO sapmasında %35 iyileşme sağladı [49].	Güvenlik-siber risk

Türkiye’de belediye nüfusunun kanalizasyon şebekesine bağlı atıksuyunun yaklaşık %86’sı arıtılmaktadır ve kişi başına günlük ortalama 197 L atıksu oluştuğu kabul edilmektedir. Bu veriler, yılda yaklaşık 5,3 milyar m<sup>3</sup> atıksu arıtıldığı anlamına gelmektedir [50].

Atıksu arıtma tesisleri, birim hacim başına ortalama  $0,30 \text{ kWh m}^{-3}$  elektrik tüketmektedir. Dolayısıyla Türkiye'deki tesislerin yıllık toplam yükü yaklaşık  $1,6 \text{ TWh}$  düzeyindedir. Havalandırma üniteleri bu enerjinin yarısından fazlasını (%50 civarı) kullanmaktadır [51].

Uluslararası çalışmalarda yapay zekâ (YZ) ve makine öğrenmesi (MÖ) uygulamaları, havalandırma enerjisinde %25–35 tasarruf sağlayabildiklerini göstermektedir. Havalandırmanın toplam enerji içindeki payı dikkate alındığında [52], YZ/MÖ'ye geçişin Türkiye'de %15–25 genel elektrik tasarrufu potansiyeli sunduğu öngörülmektedir. Sanayi tarifesine göre ortalama  $3,7 \text{ TL kWh}^{-1}$ 'lik birim maliyet varsayılırsa,  $0,9$ – $1,5$  milyar TL arasında yıllık tasarruf mümkündür [53]. Böyle bir tasarruf düzeyi, modern kontrol yatırımlarının çoğu tesiste 3 yıldan kısa geri dönüş süresine inmesini sağlar.

Elektrik tüketimindeki bu düşüş, Türkiye şebekesinin ortalama  $0,45 \text{ kg CO}_2 \text{ kWh}^{-1}$  emisyon faktörüyle çarpıldığında yılda  $110.000$ – $180.000$  ton  $\text{CO}_2$  eşdeğeri azaltım anlamına gelir. Bu miktar, yaklaşık  $70.000$ – $115.000$  hanenin yıllık elektrik kaynaklı emisyonuna denktir ve ulusal sera-gazı azaltım hedeflerine doğrudan katkı sağlar.

IZSU 2025-2029 Stratejik Planında, 2029 yılına kadar YZ Atık ve atık su yönetiminde süreç optimizasyonu ve enerji verimliliği sağlanması amacıyla ileri sensör teknolojileri, yapay zeka ve uzaktan algılama gibi dijital teknoloji uygulamalarının geliştirilmesi kapsamında 2025 yılında 2 ve diğer yıllarda birer adet olmak üzere toplam 6 adet YZ ile bütünleşik hedef koymuştur [54].

ASKİ, dijital dönüşüm projesi kapsamında “ASKİ İçme Suyu Şebekesi Dijitalleştirilmesi Fizibilite Çalışması Teknoloji Çözüm Çalıştayı” düzenlemiş ve dijital ikiz sistemlerinin kurulması gibi YZ/MÖ destekli projelerini anlatmıştır [55].

Sidal vd. (2023), çalışmalarında, Van ilindeki bir atık su arıtma tesisinden elde edilen veriler kullanılarak biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) gibi ölçülmesi zaman alan ve maliyetli bir parametrenin, pH, sıcaklık, iletkenlik, çözünmüş oksijen, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), askıda katı madde, toplam azot ve toplam fosfor gibi kolay ölçülebilir parametrelerle tahmin edilebilirliğini araştırmışlardır. Bu amaçla ileri beslemeli yapay sinir ağı (YSA) ve çoklu doğrusal regresyon analizi (ÇRA) yöntemleri kullanılmış, YSA modeli %99,83 doğruluk ve %0,12 MAPE değeri ile daha üstün performans sergilemiştir. Elde edilen sonuçlar, BOİ tahmininde YSA'nın geleneksel regresyon yöntemlerine göre daha doğru, hızlı ve ekonomik bir alternatif sunduğunu göstermektedir [56].

Şerifoğlu (2021), tez çalışmasında, Sakarya'daki bir atıksu arıtma tesisinde laboratuvar ortamında ölçümü uzun süren Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ<sub>5</sub>) parametresinin, çevrim içi olarak izlenebilen diğer parametreler kullanılarak yapay zeka ve makine öğrenmesi teknikleriyle hızlı ve doğru bir şekilde tahmin edilmesi amaçlamıştır. Çalışmada, BOİ<sub>5</sub> tahmini için Bulanık Kaba Kümeleme, SmoteR ve farklı regresyon algoritmalarını (Güçlendirilmiş Karar Ağacı, Yapay Sinir Ağı, Bayesyen ve Doğrusal Regresyon gibi) içeren hibrit bir model

geliştirilmiş ve bu modelin doğruluğunu artırmak için nitelik ve örnek seçimi ile veri dengeleme adımları uygulanmıştır. Sonuçlar, %97,18  $R^2$  ve %6,07 MAPE değerine ulaşarak Güçlendirilmiş Karar Ağacı Regresyonu algoritmasının en başarılı model olduğunu ortaya koymuş, önerilen yöntemlerin BOİ5 tahmini için etkinliğini göstermiştir [57].

Sunulan veriler, uluslararası YZ/MÖ uygulamalarının sağladığı yüksek tasarruf oranlarının Türkiye koşullarına uyarlandığında hem makro ölçekte (enerji-emisyon azaltımı) hem de mikro ölçekte (parametre tahmini, proses kontrolü) somut kazanımlar üretme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Belediyelere ait stratejik planlar ve kurum içi fizibilite çalışmaları, dijital ikiz ve ileri sensör entegrasyonu gibi akıllı altyapı hedeflerini resmî politika belgelerine taşımış; yerli akademik çalışmalar ise YSA, SVM ve güçlendirilmiş karar ağaçlarıyla BOİ/KOİ tahmininde %97-99 doğruluk seviyelerine ulaşarak proses izleme maliyetlerini düşürebileceğini kanıtlamıştır. Böylece, veri temelli optimizasyonun teknik uygulanabilirliği, ekonomik fizibilitesi ve kurumsal kabulü birlikte doğrulanmış olmaktadır.

### 3. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION & DISCUSSIONS)

Literatür incelemesi ve küresel tam-ölçek uygulamalar, SVR, ANN, CNN, PLS-R, RF/GBT, Isolation Forest ve derin pekiştirmeli öğrenme (DRL) gibi yöntemlerin, havalandırma enerjisinde %25–35, toplam tesis enerjisinde ise %10–25 düzeyinde tasarruf sağlayabildiğini ortaya koymuştur [43–49]. Türkiye özelinde, yıllık yaklaşık 5,3 milyar  $m^3$  atıksu arıtıldığı ve ortalama özgül tüketimin  $0,30 \text{ kWh } m^{-3}$  olduğu dikkate alındığında sektörün yıllık elektrik yükü yaklaşık 1,6 TWh düzeyindedir [50, 51]. Bu tüketimin yarısından fazlasını oluşturan havalandırma ünitelerinde, YZ/MÖ tabanlı optimizasyonla ülke genelinde %15–25 arasında tasarruf sağlanabileceği hesaplanmıştır. Bu durum, yılda 0,9–1,5 milyar TL işletme maliyeti tasarrufu ve 110.000–180.000 ton  $CO_2$  eşdeğeri sera gazı emisyonu azaltımı anlamına gelmektedir [52, 53].

Ancak model başarısının, kesintisiz, güvenilir ve standartlaştırılmış veri akışı, proses-uyumlu algoritma seçimi ve tesis personelinin veri analitiği konusundaki yetkinliğine güçlü biçimde bağlı olduğu görülmüştür. Bu nedenle, saha uygulamalarının yaygınlaştırılmasında en önemli kısıtlar olarak veri bütünlüğü, standartlaşmış altyapı eksikliği ve sınırlı tam-ölçek saha verileri öne çıkmaktadır. Ayrıca, mevcut analizlerin duyarlılık ve belirsizlik analizleri içermemesi, sonuçların genellenebilirliği konusunda bir sınırlılık olarak değerlendirilmiştir.

Uluslararası literatürle karşılaştırıldığında, Türkiye için öngörülen tasarruf değerlerinin, Avrupa'daki pilot uygulamalarda raporlanan %20–30 aralığıyla uyumlu olduğu ancak Avrupa ülkeleri ve Çin gibi bazı ülkelerde elde edilen %35 üzeri değerlerden daha muhafazakâr kaldığı görülmektedir. Bu farklılıkların temel nedeni olarak havalandırma ünitelerinin enerji tüketimindeki payları ve süreç tasarımlarındaki farklılıklar öne çıkmaktadır.

YZ ve MÖ uygulamalarının sahaya entegrasyonu için standart bir veri altyapısı, yüksek frekanslı ve tutarlı sensör verileri, ileri düzey operatör eğitimi ve siber güvenlik önlemlerinin

alınması kritik önem taşımaktadır. Özellikle graf sinir ağları ve zamana duyarlı transformer modellerinin hidrolik şebeke izleme ve gerçek zamanlı proses optimizasyonundaki uygulama potansiyellerinin gelecek çalışmalarda incelenmesi önerilmektedir.

Örneğin, graf sinir ağları (GNN), atıksu arıtma tesislerinin farklı proses birimlerini düğümler, bu birimler arasındaki akım ve etkileşimleri ise bağlantılar olarak temsil ederek, süreçler arası etkileşimleri çok daha iyi modelleyebilir. Benzer şekilde, transformer tabanlı modeller, çözünmüş oksijen (DO) seviyesi, kimyasal dozaj ve arıtma verimi gibi zamana bağlı değişkenlerin uzun vadeli trendlerini etkili biçimde analiz edebilir. Bu modellerin atıksu arıtma tesislerinde uygulanabilirliğini ortaya koymak üzere pilot ölçekli bir tesis üzerinde GNN tabanlı bir süreç haritası veya transformer destekli zaman serisi tahmini şeması gibi somut örneklerin geliştirilmesi ve test edilmesi, gelecek araştırmalar için öncelikli hedefler arasında yer almalıdır.

Sonuç olarak, bu çalışma YZ/MÖ modellerinin enerji verimliliği, süreç kararlılığı, operasyonel esneklik ve çevresel performans açısından sağladığı avantajları net biçimde göstermektedir. Standartlaştırılmış veri yönetimi, kurumsal kapasite artırımı ve politika destekleri eşliğinde YZ/MÖ tekniklerinin Türkiye'nin sürdürülebilir atıksu yönetim stratejilerinde merkezi bir role sahip olacağı değerlendirilmektedir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI REDDİ

Bu çalışma ile hiçbir şekilde çıkar elde edilmemiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

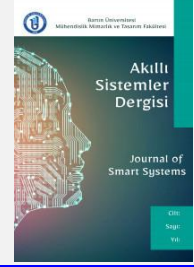
- İlhan, A. İ., Daloğlu Çetinkaya, İ., *Sürdürülebilir su kaynakları yönetimi, çevre diplomasisi ve Türkiye*, İmge Kitabevi, 194-224, 2023.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, "Akıllı temiz ve atık su yönetimi uygulaması fizibilite raporu", 2024. Erişim Tarihi: 16.05.2025, <https://www.akillisehirler.gov.tr/wp-content/uploads/fizibilite-rapor/34-Akilli%20Temiz%20ve%20Atik%20Su%20Yonetimi.pdf>
- Su Politikaları Derneği, "Su yönetiminde yenilikçi teknolojik çözümler artıyor", 2024. Erişim Tarihi: 16.05.2025, <https://supolitikalariderneği.org/2024/03/24/su-yonetiminde-yenilikci-teknolojik-cozumler-artiyor/>
- Türkmenler, H., "Atık su arıtma tesislerinde enerji verimliliği", *Politeknik Dergisi*, 20(2) : 495-502, 2017.
- American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE), *Driving energy efficiency in the U.S. water & wastewater industry by state and utility programs*, 2009.
- Lawrence, J., Giurea, R., Bettinetti, R., "The impact of seasonal variations in rainfall and temperature on the performance of wastewater treatment plant in the context of environmental protection of Lake Como", *Applied Sciences*, 14(24) : 11721, 2024.

7. Colwell, M., Abolghasemi, M., “Digital twins for forecasting and decision optimisation with machine learning: Applications in wastewater treatment”, *arXiv preprint*, arXiv:2404.14635, 2024.
8. Ganthavee, V., Trzcinski, A. P., “Artificial intelligence and machine learning for the optimization of pharmaceutical wastewater treatment systems: A review”, *Environmental Chemistry Letters*, 22 : 2293-2318, 2024.
9. Rockwell Automation, “How AI boosts energy efficiency in wastewater treatment”, 2025. Erişim Tarihi: 16.05.2025, <https://www.rockwellautomation.com/en-us/company/news/the-journal/how-ai-boosts-energy-efficiency-in-wastewater-treatment.html>
10. Waqas, S., Harun, N. Y., Sambudi, N. S., Arshad, U., Nordin, N. A. H. M., Bilad, M. R., Saeed, A. A. H., Malik, A. A., “SVM and ANN modelling approach for the optimization of membrane permeability of a membrane rotating biological contactor for wastewater treatment”, *Membranes*, 12 : 821, 2022.
11. Jana, D. K. vd., “Optimization of effluents using artificial neural network and support vector regression in detergent industrial wastewater treatment”, *Cleaner Chemical Engineering*, 3 : 100039, 2022.
12. Harrington, L., “How AI boosts energy efficiency in wastewater treatment”, Rockwell Automation, 2025. Erişim Tarihi: 16.05.2025, <https://www.rockwellautomation.com/en-us/company/news/the-journal/how-ai-boosts-energy-efficiency-in-wastewater-treatment.html>
13. Mohammadi, E. vd., “Application of soft actor-critic algorithms in optimizing wastewater treatment with time delays integration”, *arXiv preprint*, arXiv:2411.18305, 2024.
14. Yaqub, M., Lee, W., “Modeling nutrient removal by membrane bioreactor at a sewage treatment plant using machine learning models”, *Journal of Water Process Engineering*, 46 : 102521, 2022.
15. Fetimi, A., Merouani, S., Khan, M. S., Asghar, M. N., Yadav, K. K., Jeon, B.-H., Hamachi, M., Kebiche-Senhadji, O., Benguerba, Y., “Modeling of textile dye removal from wastewater using innovative oxidation technologies (Fe(II)/Chlorine and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Periodate processes): Artificial neural network–particle swarm optimization hybrid model”, *ACS Omega*, 7(16) : 13613-13625, 2022.
16. Water Online, “Innovating wastewater treatment: Harnessing AI for energy efficiency and enhanced performance”, 2024. Erişim Tarihi: 16.05.2025, <https://www.wateronline.com/doc/innovating-wastewater-treatment-harnessing-ai-for-energy-efficiency-and-enhanced-performance-0001>
17. Purecontrol, “Energy optimization of wastewater treatment by AI”, 2024. Erişim Tarihi: 16.05.2025, <https://www.purecontrol.com/en/applications/wastewater>
18. Chen, X., Lei, Z., Chang, J.-S., Lee, D.-J., “Navigating future wastewater treatment plants with artificial intelligence: Applications, challenges, and innovations”, *Journal of Cleaner Production*, 504 : 145467, 2025.

19. Zakur, Y., Márquez, F., Al-Taie, A., Alsaïdi, S., Alsadoon, A., Mirashrafı, S. B., Flaih, L., Zakoor, Y., “Artificial intelligence techniques applications in the wastewater”, *E3S Web of Conferences*, 605, 2025.
20. Xylem Inc., “Wastewater treatment plant uses AI to reduce aeration energy use by 30 percent”, 2020. Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2025, <https://www.xylem.com/en-us/making-waves/water-utilities-news/wastewater-treatment-plant-uses-ai-to-reduce-aeration-energy-use-by-30-percent/>
21. Ganthavee, V., Trzcinski, A. P., “Artificial intelligence and machine learning for the optimization of pharmaceutical wastewater treatment systems: A review”, *Environmental Chemistry Letters*, 22 : 2293-2318, 2024.
22. Cechinel, M. A. P., Neves, J., Fuck, J. V. R., Andrade, R. C., Spogis, N., Riella, H. G., Padoin, N., Soares, C., “Enhancing wastewater treatment efficiency through machine learning-driven effluent quality prediction: A plant-level analysis”, *Journal of Water Process Engineering*, 58 : 104758, 2024.
23. Mao, Z., Li, X., Zhang, X., Li, D., Lu, J., Li, J., Zheng, F., “Optimization of effluent quality and energy consumption of aeration process in wastewater treatment plants using artificial intelligence”, *Journal of Water Process Engineering*, 63 : 105384, 2024.
24. Aparna, K. G., Swarnalatha, R., Changmai, M., “Optimizing wastewater treatment plant operational efficiency through integrating machine learning predictive models and advanced control strategies”, *Process Safety and Environmental Protection*, 188 : 995-1008, 2024.
25. Nasir, F. B., Li, J., “Understanding machine learning predictions of wastewater treatment plant sludge with explainable artificial intelligence”, *Water Environment Research*, 96 : e11136, 2024.
26. Nagpal, M., Siddique, M. A., Sharma, K., Sharma, N., Mittal, A., “Optimizing wastewater treatment through artificial intelligence: Recent advances and future prospects”, *Water Science and Technology*, 90(3) : 731-757, 2024.
27. Baarimah, A. O., Bazel, M. A., Alaloul, W. S., Alazaiza, M. Y. D., Al-Zghoul, T. M., Almuhaya, B., Khan, A., Mushtaha, A. W., “Artificial intelligence in wastewater treatment: Research trends and future perspectives through bibliometric analysis”, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10 : 100926, 2024.
28. Wang, A.-J., Li, H., He, Z., Tao, Y., Wang, H., Yang, M., Savic, D., Daigger, G. T., Ren, N., “Digital twins for wastewater treatment: A technical review”, *Engineering*, 36 : 21-35, 2024.
29. Gulshin, I., Kuzina, O., “Optimization of wastewater treatment through machine learning-enhanced supervisory control and data acquisition: A case study of granular sludge process stability and predictive control”, *Automation*, 6(1) : 2, 2025.
30. Xylem Inc., “Xylem solution helps Italian water agency lower borehole pump energy use by 30 percent”, 2020. Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2025, <https://www.xylem.com/en-us/making-waves/water-utilities-news/xylem-solution-italy-lowers-borehole-pump-energy-use/>

31. Municipal Sewer & Water Magazine, “The role of AI and automation in modern treatment plants”, 24 Temmuz 2024. Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2025, <https://aquafitbd.com/blogs/the-role-of-automation-in-modern-water-treatment-plants#:~:text=Automation%20is%20revolutionizing...>
32. WaterOnline, “Five key areas in which artificial intelligence is set to transform water management in 2025”, 2025. Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2025, <https://smartwatermagazine.com/news/xylem-vue/five-key-areas-which-ai-set-transform-water-management-2025#:~:text=Dynamic...>
33. Nikhar, C. K. vd., “A critical review on applications of machine learning in wastewater treatment: Insights and implications for distillery wastewater”, *Water Quality Research Journal*, 59(2) : 120-137, 2024.
34. Monday, C., Zaghoul, M. S., Krishnamurthy, D., Achari, G., “Incremental machine learning and genetic algorithm for optimization and dynamic aeration control in wastewater treatment plants”, *Journal of Water Process Engineering*, 69 : 106600, 2025.
35. Wahl, J., *Aeration optimization at Beloit Wastewater Treatment Plant through predictive nutrient loading via AI-predicted daily averages and logic control*, Yüksek Lisans Tezi, University of Wisconsin – Madison, 2023.
36. Wang, A.-J., Li, H., He, Z., Tao, Y., Wang, H., Yang, M., Savic, D., Daigger, G. T., Ren, N., “Digital twins for wastewater treatment: A technical review”, *Engineering*, 36 : 21-35, 2024.
37. Procházka, J., Kalinčíková, Z., “Digital twin is the new generation tool in the optimization of WWTP operation”, *14th IWA Specialized Conference on the Design, Operation and Economics of Large Wastewater Treatment Plants (LWWTP2024)*, 2024. doi: 10.22618/TP.EI.20254.116003
38. Royal HaskoningDHV, “Aquasuite Autopilot delivers 20 % energy savings at Amsterdam West WWTP”, 2024. Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2025, <https://aquasuite.ai/case-studies/regional-water-authority-amstel-gooi-vecht-wwtp-amsterdam-west/>
39. Yetilmezsoy, K., Ozkaya, B., Cakmakci, M., “Artificial intelligence-based prediction models for environmental engineering”, *Neural Network World*, 21(3), 2011.
40. Manu, D., Thalla, A., “Artificial intelligence models for predicting the performance of biological wastewater treatment plant in the removal of Kjeldahl nitrogen from wastewater”, *Applied Water Science*, 7 : 3783-3790, 2017.
41. Moradi, M., Vasseghian, Y., Arabzade, H., Khaneghah, A., “Various wastewaters treatment by sono-electrocoagulation process: A comprehensive review of operational parameters and future outlook”, *Chemosphere*, 263 : 128314, 2021.
42. Dalhat, M., Mu’azu, N., Essa, M., “Generalized decay and artificial neural network models for fixed-bed phenolic compounds adsorption onto activated date palm biochar”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1) : 104711, 2021.
43. Zhao, Q. vd., “Optimized SVR model for predicting dissolved oxygen levels in activated sludge systems”, *Science of the Total Environment*, 913 : 168159, 2025.

44. Gonzalez, R. vd., “Prediction of COD in industrial WWTP using ANN”, *Scientific Reports*, 14 : 11425, 2024.
45. Demir, M. vd., “Development of a CNN for accurate land-use change detection in Tahtalı Reservoir Catchment”, *Remote Sensing Applications*, 27 : 100983, 2024.
46. Al-Farsi, M. vd., “Estimating COD in petro-WWTP via PLS-R”, *Chemosphere*, 321 : 138019, 2023.
47. Liakos, P. vd., “Data-driven leak localization in urban water networks using random forest”, *Engineering Structures*, 296 : 116597, 2024.
48. Yıldız, A. vd., “Isolation Forest model for anomaly detection in water consumption data”, *Information Technologies and Systems*, 8(1) : 45-55, 2024.
49. Wang, J. vd., “Real-time control of A2O process with deep reinforcement learning”, *Water*, 16(4) : 512, 2024.
50. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), “Belediyelerin atıksu istatistikleri 2022”, 2023. Erişim Tarihi: 16.05.2025, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Belediyelerin-Atiksu-Istatistikleri-2022>
51. Karimi, A. vd., “Energy benchmarking of Turkish municipal WWTPs”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 161 : 112420, 2022.
52. Veolia Water, “AI-driven aeration control cuts 28 % energy at Gresham WWTP”, 2021. Erişim Tarihi: 16.05.2025, <https://www.xylem.com/en-us/making-waves/water-utilities-news/wastewater-treatment-plant-uses-ai-to-reduce-aeration-energy-use-by-30-percent/>
53. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), “2025 yılı elektrik tarifeleri – Sanayi abone grubu”, 2025. Erişim Tarihi: 16.05.2025, <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-0/elektrik-tarifeler>
54. İzmir Su ve Kanalizasyon İdaresi (İZSU), “2025-2029 Stratejik Planı”, 2025. Erişim Tarihi: 16.05.2025, <https://www.izsu.gov.tr/YuklenenDosyalar/Dokumanlar/sp20252029.pdf>
55. Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresi (ASKİ), “ASKİ’nin dijital dönüşümü projesi”, 2025. Erişim Tarihi: 16.05.2025, <https://www.aski.gov.tr/tr/HABER/Askının-Dijital-Donusumu-Projesi-Hizla-Ilerliyor...>
56. Sidal, H., Altun, T., “Atık su arıtma tesislerinde BOİ tahmini için yapay sinir ağı ve regresyon analizi”, *Journal of Institute of Science and Technology*, 13(4) : 2934-2944, 2023.
57. Şerifoğlu, H., *Atıksu arıtma tesislerinde KOİ tahmini için makine öğrenmesi yaklaşımları*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2021.



# KARBON NÖTR GELECEĞE DOĞRU: AKILLI SİSTEMLERİN ENTEGRE UYGULAMALARIYLA KARBON AYAK İZİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

**Recep Önder SÜRMEİ<sup>1,a,\*</sup>**

<sup>1</sup>Çevre Mühendisliği, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bartın Üniversitesi, Merkez, Bartın.

<sup>a</sup>rsurmeli@bartin.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2869-6639

(Geliş/Received: 06.05.2025; Kabul/Accepted: 25.06.2025)

## ÖZET

Günümüzde sera gazları kaynaklı olan küresel ısınma ve iklim değişikliği, çevresel sürdürülebilirlik ve canlı yaşamı açısından en büyük tehditlerden biri haline gelmiştir. Karbon ayak izinin azaltılması, bu tehdidi en aza indirmek için başlıca stratejilerden birisi olup, akıllı sistemler bu süreçte oldukça önem taşımaktadır ve anahtar bir rol oynamaktadır. Bu derleme makalesi, akıllı sistemlerin karbon nötr bir geleceğe ulaşmadaki etkisini ve potansiyelini incelemektedir. Öncelikle, akıllı cihazlar, enerji yönetim sistemleri, ulaşım çözümleri ile su ve atıksu yönetimi gibi alanlardaki yenilikçi teknolojilerin çevresel sürdürülebilirliğe katkıları incelenmektedir. Çalışmada, IoT tabanlı enerji yönetimi, akıllı bina sistemleri, yenilenebilir enerjinin entegre edilmesi ve akıllı şebekeler gibi teknolojilerin enerji verimliliğini artırarak sera gazı salınımlarını nasıl düşürdüğü detaylı bir şekilde aktarılmakta ve örneklerle anlatılmaktadır. Ayrıca, elektrikli ve otonom araçlar, akıllı trafik yönetimi ve toplu taşıma ile beraber mikro mobilite optimizasyonunun şehirlerde sürdürülebilir bir hareketliliği teşvik ettiği vurgulanmaktadır. Bunun yanı sıra, akıllı su yönetimi ve döngüsel ekonomi yaklaşımlarının atık miktarını ve karbon dioksit başta olmak üzere sera gazı salınımını azaltmadaki rolü değerlendirilmektedir. Ancak, akıllı sistemlerin yaygınlaşmasını engelleyen bazı temel zorluklar bulunmaktadır. Çalışmada, bu engellerin aşılması için gerekli olan politikalar, teşvik mekanizmaları ve araştırma-geliştirme faaliyetleri tartışılmaktadır. Son olarak, akıllı sistemlerin geleceği ve gelişim alanları üzerine öneriler sunulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler: Karbon ayak izi, karbon nötr, akıllı sistemler, enerji verimliliği, akıllı ulaşım, akıllı cihazlar, akıllı enerji yönetimi, sürdürülebilirlik**

**TOWARDS A CARBON-NEUTRAL FUTURE: THE IMPACT OF INTEGRATED APPLICATIONS OF SMART SYSTEMS ON CARBON FOOTPRINT**

## ABSTRACT

Today, global warming and climate change were primarily driven by greenhouse gas emissions, which have become some of the most significant threats to environmental sustainability and all life forms. Reducing the carbon footprint is one of the key strategies for diminishing this threat, and smart systems play a crucial and central pivot role in this process. This review article examines the influence and

potential of smart systems in achieving a carbon-neutral future. It first investigates the contributions of innovative technologies in areas such as smart devices, energy management systems, transportation solutions, and water and wastewater management to environmental sustainability. The study provides a detailed discussion on how IoT-based energy management, smart building systems, the integration of renewable energy, and smart grids enhance energy efficiency and reduce greenhouse gas emissions. Furthermore, it features how electric and autonomous vehicles, intelligent traffic management, public transportation, and micro-mobility optimization boost sustainable urban mobility. In addition, the role of smart water management and circular economy approaches in limiting waste generation and reducing greenhouse gas emissions, especially carbon dioxide is evaluated. However, several key challenges delay the extensive adoption of smart systems. This study discusses the policies, stimulus mechanisms, and research and development efforts needed to overcome these barriers. Finally, it offers recommendations on the future of smart systems and potential areas for further development.

**Keywords:** Carbon footprint, carbon neutral, smart systems, energy efficiency, smart transportation, smart devices, smart energy management, sustainability

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde küresel ısınma ve iklim değişikliği, insan yaşamı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından en önemli ve ciddi risklerden biri olarak görülmekte ve her geçen gün etkilerini arttırarak devam etmektedir. Fosil yakıt kullanımı, sanayileşme, ulaşım ve tarım faaliyetleri, enerji tüketimi gibi insan kaynaklı eylemler, atmosfere büyük miktarda sera gazı (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, florlu gazlar vb.) salımına neden olarak küresel sıcaklık artışını hızlandırmaktadır [1]. Bu bağlamda, karbon ayak izi, bireylerin, kuruluşların, etkinliklerin ve ülkelerin faaliyetleri sonucunda atmosfere salınan toplam sera gazı miktarını ifade eder [2] ve karbon dioksit eşdeğeri (CO<sub>2</sub>eq/CO<sub>2</sub>e) olarak tümünün toplamı olarak gösterilmektedir. Bu emisyonların azaltılması, küresel ısınma ve iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir strateji ve girişim olmakta, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji kullanımı ve akıllı teknolojilerin entegrasyonu gibi çeşitli yöntemlerle sağlanabilmektedir [3].

Son yıllarda Birleşmiş Milletler'in küresel sürdürülebilir kalkınma amaçlarına (SKA) yönelik yapılan çalışmalar, karbon ayak izini düşürerek minimize etmeye ve hatta sıfırlamayı amaçlayan (karbon nötr) kapsamlı politikalar içermektedir [4]. SKA ve Paris İklim Anlaşması gibi uluslararası girişimler, ülkeleri ve şirketleri düşük karbonlu ekonomilere geçiş yapmaya teşvik etmekte [5] ve bazı durumlarda da zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, birçok ülke ve kurum, karbon nötr olma hedeflerini benimseyerek, azaltma veya dengeleme politikalarını hayata geçirmektedir [6, 7]. Bu politikalar arasında genellikle yenilenebilir enerji yatırımları, enerji verimli teknolojilerin yaygınlaştırılması ve dijitalleşme odaklı çözümler öne çıkmaktadır [8, 9].

Teknoloji alanındaki atılımlar, bu kritik sorunsalın çözümü noktasında kritik bir rol oynamaktadır. Akıllı sistemler, enerji yönetiminden ulaşım planlamasına, atık kontrolünden su yönetimine kadar geniş bir kapsamda sürdürülebilir çözümler sunmakta ve yüksek katkı sağlamaktadır [10, 11]. Yapay zekâ (artificial intelligence (AI)), büyük veri analitiği (big data

analytics), nesnelerin interneti (internet of things (IoT)) ve otomasyon teknolojileri, enerji tüketimini optimize etmek ve gereksiz kaynak kullanımını engellemek için giderek daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [12, 13]. Akıllı şebekeler (smart grids) aracılığıyla elektrik üretimi ve dağıtımı daha verimli bir duruma getirilmekte, akıllı ulaşım sistemleri sayesinde ise yüksek fosil yakıt tüketimi ve emisyonlar azaltılabilmektedir [14, 15].

Özellikle enerji sektöründe akıllı çözümler büyük fırsatlar sunmakta olup, uygulanacak çözümlerin etkisi de önemli farklar yaratabilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre edilmesi ve dağıtık enerji üretimi gibi yaklaşımlar, fosil yakıtlara olan ihtiyacı azaltmakta, enerji depolama sistemleri ve akıllı sayaçlar gibi teknolojiler tüketicilere daha verimli enerji kullanımı olanağı sunmaktadır [16]. Endüstriyel ve ticari tesislerde, yapay zekâ destekli enerji yönetim sistemleri ile gereksiz ve verimsiz enerji tüketimi tespit edilmekte, enerji verimliliği artırılmaktadır [17].

Bununla birlikte, ulaşım ve lojistik sektöründe de akıllı sistemler oldukça önemli roller üstlenmektedir. Elektrikli ve otonom araçlar, akıllı trafik yönetimi sistemleri ve paylaşımlı mobilite çözümleri, ulaşım kaynaklı ortaya çıkan istenmeyen salınımları düşürmeye yardımcı olmaktadır [18, 19]. Şehir içi ulaşımında akıllı toplu taşıma sistemleri, bireysel araç kullanımını azaltmakta böylece trafik yoğunluğu düşürülmekte ve yakıt tüketimi minimize edilmektedir. Ayrıca, lojistik sektöründe rota optimizasyonu sağlayan yapay zekâ algoritmaları, zamandan kazanç sağlamak hem de fazla yakıt kullanımını azaltmada etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır [20].

Bu çalışmada, karbon ayak izini azaltmada akıllı sistemlerin rolü incelenerek detaylı olarak ele alınmakta ve karbon nötr olabilmek için çeşitli yaklaşımlar incelenmektedir. Öncelikle, akıllı cihazlar ile enerji verimliliği, akıllı enerji yönetimi, ulaşım ve atık ve su yönetimi gibi temel alanlarda kullanılan teknolojiler araştırılarak, bu sistemlerin etkinliği ve başarılı uygulama örnekleri değerlendirilmektedir. Son olarak, akıllı sistemlerin yaygınlaşmasındaki zorluklar ve geleceğe yönelik olası gelişmeler tartışılmaktadır.

## **2. AKILLI SİSTEMLERİN KARBON AYAK İZİNİ AZALTMADAKİ ÖNEMİ (THE IMPORTANCE OF SMART SYSTEMS IN REDUCING CARBON FOOTPRINT)**

Günümüzde hızla gelişen dijital tabanlı teknolojiler, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada belirleyici derecede önemli bir rol oynamaktadır. Akıllı sistemler, enerji yönetimi, ulaşım, su ve atık yönetimi gibi birçok alanda yenilikçi çözümler sunmakta ve bu sayede kazanımlar elde edilmektedir [21-23]. Bu sistemler, büyük veri analitiği, yapay zekâ, nesnelerin interneti (IoT) ve otomasyon teknolojilerini kullanarak kaynakların daha verimli ve sürdürülebilir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır [24]. Özellikle enerji tüketimi, en büyük emisyon kaynaklarından biri olduğu için [25], akıllı cihazlar ve enerji verimliliği sağlayan teknolojiler büyük bir önem taşımaktadır [26].

Akıllı cihazlar, alışılmış sistemlere göre daha az enerji tüketen ve kullanıcı alışkanlıkları ile uyumlu teknolojiler olarak öne çıkmaktadır. IoT tabanlı enerji yönetimi, akıllı cihazlar ile donatılmış akıllı bina sistemleri ve otomasyon çözümleri tercihi ile enerji kullanımı optimize edilmekte ve gereksiz tüketim önlenmektedir [27]. Özellikle akıllı bina sistemlerinde kullanılmakta olan otomatik aydınlatma ve iklimlendirme sistemleri, enerji verimliliğini arttırmaktadır. Bu bağlamda, bu tip teknolojilerin daha çok kullanılması hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından büyük avantajlar sunmaktadır [28].

## **2.1. Akıllı Cihazlar ve Enerji Verimliliği (Smart Devices and Energy Efficiency)**

### **2.1.1. IoT Tabanlı Enerji Yönetimi (IoT-Based Energy Management)**

Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojisi, elektronik cihazların internet üzerinden birbiriyle bağlantılı çalışmasını sağlayarak, enerji tüketiminin düşürülmesi ve optimize edilmesine yardımcı olmaktadır. Akıllı sensörler ve izleme sistemleri ile donatılmış bu yapı, enerji kullanım verilerini toplayarak gerçek zamanlı analizler yapılmasını mümkün kılmaktadır [29]. Böylece enerji tüketimindeki aşırıliklar tespit edilmekte ve gereksiz tüketimin önüne geçilmektedir. Akıllı termostatlar, aydınlatma sistemleri ve elektrik şebekelerine entegre edilen IoT çözümleri sayesinde, binalardaki enerji yönetimi daha kullanışlı ve verimli hale getirilmektedir [30].

### **2.1.2. Akıllı Bina Sistemleri (Smart Building Systems)**

Akıllı bina sistemleri, enerji tüketimini en aza indirmek için tasarlanmakta ve geliştirilmektedir. Binalardaki en büyük enerji tüketim kaynakları arasında ısıtma, soğutma, havalandırma sistemleri ve aydınlatma yer almaktadır [31]. Akıllı havalandırma sistemleri (HVAC), ortam sıcaklığı ve hava kalitesini sürekli izleyerek, enerji kullanımını optimize etmektedir. Örneğin, yapay zekâ destekli sistemler, kullanıcıların bina içindeki hareketlerini analiz ederek, yalnızca gerekli alanlarda iklimlendirme sistemlerini devreye sokmaktadır [32].

Bunun yanı sıra, akıllı aydınlatma sistemleri de enerji verimliliğini artıran önemli teknolojiler arasında yer almaktadır. Hareket sensörleri ve zamanlayıcılar ile donatılmış bu sistemler, ortamda kimse bulunmadığında otomatik olarak kapanmakta ve gereksiz enerji tüketiminin önüne geçmektedir [33]. Ayrıca, akıllı bina yalıtım sistemleri, termal görüntüleme ve otomatik perde sistemleri gibi teknolojilerle desteklenerek ısı kayıplarını en düşük seviyeye indirmekte ve ısıtma-soğutma sistemlerinin daha verimli çalışmasını sağlamaktadır [34].

### **2.1.3. Enerji Verimli Cihazlar ve Otomasyon Sistemleri (Energy-Efficient Devices and Automation Systems)**

Günümüzde yeni nesil birçok elektrikli cihaz, enerji verimli tasarımlar ve akıllı kontrol aparatları ile donatılarak üretilmektedir. Enerji tasarruflu beyaz eşyalar, LED aydınlatmalar, düşük güç tüketen bilgisayarlar ve akıllı prizler, gereksiz enerji kullanımını düşürmeye

yardımcı olmaktadır [27]. Bu cihazlar, kullanım alışkanlıklarını analiz ederek enerji tüketimini otomatik olarak optimize eden algoritmalar ile de çalışmaktadır [35].

Otomasyon sistemleri de enerji verimliliğini artırmada oldukça önemli bir görev üstlenmektedir. Örneğin, endüstriyel tesislerde kullanılan akıllı üretim hatları, gereksiz enerji tüketimini engellemek için makinelerin yalnızca ihtiyaç duyulduğunda çalışmasını sağlamaktadır. Akıllı enerji yönetim panelleri, fabrikalar ve büyük tesislerde enerji tüketimini izleyerek gereksiz kullanımın önüne geçer ve enerji maliyetlerini de oldukça düşürmektedir [36].

## 2.2. Akıllı Enerji Yönetim Sistemleri (Smart Energy Management Systems)

Dünyada sürekli olarak artan enerji talebi ve fosil yakıt tüketiminin olumsuz çevresel etkileri, sürdürülebilir enerji yönetim sistemlerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Akıllı enerji yönetim sistemleri, enerji üretimi, dağıtım ve tüketimini daha etkin ve randımanlı hale getirmek için dijital teknolojileri kullanarak enerji kaynaklarının sürdürülebilir bir formda kullanılmasını ve idare edilmesini sağlamaktadır [37]. Bu akıllı sistemler, yenilenebilir enerji kaynaklarının bütünleşmesi, akıllı şebekeler ve enerji depolama sistemleri gibi öncü çözümlerle kayda değer katkılar sunmaktadır [10]. Aynı zamanda, veri analitiği ve yapay zekâ destekli enerji yönetimi ile enerji tüketimi iyileştirilmekte ve gereksiz kaynak israfının önüne geçilmektedir [38].

### 2.2.1. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Entegrasyonu (Integration of Renewable Energy Sources)

Klasik enerji üretim yolları büyük ölçüde fosil yakıtlara dayandığından, küresel karbon emisyonlarının önemli bir kısmı enerji sektörünün faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır [39]. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle (biyogaz üretimi vb.) gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması ve çeşitlendirilmesi gerekmektedir. [40]. Ancak, bu kaynaklar doğası gereği değişken olduğu için, enerji talebine kesintisiz ve dengeli bir şekilde yanıt verebilmek adına akıllı enerji yönetim sistemleri ile uyumlu çalışmaları gerekmektedir [41].

Akıllı enerji sistemleri, yenilenebilir enerji üretimini gerçek zamanlı olarak izlemekte ve talep ile üretim arasında optimum bir denge olmasını temin etmektedir [42]. Örneğin, güneş panellerinden elde edilen enerjinin en yüksek olduğu zaman dilimlerinde, fazla enerjinin depolanması veya doğrudan kullanılması için akıllı algoritmalar kullanılarak şebekeye yük bindirmeden enerjinin en verimli şekilde kullanılması sağlanmaktadır [43, 44]. Böylece, geleneksel enerji kaynaklarına olan talep azalmaktadır.

### 2.2.2. Akıllı Şebekeler ve Enerji Depolama Sistemleri (Smart Grids and Energy Storage Systems)

Akıllı şebekeler, enerji üretimi, iletimi ve tüketimi süreçlerini iyileştirmek amacıyla bilgi ve iletişim teknolojilerinin entegre edildiği modern elektrik altyapılarıdır. Akıllı şebekelerin temel amacı, enerji sistemlerinin verimliliğini artırmak, güvenilirliğini sağlamak ve sürdürülebilir bir enerji geleceği oluşturmaktır. Geleneksel elektrik şebekeleri, enerji üretim ve tüketim dengesini manuel kontrol yöntemleriyle sağlarken, akıllı şebekeler dijital teknolojiler ve otomasyon sistemleri sayesinde enerji akışını daha etkin ve verimli bir şekilde yönetmektedir [37]. Akıllı şebekeler ise, sensörler, IoT cihazları ve büyük veri analitiği kullanarak enerji arzını ve talebini gerçek zamanlı olarak izlemekte, optimize etmekte ve düzenlemektedir [45].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) entegrasyonu, akıllı şebekelerin en önemli zorluklarından biridir. YEK'lerin doğası gereği dalgalı ve öngörülemez olması, enerji arzında istikrarsızlıklara yol açabilir. Bu durum, enerji depolama sistemlerinin önemini artırmaktadır. Enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen fazla enerjiyi depolamakta ve gerektiğinde kullanılmasını sağlamakta ve şebeke dengesizliğini azaltmaktadır. Bu sayede, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımı sağlanmakta ve enerji israfı ile aşırı yüklenme gibi problemler daha önlenabilir olmaktadır. Daha önce yapılan bir çalışmada, mobil batarya sistemlerinin akıllı şebekelerde enerji depolama amacı için kullanılabilceği belirtilmektedir [46]. Bu, akıllı şebekelerin esnekliğini artırmakta, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Örneğin, gündüz saatlerinde güneş panelleri tarafından üretilen fazla enerji, bataryalarda depolanmakta ve gece saatlerinde kullanılabilir. Bu sayede, şebekedeki dalgalanmalar azalmakta ve enerji kesintileri önlenmektedir.

### 2.2.3. Veri Analitiği ile Enerji Tüketimi Optimizasyonu (Energy Consumption Optimization through Data Analytics)

Akıllı enerji yönetim sistemlerinin bir diğer önemli yapı taşı, veri analitiği destekli enerji tüketimi optimizasyonudur. Büyük veri analitiği, enerji kullanım alışkanlıklarını izlemekte ve gereksiz enerji tüketimini düşürmek ve verimliliği artırmak için kritik kararlar alınmasını sağlamaktadır [47]. Örneğin, akıllı sayaçlar ve enerji yönetim panelleri, tüketicilerin enerji kullanımını detaylı bir şekilde takip etme ve yönetme olanağı tanımaktadır. Bu sistemler, en yüksek enerji tüketim saatlerini belirlemekte ve kullanıcılara tasarruf önerileri vermektedir. Endüstriyel tesisler ve büyük ölçekli işletmelerde ise yapay zekâ algoritmaları, üretim süreçlerinde enerji tüketimini analiz ederek otomasyon çözümleri sunabilmektedir [48].

Özellikle, talep tarafı yönetimi (Demand Side Management, DSM) olarak bilinen yöntemle, kullanıcılar enerji tüketimlerini şebekenin düşük talep aldığı saat dilimlerine kaydırmakta; bu sayede hem enerji maliyetlerini düşürmekte hem de genel enerji verimliliğini artırmaktadır [49]. Bu sistemler, elektrikli araç şarj istasyonlarından akıllı ev sistemlerine kadar oldukça geniş bir kullanım alanında uygulanmakta ve enerji şebekelerinin sürdürülebilirliğini önemli katkılar

sunmaktadır [50]. Akıllı enerji yönetim sistemleri, yenilenebilir enerji entegrasyonu, akıllı şebekeler ve enerji depolama çözümleri ile enerji verimliliği artırmaktadır [10, 51].

Önümüzdeki yıllarda, yenilenebilir enerji teknolojilerinin yaygınlaşması ve akıllı enerji yönetim sistemlerinin daha fazla benimsenmesiyle, küresel ölçekte karbon emisyonlarının azalması beklenmektedir [10, 52]. Ancak, bu sistemlerin tam anlamıyla etkin hale gelebilmesi için altyapı yatırımlarının artırılması, enerji politikalarının bu yönde düzenlenmesi ve toplumda farkındalığın artırılması gerekmektedir.

### **2.3. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Sürdürülebilir Hareketlilik (Smart Transportation Systems and Sustainable Mobility)**

Günümüzde ulaşım sektörü, küresel karbon emisyonlarının oldukça büyük bir kısmından sorumlu tutulmaktadır. Özellikle fosil yakıtla çalışan kara, deniz ve hava araçlarının yaydığı sera gazları iklim değişikliğini hızlandırmaktadır [53, 54]. Şehirleşmenin ve motorlu taşıt kullanımının artması ve küresel ticaretin çok hızlı gelişmesi, hava kirliliğini ve enerji tüketimini artırmakta, bu da sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmayı zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda, akıllı ulaşım sistemleri ve sürdürülebilir hareketlilik çözümleri, ulaşımın çevresel etkilerini azaltmada kritik bir rol üstlenmektedir [55]. Elektrikli ve otonom araçlar, akıllı trafik yönetim sistemleri ve toplu taşıma optimizasyonu gibi yenilikçi yaklaşımlar bir gereklilik haline gelmektedir [19, 56].

#### **2.3.1. Elektrikli ve Otonom Araçlar (Electric and Autonomous Vehicles)**

Elektrikli araçlar, fosil yakıtlı içten yanmalı motorlara kıyasla çok daha düşük karbon emisyonlarına sahip olmakta ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla şarj edildiklerinde, emisyon seviyeleri çok düşük seviyelere ulaşmaktadır [57]. Ayrıca, batarya teknolojilerindeki gelişmeler ve hızlı şarj istasyonlarının yaygınlaşması, elektrikli araçların kullanımını artırmakta ve sürdürülebilir ulaşımı teşvik etmektedir [58].

Otonom araçlar ise yapay zekâ ve gelişmiş sensör sistemlerini kullanarak sürücüsüz çalışabilen yeni nesil ulaşım çözümleri sunmaktadır. Otonom sürüş teknolojileri, daha verimli yakıt kullanımı ve trafik akışının optimize edilmesi gibi önemli avantajlar sağlayarak enerji tüketimini azaltmaktadır [59]. Ayrıca, otonom araçların paylaşım sistemleriyle entegre edilmesi sayesinde bireysel araç sahipliği azalmakta yaklaşımının benimsenmesi sayesinde bireysel araç sahipliğini azaltmakta, böylece kazanımlar artmaktadır [19, 60].

#### **2.3.2. Akıllı Trafik Yönetim Sistemleri (Smart Traffic Management Systems)**

Trafik sıkışıklığı ve yoğunluğu, fazla fosil yakıt tüketimine neden olan en önemli faktörlerden biridir [61]. Akıllı trafik yönetim sistemleri, trafik akışını en uygun hale getirmek ve aşırı durkalk hareketlerini azaltmak için sensörler, yapay zekâ ve büyük veri analitiğini kullanmaktadır

[62]. Bu sistemler, trafik yoğunluklarını anlık olarak analiz ederek, trafik ışıklarını ve sinyalizasyon sistemlerini aktif ve hızlı bir şekilde yönetmektedir [63].

Örneğin, trafik kameraları ve IoT tabanlı yol sensörleri, araç yoğunluğunu sürekli izlemekte, trafik ışıklarının süresini dinamik bir şekilde anlık olarak ayarlamaktadır. Bu sayede, hem gereksiz bekleme süreleri azaltılmakta hem de tüketim minimuma indirilmektedir [64]. Ayrıca, sürücülere en uygun ve verimli yolculuk rotalarını öneren akıllı navigasyon sistemleri sayesinde trafik sıkışıklıkları azaltılmakta ve daha kısa sürede yolculuk mümkün hale gelmektedir [65].

### 2.3.3. Toplu Taşıma Optimizasyonu ve Mikro Mobilite Çözümleri (Public Transport Optimization and Micromobility Solutions)

Toplu taşıma sistemlerinin verimli ve etkin kullanımı, sera gazı salınımlarını azaltmada önemli bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır [66]. Akıllı ulaşım sistemleri, toplu taşıma ağlarını daha aktif hale getirmek amacıyla büyük veri analitiği ve IoT teknolojilerini kullanarak yolcu yoğunluklarını analiz etmekte, otobüs, metro veya tramvay seferlerini bu doğrultuda iyileştirmektedir [67]. Örneğin, dinamik güzergâh planlama sistemleri, yolcu taleplerine göre otobüs ve tren hatlarını anlık olarak güncellenmekte ve daha verimli bir ulaşım ağı oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra, dijital biletleme ve akıllı durak sistemleri gibi teknolojiler, yolcuların toplu taşımayı daha hızlı ve verimli bir şekilde kullanmalarını sağlamaktadır.

Mikro mobilite çözümleri de şehir içi ulaşımında sürdürülebilir alternatifler sunmaktadır. Elektrikli scooterlar, bisiklet paylaşım sistemleri ve yaya dostu ulaşım projeleri, bireysel araç kullanımını azaltmaktadır [68]. Akıllı mikro mobilite sistemleri, kullanıcıların en uygun aracı ve güzergâhı seçmesini sağlamakta ve şehir içi ulaşım daha verimli hale gelmektedir.

Elektrikli ve otonom araçlar, akıllı trafik yönetim sistemleri ve sürdürülebilir toplu taşıma çözümleri sayesinde, ulaşım kaynaklı emisyonlar minimize edilmektedir [18, 19]. Özellikle şehir planlamalarında bu sistemlerin yaygınlaştırılması, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Bu teknolojilerin daha geniş çapta benimsenebilmesi için, altyapı yatırımlarının artırılması, teşvik mekanizmalarının oluşturulması ve kullanıcı farkındalığının yükseltilmesi gerekmektedir. Önümüzdeki yıllarda, akıllı ulaşım teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte daha etkili ve yenilikçi çözümlerin hayata geçirilmesi beklenmektedir.

### 2.4. Akıllı Su ve Atık Yönetimi Çözümleri (Smart Water and Waste Management Solutions)

Sürdürülebilir şehirler oluşturmak amacıyla, su ve atık yönetimi, çevresel etkilerin minimize edilmesinde kritik bir rol üstlenmektedir. Geleneksel su ve atık yönetimi genellikle manuel kontrol mekanizmaları ile sağlandığı için kaynak israfına ve yüksek karbon emisyonlarına neden olabilmektedir [69]. Günümüzde ise akıllı su yönetimi, yapay zekâ ile desteklenen atık

yönetim sistemleri ve döngüsel ekonomi tabanlı bakış açısı sayesinde daha verimli, sürdürülebilir ve düşük karbon ayak izine sahip mekanizmalar geliştirilmektedir [69]. Bu öncü metotlar, su kaçaklarının hızlı tespitinden atıkların geri dönüştürülmesine kadar geniş bir yelpazede uygulanarak doğal kaynakların korunmasına da katkı sağlamaktadır.

#### **2.4.1. Akıllı Su Yönetim Sistemleri ve Kaçak Tespiti (Smart Water Management Systems and Leak Detection)**

Temiz su kaynaklarının giderek azalması [70], suyun etkin ve verimli kullanılması gerçeğini ortaya çıkarmıştır [71]. Bu sebeple farklı yaklaşımların kullanılması bir gereklilik olarak kabul edilmektedir. Akıllı su yönetim sistemleri, büyük veri analitiği, IoT sensörleri ve yapay zekâ destekli analiz yöntemleriyle su iletimini ve tüketimini optimize etmekte, kontrol altında tutmakta, su kayıplarını önlemektedir [72, 73]. Özellikle akıllı sayaçların kullanımı ve uzaktan takip sistemlerinin yaygınlaşması, kullanıcıların su tüketimini anlık olarak izlemelerini sağlamakta ve aşırı su tüketimini engellemektedir. Bunların yanı sıra, IoT tabanlı sensörler sayesinde su kaçakları daha erken tespit edilmekte, böylece su kayıpları hızlıca önlenmekte hem de su ile beraber enerji tasarrufu sağlanmaktadır [74, 75]. Akıllı su yönetimi, tarımsal sulama operasyonlarında da büyük önem taşımaktadır. Toprağın nem seviyesini anlık olarak ölçmekte, sadece ürünlerin ihtiyaç duyduğu miktarda su kullanımı sağlanmakta ve önemli derecede su israfı önlenmektedir [76].

#### **2.4.2. Atık Yönetiminde Yapay Zekâ ve Otomasyonun Kullanımı (Use of Artificial Intelligence and Automation in Waste Management)**

Yenilikçi atık yönetimi sistemleri ise, yapay zekâ ve otomasyon teknolojilerini kullanarak atıkların daha etkin bir şekilde sınıflandırılmasını ve geri dönüştürülmesini sağlamaktadır. Geleneksel atık yönetimi süreçlerinde, atık ayrıştırma işlemleri genellikle manuel olarak kişiler tarafından gerçekleştirilirken, günümüzde yapay zekâ destekli robotlar ve akıllı sensörler sayesinde atık türleri otomatik olarak tespit edilmekte ve geri dönüşüm oranları artırılmaktadır [77].

Örneğin, görüntü işleme teknolojileriyle desteklenen akıllı atık ayrıştırma sistemleri, organik, plastik, cam ve metal atıkları yüksek doğruluk oranıyla ayırmakta, böylece geri dönüşüm proseslerini daha etkin ve verimli hale getirmektedir [78]. Bu sayede, toplanan atıkların düzenli/düzensiz depolama sahalarına gönderilmesi yerine geri dönüşüme sokularak tekrar kullanılması sağlanmakta ve atıkların doğaya olan olumsuz etkileri azaltılmaktadır. Ayrıca, yapay zekâ destekli analiz sistemlerinin kullanılması ile atık toplama rotaları optimize edilmekte, böylece çöp kamyonlarının fazladan yakıt tüketimi önlenmekte ve lojistik süreçleri optimize edilmektedir [79]. Son olarak bu yaklaşımlar ülkemizde titizlikle uygulanmaya çalışılan sıfır atık girişimine de büyük katkılar sağlamaktadır.

### 2.4.3. Döngüsel Ekonomi ve Karbon Ayak İzi Azaltma Stratejileri (Circular Economy and Carbon Footprint Reduction Strategies)

Döngüsel ekonomi, atık oluşumunun en aza indirildiği, kaynakların tekrar tekrar kullanılabilirdiği ve üretim aşamalarının daha sürdürülebilir hale getirildiği, bir ekonomik model olarak tanımlanmaktadır [80]. Klasik ve yaygınlaşmış ekonomi modeli olan "al-kullan-at" yaklaşımı, atık miktarını artırarak çevre üzerinde baskı oluşturmaktadır. Döngüsel ekonomi stratejileri ise malzemelerin ve kaynakların geri kazanıldığı sürdürülebilir bir yaklaşım sunmaktadır [81].

Bu kapsamda, biyolojik olarak parçalanabilme özelliği olan malzemelerin tercih edilmesi, endüstri ve maden kaynaklı atıkların yeniden değerlendirilmesi [82] ve kompostlaştırma sistemleri gibi uygulamalar, karbon ayak izini düşürmek için önemli yöntemler arasında yer almaktadır [83]. Örneğin, organik atıkların biyogaz tesislerinde enerji üretimi için kullanılması, [84] hem atık miktarını azaltmakta hem de fosil yakıtlara olan bağımlılığı düşürerek sera gazı emisyonlarını azaltmaktadır [85]. Aynı şekilde, su ve atık geri dönüşüm süreçlerinin dijitalleşmesi, kaynak kullanımını optimize ederek doğrudan katkı sağlamaktadır.

## 3. KARBON AYAK İZİNİ AZALTMAYA YÖNELİK AKILLI SİSTEM UYGULAMALARI (SMART SYSTEM APPLICATIONS FOR REDUCING CARBON FOOTPRINT)

Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin etkilerinin derinleşmesi ile akıllı sistemlerin kullanımı giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Akıllı teknolojiler ile bezenmiş bu sistemler, enerji verimliliğini artırmakta, ulaşımı iyileştirmekte, su yönetiminden atıkların geri dönüşümüne kadar oldukça çeşitli alanda uygulanarak çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir. Dünya genelinde birçok ülke ve şehir, akıllı sistemleri kullanmak için çalışmalar yürütmektedir. Bu kapsamda, şehir içi ulaşımdan sanayi tesislerine, bireysel enerji yönetim çözümlerinden büyük ölçekli altyapı projelerine kadar birçok başarılı uygulama hayata geçirilmektedir.

### 3.1. Küresel Düzeyde Başarılı Akıllı Sistem Uygulamaları (Successful Smart System Applications at the Global Level)

Gelişmiş ülkelerde akıllı sistemler, sürdürülebilirlik politikalarının temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Örneğin, Singapur'un "Smart Nation" isimli akıllı şehir girişimi şehir altyapısını optimize etmek, enerji tüketimi azaltmak için büyük veriyi ve IoT teknolojilerini etkin bir şekilde kullanmaktadır [86]. Akıllı bina sistemleri sayesinde, enerji tüketimi anlık olarak izlenmekte ve gereksiz enerji kullanımının önüne geçilmektedir.

Benzer şekilde, Kopenhag, 2025 yılına kadar karbon nötr bir şehir olma hedefi doğrultusunda, akıllı ulaşım sistemleri ve yenilenebilir enerji çözümlerini uygulamaktadır [87]. Şehirde kullanılan akıllı trafik yönetim sistemleri, trafik akışını optimize ederek yakıt tüketimini düşürmekte ve toplu taşıma araçlarının verimli çalışmasını sağlamaktadır. Ayrıca, Kopenhag'ın

enerji şebekesi, rüzgar ve güneş enerjisinden elde edilen elektrik ile entegre çalışarak fosil yakıt kullanımını minimuma indirmektedir [88].

### 3.2. Yerel Düzeyde Akıllı Sistem Uygulamaları (Smart System Applications at the Local Level)

Türkiye’de de yönelik akıllı sistem uygulamaları giderek yaygınlaşmaktadır. İstanbul, Ankara ve İzmir gibi büyükşehirlerde akıllı trafik yönetim sistemleri devreye alınmakta, trafik yoğunluğunu azaltılmakta ve yakıt tüketimi optimize edilmektedir [89]. İstanbul’da kullanılan dinamik kavşak yönetim sistemleri, araç trafiğini anlık olarak izlemekte, trafik ışıklarının süresini optimize etmekte, böylece gereksiz dur-kalk hareketlerinden kaynaklanan yakıt tüketimini azaltmaktadır [90].

Bunun yanı sıra, Türkiye’nin birçok bölgesinde akıllı bina sistemlerinin uygulanması ve enerji verimli şehir aydınlatmalarının kullanımı yaygınlaşmaktadır [91]. Özellikle LED temelli akıllı sokak aydınlatmaları, hareket sensörleri aracılığıyla yalnızca gerektiğinde aktifleşerek elektrik tüketimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, sanayi tesislerinde tercih edilen akıllı üretim ve otomasyon teknolojileri sayesinde, endüstri kaynaklı emisyonların azaltılması yönünde çeşitli projeler yürütülmektedir [92].

### 3.3. Şehirlerde ve Endüstride Akıllı Sistemlerin Adaptasyonu (Adaptation of Smart Systems in Cities and Industry)

Şehirleşmenin hızlı bir şekilde artmasıyla, akıllı şehir kavramı sürdürülebilir kent yönetimi için büyük önem kazanmaktadır. Akıllı şehirler, yenilenebilir enerji kullanımına yönelen akıllı şebekeler, su yönetim sistemleri, sürdürülebilir ulaşım çözümleri ve bütünlük atık yönetimi gibi yenilikçi çözümler ile katkı sunmaktadır [93].

Sanayi sektörüne bakıldığında ise karbon salınımlarının azaltılması, özellikle enerjinin yoğun kullanıldığı üretim süreçlerinde büyük önem taşımaktadır. Akıllı üretim sistemleri, veri analitiği ve IoT cihazları kullanarak enerji tüketimini iyileştirmekte, böylece hem maliyetleri düşürmekte hem de çevresel etkiyi en aza indirmektedir [94, 95]. Örneğin, çelik ve çimento gibi enerji yoğun sektörlerde, üretim süreçlerine entegre edilen akıllı sensörler ve otomatik enerji yönetim sistemleri ile gereksiz enerji kullanımı önlenmektedir [96].

### 3.4. Karbon Azaltımına Yönelik Politika ve Teşvikler (Policies and Incentives for Carbon Reduction)

Akıllı sistemlerin etkili ve verimli olabilmesi için yasal düzenlemeler, teşvik mekanizmaları ve sürdürülebilir kalkınma politikaları büyük rol oynamaktadır [97]. Avrupa Birliği, ABD ve Çin gibi ülkeler, karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik teşvikler sağlayarak akıllı sistemlerin yaygınlaşmasını desteklemektedir [98].

Örneğin, Avrupa Yeşil Mutabakatı, 2030 yılına kadar karbon emisyonlarını %55 oranında azaltma hedefi doğrultusunda; akıllı enerji yönetimi, elektrikli araç teşvikleri ve akıllı şehir projelerini desteklemektedir [99, 100]. Bu kapsamda, yenilenebilir enerji projeleri, enerji verimliliğine yönelik bina dönüşümleri ve dijital teknoloji yatırımları teşvik edilerek desteklenmektedir [100].

Türkiye’de ise Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM) [101] ve sanayi sektörüne yönelik enerji verimliliği teşvikleri, emisyonları düşürmeye yönelik önemli adımlar arasında yer almaktadır [102, 103]. Ayrıca; yeşil enerji sertifikaları ve karbon ticaret mekanizmaları, özel sektörün sürdürülebilir enerji projelerine yönelmesini teşvik etmektedir [102, 104].

#### **4. GELİŞTİRİLMESİ GEREKEN ALANLAR VE YENİ ARAŞTIRMA FIRSATLARI (AREAS FOR IMPROVEMENT AND EMERGING RESEARCH OPPORTUNITIES)**

Akıllı sistemlerin karbon emisyonlarını azaltmadaki etkisini artırmak için yeni araştırmalar ve teknolojik yeniliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle şu alanlarda daha fazla çalışma ve geliştirmelerin yapılması gerekmektedir:

- Yenilenebilir enerji entegrasyonu: Güneş, rüzgar, jeotermal ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin, verimli ve kesintisiz kullanımı için akıllı depolama çözümlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Veri analitiği ve tahmin modelleri: Yapay zekâ destekli tahmin sistemleriyle, enerji tüketim alışkanlıkları ve eğilimleri daha iyi analiz edilerek daha verimli enerji yönetimi sağlanması önem arz etmektedir.
- Akıllı şehir projelerinin genişletilmesi: Akıllı şehir teknolojileri, şehir planlamasına daha fazla entegre edilmesi gerekmektedir.
- Dijital ikiz teknolojisi: Sanal modelleme ve simülasyon tekniklerinin kullanılarak enerji tüketimi ve çevresel etkiler önceden tahmin edilip iyileştirilmesine katkı sunulmaktadır.
- Otonom ve elektrikli araçların yaygınlaşması: Akıllı enerji ağlarının gelişmesi ve yapay zekâ tabanlı enerji verimliliği uygulamalarının artırılması sağlanmaktadır.
- Blok zinciri (blockchain) teknolojisinin kullanılması: Karbon kredileri ve yeşil finansman projelerinin şeffaf ve güvenilir bir şekilde yönetilmesine yardımcı olmaktadır.
- Akıllı tarım sistemlerinin geliştirilmesi: Su yönetimi ve sanayi süreçlerinde enerji verimliliği sağlanarak, emisyonların daha da düşmesi sağlanmaktadır.

Bu araştırma alanlarına yönelik yatırımların artırılması, akıllı sistemlerin katkısını daha da güçlendirecektir.

#### 4.1. Politika ve Finansman Desteklerinin Önemi (The Importance of Policy and Financial Support)

Akıllı sistemlerin yaygınlaşmasını sağlamak için devlet politikaları ve finansman desteği kritik bir rol oynamaktadır. Karbon vergileri, yeşil teşvikler, sübvansiyonlar ve yenilenebilir enerji yatırımları, akıllı sistemlerin benimsenmesini hızlandırabilecek kritik noktalardır. Bunun yanı sıra, özel sektör ve kamu iş birlikleriyle sürdürülebilir teknoloji projeleri teşvik edilmelidir.

Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı ve benzeri uluslararası girişimler, karbon nötr hedeflerine ulaşmada akıllı sistemlerin önemini vurgulamaktadır. Bu tür küresel politikalar, ülkeleri daha sürdürülebilir enerji ve ulaşım çözümlerine yatırım yapmaya teşvik edici araçlar arasında yer almaktadır.

#### 5. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION & DISCUSSIONS)

Sonuç olarak, akıllı sistemler karbon ayak izinin azaltılmasında kritik ve önemli bir rol üstlenmektedir. Ancak, bu sistemlerin daha etkin ve yaygın hale gelebilmesi için teknolojik inovasyonlar artırılması, politika desteklerinin sağlanması ve finansal teşviklerde iyileştirmeler ile de güçlendirilmesi gerekmektedir. Veri güvenliğinin sağlanması, yatırım maliyetlerinde yaşanan yükseklik ve etik gibi mevcut engeller aşıldığında, akıllı sistemler sürdürülebilir kalkınmanın temel taşlarından biri haline gelecektir.

Bu nedenle, hükümetler, akademik kuruluşlar ve özel sektör aktörleri, daha güçlü bir iş birliği ve ortak stratejiyle hareket etmelidir. Karbon nötr bir geleceğe ulaşmak için akıllı sistemlerin yenilikçi ve sürdürülebilir çözümler üretmesi kaçınılmaz bir zorunluluktur.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI REDDİ

Bu çalışma ile hiçbir şekilde çıkar elde edilmemiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Skytt, T., S.N. Nielsen, and B.-G. Jonsson, *Global warming potential and absolute global temperature change potential from carbon dioxide and methane fluxes as indicators of regional sustainability – A case study of Jämtland, Sweden*. Ecological Indicators, 2020. **110**: p. 105831.
2. Çelekli, A. and Ö.E. Zariç, *From Emissions to Environmental Impact: Understanding the Carbon Footprint*. International Journal of Environment and Geoinformatics, 2023. **10**(4): p. 146-156.
3. Alofaysan, H., *The Effect of Environmental Smart Technology and Renewable Energy on Carbon Footprint: A Sustainability Perspective from the MENA Region*. Energies, 2024. **17**(11): p. 2624.
4. Sofuoğlu, E. and D. Kirikkaleli, *Towards achieving net zero emission targets and sustainable development goals, can long-term material footprint strategies be a useful tool?* Environmental Science and Pollution Research, 2023. **30**(10): p. 26636-26649.

5. Akrofi, M.M., M. Okitasari, and R. Kandpal, *Recent trends on the linkages between energy, SDGs and the Paris Agreement: a review of policy-based studies*. Discover Sustainability, 2022. **3**(1): p. 32.
6. Chen, L., et al., *Strategies to achieve a carbon neutral society: a review*. Environmental Chemistry Letters, 2022. **20**(4): p. 2277-2310.
7. Zhao, X., et al., *Challenges toward carbon neutrality in China: Strategies and countermeasures*. Resources, Conservation and Recycling, 2022. **176**: p. 105959.
8. Zhang, H., *Pathways to carbon neutrality in major exporting countries: the threshold effect of digital transition*. Environmental Science and Pollution Research, 2023. **30**(3): p. 7522-7542.
9. Erdogan, S., U.K. Pata, and S.A. Solarin, *Towards carbon-neutral world: The effect of renewable energy investments and technologies in G7 countries*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023. **186**: p. 113683.
10. Elkhorchani, H. and K. Grayaa, *Novel home energy management system using wireless communication technologies for carbon emission reduction within a smart grid*. Journal of Cleaner Production, 2016. **135**: p. 950-962.
11. Mahapatra, C., A.K. Moharana, and V.C.M. Leung, *Energy Management in Smart Cities Based on Internet of Things: Peak Demand Reduction and Energy Savings*. Sensors, 2017. **17**(12): p. 2812.
12. Li, J., et al., *Methods and applications for Artificial Intelligence, Big Data, Internet of Things, and Blockchain in smart energy management*. Energy and AI, 2023. **11**: p. 100208.
13. Alaybeyoğlu, E. and C. Turhan, *TAŞRA BÖLGELEERDE KULLANILAN SİSTEMLERİN KABLOSUZ TEKNOLOJİLER YARDIMIYLA DENETİMİ*. Akıllı Sistemler Dergisi, 2023. **2**(1): p. 68-73.
14. Bayindir, R., et al., *Smart grid technologies and applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **66**: p. 499-516.
15. Coronado Mondragon, A.E., E.S. Coronado, and C.E. Coronado Mondragon, *Defining a convergence network platform framework for smart grid and intelligent transport systems*. Energy, 2015. **89**: p. 402-409.
16. Diahovchenko, I., et al., *Progress and Challenges in Smart Grids: Distributed Generation, Smart Metering, Energy Storage and Smart Loads*. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering, 2020. **44**(4): p. 1319-1333.
17. Bagdadee, A.H., L. Zhang, and M. Saddam Hossain Remus. *A Brief Review of the IoT-Based Energy Management System in the Smart Industry*. in *Artificial Intelligence and Evolutionary Computations in Engineering Systems*. 2020. Singapore: Springer Singapore.
18. Massar, M., et al., *Impacts of Autonomous Vehicles on Greenhouse Gas Emissions—Positive or Negative?* International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021. **18**(11): p. 5567.
19. Patella, S.M., et al., *Carbon Footprint of autonomous vehicles at the urban mobility system level: A traffic simulation-based approach*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019. **74**: p. 189-200.
20. Chen, W., et al., *Artificial Intelligence in Logistics Optimization with Sustainable Criteria: A Review*. Sustainability, 2024. **16**(21): p. 9145.
21. Mishra, P. and G. Singh, *Energy Management Systems in Sustainable Smart Cities Based on the Internet of Energy: A Technical Review*. Energies, 2023. **16**(19): p. 6903.
22. Dincer, I. and C. Acar, *Smart energy systems for a sustainable future*. Applied Energy, 2017. **194**: p. 225-235.

23. Salman, M.Y. and H. Hasar, *Review on environmental aspects in smart city concept: Water, waste, air pollution and transportation smart applications using IoT techniques*. Sustainable Cities and Society, 2023. **94**: p. 104567.
24. Goundar, S., A. Purwar, and A. Singh, *Applications of artificial intelligence, big data and internet of things in sustainable development*. 2022: CRC Press.
25. Nguyen, K.H. and M. Kakinaka, *Renewable energy consumption, carbon emissions, and development stages: Some evidence from panel cointegration analysis*. Renewable Energy, 2019. **132**: p. 1049-1057.
26. Shah, S.F.A., et al., *The Role of Machine Learning and the Internet of Things in Smart Buildings for Energy Efficiency*. Applied Sciences, 2022. **12**(15): p. 7882.
27. Shah, A.S., et al., *A Review on Energy Consumption Optimization Techniques in IoT Based Smart Building Environments*. Information, 2019. **10**(3): p. 108.
28. Baharudin, N., et al., *Smart lighting system control strategies for commercial buildings: A review*. International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration, 2021. **8**(74): p. 45.
29. Sinoplu, M. and E.B. Ceyhan, *Akıllı Binalarda Yapay Zekâ Destekli Enerji Yönetimi: Bir İnceleme*. Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 2023. **5**(1): p. 39-63.
30. Asopa, P., et al. *Reducing Carbon Footprint for Sustainable development of Smart Cities using IoT*. in *2021 Third International Conference on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks (ICICV)*. 2021.
31. Homod, R.Z., *Analysis and optimization of HVAC control systems based on energy and performance considerations for smart buildings*. Renewable Energy, 2018. **126**: p. 49-64.
32. Vijayan, D.S., et al., *Automation systems in smart buildings: a review*. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2020.
33. Sikder, A.K., et al. *IoT-enabled smart lighting systems for smart cities*. in *2018 IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*. 2018.
34. Metallidou, C.K., K.E. Psannis, and E.A. Egyptiadou, *Energy Efficiency in Smart Buildings: IoT Approaches*. IEEE Access, 2020. **8**: p. 63679-63699.
35. Youssef, H., et al., *Optimizing energy consumption patterns of smart home using a developed elite evolutionary strategy artificial ecosystem optimization algorithm*. Energy, 2023. **278**: p. 127793.
36. Stavropoulos, P., et al., *A Framework for CO2 Emission Reduction in Manufacturing Industries: A Steel Industry Case*. Designs, 2022. **6**(2): p. 22.
37. Rathor, S.K. and D. Saxena, *Energy management system for smart grid: An overview and key issues*. International Journal of Energy Research, 2020. **44**(6): p. 4067-4109.
38. Marinakis, V., *Big Data for Energy Management and Energy-Efficient Buildings*. Energies, 2020. **13**(7): p. 1555.
39. Das, A.K. and A. Sharma, *Chapter 1 - Climate change and the energy sector*, in *Advancement in Oxygenated Fuels for Sustainable Development*, N. Kumar, et al., Editors. 2023, Elsevier. p. 1-6.
40. Shan, S., et al., *Role of green technology innovation and renewable energy in carbon neutrality: A sustainable investigation from Turkey*. Journal of Environmental Management, 2021. **294**: p. 113004.

41. Hoang, A.T., V.V. Pham, and X.P. Nguyen, *Integrating renewable sources into energy system for smart city as a sagacious strategy towards clean and sustainable process*. Journal of Cleaner Production, 2021. **305**: p. 127161.
42. Aslan, E., N. Beşli, and A. Gümüşçü, *İnşaat Güneş Enerjisi Santrallerinin Akıllı Şebekelere Entegrasyonu*. Turkish Journal of Scientific Reviews, 2017. **10(2)**: p. 10-13.
43. Bahçeci, S. and F. Daldaban, *Dağıtım Şebekelerinde Güneş Panelleri ve Enerji Depolama Sistemi Uygulaması*. El-Cezeri, 2017. **4(3)**: p. 308-313.
44. Kaygusuz, A. and A. Acar, *Güç Sistemlerinde Farklı Enerji Depolama Seviyelerinde Sistem Kararlılığının İncelenmesi*. Computer Science, 2023. **Vol:8(Issue:1)**: p. 1-15.
45. Mostafa, N., H.S.M. Ramadan, and O. Elfarouk, *Renewable energy management in smart grids by using big data analytics and machine learning*. Machine Learning with Applications, 2022. **9**: p. 100363.
46. Wong, Y.S., et al. *Stationary and mobile battery energy storage systems for smart grids*. in *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*. 2011.
47. Diamantoulakis, P.D., V.M. Kapinas, and G.K. Karagiannidis, *Big Data Analytics for Dynamic Energy Management in Smart Grids*. Big Data Research, 2015. **2(3)**: p. 94-101.
48. Qian, F., et al., *Artificial intelligence for smart energy systems in process industries*. Applied Energy, 2022. **324**: p. 119684.
49. Oprea, S.-V., et al., *Insights into demand-side management with big data analytics in electricity consumers' behaviour*. Computers & Electrical Engineering, 2021. **89**: p. 106902.
50. Mariano-Hernández, D., et al., *A review of strategies for building energy management system: Model predictive control, demand side management, optimization, and fault detect & diagnosis*. Journal of Building Engineering, 2021. **33**: p. 101692.
51. Imran, A., et al., *Heuristic-Based Programable Controller for Efficient Energy Management Under Renewable Energy Sources and Energy Storage System in Smart Grid*. IEEE Access, 2020. **8**: p. 139587-139608.
52. Attia, M., et al. *Towards an efficient energy management to reduce CO2 emissions and billing cost in smart buildings*. in *2018 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. 2018.
53. Sun, Y.-F., Y.-J. Zhang, and B. Su, *How does global transport sector improve the emissions reduction performance? A demand-side analysis*. Applied Energy, 2022. **311**: p. 118648.
54. Khalili, S., et al., *Global Transportation Demand Development with Impacts on the Energy Demand and Greenhouse Gas Emissions in a Climate-Constrained World*. Energies, 2019. **12(20)**: p. 3870.
55. Bamwesigye, D. and P. Hlavackova, *Analysis of Sustainable Transport for Smart Cities*. Sustainability, 2019. **11(7)**: p. 2140.
56. Liu, C. and L. Ke, *Cloud assisted Internet of things intelligent transportation system and the traffic control system in the smart city*. Journal of Control and Decision, 2023. **10(2)**: p. 174-187.
57. Xia, X., et al., *Life cycle carbon footprint of electric vehicles in different countries: A review*. Separation and Purification Technology, 2022. **301**: p. 122063.
58. Mohammed, A., et al., *Strategies and sustainability in fast charging station deployment for electric vehicles*. Scientific Reports, 2024. **14(1)**: p. 283.

59. Chen, B., et al., *The Effects of Autonomous Vehicles on Traffic Efficiency and Energy Consumption*. Systems, 2023. **11**(7): p. 347.
60. Onat, N.C., et al., *Rebound effects undermine carbon footprint reduction potential of autonomous electric vehicles*. Nature Communications, 2023. **14**(1): p. 6258.
61. Pataki, D.E., et al., *An integrated approach to improving fossil fuel emissions scenarios with urban ecosystem studies*. Ecological Complexity, 2009. **6**(1): p. 1-14.
62. Nallaperuma, D., et al., *Online Incremental Machine Learning Platform for Big Data-Driven Smart Traffic Management*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019. **20**(12): p. 4679-4690.
63. Sharif, A., et al. *Internet of things — smart traffic management system for smart cities using big data analytics*. in *2017 14th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)*. 2017.
64. Khang, A. and K. Singh, *Internet of Things (IoT) Smart Sensing Traffic Lights for Revolutionizing Urban Traffic Management*, in *Driving Green Transportation System Through Artificial Intelligence and Automation : Approaches, Technologies and Applications*, A. Khang, Editor. 2025, Springer Nature Switzerland: Cham. p. 105-118.
65. Nasir, M.K., et al., *Reduction of Fuel Consumption and Exhaust Pollutant Using Intelligent Transport Systems*. The Scientific World Journal, 2014. **2014**(1): p. 836375.
66. Ercan, T., N.C. Onat, and O. Tatari, *Investigating carbon footprint reduction potential of public transportation in United States: A system dynamics approach*. Journal of Cleaner Production, 2016. **133**: p. 1260-1276.
67. Ushakov, D., et al., *The Internet of Things impact on smart public transportation*. Transportation Research Procedia, 2022. **63**: p. 2392-2400.
68. Zhang, Y., et al., *A comparative analysis of the potential of carbon emission reductions from shared micro-mobility*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2024. **72**: p. 104088.
69. Gupta, A.D., et al., *Smart Water Technology for Efficient Water Resource Management: A Review*. Energies, 2020. **13**(23): p. 6268.
70. Delikanlı, N.E., et al., *Removal of crystal violet dye with an innovative biosorbent (equisetum ramosissimum desf.)*. 2024, 2024. **23**(3): p. 12.
71. Delikanlı, N.E., *Bartın İlinde İçme/Kullanma Suları Üzerine Ön Çalışma*. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 2025. **11**(1): p. 1-13.
72. Singh, M. and S. Ahmed, *IoT based smart water management systems: A systematic review*. Materials Today: Proceedings, 2021. **46**: p. 5211-5218.
73. Krishnan, S.R., et al., *Smart Water Resource Management Using Artificial Intelligence—A Review*. Sustainability, 2022. **14**(20): p. 13384.
74. Fardan, S. and A. Al-Sartawi, *Roll of Artificial Intelligence in Smart Metering System for Water Distribution*, in *Artificial Intelligence, Internet of Things, and Society 5.0*, A. Hannon and A. Mahmood, Editors. 2023, Springer Nature Switzerland: Cham. p. 291-298.
75. Slaný, V., et al., *An Integrated IoT Architecture for Smart Metering Using Next Generation Sensor for Water Management Based on LoRaWAN Technology: A Pilot Study*. Sensors, 2020. **20**(17): p. 4712.
76. Kamienski, C., et al., *Smart Water Management Platform: IoT-Based Precision Irrigation for Agriculture*. Sensors, 2019. **19**(2): p. 276.

77. Ahmed, M.M., E. Hassanien, and A.E. Hassanien, *IoT-based intelligent waste management system*. Neural Computing and Applications, 2023. **35**(32): p. 23551-23579.
78. Mookkaiah, S.S., et al., *Design and development of smart Internet of Things–based solid waste management system using computer vision*. Environmental Science and Pollution Research, 2022. **29**(43): p. 64871-64885.
79. Fang, B., et al., *Artificial intelligence for waste management in smart cities: a review*. Environmental Chemistry Letters, 2023. **21**(4): p. 1959-1989.
80. Moraga, G., et al., *Circular economy indicators: What do they measure?* Resources, Conservation and Recycling, 2019. **146**: p. 452-461.
81. Ragossnig, A.M. and D.R. Schneider, *Circular economy, recycling and end-of-waste*. Waste Management & Research, 2019. **37**(2): p. 109-111.
82. Sürmeli, R.Ö., et al., *Phosphate recovery from digestate using magnesium-modified fungal biochar*. Clean Technologies and Environmental Policy, 2024.
83. Senadheera, U.E., et al., *Beyond Composting Basics: A Sustainable Development Goals—Oriented Strategic Guidance to IoT Integration for Composting in Modern Urban Ecosystems*. Sustainability, 2024. **16**(23): p. 10332.
84. Bayrakdar, A., et al., *Biogas production from chicken manure: Co-digestion with spent poppy straw*. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017. **119**: p. 205-210.
85. Afotey, B. and G.T. Sarpong, *Estimation of biogas production potential and greenhouse gas emissions reduction for sustainable energy management using intelligent computing technique*. Measurement: Sensors, 2023. **25**: p. 100650.
86. Ferro-Escobar, R., H. Vacca-González, and H. Gómez-Castillo, *Smart and Sustainable Cities in Collaboration with IoT: The Singapore Success Case, in Machine Learning for Smart Environments/Cities: An IoT Approach*, G. Marques, A. González-Briones, and J.M. Molina López, Editors. 2022, Springer International Publishing: Cham. p. 213-243.
87. Nikolaeva, A., *Smart Cities and (Smart) Cycling: Exploring the Synergies in Copenhagen and Amsterdam*. Journal of Urban Technology, 2024. **31**(1): p. 29-49.
88. Mathiesen, B.V., et al., *Copenhagen Energy Vision: A sustainable vision for bringing a Capital to 100% renewable energy*. 2015.
89. Aslan, M.M., *Akıllı Kent Uygulamalarının Kentlerde Yaşanan Trafik Sorununun ve Ulaşımına Bağlı Olarak Ortaya Çıkan Çevre Kirliliğinin Azaltılmasına Etkisi: Akıllı Ulaşım Uygulamaları*. JOEEP: Journal of Emerging Economies and Policy, 2024. **9**(2): p. 388-399.
90. Yazkan, B. *Impact of Adaptive Traffic Management System on Carbon Emissions: Istanbul Case*. in *A Pathway to Safe, Smart, and Resilient Road and Mobility Networks*. 2024. Cham: Springer Nature Switzerland.
91. Bıyık, C., *Smart Cities in Turkey: Approaches, Advances and Applications with Greater Consideration for Future Urban Transport Development*. Energies, 2019. **12**(12): p. 2308.
92. Uslu, H. and H. Erkekoğlu, *ENDÜSTRİ 4.0 TEKNOLOJİK DÖNÜŞÜM SÜRECİNDE SEÇİLMİŞ ÜLKELER VE TÜRKİYE'NİN DURUMU: AMPİRİK BİR ANALİZ*. Verimlilik Dergisi, 2021(4): p. 51-65.
93. Turner, S.W. and S. Uludag, *Toward Smart Cities via the Smart Grid and Intelligent Transportation Systems*. Smart Grid, 2017: p. 117-166.
94. Ma, S., et al., *Digital twin and big data-driven sustainable smart manufacturing based on information management systems for energy-intensive industries*. Applied Energy, 2022. **326**: p. 119986.

95. Zhang, Y., et al., *A big data driven analytical framework for energy-intensive manufacturing industries*. Journal of Cleaner Production, 2018. **197**: p. 57-72.
96. Oguntola, O., K. Boakye, and S. Simske, *Towards Leveraging Artificial Intelligence for Sustainable Cement Manufacturing: A Systematic Review of AI Applications in Electrical Energy Consumption Optimization*. Sustainability, 2024. **16**(11): p. 4798.
97. Bocken, N.M.P. and J.M. Allwood, *Strategies to reduce the carbon footprint of consumer goods by influencing stakeholders*. Journal of Cleaner Production, 2012. **35**: p. 118-129.
98. Guo, Q., Y. Wang, and X. Dong, *Effects of smart city construction on energy saving and CO2 emission reduction: Evidence from China*. Applied Energy, 2022. **313**: p. 118879.
99. Borysiak, O., et al., *Smart Transition to Climate Management of the Green Energy Transmission Chain*. Sustainability, 2022. **14**(18): p. 11449.
100. Fetting, C., *The European green deal*. ESDN Report, December, 2020. **2**(9): p. 53.
101. Sinan, B., *TÜRKİYE'DE YEKDEM İLE DÖVİZ KURU, ELEKTRİK TÜKETİMİ ARASINDAKİ İLİŞKİ (2012.1-2020.2)*. Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 2021. **6**(2): p. 191-207.
102. Aydoğdu, Ç., *Yenilenebilir Enerji Sektöründe ve Enerji Verimliliğinde Kamusal Destekler ve Türkiye'de Yansımaları*. Akademik İzdüşüm Dergisi, 2021. **6**(1): p. 52-74.
103. Orun, A.F. and B. Demirgil, *TÜRKİYE'DE YENİLENEBİLİR ENERJİ YATIRIMLARINA YÖNELİK TEŞVİKLER VE YENİLENEBİLİR ENERJİNİN EKONOMİK ETKİLERİ*. Uluslararası İktisadi ve İdari Akademik Araştırmalar Dergisi, 2021. **1**(2): p. 90-112.
104. Özcan, M., B. Ergün, and E. Ocaklı, *Türkiye'de Kullanılan Yenilenebilir Enerji Sertifika Sistemlerinin Değerlendirilmesi*. EMO Bilimsel Dergi, 2021. **11**(21): p. 29-41.