



Sahibi / Owner

Prof. Dr. M. Hanefi CALP

Baş Editör / Editor in Chief

Prof. Dr. M. Hanefi CALP

Yardımcı Editörler / Co-Editors

Doç. Dr. Ahmet DOĞAN

Doç. Dr. Hakan ÖZKÖSE

Doç. Dr. Serkan SAVAŞ

Alan Editörleri / Field Editors

Prof. Dr. Alptekin ERKOLLAR

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Prof. Dr. Latif ÖZTÜRK

Prof. Dr. Türksel KAYA BENSGHİR

Prof. Dr. Üstün ÖZEN

Dil Editörleri / Language Editor

Prof. Dr. Kadriye Dilek BACANAK

Yayın Etiğı Komitesi / Publication Ethics Committee

Dr. Öğr. Üyesi Emre YILDIRIM

Yayın Kurulu / Editorial Board

- Prof. Dr. Abdulkadir PEHLİVAN, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
- Prof. Dr. Ali HALICI, Başkent Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
- Prof. Dr. Aslıhan TÜFEKÇİ, Gazi Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
- Prof. Dr. Bilal GÜNEŞ, Gazi Üniversitesi, Fizik Eğitimi
- Prof. Dr. Bilal TOKLU, Gazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği
- Prof. Dr. Birgül Kutlu BAYRAKTAR, Boğaziçi Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
- Prof. Dr. Bogdan PATRUT, Alexandru Ioan Cuza Üniversitesi, Matematik ve Bilgisayar Bilimleri
- Prof. Dr. Bünyamin ER, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
- Prof. Dr. Cevriye GENCER, Gazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği
- Prof. Dr. Cihan TANRIÖVEN, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, İşletme
- Prof. Dr. Efendi NASİBOĞLU, Dokuz Eylül Üniversitesi, Bilgisayar Bilimleri
- Prof. Dr. Erdoğan DOĞDU, Çankaya Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği
- Prof. Dr. Erman COŞKUN, Bakırçay Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
- Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN, Gazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği
- Prof. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- Prof. Dr. Hamdi Tolga KAHRAMAN, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği
- Prof. Dr. Hasan Erdiñ KOÇER, Selçuk Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- Prof. Dr. Ilya LEVIN, Tel Aviv Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Eğitimi
- Prof. Dr. İsmail SARITAŞ, Selçuk Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- Prof. Dr. İsmail ŞAHİN, Gazi Üniversitesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği
- Prof. Dr. Kürşad ZORLU, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
- Prof. Dr. Latif ÖZTÜRK, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
- Prof. Dr. M. Ali AKCAYOL, Gazi Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği
- Prof. Dr. M. Nihat SOLAKOĞLU, Çankaya Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
- Prof. Dr. Mehmet AKTAN, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği
- Prof. Dr. Mehmet BAŞ, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, İşletme
- Prof. Dr. Meltem ÖZTURAN, Boğaziçi Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
- Prof. Dr. Metehan TOLON, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, İşletme
- Prof. Dr. Murat DENER, Gazi Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği
- Prof. Dr. Murat Paşa UYSAL, Başkent Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
- Prof. Dr. Nicu BIZON, Pitesti Üniversitesi, Elektronik, İletişim ve Bilgisayar Bilimleri
- Prof. Dr. Nursal ARICI, Gazi Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
- Prof. Dr. Oğuz KAYNAR, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
- Prof. Dr. Rahmi CANAL, İnönü Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği
- Prof. Dr. Sabri KOÇER, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği
- Prof. Dr. Selçuk KARAMAN, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
- Prof. Dr. Selçuk Kürşat İŞLEYEN, Gazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği
- Prof. Dr. Sevinç GÜLSEÇEN, İstanbul Üniversitesi, Enformatik

Prof. Dr. Shadi A. ALJAWARNEH, Jordan Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji
Prof. Dr. Suat ÖZDEMİR, Hacettepe Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği
Prof. Dr. Süleyman ERSÖZ, Kırıkkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği
Prof. Dr. Şükrü ÖZŞAHİN, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği
Prof. Dr. Talip KELLEGÖZ, Gazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği
Prof. Dr. Tülay İlhan NAS, Karadeniz Teknik Üniversitesi, İşletme
Prof. Dr. Türksel KAYA BENSGHIR, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, İşletme
Prof. Dr. Uğur YAVUZ, Atatürk Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
Prof. Dr. Üstün ÖZEN, Atatürk Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
Prof. Dr. Yılmaz GÖKŞEN, Dokuz Eylül Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
Doç. Dr. Gürcan ÇETİN, Muğla Sıtkı Koçma Üniversitesi, Bilişim Sistemleri Mühendisliği
Doç. Dr. Ekrem BAHÇEKAPILI, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
Doç. Dr. Hakan ÖZKÖSE, Bartın Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
Doç. Dr. Muhammet BERİGEL, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
Doç. Dr. Murat DÖRTERLER, Gazi Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği
Doç. Dr. Osman ÖZKARACA, Muğla Sıtkı Koçma Üniversitesi, Bilişim Sistemleri Mühendisliği
Doç. Dr. Paolo TORRONI, Bologna Üniversitesi, Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği
Doç. Dr. Utku KÖSE, Süleyman Demirel Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği
Doç. Dr. Ümit ATİLA, Gazi Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği
Doç. Dr. Ahmet DOĞAN, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
Dr. Öğr. Üyesi Bilgehan İMAMOĞLU, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
Dr. Öğr. Üyesi Emin Sertaç ARI, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
Dr. Öğr. Üyesi Güler KARAMAN, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt UYSAL, Gazi Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TANRIVERDİ, Gazi Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
Dr. Öğr. Üyesi Ömer Çağrı YAVUZ, Trabzon Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
Dr. Iulian FURDU, Vasile Alecsandri Üniversitesi, Bilişim ve Eğitim Bilimleri
Dr. Pandian VASANT, Teknoloji Petronas Üniversitesi, Bilişim Sistemleri
Dr. Tomayess ISSA, Curtin Üniversitesi, Bilişim Sistemleri
Arş. Gör. Berat TAHTABIÇEN, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
Arş. Gör. Nadide Gizem GÜRSÖN DOLAR, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri
Arş. Gör. Mahmud Zahid MUTLU, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri

Teknik Koordinatör / Technical Coordinator

Arş. Gör. Mahmud Zahid MUTLU

Sekreterlik / Secretarial

mahmud.mutlu@hbv.edu.tr, hanefi.calp@hbv.edu.tr

Modeling the Impact of Climate Change on Hydroelectric Production Using Machine Learning Approaches: The Case of Menzelet Dam in the Ceyhan Basin Makine Öğrenmesi Yaklaşımlarıyla İklim Değişikliğinin Hidroelektrik Üretim Üzerindeki Etkisinin Modellenmesi: Ceyhan Havzası Menzelet Barajı Örneği <i>Ezgi Öztürk İspir, Şerife Yurdağül Kumcu, H. Erdiñ Koçer</i>	131 - 144
Dynamics Of Digital Transformation In The Postal Sector: Technologies, Impacts And Future Outlook Posta Sektöründe Dijital Dönüşümün Dinamikleri: Teknolojiler, Etkiler Ve Geleceğe Bakış <i>Ali Burak Akbulut</i>	145 - 155
Enhancing Capabilities of Micro-SMEs in the Furniture Sector through a Digital Internationalisation Learning Hub Mobilya Sektöründeki Mikro-KOBİ'lerin Yeteneklerinin Dijital Uluslararasılaşma Öğrenme Merkezi Aracılığıyla Geliştirilmesi <i>Adem Tekerek, Alper Güzel, Susana Leal, João A.m. Nascimento, Sandra Oliveira</i>	156 - 162
Plastik Enjeksiyon Komponentlerinde Otomatik Hata Tespiti için Görüntü İşleme ve PLC Tabanlı Sistem Tasarımı Development of Automated Defect Detection System for Plastic Injection Components using Image Processing and PLC Integration <i>Ayşegül İncekara, Sabri Koçer, Şaban Gülcü</i>	163 - 174
Açıklanabilir Yapay Zekâ Araçları ve Transfer Öğrenme ile Görüntü Tabanlı Atık Sınıflandırması Image-Based Waste Classification With Explainable Artificial Intelligence Tools and Transfer Learning <i>İkra Kışlioğlu, Osman Güler</i>	175 - 191
Android İşletim Sistemine Sahip Cihazdan Elde Edilen Logcat Kayıtlarının Adli Bilişim Açısından Değerlendirilmesi Evaluation of Logcat Records Extracted from Android-Based Devices in Terms of Digital Forensics <i>Müge Begüm Dönmez, İbrahim Alper Doğru</i>	192 - 213
Use of Advanced Optimization and Hybrid Deep Learning Models in Ultra-Short-Term Wind Energy Forecasting: The Case of Hatay, Türkiye Ultra Kısa Vadeli Rüzgar Enerjisi Tahmininde Gelişmiş Optimizasyon ve Hibrit Derin Öğrenme Modellerinin Kullanımı: Hatay, Türkiye Örneği <i>Orkun Teke, Tolga Depci</i>	214 - 229



Makine Öğrenmesi Yaklaşımlarıyla İklim Değişikliğinin Hidroelektrik Üretim Üzerindeki Etkisinin Modellenmesi: Ceyhan Havzası Menzelet Barajı Örneği



Ezgi ÖZTÜRK İSPİR^a,



Şerife Yurdağül KUMCU^a,



H. Erdinç KOÇER^{*b}

^{a,*} Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Konya, 42140, Türkiye

^{b,*} Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Konya, 42130, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 14.06.2025
Kabul: 02.07.2025

Anahtar Kelimeler:
Makine öğrenmesi
İklim modelleri
Enerji tahmini

***Sorumlu Yazar**
e-posta:
ekocer@selcuk.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmanın temel amacı, iklimsel ve hidrolojik değişkenliklerin hidroelektrik enerji üretimi üzerindeki etkisini modellemek ve gelecekteki su-enerji yönetimi senaryoları için bilimsel altyapı sunmaktır. Aynı zamanda, makine öğrenmesi yaklaşımlarının enerji tahmin modellerinde uygulanabilirliğini test etmek ve bölgesel ölçekte karar vericilere yol gösterici bir analiz sağlamaktır. Bu amaçla, 1999–2020 yıllarına ait günlük hidro-meteorolojik gözlem verileri (yağış, sıcaklık, buharlaşma) üzerinde, makine öğrenmesi model yaklaşımı kullanılarak hidroelektrik enerji üretimi tahminlemesi yapılmıştır. Modelleme sürecinde tahminleme için Random Forest, Decision Tree, Gradient Boosting ve Support Vector Regression algoritmaları kullanılmış; her bir model GridSearchCV yöntemiyle hiperparametre optimizasyonuna tabi tutulmuştur. Model başarısı, R², MAE ve MSE gibi hata metrikleri ile karşılaştırılmış ve en yüksek başarı gösteren algoritma belirlenmiştir. Belirlenen en iyi yaklaşım kullanılarak, HadGEM2-ES, GFDL-ESM2M ve MPI-ESM-MR iklim modellerinden elde edilen 2023–2098 dönemi projeksiyon verileri (RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları altında) ile geleceğe yönelik enerji üretimi tahminleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma, iklim değişikliğinin hidroelektrik enerji potansiyeli üzerindeki etkilerini değerlendirmek açısından literatüre önemli katkı sunacaktır.

DOI: 10.59940/jismar.1719556

Modeling the Impact of Climate Change on Hydroelectric Production Using Machine Learning Approaches: The Case of Menzelet Dam in the Ceyhan Basin

ARTICLE INFO

Received: 14.06.2025
Accepted: 02.07.2025

Keywords:
Machine Learning
Climate Models
Energy Forecasting

***Corresponding Authors**
e-mail:
ekocer@selcuk.edu.tr

ABSTRACT

The main objective of this study is to model the effects of climatic and hydrological variability on hydroelectric energy production and to provide a scientific basis for future water-energy management scenarios. At the same time, to test the applicability of machine learning approaches in energy estimation models and to provide a guiding analysis for decision makers at the regional scale. For this purpose, hydroelectric energy production estimation was performed on daily hydro-meteorological observation data (precipitation, temperature, evaporation) for the years 1999–2020 using machine learning model approach. Random Forest, Decision Tree, Gradient Boosting and Support Vector Regression algorithms were used for estimation in the modeling process; each model was subjected to hyperparameter optimization with the GridSearchCV method. Model success was compared with error metrics such as R², MAE and MSE and the highest success algorithm was determined. Using the best approach determined, future energy production estimates were carried out with the projection data obtained from HadGEM2-ES, GFDL-ESM2M and MPI-ESM-MR climate models for the period 2023–2098 (under RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios). The study will make a significant contribution to literature in terms of evaluating the effects of climate change on hydroelectric energy potential.

DOI: 10.59940/jismar.1719556

1. INTRODUCTION

The impact of climate change on global water resources has become a significant area of research at both scientific and administrative levels due to recent alterations in the hydrological cycle [1]. Hydropower plants, in particular—relying on water-based energy production—are directly affected by climate variables such as precipitation regime, temperature, evaporation, and streamflow fluctuations [2-3]. One of Turkey's major river systems, the Ceyhan River, holds strategic importance for both agricultural irrigation and energy production due to a series of dams located along its course [4]. This study focuses on the Menzelet Dam situated within the Ceyhan Basin and applies machine learning algorithms to historical meteorological and hydrological data for hydroelectric energy production forecasting. The research aims to investigate the influence of climate change on energy potential while contributing to regional water management strategies.

Global climate change has profound impacts on various sectors, including water resources management, energy security, and ecosystem sustainability. These effects are especially pronounced in sectors dependent on water resources [1]. Rising temperatures, shifts in precipitation patterns, increases in evaporation, and irregularities in streamflow complicate both short-term planning and long-term strategic decision-making in hydroelectric energy production [2-3]. As a result, it has become essential to reassess hydroelectric potential both spatially and temporally, and to integrate advanced modeling techniques into this field.

Turkey is in a semi-arid climatic region and is therefore considered vulnerable to climate change. A significant portion of electricity generation in Turkey still relies on hydropower plants, which are directly influenced by natural climatic variability [5]. Rivers such as the Ceyhan River, which possess high energy potential, play a critical role in meeting agricultural and energy needs through dam systems. The Menzelet, Sır, Berke, and Aslantaş Dams, located consecutively along the Ceyhan Basin, exemplify an integrated water-energy management system that requires comprehensive modeling for optimization [4].

This study aims to forecast hydroelectric energy production potential using daily-resolution meteorological (temperature, precipitation, evaporation) and hydrological (inflow volume, discharge) data from the Menzelet Dam in the Ceyhan Basin, applying various machine learning algorithms. Long-term datasets obtained from the Turkish State Meteorological Service (MGM), State Hydraulic Works (DSİ), and Turkish Electricity Transmission Corporation (TEİAŞ) were used for data

preprocessing, missing data handling, feature engineering, and model validation. Prediction models were developed using Random Forest, Gradient Boosting, Decision Tree, and Support Vector Regression (SVR), and were evaluated comparatively based on error metrics including R^2 , MAE, and NSE. By modeling how climatic and hydrological variability affects hydroelectric production, this study aims to establish a scientific basis for future water-energy management strategies. It also tests the effectiveness of machine learning methods in energy forecasting models, offering a comprehensive analysis to guide regional decision-makers.

A review of similar studies reveals that artificial neural networks, regression models, and statistical approaches are widely used in energy production forecasting. For example, [6] used a multiple linear regression model to estimate energy production for the Keban Dam in Turkey, while [7] achieved high accuracy in hydrological predictions using artificial neural networks in the Euphrates Basin. Additionally, [8] used the SVR algorithm for hydroelectric plants in Pakistan to model the impact of climate variables on energy production, highlighting the strong predictive power of the approach. These studies indicate that machine learning-based forecasting models offer significant advantages in the face of increasing data complexity and multivariate environmental factors.

In this context, the contribution of this study lies in developing energy forecasting models supported by multiple climatic and hydrological variables in a region where consecutive dam structures exist along the Ceyhan River and where complex hydro-meteorological interactions are present. By comparing the developed models with similar examples in literature, the study provides a region-specific approach. Furthermore, it serves as a robust example for local authorities and planners in developing data-driven decision support systems.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Study Area and Dataset

This study focuses on the Menzelet Dam, one of the key hydroelectric production sites in Türkiye, located sequentially along the Ceyhan Basin. The Aslantaş, Berke, Sır, and Menzelet dams situated on the Ceyhan River play a critical role in meeting both the agricultural water demands and the energy production needs of the region.

To estimate the hydroelectric energy production potential, daily-resolution datasets which obtained from MGM, DSİ and TEİAŞ as mentioned before, covering the period 1999–2020 were utilized. Raw datasets were preprocessed to address missing values and ensure data quality. Missing observations were

handled using Python programming tools (pandas, numpy) through interpolation and forward/backward filling techniques [22,23]. Outliers were identified and removed to ensure consistency, and the data were normalized to improve the statistical reliability of the prediction models. Using these cleaned datasets, machine learning-based models were employed to forecast forward-looking hydroelectric energy production specific to the Menzelet Dam.

The study area is strategically located in the southern part of Türkiye, within the Ceyhan Basin, which hosts a series of major dam systems along the Ceyhan River, including the Menzelet Dam. The spatial layout of the Aslantaş, Berke, Sır, and Menzelet Dams along the river is illustrated in Figure 1. These dams are operated for both irrigation and hydropower generation and directly influence the flow regime and water resource management of the river. Arranged in a cascade structure from upstream to downstream, the dams are positioned in the following order: Menzelet → Sır → Berke → Aslantaş.

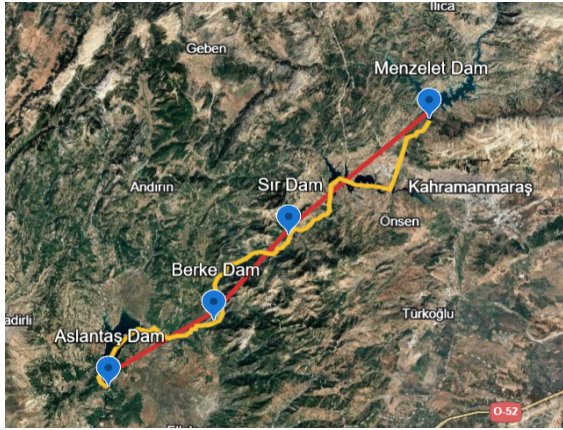


Figure 1. Location of the Menzelet, Sır, Berke, and Aslantaş Dams on the Ceyhan Basin

The elevation differences between dams, in addition to their geographic locations, are critical factors that determine hydroelectric energy production potential. The longitudinal profile of the Ceyhan River, including the heights and spatial positions of the dams, is presented in Figure 2.

The cross-sectional diagram clearly illustrates the net head differences between the dams and highlights the advantageous position of the Menzelet Dam, located at an elevation of 609 meters, in terms of energy production efficiency. These elevation differences have been considered one of the key parameters in energy generation calculations. The technical specifications of the Menzelet Dam and its hydroelectric power plant (HEPP) are provided in Table 1.

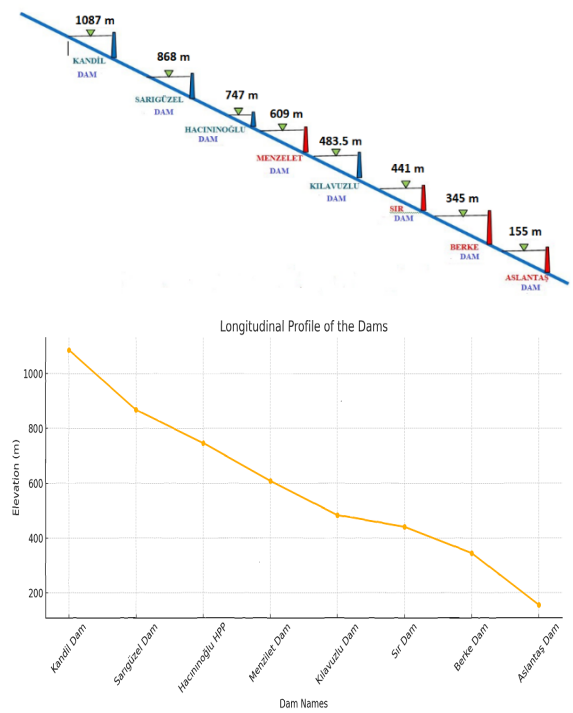


Figure 2. Longitudinal Profile of the Ceyhan River

Table 1. Technical Specifications of the Menzelet Dam and Hydroelectric Power Plant

Dam name	Menzelet
Province	Kahramanmaraş
River	Ceyhan
Min.Operating level	560.2 meter
Max.Operating level	609.4 meter
Water volume (Min. level)	533.900.000 m ³
Water volume (Max. level)	1.974.500.000 m ³
Water used for electricity	1.440.600.000 m ³
Installed capacity	124 Mwe
Annual electricity generation	482 Gwh

2.2. Trend Analysis

In the initial phase of the study, trends in the annual and seasonal mean streamflow data for the period 1999–2020 were evaluated. The Mann-Kendall (MK) test was employed to statistically assess the presence of monotonic increasing or decreasing trends over time, while the Sen's Slope estimator was used to quantify the direction and magnitude of these trends. Additionally, to avoid overlooking the influence of seasonal patterns, the Seasonal Mann-Kendall (SMK) test was applied. Together, these methods were used to detect climatic shifts in the time series data. The MK, SMK, and Sen's Slope methods are all non-parametric statistical techniques that do not require any prior assumptions about the underlying data distribution [9, 10, 11].

These combined approaches allowed for a comprehensive evaluation of hydrological changes by capturing both long-term and seasonal variations in flow behavior.

2.2.1 Mann-Kendall Test

The Mann-Kendall (MK) method is a non-parametric technique frequently used for trend analysis in time series data. It has been widely applied in the field of meteorology and was originally developed by [10] and further refined by [9]. One of the main advantages of the MK test is that it does not require the data to follow any specific distribution, which allows it to yield reliable results across a wide range of datasets. The MK test is used to determine whether a monotonic trend (consistently increasing or decreasing) exists within a time series. The test statistics, commonly denoted as S , are computed using the following formulation:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (2.1)$$

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} -1, & x_j - x_i < 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ 1, & x_j - x_i > 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

The variance value, which is required for the asymptotic form of the Mann-Kendall (MK) test—assuming a zero mean and normally distributed test statistic—is calculated using the following equation:

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} (n-1)(2n+5) \quad (2.3)$$

2.2.2 Seasonal Mann-Kendall (SMK) Test

The Seasonal Mann-Kendall (SMK) test can be applied to time series with seasonal variability without the assumption of normality [12]. Before computing the overall SMK test statistic, the Mann-Kendall test statistic (S) and its variance [$\text{Var}(S_i)$] are calculated separately for each month (or season). The Seasonal Kendall test statistics are then obtained using the following equations:

$$S' = \sum_{i=1}^{12} S_i \quad (2.4)$$

$$\text{Var}(S') = \sum_{i=1}^{12} \text{Var}(S_i) + \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{12} \text{Cov}(S_i, S_j) \quad (2.5)$$

The values S_i and S_j , $S_i = f(X_i)$ and $S_j = f(X_j)$ represents functions of independent random variables. Since all X_i and X_j correspond to mutually independent monthly data for months i and j , the covariance term in Equation (2.4) can be neglected [13]. Thus, the overall variance simplifies to:

$$\text{Var}(S') = \sum_{i=1}^{12} \text{Var}(S_i) \quad (2.6)$$

This leads to the following equation. Accordingly, the variance of the Seasonal Mann-Kendall statistic is given by:

$$\text{Var}(S') = \frac{\sum_i [n(n-1)(2n+5) - \sum t_i t_i (t_i-1)(2t_i+5)]}{18} \quad (2.7)$$

If the value of S' is positive, it indicates the presence of an increasing trend; if negative, it indicates a decreasing trend.

2.2.3 Sen's Slope Estimator

The Sen's Slope Estimator was used to determine the magnitude (slope) of trends in the time series. This method is non-parametric and does not require any assumptions regarding the distribution of the data, making it a robust and reliable approach for trend estimation [11].

Sen's method calculates the slope between all possible pairs of time points in the dataset and estimates the median of these slopes as the overall trend. This approach provides a slope estimate that is resistant to the influence of outliers and is particularly effective in environmental time series analysis. When used in conjunction with the Mann-Kendall test, it allows for a comprehensive interpretation of both the direction and magnitude of the detected trend.

For each data pair X_i and X_j where ($j > i$), the slope is calculated using the following equation:

$$\beta_{ij} = \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad (2.8)$$

$$\beta = \text{Median}(\beta_{ij}) \quad (2.9)$$

If the Sen's slope value is $\beta > 0$, it indicates a positive trend (increasing); if $\beta < 0$ it indicates a negative trend (decreasing); and if $\beta = 0$ it suggests that no trend is present. The Sen's slope coefficient is typically expressed in units such as °C/year or mm/year, representing the average annual rate of change.

2.3. Algorithms for Energy Estimation

In this study, conducted to project energy production in the Ceyhan Basin and Menzelet Dam for the period 2023–2098, four different algorithms were employed to estimate energy production and associated hydrological variables. These algorithms include Random Forest (RF), Decision Tree (DT), Gradient

Boosting Regressor (GBR), and Support Vector Regression (SVR). Each of these models is known for its ability to capture non-linear relationships and its use of distinct learning strategies.

The datasets used in this study consist of Historical energy production records from 1999 to 2020, and Climate model projections for the period 2023–2098 under different climate change scenarios.

2.3.1 Random Forest (RF)

Random Forest is an ensemble learning method composed of multiple decision trees. The model trains many decision trees, each built using different subsets of the data and feature space and makes predictions by averaging the outputs of these individual trees [14].

It is favored due to its robustness against overfitting, tolerance to noisy data, and its ability to provide high predictive accuracy. These properties make Random Forest particularly suitable for modeling complex, non-linear relationships in environmental and hydrological datasets.

2.3.1 Decision Tree (DT)

The Decision Tree algorithm makes predictions by recursively splitting the dataset into branches based on feature values. In the tree structure, each internal node represents a feature-based decision, while leaf nodes correspond to predicted output values [15].

This model is highly interpretable and provides fast and effective solutions, particularly for small datasets. However, when used alone, it may be prone to overfitting, especially in the presence of noisy or complex data [25].

2.3.3 Gradient Boosting Regressor (GBR)

Gradient Boosting is an ensemble technique that builds a sequence of weak learners—typically decision trees—where each new model is trained to minimize the errors made by the previous one [16]. This iterative process focuses on correcting residuals, allowing the model to progressively improve its accuracy.

The architecture of Gradient Boosting is especially effective in capturing complex and non-linear relationships within datasets, and it has demonstrated high predictive performance in a wide range of regression tasks.

2.3.4 Support Vector Regression (SVR)

Support Vector Regression (SVR) aims to fit the data within a specified margin of tolerance (ϵ), positioning data points as close as possible to a hyperplane that best represents the underlying trend. This model can

produce accurate predictions even in high-dimensional spaces and is particularly effective for small datasets and non-linear problems [17].

In this study, observational data from 1999 to 2020 were used to train machine learning models. During the training phase, four different regression algorithms were employed Random Forest [14], Decision Tree [15], Gradient Boosting [16], and Support Vector Regression [17].

For each model, hyperparameter tuning was performed using the GridSearchCV method. During this optimization process, the performance of the models was evaluated using the following error metrics R^2 (Coefficient of Determination), MAE (Mean Absolute Error), MSE (Mean Squared Error). These metrics provided a comprehensive assessment of model accuracy, robustness, and overall predictive capability.

During the model evaluation phase, the algorithm that achieved the highest R^2 and the lowest MAE and MSE values was identified as the most successful model.

This best-performing model, selected during the training stage, was subsequently applied to project future energy production using climate projection data from the HadGEM, GFDL, and MPI models under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the period 2023–2098.

In this way, a robust forecasting system was established that not only learns from historical observations but is also capable of projecting future energy production under different climate change scenarios.

2.4. Projections for Future Energy Production (Regression-Based Modeling)

Using the machine learning model that demonstrated the best performance during training, future hydroelectric energy production was projected for the period 2023–2098. This forecasting process incorporated three global climate models (GCMs) and two greenhouse gas emission scenarios Climate Models; HadGEM2-ES (Met Office Hadley Centre), GFDL-ESM2M (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory), MPI-ESM-MR (Max Planck Institute for Meteorology) Emission Scenarios; RCP 4.5 – Medium stabilization scenario, RCP 8.5 – High-emission “business-as-usual” scenario. These models are part of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) and were utilized in the IPCC’s Fifth Assessment Report [18].

Daily climate projection data, including precipitation, temperature, and evaporation, obtained from the above GCMs were used as inputs to the pre-trained machine learning model. In this way, future hydroelectric energy production potential was

estimated under varying climatic conditions represented by the selected scenarios.

This approach provides a scientifically significant contribution, both in terms of testing the generalizability of the model and evaluating the potential impacts of climate change on energy production.

The climatic inputs used for energy production forecasts were obtained from three different Global Climate Models (GCMs) developed under the framework of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5). Each of these models incorporates distinct representations of physical processes and atmosphere-ocean interactions, offering diverse perspectives on future climate projections.

2.4.1 HadGEM2-ES (Hadley Centre Global Environmental Model, Version 2 – Earth System)

The HadGEM2-ES model was developed by the UK Met Office – Hadley Centre. It is structured as an integrated Earth System Model (ESM) that incorporates interactions among the atmosphere, ocean, land surface, and carbon cycle. Due to its high spatial resolution and detailed dynamic ocean-atmosphere coupling, it provides comprehensive projections of temperature and precipitation distributions [19].

2.4.2 GFDL-ESM2M (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory – Earth System Model 2 Medium Resolution)

The GFDL-ESM2M model was developed by the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) of the U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Offering medium spatial resolution in its atmospheric component, the model simulates long-term climate responses by incorporating carbon cycle dynamics, aerosols, and biological processes [20].

Thanks to the integration of both terrestrial and oceanic carbon sources, GFDL-ESM2M is particularly robust in modeling climate-interactive processes.

2.4.3 MPI-ESM-MR (Max Planck Institute Earth System Model – Medium Resolution)

The MPI-ESM-MR model was developed by the Max Planck Institute for Meteorology in Germany. With moderate spatial resolution, it integrates components of the atmosphere, ocean, biosphere, and cryosphere, offering a comprehensive simulation of the Earth system [21].

This model has demonstrated strong performance in regional climate analyses, particularly for areas such as Europe and the Mediterranean Basin.

2.5. Software and Visualization

All data processing, analysis, and modeling steps in the study were carried out using Python [22,23], an open-source programming language. Thanks to Python's extensive library ecosystem, processes such as data mining, machine learning, and visualization were implemented effectively.

All calculations, including statistical tests (Mann-Kendall, Sen's Slope), machine learning algorithms (Random Forest, SVR, etc.), and error metrics (R^2 , MAE, MSE), were performed using Python and visualized with the Matplotlib and Seaborn libraries. Using Python's widely adopted scientific computing libraries—NumPy, Pandas, Scikit-learn, and Matplotlib—both model training with historical data and future predictions and graphical interpretations were successfully conducted.

All analyses were carried out using the Python programming language and open-source libraries. Python's flexible structure enabled the integrated execution of data preprocessing, model training, hyperparameter optimization, and advanced visualization processes.

3. FINDINGS

3.1. Mann-Kendall Test and Sen's Slope Estimator

A p-value of less than 0.05 indicates the presence of a trend at the corresponding station. Additionally, if the Z value exceeds the critical value $Z_{1-\alpha/2}$ (or $Z_{\alpha/2}$) (e.g., ± 1.96 at a 5% significance level) from the standard normal distribution table, a trend is considered to exist. In such cases, the sign of the Z value is used to determine whether the trend is increasing or decreasing. A negative Z value indicates a decreasing trend, while a positive Z value indicates an increasing trend [24]. Accordingly, the results of the Mann-Kendall trend analysis are presented in Table 2.

Table 2. Mann-Kendall Trend Analysis Results

Variable	Tau	Z	p-value	Slope	Trend
P (mm)	-0.015	-1.531	0.126	-1.14	-
T (°C)	0.481	3.102	0.0019	0.063	↑
E (mm)	-0.020	-0.114	0.909	-1.42	-
Q (m³/s)	-0.108	-0.705	0.481	-0.014	-

According to the results of the Mann-Kendall test, for streamflow (Q), the Kendall's tau value is -0.108 and

the p-value is 0.481, indicating that there is no statistically significant trend ($Z_s = -0.705$). For temperature, the Kendall's tau value is 0.481 and the p-value is 0.00175, indicating a statistically significant increasing trend ($Z_s = 3.102$). For precipitation, the Kendall's tau value is -0.015 and the p-value is 0.126, suggesting no statistically significant trend ($Z_s = -1.531$). As for evaporation, the Kendall's tau value is -0.020 and the p-value is 0.909, also indicating no statistically significant trend ($Z_s = -0.114$).

3.2. Seasonal Mann-Kendall Test and Sen's Slope Estimator

The seasonal parameter results by year for the Seasonal Kendall Test and Sen's Slope Estimator are presented in the table below, followed by corresponding graphs. Initially, Kendall's tau and p-values were calculated separately for each season.

For the precipitation parameter, tau and z-values are low across all seasons, and p-values are above 0.05, indicating that there is no statistically significant trend. Sen's Slope values are small (positive or negative), suggesting minimal change. Thus, no noticeable increase or decrease was observed in seasonal precipitation.

For the temperature parameter, $\text{Tau} > 0.4$, $Z > 2.8$, and $p\text{-value} < 0.05$ across all seasons, indicating a statistically significant increase.

Sen's Slope values are positive, small, but consistent. A significant increasing trend in temperature has been identified across all seasons from winter to autumn, indicating that seasonal warming is ongoing.

For the evaporation parameter, Tau is negative and small in all seasons, with insignificant Z and p-values ($p > 0.05$). Sen's Slope is low and negative. This suggests a decreasing trend in evaporation, but it is not statistically significant. The changes are minor and may be random.

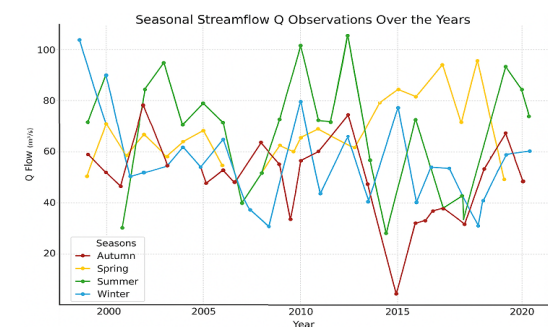
Regarding the streamflow (discharge) parameter, no significant trend was found in all seasons except summer ($p > 0.05$). In summer, $\text{Tau} = 0.49$, $Z = 4.35$, $p = 0.00$, indicating a statistically significant increasing trend in streamflow during this season. In other seasons, streamflow appears to be stable or slightly decreasing, but the trends are not statistically significant.

The results obtained from Seasonal Mann-Kendall trend analysis are given in Table 3.

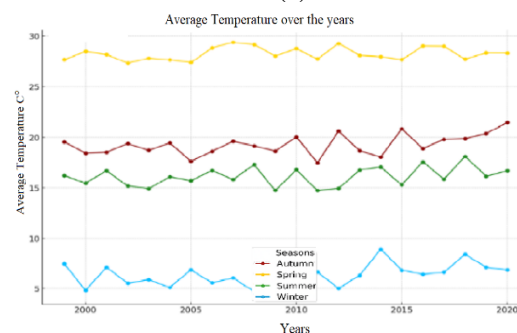
Table 3. Seasonal Mann-Kendall Trend Analysis Results

Seasonal Variable	Tau	Z	p-value	Slope	Trend
P (mm) Winter	-0.11	-0.90	0.37	-1.2	-
P (mm) Spring	0.05	0.40	0.69	0.4	-
P (mm) Summer	0.09	0.80	0.42	0.8	-
P (mm) Autumn	-0.02	-0.20	0.85	-0.1	-
T (°C) Winter	0.48	3.10	0.00	0.06	↑
T (°C) Spring	0.44	2.80	0.01	0.05	↑
T (°C) Summer	0.52	3.50	0.00	0.07	↑
T (°C) Autumn	0.50	3.30	0.00	0.06	↑
E (mm) Winter	-0.10	-0.70	0.48	-1.1	-
E (mm) Spring	-0.03	-0.30	0.78	-0.3	-
E (mm) Summer	-0.06	-0.50	0.62	-0.6	-
E (mm) Autumn	-0.09	-0.80	0.44	-1	-
Q (m³/s) Winter	-0.21	-0.07	0.18	-0.49	-
Q (m³/s) Spring	-0.06	-0.53	0.74	-0.72	-
Q (m³/s) Summer	0.49	4.35	0.00	0.07	↑
Q (m³/s) Autumn	-0.12	-1.06	0.47	-0.02	-

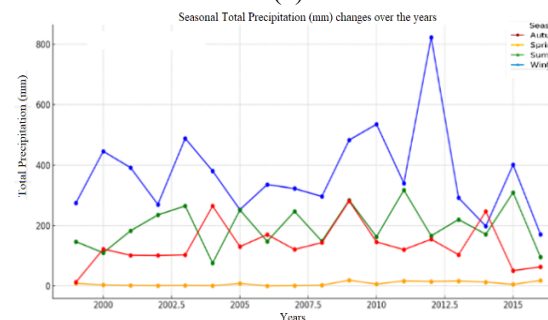
The graphs related to Seasonal Mann-Kendall Trend Analysis for each parameter are presented in Fig.3.



(a)



(b)



(c)

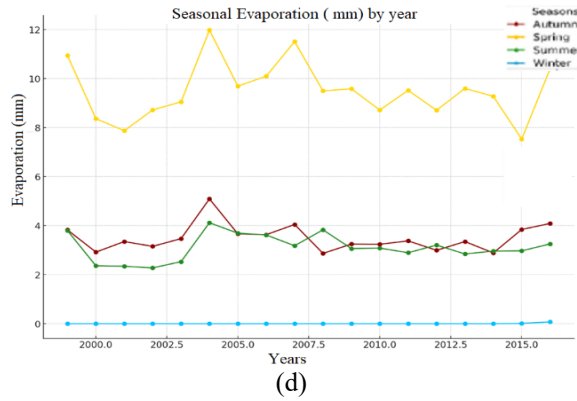


Figure 3. Seasonal Mann-Kendall Graphs by Year (1999-2020) (a)Streamflow (b)Temperature (c)Precipitation (d)Evaporation

The findings related to the z-scores obtained for the parameters in the Seasonal Mann-Kendall test are presented below (Table 4). The graphs related to these results for each parameter are presented in Fig.4.

Table 4. Mann-Kendall Z-Score Results

Variable	Z'	Var (S')	Z- Score
P (mm)	0.54	3.84	-0.24
T (°C)	0.97	3.74	-0.02
E (mm)	0.45	3.78	-0.28
Q (m ³ /s)	0.10	3.70	-0.47

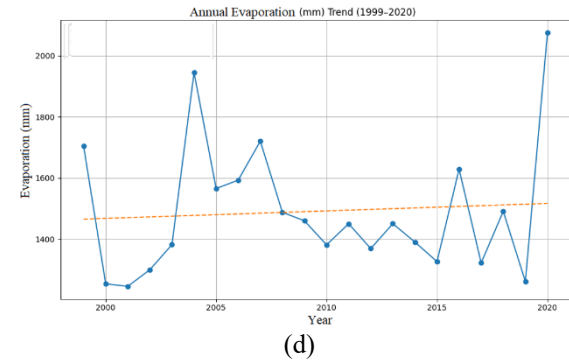
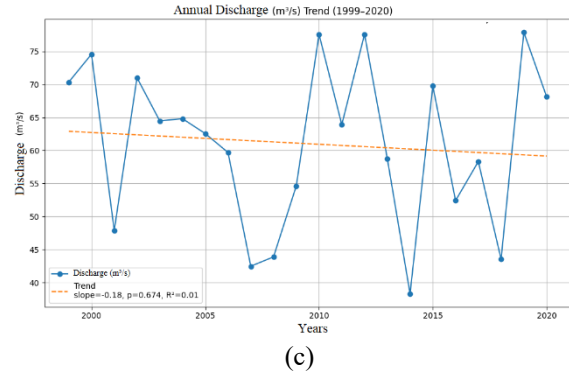
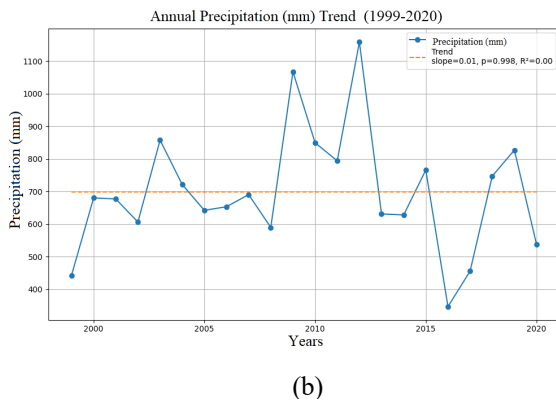
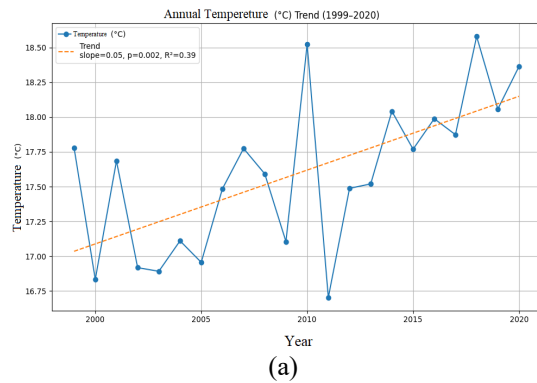


Figure 4. Mann-Kendall graphs by year (1999-2020) (a)Temperature (b)Precipitation (c)Discharge (d)Evaporation



In conclusion, for Q (streamflow), there is no statistically significant trend across seasons over the years. An increasing trend is observed only during the summer months. For temperature, there is no clear trend in the data over the years overall. Similarly, for precipitation, there is no statistically significant seasonal trend over the years. The same applies to evaporation, where no significant seasonal trend is observed throughout the years.

3.3. Mann-Kendall Test and Sen's Slope Estimator for HadGEM2-ES, GFDL-ESM2M and MPI-ESM-MR models– under RCP 4.5 and RCP 8.5

Model	Variable	Scenario	Tau	P-value	Sen's Slope	Trend
HadGEM2-ES	P (mm)	RCP4.5	-0.1	0.201	-1.2072	—
		RCP8.5	-0.095	0.226	-0.9428	—
	E (mm)	RCP4.5	-0.068	0.389	-4.8666	—
		RCP8.5	-0.095	0.228	-4.0013	—
	T (C°)	RCP4.5	0.588	0	0.0256	↑
		RCP8.5	0.778	0	0.0592	↑
GFDL-ESM2M	P (mm)	RCP4.5	-0.009	0.911	0.0303	—
		RCP8.5	-0.196	0.012	-2.3041	↓
	E (mm)	RCP4.5	-0.057	0.47	-1.8844	—
		RCP8.5	-0.25	0.001	-10.6756	↓

MPI-ESM-MR	T (C°)	RCP4.5	0.149	0.057	0.0084	—
		RCP8.5	0.658	0	0.0455	↑
	P (mm)	RCP4.5	-0.112	0.153	-1.2946	—
		RCP8.5	-0.281	0	-4.2622	↓
	E (mm)	RCP4.5	-0.069	0.377	-1.4816	—
		RCP8.5	-0.374	0	-12.2008	↓
	T (C°)	RCP4.5	0.313	0	0.014	↑
		RCP8.5	0.731	0	0.0586	↑

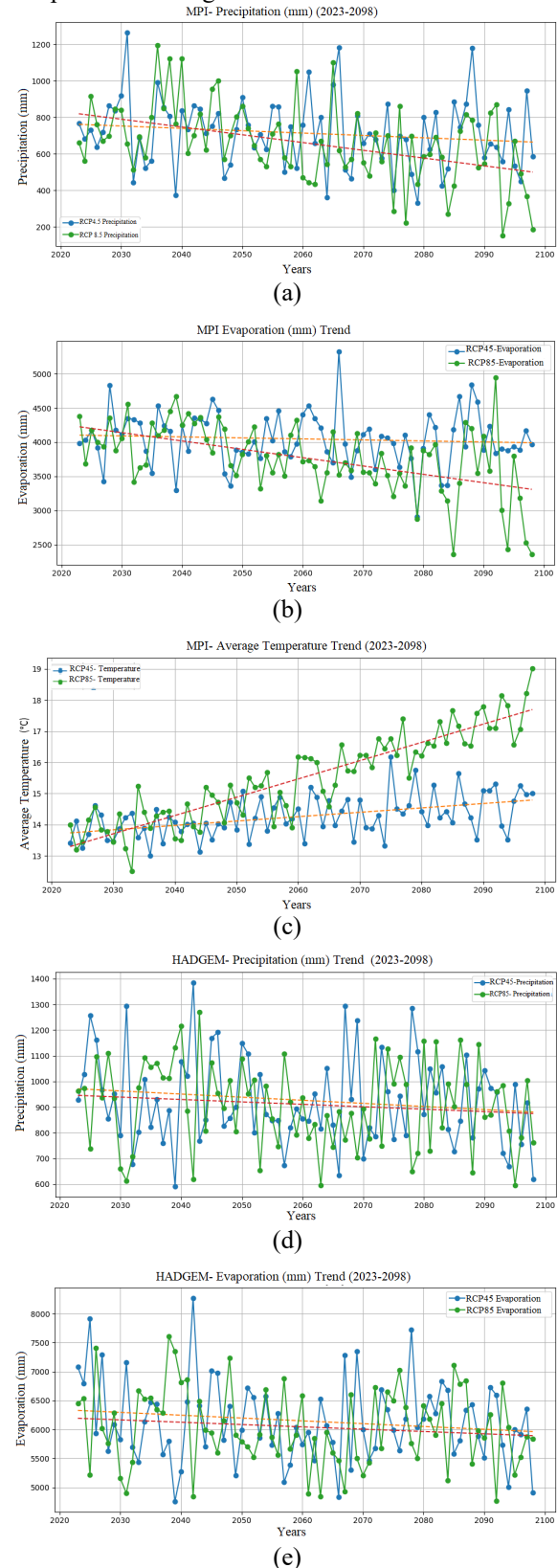
Under the HadGEM2-ES model, for Precipitation (P) in both RCP 4.5 and RCP 8.5, tau values are negative and p-values are greater than 0.05, indicating no statistically significant trend. There is a weak decreasing tendency, but it is not significant. For Evaporation (E), tau values are also negative with non-significant p-values in both scenarios, suggesting no clear trend, although the direction is slightly decreasing. For Temperature (T), tau values are high (0.588 and 0.778) with $p = 0$, indicating a statistically strong and significant increase. Sen's Slope is positive, confirming a clear rise in temperature. Thus, under the HadGEM2-ES model, while temperatures show a significant increase, precipitation and evaporation do not exhibit statistically significant changes.

Under the GFDL-ESM2M model, for Precipitation (P) under the RCP 4.5 scenario, $p = 0.911$, indicating no trend. Under the RCP 8.5 scenario, $p = 0.012$, $\tau = -0.196$, showing a statistically significant decrease. For Evaporation (E), the RCP 4.5 scenario shows a non-significant trend ($p = 0.47$). However, under the RCP 8.5 scenario, $p = 0.001$, $\tau = -0.25$, indicating a significant decrease. For Temperature (T) under RCP 4.5, $p = 0.057 \rightarrow$ which is borderline (not significant if $\alpha = 0.05$ is assumed), so no significant trend. Under RCP 8.5, $p = 0$, $\tau = 0.658$, indicating a significant increase in temperature. In summary, under the GFDL-ESM2M model, no variable shows a significant trend in the RCP 4.5 scenario. In contrast, under RCP 8.5, precipitation and evaporation decrease, while temperature increases strongly.

Under the MPI-ESM-MR model, for Precipitation (P) in the RCP 4.5 scenario, $p = 0.153$, indicating no significant trend. In the RCP 8.5 scenario, $p = 0$, $\tau = -0.281$, showing a statistically significant decrease. For Evaporation (E) under RCP 4.5, $p = 0.377 \rightarrow$ not significant. Under RCP 8.5, $p = 0$, $\tau = -0.374$, indicating a significant decrease. For Temperature (T), RCP 4.5 shows $p = 0$, indicating a significant increase. Under RCP 8.5, $p = 0$ as well, showing an even stronger increase. Under the MPI model, only temperature increases under RCP 4.5. Under RCP 8.5, the temperature rises sharply, while precipitation and evaporation significantly decrease.

This table clearly indicates that the impacts of climate change vary by scenario and model, but the common signal is an increase in temperature. The declines in precipitation and evaporation under RCP 8.5,

accompanying this warming, are particularly important in terms of drought risks and water balance. The graphs related to Mann-Kendall test and Sen's slope estimator HadGEM2-ES, GFDL-ESM2M and MPI-ESM-MR models— under RCP 4.5 and RCP 8.5 are presented in Fig.5.



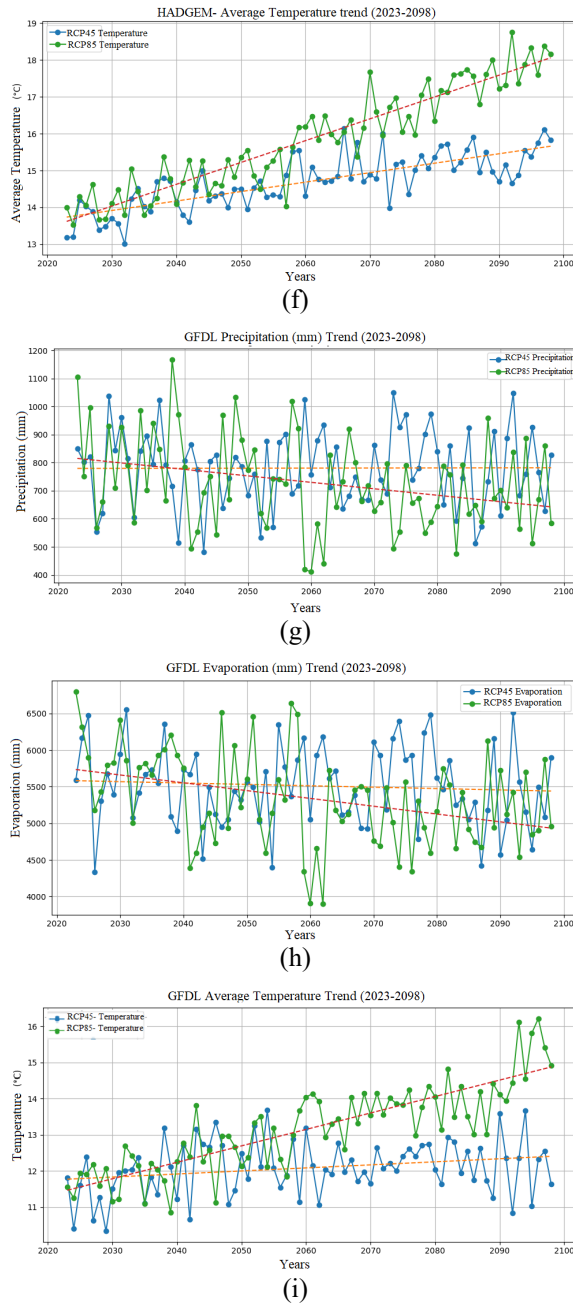


Figure 5. Scenario-Comparative Mann-Kendall graphs by year for HadGEM2-ES, GFDL-ESM2M, and MPI-ESM-MR Models (a) MPI- Precipitation (b)MPI-Evaporation (c)HADGEM-Temperature (d)HADGEM-Precipitation (e)HADGEM-Evaporation (f)HADGEM-Temperature (g) GFDL-Precipitation (h)GFDL-Evaporation (i)GFDL-Temperature

In conclusion, when examining the trend analysis results for all parameters under the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios, it is observed that under RCP 8.5, most of the trends for temperature, total precipitation, and total evaporation are statistically significant. Under the RCP 4.5 scenario, however, a significant increasing trend was detected only for temperature

3.4. Training and Testing Observational Data Using Machine Learning

In this study, four different machine learning algorithms (Random Forest, Support Vector Regression, Gradient Boosting, and Decision Tree) were applied to predict the daily energy production of the Menzelet Dam. The performance of each model was evaluated using the metrics MAE (Mean Absolute Error), MSE (Mean Squared Error), and R^2 (Coefficient of Determination). The training process is implemented with 50 percent of data belonging to 1999-2020 years and the rest is used for testing.

The Random Forest algorithm effectively captured the complex relationships and interactions within the dataset, demonstrating a strong predictive performance. An R^2 value of 78.2% indicates that approximately 78% of the variation in modeled energy production can be explained by the model. According to the MAE, the daily prediction error is quite low. This outcome is consistent with the findings in the literature, particularly emphasized by [14], highlighting Random Forest's robustness in handling multivariate and noisy datasets.

The Gradient Boosting algorithm demonstrated a performance comparable to that of Random Forest. In particular, its low MSE value indicates an advantage in penalizing squared errors. With an R^2 value of 78.5%, it stands out as the model with the highest accuracy. [16] noted that the boosting algorithms' sequential learning capability enables them to perform highly, especially in complex data structures; the results of this study are consistent with that perspective.

The SVR model produced higher error values compared to the other models. This can be attributed to SVR's inability to effectively learn complex relationships when using a linear kernel. However, SVR is still recognized in the literature for providing high general performance with smaller datasets [17]. In this study, the higher data complexity appears to have limited SVR's predictive capability.

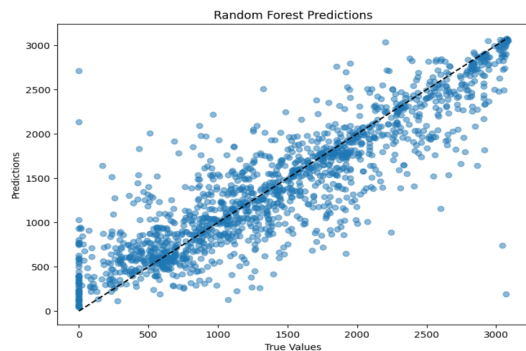
The Decision Tree algorithm had the highest error and lowest R^2 value among all models. Its reliance on a single-tree structure may expose the model to high variance and overfitting risks—a fundamental limitation also noted by [15]. Nevertheless, due to its interpretability and computational speed, the model has been retained as a valuable benchmark.

The highest R^2 and lowest error metrics were obtained from the Gradient Boosting model. However, the Random Forest model also showed competitive performance with very close values. In this context, Gradient Boosting stands out as the most reliable model for predicting energy production at Menzelet Dam. The optimal hyperparameter distribution in

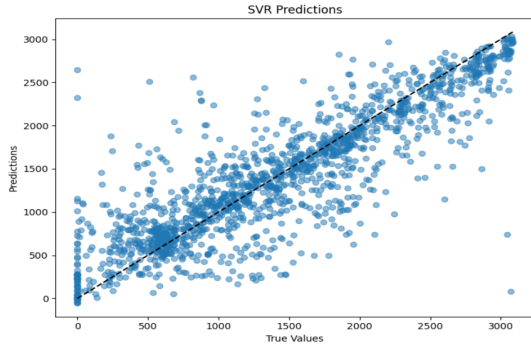
models using GridSearch CV is given in Table 5. The actual prediction graphs of the models whose hyperparameters were analyzed using GridSearchCV are given in Fig.6.

Table 5. Optimal Hyperparameter Distribution in Models Using GridSearch CV

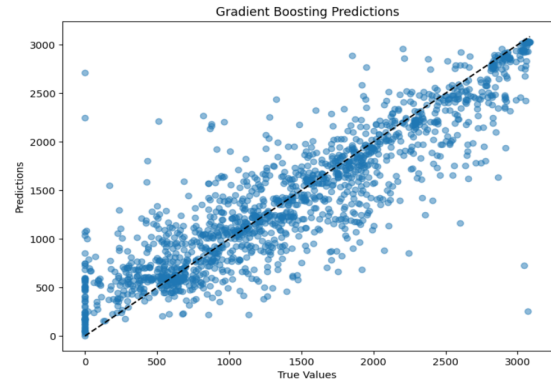
Model	Performance metrics	Best Hyperparameters
Random Forest	MAE: 265.11 MSE: 149343.6 R ² : 0.782	{'max_depth': 10, 'max_features': 'auto', 'min_samples_leaf': 4, 'min_samples_split': 10, 'n_estimators': 300}
SVR	MAE: 282.07 MSE: 174957.4 R ² : 0.744	{'C': 1, 'epsilon': 0.1, 'kernel': 'linear'}
Gradient Boosting	MAE: 264.95 MSE: 147218.2 R ² : 0.785	{'learning_rate': 0.1, 'max_depth': 3, 'min_samples_leaf': 2, 'min_samples_split': 10, 'n_estimators': 100}
Decision Tree	MAE: 296.94 MSE: 187818.7 R ² : 0.726	{'max_depth': 10, 'min_samples_leaf': 4, 'min_samples_split': 10}



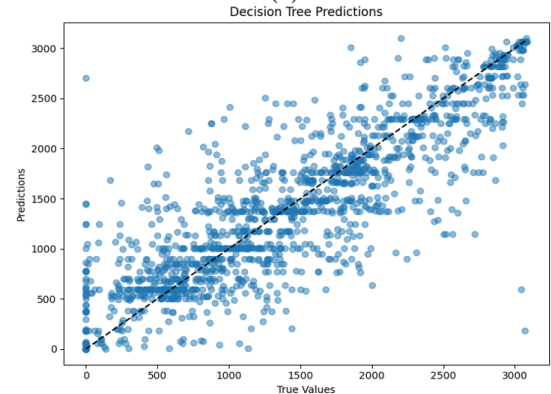
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 6. The actual prediction graph of the models whose hyperparameters were analyzed using GridSearchCV (a) Random Forest (b)SVR (c)Gradient Boosting (d)Decision Tree

3.5. Energy Forecasting Using Machine Learning with Future Model Data

The high predictive capacity of machine learning algorithms offers a powerful tool for forecasting multivariate and dynamic processes such as energy production. In this study, models trained using historical meteorological and hydrological data linked environmental indicators—such as temperature, precipitation, evaporation, and streamflow—to energy production. Consequently, potential changes in energy output between 2023 and 2098 were predicted using machine learning, based on climate scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5) from the HadGEM2-ES, GFDL-ESM2M, and MPI-ESM-MR models. Energy change graphs of the GFDL model for RCP 4.5 and RCP 8.5 in two different periods are given in Fig.7 and Fig.8, respectively.

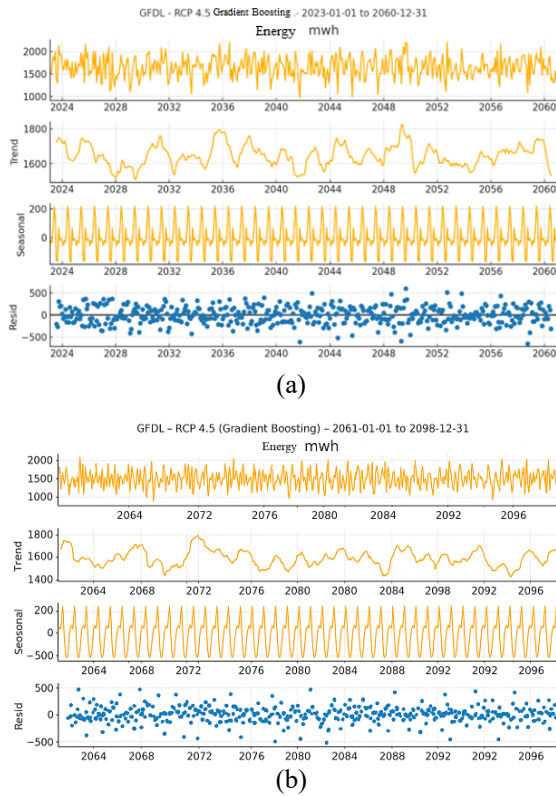


Figure 7. Energy change graph of the GFDL model for RCP 4.5 (a) 2023-2060 (b) 2061-2098

The results quantitatively reveal the impact of climate change on energy production and provide a scientific basis for region-specific management decisions. This approach makes a valuable contribution to the development of data-driven decision support systems for sustainable energy planning.

Upon transitioning to the modeling phase, after applying the necessary input parameters, energy production projections obtained using the Random Forest Regression Model revealed varying results for each climate model and scenario. Under the GFDL model's RCP 4.5 scenario, a general increasing trend in energy production was observed for the 2023–2060 period. During this time, seasonal fluctuations were pronounced, and energy production was seen to change consistently on an annual basis. From 2024 to 2060, a slightly decreasing trend is observed. This suggests that factors affecting energy production (e.g., streamflow, temperature, or evaporation) may decline over time due to climate change. A clear and recurring seasonal pattern is evident each year, clearly highlighting the impact of seasonal cycles on energy production. The residuals are randomly distributed with no clear pattern, indicating that the model successfully separates trend and seasonality. The Gradient Boosting algorithm has demonstrated strong predictive ability during this period, effectively capturing seasonality. Compared to the initial period, more pronounced fluctuations are observed. Although the general level remains within the 1600–1800 MWh

range, instabilities in production become more noticeable. The seasonal pattern remains well-preserved, with strong cycles. Forecast errors are slightly more scattered than in the previous period, reflecting the increasing unpredictability of climate change impacts. While uncertainty in long-term forecasts increases, Gradient Boosting still delivers reliable predictions.

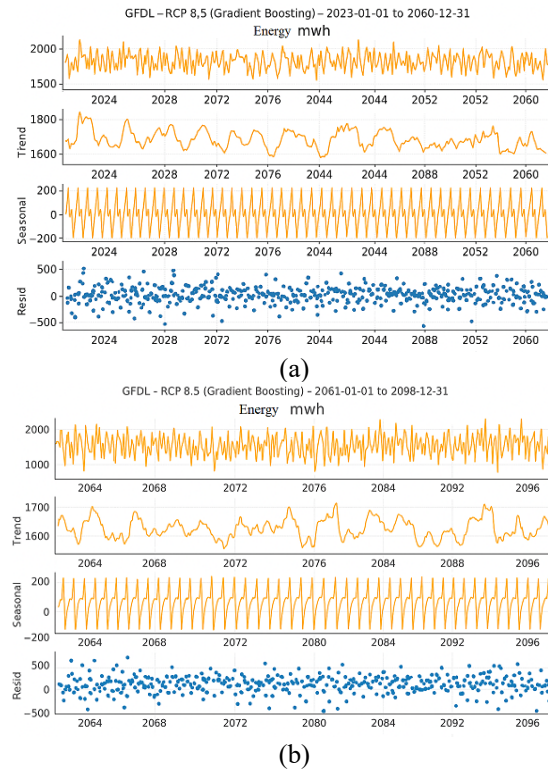


Figure 8. Energy change graph of the GFDL model for RCP 8.5 (a) 2023-2060 (b) 2061-2098

Throughout the period, the trend shows a slightly decreasing but fluctuating pattern. Between 2024 and 2040, values are relatively higher, followed by a declining trend after 2040. Clear seasonal cycles continue, and the model has successfully captured this structure. During this period, energy production trends are more volatile and lower compared to the previous phase. Instances where production falls below 1700 MWh become more prominent. The seasonal structure remains strong.

The residual components are widely dispersed, indicating that the model occasionally makes errors. In the long term, especially under the RCP 8.5 scenario, the predictive performance of the Random Forest model begins to decline. This reflects the challenging impact of climate change on modeling accuracy.

The analysis shows that the Gradient Boosting algorithm provides more consistent forecasts, particularly under the GFDL - RCP 4.5 scenario. This algorithm effectively distinguishes seasonality and

trend components and maintains strong predictive performance even in future periods. In contrast, the Random Forest model produced more errors under extreme scenarios such as RCP 8.5, highlighting how increasing climate uncertainty can compromise model accuracy. This underlines the critical importance of model selection in forecasting complex systems like energy production under climate change.

4. CONCLUSION

In this study, four different machine learning algorithms (Random Forest, Support Vector Regression, Gradient Boosting, and Decision Tree) were employed to predict the daily hydroelectric power generation of the Menzelet Dam. The performance of the models was evaluated using MAE, MSE, and R^2 metrics. The primary goal was to model the effects of climatic and hydrological variability on energy production and to provide a scientific basis for future water-energy management scenarios while testing the applicability of machine learning approaches in energy forecasting models.

According to the analysis results, the Gradient Boosting algorithm demonstrated the highest prediction accuracy, with an R^2 value of 78.5%. This success reflects the sequential learning capability of boosting algorithms in complex data structures, as highlighted by [16]. The low MSE value of Gradient Boosting emphasizes its advantage in penalizing squared errors. The Random Forest algorithm also showed competitive performance with an R^2 of 78.2%, confirming its robustness in multivariate and noisy datasets as emphasized by [14]. Both models successfully linked historical meteorological and hydrological data—such as temperature, precipitation, evaporation, and streamflow—with energy production.

In contrast, the Support Vector Regression (SVR) model produced higher error values compared to the others. This is likely due to its inability to effectively learn complex relationships when using a linear kernel. Although SVR is known in the literature [17] for performing well on small datasets, it was limited in this study due to higher data complexity. The Decision Tree algorithm recorded the highest error and lowest R^2 value among the models. As noted by [15], the use of a single-tree structure can lead to high variance and overfitting, revealing the model's limitations. Nevertheless, it was considered an important benchmark due to its interpretability and speed.

When energy production projections for the period 2023–2098 were examined under climate scenarios (HadGEM2-ES, GFDL-ESM2M, and MPI-ESM-MR; RCP 4.5 and RCP 8.5), the Gradient Boosting algorithm provided more consistent forecasts,

particularly under the GFDL - RCP 4.5 scenario. This model effectively distinguished between seasonality and trend components, maintaining its predictive performance even in future periods. For example, under the GFDL model's RCP 4.5 scenario, Gradient Boosting successfully captured a general increasing trend and strong seasonal cycles during the 2023–2060 period. However, a slightly declining trend observed between 2024 and 2060 indicates potential decreases in factors affecting energy production due to climate change.

On the other hand, the Random Forest model produced more errors under extreme scenarios such as RCP 8.5, highlighting that the unpredictability brought by climate change challenges model performance in long-term and severe scenarios.

In conclusion, the high predictive capacity of machine learning algorithms has proven to be a powerful tool for forecasting complex and dynamic processes such as energy production in hydroelectric power plants like Menzelet Dam. This study shows that the Gradient Boosting algorithm emerged as the most reliable model for forecasting energy production at Menzelet Dam and that the outputs quantitatively reveal the impact of climate change on energy production, providing a scientific foundation for region-specific management decisions. This approach significantly contributes to the development of data-driven decision support systems in sustainable energy planning.

ACKNOWLEDGMENT

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this paper. No funding or research grants were received during the preparation of this study. This paper includes the experimental results of the PhD thesis study of Ezgi Öztürk İspir.

REFERENCES

- [1] Climate Change Report: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge Uni Press, 2021.
- [2] Zhou, Y., Tol, R. S. J., & Clarke, L. E. *Climate policy and the optimal use of hydropower*, 2015.
- [3] van Vliet, M. T. H., Sheffield, J., Wiberg, D., & Wood, E. F. Impacts of recent drought and warm years on water resources and electricity supply worldwide. *Environmental Research Letters*, 11(12), 124021, 2016. Doi:10.1088/1748-9326/11/12/124021
- [4] Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ). *Türkiye Barajları ve Hidroelektrik Santralleri Raporu*. Ankara: DSİ Yayınları, 2020.

- [5] Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE). *Türkiye Elektrik Üretim Durumu ve Potansiyeli Raporu*. Ankara: EİE Genel Müdürlüğü, 2020.
- [6] Yilmaz, M., Aydın, N., & Bayazit, M. Regression-based modeling of hydropower generation at Keban Dam, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95, 312–322, 2018. Doi:10.1016/j.rser.2018.07.003.
- [7] Kaya, M., Demir, Y., & Uysal, G. Application of Artificial Neural Networks in Hydrological Forecasting: A Case Study of the Euphrates Basin. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(4), 04020008, 2020. Doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001964.
- [8] Rashid, M. M., Khan, A., & Ahmad, I. Application of Support Vector Regression in Hydropower Generation Forecasting under Climate Variability. *Renewable Energy*, 176, 780–792, 2021. Doi:10.1016/j.renene.2021.05.111.
- [9] Kendall, M. G.. *Rank Correlation Methods* (4th ed.). London: Charles Griffin, 1975.
- [10] Mann, H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259, 1945. Doi:10.2307/1907187.
- [11] Sen, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389, 1968. Doi:10.2307/2285891.
- [12] Yu, Y. S., Zou, S., & Whittemore, D. Non-parametric trend analysis of water quality data of rivers in Kansas. *Journal of Hydrology*, 150(1), 61–80, 1993.
- [13] Hirsch, R. M., Slack, J. R., & Smith, R. A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 18(1), 107–121, 1993.
- [14] Breiman, L. Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32, 2001. Doi:10.1023/A:1010933404324.
- [15] Quinlan, J. R. Induction of decision trees. *Machine Learning*, 1(1), 81–106, 1986. Doi:10.1007/BF00116251.
- [16] Friedman, J. H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *Annals of Statistics*, 29(5), 1189–1232, 2001. Doi:10.1214/aos/1013203451.
- [17] Smola, A. J., & Schölkopf, B. A tutorial on support vector regression. *Statistics and Computing*, 14(3), 199–222, 2004. Doi:10.1023/B:STCO.0000035301.49549.88.
- [18] Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485–498, 2012. Doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- [19] Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., ... & Woodward, S. Development and evaluation of an Earth-System model–HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, 4(4), 1051–1075, 2011. Doi:10.5194/gmd-4-1051-2011.
- [20] Dunne, J. P., John, J. G., Adcroft, A. J., Griffies, S. M., Hallberg, R. W., Shevliakova, E., ... & Krasting, J. P. GFDL's ESM2 global coupled climate–carbon Earth System Models. Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics. *Journal of Climate*, 25(19), 6646–6665, 2012. Doi:10.1175/JCLI-D-11-00560.1.
- [21] Giorgetta, M. A., Jungclaus, J., Reick, C. H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., ... & Stevens, B. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(3), 572–597, 2013. Doi:10.1002/jame.20038.
- [22] Van Rossum, G. *Python tutorial* (Technical Report CS-R9526). Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI), Amsterdam, Netherlands, 1995.
- [23] Python Software Foundation. Python Programming Language. <https://www.python.org> (last access date: May 2025), 1995.
- [24] Yue, S., Pilon, P., & Cavadias, G. Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of hydrology*, 259(1–4), 254–271, 2002.
- [25] Gök, M. (Editor). *Makine Öğrenmesi Algoritmaları*, Nobel yayıncılık, ISBN: 978-625-371-882-4, sf:131-136, 2024.



Posta Sektöründe Dijital Dönüşümün Dinamikleri: Teknolojiler, Etkiler ve Geleceğe Bakış



Ali Burak AKBULUT^{*,a},

^{a,*} Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu, Ankara, TÜRKİYE

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 21.06.2025
Kabul: 14.10.2025

Anahtar Kelimeler:

Posta Hizmetleri, Dijital Dönüşüm, Yenilikçi Teknolojiler

*Sorumlu Yazar

aliburakakbulut@gmail.com

ÖZET

Posta sektörü, toplumsal iletişim ağları ve küresel lojistik sistemlerinin merkezi bir bileşeni olarak hem ekonomik süreçlerde hem de günlük yaşamın işleyişinde kritik bir rol oynamaktadır. Günümüzde dijital teknolojilerin üretim, dağıtım ve hizmet modellerini yeniden şekillendirmesiyle birlikte posta sektörü dönüşüm baskılarını en yoğun biçimde yaşayan alanlardan biri hâline gelmiştir. Mektup hacimlerindeki düşüş, e-ticaretin hızlı yükselişi ve Covid-19 pandemisinin hızlandırıcı etkisi bu dönüşümü daha da belirgin hâle getirmiştir. Bu sürecin temel dinamiğini iş süreçlerine entegre edilen dijital teknolojiler oluşturmaktadır. Özellikle yapay zekâ (AI), nesnelerin interneti (IoT), büyük veri analitiği, robotik süreç otomasyonu, bulut bilişim ve blok zincir gibi yenilikçi teknolojiler, posta sektörünün geleneksel hizmet anlayışını dönüştürerek yapısal bir değişim yaratmaktadır. Bu teknolojiler yalnızca operasyonel süreçlerde hız, doğruluk ve verimlilik sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda müşteri odaklı hizmet tasarımlarının geliştirilmesine de imkân tanımaktadır. Bahse konu gelişmeler, rekabet dinamiklerini köklü biçimde değiştirerek dijital dönüşüme uyum sağlayan işletmelerin pazardaki konumlarını güçlendirmesine, hizmet çeşitliliğini artırmasına ve müşteri taleplerine daha etkin yanıt vermesine imkân tanımıştır. Bu çalışma, posta sektöründe dijital dönüşümün etkilerini ele almakta ve yenilikçi teknolojilerin sektördeki kullanım alanlarını incelemektedir. Ayrıca bu teknolojilerin operasyonel süreçler, hizmet modelleri ve rekabet dinamikleri üzerindeki yansımaları ele alınmaktadır.

DOI: 10.59940/jismar.1724460

Dynamics of Digital Transformation in The Postal Sector: Technologies, Impacts and Future Outlook

ARTICLE INFO

Received: 21.06.2025
Accepted: 14.10.2025

Keywords:

Postal Services, Digital Transformation, Innovative Technologies.

*Corresponding Authors

aliburakakbulut@gmail.com

ABSTRACT

The postal sector plays a critical role in both economic processes and the functioning of daily life as a central component of social communication networks and global logistics systems. Today, with digital technologies reshaping production, distribution, and service models, the postal sector has become one of the areas experiencing the most intense pressure for transformation. The decline in letter volumes, the rapid rise of e-commerce, and the accelerating effect of the Covid-19 pandemic have made this transformation even more pronounced. Digital technologies integrated into business processes form the fundamental dynamic of this process. Innovative technologies such as artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), big data analytics, robotic process automation, cloud computing, and blockchain are creating structural change by transforming the postal sector's traditional service approach. These technologies not only provide speed, accuracy, and efficiency in operational processes, but also enable the development of customer-focused service designs. These developments have fundamentally changed the dynamics of competition, enabling businesses that adapt to digital transformation to strengthen their market position, increase service diversity, and respond more effectively to customer demands. This study examines the effects of digital transformation in the postal sector and explores the areas of application for innovative technologies in the sector. It also addresses the implications of these technologies on operational processes, service models, and competitive dynamics.

DOI: 10.59940/jismar.1724460

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The postal sector has played a fundamental role not only in the transportation of physical items from the past to the present, but also in supporting socio-economic connectivity through communication, parcel, and money transfer services [1,2]. Representing social inclusiveness through its extensive access network in almost every country, the sector provides global coverage that enables people to send items to anyone, anywhere [2]. Today, postal networks also contribute to the functionality of supply and distribution systems by facilitating e-commerce logistics and trade flows [1]. Furthermore, as a strategic domain shaped by public policies, international standards, and regulatory frameworks, the postal sector remains closely linked to governmental and institutional agendas [2,3]. Considering the accelerating effects of digitalization and technology-driven change in the industry, the postal sector has become a focal point not only of technological transformation but also of broader social and economic transformation [1,3]. Due to these characteristics, the postal sector offers a suitable and meaningful research area for examining digital transformation processes [3]. At this point, outlining the conceptual framework of postal services is essential to understand the impacts of digital transformation on the sector.

In the most general sense, mail is the transmission of a shipment from one place to another for the purpose of communication. According to TDK, the term “postal mail” is defined as “all of the letters and entrusts that come from or are sent to a place” [4]. Postal service can be defined as a special transportation or distribution system that involves the transportation of goods from one point to another. However, there are some unique features that distinguish the postal service from other distribution methods. The most prominent feature of the postal service is that it is based on the transfer of shipments that contain address information, need to be transported in a regular and scheduled manner, and are usually distributed over a regional network [5]. In this context, not only the definition and characteristics of postal services but also their relationship with e-commerce is important for understanding the transformation of the sector.

The relationship between the postal sector and e-commerce is very important, and these two sectors complement each other. Products purchased through e-commerce platforms must be physically delivered to consumers. Postal service providers come into play at this stage. Postal service providers ensure that these

processes are carried out efficiently [6]. The growth of the e-commerce sector has a significant impact on the postal sector. While the long-term lockdowns and social distancing measures implemented due to the Covid-19 pandemic caused a serious contraction in many sectors of the global economy, they contributed to the growth of the e-commerce sector. With the increase in e-commerce volume, postal service providers have had to meet consumer needs with innovative approaches such as same-day or contactless delivery, easy return processes, instant order tracking, and multiple delivery attempts [7]. In this process, postal service providers have been trying to integrate these innovative approaches into their business processes through digital transformation technologies, while also attempting to overcome these challenges with alternative delivery models [8].

The postal sector is undergoing a fundamental transformation alongside the spread of digitalization and e-commerce. The replacement of traditional letter delivery with digital communication tools such as email, social media, and instant messaging is forcing postal service providers to adapt to changing user habits. In this context, postal service providers are diversifying their means of reaching consumers by leveraging digital technologies and increasingly shifting their sectoral activities towards parcel delivery and freight transport. To maintain their presence in a competitive environment, they must continue to develop innovative solutions and invest in digitalization [9].

2. DIGITAL TRANSFORMATION (DİJİTAL DÖNÜŞÜM)

Digital transformation is also defined as a process where various digital innovations come together to create new actors, structures, practices, values and beliefs that change, threaten, transform or complement existing rules [10]. Digital transformation is a process that enables enhanced customer experiences, streamlined operations and new business models by enabling significant improvements in business processes through the use of new digital technologies such as social media, mobile technology, analytics and embedded devices [11]. In shorter terms, digital transformation is the integration of technological developments into business and operational processes [12].

Digital transformation means that businesses adapt to the digital age by adapting to new technologies. This process affects various sectors such as industry, energy, logistics, electronic communication and mail. Businesses that want to gain competitive advantage

tend to digitalize their business processes. For this transformation to be effective, the right human resources, led by qualified experts, are required. In addition, transformations should be strategically analyzed and supported by budget planning [13]. Digital technologies have significantly changed the way businesses interact with customers, understand competition, manage data and approach innovation. This change allows businesses to better understand customer needs, gain competitive advantage and develop innovative products and services [14]. In this context, it is important to identify the key technologies that drive digital transformation and shape sectoral practices.

The most widely used digital transformation technologies today are artificial intelligence, internet of things, robotics, big data, blockchain, cloud computing, robotic process automation. The relationship between these technologies and the postal sector is described below. These technologies are shown in Figure 1. Before examining their role in the postal sector, it is useful to briefly outline the characteristics of these technologies.



Figure 1: Digital Transformation Technologies (*Dijital Dönüşüm Teknolojileri*)

2.1. Artificial Intelligence (*Yapay Zeka*)

Artificial intelligence is a set of techniques that can produce solutions with similar designs to solve problems and in this process tries to imitate human intelligence in computer environment [15]. In other words, artificial intelligence is the field of computer science that aims to design systems with abilities such

as learning, reasoning, problem solving, etc. that we observe in human behavior [16].

2.2. Internet of Things (*Nesnelerin İnterneti*)

The IoT concept is defined as electronic devices that have the ability to connect to the internet and communicate with each other via their IP (Internet Protocol) addresses over the internet. Electronic devices that interact with each other in the IoT network are referred to as objects. These objects can perform identification, detection, networking and processing processes with each other [17]. Objects in these networks have the ability to automatically organize, share information, react to situations and changes in the environment, and move [18].

2.3 Blockchain (*Blokzincir*)

Blockchain is defined as a database in the most basic terms. In the working logic of this technology, data or information is sequentially stored in blocks. When the data capacity of a block reaches the upper limit, a new block is produced with the data of the other block and moved to another block. The moved blocks are connected to each other in the form of a chain. Each connected block chain has its own unique sequence rule. The size and data fields of the blocks in the block chain are unique characteristics [19]. A blockchain is actually a database where all transactions executed and shared between participating parties are kept in a distributed ledger. Each transaction in the public ledger is verified by the consensus of the majority of participants in the system. The information obtained as a result of this transaction can never be deleted and contains a precise and verifiable record of every single transaction ever made [20].

2.4 Cloud Computing (*Bulut Bilişim*)

Cloud computing can be briefly defined as an internet-based computing method. Thanks to cloud computing, information shared with hardware and software resources can be transferred to computers and other devices on demand, regardless of the source. NIST (National Institute of Standards and Technology) defines cloud computing as a pay-per-use model that provides on-demand network access to configurable computing repositories (including storage, software, services) [21].

2.5 Robotics (*Robotik*)

The term "robot" is defined by the International Organization for Standardization (ISO) as "a programmed, operated mechanism possessing a degree of autonomy to perform movements,

manipulation, or positioning." Robotics is an engineering discipline that involves the design, manufacturing, and operation of robots. The aim of the field of robotics is to develop intelligent machines that can assist humans in various ways. In robotics technology, robots may resemble humans or be used to perform repetitive tasks typically carried out by people [22].

2.6 Robotic Process Automation (*Robotik Süreç Otomasyonu*)

With the integration of computer and software sciences into robotic technologies, the concept of Robotic Process Automation (RPA) has emerged. RPA is a technology designed to reduce human intervention in computer applications, particularly in repetitive business processes. It operates through user interfaces similarly to humans and is specifically developed to automate business processes. RPA transforms simple, repetitive, and structured tasks from manual execution to automation [23].

2.7 Big Data (*Büyük Veri*)

Big data refers to high-volume, high-velocity, and highly diverse data that is difficult to process using traditional computing techniques. However, such data can be utilized to generate meaningful insights and support better decision-making [24]. Unlike traditional data, the term big data encompasses large and continuously growing datasets composed of heterogeneous formats, including structured, unstructured, and semi-structured data [25]. In general, big data denotes datasets that have become too large and complex to be handled by conventional tools and database management systems [26].

3. DIGITAL TRANSFORMATION AND POSTAL SECTOR (*DİJİTAL DÖNÜŞÜM VE POSTA SEKTÖRÜ*)

The impacts of digital transformation are being significantly felt in the postal sector, as in many other industries. With the acceleration of technological advancements, the implementation of digital transformation initiatives and projects within this sector has become increasingly widespread. Digital transformation in the postal sector has influenced the way postal services are delivered, the competitive dynamics of postal service providers and access to postal services. At every stage of postal operations, digital transformation has brought about a profound shift. The replacement of traditional postal procedures with digital tracking and automation systems has

accelerated business processes and enhanced overall efficiency [27].

Postal operators should adopt a strategic approach to capitalize on opportunities in the digital transformation process. These approaches include adopting new business models and technologies to reduce fixed costs, making organizational changes to make inflexible processes more agile, modernizing complex and legacy systems, investing in integrating physical and digital channels, using data analytics to better understand customer needs, and creating a culture of innovation to adopt new technologies [28]. To better understand the dynamics of this transformation, the effects of key digital technologies such as artificial intelligence, the Internet of Things, big data analytics, robotic process automation, cloud computing, robotics, and blockchain on the postal sector are examined.

3.1. Artificial Intelligence and the Postal Sector (*Yapay Zeka ve Posta Sektörü*)

Artificial intelligence technologies are used at every stage of postal services, including the collection, sorting, tracking and delivery of parcels and letters. Artificial intelligence has changed the correspondence system in the postal sector. Barcode technologies record information such as sender and recipient addresses and type of delivery. With RFID (Radio Frequency Identification) or barcode technologies, letters and packages can be tracked, enabling real-time information flow. In addition, advanced optical character recognition (OCR) technology in mail and parcel sorting processes enables automated reading of handwritten addresses. This technology helps postal operators to sort letters and parcels automatically [29].

One of the most important areas of digitalization in the postal sector is the supply chain and logistics processes. In the supply chain, artificial intelligence technologies help to optimize processes and balance demand and supply through data analysis. It is used in demand forecasting processes and inventory tracking in warehouses. In addition, with AI-based route optimization technologies, postal businesses can reduce the cost of delivery and distribution and provide faster delivery. Thanks to unmanned aerial vehicles or autonomous vehicles, efficiency is increased by continuous delivery. Artificial intelligence technologies provide businesses with a better workflow in case of staff shortages. Chat bots or virtual assistants use natural language processing from AI technologies to provide 24/7 support to consumers. As a result, consumers can access the

necessary information at any time and do not have to wait for a response from staff [29].

3.2 Internet of Things and the Postal Sector

(Nesnelerin İnterneti ve Posta Sektörü)

IoT technology has brought innovations and improvements to the postal sector. IoT enables postal businesses to monitor their shipments in real time. In particular, through small sensors and tags, the location of each shipment can be tracked and parameters such as temperature, humidity, weight, as well as the security status of packages can be monitored. This reduces the risk of loss and damage and makes tracking shipments more effective [30]. Thanks to the sensors installed in vehicles carrying postal shipments, package transportation processes can be monitored. In this way, routes can be optimized, routing can be made according to traffic conditions and delivery times can be shortened. At the same time, the maintenance needs of the vehicles can be monitored so that malfunctions can be detected in advance and planned maintenance can be carried out [31].

IoT technologies also facilitate storage and inventory management. Sensors can automatically monitor inventory in storage areas, report stock levels in real time and optimize reordering processes. This enables stock optimization and increases efficiency. IoT also enhances postal companies' security measures. Sensors can detect the movement of packages and alert in case of unauthorized access or theft. This can secure shipments and reduce the risk of theft. IoT offers a wide range of benefits from logistics businesses to the consumer. These benefits have an impact throughout the logistics value chain, including warehousing operations, freight transportation and final stage delivery [32].

3.3 Blockchain and the Postal Sector

(Blokzincir ve Posta Sektörü)

Blockchain technology is being used in many areas in the postal sector. These applications include contract enforcement, authentication services, network and device management, and records management. Blockchain technology can also be used in the postal sector, device and vehicle management, and supply chain management processes [33].

Blockchain technology can make financial transactions in postal services more secure, transparent and efficient. A blockchain-based platform enables direct and faster transactions between postal services. Blockchain technology can make authentication processes in postal services more

secure and transparent. A blockchain-based authentication system enables senders and recipients to verify their identities securely. Blockchain technology can be used to secure and manage IoT devices in postal service processes. A blockchain-based device management system can allow devices to record and transfer their data more securely. Blockchain allows packages and mail to be uniquely identified and each shipment to be tracked. This can enable more accurate identification of where packages and mail are and when they will be delivered [33].

3.4 Cloud Computing and the Postal Sector

(Bulut Bilişim ve Posta Sektörü)

Cloud computing stands out as a technology that provides various advantages for the postal sector. Since postal operators have to process and manage large amounts of data, cloud computing facilitates the secure storage and access of this data. Data is stored on cloud-based servers and can be accessed from anywhere when desired [34]. Cloud-based systems can convert capital costs into operational costs by providing cost savings. It also facilitates information sharing by eliminating compatibility problems by providing access to all components of the supply chain. Cloud-based systems can host different activities of the postal supply chain on a single platform and provide access to supply chain partners from any location. In addition, it is stated that cloud-based systems can reduce environmental impact by reducing energy costs and contribute to creating a sustainable supply chain [35].

Cloud computing can provide great benefits to postal companies in their postal service processes. Processes such as shipment tracking, inventory management, vehicle routing and last-mile delivery can be managed more efficiently with cloud-based systems. Cloud-based communication tools help postal companies to communicate effectively with their internal and external stakeholders. Collaboration activities such as data sharing, document editing, project management, etc. among employees, consumers and suppliers can be easily carried out via cloud-based platforms [35].

3.5 Robotics and the Postal Sector

(Robotik ve Posta Sektörü)

Robotic technology is used in the postal sector to enhance automation and efficiency in processes such as warehouse management, distribution, and delivery. Robots in the postal sector can be employed at various stages of operation. One example is autonomous mobile robots. These robots use sensors and navigation technologies to transport materials in open areas without human intervention. In storage facilities,

different types of autonomous robots are used to move containers and pallets between sorting machines. Recent advancements in automation technology have increased the range and complexity of tasks that robots can perform. Meanwhile, major postal service providers around the world are testing the delivery of certain products by robots in selected cities [36].

3.6 Robotic Process Automation and the Postal Sector *(Robotik Süreç Otomasyonu ve Posta Sektörü)*

In the postal sector, RPA can enhance operational performance by automating various business processes and improving efficiency. RPA can automate manual tasks such as extracting customer information from invoices and entering data into systems. It can also play a role in verifying the accuracy of addresses, postal codes, and other data, thereby reducing errors and increasing delivery accuracy. Furthermore, RPA can support the reporting of business processes, contributing to improved organizational oversight and decision-making [37].

RPA can automate the order fulfillment process by eliminating the need to manually process incoming orders [38]. It is capable of monitoring postal data in real time, automatically updating shipment statuses, and sending notifications to users at various stages of the delivery process. RPA can also be beneficial in warehouse and inventory management operations. In return logistics, it can automate the return and refund processes, thereby optimizing reverse logistics and enhancing customer satisfaction [39]. Additionally, RPA can support customer service operations by automatically responding to frequently asked questions, analyzing customer inquiries, and forwarding complex issues to call center agents [40]. Overall, RPA facilitates business processes in the postal sector by automating repetitive, rule-based tasks, enabling human resources to focus on more complex and value-added activities. It enhances operational efficiency, reduces costs, and ultimately contributes to a more competitive and flexible environment in the postal industry.

3.7 Big Data and the Postal Sector *(Büyük Veri ve Posta Sektörü)*

The postal sector is one of the industries with significant potential to benefit from big data. Postal operators can generate large datasets by collecting information related to shipments, user profiles, and operational activities. By applying big data analytics techniques, postal companies can reduce transportation costs. These technologies help optimize delivery routes, lower fuel consumption, and enable more efficient vehicle dispatching [41]. Moreover, big

data analytics contributes to improving customer experience. It allows businesses to gain deeper insights into consumer behavior and trends. This knowledge enables postal service providers to design services that are better aligned with the needs and preferences of their customers [42].

One of the greatest advantages of big data is its ability to help businesses track package deliveries. Through big data, the entire transportation process of a package can be monitored from start to finish. Big data can also be utilized for route optimization in logistics and supply chain management processes. With the help of sensors installed on delivery vehicles, companies can collect data not only from big data technologies but also from weather reports and traffic updates [43].

Big data technology can also be used to optimize inventory levels of supply materials. Postal operators operating on a global scale are increasingly adopting smart warehouse technologies. These smart warehouses, which offer faster and higher performance compared to traditional ones, contribute to enhanced efficiency. With the real-time insights provided by big data technology, businesses can monitor and track their current inventory levels. As a result, big data enables efficient warehouse management [43]. On the other hand, postal companies are turning to big data analytics to optimize their internal operations and are exploring its use beyond postal data for various other purposes. By leveraging big data, the postal sector can deliver better services to customers, improve operational efficiency, and gain a competitive advantage [44].

4. THE INNOVATIONS THAT DIGITAL TRANSFORMATION BRINGS TO THE POSTAL SECTOR *(DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN POSTA SEKTÖRÜNE GETİRDİĞİ YENİLİKLER)*

Innovative technologies in postal service processes have been developing rapidly in recent years. These advancements, referring to a range of technologies employed to make postal services more effective, efficient, and faster, are utilized by postal operators to enhance operational efficiency, improve delivery times, and optimize the customer experience. In this context, the innovations that digital transformation brings to the postal sector are presented in Table 1.

Table 1. Digital innovations in the postal sector (*Posta Sektöründeki Dijital Yenilikler*)

Innovations	Description
Barcoding	Enables automated and accurate item tracking, improving processing speed and reliability.

Computer-Based Sensors	Uses vision sensors to support automated recognition and traceability, enhancing delivery performance.
Tag Learning Software Systems	AI-based label recognition and routing, adaptable to new label formats via specialized interfaces.
Fingerprinting Technologies	Identifies items through visual features, enabling label-free sorting when labels are missing/unreadable.
OCR	Digitizes address/recipient data to accelerate sorting and reduce human error and costs.
RFID	Provides real-time tracking and secure monitoring, improving inventory control and reducing errors/theft.
Route Optimization	Algorithmic routing improves delivery efficiency and lowers costs under traffic and capacity constraints.
Parcel Lockers	Secure, contactless last-mile option that increases accessibility, especially in dense areas.
Automation	Streamlines repetitive operations to improve service consistency and reduce labor-intensive processing.
Autonomous Vehicles and Drones	Supports faster and potentially greener delivery, particularly for remote or hard-to-access locations.
Smart Conveyor Systems	Sensor-enabled conveyors automate sorting and routing with high speed and accuracy.
Digitalization of Business Processes	Digitizes documents/workflows to improve accessibility, efficiency, and sustainability.
Mobile Applications	Enables tracking, delivery preferences, digital payments, and real-time customer communication.
Innovative Delivery Models	Integrates flexible delivery modes (e.g., lockers, pick-up points, same-day/contactless) for e-commerce needs.
Chatbots and IVR (Interactive Voice Response)	Provides 24/7 automated customer support and delivery management, reducing workload and waiting times.

The rapid adoption of innovative technologies has not only transformed the operational logic of postal services but also redefined the sector's role in meeting

changing customer expectations. These technologies are increasingly embedded into various stages of postal processes, from collection and sorting to transportation and final delivery, in order to enhance speed, reliability, and service quality. To present this transformation in a more systematic manner, their areas of application and impact within postal service processes are illustrated in Figure 2.

The rapid adoption of innovative technologies has not only transformed the operational logic of postal services but also redefined the sector's role in meeting changing customer expectations. These technologies are increasingly embedded into various stages of postal processes, from collection and sorting to transportation and final delivery, in order to enhance speed, reliability, and service quality. To present this transformation in a more systematic manner, their areas of application and impact within postal service processes are illustrated in Figure 2.

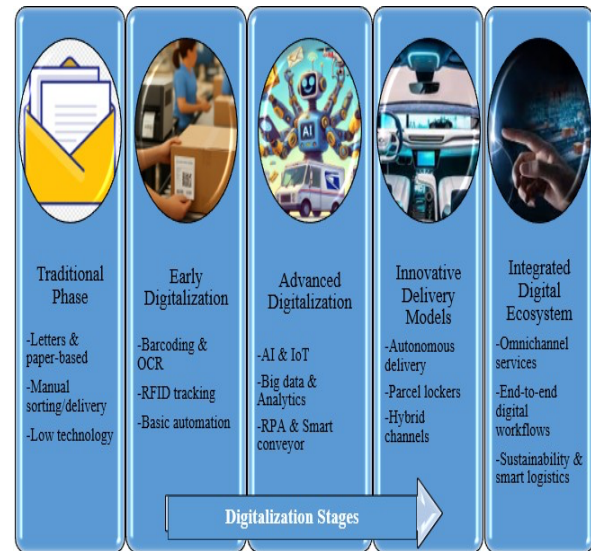


Figure 2 Digital Transformation Stages in the Postal Sector (*Posta Sektöründeki Dijital Dönüşüm Aşamaları*)

5. CONCLUSION AND RECOMMENDATION (SONUÇ VE ÖNERİLER)

In today's digital age, the traditional service structure of the postal sector has undergone a fundamental transformation driven by technological advancements. Digital technologies such as artificial intelligence, big data, the Internet of Things, cloud computing, blockchain, and robotic process automation have enabled postal service providers to enhance operational efficiency, reduce errors, and improve service quality. These innovations have led to the digitization and significant automation of processes such as mail and parcel sorting, shipment tracking, delivery planning, and customer service.

The rapid expansion of the e-commerce sector has further compelled postal service providers to provide faster and more flexible services in response to rising demand, making the adoption of digital technologies a necessity rather than a strategic choice. In this context, the growing use of parcel lockers has emerged as a contactless delivery model that minimizes failed delivery attempts and allows recipients to collect their parcels at their convenience. Particularly in densely populated urban areas, these systems have become a key innovation in last-mile delivery, representing a practical and effective application of digital transformation. Moreover, global crises such as the Covid-19 pandemic have highlighted the critical importance of this transformation, as organizations with robust digital infrastructure were able to sustain operations, while others faced significant disruptions and bottlenecks.

Moreover, the data-driven approach enabled by digital transformation has provided postal operators with significant advantages not only in operational processes but also in strategic planning, demand forecasting, and customer segmentation. The analysis of shipment history, customer behavior, and routing data allows organizations to make more informed decisions and offer personalized services. This transformation has repositioned postal operators from being merely delivery carriers to becoming data-oriented digital service providers. However, sustaining this transformation requires more than just technological investment; it also depends on organizational agility, equipping the workforce with digital competencies, and adopting a forward-looking strategic vision. Postal enterprises that fail to adapt to digitalization face the risk of falling behind in an increasingly competitive market environment.

In the future, the development of a more competitive, sustainable, and user-friendly postal sector will heavily depend on the integration of digitalization strategies with next-generation technologies. First, micro-mobility solutions—such as electric bikes and small autonomous delivery robots—can alleviate urban traffic congestion while enhancing speed and efficiency in last-mile deliveries. Additionally, logistics systems supported by augmented reality (AR) can enable faster and more accurate inventory management within warehouses. With AR glasses, employees can easily locate packages, receive navigation guidance, and manage workloads more effectively.

Furthermore, digital twin technology offers the potential to create virtual replicas of operational processes, particularly in high-volume distribution centers. This enables real-time monitoring and

simulation to proactively identify and mitigate potential risks, allowing for improved maintenance, capacity planning, and bottleneck management. Sustainability-focused technologies are also expected to become key drivers in the postal sector of the future. Solar-powered parcel lockers, electric delivery vehicles, and digital reporting systems that track carbon emissions will offer strategic advantages to environmentally conscious organizations. AI-powered customer experience platforms will further enhance competitiveness by delivering personalized services not only in delivery operations, but also in complaint handling, service recommendations, and dynamic pricing. Within this framework, postal operators that view technology not merely as an operational tool but as a strategic lever will be well-positioned to achieve transformative change, both economically and socially.

In recent years, the postal sector in Türkiye has taken significant steps toward digitalization, and postal service providers have begun to reshape their operational processes with advanced technologies. Barcode and RFID-based solutions enable end-to-end tracking of shipments, thereby increasing transparency and reliability. OCR systems allow address information to be read quickly and accurately, while computer vision-based sensors facilitate the automatic recognition of parcels. Postal service providers are also deploying AI-powered forecasting models and route optimization systems to shorten delivery times and reduce costs. In addition, smart conveyor systems accelerate sorting and routing operations in large distribution centers to enhance operational efficiency, while robotic process automation helps reduce repetitive workloads and contributes to more flexible and error-free processes.

Postal service providers operating in Türkiye are focusing not only on operational efficiency but also on innovative delivery models designed to improve customer experience. In particular, smart parcel lockers, which have become widespread in major cities, offer consumers flexible and contactless delivery options, while practices such as same-day delivery and multiple delivery attempts have significantly increased customer satisfaction. Real-time shipment tracking via mobile applications, digital payment systems, and chatbot-based customer support services further strengthen user experience. In addition, environmentally friendly practices such as the use of electric vehicles and sustainable packaging solutions are becoming more widespread. All these developments demonstrate that the digitalization journey of Türkiye's postal sector is evolving not only at the operational level but also toward a customer-oriented, flexible, and sustainable service model.

In order for the postal sector in Turkey to increase its future competitiveness and effectively meet customer expectations, it must shift towards a service model based on end-to-end digital integration. In this model, all stages from collection and sorting to transfer, transport, and last-mile delivery must be supported by digital technologies. This will enable consumers to track the entire life cycle of their shipments and manage the delivery process digitally. As a result, the postal sector will not only achieve operational efficiency but also become a customer-focused, sustainable, and globally integrated digital ecosystem.

The successful and sustainable implementation of digital transformation in the postal sector is not only dependent on technological investments but also requires an effective regulatory structure, inclusive policy frameworks, and multi-stakeholder collaboration mechanisms. In this regard, strong and continuous institutional coordination between the sector's regulatory authority BTK, and postal service providers is of critical importance. BTK should act not only as a supervisory body but also as a facilitator and enabler of digitalization. Accordingly, it is necessary to update the regulatory infrastructure to allow the integration of next-generation technologies—such as artificial intelligence, blockchain, and robotic process automation—into the sector, and to define clear rules and standards in areas such as data security, ethical AI use, and cybersecurity. Furthermore, BTK should carry out impact assessments to monitor the effectiveness of digital transformation practices and develop compliance criteria.

To make digitalization accessible to all postal service providers, access to digital infrastructure for small and medium-sized enterprises must be facilitated. In this context, inclusive mechanisms should be developed through state-supported incentive programs, grants, tax relief, or public-private partnerships. Additionally, the sector must implement training and certification programs to enhance the digital competencies of its human resources. BTK may support these efforts by setting minimum standards for digital skills and promoting policies that enhance workforce qualifications. In conclusion, a holistic regulatory approach shaped by the principles of legal compliance, social inclusion, and economic sustainability will institutionalize digital transformation and enable the postal sector to evolve into a more competitive, resilient, and customer-centric structure.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Universal Postal Union (UPU), Postal networks: actors in the social and economic development of the Europe and Central Asia region – Regional Development Plan 2017–2020. Bern, Switzerland: UPU, 2017.
- [2] Universal Postal Union (UPU), The State of the Postal Sector 2025 – Postal Power Reimagined. Bern, Switzerland: UPU, 2025.
- [3] European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Postal services in the EU. Brussels, Belgium, 2019.
- [4] <https://sozluk.gov.tr/>
- [5] B. Gökdemir, “Universal service practices in the postal sector: A proposal for an appropriate method for Turkey,” Ph.D. dissertation, Ankara University, Ankara, Türkiye, 2014.
- [6] Universal Postal Union (UPU). (2016). Boosting E-commerce: A How-to Guide for Postal Operators.
- [7] Boffa, M. (2023). Logistics Constraints for International E-commerce. *Postal Strategies* (s. 359-369).
- [8] Groves, P., Mapletoft, A., & Roscelli, G. (2023). Short and Longer-Term Impacts of the Covid-19 Pandemic on Postal Consumer Demands, Universal Service Providers and the Wider Postal Sector. In *The Postal and Delivery Contribution in Hard Times* (pp. 191-206).
- [9] Sá Costa, C. F. P. (2022). Digital transformation of postal services operators.
- [10] Hinings B., Gegenhuber T., Greenwood R. (2018). Digital innovation and transformation: An institutional perspective. *Information and Organization*, 28(1), 52–61.
- [11] Fitzgerald M., Kruschwitz N., Bonnet D., Welch M. (2014). Embracing digital technology: A new strategic imperative. *MIT Sloan Management Review*, 55(2), 1.
- [12] Liu D., Chen S., Chou T. (2011). Resource fit in digital transformation: Lessons learned from the CBC Bank global e-banking project. *Management Decision*, 49(10), 1728–1742.
- [13] Vial, G. (2019), “Understanding digital transformation: A review and a research agenda”, *J. Strategic Information Systems*, 28(2), 118–144.

- [14] Rogers, D. L. (2016). The Digital Transformation Playbook: Rethink Your Business for the Digital Age.
- [15] Cebeci, H. İ. (2021). Artificial Intelligence Applications in Management Information Systems: A Comprehensive Systematic Review with Business Analytics Perspective.
- [16] Chowdhary, K. R. (2020). Fundamentals of Artificial Intelligence.
- [17] Whitmore, A., Agarwal, A. & Da Xu, L. The Internet of Things—A survey of topics and trends. *Inf Syst Front* 17, 261–274 (2015).
- [18] Madakam, S., Ramaswamy, R. and Tripathi, S. (2015) Internet of Things (IoT): A Literature Review. *Journal of Computer and Communications*, 3, 164-173.
- [19] Güven, V., & Şahinöz, E. (2018). Blockchain Cryptocurrencies: Bitcoin.
- [20] Berkeley Engineering. (2015). Sutardja Center for Entrepreneurship & Technology Technical Report, Blockchain Technology.
- [21] Huawei Technologies Co., Ltd. (2023). Cloud Computing Technology.
- [22] TechTarget (2023), “Robotics”, [Online]. <https://www.techtarget.com/whatis/definition/robotics> Accessed: 02 Jan. 2025.
- [23] Pekonen, I., & Lähtinen, J. (2021). Robotic Process Automation (RPA) As A Digitalization Related Tool To Process Enhancement And Time Saving.
- [24] Gartner (2023), “Big Data”, [Online]. Available: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/big-data>. Accessed: 10 May 2025.
- [25] Oussous, A., Benjelloun, F.-Z., Lahcen, A. A., & Belfkih, S. (2018). Big Data technologies: A survey.
- [26] Al-Shiakhli, S. (2019). Big Data Analytics: A Literature Review Perspective.
- [27] A. B. Akbulut (2023), “An analysis of digital transformation in the postal sector from a competitive perspective: International practices and recommendations for ICTA,” IT Specialization Thesis, Information and Communication Technologies Authority (BTK), Ankara, Türkiye.
- [28] Otsetova, A. (2019), “Digital Transformation of Postal Operators – Challenges and Perspectives”, *Transport and Communications*, II.
- [29] Nguyen, A. (2020). How Artificial Intelligence Can Affect Postal and Parcel Industry.
- [30] Gartner (2023), “Big Data”, [Online]. Available: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/big-data>. Accessed: 10 May 2025.
- [31] Kosovac, A., Muharemović, E., Blagojević, M., & Medić, A. (2021). The Influence of Introduction and Integration of New Technologies on Processes in Postal Traffic. In *New Technologies, Development and Application IV* (s. 690–699).
- [32] DHL & Cisco. (2020). Internet of Things in Logistics: A Collaborative Report by DHL and Cisco on Implications and Use Cases for the Logistics Industry.
- [33] United States Postal Service. (2016). Blockchain Technology: Possibilities for the U.S. Postal Service. RARC Report Report Number RARC-WP-16-011. May 23, 2016.
- [34] Logapriya, S., & Niraimathi, S. (2016). Data Storage in Cloud Computing. *IJSRSET*, 2(2), Themed Section: Engineering and Technology. Print ISSN: 2395-1990, Online ISSN: 2394-4099.
- [35] Aivazidou, E., Antoniou, A., Arvanitopoulos, K., & Toka, A. (2012). Using Cloud Computing in Supply Chain Management: Third-Party Logistics on the Cloud. In *Second International Conference on Supply Chains*.
- [36] United States Postal Service. (2018). Autonomous Mobile Robots and the Postal Service. RARC Report Report Number RARC-WP-18-006. April 9, 2018.
- [37] Robocloud (2025), “Data Validation”, [Online]. Available: <https://robocloud.co.uk/data-validation/>. Accessed: 09 Jan. 2025.
- [38] Shamsuzzoha, A., & Pelkonen, S. (2025), “A robotic process automation model for order-handling optimization in supply chain management”, *Supply Chain Analytics*, 9, 100102.
- [39] Ł. Brzeziński, “Robotic Process Automation in Logistics – A Case Study of a Production Company,” *European Research Studies Journal*, vol. XXV, no. 2B, pp. 307–315, 2022.

- [40] Sisua Digital (2025), “RPA in Customer Service”, [Online]. Available: <https://sisuadigital.com/rpa-solutions/rpa-in-customer-service/>. Accessed: 09 Jan. 2025.
- [41] Kazan, H., Ünal, A., & Çuhadar, L. (2022), “Artificial Intelligence–Based Route Optimization: A Logistics Process Software Case Study”, in Proc. Int. Conf. on Smart Logistics (ICSL2022), Istanbul, Türkiye, 24–25 Nov. 2022.
- [42] Kılıç, H., Atalay, E., & Yurtsever, A. E. (2019), “The Role of Big Data and Customer Relationship Management (CRM) Integration in Marketing Communication Strategies: Evidence from a Large-Scale Private Bank”, *Journal of Strategic and Social Research*, 3(2), 289–310.
- [43] Melway (2025), “Big Data in the Logistics Sector”, [Online]. Available: https://www.melway.com.tr/tr/lojistik-sektorunde-buyuk_veri_a.html. Accessed: 10 Jan. 2025.
- [44] Martínez-Álvaro, O., & Núñez-González, A. (2016), “Information Related to Postal Flows and Big Data Analysis Potential: The Case of Spain”, *Transportation Research Procedia*, 18, 256–263.



Mobilya Sektöründeki Mikro-KOBİ'lerin Yeteneklerinin Dijital Uluslararasılaşma Öğrenme Merkezi Aracılığıyla Geliştirilmesi

Adem TEKEREK^{a,*}, Alper GÜZEL^b, Susana LEAL^c

João A.m. NASCIMENTOD^c, Sandra OLIVEIRA^c

^{a,*} Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ankara, 06500, Türkiye

^{b,*} Gazi Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri MYO, Ankara, 06500, Türkiye

^{c,*} Santarém Polytechnic University, School of Management and Technology, Santarém, Portugal

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 25.06.2025
Kabul: 20.07.2025

Anahtar Kelimeler:

Uluslararasılaşma
Mikro-KOBİ'ler
dijital öğrenme
mobilya sektörü
***Sorumlu Yazar**
e-posta:
atekerec@gmail.com

ÖZET

Avrupa mobilya sektöründeki mikro ve küçük ölçekli işletmeler (mikro-KOBİ'ler), sınırlı dijital beceriler, kısıtlı kaynaklar ve stratejik pazar anlayışının eksikliği gibi uluslararasılaşmanın önündeki önemli engellerle karşılaşmaya devam etmektedir. Bu zorluklara yanıt olarak, Erasmus+ Ana Eylem 2 tarafından desteklenen INT4FURN projesi, ECVET çerçevesiyle uyumlu modüler eğitim yoluyla uluslararası iş yetkinlikleri oluşturmak için tasarlanmış bir Dijital Uluslararasılaşma Öğrenme Merkezi geliştirmiştir. Bu makale, platformun pedagojik yaklaşımını, yapısal tasarımını ve tematik öğrenme modülleri, çok dilli sözlükler, eğitici videolar ve öz değerlendirme araçları gibi temel özelliklerini inceleyerek eleştirel bir analiz sunmaktadır. Nitel bir vaka çalışması metodolojisine dayanan bulgular, platformun özellikle mikro KOBİ'lerin ihtiyaçlarına göre uyarlanmış, kullanıcı merkezli, mobil erişilebilir ve dijital olarak kapsayıcı bir öğrenme deneyimi sağladığını göstermektedir. Dijital okuryazarlık ve öğrenci katılımı gibi zorluklar devam etse de INT4FURN merkezi, mesleki eğitime anlamlı bir şekilde katkıda bulunan ve geleneksel imalat endüstrilerindeki dijital ve sürdürülebilir dönüşümün daha geniş hedeflerini destekleyen ölçeklenebilir, yenilikçi bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır.

DOI: 10.59940/jismar.1726227

Enhancing Capabilities of Micro-SMEs in the Furniture Sector through a Digital Internationalisation Learning Hub

ARTICLE INFO

Received: 25.06.2025
Accepted: 20.07.2025

Keywords:

Internationalisation
Micro-SMEs
digital learning
furniture sector
***Corresponding Authors**
e-mail:
atekerec@gmail.com

ABSTRACT

Micro and small-sized enterprises (micro-SMEs) in Europe's furniture sector continue to face significant obstacles to internationalisation, including limited digital skills, constrained resources, and a lack of strategic market insight. In response to these challenges, the INT4FURN project, supported by Erasmus+ Key Action 2, has developed a Digital Internationalisation Learning Hub designed to build international business competencies through modular training aligned with the ECVET framework. This paper offers a critical analysis of the platform, examining its pedagogical approach, structural design, and core features, including thematic learning modules, multilingual glossaries, instructional videos, and self-assessment tools. Drawing on a qualitative case study methodology, the findings indicate that the platform provides a user-centred, mobile-accessible, and digitally inclusive learning experience, tailored specifically to the needs of micro-SMEs. While challenges such as digital literacy and learner engagement persist, the INT4FURN hub emerges as a scalable and innovative solution that makes meaningful contributions to vocational education and supports the broader goals of digital and sustainable transformation within traditional manufacturing industries.

DOI: 10.59940/jismar.1726227

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The furniture sector, a significant part of Europe's creative industries, reflects the continent's rich cultural and design heritage. Despite their strengths in craftsmanship and innovation, micro and small enterprises (micro-SMEs) often face considerable challenges when it comes to internationalisation. These difficulties are mainly due to limited resources, low levels of digital preparedness, and a lack of market intelligence. Such structural constraints are well-documented in the literature, which shows that micro-SMEs across various sectors frequently encounter barriers to entering foreign markets, including financial limitations, underdeveloped managerial capacity, and insufficient support structures [1][2].

Internationalisation is increasingly regarded not only as a growth strategy but as a vital requirement for long-term survival in today's globalised economy, particularly in traditional sectors such as furniture manufacturing [3]. However, research indicates that most micro-SMEs lack structured knowledge and key competencies in areas such as export logistics, market entry strategies, and cross-cultural communication. In many cases, these businesses adopt a reactive rather than a proactive approach to international markets, often lacking the strategic frameworks and skill sets necessary for sustainable global engagement [4].

To address these challenges, the European Union, through Erasmus+ Key Action 2 (KA220-VET), has launched several strategic partnerships aimed at enhancing the internationalisation capacity of vocational sectors. Within this context, the project stands out by providing a dedicated Digital Learning Hub that promotes the development of internationalisation skills through modular training aligned with the European Credit System for Vocational Education and Training (ECVET).

The relevance of such initiatives is underscored by research highlighting the need for accessible, context-specific, and scalable training solutions that are tailored to the practical realities of micro-enterprises [5]. Digital learning environments have gained increasing recognition as valuable tools for upskilling individuals in geographically dispersed and resource-constrained contexts. E-learning platforms, particularly those that incorporate mobile learning (m-learning), have proven their value in delivering flexible, personalised education to learners from diverse socio-economic and geographical backgrounds [6] [7]. These platforms are especially valuable in supporting ongoing professional development without disrupting day-to-day business

operations, an essential consideration for small business owners and employees operating under time and budget constraints.

The ECVET framework further enhances the structure of vocational learning by enabling credit transfer and recognition across national systems, thus supporting mobility and lifelong learning across borders. When embedded in well-designed digital training platforms, ECVET-aligned modules can significantly improve the quality, comparability, and recognition of vocational education outcomes [8].

Bringing together these elements, the project aims to bridge the knowledge and skills gap in micro-SME internationalisation through a user-friendly, multilingual, and mobile-accessible platform. This paper presents an academic review of the platform, analysing its content, pedagogical framework, digital tools, and its potential to impact the furniture sector. By addressing both educational quality and technological accessibility, it offers a replicable model that contributes to broader policy goals related to economic resilience, digital transformation, and sustainable growth within Europe's creative industries [6].

2. METHODOLOGY (Yöntem)

The Digital Internationalisation Learning Hub's design, usability, and pedagogical efficacy are assessed in this study using a qualitative case study methodology. When evaluating the multifaceted character of digital learning platforms designed for micro-enterprises, a case study technique was chosen because it is well-suited for in-depth, contextual examination of complex interventions within real-life settings. Five fundamental aspects of the platform are the subject of the analysis: (1) User Interface (UI); (2) Create a Navigational Design; (3) Accessibility of Digital Content; (4) Pedagogical Structure and Learning Objectives; (5) Multilingual materials, instructional videos, proficiency glossary and self-assessment tools. A summary of the main steps implemented is provided in Table 1.

Direct interaction with the platform's publicly available components (digitalhub.int4furn.eu), a reading of relevant project documentation, and an examination of interface behaviour across various devices and browsers were used to gather data. Established frameworks in online accessibility (Web Content Accessibility Guidelines - WCAG 2.1), instructional design, and usability served as the basis for key criteria [9][10].

Components that represent the user's initial experience and basic architecture were given priority in the review because full access to all training materials and interactive features required user registration. Field notes, screenshots, and comparative checklists based on worldwide e-learning platform evaluation standards were used to document observations.

Table 1 - Summary of Observations and Recommendations on the INT4FURN Learning Platform

Component	Observations	Recommendations
2.1. User Interface	Modern, clean interface with consistent design; modular content layout supports usability. Needs improved visual hierarchy and interactive feedback.	Add hover states, progress indicators, and clearer content hierarchy.
2.2. Navigation Structure	Intuitive and shallow navigation structure with valuable features like breadcrumbs and search. Some sub-pages lack internal linking or contextual guidance.	Enhance internal links and add contextual prompts on sub-pages.
2.3. Digital Accessibility	Partially meets WCAG 2.1 standards with basic keyboard access and text. Need transcripts for media, UI customisation options, and better format accessibility.	Provide transcripts, subtitle options, and UI customisation tools.
2.4. Learning Objectives	Modules are thematically organised but lack clear, measurable learning objectives. Improved instructional alignment is recommended.	Define specific, measurable objectives that align with the module's content.
2.5. Instructional Videos	Training videos with subtitles are included, but not publicly	Make sample videos publicly available with subtitles and descriptions.

	accessible. Metadata lacks detail on duration, pedagogy, and interactivity.	
2.6. Proficiency Glossary	Glossary supports multiple languages and defines key terms, but access is restricted to logged-in users.	Provide open access to selected glossary entries and usage examples.
2.7. Self-Assessment Tool	Featured; format and feedback mechanism not transparent.	Offer a demo version; describe the structure, scoring logic, and alignment to modules.

2.1. User Interface (Kullanıcı Arayüzü)

The platform presents a modern, clean, and visually consistent interface that aligns well with current digital design standards. Its use of a cohesive colour scheme, legible typography, and generous white space contributes to a comfortable and accessible user experience. Graphical elements such as icons and buttons are seamlessly integrated and intuitively designed, supporting ease of navigation and interaction. Content is organised into modular blocks, which aids cognitive processing and helps prevent information overload. Interactive features, including course modules and downloadable resources, are clearly identifiable and function smoothly across different devices. Nonetheless, some areas could be improved by introducing a more pronounced visual hierarchy and interactive cues, such as hover effects or progress indicators, to further enhance user engagement and feedback [11].

2.2. Navigation Structure (Navigasyon Yapısı)

The platform's navigation structure is primarily intuitive and designed with the user in mind. The main navigation menu provides direct access to core sections, including course content, partner institutions, and learning resources. The structure is hierarchical yet shallow, enabling users to locate information within just a few clicks. Features such as breadcrumbs, a persistent header menu, and search functionality contribute to a smooth and accessible navigation experience, particularly for first-time visitors. However, some sub-pages would benefit from improved internal linking and more explicit contextual guidance, which would reduce the need for users to backtrack. The logical organisation of content

structured around thematic areas and training modules supports both content discoverability and knowledge retention.

2.3. Digital Accessibility (*Dijital Erişebilirlik*)

In terms of digital accessibility, the platform demonstrates partial adherence to the Web Content Accessibility Guidelines (WCAG 2.1). The site offers basic keyboard navigability and displays acceptable contrast ratios between text and background. Additionally, the inclusion of alternative text for images and screen-reader-compatible HTML elements enhances accessibility for users with visual impairments. However, there are areas requiring improvement to ensure full inclusivity. For instance, dynamic elements such as video content and downloadable files should be provided in accessible formats (e.g., transcripts, subtitles, or PDFs that are compatible with screen readers). Moreover, the absence of customizable UI options, such as text resizing or colour contrast adjustments, may limit accessibility for users with specific needs [12].

2.4. Learning Objectives (*Öğene Objeleri*)

The platform structures its curriculum into seven thematic modules that address essential dimensions of internationalisation from "Starting up an International Business" to "Sustainable Internationalisation" (digitalhub.int4furn.eu). However, the platform does not prominently display explicit learning objectives, such as measurable outcomes (e.g., "able to draft an export plan"). While the module titles suggest thematic breadth, an academic evaluation would recommend the inclusion of clearly defined objectives, articulated in terms of knowledge, skills, and application levels. This would support both instructional coherence and learner self-regulation [13].

2.5. Instructional Videos (*Tanıtıcı Videolar*)

According to site metadata, the platform includes "instructive and engaging training videos with subtitles" as a key component of Work Package 4 (digitalhub.int4furn.eu). However, these videos are not accessible through the publicly available sections of the platform. Information on their duration, instructional style (e.g., case-based, lecture-based), or degree of interactivity is likewise unavailable. To conduct a comprehensive review of their pedagogical value and accessibility, particularly regarding subtitle accuracy and inclusive design, it would be necessary to access sample videos, which appear to be restricted to registered users or the full version of the platform.

2.6. Proficiency Glossary (*Yeterlilik Sözlüğü*)

The platform promotes a "Proficiency Glossary" intended to clarify key terminology related to internationalisation and business (digitalhub.int4furn.eu). The multilingual nature of the platform is evident, with interface support available in languages including Turkish, Spanish, Portuguese, Greek, Estonian, Dutch, and English. However, access to the glossary itself requires user registration, preventing a complete evaluation of its structure, scope, and usability in the public-facing version of the site.

2.7. Self-Assessment Tool (*Öz Değerlendirme Aracı*)

A self-assessment tool is available within the platform to support learners in evaluating their readiness for internationalisation and to offer tailored tutoring recommendations (<http://digitalhub.int4furn.eu>). Access to this feature requires a user login. Once logged in, users are provided with quizzes, assessment scales, and personalised feedback reports. This methodological framework enables a multidimensional evaluation of the platform's educational and technical qualities [14].

3. SYSTEM DESCRIPTION AND CONTENT (SİSTEM AÇIKLAMASI VE İÇERİK)

3.1. Platform Structure (*Platform Yapısı*)

The Digital Learning Hub functions as a comprehensive, open-access e-learning platform specifically designed to address the upskilling and digital transformation needs of micro, small, and medium-sized enterprises (micro-SMEs) operating in the furniture manufacturing sector. With a multilingual interface and user-friendly design, the platform is built to accommodate a diverse user base across various European regions. Its structure integrates several key components designed to enhance accessibility, learner engagement, and practical relevance.

Thematic Learning Modules. The platform is organised into seven key modules: Starting up an International Business, Accessing International Markets, International Logistics and the International Value Chain, Managing Market Analytics and Information, Understanding the Customer, Marketing to Global Customers, and Sustainable Internationalisation. Collectively, these modules cover a wide range of topics central to the internationalisation of the furniture sector, including digital innovation, sustainable production practices, digital marketing, innovative manufacturing

technologies, and human capital development. The modular and sequential structure allows learners to engage with the content at their own pace, supporting personalised and goal-oriented learning pathways.

E-Learning-Adapted Content. All educational materials are adapted explicitly for e-learning environments, incorporating infographics, instructional videos, and clear, structured text. Importantly, all textual content within the modules, as well as subtitles for video materials, is available in the seven partnership languages: Turkish, Spanish, Portuguese, Greek, Estonian, Dutch, and English. This ensures both linguistic inclusivity and accessibility for a broad range of learners.

Proficiency Glossary. To support comprehension and promote a shared understanding of key concepts, the platform features a multilingual glossary that facilitates a deeper understanding of the content. Available in the seven partnership languages, the dictionary defines essential technical terms related to internationalisation in the furniture industry, helping users navigate specialised content across language barriers.

Self-Assessment Tools. Each module includes a self-assessment feature designed to encourage reflective learning. Learners can evaluate their prior knowledge and track their progress upon completion of the module, reinforcing learning outcomes and enabling personalised feedback.

Mobile Compatibility. Acknowledging the importance of flexible learning, the platform is fully optimised for mobile access across iOS and Android devices. This ensures that learners can engage with the content at their convenience, even in remote or resource-limited settings.

User-Centred and Accessible Design. The platform architecture is grounded in user-centred design principles, with an emphasis on intuitive navigation and adherence to digital accessibility standards, such as the Web Content Accessibility Guidelines (WCAG). This approach accommodates users with different levels of digital proficiency and supports inclusive learning experiences.

Supportive Learning Ecosystem. Beyond its core learning materials, the platform fosters a broader educational environment through features such as discussion forums, progress tracking dashboards, and access to supplementary resources. These tools encourage peer interaction and ongoing knowledge exchange, contributing to the development of a collaborative community of practice among users.

3.2. Learning Modules (*Öğrenme Modülleri*)

The INT4FURN Digital Learning Hub offers a comprehensive set of learning modules aligned with the European Credit System for Vocational Education

and Training (ECVET), designed to equip learners, particularly those in the furniture and wood processing sectors, with the skills necessary for effective internationalisation. By adhering to ECVET principles, the modules support the transfer and recognition of learning outcomes across national boundaries, enhancing mobility and the relevance of vocational training within a European context.

The platform currently features the following seven modules:

Starting up an International Business: This module introduces the foundational principles of launching a business in an international context. Learners explore the legal, financial, and strategic requirements of cross-border operations, with emphasis on preparing a business for global markets. Topics include international business planning, legal forms, partnerships, and risk assessment.

Accessing International Markets: Focused on market entry strategies and internationalisation pathways, this module guides learners through export readiness, market selection, and the regulatory and cultural considerations of target countries. Case studies demonstrate successful market entry approaches, and learners are encouraged to evaluate and compare multiple strategies to inform their own decision-making.

International Logistics and International Value Chain: This module provides insight into global supply chain structures and logistics operations critical for international trade. Topics include transportation modes, warehousing, customs procedures, and digital tools for logistics management. Learners gain a practical understanding of how efficient logistics systems contribute to international competitiveness.

Managing market analytics and information: Equipping learners with the tools to collect, interpret, and apply market data, this module emphasises the importance of informed decision-making. Topics include competitor analysis, market trend forecasting, and digital platforms for information sourcing. Learners are introduced to techniques for managing information flows and turning data into strategic insights.

Understanding Customers: This module delves into customer behaviour in international contexts, including cultural dimensions, preferences, and communication styles. Learners explore segmentation techniques, customer profiling, and buyer personas to gain a deeper understanding of diverse international audiences. Real-world examples illustrate how understanding customer needs leads to successful engagement.

Marketing to Global Customers: Building on the previous module, this section focuses on global marketing strategies, branding, and promotional channels suitable for international customers.

Learners are introduced to digital marketing, content localisation, and multi-channel campaign planning. The module also addresses ethical marketing and cultural sensitivity in communication.

Sustainable Internationalisation: Addressing the growing demand for sustainability in global business, this module highlights the environmental and social dimensions of international operations. Learners explore corporate social responsibility (CSR), eco-certifications, principles of the circular economy, and sustainability reporting. Practical tools help businesses align their international strategies with global sustainability goals.

4. EXPECTED IMPACT AND DISCUSSION (BEKLENEN ETKİ VE TARTIŞMA)

The Digital Learning Hub is anticipated to bring significant benefits to micro-SMEs in the furniture sector, particularly across Europe. These benefits are expected to contribute across several strategic areas, closely aligned with broader industry objectives related to modernisation and internationalisation, as outlined below.

Capacity Building: The platform offers targeted and sector-specific training modules that focus on international trade, logistics, digitalisation, and cross-cultural marketing. These learning opportunities address a significant skills gap in micro-SMEs, equipping entrepreneurs and employees with competencies that are critical for entering and succeeding in global markets.

Accessibility and Equity: The platform's free access and multilingual support ensure that learning is inclusive and not limited by language, geography, or financial capacity. This is particularly crucial in empowering underrepresented groups within the sector, including women, youth, and migrants.

Self-directed Learning: Learners benefit from a personalised learning experience supported by self-assessment tools that help identify their strengths, knowledge gaps, and track progress over time. This fosters autonomy and increases engagement by allowing learners to tailor their educational journey according to individual needs.

Digital Transformation Readiness: By familiarising users with online learning environments and digital tools, it contributes to the broader digital transformation of the furniture sector, which has traditionally lagged in adopting digital solutions [6].

Sustainability Integration: In line with the European Green Deal and increasing consumer demand for sustainable practices, it incorporates modules on green logistics, eco-friendly packaging, and responsible sourcing strategies. These elements foster an understanding of sustainability as a competitive advantage rather than a regulatory burden.

However, despite these expected benefits, several challenges must be acknowledged. Digital literacy remains a barrier for some target users, particularly in rural regions or among older demographics. Moreover, sustaining learner motivation in self-paced environments can be difficult without structured incentives or community interaction. Finally, long-term usage and impact depend on ongoing content updates, institutional support from industry associations, and empirical monitoring of learning outcomes and business performance improvements. Future follow-up studies should aim to capture both quantitative metrics (e.g., user engagement, completion rates, business performance indicators) and qualitative insights (e.g., user satisfaction, perceived relevance, behavioural changes). These studies will be instrumental in refining the platform and ensuring its scalability and adaptability across multinational and cultural contexts. In conclusion, the platform represents a forward-looking initiative with high transformative potential for micro-SMEs in the furniture industry. Its success, however, will ultimately hinge on sustained stakeholder engagement, user-centred design evolution, and evidence-based impact evaluation.

5. CONCLUSION (SONUÇ)

The Digital Learning Hub emerges as a timely and strategic intervention aimed at addressing the internationalisation challenges faced by micro-SMEs in the European furniture sector. By combining modular, ECVET-aligned content with a user-friendly, multilingual, and mobile-accessible platform, it offers a scalable solution to close skills gaps in areas such as export readiness, market intelligence, and sustainable business practices. The platform's integration of multimedia resources, self-assessment tools, and inclusive design principles demonstrates a commitment to both pedagogical quality and learner accessibility. While the initiative shows strong potential in fostering digital transformation and capacity building, its long-term success will depend on continuous stakeholder engagement, iterative improvements based on user feedback, and robust mechanisms for evaluating its impact. The approach might be expanded to include allied industries (such as light manufacturing, crafts, and textiles) and better integrated with national qualification frameworks to facilitate the official acknowledgement of learning results.

Future studies should examine both quantitative indicators (such as user engagement, module completion rates, and participant export growth) and qualitative feedback (such as perceived value, learning impact, and behavioural change) to evaluate

practical efficacy. These observations will be crucial for enhancing the platform and informing digital training plans across various vocational fields. To summarise, it is a viable, inclusive, and scalable strategy for enhancing the international expansion capabilities of micro-SMEs. It has a great chance to make a significant contribution to the digital and economic transformation of Europe's manufacturing and creative sectors with continued stakeholder collaboration and evidence-based improvement.

6. REFERENCES (REFERANSLAR)

- [1]. European Commission. (2020). Annual Report on European SMEs 2019/2020.
- [2]. Knight, G. A., & Liesch, P. W. (2016). Internationalisation: From incremental to born global. *Journal of World Business*, 51(1), 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.jwb.2015.08.011>
- [3]. Ruzzier, M., Hisrich, R. D., & Antoncic, B. (2006). SME internationalisation research: Past, present, and future. *Journal of Small Business and Enterprise Development*, 13(4), 476–497. <https://doi.org/10.1108/14626000610705705>
- [4]. Johanson, J., & Vahlne, J.-E. (2009). The Uppsala internationalisation process model revisited: From liability of foreignness to liability of outsidership. *Journal of International Business Studies*, 40(9), 1411–1431. <https://doi.org/10.1057/jibs.2009.24>
- [5]. Kok, J., Vroonhof, P., Verhoeven, W., Timmermans, N., Kwaak, T., & Snijders, J. (2011). Do SMEs create more and better jobs? EIM. https://files.fleetnews.co.uk/do-smes-create-more-and-better-jobs_en.pdf Access Date: 20.07.2025
- [6]. INT4FURN Project. (2025). Digital learning hub for the internationalisation of furniture sector micro-SMEs. <https://digitalhub.int4furn.eu/> Access Date: 20.07.2025
- [7]. Ally, M., & Samaka, M. (2013). Open education resources and mobile technology to narrow the learning divide. *International Review of Research in Open and Distributed Learning*, 14(2), 14–27.
- [8]. European Commission. (2019). European Vocational Education and Training Policy. <https://ec.europa.eu/>
- [9]. M. D. Merrill, “First principles of instruction,” *Educational Technology Research and Development*, vol. 50, no. 3, pp. 43–59, 2002, doi: <https://doi.org/10.1007/BF02505024>
- [10]. J. Nielsen, *Usability Engineering*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann, 1994.
- [11]. J. Nielsen, “Enhancing the explanatory power of usability heuristics,” in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Boston, MA, USA, 1994, pp. 152–158.
- [12]. Chavda, M., Patel, H., & Bhatt, H. (2024). Quality education through writing: Aligning learning objectives in learning materials and question papers using Bloom’s taxonomy. *Quality Assurance in Education*, 32(1), 96–110. <https://doi.org/10.1108/QAE-03-2023-0045>
- [13]. Alsaeedi, A. (2020). Comparing web accessibility evaluation tools and evaluating the accessibility of webpages: Proposed frameworks. *Information*, 11(1), 40. <https://doi.org/10.3390/info11010040>
- [14]. Nicol, D. J., & Macfarlane-Dick, D. (2006). Formative assessment and self-regulated learning: A model and seven principles of good feedback practice. *Studies in Higher Education*, 31(2), 199–218.



Plastik Enjeksiyon Komponentlerinde Otomatik Hata Tespiti için Görüntü İşleme ve PLC Tabanlı Sistem Tasarımı

Ayşegül İNCEKARA^a, Sabri KOÇER^{a*}, Şaban GÜLCÜ

^a* Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Konya, 42140, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: : 30.06.2025
Kabul: 25.11.2025

Anahtar Kelimeler:

Gerçek zamanlı sistemler,
Makine görmesi,
Görüntü işleme,
Nesne Tanıma,
Plastik enjeksiyon.

*Sorumlu Yazar

e-posta:
ayseglakmn@gmail.com

ÖZET

Günümüzde otomasyon sistemlerinde, özellikle plastik enjeksiyon sektöründe faaliyet gösteren üreticiler için üretim bandından çıkan nihai ürünün kalitesi en önemli etkenlerden biridir. Bu bağlamda, üreticiler üretimin son aşaması olan kalite kontrol işlemlerini minimum hata ile gerçekleştirmek istemektedirler. Geleneksel yöntemlere alternatif olarak, üreticilerin ihtiyaç ve taleplerine hızlı yanıt verebilmek için tam otomasyonlu bir sistem geliştirilmiştir. Bu çalışmada, plastik enjeksiyon komponentlerinin kalite kontrolünü otomatikleştirmek amacıyla, PLC tabanlı görüntü işlemeyle sınıflandırma ve fiziksel ayırıştırma sistemi tasarlanarak gerçekleştirilmiştir. Görüntü işleme işlemleri, Python dili ve OpenCV kütüphanesi kullanılarak geliştirilmiştir. Plastik enjeksiyon numune komponentlerine HSV renk uzayında eşikleme ve kontur analizi yapılmıştır. Kameradan alınan görüntülerde, RGB'den HSV renk uzayına yapılan dönüşümler sayesinde komponentlerin rengi ve geometrik şekli başarılı bir şekilde tanımlanmıştır. OpenCV kütüphaneleri ile desteklenen görüntü işleme algoritmaları kameradan alınan görüntülerin anlık işlenmesini sağlamıştır. Görüntü verileri üzerinden renk ve geometrik şekil tespiti yapılmıştır. Tespiti yapılan komponentler, GUI üzerinden kullanıcı tarafından belirlenen hatalı renk ve şekil değerlendirilmesi sonucu PLC'ye Modbus RS-232 seri haberleşme protokolü ile tetikleme sinyali gönderilmiştir. PLC, bu sinyali pnömatik silindire ileterek çalışmasını sağlamıştır. Pnömatik silindirin hareketi sonucunda hatalı komponentler, konveyör hattından otomatik olarak ayırıştırılmıştır. Sistem üzerinde yapılan testler kapsamında, farklı renk ve şekil kombinasyonlarına sahip numune komponentler kullanılarak mavi dairede %100, yeşil yıldızda %95.00, sarı üçgende %98,33 ve turuncu kare için ise %98,33 doğruluk oranına ulaşılmıştır.

DOI: 10.59940/jismar.1729853

Development of Automated Defect Detection System for Plastic Injection Components using Image Processing and PLC Integration

ARTICLE INFO

Received: 30.06.2025
Accepted: 25.11.2025

Keywords:

Real-time systems,
Machine vision,
Image processing,
Object recognition,
Plastic injection.

*Corresponding Authors

e-mail:
ayseglakmn@gmail.com

ABSTRACT

In today's automation systems, especially within the plastic injection industry, the quality of the final product emerging from the production line is one of the most critical factors for manufacturers. In this context, manufacturers aim to perform quality control processes, the final stage of production, with minimal error. As an alternative to traditional methods, a fully automated system has been developed to quickly respond to the needs and demands of manufacturers. In this study, a PLC-based system combining image processing for classification and physical separation was designed and implemented to automate the quality control of plastic injection components. The image processing tasks were developed using the Python programming language and the OpenCV library. Thresholding and contour analysis were applied to plastic injection sample components in the HSV color space. Through the conversion of images from RGB to HSV color space, the color and geometric shape of the components were accurately identified. Real-time image processing of the captured frames was achieved using OpenCV-supported algorithms. Based on the image data, color and shape detection was performed. The identified components were evaluated through a user-defined GUI, where defect criteria based on color and shape were set. If a component matched the defective criteria, a trigger signal was sent to the PLC via the Modbus RS-232 serial communication protocol. The PLC then activated a pneumatic cylinder, which physically removed the defective components from the conveyor line. Tests conducted on the system using sample components with different color and shape combinations yielded accuracy rates of 100% for blue circles, 95.00% for green stars, 98.33% for yellow triangles, and 98.33% for orange squares.

DOI: 10.59940/jismar.1729853

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son 20 yılda plastik uygulamalarının hızlı ilerleyişi, sentetik polimerlerden veya diğer malzemelerden üretilen çok sayıda plastik ürünün ortaya çıkmasıyla sonuçlandı [1]. Plastik malzemeler, günümüz endüstrilemiş dünyasında en önemli ve en yaygın şekilde kullanılan malzemeler arasında yer almaktadır. İstenilen niteliklere göre kolayca şekillendirilebilen yapıları sayesinde, hemen her formda kolayca üretilmekte ve geniş bir kullanım alanı sunmaktadır. Sertlik, renk, tokluk, geometrik şekil gibi fiziksel özellikleriyle, farklı sektördeki uygulamalar için uygun çözümler sağlamaktadır [2]. Bu bağlamda, üretim süreçlerinde hız, kalite ve verimlilik gibi temel gereksinimlerin karşılanabilmesi, makine gücüne dayalı otomasyon sistemlerin kullanımını kaçınılmaz kılmaktadır. Plastik enjeksiyon kalıplama, yüksek hacimli ve hızlı üretim imkanı sunmasıyla otomasyon sistemleri arasında plastik ürünlerin imalatında yaygın olarak tercih edilmektedir [3].

Endüstriyel denetim, bir ürünün piyasaya sunulmadan önce kalite standartlarını karşılayıp karşılamadığının kontrol edilmesinde hayati bir öneme sahiptir [4]. Üretim hatalarının en aza indirilmesi, yüksek kalite standartlarında ürün elde edilmesi ve bu süreçlerin üretim süreçleriyle entegre şekilde yürütülmesi, plastik enjeksiyon komponentlerinin gerekliliği arasında yer almaktadır. Geleneksel kalite kontrol yöntemleri, büyük ölçüde insan gözüne dayalı görsel denetimlerle sınırlı kalmaktadır. Bu durum hata tespitinde gecikmelere yol açmakta ve istenmeyen sonuçlara yol açabilmektedir. Hataların geç farkedilmesi, üretim verimliliğini olumsuz etkilediği gibi, kalite standartlarının sürdürülebilirliğini de zorlaştırmaktadır [5]. Bu nedenle, modern üretim hatlarında kalite kontrol süreçlerinin daha güvenilir ve hızlı bir şekilde yürütülebilmesi amacıyla makine görüşü, görüntü işleme algoritmaları ve yapay zeka destekli sistemler beraber kullanılmaktadır [6]. Söz konusu teknolojiler ile yüksek kalitede ürünler elde edilmesi ve üretim süreçlerinin kesintisiz şekilde denetlenmesi mümkün hale gelmektedir.

Huang vd. [7] kameradan alınan görüntü verileri üzerinde nesneleri şekillerine göre sınıflandırma işlemi yapmışlardır. Sınıflandırılan nesneler, yatay eksende hareket edebilen bir robot kol aracılığıyla farklı bir konuma taşınmıştır. Görüntü işleme teknikleri kapsamında kullanılan kenar bulma algoritması ile yuvarlak nesnelerin tespiti gerçekleştirilmiştir. Robot kol, tespit edilen nesnenin konumuna göre hareket eden nesneyi kavrayıp ilgili konuma yerleştirmiştir.

Al Kamal vd. [8] metal kauçuk kaplama işlemi sonrasında kusurların tespiti için bir makine görme sistemi tasarlamışlardır. Geliştirilen sistemde, kamera vasıtasıyla FireWire arayüzü üzerinden PCI FireWire kartı ile bilgisayara entegre edilmiştir. Görüntü işleme ve analiz süreci; görüntü edinimi, görüntü iyileştirme, eşikleme ve şekil eşleştirme adımlarından oluşmaktadır. Bu yöntem, kalite kontrolü sağlayarak, insan kaynaklı hataları azaltmaktadır.

Bin Roslan vd. [9] plastik ürünlerin üretim süreci içinde otomatik yüzey kusurların tespitini yapmıştır. Kusur tespiti için You Only Look Once adlı yöntem önermişler ve yöntemin sistemlere kolayca entegre edilebileceğine vurgu yapmışlardır. Yine 2019 yılında Adamo vd. [10] cam yüzeyinde kusurlar için kameradan görüntü verileri almışlar ve Canny kenar bulma algoritması kullanarak hata tespitini sağlamıştır.

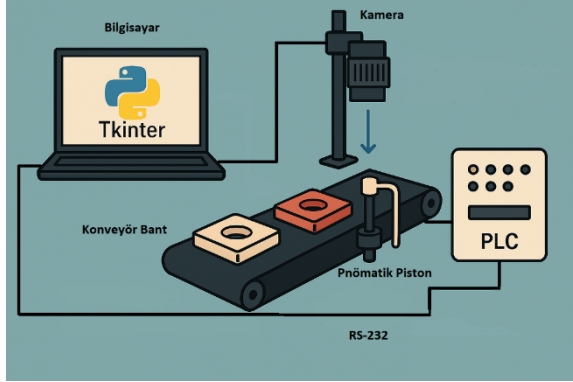
Şengül vd. [11] ürünleri renklerine göre ayırmak için görüntü işleme teknolojileri kullanarak PLC tarafından kontrol edilen bir sistem geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımda endüstriyel otomasyon sistemlerde verimliliğin artırılması hedeflenmiştir. Yine Liu vd [12] plastik ürünlerin yüzeyinde çizik ve çatlaklar için CCD kamera ile PLC kontrol biriminden oluşan sistem önermişler ve özel aydınlatma sisteminin gerekliliğine değinmişlerdir.

Bu çalışmada, plastik enjeksiyon ile üretilen komponentlerin kalite kontrolünü sağlamak amacıyla PLC tabanlı otomatik görüntü işleme sistem tasarlanması ve uygulanması amaçlanmaktadır. Sistem, üretim hattındaki ürünlerde renk veya geometrik şekil hatalarını gerçek zamanlı olarak tespit etmeyi ve bu hatalara uygun otomasyon ile görüntü işleme teknolojileri kullanarak müdahale etmeyi amaçlamaktadır. Böylece, hem ürün kalitesinin artırılması hem de sürecin dijitalleşme ve endüstri 4.0 hedeflerine uygun şekilde otomatikleştirilmesi sağlanacaktır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHODS)

Makine görme teknolojisiyle çalışan kalite kontrol sistemleri, aydınlatma sistemi, optik görüntüleme sistemleri, kamera modülü, görüntü toplama ve dijitalleştirme birimi, görüntü işleme ve karar verme algoritmaları ile PLC destekli kontrol ve uygulama modüllerinden oluşmaktadır [13]. Verilen bu modüller üretim hatlarına entegre edilmiş makine görme otomasyon sistemini oluşturmaktadır.

Plastik enjeksiyonla üretilen komponentlerde kalite kontrolün sağlanabilmesi için bu modüller, gerçek zamanlı görüntü analizi ve otomatik ayırıştırma süreçlerinde birlikte çalışacak şekilde yapılandırılmıştır. Geliştirilen sistemin genel mimarisi Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1 Sistem Mimarisi (System Architecture)

2.1. Aydınlatma Sistemi (Lighting System)

Görüntü işleme sistemlerinde ışık kaynağının seçimi, algılanacak nesnenin yüzey özelliklerine göre belirlenmelidir. Nesnenin açık veya koyu renkte olması, mat ya da parlak yüzeye sahip olması gibi özellikler, üzerine düşen ışığın miktarını ve bu ışığın kamera lensi tarafından algılama kalitesini doğrudan etkilemektedir [13], [14]. Bu nedenle, görüntüde mümkün olan en yüksek yoğunluk değeri elde edildiğinde optimum kontrast seviyesi sağlanmalı ve görüntü işleme algoritmalarının başarımı artırılmalıdır.

Öte yandan, doğal ışık kaynakları -özellikle gün ışığı- mevsimsel değişimler, günün saatine bağlı açılabilir farklılıklar ve hava koşulları gibi çevresel etmenler nedeniyle istikrarsız bir aydınlatma düzeyi sergilemektedir. Işık kaynağındaki kararsızlık, gün ışığının endüstriyel görüntü işleme uygulamalarında istikrarlı bir aydınlatma kaynağı olarak kullanılmasını büyük ölçüde sınırlandırmaktadır. Bu bağlamda, sistemlerde kontrollü ve sabit özelliklere sahip yapay ışık kaynaklarının tercih edilmesi, algılama doğruluğu ve kararlılığı açısından önemlidir. Çalışmada, numune komponentlerin renk ve geometrik şekillerinin tanımlanması için aydınlatma sistemi olarak beyaz şerit LED kullanılmıştır. Şerit LED, dışarıdan ışık almaz bir kutunun içine konveyöre dik şekilde konumlandırılmıştır. Işık yansımalarının ve olası parlamaların önlenmesi amacıyla kutunun içi beyaz kağıtla kaplanmıştır.

2.2 Kamera Modülü (Camera Module)

Makine ile görme uygulamalarında, kameranın ürettiği görüntü verisinin kalitesi, görüntü işlemenin doğruluğu üzerinde doğrudan etkili olup sistemin genel performansını belirleyen temel unsurlardan biridir [15]. Görüntü işleme algoritmaları, bu veriler üzerinde işlem yapacağından kalite kontrol süreçlerinde eksik veri içeren görüntüler yanlış değerlendirmelere sebep olmaktadır. Bu nedenle, kamera görüntülerinden elde edilen veriler görüntünün işleme başarımını doğrudan etkilemektedir.

Son yıllarda popüler olan CMOS görüntüleme sensörler, insan makine arayüzleri, makine görüşü, gözetimle izleme ve nesne tanıma gibi uygulamalar için tercih edilmektedir [16]. CMOS sensörlerin temel özelliği, algılama sürecini piksel seviyesinde hem analog hem de dijital işlemlerle bütünleştirebilmesidir [17]. Çalışmada kullanılan görüntüleme sistemi, CMOS görüntü sensörlü bir web kamerasından oluşmaktadır. Kamera, plastik numune komponentlerde geometrik şekil ve renk algılamak için yüksek kontrastlı görüntü verileri elde edecek biçimde konveyör üzerine Şekil 2’de gösterildiği üzere konumlandırılmıştır.



Şekil 2 Konveyör Bandında Kameranın Konumu (Camera Position on Conveyor Belt)

Kamera sistemi, mekanik stabiliteyi sağlamak amacıyla metal profiller ve bağlantı elemanları ile konveyör bantı kenarına monte edilmiştir. Nesnelerin optimum açıyla algılanabilmesi için sistem, ayarlanabilir açılı bir yapıyla desteklenmiştir. Kullanılan kamera bir USB 3.0 bağlantı arayüzü ile bilgisayara bağlanmıştır. Görüntü işleme yazılımı aracılığıyla, konveyör bandı üzerinde hareket eden nesnelerin renk ve şekil özelliklerini tespit etmek üzere kamera görüntüleri analiz edilmiştir. Kamera çözünürlüğü parça boyutuna ve kusur tipine göre seçilmiştir.

2.3 Konveyör Sistemi (Conveyor System)

Konveyör bant sistemleri, endüstriyel sanayi tesislerinde ve üretim hatlarında taşımacılığı otomatikleştirmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerde, motorla tahrik edilen gerilimli kayış mekanizması, nesnelerin belirlenen güzergah boyunca düzenli ve kontrollü bir şekilde taşınmasını sağlamaktadır. Konveyörün hareketi için motorun çalışma hızı, sistemin ihtiyacına göre mekanik düzenekler veya hız kontrol cihazları aracılığıyla ayarlanabilmektedir.

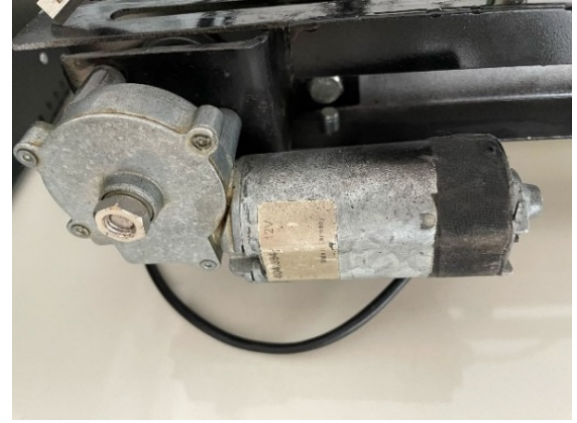
Çalışmada kullanılan konveyör sistemi, üretim hattında nesne algılama ve sınıflandırma işlemlerine entegre olacak şekilde yapılandırılmıştır. Bu mekanizma, motorla tahrik edilen bir bant sistemine dayanmaktadır ve Şekil 3'te gösterilmektedir. Farklı renklere ve geometrik şekile ait nesnelerin taşınması sağlayan ana yapı, konveyör bant sistemidir. Sistem, bantı hareket ettiren tahrik rulosu ile bantın yönünü ve gerginliğini koruyan serbest rulodan oluşan iki silindir etrafına kurgulanmıştır.



Şekil 3 Konveyör Bant Sistemi (Conveyor Belt System)

Tahrik rulosu, motorun dönme hareketini banda aktaran aktif eleman olup sistemin hareketini başlatırken; serbest rulo bantın uç kısmında yer almakta ve pasif bir şekilde dönerek bantın gerilimini ve yönlülüğünü dengelemektedir. Bu bağlamda bant, taşıma hattı boyunca düzenli ve kesintisiz bir akış sağlamaktadır. Bant üzerinde ilerleyen numune komponentler, görüntü işleme sisteminin çalışma alanından -kamera önünden- geçirilerek analiz edilmektedir. Bant 50*20 cm ölçülerinde tasarlanmış ve sistemin kompakt yapısını destekleyecek boyuttadır. Ayrıca, mekanik titreşimlerin minimize edilmesi ve zeminle olan teması dengelemek amacıyla konveyör ünitesine kauçuk tabanlı ayaklar monte edilmiştir.

Sistemin mekanik hareketi, redüktörlü bir doğru akım (DC) motor aracılığıyla sağlanmakta ve bu yapı Şekil 4'te verilmiştir. Motorun dönüş hızı, sistemin gereksinimlerine göre elektronik hız kontrol sürücülerini ile ayarlanabilmektedir. Konveyör bantının hareketinden sorumlu olan bu motor, PLC (Programlanabilir Lojik Kontrol) tarafından yönetilmekte ve kontrol sinyalleri yine PLC üzerinden motor sürücülerine iletilmektedir. Böylece konveyörün başlatılması ve durdurulması otomatik olarak gerçekleştirilmekte, işlem süresi sistem mantığına göre yönlendirilmektedir. Motorun çalışması için gerekli enerji, 5V-20A özelliğine sahip bir güç kaynağından sağlanmaktadır.



Şekil 4 Konveyörün Hareketini Sağlayan Motor (Motor to Drive the Conveyor)

2.3 Görüntü Bölümlendirme (Image Segmentation)

Görüntü bölümlendirme, bir görüntünün farklı özellikler temelinde birden fazla bölgeye ayrılması ve bu bölgeler arasından hedeflenen alanların çıkarılması işlemidir. Bu özellikler; gri ton değerleri, renk dağılımı, doku gibi parametreleri içerebilirken, çıkarılan hedef alanlar tekil bir bölge olabileceği gibi çoklu bölgelerde olabilmektedir [13].

2.4 HSV Renk Uzayı (Color Space)

Renk tabanlı görüntü işleme algoritmalarında RGB'den HSV (Hue Saturation Value) renk uzayına dönüşüm, özellikle değişken aydınlatma koşullarına karşı daha yüksek bir dayanıklılık sağlaması açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Bu dönüşüm nesne tespitinde doğruluğu artırmakta ve renk ile parlaklık bileşenlerinin birbirinden bağımsız olarak işlenebilmesine imkan tanımaktadır [18], [19]. Böylece, nesne tanıma ve sınıflandırma aşamalarında daha hassas ve kararlı analizlerin gerçekleştirilmesi mümkün olmaktadır.

Bu çalışmada, kamera görüntüsü RGB renk uzayından HSV renk uzayına dönüştürülerek nesne tespiti gerçekleştirilmiştir. HSV uzayı, özellikle renk tonlarını bileşenlerine ayırarak ayrıntılı renk analizi yapmaya olanak tanımaktadır. RGB'den HSV'ye dönüşüm, her pikselin yeni bir renk uzayı koordinatına dönüştürülmesiyle gerçekleştirilmiştir. RGB bileşenleri (R, G, B) normalize edilerek (0-1 aralığına) aşağıdaki denklemler kullanılmıştır [20]:

$$C_{max} = \max(R, G, B) \quad (1)$$

$$C_{min} = \min(R, G, B) \quad (2)$$

$$\Delta = C_{max} - C_{min} \quad (3)$$

Hue (H), doygunluk (S) ve parlaklık (V) bileşenleri sırasıyla Denklem (4), (5) ve (6)' da hesaplanmıştır [20]:

$$H = \begin{cases} 0^\circ, & \text{eğer } \Delta = 0 \\ 60^\circ * \left(\frac{G-B}{\Delta} \bmod 6 \right), & \text{eğer } C_{max} = R \\ 60^\circ * \left(\frac{B-R}{\Delta} + 2 \right), & \text{eğer } C_{max} = G \\ 60^\circ * \left(\frac{R-G}{\Delta} + 4 \right), & \text{eğer } C_{max} = B \end{cases} \quad (4)$$

$$S = \begin{cases} 0, & \text{eğer } C_{max} = 0 \\ \Delta / C_{max}, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (5)$$

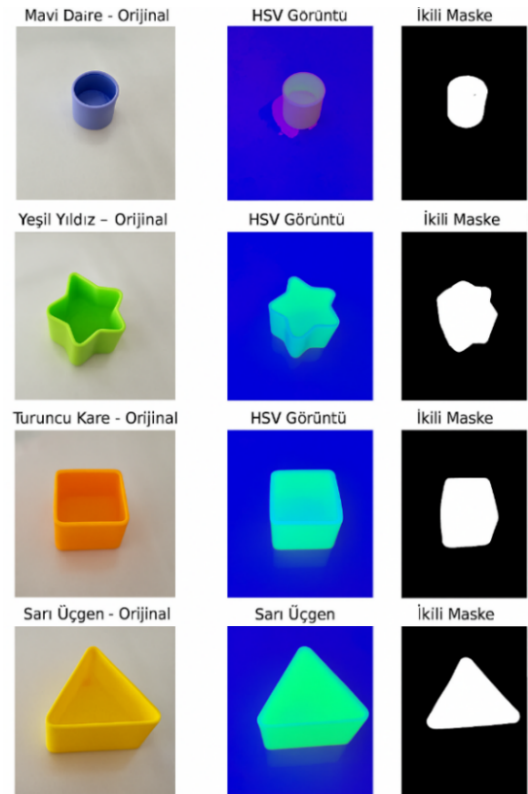
$$V = C_{max} \quad (6)$$

Denklem (4)'te hesaplanan H değeri $0^\circ - 360^\circ$ aralığında, Denklem (5) ve Denklem (6)' da hesaplanan S ve V bileşenleri 0-1 arasında değişmektedir. OpenCV kütüphanesinde bu bileşenler 8 bitlik formatta (0-255) ölçeklendirilmiş ve dönüşüm işlemleri `cvtColor()` fonksiyonu ile gerçekleştirilmiştir [20], [21].

Elde edilen HSV görüntüsünde belirli bir renk spektrumuna ait piksellerin tespiti için OpenCV'nin `inRange()` fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon belirlenen alt ve üst HSV eşik değerleri arasında kalan pikselleri tespit ederek ikili(binary) bir maske üretmektedir. Maskeleme işleminde hedeflenen renk spektrumuna sahip pikseller 1(beyaz), diğerleri ise 0(siyah) olarak işaretlenmiştir [21]. Bu işlem sonucunda, sadece hedeflenen renge sahip bölgeler ön plana çıkarılmakta, diğer alanlar ise bastırılmaktadır. Tablo 1'de sistemde tanımlanmış olan renklerin HSV eşik değerleri verilmiştir. Bu eşik değerleri kodlanarak çalışmada kullanılacak numune komponentlerin HSV renk ve ikili maske görüntüleri Şekil 5'te gösterilmiştir.

Tablo 1 Komponentlerin HSV Eşik Değerleri (HSV Threshold Values of Components)

Renk	Alt HSV Eşığı	Üst HSV Eşığı
Sarı	[24, 90, 0]	[32, 255, 255]
Yeşil	[39, 95, 0]	[59, 255, 255]
Turuncu	[3, 90, 0]	[50, 255, 255]
Mavi	[0, 49, 56]	[179, 255, 255]

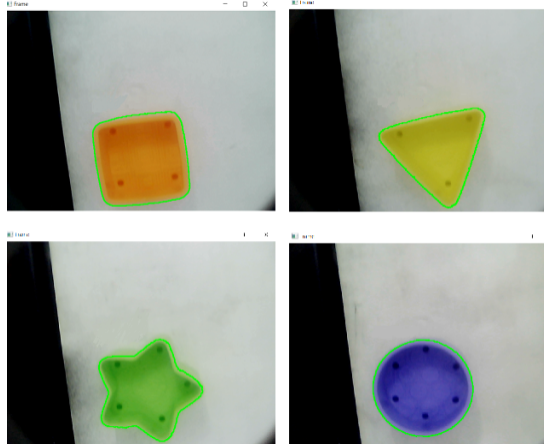


Şekil 5 Kullanılan Komponentlerin HSV ve İkili Maske Görüntüleri (HSV and Dual Mask Images of Components Used)

2.4.1 Komponentlerin kenar çizgilerinin belirlenmesi (Determination of edge lines of components)

Geometrik şekillere sahip plastik komponentlerin sistem tarafından doğru bir şekilde tanınması, sistemin doğru ve uygun tepkiler verebilmesini sağlamaktadır. Görüntü bölümlendirme algoritmaları arasında en yaygın ve en etkili yöntemlerden biri olan aktif kontur algoritması, nesne tespiti alanında yüksek doğruluk oranıyla tercih edilmektedir. Bu algoritma genellikle nesnenin kenar tespiti amacıyla kullanılmaktadır. Algoritma iteratif olarak

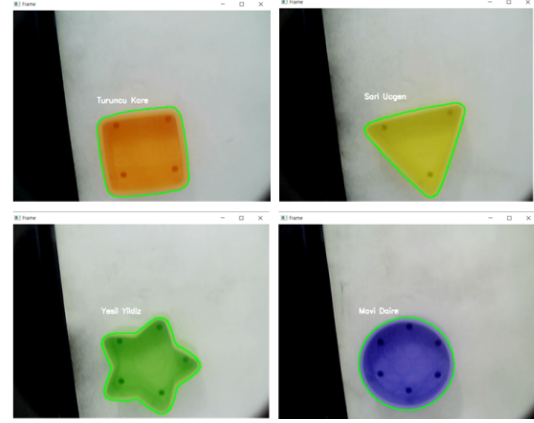
güncellenen bir sınır (contour) yapısından oluşmaktadır. Başlangıçta nesnenin çevresine yerleştirilen bu sınır, her yinelemede nesnenin gerçek kenarlarına doğru ilerleyerek, hedef nesnenin sınırlarını hassas bir şekilde tanımlamaktadır [22]. İkili maske görüntüsünden elde edilen nesne sınırlarının tespiti için OpenCV kütüphanesinin gerekli fonksiyonları kodlanmıştır. Bu yöntem, görüntüdeki beyaz piksellerin oluşturduğu dış sınırları izleyerek ilgili nesnelerin konturlarını belirlemektedir. Bahsedilen yöntemin nesne üzerindeki uygulanmış hali Şekil 6'da verilmiştir. Doğrudan renk segmentasyonuna dayalı bu yaklaşım, gerçek zamanlı uygulamalarda hem işlem süresini azaltmakta hem de hedef nesnelerin daha kararlı bir şekilde tespit edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 6 Komponentlerin Sınır Çizgilerinin Çıkarılması (*Removing the Boundary Lines of Components*)

2.4.2 Şekil tanıma (Shape recognition)

Çalışmada, çıkarılan konturun köşe noktaları üzerinden geometrik şekil tanımlamaları yapılmıştır. Nesne çevresi hesabı için OpenCV'nin "arcLength" fonksiyonu, kenar sayısı bilgisi için yine OpenCV'nin "approxPolyDP" fonksiyonları kodlanmıştır. Nesnenin çevre hesabı sonrası kontur boyutu hesaplanarak kenar sayısının analizi sonucunda geometrik şekil bilgisi elde edilmiştir. Çalışmada kare, üçgen, yıldız, daire şekilleri kullanılmış ve bunların tespiti yapılmıştır. Bu şekillerin sistem tarafından tanınmasına ilişkin görüntüler Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7 Komponentlerin Şekil ve Renk Bilgisi (Shape and Color Information of Components)

Kontura bağlı analizler aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir:

Üçgen: Kontur üzerinde üç kenarın tespit edilmesi durumunda, nesne belirgin köşelere sahip bir üçgen olarak sınıflandırılmıştır.

Kare: Konturda dört kenarın ve bu kenarların birbirine eşit uzunlukta olması ile birlikte 90°'lik açılarının bulunması şeklin kare olarak tanınlanması sağlamaktadır.

Yıldız: Beş köşeye sahip konturlar, yıldız formunda bir nesne olarak değerlendirilmiştir.

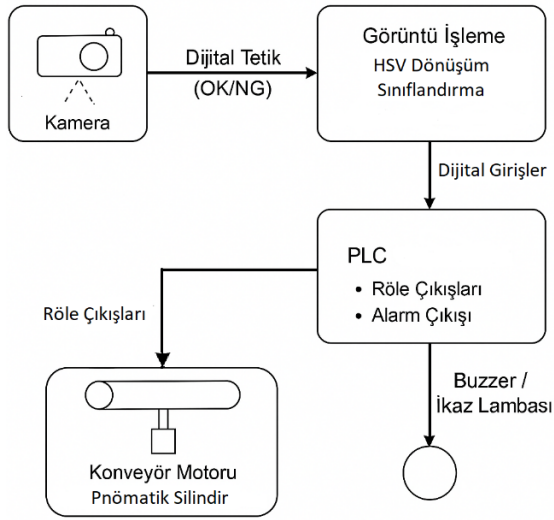
Daire: Kenar çizgilerinin düzgün ve sürekli bir eğri oluşturduğu ve köşe barındırmayan konturlar, daire olarak sınıflandırılmıştır.

Plastik enjeksiyon parçalarının şekil bütünlüğünü analiz etmek ve üretim sürecinde sürecinde ortaya çıkabilecek bozulmaları belirlemek amacıyla bu yöntem kullanılmıştır.

2.5 PLC Kontrol Ünitesi (PLC Control Unit)

PLC'ler, günümüz otomasyon sistemlerinde yaygın olarak kontrol birimi olarak tercih edilmektedir. Kolay programlanabilir olması karmaşık süreçlerin kontrolünü basit hale getirmektedir. Hem bilgisayar hem de kontrol panelleri üzerinden programlanabilir olması, esnek ve güncellenebilir bir kontrol imkanı sunmaktadır [23]. PLC'ler giriş biriminden aldığı sinyalleri milisaniye mertebesinde kodlanan algoritmaya bağlı olarak işleyerek, işlem sonuçlarını çıkış birimlerine iletmektedir. Bu bağlamda, sürekliliği sağlanarak gerçek zamanlı sistemler için güvenilir bir ortam oluşturmaktadır.

Çalışma kapsamında, plastik enjeksiyonla üretilen komponentlerin hata tespiti ve kalite kontrol süreçlerinin otomatik olarak yürütülmesi amacıyla, bir görüntü işleme sistemi PLC tabanlı bir kontrol yapısına entegre edilmiştir. Master-Slave mimarisi temelinde tasarlanan sistemde, PLC Slave birim olarak görev yapmaktadır. Bilgisayar ile PLC arasındaki iletişim seri haberleşme protokolüyle sağlanmaktadır. Sistemde deLab MultiDAS marka PLC kullanılmıştır. Sistemle entegre çalışan PLC, bilgisayardan iletilen komutları analiz ederek; konveyör bandını durdurma, yeniden çalıştırma ve hata verilerini sistemden fiziksel uzaklaştırma gibi operasyonel süreçleri kontrol etmektedir. PLC kontrol ünitesine ait röle bağlantılarına ilişkin gerekli bilgiler Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8 PLC Bağlantısı (PLC Connection)

Üretim hattındaki komponentlerin anlık durumlarının izlenebilmesi için dijital giriş birimleri kullanılmıştır. Bu girişler 12V DC gerilim ile aktive edilmiştir. Dijital çıkışlar, hata algılama sonrasında konveyör mekanizmasının durdurulması ya da yeniden çalıştırılmasına yönelik komutların uygulanmasında görev almaktadır.

Bilgisayar ile PLC arasındaki veri iletimi Modbus RS-232 iletişim protokolü ile sağlanmıştır. Sistem ile PLC arasındaki seri iletişimin kurulabilmesi için haberleşme parametreleri aşağıdaki şekilde yapılandırılmıştır:

- ☐ *Baud Rate:* 19200
- ☐ *Data Bits:* 8
- ☐ *Parity:* Yok
- ☐ *Stop Bits:* 1
- ☐ *Timeouts:* 5 ms

Belirtilen bu ayarlar doğrultusunda, bilgisayar ile PLC arasında doğrudan fonksiyon kodlanarak iletişim sağlanmıştır.

2.6. PLC ile Görüntü İşleme Sistemi Arasında Haberleşme (Communication Between PLC and Image Processing System)

Çalışmada, görüntü işleme algoritmaları tarafından gerçekleştirilen analizler sonucunda, komponentlerin renk ve şekil özelliklerine göre sınıflandırılması yapılmaktadır. Sistemin harekete geçmesi gerektiği durumlarda PLC’ye ASCII tabanlı komutlar (örneğin “PC 0r”, “PC 1\”, “PC 2\”) iletilmektedir. Bu komutlar doğrultusunda PLC, ilgili röle çıkışlarını devreye alarak konveyör bandının hareketini durdurmakta ya da yeniden başlatmaktadır. Uygulanan kontrol stratejisi, gelen komutlara bağlı olarak yazılım destekli bir mantıkla geliştirilmiştir. Bu yapı, klasik Ladder diyagramı yaklaşımının yerine geçmiştir. Sistemin çalışma mantığı şu şekilde kurgulanmıştır:

Başlangıç Durumu (PC 1): Sistemin çalıştırılmasıyla birlikte PLC, izleme moduna geçerek tetiklenmeye hazır hale gelir.

Hata Algılama Durumu (PC 0): Bir hata tespit edildiğinde “PC 0” komutu gönderilerek konveyör bandının durdurulması sağlanır.

İkincil Müdahale veya Gecikmeli Yanıt (PC 2): Örneğin hatalı ürün mavi daire olarak tanımlandığında, sistemin bekleme moduna geçmesi için “PC 2” komutu kullanılır.

Sıfırlama ve Hazırlık (PC 1): Bekleme süresi tamamlandığında, yeniden “PC 1” komutu ile sistem başlangıç durumuna döndürülür ve yeni bir döngüye hazır hale gelir.

Gönderilen her bir komut, ilgili çıkış biriminin aktif ya da pasif hale getirilmesini sağlayan bir kontrol sinyali işlevi görmektedir. PLC tarafından yorumlanan bu sinyaller doğrultusunda elde edilen veriler, sistemin güncel durumu hakkında bilgi sunmak üzere bilgisayara aktarılmaktadır. Bu bilgiler kullanıcı arayüzü üzerinden izlenebilmektedir. Seri haberleşme protokolü ile üretim hattı üzerinde doğrudan kontrol sağlanmakta; bir hata algılandığında sistem otomatik olarak devre dışı bırakılmakta ve tanımlı süre sonunda tekrar çalışır duruma getirilmektedir. Pnömatik sistemler, sıkıştırılmış hava enerjisinden yararlanarak mekanik hareketin oluşturulmasını sağlayan teknolojidir [24]. Bu çalışma kapsamında, hatalı komponentlerin konveyör hattından otomatik şekilde uzaklaştırılması

sağlamak amacıyla, pnömatik silindirle çalışan bir itme mekanizması tasarlanmıştır. Görüntü işleme algoritması tarafından tespit edilen hatalı komponentler, PLC aracılığıyla tetiklenen bir çıkış sinyaliyle işleme alınmaktadır. Pnömatik silindir ileri yönde hareket etmektedir. Silindirin ucunda bulunan piston kolu, üretim hattında yer alan kusurlu komponenti fiziksel olarak sistemden uzaklaştırmaktadır. Hatalı komponentin sistemden tamamen uzaklaştırılması için konveyörün en ve boyut ölçülerine uygun olarak pnömatik silindirin strok mesafesi 20 cm olarak belirlenmiştir. Pnömatik silindirli sistemin işleyiş süreci aşağıdaki adımlarla gerçekleşmektedir:

1. Konveyör üzerinde komponent, kamera tarafından taranır ve görüntü işleme birimine aktarılır.

2. Eğer algılanan komponent, sistemde tanımlı renk ve şekil eşleşmelerinde sapma gösteriyorsa, bu durum hatalı komponent olarak sınıflandırılır.

3. PLC, bu sınıflandırma bilgisine bağlı olarak pnömatik silindirin çalışmasını tetikleyen sinyali üretir.

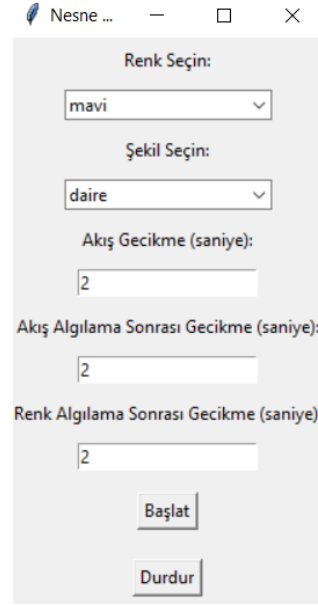
4. Silindir ileri yönde hareket ederek kusurlu ürünü üretim hattından uzaklaştırır.

5. Ürünün dışarı atılmasının ardından piston kolu başlangıç pozisyonuna döner ve sistem, sıradaki ürün için yeniden hazır konuma gelir.

2.7 Grafikselle Kullanıcı Arayüzü (GUI) (Graphical User Interface)

Endüstriyel otomasyon sistemlerinde üretim süreçlerinin etkin ve hatasız bir biçimde yönetilebilmesi, görüntü işleme, hata tespiti ve veri analizi gibi işlemlerin kullanıcıya anlaşılır bir arayüz aracılığıyla sunulmasıyla mümkün olmaktadır. Bu bağlamda, grafik kullanıcı arayüzü (GUI), kullanıcıların sistemle doğrudan etkileşime geçmesini ve süreçleri anlık olarak izleyebilmesini sağlamaktadır.

Bu çalışmada, GUI işlemleri Python dili ve Tkinter kütüphanesi kullanılarak geliştirilmiştir. Arayüz, komponentlerin anlık olarak hata tespiti süreçlerinin takibi, sistemin parametrelerinin ayarı ve PLC ile haberleşmenin yönetilmesinde görev almaktadır. Bahsedilen arayüz görüntüsü Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 9 GUI Arayüzü (GUI Interface)

Kullanıcı arayüzü üzerinden çeşitli sistem parametrelerinin yapılandırılması mümkündür. Bu kapsamda; renk ve şekil tanımlamaları ile sistemin yalnızca belirlenen renk ve geometriye sahip nesnelerin hatalı olarak sınıflandırılması sağlanmıştır. Akış algılama sonrası gecikme süresi, konveyör bandının durdurulma ve yeniden çalıştırılma sürelerinin kullanıcı isteğine göre esnek biçimde düzenlenmesine olanak tanımaktadır. Renk algılama sonrası gecikme süresi ise sistem hatalı komponenti tespit ederse konveyörün durma ve yeniden başlama süresi yine kullanıcı isteğine bırakılmıştır. Başlat komutu, sistemin video akışını işleyebilmesi için gerekli olan görüntü işleme algoritmalarını devreye sokar ve PLC iletişimini başlatmaktadır. Durdur butonu ise, işlem süresini manuel olarak sonlandırır ve PLC ile haberleşmeyi keserek sistemin kontrolünü kullanıcıya bırakır. Söz konusu sistem tasarımı, plastik komponentlerin üretim sürecinin dinamik olarak yönetilmesine imkan tanıırken, kalite kontrol aşamalarının da titizlikle yürütülmesini sağlamaktadır.

BULGULAR (RESULTS)

Bu çalışma kapsamında geliştirilen sistem, farklı renk ve geometrik şekillerdeki komponentlerin gerçek zamanlı olarak tespit edilmesini, sınıflandırılmasını ve PLC aracılığıyla hatalı komponentlerin sistemden uzaklaştırılması için fiziksel müdahale yapılması

gerçekleştirilmiştir. Yapılan uygulama, OpenCV tabanlı görüntü işleme algoritmaları ve Tkinter GUI ile desteklenmiştir. Bu yapı, kullanıcı etkileşimi sayesinde esnek ve etkin kontrol mekanizması imkanı sunmaktadır. Deneysel uygulamalar sonucunda elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

- Sistem, HSV renk uzayında tanımlanan eşik değerleri ile **sarı (üçgen)**, **yeşil (yıldız)**, **turuncu (kare)** ve **mavi (daire)** renkli numune plastik komponentleri başarılı bir şekilde tanımlayabilmektedir.
- Kontur analizine dayalı şekil tanımlama algoritması ile geometrik sınıflandırmalar doğrulukla gerçekleştirilmiştir. Kare ve daire gibi belirgin geometrik şekillerin ayrımı yüksek başarıyla yapılmıştır.
- Kullanıcı arayüzü üzerinden seçilen renk ve şekil kombinasyonları doğrultusunda, yalnızca tanımlı komponentler üzerinde işlem yapılmıştır. Geliştirilen sistem, gereksiz tepkimeleri önleyerek yüksek seçicilik göstermiştir.
- Uygulama sırasında kullanıcı tarafından belirlenen gecikme parametreleri ile üretim hattı üzerinde zamanlama kontrolü sağlanmıştır.
- Modbus RS-232 seri haberleşme protokolü üzerinden PLC'ye gönderilen komutlarla pnömatik sistemler etkin şekilde tetiklenmiştir. Belirlenen hatalı komponentler üretim hattından fiziksel olarak uzaklaştırılmıştır.
- Gerçekleştirilen testlerde, her biri 5 tekrar üzerinden olmak üzere toplam 20 komponent (5 sarı üçgen, 5 turuncu kare, 5 mavi daire, 5 yeşil yıldız) konveyör bant üzerinde döngüsel olarak sisteme dahil edilmiştir. Hedef komponent, sistem tarafından doğru şekilde tespit edilmiş ve yalnızca bu hedef için PLC çıkışı üretilmiştir.

Sistemin sınıflandırma başarımı dört temel performans ölçütü ile değerlendirilmiştir: kesinlik (Precision), duyarlılık (Recall), doğruluk (Accuracy) ve F1 Skoru.

Kesinlik, sistemin yalnızca doğru parçalarda doğru çıkış portlarını aktif ettiği, yanlış sınıflandırmalarda gereksiz portları aktif etmediğini gösteren metriktir. Matematiksel ifadesi Denklem (7)'de verilmiştir [25].

$$Kesinlik = TP / (TP + FP) \quad (7)$$

Duyarlılık, sistemin gerçek pozitif örnekleri ne ölçüde doğru biçimde tanıyabildiğini ifade eden metriktir. Matematiksel ifadesi Denklem (8)'de verilmiştir [26].

$$Duyarlılık = TP / (TP + FN) \quad (8)$$

Doğruluk, sistemin tüm karar anlarındaki doğruluk oranını ifade etmektedir. Matematiksel ifadesi Denklem (9)'da verilmiştir [27].

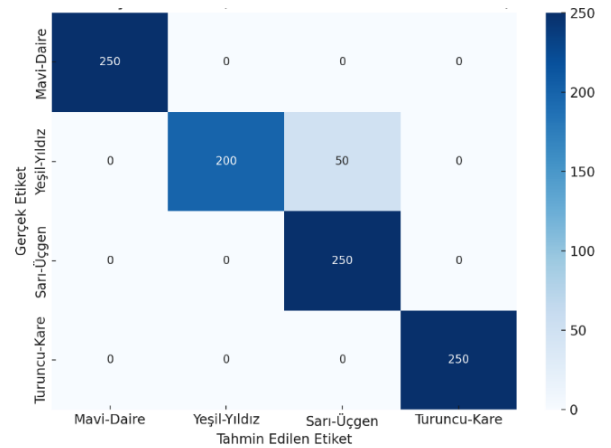
$$Doğruluk = TP + TN / (TP + FP + TN + FN) \quad (9)$$

Hassasiyet ve duyarlılığı tek bir değerde birleştiren F1, bu iki metriğin dengesini harmonik ortalama yoluyla ölçer; FP/FN 'nin sonucu belirlediği durumlarda en işlevsel göstergelerden biridir. Matematiksel ifadesi Denklem (10)'da verilmiştir [25], [26].

$$F1 = 2 * HASSASİYET * DUYARLILIK / (HASSASİYET + DUYARLILIK) \quad (10)$$

Bu metrikler, sistemin sınıflandırma performansını kapsamlı biçimde değerlendirmektedir. Kalite kontrol sürecinde yalnızca genel başarı oranı değil, hatalı ürünleri kaçırma eğilimi ve gereksiz ayırma tetiklemeleri de sistem performansı açısından önem taşımaktadır.

Çalışmada, 1000 test işlemleri üzerinden elde edilen konfüzyon matrisi Şekil 10'da gösterilmiştir. Ayrıca, farklı renk ve şekil kombinasyonları için hesaplanan performans metrikleri Tablo 2'de sunulmuştur.



Şekil 10 Konfüzyon Matrisi (Confusion Matrix)

Tablo 2 Renk ve Şekil Kombinasyonlarının Performans Sonuçları (Performance Results of Color and Shape Combinations)

Renk ve Şekil Kombinasyonları	Precision	Recall	Accuracy	F1 Score
Mavi- Daire	1.00	1.00	1.00	1.00
Yeşil- Yıldız	1.00	0.80	0.80	0.88
Sarı -Üçgen	0.83	1.00	1.00	0.90
Turuncu- Kare	1.00	1.00	1.00	1.00

Tablo 2'deki veriler incelendiğinde, başarı oranı 1.00'e yaklaştıkça sistemin başarı doğruluğunun arttığı görülmektedir. Bu bağlamda, sistemin renk ve şekil kombinasyonlarını ayırt etmede yüksek doğruluk sağladığı belirlenmiştir. Özellikle mavi daire ve turuncu kare kombinasyonları %100 başarı ile tespit edilirken, diğer kombinasyonlarda doğruluk oranları %95 ile %98.33 arasında değişmiştir.

TARTIŞMA (DISCUSSION)

Bu çalışmada geliştirilen görüntü işleme algoritmaları ile PLC tabanlı hata tespit ve sınıflandırma sistemi, üretim hatlarında gerçek zamanlı kalite kontrol uygulamaları için etkili bir çözüm sunmaktadır. Sistem, kamera aracılığıyla alınan görüntü verileri üzerinden renk ve şekil analizini başarıyla gerçekleştirerek yalnızca kullanıcının belirlediği parametrelere sahip bileşenler üzerinde işlem yapmaktadır. OpenCV kütüphanesi kullanılarak geliştirilen sistemde, HSV renk uzayı ve kontur tabanlı şekil tanıma yöntemleri renk ve şekil ayrımının etkin biçimde yapılmasına olanak tanımıştır.

Sistem modüler bir yapıda tasarlanmıştır. Özellikle çoklu iş parçacığı (threading) kullanımı sayesinde görüntü işleme süreci ile kullanıcı arayüzü birbirinden ayrılmış, böylece sistemin kararlılığı artırılmıştır. Ayrıca, Tkinter tabanlı kullanıcı arayüzü aracılığıyla parametrelerin kolaylıkla ayarlanabilmesi, sistemin farklı senaryolara adapte uyulanabilirliğini sağlamıştır. Bu yapı, değişken üretim ortamlarında farklı renk ve şekil kombinasyonlarının hedeflenmesi açısından önemli bir durumdur.

Sistem, kullanıcı tarafından belirlenen kombinasyonları algıladığında Modbus RS-232 seri haberleşme protokolü üzerinden PLC'ye sinyal göndermekte ve pnömatik silindiri tetiklemektedir. Bu durum, yazılım ve donanım bileşenlerinin senkronize çalışabildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, sistem performansını doğrudan etkileyen fiziksel faktörler de bulunmaktadır. Özellikle kamera açısı, ışık koşulları, nesne konumu ve kamera çözünürlüğü gibi değişkenler sınıflandırma doğruluğunu etkileyebilmektedir. Testler sırasında ışık yansımaları

veya renklerin birbirine yakın olması durumlarında sistemin doğruluk oranının azaldığı gözlemlenmiştir.

Mavi daire ve turuncu kare bileşenlerinde diğer kombinasyonlarına kıyasla elde edilen daha yüksek doğruluk oranlarının, hem renk doygunluğu/kontrastı hem de geometrik sadelik ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Mavi ve turuncu tonları HSV renk uzayında birbirinden net biçimde ayrılabilirdiğinden, renk eşikleme aşamasında segmentasyon hataları azalmaktadır. Ayrıca daire ve kare şeklindeki, kontur tabanlı tanıma için köşe tespiti ve kontur bütünlüğü bakımından daha kararlı yapılar sunmaktadır. Buna karşılık en fazla hata yeşil yıldız ve sarı üçgen arasında gözlemlenmiştir. Bu durum, iki parçanın renk tonlarının yakın spektral aralıkta bulunması ve geometrik kenar kontrastlarının benzer olması nedeniyle HSV tabanlı segmentasyon algoritmasının sınır değerlerinde karışıklık oluşturmaktan kaynaklanmıştır. Bazı örneklerde aydınlatma değişimleri ve yansımaları, renk bileşenlerinin doğru şekilde ayrıştırmasını zorlaştırmıştır.

Çalışmada kullanılan şekil tanıma algoritması esas olarak kontur köşe sayısına dayanmaktadır. Bu yaklaşım, daha karmaşık geometrik şekiller veya birleşik nesneler için yetersiz kalabilmektedir. Bu sınırlamanın giderilmesi için gelecekte derin öğrenme tabanlı modelleme yöntemleri ve kontur-kenar bilgisini birleştiren hibrid yaklaşımlar değerlendirilebilir.

Sistemde ayarlanabilir gecikme süreleri, plastik enjeksiyon komponentlerinin üretim hızına göre optimizasyon yapılmasına olanak tanımaktadır. Ancak, zamanlama konusunda hassas durumlarda gerçek zamanlı işletim sistemleri (RTOS) kullanımı gerekli olabilir.

Sonuç olarak, geliştirilen sistem görüntü işleme temelli otomatik hata tespitinde yüksek performans sergilemiş ve düşük maliyetli bileşenlerle uyulanabilir bir çözüm sunmuştur. Bununla birlikte, yüksek hız gerektiren veya ürün çeşitliliğinin fazla olduğu üretim hatlarında sistemin hem donanımsal hem de algoritmik açıdan daha ileri düzeyde iyileştirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır.

SONUÇ (CONCLUSIONS)

Yapılan çalışmada, plastik enjeksiyon komponentlerinin süreçlerine yönelik geliştirilen görüntü işleme kullanılarak nesne algılama ve ayıklama sistemi sunulmuştur. Python programlama ile geliştirilen sistem, OpenCV kütüphanesi kullanılarak gerçek zamanlı olarak renk ve geometrik şekil analizi yapılmıştır. Görüntü işlemeyle

tanımlanan kriterlere uymayan komponentler tespit edilmiş ve PLC üzerinden müdahale edilmiştir.

Sistem, HSV renk aralıkları ve kontur analizi yöntemleri sayesinde farklı renkteki (sarı, turuncu, mavi, yeşil) ve farklı geometrik şekillerdeki (üçgen, kare, daire, yıldız) komponentleri yüksek doğrulukla sınıflandırmıştır. Çalışmada 5 sarı üçgen, 5 turuncu kare, 5 mavi daire ve 5 yeşil yıldız olarak toplamda 20 komponent üzerinden test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Her test senaryosunda kullanılan kullanıcı arayüzü üzerinden tek bir komponent hatalı ürün tanımlanmış ve sisteme rastgele sıralarla gönderilmiştir. Tanımlı hedef komponent, sistem tarafından algılandığında doğru şekilde PLC’de tetikleme sinyali üretilmiştir. Diğer komponentlere karşı herhangi bir tepki vermemiştir. Tüm senaryolar her kombinasyon için 50 tekrar ile yürütülmüştür. Toplam 1000 örnek üzerinde test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sistem, 950 doğru ve 50 yanlış sınıflandırma ile %95 doğruluk oranına ulaşmıştır. Bu yönüyle sistem, yüksek seçicilik ve hassasiyet göstermiştir.

Performans değerlendirmeleri sonucunda; mavi daire ve turuncu kare kombinasyonlarında %100 doğruluk, diğer kombinasyonlarda ise %95 ile %98.33 arasında doğruluk oranları elde edilmiştir.

PLC ve görüntü işleme süreçleri, kodda milisaniye bazlı zamanlayıcı aracılığıyla denetlenmiştir. Kullanılan webcam ile 12 FPS (saniyede 12 kare) hızında alınan görüntüler, yaklaşık 83 milisaniyede bir kare üretilmektedir. Yapılan ölçümlerde, bir komponentin tespiti, işlenmesi ve PLC’ye gerekli komutun gönderilmesi işlemleri 83 ms sürmektedir. Bu süre zarfında sistemin gerçek zamanlılık kriterlerini sağladığı ortaya konulmuştur.

Sistemde, konveyör bant üzerinde nesnelerin yaklaşık her 12 saniyede bir geçtiği varsayımıyla çalışılmıştır. Yüreyen bant üzerinde nesnelerin daha sık ve hızlı gelişi, sistem performansında aksamalar meydana getirebilmektedir. Nesneler konveyör bant üzerinde yatay ekseninde gönderilmektedir aksi halde kamera şekli göremeyecek ve şekil tanıma işlemi gerçekleşmeyecektir. Gerçekleştirilen deneysel şartlarda sistem, dakikada yaklaşık 5 ürünü tarayarak hatalı ürünü ayırıştırma bölgesine göndermektedir.

Geliştirilen sistem; kullanıcı etkileşimli kontrol, esnek parametre ayarı ve entegre PLC kontrolü sayesinde, plastik enjeksiyon üretim hatlarında kalite kontrol işlemlerine uygulanabilir, düşük maliyetli ve etkili bir çözüm sunmaktadır. Bu yönüyle çalışma, endüstriyel otomasyon ve yapay görme uygulamaları için önemli bir örnek teşkil etmektedir.

ÖNERİLER (SUGGESTIONS)

Çalışma süresince edinilen bulgular ve gözlemler doğrultusunda, sabit HSV renk eşikleri yerine çevresel aydınlatma koşullarına uyum sağlayabilen dinamik eşikleme algoritmalarının entegrasyonu ile sistemin farklı ışık koşullarında daha kararlı çalışması mümkün hale gelebilir. Ayrıca, kullanılan kameranın çözünürlüğünün artırılması daha hassas kenar ve kontur tespitine olanak tanıyabilir; bununla birlikte, endüstriyel kameraların tercih edilmesi sistem performansını daha da üst seviyelere taşıyabilir. Eğer nesnelerin çeşitli açılardan değerlendirilmesi gerekiyorsa, sisteme çoklu kamera desteği eklenerek üç boyutlu veri analizi yapılabilir ya da yüzey kusurlarını tespit edebilen ileri görüntü işleme teknikleri entegre edilebilir. Bu tür gelişmeler, sistemin daha üst düzey sürümlerine temel oluşturabilir ve sanayide görüntü işlemeyle PLC entegrasyonu çözümlerinin daha geniş bir kullanım alanına yayılmasına olanak sağlayabilir.

KAYNAKLAR(REFERENCES)

- [1] Ciofu, C., & Mindru, D. T. (2013). Injection and micro injection of polymeric plastics materials: a review. *Int. J. Mod. Manufact. Technol*, 1, 49-68.
- [2] Senthilvelan, S., & Gnanamoorthy, R. (2006). Fiber reinforcement in injection molded nylon 6/6 spur gears. *Applied composite materials*, 13(4), 237-248.
- [3] Rosato, D. V., & Rosato, M. G. (2012). *Injection molding handbook*. Springer Science & Business Media..
- [4] Muresan, M. P., Cireap, D. G., & Giosan, I. (2020, September). Automatic vision inspection solution for the manufacturing process of automotive components through plastic injection molding. In *2020 IEEE 16th international conference on intelligent computer communication and processing (ICCP)* (pp. 423-430). IEEE.
- [5] Rigelsford, J. (2001). Industrial image processing: Visual quality control in manufacturing. *Sensor Review*, 21(2).
- [6] Huang, J., Huang, Z., Li, C., & Liu, J. (2025). Research on Defect Detection Method of Motor Control Board Based on Image Processing. *arXiv preprint arXiv:2505.17493*.
- [7] Xiong, C., Wang, W., & Song, R. (2025). *Structural Design and Grasping Control*

- Strategy of an Intelligent Sorting Robotic Arm Based on Machine Vision. *Journal of Electrical Systems*, 21.
- [8] Tang, B., Chen, L., Sun, W., & Lin, Z. K. (2023). Review of surface defect detection of steel products based on machine vision. *IET Image Processing*, 17(2), 303-322
- [9] Roslan, M. I. B., Ibrahim, Z., & Abd Aziz, Z. (2022, May). Real-time plastic surface defect detection using deep learning. In *2022 IEEE 12th symposium on computer applications & industrial electronics (ISCAIE)* (pp. 111-116). IEEE.
- [10] Adamo, F., Attivissimo, F., Di Nisio, A., & Savino, M. (2009). A low-cost inspection system for online defects assessment in satin glass. *Measurement*, 42(9), 1304-1311.
- [11] Şengül, Ö., Öztürk, S., & Kuncan, M. (2020). PLC ve Operatör Panel Kullanarak Konveyör Bantta Renk Temelli Nesne Ayırıştırma. *European Journal of Science and Technology*, 401-412.
- [12] Liu, N., Zhang, Y., & Wang, Z. (2025). Hybrid Model and Data-Driven Optimal PID Control with Enhanced Disturbance Rejection. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*.
- [13] Bayrakçı, H. C., & Büyükpatpat, H. (2021). PLC ve SCADA kontrol yöntemleri ile sıvı dolum otomasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (27), 283-291.
- [14] S. Şentürk and B. Satıcı, "İç mekandaki yüzeylerin görsel özellikleri ve ışık arasındaki ilişki," 2022. [Online]. Available: www.skupit.com.tr. Accessed: Aug. 04, 2025.
- [15] Ş. Öztürk, "Cam üretim hatalarının görüntü işleme tabanlı bulunması," Ms.C dissertation, Selçuk Univ., Turkey, 2015.
- [16] A. El Gamal and H. Eltoukhy, "CMOS image sensors," *IEEE Circuits and Devices Magazine*, vol. 21, no. 3, pp. 6–20, May 2005, doi: 10.1109/MCD.2005.1438751.
- [17] Wang, P. (2024, November). CMOS image sensor applications and working principles. In *2nd International Conference on Mechatronic Automation and Electrical Engineering (ICMAEE 2024)* (Vol. 2024, pp. 98-104). IET.
- [18] Umaru, K., Marlon, M., Nansukusa, Y., Asikuru, S., Ritah, N., & Zaina, K. (2025). PLC Based Speed Control in a Color Sorting System: A Design and Simulation Perspective. *Journal of Engineering, Technology, and Applied Science (JETAS)*, 7(1), 37-51.
- [19] Kusnandar, T., Santoso, J., & Surendro, K. (2024). Enhancing Color Selection in HSV Color Space. *Ingenierie des Systemes d'Information*, 29(4), 1483.
- [20] G. Saravanan, G. Yamuna, and S. Nandhini, "Real time implementation of RGB to HSV/HSI/HSL and its reverse color space models," *International Conference on Communication and Signal Processing, ICCSP 2016*, pp. 462–466, Nov. 2016, doi: 10.1109/ICCSP.2016.7754179.
- [21] Chernov, V., Alander, J., & Bochko, V. (2015). Integer-based accurate conversion between RGB and HSV color spaces. *Computers & Electrical Engineering*, 46, 328-337.
- [22] Corso, R., Khan, F., Yezzi, A., & Comelli, A. (2025). Features for Active Contour and Surface Segmentation: A Review: R. Corso et al. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1-27.
- [23] S. Kocer, O. Dundar, and R. Butuner, *Programmable Smart Microcontroller Cards EDITORS*. 2021. [Online]. Available: www.isres.org. Accessed: Feb. 08, 2025.
- [24] Al Agha, A., Zidan, A. M., Ramzan, M., Shafique, A., Abbas, S., Nazar, M., & Al Garalleh, H. (2025). Analysis of active and passive control of fluid with fractional derivative. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 86(15), 5222-5240.
- [25] Sathyanarayanan, S., & Tantri, B. R. (2024). Confusion matrix-based performance evaluation metrics. *African Journal of Biomedical Research*, 27(4S), 4023-4031.
- [26] Dur, R., Koçer, S., & Dündar, Ö. (2022). Evaluation of Customer Loss Analysis for Marketing Campaigns in the Banking Sector. *Politeknik Dergisi*, 26(2), 759-764.
- [27] Dündar, Ö., & Koçer, S. (2024). Pneumonia Detection from Pediatric Lung X-Ray Images Using Artificial Neural Networks. *Politeknik Dergisi*, 1-1.



Açıklanabilir Yapay Zekâ Araçları ve Transfer Öğrenme ile Görüntü Tabanlı Atık Sınıflandırması

İkra KIŞLIOĞLU^a, Osman GÜLER^{*a}

^a* Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çankırı, 18200, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 19.07.2025
Kabul: 07.11.2025

Anahtar Kelimeler:

Atık Sınıflandırma, Evrişimli Sinir Ağları (ESA), Transfer Öğrenme, Grad-CAM (Gradyan Ağırlıklı Sınıf Aktivasyon Haritalaması)

***Sorumlu Yazar**

e-posta:
osmanguler@karatekin.edu.tr

ÖZET

Atıkların doğru biçimde ayrıştırılması, sürdürülebilir çevre yönetimi ve geri dönüşüm sistemlerinin etkinliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, RealWaste veri setinden elde edilen görüntüler kullanılarak dokuz farklı atık türünü otomatik olarak sınıflandıran derin öğrenme tabanlı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında, VGG, ResNet, DenseNet, EfficientNet, Inception, MobileNet ve Xception gibi farklı mimari ailelerinden toplam on beş önceden eğitilmiş evrişimsel sinir ağı (ESA) modeli, transfer öğrenme ve ince ayar (fine-tuning) teknikleriyle yeniden eğitilmiştir. Sınıf dengesizliğini azaltmak için veri artırma ve sınıf ağırlıklandırma stratejileri uygulanmış; modeller doğruluk, hassasiyet, duyarlılık, F1 skoru ve karmaşıklık matrisi ölçütleriyle değerlendirilmiştir. Ayrıca, modellerin karar süreçlerini açıklanabilir kılmak amacıyla Grad-CAM görselleştirmeleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, DenseNet201, EfficientNetB2 ve Xception mimarilerinin yüksek doğruluk, güçlü genelleme kabiliyeti ve tutarlı sınıf bazlı performanslarıyla öne çıktığını göstermektedir. Bu bulgular, derin transfer öğrenme yaklaşımlarının açıklanabilir yapay zekâ destekli akıllı atık sınıflandırma sistemlerinde etkin ve sürdürülebilir çözümler sunduğunu ortaya koymaktadır.

DOI: 10.59940/jismar.1746258

Image-Based Waste Classification With Explainable Artificial Intelligence Tools and Transfer Learning

ARTICLE INFO

Received: 19.07.2025
Accepted: 07.11.2025

Keywords:

Waste Classification, Convolutional Neural Networks (CNN), Transfer Learning, Grad-CAM (Gradient-weighted Class Activation Mapping)

***Corresponding Authors**

e-mail:
osmanguler@karatekin.edu.tr

ABSTRACT

Accurate segregation of waste is of great importance for sustainable environmental management and the efficiency of recycling systems. In this study, a deep learning-based approach is developed to automatically classify nine different categories of waste using images obtained from the RealWaste dataset. A total of fifteen pre-trained convolutional neural network (CNN) models from various architectural families, including VGG, ResNet, DenseNet, EfficientNet, Inception, MobileNet, and Xception, were retrained using transfer learning and fine-tuning techniques. To reduce class imbalance, data augmentation and class-weighting strategies were applied, and the models were evaluated using accuracy, precision, recall, F1-score, and confusion matrix metrics. Additionally, Grad-CAM visualizations were employed to enhance the interpretability of the models' decision-making processes. The experimental results revealed that the DenseNet201, EfficientNetB2, and Xception architectures stood out with their high accuracy, strong generalization ability, and consistent class-wise performance. These findings demonstrate that deep transfer learning approaches, supported by explainable artificial intelligence, provide effective and sustainable solutions for the development of intelligent waste classification systems that can be integrated into mobile or embedded platforms.

DOI: 10.59940/jismar.1746258

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sanayileşmenin hız kazanması, kentleşmenin yaygınlaşması ve tüketim alışkanlıklarının değişmesi, günümüzde ciddi çevresel sorunların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu sorunların başında, kontrolsüzce artan katı atık üretimi gelmektedir. Dünya genelinde her yıl milyarlarca ton atık ortaya çıkmakta ve bu atıkların büyük bir kısmı ya düzensiz depolanmakta ya da çevreye zarar verecek şekilde bertaraf edilmektedir [1]. Atıkların bu şekilde yönetilmesi, doğal kaynakların hızla tükenmesine, çevre kirliliğine ve sera gazı emisyonlarının artmasına yol açmaktadır. Bu bağlamda, atıkların etkili bir biçimde ayrıştırılması ve geri dönüşüm süreçlerinin optimize edilmesi, sürdürülebilir çevre yönetimi açısından kritik bir gereklilik haline gelmiştir [2].

Atıkların sınıflandırılması, geri dönüşüm oranlarının artırılmasında ve atık yönetim sistemlerinin otomasyonunda merkezi bir role sahiptir. Ancak bu süreç, özellikle karmaşık atık türlerinin bulunduğu ortamlarda manuel yöntemlerle oldukça zahmetli, zaman alıcı ve maliyetlidir. Ayrıca, insan kaynaklı hatalar, manuel sınıflandırmanın doğruluğunu düşürmekte ve geri dönüşüm süreçlerini verimsiz hale getirmektedir [3]. Bu nedenle, atık sınıflandırma sistemlerinde teknolojik çözümlere olan ihtiyaç artmakta ve yapay zekâ tabanlı yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır [4]. Yapay zekânın bu sistemlere entegre edilmesi, bilgi işlemeyi optimize eder ve akıllı karar alma süreçlerini destekler [5].

Son yıllarda yapay zekânın bir alt alanı olan derin öğrenme, özellikle görüntü işleme temelli uygulamalarda gösterdiği yüksek başarı ile atık sınıflandırma sistemlerinde umut vadeden bir çözüm olarak değerlendirilmektedir [6]. Evrimsel sinir ağları (ESA), çeşitli atık türlerinin görsel özelliklerini yüksek doğrulukla ayırt edebilme yetenekleri sayesinde bu alanda sıkça kullanılmaktadır [7]. Transfer öğrenme teknikleri ise önceden büyük veri setleri üzerinde eğitilmiş modellerin yeniden kullanılmasını mümkün kılarak, sınırlı veriyle yüksek doğruluk elde edilmesini sağlamaktadır [8].

Ayrıca sınıflandırma performansı kadar önemli bir diğer husus da modelin kararlarının açıklanabilirliğidir. Günümüzde geliştirilen birçok yapay zekâ modeli, "kara kutu" olarak değerlendirilmekte ve bu durum kullanıcıların sistemlere güvenini azaltmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için geliştirilen açıklanabilir yapay zekâ (AYZ) araçları, derin öğrenme modellerinin nasıl karar verdiğini anlamaya yönelik görselleştirmeler ve dikkat haritaları sunarak,

sistemlerin şeffaflığını ve kullanıcı güvenliğini artırmaktadır [9].

Bu çalışma, sürdürülebilir çevre yönetimi için kritik öneme sahip olan atık sınıflandırma süreçlerini yapay zekâ temelli yöntemlerle ele almakta ve transfer öğrenme ile desteklenmiş derin sinir ağlarının performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Aynı zamanda, açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımları ile sistemin karar mekanizmaları analiz edilmekte ve model çıktılarının yorumlanabilirliği ortaya konulmaktadır. Bu yönüyle çalışma hem sınıflandırma başarımını hem de kullanıcı güvenliğini ön planda tutan bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Atıkların doğaya bıraktığı iz her geçen gün derinleşirken, bu izleri doğru okuyabilmek ve dönüştürebilmek giderek daha hayati bir mesele haline gelir. Atığın yalnızca bertaraf edilmesi değil; türüne göre doğru bir biçimde ayrıştırılması, çevresel sürdürülebilirliğin temel taşlarından biri olarak karşımıza çıkar. Ancak bu süreç, hâlâ büyük oranda insan gücüne dayanır ve bu durum hem verimliliği hem de doğruluğu sınırlandırır. İşte tam da bu noktada, teknolojinin sunduğu olanaklar devreye girer. Görüntü işleme ve yapay zekâ alanında yaşanan hızlı gelişmeler, atıkları yalnızca görsel olarak tanıyabilen değil, aynı zamanda kategorize edebilen sistemlerin önünü açar. Derin öğrenme mimarileri ise bu dönüşümde kilit rol oynar; çünkü onlar, bir görüntünün ardındaki anlamı insan benzeri bir sezgiyle keşfedebilme gücüne sahiptir. Atığın içindeki bilgiyi okumak, bu teknolojilerle artık bir hayal değil, sürdürülebilir bir çözümün parçasıdır. Literatürde bu teknolojilerin atık yönetiminde nasıl kullanıldığını ve hangi mimarilerin öne çıktığını incelemek, bu çalışmanın temelini oluşturur.

Al-Mashhadani [10], atık görüntülerinin sınıflandırılmasında farklı ESA mimarilerini (ResNet50, GoogleNet, InceptionV3, Xception) karşılaştırmış ve InceptionV3 mimarisinin %100 F1 skoru ile en yüksek başarıyı gösterdiğini rapor etmiştir. Bu çalışma özellikle mimari karşılaştırma açısından değerlidir ancak yalnızca sınırlı model seçimiyle gerçekleştirilmiştir.

Younis ve Obaid [11], EfficientNet mimarisini RealWaste veri seti üzerinde test ederek %96,31 doğruluk oranı elde etmişlerdir. Bu model, düşük parametre sayısı ile yüksek doğruluk sağlayarak mobil ve gömülü sistemlerde uygulanabilirliğini göstermiştir. Bu yönüyle çalışmamızda EfficientNet mimarisine özel ilgi gösterilmiştir.

Qiu ve arkadaşları [12], gerçek zamanlı uygulamalar için optimize edilmiş EfficientNetV2 tabanlı bir model önermiş ve %95,4 doğruluk oranı ile hem hızlı hem de güvenilir sonuçlar sunmuştur. Bu çalışma, model boyutu ile doğruluk arasındaki dengeyi vurgulaması açısından önemlidir.

Yalçın, Cebeci ve Altıoklar [13], saha koşullarında toplanmış RealWaste veri seti ile çalışan bir sınıflandırma modeli geliştirmiş ve %89,19 doğruluk oranı elde etmiştir. Bu çalışma, veri setinin gerçek yaşamdan alınması nedeniyle literatüre önemli bir uygulamalı katkı sunmaktadır. Aynı veri seti bu çalışmada da kullanılarak model karşılaştırması daha geniş kapsamlı şekilde yapılmıştır.

Kunwar ve arkadaşları [14], plastik atıkları sınıflandırmak için YOLO-11m mimarisini kullanarak %98.03 doğruluk elde etmişlerdir. Bu model, nesne tespiti ile sınıflandırmayı birleştirmesi bakımından diğer çalışmalardan ayrılmaktadır.

Narayan [15], DeepWaste adlı bir mobil uygulama geliştirerek, ESA tabanlı sınıflandırmanın mobil cihazlarda gerçek zamanlı olarak uygulanabilirliğini göstermiştir. Bu yönüyle çalışmamıza benzer biçimde gömülü sistemlere uyarlanabilirlik teması taşımaktadır.

Selvaraju ve arkadaşları [16] tarafından önerilen Grad-CAM yöntemi, ESA modellerinin karar verme süreçlerini görselleştirerek açıklanabilirliği artırmakta ve kullanıcıların modelin neden belirli bir sınıfı seçtiğini anlayabilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada da Grad-CAM görselleştirmeleri, modelin dikkat ettiği bölgeleri anlamak amacıyla uygulanmıştır.

Mazlounian ve arkadaşları [17], gıda atıkları için ESA tabanlı bir sınıflandırma modeli sunmuş ve yüksek başarı oranları bildirmiştir. Ancak çalışmada kullanılan veri seti yapay ortamda oluşturulduğundan, gerçek dünya genellemesi sınırlıdır.

Guo, Xu ve Wu [18], süperpiksel temelli özellik çıkarımı ile ESA birleşimini deneyerek, atık sınıflandırması için daha sofistike bir yapı önermişlerdir. Ancak başarı oranı %90'ın altında kalmıştır.

Badrinarayanan ve arkadaşları [19], atık görüntüleri için doğrudan olmasa da görüntü segmentasyonu için önerilen SegNet yapısının bu tür görevlerde etkili olabileceğini göstermiştir.

Alade, Jegede ve Fakorede [20], mevcut çalışmalarını inceleyen bir literatür araştırması yaparak

farklı modellerin doğruluklarını karşılaştırmış, ancak Grad-CAM gibi açıklanabilirlik yöntemlerine yer vermemiştir.

EfficientNet mimarisini öneren Tan ve Le [21], bu ağların daha düşük parametre ile yüksek doğruluk sunabildiğini göstererek model ölçekleme konusunda literatüre önemli katkı sunmuştur.

VGG mimarisinin mucitleri Simonyan ve Zisserman [22], çok katmanlı yapılarla görüntü sınıflandırmada başarıyı artırabileceklerini göstermiş, bu model daha sonra atık sınıflandırma gibi alanlarda da sıkça kullanılmaya başlanmıştır.

He ve arkadaşları [23], residual blok yapısıyla derinliği artırırken öğrenme kaybını önleyen ResNet mimarisini önermiş, bu model de özellikle detaylı sınıflandırma gereken veri setlerinde öne çıkmıştır.

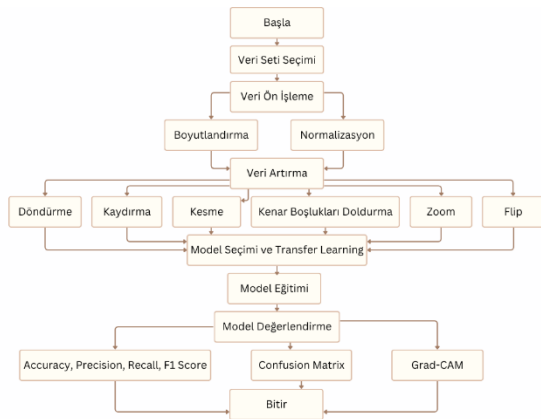
Shorten ve Khoshgoftaar [24], özellikle veri azlığı bulunan projelerde veri artırmanın sınıflandırma başarısını ciddi oranda iyileştirdiğini göstermiştir. Bu nedenle, çalışmamızda da sınıf dengesizliği veri artırmayla giderilmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmaların ışığında, mevcut literatürün özellikle sınıflandırma başarıyı odaklı ilerlediği, ancak modellerin açıklanabilirliğine veya mobil sistemlere entegrasyon potansiyeline yeterince yer verilmediği dikkat çekmiştir. Yapılan incelemelerde, pek çok araştırmanın sınırlı sayıda modelle çalıştığını ve yalnızca doğruluk oranları ile sonuçları değerlendirdiğini görülmüştür. Bu durum, modellerin davranışlarını anlama ya da uygulamalı sistemler için karar verme aşamalarında bazı belirsizliklere neden olmaktadır. Literatürde atık sınıflandırması alanında yapılan pek çok çalışmada yüksek doğruluk oranlarına ulaşılmıştır; ancak bu çalışmaların çoğu ya özel veri kümeleri ile sınırlı kalmış ya da sınırlı sayıda modelle yapılmıştır. Bunun yanında, derin öğrenme modellerinin açıklanabilirliğine ilişkin değerlendirmeler de çoğu zaman göz ardı edilmiştir. Bu çalışmada hem bu eksiklikleri gidermek hem de gerçek dünya verileri üzerinde çalışan kapsamlı ve karşılaştırmalı bir model değerlendirmesi sunmak amaçlanmıştır. RealWaste gibi sahadan elde edilmiş, sınıf dengesizliği içeren bir veri seti kullanılarak toplamda on beş farklı model test edilmiştir. Bu yönüyle çalışma, literatürdeki birçok örnekten ayrılmakta ve daha kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır. Ayrıca Grad-CAM gibi açıklanabilirlik araçları kullanılarak modellerin karar mekanizmaları görselleştirilmiştir. Literatürdeki bu eksikliği fark ederek, özellikle karar verme süreçlerine ışık tutmayı ve sınıflandırma başarısının arkasındaki nedenleri açıklamayı amaçlanmıştır.

Dolayısıyla bu çalışma, sadece performans karşılaştırması yapan bir model karşılaştırma çalışması olmanın ötesinde; açıklanabilirlik, gerçek dünya senaryoları ve uygulanabilirlik gibi faktörleri de barındıran daha bütünsel bir yaklaşımla hazırlanmıştır.

3. YÖNTEMLER (METHODS)

Atık sınıflandırma probleminin çözümüne yönelik olarak geliştirilen sistem, görüntü işleme temelli derin öğrenme teknikleri üzerine kuruludur. Özellikle transfer öğrenme yaklaşımı benimsenmiş ve çeşitli önceden eğitilmiş evrimsel sinir ağları kullanılarak model eğitimi gerçekleştirilmiştir. Önerilen çalışmanın yöntemi Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Önerilen çalışmanın akış şeması
(Flowchart of the proposed study)

Bu çalışma, derin öğrenmeye dayalı bir görüntü sınıflandırma modelinin geliştirilme sürecini sistematik bir şekilde ele almaktadır. Süreç, veri ile başlamakta ve model değerlendirmesine kadar devam eden bir dizi ardışık adımdan oluşmaktadır. İlk aşamada, sınıflandırma görevine uygun bir veri seti seçilerek çalışmanın temel bileşeni oluşturulur. Seçilen veri seti üzerinde çeşitli ön işleme adımları gerçekleştirilir. Bu işlemler, modelin daha hızlı ve kararlı öğrenmesini desteklemek amacıyla gerçekleştirilir. Modelin belirlenmesinin ardından eğitim süreci başlar. Eğitimin ardından, model performansı çeşitli değerlendirme kriterleriyle ölçülür. Bu kapsamda doğruluk (accuracy), hassasiyet (precision), duyarlılık (recall) ve F1 skoru gibi metriklerle modelin başarısı nicel olarak analiz edilir. Ayrıca, karmaşıklık matrisi (confusion matrix) aracılığıyla modelin her sınıfa ilişkin doğru ve yanlış tahminleri ayrıntılı olarak incelenir. Modelin karar mekanizmalarının daha anlaşılır hale getirilmesi için Grad-CAM yöntemi uygulanarak modelin hangi görüntü bölgelerine odaklandığı görselleştirilir.

Çalışmada kullanılan veri seti, saha koşullarında elde edilen ve çeşitli atık türlerini temsil eden yüksek

çözünürlüklü görüntülerden oluşmaktadır. Bu veriler, modelin gerçek dünya senaryolarında uygulanabilirliğini test etme açısından büyük önem taşımaktadır.

Verilerin sınıflandırılması amacıyla Python programlama dili ve TensorFlow/Keras kütüphaneleri kullanılarak derin öğrenme tabanlı bir eğitim süreci yürütülmüştür. Eğitim aşamasında, eğitim/validation/test ayrımı dikkatle yapılmış, veri artırma yöntemleri ile sınıfların dengesizliği azaltılmaya çalışılmıştır. Ayrıca, erken durdurma ve model checkpoint gibi stratejilerle eğitim süreçleri optimize edilmiştir.

Model performansları, yalnızca doğruluk oranı ile değil; aynı zamanda kayıp değerleri, karışıklık matrisi ve Grad-CAM görselleştirmeleri gibi yöntemlerle kapsamlı şekilde analiz edilmiştir.

3.1. Veri Seti (Dataset)

Bu çalışmada kullanılan veri seti, güncel ve sahadan elde edilmiş nitelikteki RealWaste veri kümesidir [13,25]. RealWaste, atık sınıflandırma alanındaki araştırmalara katkı sağlamak amacıyla oluşturulmuş, yüksek çözünürlüklü ve etiketlenmiş atık görsellerinden oluşan bir veri setidir [4]. Veri seti, Avustralya'nın Wollongong bölgesinde yer alan Whyte's Gully Atık ve Kaynak Geri Kazanım Merkezi'nde çekilmiş fotoğraflardan oluşmaktadır [4,17]. Bu bağlamda, veri seti gerçek dünya koşullarını yansıttığı için laboratuvar ortamlarında üretilen yapay verilerle karşılaştırıldığında çok daha zorlu ve gerçekçi bir test ortamı sunmaktadır.

RealWaste veri seti toplamda 4.752 adet renkli görüntü içermektedir. Görsellerin çözünürlüğü 524x524 piksel olarak sabitlenmiştir. Her bir görsel JPEG formatında olup, farklı aydınlatma ve arka plan koşulları altında çekilmiştir. Bu çeşitlilik, derin öğrenme modellerinin genelleme yeteneğini artırmak açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Görüntüler, 9 ana kategori altında etiketlenmiştir: plastik, cam, metal, kağıt, karton, tekstil, organik gıda, bitki ve karışık atık. Sınıflar dengeli olacak şekilde dağıtılmamış olup, bu durum model performansı üzerinde doğrudan etkili olabilmektedir. Bu nedenle veri ön işleme sürecinde veri artırımı yöntemlerine ihtiyaç duyulmuştur.

Veri setinin en dikkat çekici özelliklerinden biri, saha koşullarında elde edilmiş olmasıdır. Görseller, atıkların doğrudan ayrıştırma bandı üzerinde doğal halleriyle çekilmiştir. Bu durum hem sınıflandırmayı zorlaştırmakta hem de geliştirilen modellerin gerçek sistemlerdeki başarı düzeyini test edebilmek için bir fırsat sunmaktadır.

Tablo 1. Veri setinin sınıf dağılımı ve veri artırımı sonrası eşitleme durumu
(Class distribution of the dataset and the balancing status after data augmentation)

Sınıf	Toplam Veri Sayısı	Eğitim Veri Sayısı (%70)	Veri Artırımı Sonrası Eğitim Verisi	Doğrulama Verisi (%15)	Test Verisi (%15)
Karton Atıklar	461	322	369	70	69
Organik (Gıda) Atıklar	411	287	369	63	61
Cam Atıklar	420	294	369	63	63
Metal Atıklar	790	553	369	119	118
Karışık Atıklar	495	346	369	75	74
Kağıt Atıklar	500	350	369	75	75
Plastik Atıklar	921	644	369	139	138
Tekstil Atıklar	318	222	369	49	47
Bitki Atıklar	436	305	369	66	65
Toplam Veri Sayısı	4752	3323	3321	719	710

Bu çalışmada kullanılan *RealWaste* veri setinin sınıf bazlı dağılımı ve uygulanan veri artırımı işleminin etkileri Tablo 1'de özetlenmiştir. Sınıflar arasında belirgin bir dengesizlik bulunduğundan, modelin tüm sınıflarda etkin bir şekilde öğrenebilmesi için eğitim verisine yönelik çeşitli dönüşümler uygulanmıştır. Özellikle “Tekstil Atıklar” ve “Organik (Gıda) Atıklar” gibi daha az temsile sahip sınıflar için veri artırımı yoluyla örnek sayısı 369'a artırılırken, “Plastik Atıklar” ve “Metal Atıklar” sınıflarında veri indirgeme yapılarak örnek sayısı 369'a indirgenmiştir. Böylelikle, her sınıf için dengeli bir eğitim ortamı sağlanmış ve olası öğrenme sapmalarının önüne geçilmiştir. Eğitim seti, toplam veri kümesinin yaklaşık %70'ini oluşturmakta olup kalan veriler doğrulama ve test amacıyla ayrılmıştır. Bu düzenleme, modelin hem genelleme başarısını artırmak hem de dengesiz sınıf dağılımından kaynaklanabilecek doğruluk kayıplarını azaltmak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak *RealWaste* veri seti, atık sınıflandırma alanında çalışan araştırmacılar için kapsamlı, çeşitli ve gerçekçi bir test ortamı sağlamaktadır. Söz konusu veri seti kullanılarak çeşitli derin öğrenme mimarileri eğitilmiş, elde edilen sonuçlar literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 2. Veri setinden alınan her sınıfa ait örnek görüntüler
(Sample images from each class in the dataset)

3.2. Derin Öğrenme Modelleri (Deep Learnings Models)

Bu çalışmada, görüntü sınıflandırma görevini yerine getirmek amacıyla farklı mimari yapılara sahip on beş farklı evrimsel sinir ağı (ESA) modeli tercih edilmiştir. Bu modeller; VGG16, VGG19, ResNet50, ResNet101, ResNet152, EfficientNetB0, EfficientNetB1, EfficientNetB2, EfficientNetB3, DenseNet121, DenseNet169, DenseNet201, InceptionV3, Xception, MobileNetV2'dir. Her bir modelin mimarisi, derinliği, parametre sayısı ve hedef sistemlere uygunluk durumu göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir.

3.3. Veri Ön İşleme ve Veri Artırma (Data Preprocessing and Augmentation)

Modelin genel performansını artırmak ve overfitting (aşırı öğrenme) riskini azaltmak amacıyla veri ön işleme ve veri artırma adımları titizlikle uygulanmıştır. Öncelikle tüm görüntüler 224x224 piksel boyutlarına yeniden boyutlandırılmış, böylece tüm modellerle uyumlu giriş boyutu sağlanmıştır. Ardından görüntü değerleri 0-255 aralığından 0-1 aralığına normalize edilmiştir. Bu işlem, modelin daha hızlı ve stabil şekilde öğrenmesini sağlamaktadır.

Veri seti, eğitim (%70), doğrulama (%15) ve test (%15) olmak üzere üç alt kümeye ayrılmıştır. Bu ayırım, her sınıf için dengeli olacak şekilde rastgele yapılmıştır. Ayrıca sınıflar arası örnek sayısı farklılıklarını dengelemek amacıyla eğitim verileri

üzerinde çeşitli veri artırma teknikleri uygulanmıştır. Bu teknikler şunlardır:

- Rastgele döndürme (rotation_range=25)
- Genişlik ve yükseklik kaydırmaları (shift_range=0.1)
- Kesme (shear_range=0.1)
- Yakınlaştırma (zoom_range=0.15)
- Yatay çevirme (horizontal_flip)
- Kenar boşluklarını doldurma (fill_mode='nearest')

Bu artırma işlemleri, sınıflar arası dengesizliği azaltmanın yanı sıra modelin aşırı öğrenme (overfitting) problemini engellemesine de yardımcı olmuştur. Aynı zamanda görüntülerin çeşitli varyasyonları üzerinden öğrenme yapan modeller, gerçek dünya senaryolarına daha iyi genellenebilir hâle gelmiştir.

Bunlara ek olarak, sınıf dengesizliklerinin model performansına etkisini azaltmak için sınıf ağırlıkları hesaplanmış ve model eğitime entegre edilmiştir. Böylece azınlıkta kalan sınıfların öğrenilmesi için modelin daha fazla odaklanması sağlanmıştır.

Bu veri ön işleme ve artırma stratejileri, özellikle karmaşık ve sınıflar arası benzerliğin yüksek olduğu atık türlerinde sınıflandırma doğruluğunu artırmada etkili bir rol oynamıştır. Tüm bu adımlar, modelin daha dengeli, güvenilir ve genellenebilir çıktılar üretmesini sağlamıştır.

3.4. Model Performans Değerlendirme (Model Performance Evaluation)

Model eğitimi, derin öğrenme tabanlı sınıflandırma sisteminin başarısını doğrudan etkileyen en kritik aşamalardan biridir. Bu çalışmada, farklı mimarilere sahip toplam 15 adet önceden eğitilmiş model (VGG16, VGG19, ResNet50, ResNet101, ResNet152, MobileNetV2, EfficientNetB0–B3, DenseNet121–201, InceptionV3 ve Xception) transfer öğrenme yöntemiyle yeniden eğitilmiştir.

Eğitim süreci boyunca, modellerin temel katmanları ilk etapta dondurularak yalnızca son katmanları eğitilmiş; ardından tüm katmanlar açık hâle getirilerek ince ayar (fine-tuning) yöntemiyle eğitim süreci tamamlanmıştır. Böylece önceden öğrenilmiş evrensel özelliklerin korunması sağlanırken, yeni görev özelinde detaylı öğrenme gerçekleştirilmiştir.

Model eğitimi sırasında, aşağıda belirtilen stratejiler uygulanmıştır:

- Optimizasyon Yöntemi: Tüm modellerde Adam optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Başlangıç öğrenme oranı

genellikle $1e-4$ olarak belirlenmiş ve gerektiğinde dinamik olarak düşürülmüştür.

- Erken Durdurma (Early Stopping): Modelin doğrulama başarımı belirli bir sayıda epoch boyunca artmadığında eğitim sonlandırılmıştır. Bu sayede aşırı öğrenmenin önüne geçilmiştir.
- ModelCheckpoint: Eğitim süresince doğrulama doğruluğu en yüksek olan modelin ağırlıkları kaydedilmiştir.
- Öğrenme Oranı Azaltma (ReduceLROnPlateau): Doğrulama kaybında iyileşme gözlenmediğinde öğrenme oranı azaltılmış ve modelin yerel minimumlara ulaşması teşvik edilmiştir.

Eğitim işlemleri, her biri 30 epoch'a kadar sürmekte olup, batch size değeri 32 olarak belirlenmiştir. Modelin sınıf dengesizliklerine karşı duyarlılığını artırmak amacıyla compute_class_weight yöntemiyle hesaplanan sınıf ağırlıkları da eğitim fonksiyonuna entegre edilmiştir.

Tüm modeller, aynı eğitim ve doğrulama verileriyle test edilerek adil bir karşılaştırma ortamı sağlanmıştır. Eğitim süreci boyunca elde edilen doğruluk ve kayıp değerleri grafiksel olarak analiz edilerek, modellerin öğrenme davranışları gözlemlenmiştir.

Bu yapılandırmalar sayesinde modellerin genelleme yetenekleri maksimize edilmiş ve gerçek dünyadaki atık sınıflandırma problemlerine daha uygun hâle gelmeleri sağlanmıştır.

Model değerlendirme, derin öğrenme tabanlı sınıflandırma sistemlerinin başarımlarını ölçmek, doğruluklarını ve genellenebilirlik kapasitelerini anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Bu süreçte kullanılan metrikler, modelin yalnızca doğru tahminlerini değil, aynı zamanda hangi tür hataları ne sıklıkla ve hangi sınıflarda yaptığını da ortaya koyarak daha kapsamlı bir analiz yapılmasını sağlar. Bu çalışmada, atık sınıflandırma görevinde eğitilen modellerin performansı; doğruluk (accuracy), hassasiyet (precision), duyarlılık (recall), F1 skoru, karışıklık matrisi (confusion matrix) ve Grad-CAM görselleştirmeleri gibi yaygın ölçütlerle detaylı biçimde değerlendirilmiştir.

En temel metrik olan doğruluk (accuracy), modelin tüm tahminlerinin yüzde kaçının doğru olduğunu göstermektedir. Ancak çok sınıflı ve dengesiz yapıya sahip olan *RealWaste* veri setinde yalnızca doğruluk oranına dayanmak model performansını yanıltıcı şekilde yorumlamaya neden olabilir. Bu nedenle ek metriklerin de birlikte kullanılması gereklidir. Doğruluk, aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

Burada, *TP* (True Positive) doğru pozitif tahminleri, *TN* (True Negative) doğru negatif tahminleri, *FP* (False Positive) yanlış pozitif tahminleri ve *FN* (False Negative) yanlış negatif tahminleri ifade eder.

Hassasiyet (Precision), modelin pozitif olarak tahmin ettiği örneklerin ne kadarının gerçekten doğru olduğunu ölçer. Bu metrik, özellikle yanlış pozitif tahminlerin minimize edilmesinin önemli olduğu uygulamalarda belirleyici olmaktadır:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

Duyarlılık (Recall), modelin doğru pozitif tahminlerinin toplam gerçek pozitiflere oranıdır ve yanlış negatiflerin azaltılması gerektiği durumlarda önem taşır.

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

F1 skoru ise hassasiyet ve duyarlılığın harmonik ortalamasıdır ve dengesiz veri setlerinde daha doğru bir değerlendirme yapmayı sağlar.

$$F1 = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (4)$$

Ayrıca, modelin sınıf bazlı tahmin başarısı karışıklık matrisi (confusion matrix) ile görselleştirilmiştir. Bu matris aracılığıyla her bir atık türü için doğru ve yanlış sınıflandırmalar detaylı biçimde analiz edilmiştir. Özellikle plastik, cam, metal gibi görsel olarak benzer sınıflar arasında yapılan karışıklıklar bu matrisler üzerinden değerlendirilmiştir.

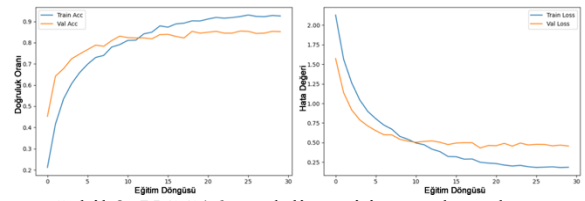
Bu metriklerin birlikte kullanılması sayesinde, yalnızca genel doğruluk değil, aynı zamanda sınıflar arası dengesizliklerin model performansına etkisi de daha sağlıklı bir biçimde ortaya konmuştur.

Tablo 2. Karmaşıklık matrisi
(Confusion matrix)

Gerçek Tahmin Edilen	Bitki Atıkları	Tekstil Atıkları	Plastik Atıkları	Karışık Atıklar	Kâğıt Atıkları	Metal Atıkları	Organik (Gıda) Atıkları	Cam Atıkları	Karton Atıkları
Bitki Atıkları	TP1	FP12	FP13	FP14	FP15	FP16	FP17	FP18	FP19
Tekstil Atıkları	FN21	TP2	FP23	FP24	FP25	FP26	FP27	FP28	FP29
Plastik Atıkları	FN31	FN32	TP3	FP34	FP35	FP36	FP37	FP38	FP39
Karışık Atıklar	FN41	FN42	FN43	TP4	FP45	FP46	FP47	FP48	FP49
Kâğıt Atıkları	FN51	FN52	FN53	FN54	TP5	FP56	FP57	FP58	FP59
Metal Atıkları	FN61	FN62	FN63	FN64	FN65	TP6	FP67	FP68	FP69
Organik (Gıda) Atıkları	FN71	FN72	FN73	FN74	FN75	FN76	TP7	FP78	FP79
Cam Atıkları	FN81	FN82	FN83	FN84	FN85	FN86	FN87	TP8	FP89
Karton Atıkları	FN91	FN92	FN93	FN94	FN95	FN96	FN97	FN98	TP9

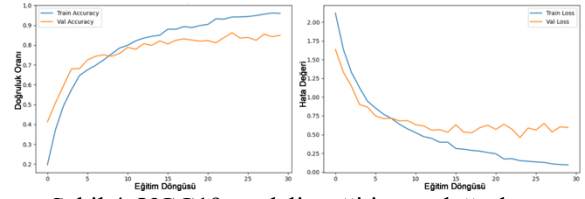
Bu çalışmada, her derin öğrenme modeli için eğitim sürecinde elde edilen eğitim doğruluğu (train accuracy) ve doğrulama doğruluğu (validation accuracy) grafiksel olarak görselleştirilmiştir. Bu grafikler, modellerin öğrenme dinamiklerini, genelleme yeteneklerini ve olası overfitting (aşırı öğrenme) eğilimlerini incelemek açısından önemli bir araç olarak kullanılmıştır.

Eğitim doğruluğu, modelin eğitim verisi üzerindeki başarısını gösterirken, doğrulama doğruluğu modelin daha önce görmediği veriler üzerindeki performansını yansıtır. Bu iki metriğin bir arada değerlendirilmesi, modelin yalnızca ezberleyip ezberlemediğini değil, aynı zamanda genelleme kapasitesini de ortaya koyar.



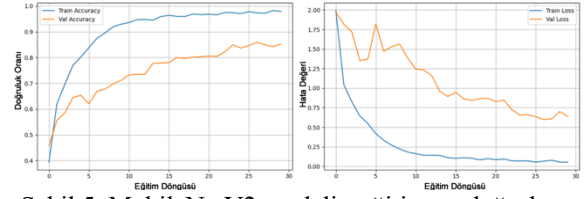
Şekil 3. VGG16 modeli - eğitim ve doğrulama doğruluk grafiği

(VGG16 model – training and validation accuracy graph)



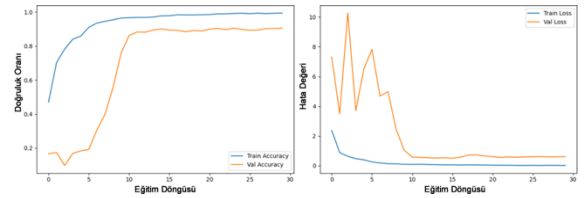
Şekil 4. VGG19 modeli - eğitim ve doğrulama doğruluk grafiği

(VGG19 model – training and validation accuracy graph)



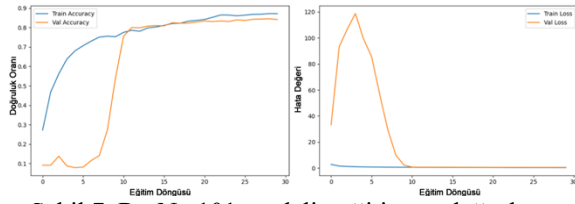
Şekil 5. MobileNetV2 modeli - eğitim ve doğrulama doğruluk grafiği

(MobileNetV2 model – training and validation accuracy graph)

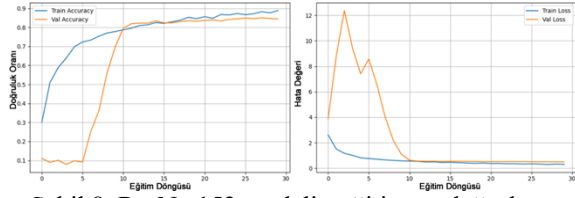


Şekil 6. ResNet50 modeli - eğitim ve doğrulama doğruluk grafiği

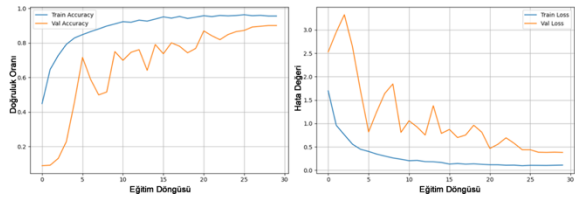
(ResNet50 model – training and validation accuracy graph)



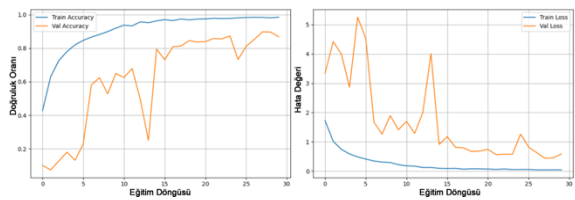
Şekil 7. ResNet101 modeli - eğitim ve doğrulama doğruluk grafiği
(ResNet101 model – training and validation accuracy graph)



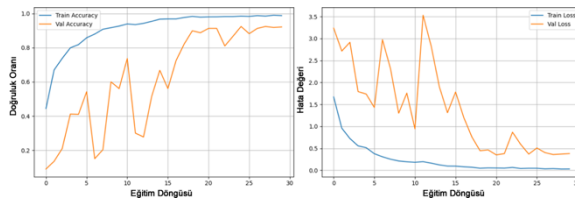
Şekil 8. ResNet152 modeli - eğitim ve doğrulama doğruluk grafiği
(ResNet152 model – training and validation accuracy graph)



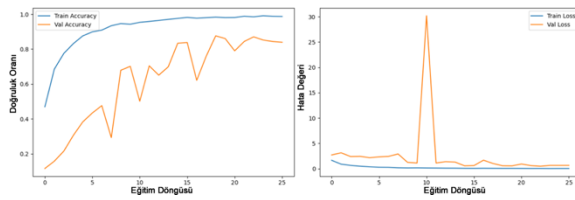
Şekil 9. EfficientNetB0 modeli - eğitim ve doğrulama doğruluk grafiği
(EfficientNetB0 model – training and validation accuracy graph)



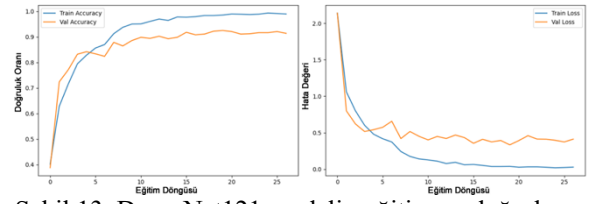
Şekil 10. EfficientNetB1 modeli - eğitim ve doğrulama doğruluk grafiği
(EfficientNetB1 model – training and validation accuracy graph)



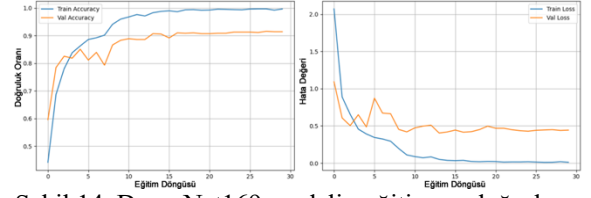
Şekil 11. EfficientNetB2 modeli - eğitim ve doğrulama doğruluk grafiği
(EfficientNetB2 model – training and validation accuracy graph)



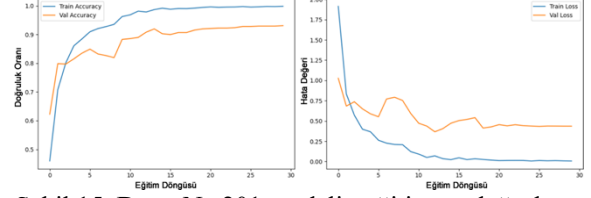
Şekil 12. EfficientNetB3 modeli - eğitim ve doğrulama doğruluk grafiği
(EfficientNetB3 model – training and validation accuracy graph)



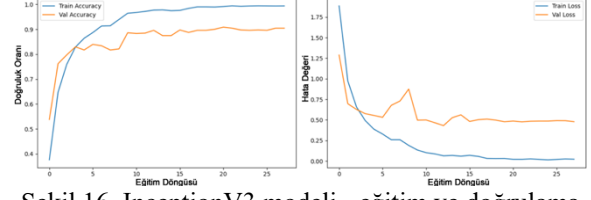
Şekil 13. DenseNet121 modeli - eğitim ve doğrulama doğruluk grafiği
(DenseNet121 model – training and validation accuracy graph)



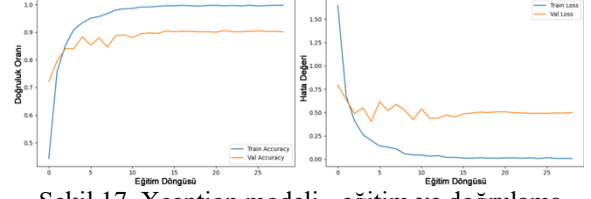
Şekil 14. DenseNet169 modeli - eğitim ve doğrulama doğruluk grafiği
(DenseNet169 model – training and validation accuracy graph)



Şekil 15. DenseNet201 modeli - eğitim ve doğrulama doğruluk grafiği
(DenseNet201 model – training and validation accuracy graph)



Şekil 16. InceptionV3 modeli - eğitim ve doğrulama doğruluk grafiği
(InceptionV3 model – training and validation accuracy graph)



Şekil 17. Xception modeli - eğitim ve doğrulama doğruluk grafiği
(Xception model – training and validation accuracy graph)

Bu çalışmada kullanılan tüm derin öğrenme modelleri için eğitim süreci boyunca elde edilen doğruluk (accuracy) ve hata (loss) değerleri grafikler aracılığıyla görselleştirilmiştir. Eğitim ve doğrulama doğruluğu grafiklerinin incelenmesi, modellerin öğrenme performanslarını, genellebilirlik düzeylerini ve aşırı öğrenme (overfitting) eğilimlerini değerlendirmek açısından büyük önem taşımaktadır.

Grafikler genel olarak incelendiğinde, çoğu modelde eğitim doğruluğunun artış gösterdiği ve doğrulama doğruluğunun da buna paralel olarak ilerlediği gözlemlenmiştir. Ancak bazı modellerde, özellikle derin katman yapısına sahip olanlarda (örneğin ResNet152 ve EfficientNetB3), eğitim doğruluğu doğrulama doğruluğuna kıyasla daha yüksek seviyelere ulaşmakta, bu durum da overfitting ihtimaline işaret etmektedir. Bu gibi durumlarda erken durdurma (early stopping) ve öğrenme oranı azaltma (ReduceLROnPlateau) gibi düzenleyici yöntemlerin kullanılması, modelin aşırı öğrenmesini engelleyerek doğrulama performansını stabilize etmeye yardımcı olmuştur.

Ayrıca, veri artırımı (data augmentation) tekniklerinin uygulanması, sınıf dengesizliklerinden kaynaklanan aşırı öğrenme eğilimini azaltmış ve doğrulama doğruluklarında daha dengeli bir seyir elde edilmesini sağlamıştır. Grafiklerin çoğunda, erken epoch'larda hızlı bir öğrenme gerçekleştiği, sonrasında ise doğruluk artış hızının azaldığı görülmektedir. Bu durum, modellerin erken evrelerde temel desenleri öğrendiğini ve sonrasında detaylara yöneldiğini göstermektedir.

Genel olarak grafiklerin incelenmesi, modellerin hem eğitim hem de doğrulama verileri üzerinde başarılı bir şekilde optimize edildiğini ve kullanılan yöntemlerin etkin sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Model performanslarının karşılaştırmalı olarak sunulduğu aşağıdaki tabloda, her bir modelin test doğruluğu, hassasiyet, duyarlılık, F1 skoru ve sınıf bazlı başarı değerleri yer almaktadır. Modelin sınıf bazlı başarı oranları incelendiğinde, genel olarak yüksek bir sınıflandırma başarısına ulaşıldığı görülmektedir. "Plastik Atıklar", "Cam Atıklar", "Metal Atıklar" ve "Bitki Atıklar" gibi sınıflarda hassasiyet (Precision) ve duyarlılık (Recall) değerleri %85'in üzerinde seyretmekte olup, bu durum modelin bu kategorilerde hem doğru sınıflandırma yapabildiğini hem de büyük oranda örnekleri hatasız şekilde yakalayabildiğini göstermektedir. Özellikle "Bitki Atıklar" sınıfında elde edilen yüksek F1-score değeri, modelin bu sınıfa dair güçlü bir genel performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

Buna karşın "Karışık Atıklar" ve "Karton Atıklar" gibi sınıflarda görece olarak daha düşük F1-score değerleri elde edilmiştir. Bu düşüklük, sınıf içi çeşitliliğin fazla olması ya da sınıflar arası görsel benzerlikten kaynaklanıyor olabilir. Özellikle "Karışık Atıklar" sınıfı, yapısı itibarıyla diğer kategorilerle karışmaya daha müsait olduğu için, modelin bu sınıftaki örnekleri ayırt etmesi zorlaşmaktadır. Benzer şekilde, "Karton Atıklar" sınıfı ile "Kağıt Atıklar" sınıfı arasında görsel yakınlık, sınıflar arası ayrımı zorlaştırmış olabilir.

Sonuç olarak, model genel anlamda yüksek doğrulukta sınıflandırma yapabilmış ve çoğu sınıfta başarılı sonuçlar üretmiştir.

Tablo 3. Derin öğrenme modellerinin sınıf bazında performans ölçümleri

(Class-wise performance metrics of deep learning models)

Model	Sınıf	Hassasiyet	Duyarlılık	F1-Puanı
VGG16	Karton Atıklar	0.89	0.81	0.85
	Organik Atıklar	0.92	0.90	0.91
	Cam Atıklar	0.90	0.89	0.90
	Metal Atıklar	0.84	0.91	0.87
	Karışık Atıklar	0.74	0.85	0.80
	Kağıt Atıklar	0.89	0.88	0.88
	Plastik Atıklar	0.89	0.76	0.82
	Tekstil Atıklar	0.79	0.86	0.82
VGG19	Bitki Atıklar	0.90	0.98	0.94
	Karton Atıklar	0.94	0.91	0.93
	Organik Atıklar	0.87	0.97	0.92
	Cam Atıklar	0.92	0.86	0.89
	Metal Atıklar	0.90	0.87	0.89
	Karışık Atıklar	0.71	0.88	0.79
	Kağıt Atıklar	0.91	0.85	0.88
	Plastik Atıklar	0.88	0.81	0.84
ResNet101	Tekstil Atıklar	0.87	0.84	0.85
	Bitki Atıklar	0.96	0.98	0.97
	Karton Atıklar	0.81	0.81	0.81
	Organik Atıklar	0.82	0.94	0.87
	Cam Atıklar	0.89	0.89	0.89
	Metal Atıklar	0.85	0.88	0.87
	Karışık Atıklar	0.88	0.68	0.77
	Kağıt Atıklar	0.86	0.88	0.87
ResNet152	Plastik Atıklar	0.89	0.82	0.85
	Tekstil Atıklar	0.78	0.88	0.83
	Bitki Atıklar	0.89	0.98	0.94
	Karton Atıklar	0.86	0.91	0.89
	Organik Atıklar	0.88	0.97	0.92
	Cam Atıklar	0.95	0.86	0.90
	Metal Atıklar	0.78	0.87	0.82
	Karışık Atıklar	0.78	0.87	0.82
EfficientNetB0	Kağıt Atıklar	0.89	0.87	0.88
	Plastik Atıklar	0.92	0.73	0.82
	Tekstil Atıklar	0.88	0.94	0.91
	Bitki Atıklar	0.96	0.98	0.97
	Karton Atıklar	0.90	0.91	0.91
	Organik Atıklar	0.90	0.97	0.93
	Cam Atıklar	0.88	0.95	0.92
	Metal Atıklar	0.85	0.94	0.90
EfficientNetB1	Karışık Atıklar	0.83	0.77	0.80
	Kağıt Atıklar	0.92	0.92	0.92
	Plastik Atıklar	0.95	0.78	0.85
	Tekstil Atıklar	0.79	0.90	0.84
	Bitki Atıklar	0.98	0.98	0.98
	Karton Atıklar	0.90	0.91	0.91
	Organik Atıklar	0.89	0.94	0.91
	Cam Atıklar	0.90	0.90	0.90
EfficientNetB2	Metal Atıklar	0.91	0.88	0.89
	Karışık Atıklar	0.82	0.83	0.82
	Kağıt Atıklar	0.96	0.89	0.92
	Plastik Atıklar	0.87	0.80	0.87
	Tekstil Atıklar	0.81	0.88	0.84
	Bitki Atıklar	1.00	0.97	0.98
	Karton Atıklar	0.94	0.93	0.94
	Organik Atıklar	0.92	0.97	0.95
EfficientNetB2	Cam Atıklar	0.91	0.94	0.92
	Metal Atıklar	0.86	0.90	0.88
	Karışık Atıklar	0.87	0.87	0.87

	Kağıt Atıklar	0.99	0.95	0.97
	Plastik Atıklar	0.87	0.83	0.85
	Tekstil Atıklar	0.96	0.96	0.96
	Bitki Atıklar	0.98	0.98	0.98
EfficientNetB3	Karton Atıklar	0.79	0.96	0.86
	Organik Atıklar	0.92	0.92	0.92
	Cam Atıklar	0.79	0.86	0.82
	Metal Atıklar	0.89	0.91	0.90
	Karışık Atıklar	0.81	0.88	0.85
	Kağıt Atıklar	1.00	0.85	0.92
	Plastik Atıklar	0.90	0.73	0.81
	Tekstil Atıklar	0.80	0.88	0.83
	Bitki Atıklar	0.93	0.97	0.95
DenseNet121	Karton Atıklar	0.89	0.94	0.92
	Organik Atıklar	0.92	0.95	0.94
	Cam Atıklar	0.91	0.95	0.93
	Metal Atıklar	0.94	0.92	0.93
	Karışık Atıklar	0.88	0.85	0.86
	Kağıt Atıklar	0.95	0.93	0.94
	Plastik Atıklar	0.94	0.89	0.92
	Tekstil Atıklar	0.90	0.94	0.92
	Bitki Atıklar	0.96	0.98	0.97
DenseNet169	Karton Atıklar	0.82	0.97	0.89
	Organik Atıklar	0.97	0.90	0.93
	Cam Atıklar	0.87	0.97	0.92
	Metal Atıklar	0.91	0.94	0.93
	Karışık Atıklar	0.91	0.89	0.90
	Kağıt Atıklar	0.98	0.87	0.92
	Plastik Atıklar	0.96	0.85	0.90
	Tekstil Atıklar	0.92	0.98	0.95
	Bitki Atıklar	0.94	0.98	0.96
DenseNet201	Karton Atıklar	0.89	0.94	0.92
	Organik Atıklar	0.92	0.95	0.94
	Cam Atıklar	0.91	0.95	0.93
	Metal Atıklar	0.94	0.92	0.93
	Karışık Atıklar	0.88	0.85	0.86
	Kağıt Atıklar	0.95	0.93	0.94
	Plastik Atıklar	0.94	0.89	0.92
	Tekstil Atıklar	0.90	0.94	0.92
	Bitki Atıklar	0.96	0.98	0.97
InceptionV3	Karton Atıklar	0.89	0.93	0.91
	Organik Atıklar	0.92	0.95	0.94
	Cam Atıklar	0.89	0.98	0.93
	Metal Atıklar	0.87	0.92	0.89
	Karışık Atıklar	0.83	0.92	0.87
	Kağıt Atıklar	0.94	0.87	0.90
	Plastik Atıklar	0.93	0.82	0.87
	Tekstil Atıklar	0.96	0.92	0.94
	Bitki Atıklar	1.00	0.98	0.99
MobileNetV2	Karton Atıklar	0.69	0.94	0.80
	Organik Atıklar	0.91	0.81	0.86
	Cam Atıklar	0.88	0.89	0.89
	Metal Atıklar	0.90	0.88	0.89
	Karışık Atıklar	0.71	0.77	0.74
	Kağıt Atıklar	0.87	0.80	0.83
	Plastik Atıklar	0.92	0.78	0.84
	Tekstil Atıklar	0.93	0.82	0.87
	Bitki Atıklar	0.86	0.98	0.92
ResNet50	Karton Atıklar	0.88	0.96	0.92
	Organik Atıklar	0.91	0.97	0.94
	Cam Atıklar	0.93	0.86	0.89
	Metal Atıklar	0.86	0.91	0.88
	Karışık Atıklar	0.92	0.89	0.91
	Kağıt Atıklar	0.96	0.91	0.93
	Plastik Atıklar	0.91	0.85	0.88
	Tekstil Atıklar	0.90	0.94	0.92
	Bitki Atıklar	0.97	0.98	0.98
Xception	Karton Atıklar	0.86	0.94	0.90
	Organik Atıklar	0.88	0.94	0.91
	Cam Atıklar	0.90	0.98	0.94

	Metal Atıklar	0.92	0.92	0.92
	Karışık Atıklar	0.90	0.87	0.88
	Kağıt Atıklar	0.97	0.89	0.93
	Plastik Atıklar	0.94	0.83	0.89
	Tekstil Atıklar	0.90	0.96	0.93
	Bitki Atıklar	0.92	0.98	0.95

Modellerin test ve doğrulama başarıları incelendiğinde, genel olarak istikrarlı ve yüksek performanslar elde edildiği görülmektedir. Özellikle DenseNet ailesi öne çıkmakta; DenseNet201 modeli %92,91 test ve %93,10 doğrulama doğruluğu ile en yüksek genel başarıyı sergileyerek hem eğitim sırasında hem de daha önce görmediği test verileri üzerinde güçlü bir genelleme yeteneği göstermiştir. Aynı şekilde DenseNet169 ve DenseNet121 modelleri de %91'in üzerindeki doğruluklarıyla dikkat çekmektedir.

EfficientNet mimarileri de oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. En iyi performansı EfficientNetB2 sunarken, %91,10 test doğruluğu ve %92,39 doğrulama doğruluğu ile oldukça dengeli bir sonuç elde edilmiştir. Bu durum, EfficientNet modellerinin hem parametrik verimlilik hem de sınıflandırma başarısı açısından güçlü adaylar olduğunu ortaya koymaktadır.

InceptionV3, ResNet50 ve Xception gibi ileri düzey mimarilerde de benzer şekilde %90 üzerinde test doğruluğu elde edilmiş, bu da bu modellerin derin yapılarının karmaşık veri setlerinde iyi sonuçlar verebildiğini göstermiştir.

Daha klasik mimarilerden olan VGG16 ve VGG19, diğer modellere göre daha düşük doğruluklara sahip olsa da yine de %85'in üzerindeki test doğruluklarıyla sağlam bir temel performans sunmaktadır. Özellikle VGG16 modelinin doğrulama ve test verileri arasındaki uyumlu performansı (%86,23 test doğruluğu ve %85,49 doğrulama doğruluğu), dengeli bir öğrenme süreci geçirildiğini göstermektedir.

Düşük parametre sayısı ile bilinen MobileNetV2, %84,28 test doğruluğu ile kaynak kısıtlı sistemlerde kullanılabilecek verimli bir model olarak öne çıkmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, test ve doğrulama doğrulukları arasındaki farkların oldukça düşük olması, modellerin overfitting eğiliminde olmadığını ve öğrenilen temsillerin yeni veriler üzerinde de etkili olduğunu göstermektedir. Bu da eğitim sürecinde uygulanan veri artırımı, erken durdurma ve dengeli sınıf ağırlıklandırması gibi yöntemlerin başarıyla uygulandığını göstermektedir.

Tablo 4. Modellerin test ve doğrulama oranları
sonuçları
(Models' test and validation accuracy results)

Sınıf	Test Oranı	Doğrulama Oranı
DenseNet201	0.9291	0.9310
DenseNet121	0.9235	0.9254
EfficientNetB2	0.9110	0.9239
DenseNet169	0.9193	0.9155
Xception	0.9138	0.9056
InceptionV3	0.9096	0.9085
ResNet50	0.9096	0.9056
EfficientNetB0	0.8915	0.9000
EfficientNetB1	0.8943	0.8972
EfficientNetB3	0.8707	0.8761
ResNet152	0.8527	0.8693
VGG16	0.8623	0.8549
MobileNetV2	0.8428	0.8704
ResNet101	0.8567	0.8451
VGG19	0.8275	0.8268

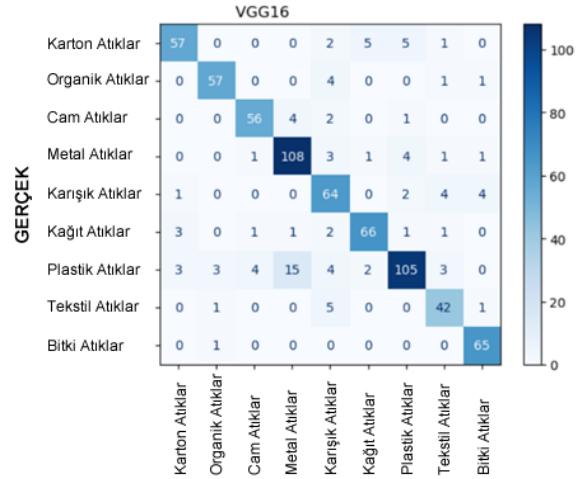
Bu çalışmada kullanılan farklı derin öğrenme mimarileri, atık sınıflandırma görevinde genellikle yüksek doğruluk seviyeleri sunmuştur. Confusion matrix analizleri, sınıf bazında başarı oranlarını detaylı biçimde ortaya koymakta ve modellerin güçlü ya da zayıf yönlerini görsel olarak yansıtmaktadır. Özellikle “Bitki Atıklar”, “Metal Atıklar” ve “Tekstil Atıklar” gibi ayırt edici özelliklere sahip sınıflar, hemen hemen tüm modellerde yüksek doğruluk, hassasiyet ve duyarlılık değerleriyle sınıflandırılmıştır. Bu sınıflar için F1 skorlarının %90 seviyesini aşması, bu kategorilerin modeller tarafından başarıyla öğrenildiğini göstermektedir.

Buna karşın, “Plastik Atıklar” ve “Karışık Atıklar” sınıfları birçok model için zorluk teşkil etmiştir. Özellikle bu sınıfların görsel açıdan diğer kategorilere benzerlik göstermesi ve içsel çeşitliliğe sahip olması, karışıklığa yol açmıştır. Bu durum, confusion matrixlerde “Plastik Atıklar” sınıfının diğer sınıflarla karıştığını ve bazı örneklerin yanlış sınıflara atandığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, veri artırma (augmentation) stratejileri sayesinde az örnekli sınıflarda model performansları dengelenmiş ve düşük destekli sınıflar da başarıyla temsil edilmiştir.

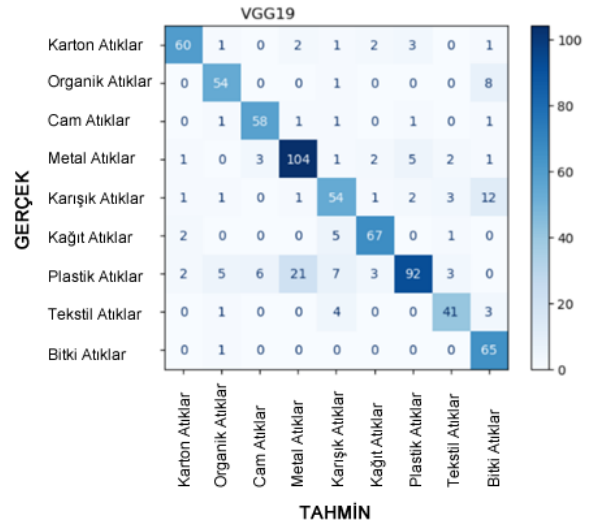
Modellerin büyük bir kısmı sınıflar arası dengeli korurken, mimari derinliği ve katman yapısı daha gelişmiş olan modeller (örneğin DenseNet201, EfficientNetB2/B3, Xception) genellikle daha yüksek sınıf ayırma gücü göstermiştir. Bu modellerin

karışık örüntüleri daha iyi temsil edebildiği ve bu sayede hata oranlarını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Özellikle DenseNet tabanlı mimarilerde, sınıf karışıklığı minimum düzeye indirilmiştir.

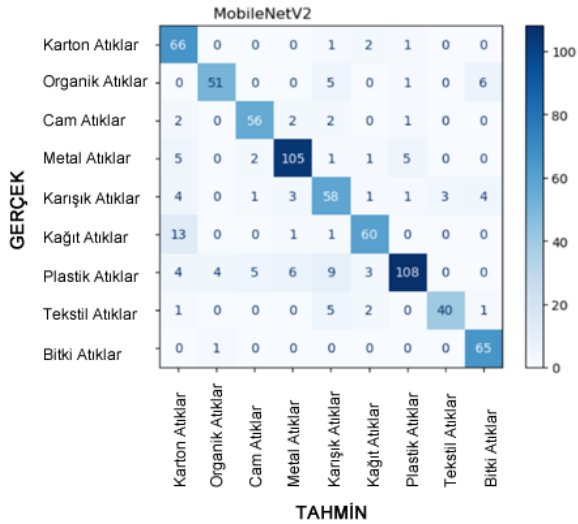
Sonuç olarak, confusion matrixler yalnızca genel doğruluğu değil, aynı zamanda sınıf içi ve sınıflar arası başarıyı da ayrıntılı bir şekilde analiz etme fırsatı sunmuştur. Bu analizler, modellerin hangi sınıflarda güvenilir sonuçlar verdiğini ve hangi sınıflarda iyileştirme gerektiğini açıkça ortaya koymuş, gelecekte yapılacak veri toplama ya da model geliştirme çalışmalarına da yön verici olmuştur.



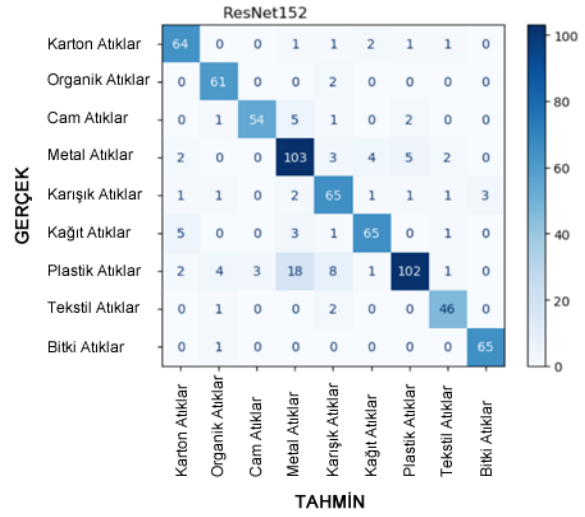
Şekil 18. VGG16 modeli karışıklık matrisi
(Confusion matrix of the VGG16 model)



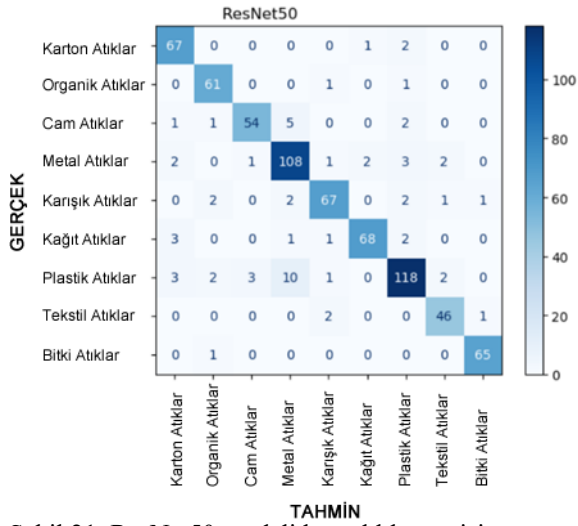
Şekil 19. VGG19 modeli karışıklık matrisi
(Confusion matrix of the VGG19 model)



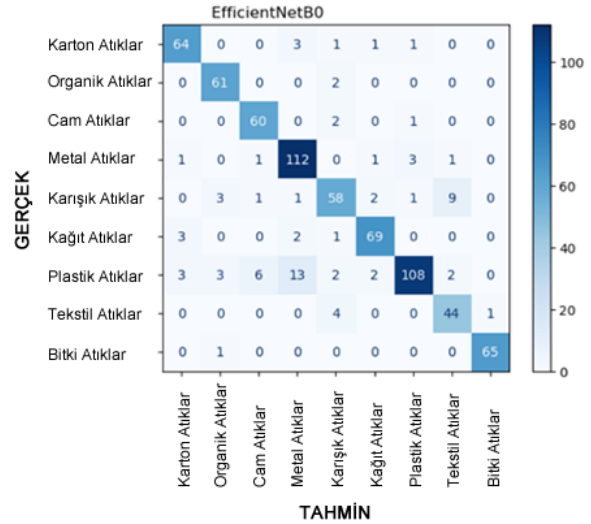
Şekil 20. MobileNetV2 modeli karışıklık matrisi
(Confusion matrix of the MobileNetV2 model)



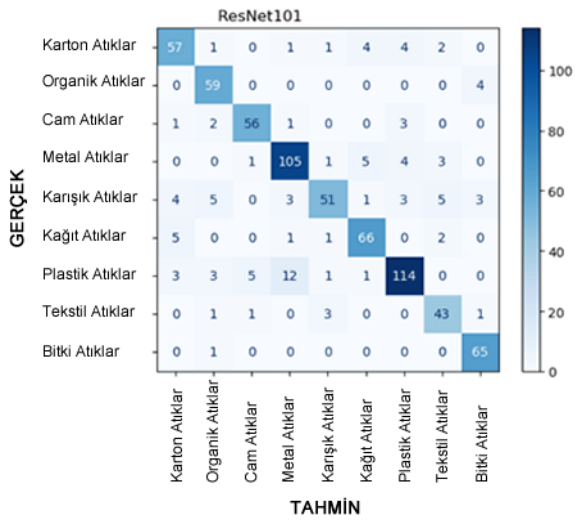
Şekil 23. ResNet152 modeli karışıklık matrisi
(Confusion matrix of the ResNet152 model)



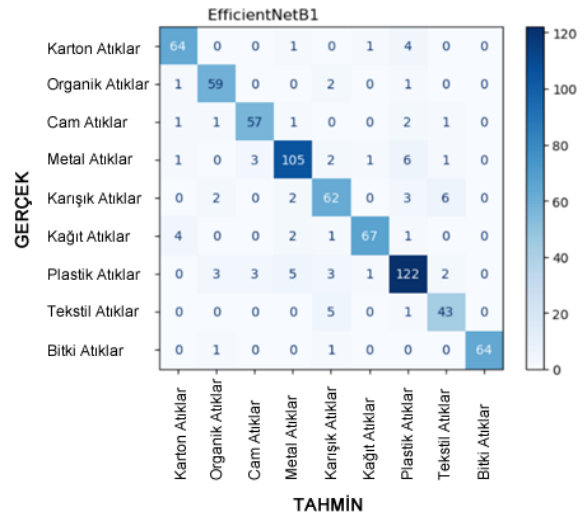
Şekil 21. ResNet50 modeli karışıklık matrisi
(Confusion matrix of the ResNet50 model)



Şekil 24. EfficientNetB0 modeli karışıklık matrisi
(Confusion matrix of the EfficientNetB0 model)

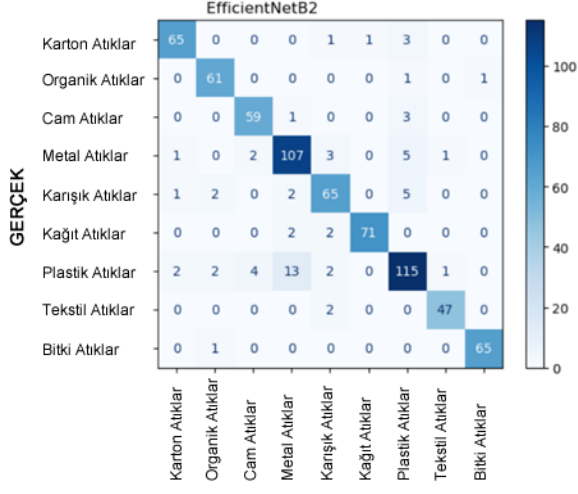
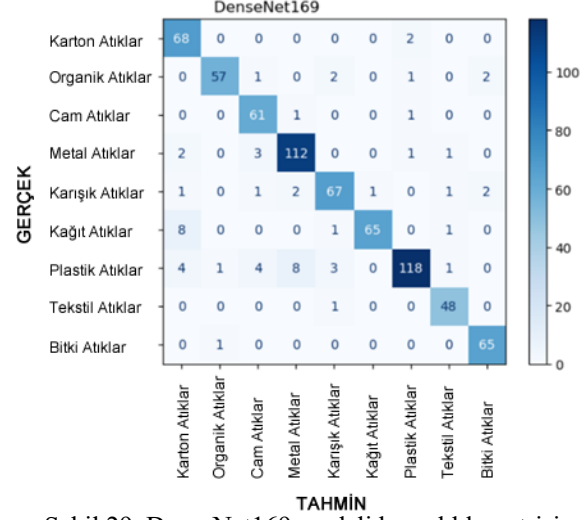
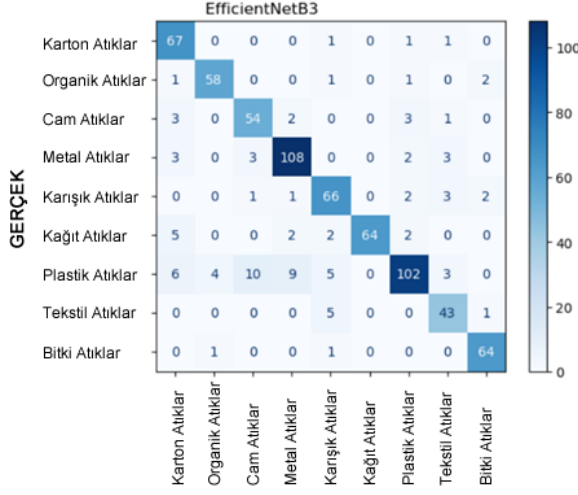
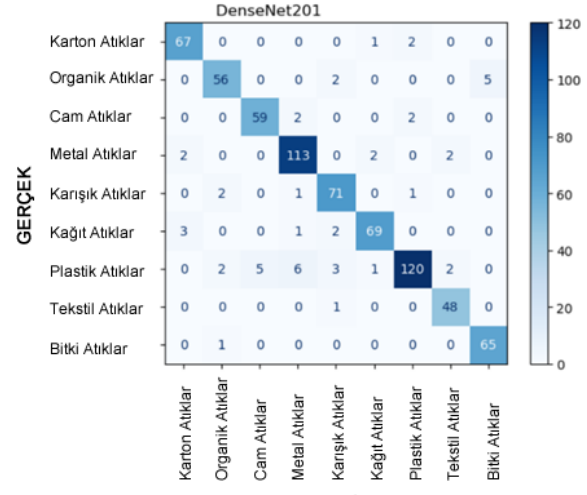
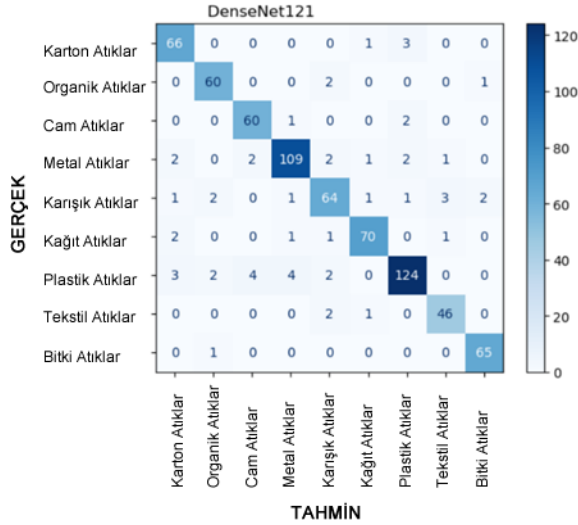


Şekil 22. ResNet101 modeli karışıklık matrisi
(Confusion matrix of the ResNet101 model)

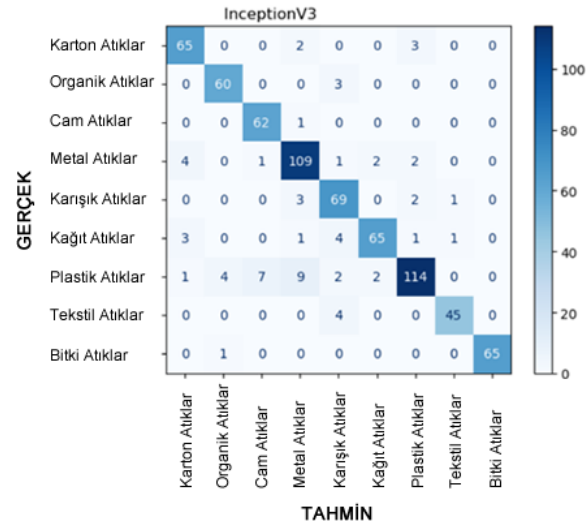


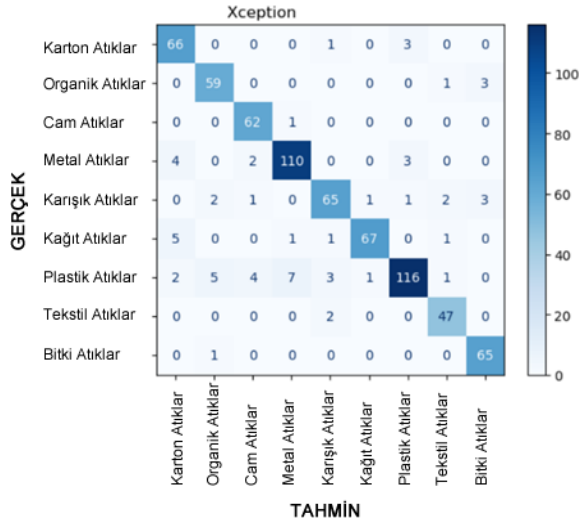
Şekil 25. EfficientNetB1 modeli karışıklık matrisi
(Confusion matrix of the EfficientNetB1 model)

(Confusion matrix of the DenseNet121 model)

Şekil 26. EfficientNetB2 modeli karışıklık matrisi
(Confusion matrix of the EfficientNetB2 model)Şekil 29. DenseNet169 modeli karışıklık matrisi
(Confusion matrix of the DenseNet169 model)Şekil 27. EfficientNetB3 modeli karışıklık matrisi
(Confusion matrix of the EfficientNetB3 model)Şekil 30. DenseNet201 modeli karışıklık matrisi
(Confusion matrix of the DenseNet201 model)

Şekil 28. DenseNet121 modeli karışıklık matrisi

Şekil 31. InceptionV3 modeli karışıklık matrisi
(Confusion matrix of the InceptionV3 model)



Şekil 32. Xception modeli karışıklık matrisi
(Confusion matrix of the Xception model)

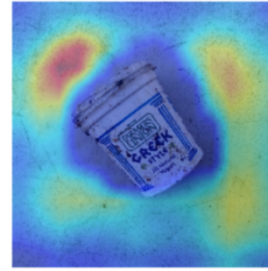
Bu çalışmada farklı derin öğrenme mimarileri için elde edilen Grad-CAM (Gradient-weighted Class Activation Mapping) çıktıları, modellerin sınıflandırma kararlarını verirken odaklandıkları bölgeleri anlamamıza olanak tanımaktadır. Grad-CAM yöntemi, özellikle evrimsel sinir ağlarının karar verme süreçlerinin şeffaflığını artırmak ve model davranışlarını yorumlamak amacıyla geliştirilmiştir.

Elde edilen görselleştirmeler incelendiğinde, EfficientNetB2, DenseNet121 ve Xception gibi ileri düzey mimarilerin, atık nesnelerin bulunduğu bölgelere yoğunlaşan belirgin aktivasyon haritaları ürettiği gözlemlenmiştir. Bu modellerin özellikle sınıf ayrımı güç olan örneklerde dahi nesne merkezine odaklandıkları ve sınıflandırma başarısını artırdıkları dikkat çekmiştir. Buna karşın, VGG16 ve MobileNetV2 gibi daha hafif mimarilerde aktivasyon bölgelerinin zaman zaman dağınık olduğu ve sınıf karışıklıklarının yaşanabildiği görülmektedir.

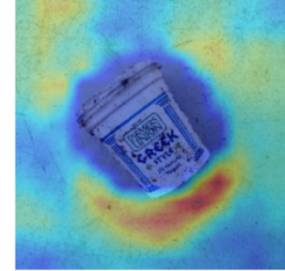
Genel olarak, Grad-CAM görselleştirmeleri, modellerin hangi görsel ipuçlarına dayandığını ortaya koyarak karar verme mekanizmalarının yorumlanabilirliğini artırmıştır. Bu da, modelin sadece doğruluk metriği ile değil, aynı zamanda görsel anlamda tutarlılığıyla da değerlendirilmesini mümkün kılmıştır.



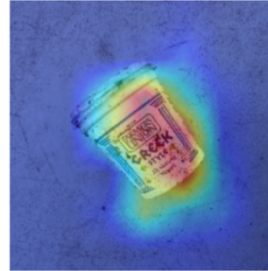
Şekil 33. Orijinal Resim
(original picture)



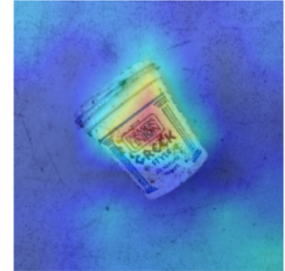
Şekil 34. VGG16 Modeli
(VGG16 model)



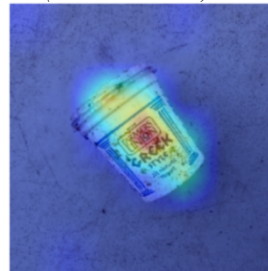
Şekil 35. VGG19 Modeli
(VGG19 model)



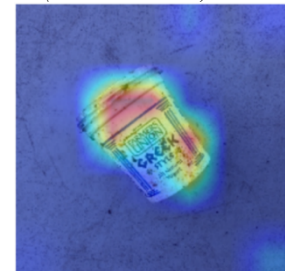
Şekil 36. ResNet101 Modeli
(ResNet101 model)



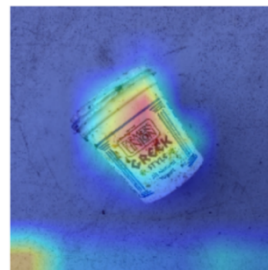
Şekil 37. ResNet152 Modeli
(ResNet152 model)



Şekil 38. EfficientNetB0 Modeli
(EfficientNetB0 model)



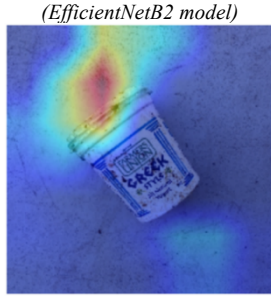
Şekil 39. EfficientNetB1 Modeli
(EfficientNetB1 model)



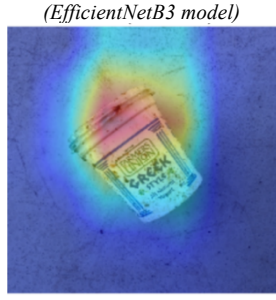
Şekil 40. EfficientNetB2 Modeli



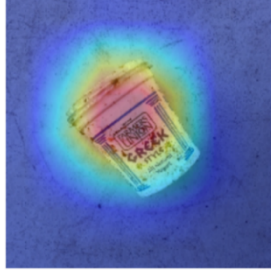
Şekil 41. EfficientNetB3 Modeli



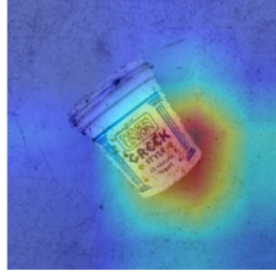
Şekil 42. DenseNet121 Modeli
(DenseNet121 model)



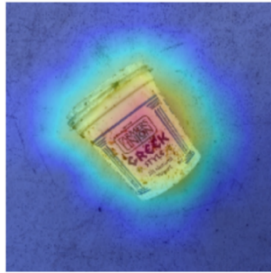
Şekil 43. DenseNet169 Modeli
(DenseNet169 model)



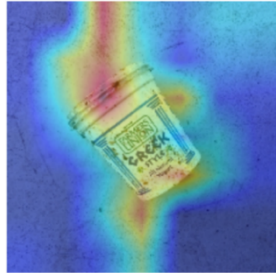
Şekil 44. DenseNet201 Modeli
(DenseNet201 model)



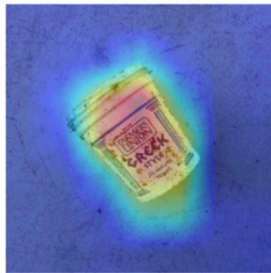
Şekil 45. InceptionV3 Modeli
(InceptionV3 model)



Şekil 46. Xception Modeli
(Xception model)



Şekil 47. MobileNetV2 Modeli
(MobileNetV2 model)



Şekil 48. ResNet50 Modeli
(ResNet50 model)

Genel olarak, Grad-CAM görselleştirmeleri, modellerin hangi görsel ipuçlarına dayandığını ortaya koyarak karar verme mekanizmalarının yorumlanabilirliğini artırmıştır. Bu da modelin sadece doğruluk metriği ile değil, aynı zamanda görsel anlamda tutarlılığıyla da değerlendirilmesini mümkün kılmıştır. [16] tarafından önerilen bu yöntem sayesinde, bu çalışma kapsamında kullanılan

derin öğrenme modellerinin güvenilirliği daha güçlü şekilde analiz edilmiştir.

4. BULGULAR VE YORUMLAR (FINDINGS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen uygulamalar, *RealWaste* veri kümesinin özgün yapısı ve saha koşullarını yansıtan çeşitliliği göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Farklı derin öğrenme mimarileri üzerinde yapılan kapsamlı testler ve karşılaştırmalar sonucunda önemli gözlemler elde edilmiştir.

Eğitim ve doğrulama aşamalarına ait doğruluk ve kayıp eğrileri incelendiğinde, modellerin büyük çoğunluğunun belirli bir epoch sayısından sonra doğrulukta plato noktasına ulaştığı, hata değerlerinin ise başarılı bir biçimde minimize edildiği görülmüştür. Özellikle EfficientNet ve DenseNet ailesine ait modellerin hem eğitim hem de doğrulama sürecinde istikrarlı bir öğrenme eğrisi sergilediği tespit edilmiştir. Bu durum, bu mimarilerin veri çeşitliliğini etkili biçimde öğrenebildiğini ve aşırı öğrenme eğiliminde olmadığını göstermektedir.

Test ve doğrulama başarıları karşılaştırıldığında, DenseNet201, EfficientNetB2 ve Xception modelleri genel doğruluk açısından ön plana çıkmıştır. Bu modeller, karmaşık sınıf örüntülerini ayırt etme konusunda yüksek performans göstermiştir. Buna karşın, VGG19 ve MobileNetV2 gibi görece daha hafif mimarilerin doğruluk oranları diğer modellere kıyasla daha düşük seviyede kalmıştır. Ancak bu modellerin daha az hesaplama maliyetiyle çalıştığı ve gerçek zamanlı uygulamalar için avantaj sağladığı unutulmamalıdır.

Sınıf bazlı değerlendirmelerde, bazı atık türlerinin diğerlerine göre daha kolay sınıflandırıldığı gözlemlenmiştir. Özellikle belirgin görsel özelliklere sahip olan "Cam Atıklar" ve "Metal Atıklar" sınıflarında yüksek hassasiyet ve duyarlılık değerleri elde edilmiştir. Öte yandan, "Karışık Atıklar" ve "Tekstil Atıklar" gibi sınıflar, içerdiği örneklerin çeşitliliği ve sınıf içi benzerlik düşüklüğü nedeniyle modellerin en çok zorlandığı kategoriler olmuştur.

Karışıklık matrisleri incelendiğinde, sınıflar arası karışmanın en çok yukarıda bahsi geçen karmaşık kategorilerde gerçekleştiği görülmüştür. Bu, özellikle atıkların saha koşullarında bir arada bulunması ve arka plan değişkenliğinin yüksek olması ile ilişkilendirilebilir.

Grad-CAM görselleştirmeleri sayesinde, modellerin karar verme süreçlerinde hangi görsel bölgeleri dikkate aldığı analiz edilmiştir. Çoğu model, atığın merkezine odaklanmakla birlikte, bazı örneklerde çevresel öğelere de dikkate aldığı

görülmüştür. Bu durum, modelin dikkat mekanizmasının sadece nesneye değil, nesnenin konumlandığı bağlama da duyarlı olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, yapılan tüm deneyler, *RealWaste* veri setinin gerçek dünya koşullarını başarıyla temsil ettiğini ve derin öğrenme mimarilerinin bu tür karmaşık sınıflandırma görevlerinde etkili çözümler sunabildiğini ortaya koymuştur. Her modelin kendi içinde sunduğu avantajlar, kullanım senaryosuna bağlı olarak farklı öncelikler doğrultusunda değerlendirilmelidir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, yalnızca akademik bir değerlendirme değil, aynı zamanda pratik uygulamalara ışık tutacak nitelikte sonuçlar sağlamaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, sahadan elde edilen gerçek görüntüler içeren *RealWaste* veri seti kullanılarak, 15 farklı önceden eğitilmiş derin öğrenme modeli karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, çeşitli atık türlerinin görsel özelliklerine dayanarak ne ölçüde başarılı bir şekilde sınıflandırılabilceğini ve bu bağlamda hangi mimarilerin öne çıktığını ortaya koymaktır. Uygulanan tüm modeller transfer öğrenme yaklaşımı ile eğitilmiş, sonuçlar eğitim-doğrulama grafiklerinin takibi, sınıf bazlı performans metrikleri, karışıklık matrisleri ve Grad-CAM görselleştirmeleri gibi çok boyutlu yöntemlerle analiz edilmiştir.

Modeller arasında DenseNet201, EfficientNetB2 ve Xception, test ve validation doğruluk oranları ile genel sınıflandırma başarılarında ön plana çıkmıştır. Özellikle DenseNet201 modeli hem doğruluk açısından hem de görsel dikkat haritalarının (Grad-CAM) hedef odaklı yapısı bakımından en güvenilir sonuçları vermiştir. Bu durum, modelin sınıflar arası benzerlik içeren görsellerde dahi ayırt edici örüntüleri doğru tespit edebilme kapasitesinden kaynaklanmaktadır. Öte yandan, VGG19, ResNet101 ve MobileNetV2 gibi modellerde doğruluk seviyeleri görece daha düşük kalmış, özellikle görsel çeşitliliği yüksek sınıflarda sınırlı başarı elde edilmiştir.

Sınıf bazında incelendiğinde, “Cam Atıklar”, “Plastik Atıklar” ve “Metal Atıklar” gibi görsel açıdan ayırt edici atık türlerinin başarıyla sınıflandırıldığı; buna karşın “Karışık Atıklar” ve “Tekstil Atıklar” gibi sınıflarda modellerin zaman zaman hatalı tahminlerde bulunduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, veri setindeki örneklerin sınıf içi tutarsızlığından ve sınıf sayılarının dengesizliğinden kaynaklanmaktadır.

Veri setinin hacminin ve çeşitliliğinin artırılması, derin öğrenme modellerinin genelleme yeteneklerini önemli ölçüde artırabilir. Farklı çevresel koşullarda ve değişken ışıklandırma altında elde edilen daha fazla örnek, modelin çeşitli senaryolarda daha tutarlı sonuçlar vermesini sağlayacaktır. Öte yandan, donanım kısıtlarının bulunduğu gömülü sistemlerde model sıkıştırma (pruning) ve kuantizasyon gibi yöntemler kullanılarak daha hafif, hızlı ve verimli modeller geliştirilebilir. Bu sayede sınırlı kaynaklara sahip cihazlarda bile etkin sınıflandırma yapılması mümkün olacaktır. Gelecekte, bu sistemin mobil cihazlara entegre edilerek gerçek zamanlı atık tanıma uygulamaları biçiminde kullanıcılara sunulması, çevresel farkındalığın artırılması açısından büyük katkı sağlayabilir. Ayrıca, modelin yalnızca görüntü temelli değil; sıcaklık, ağırlık, konum gibi sensör verileri ya da kullanıcıdan alınan ek bilgilerle desteklenmesi, sınıflandırma performansını daha da iyileştirecek ve sistemin doğruluk oranını artıracaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. A. Kazaure and H. Kabir, “Global waste crisis: Causes and consequences,” *Environmental Sustainability Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 115–124, 2021.
- [2] J. R. Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox, T. R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, and K. L. Law, “Plastic waste inputs from land into the ocean,” *Science*, vol. 347, no. 6223, pp. 768–771, 2015.
- [3] M. Ilyas and M. Sadiq, “An overview of municipal solid waste management in emerging countries,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 265, p. 121610, 2020.
- [4] S. Pahl, K. J. Wyles, and R. C. Thompson, “Can the arts help to deliver sustainable messages?,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 371, no. 1701, p. 20160367, 2017.
- [5] M. Önder, N. Daldal, K. Polat, and M. U. Doğan, “Internet of thing-based hand tremor monitoring system and automated detection of hand tremor frequency,” *Computers and Electrical Engineering*, vol. 122, 2025.
- [6] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, “Deep learning,” *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444, 2015.
- [7] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, “ImageNet classification with deep convolutional neural networks,” *Communications of the ACM*, vol. 60, no. 6, pp. 84–90, 2017.

- [8] S. J. Pan and Q. Yang, "A survey on transfer learning," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 22, no. 10, pp. 1345–1359, 2010.
- [9] A. Adadi and M. Berrada, "Peeking inside the black-box: A survey on explainable artificial intelligence (XAI)," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 52138–52160, 2018.
- [10] H. Al-Mashhadani, "Waste classification based on deep learning algorithms," *Journal of Intelligent Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 321–332, 2023. doi: 10.1515/jisys-2023-0064
- [11] A. A. Younis and A. A. Obaid, "Intelligent waste classification using EfficientNet based deep learning," *IJACSA*, vol. 15, no. 11, pp. 486–492, 2024.
- [12] R. Qiu, Y. Zhou, J. Wang, and Y. Li, "Real-time waste classification using EfficientNetV2," arXiv preprint, arXiv:2503.21208, 2025.
- [13] B. Yalçın, Z. Cebeci, and R. Altioklar, "Deep learning-based waste classification system using RealWaste dataset," *Information*, vol. 14, no. 12, p. 633, 2023.
- [14] A. Kunwar, N. Gupta, and S. Sharma, "Intelligent plastic waste classification using YOLO-11m," arXiv preprint, arXiv:2412.20232, 2024.
- [15] S. Narayan, "DeepWaste: A mobile app for real-time waste classification using deep learning," arXiv preprint, arXiv:2101.05960, 2021.
- [16] R. R. Selvaraju et al., "Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization," in *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis.*, 2017, pp. 618–626.
- [17] M. Mazlounian, N. Amini, and M. Derakhshan, "Food waste detection and classification using CNNs," arXiv preprint, arXiv:2002.03786, 2020.
- [18] J. Guo, Y. Xu, and H. Wu, "Waste image classification using superpixel and deep convolutional neural networks," *IJCRT*, vol. 8, no. 6, pp. 1856–1862, 2020.
- [19] V. Badrinarayanan, A. Kendall, and R. Cipolla, "SegNet: A deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation," *IEEE TPAMI*, vol. 39, no. 12, pp. 2481–2495, 2017.
- [20] A. A. Alade, O. O. Jegede, and O. A. Fakorede, "Deep learning in waste management: A brief survey," *Int. J. Comput. Anal. Strategy Tech.*, vol. 14, no. 2, pp. 101–116, 2024.
- [21] M. Tan and Q. V. Le, "EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks," in *Proc. ICML*, 2019, pp. 6105–6114.
- [22] K. Simonyan and A. Zisserman, "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition," arXiv preprint, arXiv:1409.1556, 2014.
- [23] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, "Deep residual learning for image recognition," in *Proc. IEEE CVPR*, 2016, pp. 770–778.
- [24] C. Shorten and T. M. Khoshgoftaar, "A survey on image data augmentation for deep learning," *Journal of Big Data*, vol. 6, no. 1, pp. 1–48, 2019.
- [25] S. Single, S. Iranmanesh, and R. Raad, "Realwaste: A novel real-life data set for landfill waste classification using deep learning," *Information*, vol. 14, no. 12, p. 633, 2023. doi: 10.3390/info14120633



Android İşletim Sistemine Sahip Cihazdan Elde Edilen Logcat Kayıtlarının Adli Bilişim Açısından Değerlendirilmesi



Müge Begüm DÖNMEZ^{*,a}



İbrahim Alper DOĞRU^a

^a Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, ANKARA, 06500, TÜRKİYE

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 17.09.2025
Kabul: 15.12.2025

Anahtar Kelimeler:

Mobil Adli Bilişim,
Mobil Adli Analiz,
Günlük Kaydı
*Sorumlu Yazar
e-posta:
mbd.dnmez@yandex.com

ÖZET

Günümüzde mobil cihazlar, çoklu bağlantı özellikleri, yoğun kullanım oranları ve barındırdıkları zengin veri çeşitliliği nedeniyle adli bilişim süreçlerinde önemli bir delil kaynağı haline gelmiştir. Android işletim sistemlerinde yer alan Logcat, cihazın sistem, uygulama ve kullanıcı aktivitelerini tutan bir kayıt mekanizmasıdır. Bu kayıtlar, cihaz üzerinde hangi işlemlerin ne zaman ve nasıl gerçekteştiği bilgisini vererek, olayların dijital izlerinin tespit edilmesinde kritik bir rol oynar. Araştırma, Android işletim sistemine sahip bir OPPO A5S cihazından elde edilen Logcat kayıtlarının adli bilişim açısından analizini konu almaktadır. Araştırmacı tarafından oluşturulan senaryolar sonucunda elde edilen loglar üzerinden kullanıcının Wi-Fi bağlantıları, internet tarayıcı geçmişi, Google Haritalar sorgulamaları ve kamera servisleriyle ilişkili faaliyetler incelenmiştir. Bulgular, Logcat çıktılarında doğrudan parola veya desen kilidi gibi kişisel veriler yer almasa da, gerçekteştirilen tüm eylemlerin doğru şekilde tespit edilebildiğini göstermektedir. Sonuç olarak, Logcat verileri yalnızca teknik kayıtlar sunmakla kalmayıp; dijital olayların kronolojik sıralamasını oluşturma, kullanıcı davranışlarını anlamlandırma ve beyanların doğruluğunu test etme açısından da adli bilişim uzmanlarına güçlü bir destek sağlamaktadır. Bu yönüyle Logcat, mobil cihaz incelemelerinde etkili ve tamamlayıcı bir adli bilişim aracı olarak değerlendirilebilir.

DOI: 10.59940/jismar.1786182

Evaluation of Logcat Records Extracted from Android-Based Devices in Terms of Digital Forensics

ARTICLE INFO

Received: 17.09.2025
Accepted: 15.12.2025

Keywords:

Mobile Digital Forensic,
Mobile Digital Analysis,
Log Record

*Corresponding Authors

e-mail:
mbd.dnmez@yandex.com

ABSTRACT

Today, mobile devices have become an important source of evidence in forensic investigations due to their multi-connectivity features, high usage rates, and the rich variety of data they contain. In Android operating systems, Logcat is a logging mechanism that records system, application, and user activities. These records provide information about what operations occurred on the device, when, and how, thus playing a critical role in identifying the digital traces of events. This study focuses on the forensic analysis of Logcat records obtained from an Android-based OPPO A5S device. Based on scenarios created by the researcher, the logs were examined to analyze user activities such as Wi-Fi connections, web browsing history, Google Maps queries, and camera-related actions. The findings indicate that although Logcat outputs do not contain personal data such as passwords or pattern locks, all actions performed during the scenarios were accurately detected. In conclusion, Logcat data not only provide technical records but also offer strong support to forensic experts in reconstructing the chronological sequence of digital events, interpreting user behavior, and verifying the accuracy of statements. In this respect, Logcat can be considered an effective and complementary digital forensic tool in mobile device examinations.

DOI: 10.59940/jismar.1786182

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde mobil cihazlar, bireylerin kişisel ve kurumsal verilerinin işlem gördüğü, depolandığı dijital bir araç haline gelmiştir. Mobil cihazların yaygın kullanımı, mobil cihaz üreticilerine sektörde pazar payı kazanma amacına yönelik kullanıcıların taleplerini gerçekleştirmek için büyük bir rekabet alanı oluşturmuştur. Mobil cihazların kolay erişilebilirliği, taşınabilirliği ve kullanıcı dostu yapıları, bu teknolojilerin hızla yaygınlaşmasına neden olmuştur.

Yapılan araştırmalar mobil cihaz sayılarının dünya nüfusunun neredeyse iki katına ulaşabileceğini öngörmektedir [1]. Mobil cihazlara ait işletim sistemleri ele alındığında ise, dünya genelinde kullanılan mobil cihazların %42.9'u Android iken, %16.82'si iOS olarak belirlenmiştir; Türkiye'de ise bu durum %58.72 Android, %19.04 iOS olarak tespit edilmiştir [2-3]. Türkiye özelinde ve dünya genelinde Android işletim sistemine sahip cihazların tercih ediliyor olmasının sebebi, bu işletim sistemine sahip cihazların geniş fiyat aralıklarında sunulması, farklı marka ve modellerle çeşitlilik göstermesi olarak düşünülebilir. Araştırmada Android işletim sistemine sahip cihazın tercih edilmesinin sebebi ise Android işletim sisteminin Dünya genelinde ve Türkiye özelindeki yaygın kullanımıdır.

Mobil cihazların yaygınlaşması, verilerin büyük oranda bu cihazlar üzerinden dijital ortamlarda depolanmasına neden olmakta ve bu durum, mobil cihazların adli süreçlerde kritik bir konuma yerleşmesini kaçınılmaz kılmaktadır.

Adli bilişim perspektifinden bakıldığında, mobil cihazların kullanıcılar tarafından sürekli kullanılması, bu cihazların suça tanıklık etmesi veya suça karışması açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Ancak belirtmek gerekir ki; mobil cihazlarda yapılan her işlem işletim sistemi tarafından kaydedilmekte ve bu kayıtlar delil değeri taşımaktadır. Bu kayıtlar "log" olarak adlandırılmakta olup, ilerleyen bölümlerde ayrıntılı biçimde açıklanacaktır.

Tüm bu değerlendirmelerden hareketle; araştırmanın temel amacı, Android işletim sistemine sahip cihazda (OPPO A5s) logcat çıktıları üzerinden, Adli bilişim açısından kritik olabilecek verileri belirleyip, uygulanan senaryolardaki hallerinin doğruluğunu tespit etmektir. Araştırma sadece Android işletim sistemine sahip OPPO A5s cihaz üzerinde gerçekleştirilmiştir. Analiz edilen log türleri sadece seçilen senaryolarla sınırlandırılmıştır. Araştırma süresince, logcat çıktıları değerlendirilmiştir; fiziksel bellek imajı veya harici yazılım kullanımı kapsam dışındadır. Android logcat ile günlük işlemlerin kaydedilmesi mevcutta

kullanılan bir sistemdir ancak burada tespit edilmek istenilen esas nokta, oluşturulan senaryolardaki hedeflenen verilerin bu sisteme doğru bir şekilde kaydedilip kaydedilmediğini belirlemektir. Böylelikle Logcat kayıtlarının adli süreçlerde kullanılabilirliğinin tespiti mümkün olacaktır.

Araştırma aşağıdaki soruları (Research Questions) cevaplandırmaktadır:

- RQ1: Adli bilişim açısından ele alındığında mobil bir cihazdan hangi önemli veriler elde edilebilir?
- RQ2: Android işletim sistemine sahip bir cihazda Logcat vasıtasıyla telefonda gerçekleştirilen günlük işlemler (telefonu açma-kapatma, ana ekrana girme) tespit edilebilir mi?
- RQ3: Android işletim sistemine sahip bir cihazda Logcat vasıtasıyla Kamera servisleri işlemleri tespit edilebilir mi?
- RQ4: Android işletim sistemine sahip bir cihazda Logcat vasıtasıyla Bluetooth İşlemleri (Bluetooth ile bağlantı kurma, Bluetooth ile dosya aktarımı) tespit edilebilir mi?
- RQ5: Android işletim sistemine sahip bir cihazda Logcat vasıtasıyla Ses Kaydı işlemleri tespit edilebilir mi?
- RQ6: Android işletim sistemine sahip bir cihazda Logcat vasıtasıyla Wi-Fi bağlantısı kurma işlemi tespit edilebilir mi?
- RQ7: Android işletim sistemine sahip bir cihazda Logcat vasıtasıyla Web gezintisi işlemi tespit edilebilir mi?
- RQ8: Android işletim sistemine sahip bir cihazda Logcat vasıtasıyla Harita uygulaması işlemleri tespit edilebilir mi?

Araştırmanın genel ilerleyişi aşağıda verildiği şekildedir:

Araştırmaya yönelik genel bilgilerin yer aldığı 1. Giriş bölümü, ilgili araştırmaların yer aldığı 2. bölüm, araştırmada kullanılan ekipmanların, uygulama sürecinin ayrıntılı olarak ele alındığı 3. Yöntem bölümü, uygulama sonucunda elde edilen bulguların yer aldığı 4. Bulgular bölümü, araştırmaya yönelik bulguların mevcut araştırmalarla karşılaştırıldığı 5. Tartışma bölümü, nihai değerlendirmenin yapıldığı sonuç bölümü ve gelecekteki araştırmalara yönelik önerilerin verildiği 6. Sonuç bölümü ile araştırma tamamlanmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE ve İLGİLİ ARAŞTIRMALAR (CONCEPTUAL FRAMEWORK AND RELATED WORKS)

2.1 Günlük Kaydı (Log Record)

Mobil cihazlarda gerçekleştirilen her işlemin kaydedilmesi durumunda, çıktı olarak elde edilen kayıtlar log olarak adlandırılmıştır. İşletim sistemi veya uygulama yazılımları, alınan hata veya sorunlar gibi belirli olayları günlük adı altında kayda alır; her olay için bir mesaj, yani bir log kaydı oluşturulur [4]. Log[5], bilişim personelleri tarafından, bilgi sistemlerinde tespit edilen olayın ne şekilde gerçekleştiği (Nasıl, ne zaman ...vb.) sorularına cevap verebilecek kayıt olarak tanımlanmıştır.

2.2 Log Kayıtlarının Önemi (The Importance of Log Records)

Gerçekleştirilen her işlemin log kaydının bulunması, suç soruşturmasının seyrini değiştirecek güce sahiptir; çünkü log kayıtları taraf beyanlarını doğrulayacak ya da tersini ispat edebilecek kayıtlardır. Bunun yanı sıra, Log dosyaları dijital delil niteliğine sahip olmaları sebebiyle adli bilişim açısından önem taşımaktadırlar, ek olarak log dosyalarının bütünlüğünün sağlanması delil güvenilirliği açısından çok önemlidir [6].

2.3 Log Kaydı Kullanım Amaçları (Purposes of Using Log Records)

Log kayıtları ile;

- işlemi gerçekleştiren kişi
- yetkisiz erişimler
- anormal işlemler
- sistemlerdeki olası sorunlar

belirlenebilir [6].

2.4 Android İşletim Sistemi Log Kayıtları (Log Records of the Android Operating System)

Android Studio'daki Logcat kayıtları, uygulamalardaki hataları ayıklanmasına olanak tanımaktadır. Bu kayıtlar, cihazdaki günlüklerin görüntülenmesini eş zamanlı olarak sağlamaktadır [7]. Uygulama yazılım geliştiricileri tarafından sistemdeki hataları ayıklamak için kullanılan Logcat kayıtlarının adli bilişim açısından kullanılabilirliğinin test edilmesine yönelik araştırmanın olmayışı araştırmanın motivasyon noktasını oluşturmaktadır.

2.5 Log Kayıtları Üzerinde Çalışmanın Zorluğu (Challenges in Working with Log Records)

- Cihazlarda yapılan en küçük bir işlem bile (örneğin mobil cihazın ekranının kapanması için ekrana dokunma, ama kapatma vb. gibi) birçok sayıda logun üretilmesine sebep olmaktadır; bu sebeple loglar üzerinde manuel çalışmak zaman alıcı ve uğraştırıcı bir iştir[8].
- Log verileri içerisinde anlamlı ve istenen bilgiyi bulmak uğraştırıcı ve zaman alıcı bir işlemdir; çünkü aranan bilginin dışında log çıktısı içerisinde istenmeyen veya gereksiz bilgiler bulunmaktadır.
- Farklı marka ve modeldeki mobil cihazlar, logcat kayıtlarında yapısal farklılıklar oluşturarak standartlaşmayı güçleştirmektedir.
- Mobil cihazın tarih ayarının doğru olmaması, olaya yönelik oluşturulacak zaman haritalamasının yapılmasını zorlaştırır.
- Log dosyalarının yapısal olarak değişken olması, adli süreçte güvenilirliğini azaltır. Log verilerinin inceleme ve analiz sürecinin başında ve sonunda hash değerlerinin hesaplanması gerekmektedir.

2.6 Adli Bilişim Açısından Log Kayıtları (Log Records in the Context of Digital Forensics)

Sistemde tespit edilen hataları çözmek için kullanılmalarının dışında, özellikle bir bilişim suçunun ortaya çıkartılmasında işletim sistemi tarafından tutulan kayıtlar büyük önem taşımaktadır. Log Kayıtları tutuldukları cihazların işletim sistemlerine göre farklılık göstermektedir [9].

2.7 İlgili Araştırmalar (Related Works)Tablo1. Literatür Araştırmalarına Ait Genel Bilgiler
(General Information About Literature Reviews)

Yazar(lar) ve Yıl	Yayın Adı	Yayınlanma Yeri
Horsman, G., Conniss, L.R. 2015	Investigating evidence of mobile phone usage by drivers in road traffic accidents	Digital Investigation
Y. Shin, S. Kim, W. Jo, and T. Shon, 2022	Digital forensic case studies for in-vehicle infotainment systems using Android Auto and Apple CarPlay	Sensors
J. Bellizzi, M. Vella, C. Colombo, and J. C. Hernandez-Castro, 2023	Using infrastructure-based agents to enhance forensic logging of third-party applications	Proc. ICISSP
Jung, J., Han, S., Park, M., Cho, S.J.2024	Automotive digital forensics through data and log analysis of vehicle diagnosis Android apps	Forensic Science International: Digital Investigation
Patel, P. C., et al., 2024	A forensic perspective on the use of event viewer for detecting malicious activities and ensuring system integrity	Journal of Visual and Performing Arts
J. H. Lee, S. H. Lim, B. Hyeon, O. Y. Jeon, J. J. Park, and N. I. Park, 2024	Tesla log data analysis approach from a digital forensics perspective	World Electr. Veh. J.
J. A. Bessa, R. Miranda Filho, G. Souza, R. Barreto, and R. de Freitas, 2025	Log parsers' performance on raw logs from Android devices	J. Internet Serv. Appl.
Olegård, J., Axelsson, S., & Li, Y., 2025	When is logging sufficient?—Tracking event causality for improved forensic analysis and correlation	Forensic Science 20International: Digital Investigation
S. Pavani, L. S. Naga, N. Manoja ve E. Karthik, 2025	An integrated forensic logger for Android devices: Multisource user activity reconstruction	Int. Res. J. Modernization Eng. Technol. Sci.
S. Jadhav, K. Kondhare, S. Mulik, J. Panchal, and M. Kale, 2025	Implementation and Evaluation of an Automated Android Log Extraction Tool for Digital Forensics	Int. J. Adv. Res. Sci. Commun. Technol.
S. Cho, H. Seong, H. Kang, S. J. Cho, and B. Kang, 2025	Forensic investigation of vehicle-related data in Android phones connected to In-Vehicle Infotainment systems	Computer Networks

Log verileri ile gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, bu alandaki araştırmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Türkiye özelinde yapılan bazı çalışmalar, örneğin bir araştırma[10], log verilerini derin öğrenme tabanlı algoritmalarla analiz ederek ağ trafiği kayıtları üzerinden kötü amaçlı yazılım tespiti yapmaktadır. Benzer şekilde bir araştırma[11], sistem logları üzerinden kötü amaçlı yazılım tespiti gerçekleştirmiş, bir diğer araştırma[12] ise; mobil Android uygulamalarına ait logları toplayarak IoMT ve sağlık uygulamalarında güvenlik analizleri yapmıştır. Ancak, mevcut yerel çalışmalar mobil cihaz loglarına odaklanmamış, uluslararası çalışmalarda da mobil log verilerinin kullanıldığı örnekler sınırlı sayıdadır. Özellikle Android logcat verileri üzerinde çalışan araştırmalar çok azdır ve bu çalışmalarda logcat kayıtlarının doğruluğunun tespiti genellikle göz ardı edilmiştir.

Tüm bu değerlendirmelerden hareketle literatürdeki bu boşluğu gidermek, logcat verilerinin doğruluğunu sistematik olarak değerlendirmek ve adli bilişim açısından anlamlı, nitelikli verilerin elde edilebilmesini sağlamak araştırmacının motivasyonunu oluşturmaktadır. Böylece logcat verilerinin olaya yönelik zaman çizelgesi oluşturma, kullanıcı davranışlarını anlamlandırma gibi süreçlerde güvenilir bir şekilde kullanılabilirliğini test etme araştırmacının odak noktasıdır.

Aşağıda, uluslararası literatürde log verilerinin özellikle adli bilişim bağlamında kullanım potansiyelini ortaya koyan çalışmalar sunulmaktadır. Seçim kriteri olarak, çalışmaların cihaz loglarını incelemesi, adli analiz ve dijital delil üretimi süreçlerine katkı sağlaması ile log verilerinin olay çözümleme ve kullanıcı davranışı analizi gibi uygulamalarda kullanım potansiyelini ortaya koyması dikkate alınmıştır.

Motorlu taşıt kazalarını sürücülerin mobil cihaz kullanımı ile ilişkilendiren araştırmada [13] iPhone CurrentPowerlog.powerlogsystem dosyaları ve Android buffer logları ile veriler incelenmiş, cihazın kazadan önce veya kazı sırasında kullanımını belirlemeye yönelik kullanıcı etkileşimleri tespit edilmiştir. Bu veriler, çağrı ve mesaj kayıtlarının sürücünün cihazla etkileşimini ortaya koyarak kazaya olası katkıların değerlendirilmesine imkân sağlamaktadır ve mobil cihaz loglarının adli bilişim açısından değerlendirilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Bir diğer araştırmada[14], Android Auto ve Apple CarPlay tabanlı araç içi bilgi-eğlence (IVI) sistemlerinin adli bilişim açısından incelenmesini hedeflemektedir. Araştırmada, araç ve mobil cihaz arasındaki bağlantılardan elde edilen log kayıtları analiz edilerek bağlantı zamanları, araç bilgileri ve

kullanıcı etkileşimleri gibi kritik veriler tespit edilmiştir. Bulgular, özellikle kablosuz iletişimdeki şifreleme protokollerinin analizi zorlaştırdığını, ancak bu sistemlerin çeşitli olaylarda örneğin; trafik kazaları, sahtekârlık gibi olaylarda önemli dijital delil niteliği taşıyabileceğini göstermektedir.

Üçüncü taraf Android uygulamaları için adli kayıt ajanları geliştirmeyi amaçlayan araştırmada [15], mevcut uygulama tabanlı ajanların yüksek bakım maliyetleri ve sürüm bağımlılığı sorunlarına çözüm olunması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, Android uygulamalarında yaygın olarak kullanılan SQLite veri yönetim altyapısı temel alınarak, adli kayıt ajanları tasarlanmıştır. Çalışmada statik analiz ve tersine mühendislik teknikleriyle Signal, WhatsApp ve Telegram gibi popüler mesajlaşma uygulamaları incelenmiş; bu uygulamalarda SQLite tabanlı ajanların veri doğruluğunu koruduğu görülmüştür. Elde edilen bulgular ışığında çalışma, mobil adli bilişim alanında uygulama bağımlılığını azaltan, yeniden kullanılabilir ve sürdürülebilir bir loglama çözümü önererek, dijital delillerin güvenilirliğini ve bütünlüğünü artıran önemli bir katkı sağlamaktadır.

Araştırmada[16], Windows Event Viewer (Olay Görüntüleyicisi) kayıtlarının kötü amaçlı faaliyetlerin tespiti ve sistem bütünlüğünün korunması açısından adli bilişim süreçlerinde daha etkin kullanılmasını amaçlamaktadır. Çalışmada, Event Viewer loglarının olay-korelasyon temelli analizi gerçekleştirilmiştir. Bulgular, XML tabanlı yapılandırmanın logların doğrulanabilirliğini, sorgulanabilirliğini ve adli delil niteliğini artırdığını göstermiştir. Uygulama loglarının kronolojik olarak ilişkilendirilmesi sayesinde giriş denemeleri, sistem kapanışları, hata kayıtları ve potansiyel kötü amaçlı etkinliklerin yüksek doğrulukla izlenebildiği görülmüştür. Çalışma, Event Viewer loglarının yalnızca sistem izleme aracı olarak değil, aynı zamanda adli analiz süreçlerinde yapılandırılmış bir veri kaynağı olarak kullanılabileceğini göstermekte ve adli bilişim için tekrarlanabilir, bütünlük odaklı bir log analiz metodolojisi önermektedir.

Bir diğer araştırma[17], modern araçlarda bulunan elektronik kontrol üniteleri (ECU'lar), OBD sistemleri ve bilgi-eğlence sistemleri gibi elektronik cihazların ürettiği verilerin adli bilişim açısından önemini ele almaktadır. Araştırmada, Bluetooth üzerinden araç OBD-II portuna bağlanan bir Android telefonda üç farklı veri türü toplanmış ve analiz edilmiştir. Elde edilen veriler Bluetooth bağlantı süreleri, araç bilgileri, OBD-II cihazının MAC adresi, araç hızı, ani hızlanma ve frenleme olayları ile yakıt dolum bilgileridir.

Tesla gibi yazılım tanımlı araçların (SDV) [18] kaydettiği farklı logların adli bilişim açısından değerlendirilmesini amaçlayan araştırmada ise, araç içi logların adli delil olarak bağımsız doğrulama sağladığını ve yazılım tanımlı araçların veri zenginliği ve sürüm bağımlılığı açılarından adli bilişimde fırsat ve zorluk sunduğunu vurgulamaktadır. Çalışma, araç içi eMMC ve autopilot sisteminin daha derin analizinin ileri araştırmalar için önemli olduğunu göstermektedir.

Araştırma[19], Android cihazlardan elde edilen ham log verilerinin analizini ve log ayrıştırma araçlarının etkinliğini incelemeyi amaçlamıştır. Araştırmada, 10 farklı ayrıştırma aracı (AEL, Brain, Drain, LFA, LogCluster, Logram, NuLog, SHISO, SLCT, ULP) karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bulgular, ön işleme yapılmamış ham logların, mevcutta kullanılan araçlar tarafından işlenmesinin performans konusunda sınırlı olduğunu göstermektedir; bazı araçlar belirli log türlerinde yüksek doğruluk sağlasa da genel performansta dalgalanmalar söz konusudur. Adli bilişim bağlamında, çalışma Android loglarının dijital delil olarak önemini vurgulamıştır. Ham log dosyalarının düzensiz yapısı, delil toplama ve analiz süreçlerini zorlaştırırken, performansı yüksek araçlar ve uygun ön işleme yöntemleri, adli analizlerde daha güvenilir ve verimli sonuçlar elde edilmesini sağlar çıkarımında bulunulmuştur. Çalışma log analizi ile veri madenciliği ve makine öğrenimi tekniklerinin entegrasyonunun, dijital delillerden daha derin ve anlamlı bilgiler çıkarılmasına katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, araştırma, log dosyalarının adli bilişimde etkin kullanımını destekleyecek araç ve yöntemlerin geliştirilmesine temel sağlamaktadır.

Araştırmada[20], adli bilişim bağlamında log kayıtlarının yeterliliği incelenmiştir. Araştırmada, gretel numaraları adı verilen yeni bir yöntem geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu yöntem, her log kaydına benzersiz bir kimlik (ID) atayarak, olaylar arasındaki nedensellik ilişkilerini takip etmeyi mümkün kılmaktadır. Prototip sistem Extended Berkeley Packet Filter (EBPF) ve bir Nginx web sunucusu kullanılarak test edilmiş, etkinliğinin yüksek olduğu ve kaynak kullanımının minimal seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Log boyutlarının artması, sistem üzerinde ek yük oluşturmaya rağmen, adli araştırmaların doğruluk ve güvenilirliğini artıran bir avantaj sağlamaktadır. Araştırma bulguları, loglara eklenen nedensellik bilgisinin olaylar arasındaki bağlamı kolaylaştırdığı ve adli analizlerde hızlı ve doğru bilgi sağladığını, Gretel numaralarının log manipülasyonlarını tespit ederek dijital delillerin güvenilirliğini artırdığını ve log boyutlarındaki artışın sistem kaynakları açısından bir maliyet oluştursa da siber güvenlik ve bilişim açısından kabul edilebilir

olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışma loglama tasarımı nedensellik bilgisinin önemini vurgulamış ve adli bilişim suç araştırmalarında daha planlı, güvenilir ve etkili bir veri toplama süreci için temel sağlamaktadır.

Araştırma[21], Android mobil cihazlardan kullanıcı etkinliklerini çıkarmak ve analiz etmek amacıyla geliştirilmiş Forensic Activity Logger adlı bir adli araç üzerine odaklanmaktadır. Araç, Android cihazlardan verileri yalnızca okunabilir modda çıkararak, yapılandırılmış ayrıştırma ve emanet zinciri koruması sağlamaktadır. Veri toplama süreci sonrasında elde edilen veriler, zaman damgalarına göre sıralanarak, kullanıcı etkinliklerinin bütünsel bir zaman çizelgesi oluşturulmuştur. Araştırmada odaklanılan Forensic Activity Logger aracı ile mobil adli bilişimde mevcut araçların sunduğu sınırlı analiz imkanı aşılmış, daha kapsamlı, bir veri toplama ve analiz süreci sunulmuştur.

Bir diğer araştırmada[22], Android cihazlardan adli log verisi toplama sürecini otomatikleştirmeyi ve basitleştirmeyi amaçlayan bir aracın tasarımı, uygulanması ve değerlendirmesi ele alınmıştır.

Araştırmanın sunduğu araç sayesinde otomasyon, soruşturma süresini kısaltmış, teknik uzmanlığı olmayan kullanıcıların da log toplamasını mümkün kılmış, dijital delil sunumu ve dokümantasyonu kolaylaştırmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma, Android cihazlardan log çıkarma sürecini hızlandıran, doğruluk ve adli bütünlüğü güvence altına alan, tekrarlanabilir ve kullanıcı dostu bir yöntem sunarak adli bilişime pratik bir katkı sağlamıştır.

Son olarak Android işletim sistemine sahip mobil cihazların araç In-Vehicle Infotainment (IVI) sistemleri ile bluetooth üzerinden etkileşiminin araç olaylarına dair dijital deliller üzerindeki etkisini inceleyen araştırmada [23], Android log mesajları ve Bluetooth logları analiz edilerek bağlı aracın MAC adresi, araç bilgileri, bağlantı zamanları ve telefon çağrı geçmişi gibi deliller tespit edilmiş ve sürücünün eylemlerini gösteren bir zaman çizelgesi oluşturulmuştur.

Araştırmanın Literatüre Katkısı

Karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, literatürdeki makalelerde öne çıkan temalar şunlardır:

- Makalelerin tamamı, kullanıcı etkinliklerini detaylı şekilde kaydetme kapasitesi sayesinde Android loglarının adli araştırmalarda kritik bir kaynak olabileceğini göstermektedir.

- Geleneksel ADB/Logcat veya SMS/çağrı kayıtlarına dayalı yöntemlerin zaman alıcı ve riskli olduğu vurgulanmıştır.
- Hash değer hesaplama ve delil zincirinin korunması, logların mahkemede geçerliliğini ve güvenilirliğini artırmaktadır.
- Loglar, kullanıcı davranışlarının zaman bağlamında anlamlandırılması, olay örüntüsü tespiti açısından kritik öneme sahiptir.

Verilen tüm değerlendirmeler doğrultusunda, bu çalışma literatüre, logcat çıktılarının olay bağlamında sistematik olarak değerlendirilmesi ve doğruluğunun senaryolar aracılığıyla test edilmesi açısından katkı sağlamaktadır. Araştırma, mobil cihaz loglarının adli soruşturmalar bağlamında kullanılabilirliğinin ispatı açısından önem arz etmekte ve literatürdeki mevcut boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

3. YÖNTEM (METHODOLOGY)

Araştırmada, Android işletim sistemine sahip, OPPO A5S cihazı üzerinde, sistemsel davranışları yansıtan **logcat verileri** toplanmış ve anahtar kelime filtreleme ile veriler filtrelenmiş ardından analiz edilmiştir. Veriler, araştırmacı tarafından 2 günlük zaman dilimi içerisinde, oluşturulan senaryoların uygulanmasıyla elde edilmiştir. Log verilerinin elde edilememesi gibi durumların oluşmasını engellemek

3.1. Kullanılan Ekipmanlar (Equipment Used)

Tablo2. Kullanılan Ekipmanlar

(Equipment Used)

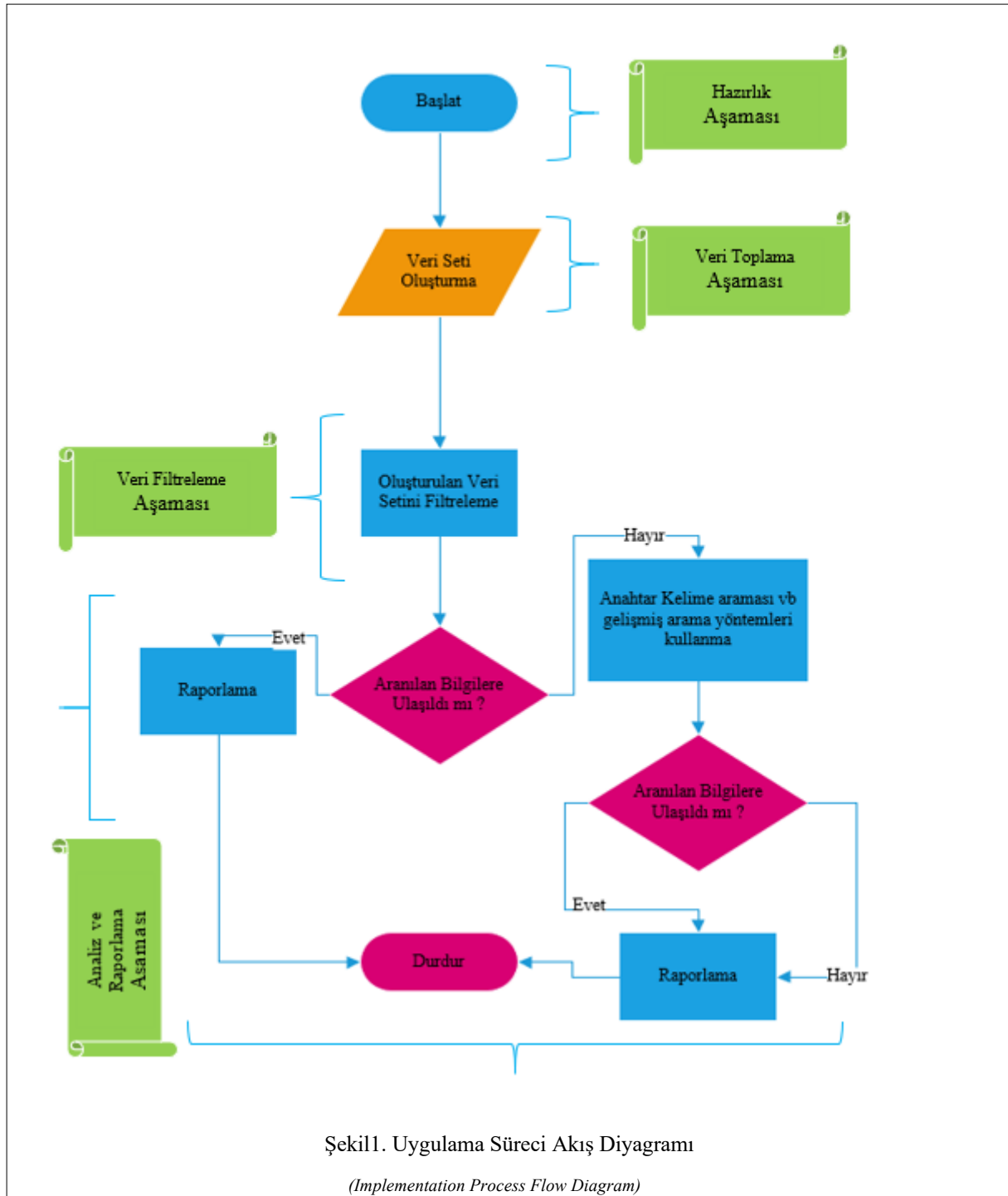
Ekipman	Açıklama
Mobil Cihaz	OPPO A5S
İş İstasyonu	Dell Latitude E7470
İşletim Sistemi	Android 8.1 (ColorOS)
Kullanılan Araçlar	ADB (Android Debug Bridge), CMD, Notepad++
Terminale Girilen Komutlar	adb devices, adb logcat, findstr

amacıyla oluşturulan logların tamamının text dosyasına (logcat2.txt) aktarılması sağlanmıştır. Senaryoların uygulanması yoluyla elde edilen verilerin toplam boyutu 11.9 MB, satır sayısı 103.973'tür. Bu değerler aslında mobil cihazlarda yapılan en ufak hareketlerin bile satırlarca log verisinin oluşmasına neden olduğunun kanıtıdır.

2 günlük log verilerinin toplanması sürecinde yer alan işlemler aşağıda verilmiştir:

- Günlük işlemler (telefonu açma-kapatma, ana ekrana girme)
- Kamera servisleri işlemleri (Kamerayı açma ve fotoğraf çekme, Fotoğrafi silme ve geri yükleme, fotoğrafı gizli albüme ekleme-fotoğrafi saklama, Galeriye girme ve fotoğrafı görüntüleme)
- Bluetooth İşlemleri (Bluetooth üzerinden dosya aktarımı)
- Ses Kaydı işlemleri (Ses kaydı başlatma)
- Wi-Fi bağlantısı kurma işlemi
- Web gezintisi işlemi (Google Chrome üzerinden arama yapma)
- Harita uygulaması işlemleri (Konum servislerini açma-kapatma, Google Maps üzerinden yol tarifi alma)

3.2. Uygulama Süreci (Application Process)



Araştırmanın uygulama süreci 5 aşamada gerçekleştirilmiştir. Aşağıda aşamalar hakkında genel bilgiler verilmiş, aşamalara yönelik detaylı bilgiler ilerleyen bölümde açıklanmıştır.

- **Hazırlık Aşaması:** Uygulama sürecinin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla, araştırma ekosisteminin(İş

istasyonu, mobil cihaz, gereken araçların belirlenmesi, kurulumu vb.) oluşturulduğu aşamadır.

- **Veri Toplama Aşaması:** Araştırmacı tarafından oluşturulan senaryolar ile mobil cihaz üzerinde verilerin oluşturulduğu aşamadır.

- **Veri Filtreleme Aşaması:** adb logcat ile logcat kayıtlarının alınması ve findstr komutlarıyla filtreleme yapılan aşamadır. İstenilen verilere ulaşılamadığı durumda Python betiğiyle gelişmiş arama gerçekleştirilmiştir.
- **Analiz Aşaması:** Senaryolar sonucunda oluşturulan ve filtreleme aşaması sonucunda elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Araştırmacı tarafından oluşturulan verilerle filtreleme sonucu elde edilen verilerin karşılaştırılması sonucunda verilerin doğruluğu tespit edilmiştir.
- **Raporlama Aşaması:** Analiz aşamasında elde edilen verilerin kayıt altına alındığı aşamadır.

3.2.1. Hazırlık aşaması (Preparation Phase)

Hazırlık aşamasında gerçekleştirilen adımlar aşağıda verilmiştir:

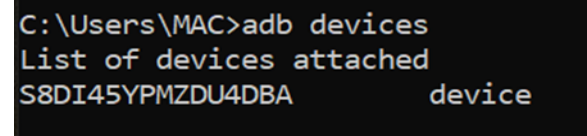
- Hazırlık aşamasının başlangıcında OPPO A5S cihazı, herhangi bir verinin önceden kalmasını engellemek amacıyla fabrika ayarlarına sıfırlanmıştır.
- İş istasyonu olan dizüstü bilgisayara ADB ve OPPO USB Sürücüsü yüklenmiştir.
- Mobil cihazda varsayılan ayarlarda gelen Buffer Boyutu 16 MB'a çıkarılmıştır, böylelikle telefonda oluşturulan verilerde logların silinme, ya da kaybolma olasılıkları engellenmiştir. Mevcut buffer boyutunu görebilmek için; terminale *adb logcat -g* komutu, Buffer boyutunu istenilen boyuta değiştirmek için *adb logcat -G 16M* komutu yazılmıştır.

- USB Hata Ayıklama (USB Debugging) modu android telefona yönelik verilere tam erişim için ön gereksinimdir.

Hata ayıklama modunun aktif olması için gerçekleştirilen adımlar aşağıda verilmiştir.

- Cihaz açılmış ardından; Ayarlar'a girilmiştir.
- Telefon Hakkında bölümüne Gidilmiş ardından "Yapım Numarası" (Build Number) üzerine arka arkaya 7 kez dokunulmuştur.
- "Artık bir geliştiricisiniz!" mesajı çıkmasının ardından Geliştirici Seçenekleri açılmıştır.
- Geliştirici seçeneklerinde yer alan "Ek Ayarlar" bölümüne girilmiştir.
- "Geliştirici Seçenekleri" üzerine tıklandığında USB Hata Ayıklama' yı Aktif Et'e basılmıştır. Anahtar yeşil konuma getirilerek işlemler tamamlanmıştır.

USB Hata ayıklama işlemi tamamlanmasının ardından önceden kurulmuş Android Debug Bridge (ADB) vasıtasıyla mobil cihaz bilgisayara USB ile bağlanmış ve terminale adb devices komutuyla tanıtılmıştır.



Şekil2. Mobil Cihaz Bilgisayar Bağlantısı Ekran Alıntısı

(Screenshot of Mobile Device to Computer Connection)

3.2.2. Veri toplama aşaması (Data Collection Phase)

Mobil cihazda veri seti oluşturabilmek için aşağıdaki senaryolar uygulanmıştır. 2 Günlük işlemlerden oluşan log veri seti hazırlanmıştır; bu günlük işlemler aşağıda yer almaktadır:

Tablo3. Senaryolar

(Scenarios)

İşlemler	Senaryolar	İşlem Zamanı
Kamera servisleri işlemleri	Kamerayı açma fotoğraf çekme,	06.06.2025 23:09
	Fotoğrafi silme ve geri yükleme,	06.06.2025 23:11
	Fotoğrafi gizli albüme ekleme	06.06.2025 23:13
Bluetooth İşlemleri	Bluetooth üzerinden dosya aktarımı	07.06.2025 17:20
Ses Kaydı işlemleri	Ses kaydı başlatma	07.06.2025 17:26
Wifi bağlantısı kurma işlemleri	Wifi bağlantısı kurma işlemi	07.06.2025 17:30
Web gezintisi işlemleri	Google Chrome üzerinden arama yapma	07.06.2025 17:29
Harita uygulaması işlemleri	Google Maps üzerinden yol tarifi	07.06.2025 17:31
Konum servisleri işlemleri	Konum servislerini açma-kapatma,	06.06.2025 23:15

`adb logcat -d > logcat-output2.txt` komutuyla 2 gün boyunca oluşturulan veriler `logcat-output2` adıyla bir text dosyasına kaydedilmiştir.

Text dosyasında veri kaybı yaşamamak ve delil bütünlüğünün korunması adına Hash değeri oluşturma işlemi gerçekleştirilmiştir (Bknz.Şekil3). Filtreleme işlemi gerçekleştirildikten sonra Hash değerleri karşılaştırılmış ve delilin bütünlüğünün korunduğu tespit edilmiştir.

İki günlük log veri seti hazırlanması sırasında başka işlemlerin olmaması için gerekli önlemler alınmıştır. Veri toplama sürecinde test cihazı **uçak moduna** alınmış ve **internet bağlantısı** kapatılmıştır; ayrıca **arka planda çalışan uygulamalar kapatılarak** yalnızca planlanan senaryoların çalıştırılması sağlanmıştır. Delil bütünlüğünün korunması ve logların doğru şekilde tespit edilebilmesi için **telefonun otomatik tarih ve saat ayarı kapatılmış** ve **loglar oluştukları gibi, text formatında**

çıkarılmıştır. Gerçekleştirilen işlemler Tablo 2’de detaylı olarak belirtilmiş, log verileri `adb logcat -d > logcat-output2.txt` komutu ile kaydedilmiş ve veri bütünlüğü hash değerleri ile doğrulanmıştır. (Bknz.Şekil 3). Filtreleme işlemi sonrası hash değerleri tekrar kontrol edilerek delilin bütünlüğü teyit edilmiştir.

```
In [1]: runfile('C:/Users/MAC/Hash.py', wdir='C:/Users/MAC')
logcat-output2.txt dosyasının SHA-256 hash değeri:
3ce393d2bd546538d1433a9816f66d9da: [redacted] 5b7e4c0
153cc1
Hash değeri output2_hash.txt dosyasına yazılmıştır.
```

Şekil3.Text Dosyasının Hash Bilgileri

(Hash Information of the Text File)

3.2.3. Veri filtreleme aşaması (Data Filtering Phase) Veri filtreleme aşamasında çıktısı alınan Logcat kayıtları üzerinde filtreleme amacıyla `findstr` komutları çalıştırılmıştır. Temel anlamda aşağıda verilen filtre komutları kullanılmıştır:

- **Kamera Servisleri:** `findstr /i "CameraService", "DELETE",`
- **Ses Kaydı:** `findstr /i "AudioRecord MediaRecorder"`
- **Konum Servisleri:** `findstr /i "LocationManager"`
- **Harita Uygulaması:** `findstr "Maps", "Gazipark"`
- **Bluetooth Servisleri:** `findstr "Bluetooth"`
- **Web Gezintisi:** `findstr "Chrome", "Milliyet"`

Ses Kaydı ve oluşturulan fotoğraf dosyaları için anahtar kelime olarak dosya adları aratılmış ve tespit edilmiştir. Bunun dışında anahtar kelime aramasıyla elde edilemeyen bluetooth dosya aktarımı işlemi bilgileri için python betiği oluşturulmuştur, bu birden fazla kelimenin aratılmasına; gelişmiş aramaya olanak tanımıştır.

3.2.4. Analiz Aşaması (Analysis Phase)

Senaryolarda gerçekleştirilen işlemlerdeki verilerle Logcat çıktısında elde edilen verilerin karşılaştırıldığı aşamadır. Senaryolarda oluşturulan verilerle logcat filtreleme işlemleri sonucunda elde edilen veriler kıyaslandığında senaryolar sonucu oluşturulan verilerin sadece 1 tanesine dolaylı yoldan ulaşılmıştır. Fotoğrafın gizlenmesi senaryosunda galeri içerisindeki gizli albüme eklenen fotoğraf logcat çıktılarında net bir şekilde gözlenememiş ancak encryption mesajının çıktıda görünmesi şüphe uyandıracak nitelikte olarak kaydedilmiştir. Analiz aşaması sonucunda elde edilen veriler bulgular kısmında detaylıca açıklanmıştır. Analiz aşamasında temel amaç senaryolarda oluşturulan verilerle logcat

çıkışındaki verilerin kıyaslanması ve böylece doğruluğunun ispatlanmasıdır.

4. BULGULAR (FINDINGS)

Standart Logcat Çıktısında Bulunan Bileşenler

Standart bir logcat çıktısında Tarih ve saat, PID (Process ID) ve TID (Thread ID), Log Seviyesi (V = Verbose D = Debug, I = Info, W = Warning, E = Error) bulunmaktadır. Bileşen (tag) debugging hata ayıklama modunda elde edilmekte, standart log çıktısında gözlenmemektedir.

Aşağıda standart bir logcat çıktısı üzerindeki veriler ayrıntılı olarak anlatılmıştır(USB Debugging işlemi gerçekleştirildiği için bileşen kısmı gözlenmektedir).

06-06 23:11:24.712 5734 5734 E CameraManager

Tarih ve Saat

06-06 23:11:24.712 5734 5734 E CameraManager

Logun kaydedildiği tarih (06-06: 6 Haziran) ve saat (23:11:24) ile milisaniye düzeyinde zaman damgası elde edilmiştir.

PID (Process ID) ve TID (Thread ID)

06-06 23:11:24.712 5734 5734 E CameraManager

5734-5734 İlgili logu üreten işlem id'si ve iş parçacığı id'si kimliği elde edilmiştir.

Log Seviyesi (Log Level)

06-06 23:11:24.712 5734 5734 E CameraManager

V = Verbose D = Debug, I = Info, W = Warning, E = Error olarak verildiği üzere E. Error kodu elde edilmiştir.

Bileşen(Tag)

06-06 23:11:24.712 5734 5734 E CameraManager

CameraManager

İlgili logun hangi uygulama kaynaklı çalıştığını belli etmektedir, Kamera yöneticisi tespit edilmiştir.

Özetlenecek olursa, standart bir log kaydı çıktısında zaman damgası, işlem kimliği (PID), thread kimliği (TID), paket adı, günlük seviyesi, etiket ve gövde bulunmaktadır. İlk üç alan sistem tarafından atanırken bileşen adı yalnızca debug modunda görünür, günlük seviyesi, gövde ise uygulamanın programında tanımlanmaktadır[24].

Bulgular Giriş kısmında yer alan araştırma sorularına cevap verecek şekilde oluşturulmuştur.

RQ1: Adli bilişim açısından ele alındığında mobil bir cihazdan hangi önemli veriler elde edilebilir?

Android işletim sistemine sahip bir cihazda, Logcat vasıtasıyla telefonda gerçekleştirilen günlük işlemler (telefonu açma-kapatma, ana ekrana girme), Kamera servisleri işlemleri(Kamera uygulamasını kullanma, Fotoğraf çekme, Fotoğrafi gizleme), Bluetooth İşlemleri (Bluetooth ile bağlantı kurma,Bluetooth ile dosya aktarımı), Ses Kaydı işlemleri(Ses kaydı oluşturma), Wifi bağlantısı kurma işlemi, Web gezintisi, Harita uygulaması(Google Maps üzerinden yol tarifi), konum servislerini açma-kapatma işlemleri tespit edilebilir.

Elde edilen verilerin önemi, yürütülen suç soruşturmasının niteliğine ve ihtiyaç duyulan delil türüne bağlı olarak değişkenlik gösterecektir. Adli bilişim bağlamında değerlendirildiğinde, sistem logları gibi kayıtların delil değeri; olayın yapısına, teknik ayrıntılarına ve ispatlanması gereken unsurlara göre farklılık arz eder.

Örneğin; bir şüphelinin olay yerinde bulunup bulunmadığının tespiti amacıyla konum verilerinin incelendiği bir soruşturmada, cihaz loglarında yer alan Wi-Fi erişim noktaları ya da GPS verileri kritik öneme sahip olabilir. Benzer şekilde, suçla bağlantılı delilin mobil cihazdaki fotoğraf olarak değerlendirildiği bir soruşturmada, fotoğrafın oluşturulması, silinmesi veya gizlenmesi gibi işlemler log kayıtları üzerinden izlenebilir. Bu tür verilerin zamanında ve doğru yöntemlerle toplanmaları adli süreçler açısından belirleyici olabilir.

RQ2: Android işletim sistemine sahip bir cihazda Logcat vasıtasıyla telefonda gerçekleştirilen günlük işlemler (telefonu açma-kapatma, ana ekrana girme) tespit edilebilir mi?

Yazılım geliştiricileri tarafından sıklıkla tercih edilen hata ayıklama işlemlerinin bir gereksinimi olarak gündelik olarak gerçekleştirilen işlemler ekrana dokunma ana sayfaya girme vb. Android işletim sisteminin android kullanıcılarına sunduğu hizmetler arasında sayılmaktadır. Senaryolar sonucunda elde edilen çıktılar dahilinde

gerçekleştirilen bütün işlemler logcat sisteminde kayıt altına alınmıştır.

4.1. Kamera Servisleri(Camera Services)

RQ3: Android işletim sistemine sahip bir cihazda Logcat vasıtasıyla Kamera servisleri işlemleri tespit edilebilir mi ?

```
C:\Users\MAC>findstr "CameraService" logcat-output2.txt
06-06 23:09:15.454 664 664 I CameraService: CameraService started (pid=664)
06-06 23:09:15.454 664 664 I CameraService: CameraService process starting
06-06 23:09:22.760 664 776 I CameraService: onDeviceStatusChanged: Status changed for cameraId=0, newStatus=1
06-06 23:09:22.760 664 776 E CameraService: onDeviceStatusChanged: State transition to the same status 0x1 not allowed
06-06 23:09:22.760 664 776 I CameraService: onDeviceStatusChanged: Status changed for cameraId=1, newStatus=1
06-06 23:09:22.760 664 776 E CameraService: onDeviceStatusChanged: State transition to the same status 0x1 not allowed
06-06 23:09:22.760 664 776 I CameraService: onDeviceStatusChanged: Status changed for cameraId=2, newStatus=1
06-06 23:09:22.760 664 776 E CameraService: onDeviceStatusChanged: State transition to the same status 0x1 not allowed
06-06 23:09:22.760 664 776 I CameraService: onDeviceStatusChanged: Status changed for cameraId=3, newStatus=1
06-06 23:09:22.760 664 776 E CameraService: onDeviceStatusChanged: State transition to the same status 0x1 not allowed
06-06 23:09:25.090 1137 1137 I SystemServer: StartCameraServiceProxy
06-06 23:09:25.091 1137 1137 I SystemServiceManager: Starting com.android.server.camera.CameraServiceProxy
06-06 23:09:28.403 664 835 I CameraService: CameraService::connect call (PID -1 "cameraserver", camera ID 0) for HAL version default and Camera API version 1
06-06 23:09:28.411 664 835 E CameraService: can not read file /data/.camera/RUS_camera_hardware_thirdParty.
06-06 23:09:28.415 664 835 I CameraService: CameraService::connect, oppo.camera.packname = cameraserver
06-06 23:09:28.417 664 835 I CameraService: onTorchStatusChangedLocked: Torch status changed for cameraId=0, newStatus=0
06-06 23:09:28.460 664 835 I CameraService: onTorchStatusChangedLocked: Torch status changed for cameraId=0, newStatus=0
06-06 23:09:28.622 664 835 I CameraService: onTorchStatusChangedLocked: Torch status changed for cameraId=0, newStatus=1
06-06 23:09:28.626 664 835 I CameraService: disconnect: Disconnected client for camera 0 for PID 664
06-06 23:09:30.478 664 835 I CameraService: CameraService::connect call (PID -1 "cameraserver", camera ID 1) for HAL version default and Camera API version 1
06-06 23:09:30.479 664 835 E CameraService: can not read file /data/.camera/RUS_camera_hardware_thirdParty.
06-06 23:09:30.482 664 835 I CameraService: CameraService::connect, oppo.camera.packname = cameraserver
06-06 23:09:30.607 664 835 I CameraService: disconnect: Disconnected client for camera 1 for PID 664
06-06 23:10:16.144 664 2005 I CameraService: cameraservice improve cpu gpu ddr to performance 1500ms
06-06 23:10:16.146 664 2005 I CameraService: CameraService::connect call (PID -1 "com.oppo.camera", camera ID 0) for HAL version default and Camera API version 1
06-06 23:10:16.147 664 2005 E CameraService: can not read file /data/.camera/RUS_camera_hardware_thirdParty.
06-06 23:10:16.150 664 2005 I CameraService: CameraService::connect, oppo.camera.packname = com.oppo.camera
06-06 23:10:16.152 664 2005 I CameraService: onTorchStatusChangedLocked: Torch status changed for cameraId=0, newStatus=0
06-06 23:10:16.212 664 2005 I CameraService: onTorchStatusChangedLocked: Torch status changed for cameraId=0, newStatus=0
06-06 23:10:23.760 664 2005 I CameraService: onTorchStatusChangedLocked: Torch status changed for cameraId=0, newStatus=1
06-06 23:10:23.772 664 2005 I CameraService: disconnect: Disconnected client for camera 0 for PID 5734
```

Şekil4. Logcat Terminal Ekran Alıntısı
(Screenshot of Logcat Terminal)

4.1.1. Kamera servislerini başlatma(Starting camera services)

Kamera servislerinde gerçekleştirilen işlemlere ulaşmak amacıyla cmd terminal ekranında **“findstr CameraService logcat-outpput2.txt”** komutu çalıştırılmıştır. Bu komut içerisinde yer alan **“CameraService”** anahtar kelime grubu output2 text dosyası içerisinde aratılmıştır.

Senaryo

“Kamera Servislerinin Başlatılması ve Fotoğraf Çekimi işlemleri gerçekleştirilmiştir.”

İşlem Tarihi: 06.06.2025 Saat: 23:09:15

Senaryo Adımları:

Kamera Uygulamasının Başlatılması

Mobil cihazın Uygulama menüsü üzerinden saat 23:09:00’da kamera uygulaması başlatılmıştır.

23:09:28.403 CameraService::connect Kamera Başlatıldı

Bu işlem ile birlikte kamera servisleri (donanım erişimi, önizleme başlatma, sensör kontrolü vb.) aktive edilmiştir.

23:09:28.622 Torch newStatus=1 Fotoğraf Çekimi

Fotoğraf Çekim İşlemi

Kamera uygulaması başlatıldıktan hemen sonra, aynı dakika içerisinde fotoğraf çekilmiştir. Görüntü, cihazın dahili depolamasına kaydedilmiştir.

Kamera servisleri devre dışı bırakılmış, uygulama arayüzü sistem tarafından sonlandırılmıştır.

Kamera servisleri üzerinde gerçekleştirilen servisi başlatma, fotoğraf çekme, servisi kapatma senaryoları zaman damgaları doğru şekilde tespit edilmiştir.

Kamera Uygulamasının Kapatılması

Fotoğraf çekiminin hemen ardından, yine saat 23:09 içerisinde kamera uygulaması kapatılmıştır.

23:09:28.626	disconnect	Kamera kapandı
--------------	------------	----------------

4.1.2. Galeriden bir fotoğraf silme (Deleting a photo from the gallery)

```
06-06 23:10:50.234 1137 1280 D WindowClient: Remove from mViews: DecorView@431a858[gallery3d], this = android.view.WindowManagerGlobal@db35d82
06-06 23:10:58.420 1137 3086 W ActivityManager: app.persistent false app.isolated false app.removed false app.ProcessRecord{14ae434 6602:com.oppo.aod/1000}
06-06 23:11:24.558 5907 5907 D WindowClient: Remove from mViews: DecorView@8a8a991[], this = android.view.WindowManagerGlobal@91ecf05
06-06 23:11:24.691 5907 5965 D ContentResolver: rowsDeleted 4 granted true
06-06 23:11:24.712 5734 5734 E CameraManager: onReceiver, intent action: com.oppo.gallery3d.action.DELETE_PICTURE, packageName: null
06-06 23:11:24.722 1137 3086 V WindowManager: Remove Window{b01265c u0 DeletingÖÇĞ} client=29e3ccf, surfaceController=Surface(name=DeletingÖÇĞ) Callers=com.android.server.wm.WindowState.removeIfPossible:2087 com.android.server.wm.WindowManagerService.removeWindow:2368 com.android.server.wm.Session.remove:225 android.view.IWindowSession$Stub.onTransact:242 com.android.server.wm.Session.onTransact:166
```

Şekil5. Logcat Terminal Ekran Alıntısı
(Screenshot of Logcat Terminal)

Kamera servisleri üzerinden gerçekleştirilen Galeri işlemlerine ulaşmak amacıyla cmd terminal ekranında “**findstr CameraService logcat-outpput2.txt**” komutu çalıştırılmıştır. Bu komut içerisinde yer alan “DELETE” anahtar kelimesi output2 text dosyası içerisinde aratılmıştır.

Senaryo

Kamera uygulaması ile çekilen fotoğrafın Galeriden silinmesi işlemi gerçekleştirilmiştir.

İşlem Tarihi: 06.06.2025 Saat: 23:11:24

Senaryo Adımları:

Galeri Uygulamasının Açılması

Mobil cihaz üzerinde galeri (Gallery3D) uygulaması başlatılmıştır.

Silinmek Üzere Fotoğrafın Seçilmesi

Galeri içerisinde daha önce çekilmiş bir fotoğraf silinmek amacıyla seçilmiştir.

Fotoğraf Silme Komutunun Tetiklenmesi

Saat 23:11:24.712'de sistem loglarında kayıt altına alındığı üzere, uygulama tarafından şu içerik kayıt edilmiştir:

intentaction:
com.oppo.gallery3d.action.DELETE_PICTURE

Bu kayıt, galeri uygulamasına ait yerel bir silme işleminin göstergesidir.

Silme İşleminin Gerçekleşmesi

İlgili medya dosyası, cihazın medya depolama alanından geri dönüşüm kutusuna taşınacak şekilde kaldırılmıştır. Silme işlemi sonucunda sistem medya veritabanı güncellenmiştir.

06-06 23:11:24.712 5734 5734 E CameraManager: onReceiver,intentaction:com.oppo.gallery3d.action.DELETE_PICTURE, packageName: null

4.1.3. Fotoğrafi gizleme (Hiding a Photo)

Kamera servisleri üzerinden gerçekleştirilen işlemlere ulaşmak amacıyla cmd terminal ekranında “**findstr fotoğrafdosyasıadı logcat-outpput2.txt**” komutu çalıştırılmıştır. Bu komut içerisinde yer alan “Fotoğrafdosyasıadı” arama yapılacak alanı sınırlandırmıştır.

Senaryo

Galeri Uygulamasına Erişim ve Önceden Çekilmiş Fotoğrafi Gizli Albüme Kaydetme işlemi gerçekleştirilmiştir.

İşlem Tarihi: 06.06.2025 23:13:33 – 23:14:13

Senaryo Adımları:

Galeri Uygulamasının Başlatılması

Saat 23:13:33'te OPPO' ya ait galeri uygulaması başlatılmıştır.

Şifreli İçeriğe Yönelik Etkileşim – Uyarı Penceresi

Saat 23:13:54'te, OPPO'nun şifreleme bileşenine ait bir kullanıcı arayüzü bileşeni (PermissionAlertActivity) tetiklenmiştir. Uyarı

penceresi, şifreli içeriklere erişim girişimi veya şifreleme modülüne yönelik bir işlem (örneğin, şifre çözme, yetkilendirme) nedeniyle ortaya çıkmıştır. Pencereyle etkileşime geçilmiş pencere kapatılmıştır. Bu, şifreli medyaya bir erişim teşebbüsüne işaret etmektedir.

Galeri Uygulamasının Yeniden Başlatılması

Yaklaşık 40 saniye sonra galeri uygulaması ikinci kez başlatılmıştır. Uygulamanın yeniden başlatılması, potansiyel olarak farklı medya dosyalarına erişim, görüntüleme veya işlem yapılması anlamına gelmektedir. Bu zaman aralığında, galeri uygulamasına iki ayrı erişim gerçekleşmiştir. Aradaki süreçte, şifreli içeriğe ait bir sistem bileşeni ile kullanıcı etkileşimi tespit edilmiştir. Bu, gizli/korunan medya dosyalarına erişim girişimi anlamına gelmektedir. Zaman damgalarının sıralı olması, bu eylemlerin aynı olay zinciri içinde olduğunu desteklemektedir.

06 Haziran saat 23:13:33, 06 Haziran saat 23:13:54, 06 Haziran saat 23:14:13

Zaman damgaları adli zaman çizelgesi (timeline) oluşturmak için önemlidir. Zaman damgalarının kronolojik sıralaması özellikle bir olayın tam olarak ne zaman gerçekleştiğini belirlemek açısından kritiktir.

4.2. Bluetooth ile Dosya Aktarımı (Bluetooth Photo Transfer)

RQ4: Android işletim sistemine sahip bir cihazda Logcat vasıtasıyla Bluetooth İşlemleri(Bluetooth ile bağlantı kurma,Bluetooth ile dosya aktarımı) tespit edilebilir mi?

```
06-07 17:20:03.081 1137 1137 D OppoEngineerService: onReceive intent = Intent { act=android.intent.action.BATTERY_CHANGED flg=0x60000010 (has extras) }
06-07 17:20:04.182 11100 11100 W FileDecoder-1: type=1400 audit(0.0:5468): avc: denied { read } for name="mtk_cmdq" dev="tmpfs" ino=7417 scontext=u:r:priv_app:s0:c512,c768 tc
06-07 17:20:05.213 12157 12170 D OShare_DeviceManager: resetAllReceiveDevice
06-07 17:20:06.806 11100 11100 D ColorResolverPagerAdapter: onItemClick : 2, [ResolveInfo{745d7d3 com.google.android.gm/.ComposeActivityGmailExternal m=0x608000}, ResolveInfo
06-07 17:20:06.815 1137 2492 I ActivityManager: START u0 {act=android.intent.action.SEND typ=image/* flg=0x30000001 cmp=com.android.bluetooth/.opp.BluetoothOppLauncherActivi
06-07 17:20:06.893 1137 2492 V WindowManager: Set focused app to: AppWindowToken{112ca12 token=Token{b61e59d ActivityRecord{c535c74 u0 com.android.bluetooth/.opp.BluetoothC
06-07 17:20:06.893 1137 2492 V WindowManager: findFocusedWindow: Reached focused app=AppWindowToken{112ca12 token=Token{b61e59d ActivityRecord{c535c74 u0 com.android.bluetooth
06-07 17:20:06.899 463 486 I vendor.mediatek.hardware.power@1.1-impl: notifyAppState pack=com.android.bluetooth, act=com.android.bluetooth.opp.BluetoothOppLauncherActivit
06-07 17:20:06.902 12157 12509 D OShare_OShareClient: handleMessage.STOP_SENDE_CODE
06-07 17:20:06.916 10228 10259 I DCS-BackgroundAppData: sendAppBgEvent: has no pkgName=com.android.bluetooth
06-07 17:20:06.929 12177 12177 I BluetoothOppSendFileInfo: generateFileInfo ++ uri = content://media/external/images/media/163
06-07 17:20:06.929 12177 12177 D BluetoothOppSendFileInfo: ,Current authority,media
06-07 17:20:06.946 12177 12177 D BluetoothOppSendFileInfo: fileName = IMG20250606115801.jpg length = 2722344
06-07 17:20:07.019 12177 12516 D BluetoothOppUtility: closeSendFileInfoForPreparing
06-07 17:20:07.019 12177 12516 D BluetoothOppUtility: removePrepareSendingUri
06-07 17:20:07.020 12177 12516 I BluetoothOppSendFileInfo: generateFileInfo ++ uri = content://media/external/images/media/163
06-07 17:20:07.020 12177 12516 D BluetoothOppSendFileInfo: ,Current authority,media
06-07 17:20:07.028 12177 12516 D BluetoothOppSendFileInfo: fileName = IMG20250606115801.jpg length = 2722344
```

Şekil6. Bluetooth ile Aktarım Bilgilerinin Ekran Alıntısı

(Screenshot of Bluetooth Transfer Information)

Bluetooth servisleri üzerinden gerçekleştirilen işlemlere ulaşmak amacıyla cmd terminal ekranında “**findstr Fotoğrafdosyasiadı logcat-outpput2.txt**” komutu çalıştırılmıştır. Bu komut içerisinde yer alan “Fotoğrafdosyasiadı” arama yapılacak alanı sınırlandırmıştır.

Senaryo:

Bluetooth Üzerinden Dosya Gönderim İşlemi gerçekleştirilmiştir.

İşlem Tarihi: 06.06.2025 17:20:06.929– 17:20:06.946

Senaryo Adımları:

Dosya Bilgilerinin URI Üzerinden Alınması

BluetoothOppSendFileInfo sınıfı, Android MediaStore üzerinde kayıtlı bir medya ögesini tanımlayan URI üzerinden dosya bilgilerini çekmektedir.

AlınanURI:content://media/external/images/media/163

Bu URI, cihazın medya veritabanında ID değeri 163 olan bir görsel dosyasına işaret etmektedir.

Dosya Adının Tespit Edilmesi

URI üzerinden erişilen dosyanın adı, sistem loglarına göre **IMG20250606115801.jpg** olarak belirlenmiştir. Elde edilen kayda göre; görselin oluşturulma zamanı 06.06.2025 –11:58:01 olarak yorumlanabilir. Bu bilgi, dosyanın içeriğine ilişkin oluşturulma zamanını ve cihazda daha önce çekilmiş olduğunu göstermektedir.

Bluetooth Gönderim Sürecinin Başlaması

Bahsi geçen dosya, Bluetooth üzerinden başka bir cihaza gönderilmek üzere sistem tarafından işlenmeye başlanmıştır. **BluetoothOppSendFileInfo** sınıfının bu eylemi tetiklemesi, Bluetooth paylaşım işleminin başlatıldığını göstermektedir.

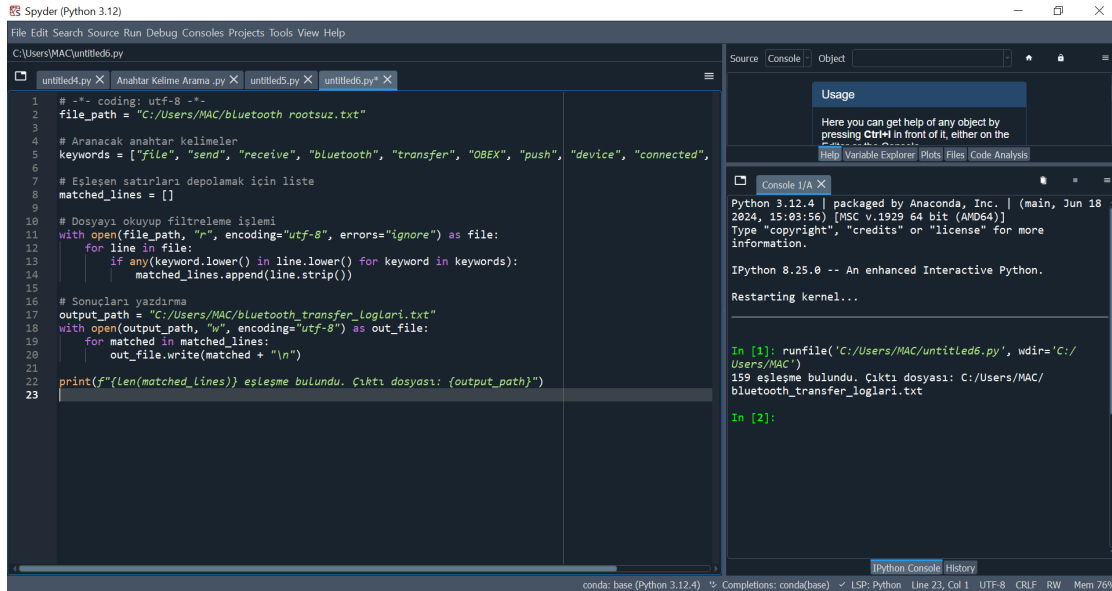
Dosya Özellikleri

Android MediaStore'da yer alan bir görsel dosyası
ID: 163

Dosya Türü: JPEG

Görsel Boyut: 2.7 MB (2,722,344 bayt)

Saat 17:20:06.946'da dosya adı olan IMG20250606115801.jpg tespit edilmektedir. Bu bilgi, Bluetooth üzerinden bir dosya gönderme işleminin başladığı kısmın parçasıdır. Yani bu görsel, başka bir cihaza dosya aktarımının gerçekleştirildiğinin kayıdır.



Şekil7. Çoklu Anahtar Kelime Araması İçin Oluşturulan Python Betiği Ekran Alıntısı
(Screenshot of Python Script Created for Multi-Keyword Search)

```
06-07 17:28:15.589 1137 1137 D AudioService: onReceive BluetoothAdapter state=13
06-07 17:28:15.602 12177 12177 D PanService: Received stop request...Stopping profile...
06-07 17:28:15.604 10525 10565 D CachedBluetoothDevice: Clearing all connection state for dev:OPPO A5s
```

Şekil8. Bluetooth Bağlantısı Hedef Cihaz Ekran Alıntısı
(Screenshot of Bluetooth Connection to Target Device)

Aktarım yapılan cihazın markası modeli vb bilgiler, OBEX değerleri Python betiği ile elde edilmiştir. Betik içerisinde yazılan birden fazla kelime ile aynı anda arama mümkün olmuş aramalar için harcanan işlem süresi kısalmıştır. Python betiğinde “OBEX”, “Transfer”, “Connected”, “Send” vb. kelimeler anahtar kelime olarak kullanılmıştır(Bknz. Şekil7).

Bluetooth ile bağlantı kurulan cihazın **OPPO A5S** olduğu, bağlantının **6 Haziran saat 17:28:15'te** sona erdiği, bu cihazın **daha önce eşleştirilmiş** olduğu ve sistemde önbellekte kayıtlı olduğu (**CachedBluetoothDevice**) aynı anda birden fazla anahtar kelime araması yöntemiyle elde edilmiştir(Bknz Şekil8).

4.3. Ses Kayıtları (Audio Recordings)

RQ5: Android işletim sistemine sahip bir cihazda Logcat vasıtasıyla Ses Kaydı işlemleri tespit edilebilir mi?

Ses Kayıtları servisleri üzerinden gerçekleştirilen işlemlere ulaşmak amacıyla cmd terminal ekranında “**findstr SesKaydıDosyaAdı logcat-outpput2.txt**” komutu çalıştırılmıştır. Bu komut içerisinde yer alan “**SesKaydıDosyaAdı**” arama yapılacak alanı sınırlandırmıştır.

Senaryo

Ses Kaydının Oluşturulması, Erişilmeye Çalışılması ve Sonrasında Dosyanın Bulunamaması işlemleri gerçekleştirilmiştir.

İşlem Tarihi: 07.06.2025 17:25:08

Senaryo Adımları:

Ses Kaydının Oluşturulması

expandFile(/storage/emulated/0/Recordings/**REC20250607172508.mp3**,1) satırı, ilgili ses dosyasının oluşturulmaya veya işlenmeye başlandığını göstermektedir.

Dosya Sistemine Kaydedilme

Oluşturulan ses kaydı, Android dosya sisteminde belirtilen dizine kaydedilmek üzere planlanmıştır: **/storage/emulated/0/Recordings/**

Dosyaya Erişim

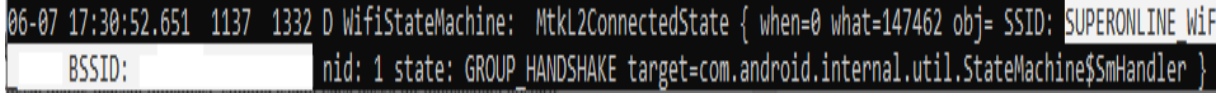
Sonraki adımda, sistem MediaScanner aracılığıyla bu dosyaya erişmeye çalışmaktadır.

Dosyanın Bulunamaması:

Sistem tarafından aşağıdaki hata mesajı üretilmiştir. MediaScanner: prescan, Libcore.os.access failed, access failed: ENOENT (No such file or directory) **ENOENT (Error NO ENTry)** hatası, belirtilen dosya yolunun artık geçerli olmadığını ve dosyanın silinmiş veya taşınmış olduğunu göstermektedir. Dosyanın fiziksel olarak mevcut olmaması, silinme işlemi veya başka bir müdahaleyi göstermektedir.

4.4. Wi-Fi Bağlantısı (Wi-Fi Connection)

RQ6: Android işletim sistemine sahip bir cihazda Logcat vasıtasıyla Wifi bağlantısı kurma işlemi tespit edilebilir mi?



Şekil9. Wifi Bağlantısı Ekran Alıntısı
(Screenshot of Wi-Fi Connection)

Wi-Fi Bağlantısı işlemlerine ulaşmak amacıyla cmd terminal ekranında “**findstr WIFI logcat-outpput2.txt**” komutu çalıştırılmıştır. Bu komut dışında aynı text dosyasında “**SSID**” anahtar kelime araması gerçekleştirilmiştir.

Senaryo:

Mobil cihazla Wi-Fi Bağlantısı Kurulma işlemi gerçekleştirilmiştir.

İşlem Tarihi: 07.06.2025 Saat: 17:30:52

Senaryo Adımları:

Kablosuz Ağ Taraması ve Seçimi

Mobil cihaz, kablosuz ağlar arasında bir tarama gerçekleştirmiştir ve bir ağa bağlanmak üzere seçim yapılmıştır.

WPA Anahtar Değişimi

Saat **17:30:52** itibarıyla cihaz, WPA-PSK (Wi-Fi Protected Access – Pre-Shared Key) protokolü üzerinden şifreli kimlik doğrulama ve anahtar

değişimini başarıyla tamamlamıştır. Bu işlem, 4-yollu el sıkışma (4-way handshake) prosedürünü içermektedir ve bağlantı güvenliğini sağlamaktadır.

Bağlantının Kurulması

Anahtar doğrulamasının tamamlanmasıyla birlikte cihaz, seçilen kablosuz ağa başarılı şekilde bağlanmıştır. Sistem tarafından bağlantı *Profil ID: 0* ile ilişkilendirilir. Bu, cihazda önceden kayıtlı bir bağlantı yapılandırmasının kullanıldığını gösterir.

Özetleyecek olursak; Ağın adı (SSID) veya MAC adresi (BSSID) bilgisi, Mobil cihaz arayüz üzerinden WPA şifreleme anahtar değiş tokuşunu tamamlamıştır. Bağlantı başarılı ve tamamlanmıştır. Bağlantı profili ID 0 ve yapılandırması WPA_PSK (şifreli ağ) bilgilerine ulaşılmaktadır.

4.5. Web Gezintisi (Web Browsing)

RQ7: Android işletim sistemine sahip bir cihazda Logcat vasıtasıyla Web gezintisi işlemi tespit edilebilir mi?

```
06-07 17:29:36.247 15858 15858 I chromium: [INFO:CONSOLE(1)] "Uncaught SyntaxError: Unexpected token .", source: https://www.milliyet.com.tr/son-dakika-haberleri/ (1)
06-07 17:29:36.396 15858 15858 I chromium: [INFO:CONSOLE(1)] "netmera::info::", source: https://ntm.netmera-web.com/wsd2/nmweb/netmera_sdk.js (1)
06-07 17:29:36.461 15858 15858 I chromium: [INFO:CONSOLE(1)] "Uncaught ReferenceError: $ is not defined", source: https://www.milliyet.com.tr/son-dakika-haberleri/
```

Şekil10. Web Gezintisi Ekran Alıntısı

(Screenshot of Web Browsing)

Web Gezintisi işlemlerine ulaşmak amacıyla cmd terminal ekranında **“findstr chrome logcat-output2.txt”** komutu çalıştırılmıştır. Bu komut içerisinde yer alan **“chrome”** arama yapılacak alanı sınırlandırmıştır.

Senaryo:

Tarayıcı Üzerinden Web Sitesi Ziyareti gerçekleştirilmiştir.

İşlem Tarihi: 07.06.2025 Saat: 17:29:36.247

Senaryo Adımları:

Web Tarayıcısının Kullanılması

Mobil cihazda Chromium tabanlı bir tarayıcı kullanılarak internet gezintisi yapılmıştır. Bu bilgi, sistem loglarında yer alan I chromium: etiketiyle doğrulanmaktadır.

I harfi, logcat çıktısında log seviyesini belirtmektedir. Buradaki “I”, Information (Bilgi) seviyesini temsil eder. Bu satır, sistem tarafından bilgi verme amacıyla kaydedilmiştir.

Chromium etiketi log kaydını üreten uygulama bileşenin adıdır. Chromium, Google Chrome’un açık kaynak kodlu temelidir.

Android cihazlarda Chromium tabanlı tarayıcılar (örneğin Google Chrome, Samsung Internet, Opera, Brave gibi) bu etiketi kullanmaktadır. Senaryoda internet sayfasının Chrome üzerinden aranmış olması bu durumu destekler niteliktedir.

URL’ye Erişim Sağlanması

Saat 17:29:36.247’de aşağıdaki URL ziyaret edilmiştir.

<https://www.milliyet.com.tr/son-dakika-haberleri/>

Bu bağlantı, bir haber sitesinin "son dakika" haberleri sayfasıdır. Senaryoda oluşturulan işlemler eksiksiz elde edilmiştir.

5. TARTIŞMA(DISCUSSION)

Araştırmada, belirli senaryolar üzerinden elde edilen logcat kayıtları incelenmiş ve her bir senaryoya ait veriler başarılı bir şekilde tespit edilmiştir. Toplamda 11.9 MB büyüklüğünde ve 103.973 satırdan oluşan bu veriler, mobil cihazlarda gerçekleştirilen en basit işlemlerin bile büyük miktarda çıktı ürettiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, logcat kayıtlarının oldukça ayrıntılı ve detaylı veriler içerdiğini göstermektedir. Ancak, logcat verilerinin kayıt edilebilmesinin mobil cihazlardaki buffer boyutuna bağlı olması nedeniyle, bu verilerin uçucu (volatile) nitelik taşıdığı ve hızlı bir şekilde silinebileceği veya üzerine veri yazılabileceği gerçeği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu bağlamda, özellikle suç soruşturamalarında, log verilerinin hızlı bir şekilde toplanması ve muhafaza edilmesi son derece kritiktir. Bu nedenle, log verilerinin mümkün olan en kısa sürede, özellikle metin formatında (.txt) alınarak saklanması, potansiyel delil kaybını engellemek adına büyük önem taşımaktadır.

Araştırma, literatürdeki mevcut çalışmalarla karşılaştırıldığında, logcat verilerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini sistematik bir şekilde test eden nadir çalışmalardan biri olarak öne çıkmaktadır. Mevcut literatürde genellikle logcat verilerinin doğruluğu üzerine doğrudan bir değerlendirme yapılmamış olup, çoğu çalışma yalnızca log verilerinin toplanması veya analiz edilmesine odaklanmıştır. Bu bağlamda, araştırmamız logcat verilerinin doğruluğunu test etmiş ve elde edilen sonuçları somut verilerle desteklemiştir.

Literatür incelendiğinde, Android cihazlardan elde edilen log verilerinin adli bilişim bağlamındaki potansiyeline dikkat çeken birkaç çalışma bulunmaktadır [10]–[12], [19]–[22]. Ancak bu çalışmaların çoğu, logcat çıktılarının doğruluğu veya adli analizdeki uygulanabilirliği üzerinde sistematik bir değerlendirme sunmamıştır. Örneğin, bazı araştırmalar [19], [21] log ayrıştırma araçlarının etkinliğini veya veri toplama süreçlerini ele almış, ancak bu verilerin gerçek zaman çizelgeleri ve kullanıcı davranışlarını güvenilir şekilde yansıtmayı yansıtmadığını doğrudan incelememiştir.

Araştırma, literatürdeki boşluğu doldurarak, logcat verilerinin adli bilişim süreçlerinde kullanılabilirliğini test etmiş ve elde edilen verilerin doğruluğunu senaryo temelli analizlerle kanıtlamıştır. Özellikle olaya yönelik zaman haritalandırılması, kullanıcı davranışlarını analiz etme bağlamında logcat verilerinin sağladığı değer ortaya konmuştur.

Yapılan literatür incelemesi ve araştırmada elde edilen senaryo tabanlı bulgular bir araya getirildiğinde, log verilerinin adli bilişimde kullanım potansiyeli ile ilgili bazı ortak desenler ve önemli çıkarımlar ortaya çıkmaktadır.

Logların Adli Analiz İçin Güvenilirliği ve Doğruluğu

Literatürde, mobil cihaz loglarının adli bilişim süreçlerinde kullanımı sınırlı olmakla birlikte, logların önemli ölçüde veri sağlama kapasitesine dikkat çekilmiştir. Örneğin, araştırmalar Android loglarının dijital delil olarak önemini vurgulamakta ve ham logların işlenmesinde doğru araçların ve uygun ön işleme yöntemlerinin kritik olduğunu belirtmektedir [10],[19]. Senaryo bulgularımızda, logcat kayıtları kamera servisleri, WiFi bağlantısı, Google Maps ve web aktiviteleri gibi farklı sistem bileşenlerinde gerçekleşen olayları kesin zaman damgalarıyla kaydetmiştir. Bu, literatürde öne sürülen “logların adli değerinin doğruluk ve bütünlük temeline dayandığı” bulgusuyla doğrudan paralellik göstermektedir.

Mobil Cihaz Loglarının Çeşitliliği

Araştırmalar, mobil cihazlarda SQLite tabanlı loglar ve araç içi logların veri zenginliği açısından adli bilişimde önemli fırsatlar sunduğunu belirtmektedir [15], [18]. Benzer şekilde, araştırmamızda yer alan farklı senaryolar (Bluetooth dosya aktarımı, ses kayıtları, harita kullanımı.vb.) logcat kayıtları üzerinden net bir şekilde tespit edilmiştir. Bu durum, mobil logların hem kullanıcı aktivitelerini hem de cihaz davranışlarını bütünsel bir şekilde izlemede değerli olduğunu göstermektedir.

Olay Zaman Çizelgesi Oluşturma Potansiyeli

Literatürde, logların kronolojik olarak sıralanması ve nedensellik bilgisi eklenmesi yoluyla olayların doğru şekilde çözülmesini sağlayan yöntemler geliştirilmiştir[17],[20]. Senaryo tabanlı analizlerimizde, logcat kayıtları olayların tam zamanlamasını sağlayarak fotoğraf silme, WiFi bağlantısı, konum araması gibi aktivitelerin net bir şekilde kronolojisini oluşturmuştur. Bu, literatürde önerilen “logların olay çözümleme ve zaman çizelgesi oluşturma amaçlı kullanılabilirliği” ile örtüşmektedir.

Hassas Bilgi Kapasitesi

Araştırmada, logcat ile kullanıcı parolası veya ekran deseni gibi kritik bilgiler elde edilemezken, wifi bağlantısı ve web geçmişine yönelik hassas veriler tespit edilebilmiştir. Bu durum, literatürde logların hem fırsat hem de potansiyel riskler barındırdığına işaret eden bulgularla uyumludur [22]. Loglar, adli süreçlerde değerli bilgiler sağlarken, veri gizliliği ve güvenliği açısından dikkatli kullanım gerektirmektedir.

Ortak Temalar ve Literatüre Katkı

Tüm çalışmalar ve bizim bulgularımız göz önüne alındığında şu ortak temalar ortaya çıkmaktadır:

- Mobil loglar, özellikle Android logcat, adli bilişimde zaman damgalı ve doğrulanabilir veri sağlamaktadır.
- Loglar, olay zaman çizelgesi oluşturma, kullanıcı davranışı analizi açısından kritik öneme sahiptir.
- Logların kapsamlı analizi, adli soruşturmanın etkinliğini artırmakta, olayların yeniden yapılandırılmasını mümkün kılmaktadır.

Bu bağlamda, araştırma literatürdeki boşluğu doldurarak Android logcat verilerinin doğruluğunu sistematik olarak test etmiş ve senaryo tabanlı bir doğrulama sağlamıştır. Sonuçlar, adli bilişim alanında log tabanlı analizlerin destekleyici delil olarak kullanılabilceği görüşünü desteklemektedir.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Araştırmada, mobil cihazlardan elde edilen Logcat verilerinin adli bilişim sürecindeki etkinliği incelenmiştir. Yapılan analizler, Logcat çıktılarının Android işletim sistemi üzerinde gerçekleştirilen işlemleri ayrıntılı bir şekilde kaydederek, adli soruşturmalar için güvenilir bir delil kaynağı sağladığını ortaya koymuştur.

Fotoğraf silme, ses kaydı oluşturma, Wi-Fi bağlantıları, web gezintisi, Bluetooth dosya transferi ve konum takibi gibi kullanıcı aktiviteleri, Logcat kayıtları üzerinden inceleme sırasında tespit edilebilmekte ve olayların kronolojik olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Logcat verilerinin sağladığı bu ayrıntılı bilgiler, dijital delil toplama sürecinde suçlu davranışlarının anlamlandırılması ve olaylarla ilişkilendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Logcat çıktılarının hızlı bir şekilde toplanması ve güvenli bir biçimde muhafaza edilmesi, dijital delil kaybının önlenmesi ve adli süreçlerin verimli şekilde yürütülmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, Logcat verileri adli bilişim uzmanları ve diğer görevli personel için değerli bilgiler sunmakta, mobil cihazlardan elde edilen logların sistematik delil toplama süreçlerine entegrasyonuna katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, Logcat verilerinin doğru şekilde analiz edilmesi, adli bilişim sürecinde olayların detaylı şekilde incelenmesine ve suç soruşturmalarında etkin delil sunulmasına olanak tanımaktadır. Mobil cihaz aktivitelerinin izlenmesi,

zaman damgalarının kaydedilmesi ve kullanıcı etkileşimlerinin belgelenmesi, Logcat sayesinde güvenilir bir biçimde gerçekleştirilebilmekte ve dijital delillerin adli süreçlerdeki değerini artırmaktadır.

Öneriler

Araştırmanın bulguları ışığında, aşağıdaki önerilerde bulunulabilir:

- Gelecekte yapılacak çalışmalarla, farklı Android sürümleri ve cihaz modelleri kullanılarak logcat verilerinin doğruluğu daha geniş veri kümeleriyle test edilebilir.
- Farklı kullanıcı senaryoları ve uygulama türleri kullanılarak logcat verilerinin adli bilişim süreçlerindeki güvenilirliği test edilebilir.
- Android adli bilişim araçlarının logcat analiz modüllerini geliştirmek, bu araçların otomatik sınıflandırma yapabilmesi ve kullanıcı etkileşimlerini daha hızlı bir şekilde analiz edebilmesi için faydalı olacaktır.
- Adli bilişim laboratuvarlarında eğitim ve test amaçlı kullanılacak ortak veri setlerinin oluşturulması, gelecekteki çalışmaların daha tutarlı ve tekrarlanabilir olmasını sağlayabilir.
- Logcat verilerinin, adli bilişim zaman çizelgesi oluşturma yazılımlarıyla entegrasyonu, olayların daha doğru bir şekilde analiz edilmesini ve kullanıcı davranışlarının net bir şekilde izlenmesini sağlayacaktır.

Bu öneriler, logcat verilerinin adli bilişimde daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlamak ve dijital delillerin güvenilirliğini artırmak için önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Worldometers, "World population projections," *Worldometers*, Jan. 2, 2025. [Online]. Available: <https://www.worldometers.info/worldpopulation/world-population-projections/>. Accessed: Aug. 25, 2025.
- [2] StatCounter, "Android version market share worldwide," [Online]. Available: <https://gs.statcounter.com/android-version-market-share/mobile-tablet/worldwide>. Accessed: Aug. 22, 2025.
- [3] StatCounter, "Android version market share in Turkey," [Online]. Available: <https://gs.statcounter.com/android-version-market-share/mobile-tablet/turkey>. Accessed: Aug. 22, 2025.

- [4] Adobe, ".LOG Format – What Is .LOG and How to Open It," *Adobe Acrobat Resources*, 2025. [Online]. Available: <https://www.adobe.com/uk/acrobat/resources/document-files/text-files/log.html>. Accessed: Sep. 13, 2025.
- [5] S. Allen, *Importance of Understanding Logs from an Information Security Standpoint*, Tech. Rep., 2001, p. 241.
- [6] H. Çakır and M. S. Kılıç, Eds., *Güncel Tehdit: Siber Suçlar*. Ankara, Turkey: Seçkin, 2014, pp. 241, 251.
- [7] Android Developers, "Günlükleri Logcat ile görüntüleme," *Android Studio*. [Online]. Available: <https://developer.android.com/studio/debug/logcat?hl=tr>. Accessed: Sep. 3, 2025.
- [8] Y. Liu, X. Zhang, S. He, H. Zhang, L. Li, Y. Kang, and D. Zhang, "Uniparser: A unified log parser for heterogeneous log data," in *Proc. ACM Web Conf.*, Apr. 2022, pp. 1893–1901.
- [9] H. Çakır and M. S. Kılıç, *Adli Bilişim ve Elektronik Deliller*. Ankara, Turkey: Seçkin Yayıncılık, 2014, p. 275.
- [10] A. Utku, "Güvenlik duvarlarındaki ağ trafiği log kayıtlarının analizinde açıklanabilir yapay zekâ ve derin sinir ağlarının kullanımı: Karşılaştırmalı bir analiz," *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 40, no. 3, pp. 587–608, 2024.
- [11] N. T. Nguyen, T. T. Pham, T. X. Dang, M.-S. Dao, D.-T. Dang-Nguyen, C. Gurrin, and B. T. Nguyen, "Malware detection using system logs," in *Proc. 2020 Intelligent Cross-Data Analysis and Retrieval Workshop (ICDAR '20)*, Dublin, Ireland, Oct. 2020, doi: 10.1145/3379174.3392318.
- [12] S. Karagiannis, L. L. Ribeiro, C. Ntantogian, E. Magkos, and L. M. Campos, "Chidroid: A mobile Android application for log collection and security analysis in healthcare and IoMT," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 5, Art. 3061, Feb. 27, 2023, doi: 10.3390/app13053061.
- [13] G. Horsman and L. R. Conniss, "Investigating evidence of mobile phone usage by drivers in road traffic accidents," *Digital Investigation*, vol. 12, no. S1, pp. S30–S37, 2015. [Online]. Available: https://dfirws.org/sites/default/files/session-files/2015_EU_paperinvestigating_evidence_of_mobile_phone_usage_by_drivers_in_road_traffic_accidents.pdf
- [14] Y. Shin, S. Kim, W. Jo, and T. Shon, "Digital forensic case studies for in-vehicle infotainment systems using Android Auto and Apple CarPlay," *Sensors*, vol. 22, no. 19, p. 7196, 2022.
- [15] J. Bellizzi, M. Vella, C. Colombo, and J. C. Hernandez-Castro, "Using infrastructure-based agents to enhance forensic logging of third-party applications," in *Proc. ICISSP*, Feb. 2023, pp. 389–401.
- [16] P. C. Patel, P. M. Bhatt, U. Parmar, and K. Bhavsar, "A forensic perspective on the use of event viewer for detecting malicious activities and ensuring system integrity," *ShodhKosh: J. Visual Perform. Arts*, vol. 5, no. 1, pp. 3250–3256, 2024, doi: 10.29121/shodhkosh.v5.i1.2024.5975.
- [17] J. Jung, S. Han, M. Park, and S. J. Cho, "Automotive digital forensics through data and log analysis of vehicle diagnosis Android apps," *Forensic Science International: Digital Investigation*, vol. 49, 301752, 2024. [Online]. Available: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4579305
- [18] J. H. Lee, S. H. Lim, B. Hyeon, O. Y. Jeon, J. J. Park, and N. I. Park, "Tesla log data analysis approach from a digital forensics perspective," *World Electr. Veh. J.*, vol. 15, no. 12, p. 590, 2024.
- [19] J. A. Bessa, R. Miranda Filho, G. Souza, R. Barreto, and R. de Freitas, "Log parsers' performance on raw logs from Android devices," *J. Internet Serv. Appl.*, vol. 16, no. 1, pp. 105–116, 2025.
- [20] J. Olegård, S. Axelsson, and Y. Li, "When is logging sufficient?—Tracking event causality for improved forensic analysis and correlation," *Forensic Sci. Int.: Digit. Invest.*, vol. 52, p. 301877, 2025, doi: 10.1016/j.fsidi.2025.301877.
- [21] S. Pavani, L. S. Naga, N. Manoja, and E. Karthik, "An integrated forensic logger for Android devices: Multisource user activity reconstruction," *Int. Res. J. Mod. Eng. Technol. Sci.*, vol. 7, no. 6, pp. 5244–5250, Jun. 2025, doi: 10.56726/IRJMETs80449.
- [22] S. Jadhav, K. Kondhare, S. Mulik, J. Panchal, and M. Kale, "Implementation and evaluation of an automated Android log extraction tool for digital forensics," *Int. J. Adv. Res. Sci. Commun. Technol.*, vol. 5, no. 5, p. 213, Jun. 2025, doi: 10.48175/IJARsCT-27730.
- [23] S. Cho, H. Seong, H. Kang, S. J. Cho, and B. Kang, "Forensic investigation of vehicle-related data in Android phones connected to In-Vehicle Infotainment systems," *Computer Networks*, 111370, 2025. [Online]. Available: <https://eprints.soton.ac.uk/503333/>
- [24] C. C. C. Cheng, C. Shi, N. Z. Gong, and Y. Guan, "Logextractor: Extracting digital evidence from Android log messages via string and taint analysis," *Forensic Sci. Int.: Digit. Invest.*, vol. 37, p. 301193, 2021, doi: 10.1016/j.fsidi.2021.301193



Ultra Kısa Vadeli Rüzgar Enerjisi Tahmininde Gelişmiş Optimizasyon ve Hibrit Derin Öğrenme Modellerinin Kullanımı: Hatay, Türkiye Örneği

Orkun TEKE^{a,*}, Tolga DEPCİ^b

^{a,*}. Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, ŐEHİR, Posta Kodu, ÜLKE

^b İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği Bölümü, MANİSA, 45140, TÜRKİYE

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 20.09.2025
Kabul: 26.11.2025

Anahtar Kelimeler:

Rüzgar gücü kestirimi,
ultra-kısa dönem tahmin,
CNN-LSTM, GRU-
LSTM, RFECV, Optuna,
DBSCAN, SCADA

*Sorumlu Yazar

e-posta:
orkunteke@gmail.com

ÖZET

Bu çalışma, Bu çalışma, ultra kısa vadeli rüzgar enerjisi tahmininde doğruluğu ve kararlılığı artırmak amacıyla tasarlanmış uçtan uca bir veri hattı ile hibrit derin öğrenme yaklaşımlarının performans karşılaştırmasını sunmaktadır. SCADA tabanlı çok değişkenli verilere, anomali giderme işlemi DBSCAN ile, özellik seçimi ise RFECV tabanlı olarak uygulanmıştır. Optuna gibi gelişmiş bir hiperparametre optimizasyon aracı, ilerici arama ve budama stratejileri kullanarak modelleri (SDAE temel, CNN-LSTM ve GRU-LSTM) eğitmiştir. Performans, t+1'den t+6'ya kadar MAE, RMSE ve R² metrikleriyle değerlendirilmiştir. Bulgular, hibrit mimarilerin temel (SDAE) modele kıyasla önemli bir üstünlük sergilediğini göstermektedir: CNN-LSTM tüm ufuklarda sürekli olarak yüksek doğruluk sergilerken, GRU-LSTM özellikle en kısa ufukta (t+1'de R²=0.9976) en düşük hata değerlerini üretmiştir. CNN-LSTM'nin kararlılığı ufuk uzadıkça korunmuş ve t+6'da bile R²=0.79'luk yüksek bir performans elde edilmiştir. Bu çalışma, en kısa vadeli tahminler için GRU-LSTM, ufuk uzadıkça daha kararlı tahminler için ise CNN-LSTM'in operasyonel kullanımını önermektedir. Sonuçlar, hibrit modellerin endüstriyel uygulamalar için güvenilir bir temel oluşturduğunu ve belirsizlik modellemesi ile Sayısal Hava Tahmini (NWP) entegrasyonu ile daha ileri kazanımlar elde edilebileceğini göstermektedir.

DOI: 10.59940/jismar.1787678

Use of Advanced Optimization and Hybrid Deep Learning Models in Ultra-Short-Term Wind Energy Forecasting: The Case of Hatay, Türkiye

ARTICLE INFO

Received: 20.09.2025
Accepted: 26.11.2025

Keywords:

Wind power forecasting,
ultra-short term forecast,
CNN-LSTM, GRU-
LSTM, RFECV, Optuna,
DBSCAN, SCADA

*Corresponding Authors

e-mail:
orkunteke@gmail.com

ABSTRACT

This study presents a performance comparison of hybrid deep learning approaches with an end-to-end data pipeline designed to enhance accuracy and stability in ultra-short-term wind power forecasting. Anomaly removal using DBSCAN and feature selection based on RFECV are applied to multivariate SCADA-based data. An advanced hyperparameter optimization tool, Optuna, trained the models (SDAE baseline, CNN-LSTM, and GRU-LSTM) using progressive search and pruning strategies. Performance is evaluated using MAE, RMSE, and R² metrics from t+1 up to t+6 horizons. The findings indicate a significant superiority of the hybrid architectures over the baseline (SDAE) model: CNN-LSTM maintains consistently high accuracy across all horizons, while GRU-LSTM yields the lowest error metrics specifically at the shortest horizon (achieving an R²=0.9976 at t+1). The stability of the CNN-LSTM is maintained as the forecasting horizon extends, achieving a respectable performance of R²=0.79 even at t+6. This work proposes the operational use of GRU-LSTM for the shortest-term forecasts and CNN-LSTM for more stable predictions as the horizon lengthens. The results demonstrate that hybrid models establish a reliable foundation for industrial applications and suggest further gains are possible through the integration of uncertainty modeling and Numerical Weather Prediction (NWP).

DOI: 10.59940/jismar.1787678

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The growing global demand for energy and efforts to combat climate change have made the integration of sustainable energy sources a critical priority. Wind energy, one of the fastest-growing components of the renewable energy portfolio, plays a strategic role in reducing dependence on fossil fuels. As of 2023, global wind energy capacity has exceeded 900 gigawatts (GW), meeting approximately 7% of the world's electricity demand. Turkey has also emerged as a major player in this field, with its total installed wind energy capacity exceeding 12 GW by the end of 2023, providing approximately 11% of the country's electricity production [1-2-3]. However, the inherent variability and intermittent production structure of wind energy create significant challenges for grid integration and energy system management [4]. Sudden changes in wind speed and complex atmospheric conditions are among the most important factors that reduce the accuracy of forecasting models [5]. Therefore, accurate and reliable wind power forecasting is vital for increasing operational efficiency, ensuring grid stability, and improving economic efficiency in energy markets. In this context, ultra-short-term (less than one hour) wind power forecasts have become essential for regulating instantaneous operational activities and maximizing plant profitability[6].

In the field of wind power forecasting, there has been a significant evolution from traditional statistical methods towards more advanced machine learning and deep learning algorithms. In particular, hybrid deep learning architectures (such as Convolutional Neural Networks-Long Short Term Memory (CNN-LSTM) and Gated Recurrent Unit (GRU)- LSTM), thanks to their ability to model complex temporal and spatial relationships in sequential data, offer promising results in wind power forecasting. However, despite these developments, research is needed to optimize data quality and model parameters to further advance model performance [7-8].

This study aims to present a new methodological approach for ultra short term wind power prediction using high-resolution data obtained from a wind power plant in Hatay province. First, during the data preprocessing stage, the Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) algorithm was applied to clean up erroneous and noisy points commonly encountered in wind energy data. Then, to determine the most relevant features to be used in model training, the Recursive Feature Elimination with Cross Validation (RFECV) method, a model performance-focused method frequently used in the literature, was applied. In the modeling phase,

the Stacked Denoising Autoencoder (SDAE), a baseline model, was compared with CNN-LSTM and GRU-LSTM models, hybrid architectures proven effective in the literature. To achieve optimal performance for all models, Optuna, a modern hyperparameter optimization tool rarely used in the Turkish literature in this field, was utilized. This comprehensive approach aims not only to improve prediction accuracy but also to enhance the model's generalization ability and robustness. The findings of this study will provide valuable insights for more reliable and practical prediction solutions for the energy sector.

1.1. Literature Review (Literatür Taraması)

Wind energy forecasting is divided into different classes and sections. These are classified according to the forecasting time frame as 'Ultra Short-Term Forecasting (less than one day), Short-Term Forecasting (1 Day- 1 Week), Medium-Term Forecasting (1 Month- 1 Year), Long-Term Forecasting (More than 1 Year)' [9-10-11]. The main reason for selecting 'Ultra Short-Term Forecasting' in this study is to help organize instant operational activities, which is one of the important operational steps in power plants to maintain maximum profitability. Ensuring grid stability, preventing control and optimization problems, providing more accurate bids to electricity markets, reducing financial losses due to forecasting errors, and ensuring that actual production is in line with commitments are among the most important problems to be solved [12]. Ultra short-term wind energy forecasting is crucial for mitigating the intermittent nature of wind energy and improving grid integration. Recent research has explored various approaches to improve forecast accuracy. Multivariate multi-step reanalysis, when combined with multivariate linear regression, has shown promising results in improving forecast accuracy [13-14].

A systematic review by [15] reported that studies generally focused on either long horizons or ultra-short periods. Specifically, [16] calculated the first three steps using different hybrid models and found a reduction of around 40% compared to classical models. Advances in ultra-short-term forecasting methods have accelerated, increasing accuracy and reliability through multivariate, multistep wind power forecasting techniques. A review of recent studies reveals that various models integrating complex algorithms and data decomposition techniques have been presented to improve forecast performance, as presented by [17] and [18].

DBSCAN algorithm used in this study has emerged as an important tool for data preprocessing in wind forecasting studies, providing valuable and accurate results. The algorithm, which effectively identifies and separates noise and anomalous data points, increases the accuracy of wind power forecasts and has been used in the industry since the 2010's [19-20-21]. RFECV selects optimal feature combinations based on statistical importance measures, effectively reducing forecasting errors when combined with neural networks [22].

The SDAE used in this study served as the baseline model and was included for comparison purposes. This model was chosen because it represents the fundamental level of machine learning algorithms, is widely used in industry, and is still employed in literature for different hybrids or different purposes [23-24]. SDAE algorithms can effectively capture complex patterns in wind energy data characterized by high volatility and non-linear relationships, providing an advantage over conventional classification algorithms [25-26-27-28].

Recent developments have focused on improving the accuracy of wind energy forecasting through the development of hybrid models consisting of CNN and LSTM networks. These models utilize the spatial data processing capabilities of CNN and the temporal data processing capabilities of LSTM. CNN-LSTM algorithms that predict wind speed, which is critical for wind power forecasting [29-30-31-32] are then used for power forecasting.

Numerous studies in the literature have investigated the application of CNN-LSTM models for predicting wind energy. The common point of these studies is to demonstrate the potential of CNN-LSTM models for accurate wind energy prediction by focusing on high-quality feature extraction [33-34-35]. [36] demonstrated high performance in predicting wind turbine power generation and demand with minimal error in short prediction intervals using their CNN-LSTM Hybrid. Some studies present a short-term wind power prediction model using a CNN-LSTM deep learning approach enhanced with multi-feature extraction and data clustering or feature selection using gray correlation analysis [37-38].

Another method used, GRU-LSTM hybrids, is also widely reported in the literature. Accuracy rates have been increased, particularly with the integration of Variational Mode Decomposition and Seq2Seq (Sequence-to-Sequence) models, and these models have proven promising in multi-step forward forecasting for both short-term and nationwide forecasts [39-40-41]. [42] developed multi-step ahead

forecasting models using LSTM-GRU with wind speed correction processes, demonstrating superiority over traditional methods. In [43] a hybrid GRU-LSTM model outperforms individual LSTM and GRU models in short-term wind power forecasting.

[44] noted that Optuna's main search function, the Tree-Based Partial Distribution Estimator, outperformed Grid Search and Random Search in many hyperparameter optimization problems. Another important reason is the mechanism for stopping 'unnecessary' or inefficient trials. This approach is called the 'Pruning' mechanism. [45] showed that Optuna's pruning mechanisms can provide up to 50% computational savings in training deep learning models. [46] compared Scikit-opt, Optuna, and Hyperopt for optimizing CNN and LSTM models and found Optuna to be the most efficient for both. [47] found in their study that an Optuna-optimized hybrid deep learning model improved ultra short-term wind energy production forecasting.

Optuna offers significant potential for advancement in the field of hyperparameter optimization. With features such as dynamic search space definition, efficient search algorithms, pruning mechanisms, and parallelization support, it has become a valuable tool for both researchers and practitioners.

2. MATERIAL AND METHOD (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Dataset (Veri Seti)

In this study, the dataset obtained from a wind power plant in Turkey corresponds to the measurements of a single turbine. Through the SCADA system, wind turbines record parameters such as wind direction, wind speed, and generated power. The dataset consists of 192.082 entries collected at 10-minute intervals, covering the period from January 1, 2019, 00:00:00 to August 31, 2022, 23:50:00.

2.2. Exploratory Data Analysis (Keşifsel Veri Analizi)

Exploratory Data Analysis (EDA) is conducted to better understand the dataset and analyze the relationship between each attribute and wind power. The dataset used in this study contains the following basic information:

- *Date*: all timestamps with a 10-minute interval.
- *Wind Speed-WS (m/s)*: Wind speed measured at the turbine.
- *Wind Direction-WD (°)*: The direction of the wind.
- *Pitch Angle-PA (°)*: Defines the structural tilt angle.

□ *Temperature-T* (°C): Temperature measured by a meteorological sensor.

□ *Power (kW)-P*: The actual power generated by the wind turbine in each period.

Statistical information about the dataset is also shown in Table 1. Also, presented in Figure 1.

Table 1. Statistical info about dataset
(Datasetle ilgili istatistiksel bilgi)

	WS	WD	PA	T	P
Mean	7.10	258.80	2.85	16.43	800.96
Std	2.83	96.94	15.85	7.14	752.07
Min.	0	0	-3.50	-3	-32.40
Max	25.80	1000	88.40	38	3001



Figure 1. Visualized dataset
(Görselleştirilmiş dataset)

Overall, the dataset exhibits a reasonable range of values for most parameters, but certain anomalies, such as extreme wind direction values and negative power values, suggest further investigation. As such, the dataset is not ideal for machine learning algorithms, so outlier elimination was first performed, followed by feature elimination.

2.3. Data Preprocessing (Data Ön İşleme)

The 734 empty values in the dataset are insignificant given the size of the dataset. Nevertheless, they have been filled with the previous value. After completing the missing data in the dataset, we moved on to identifying outliers in the dataset. In statistical terms, outliers are data instances that depart significantly from the general pattern of the dataset. In sensor data, outliers may indicate hardware malfunctions or measurement errors. These values can distort statistical measures (e.g., mean, variance) and misrepresent trends [48]. Outliers showed in Figure 2.

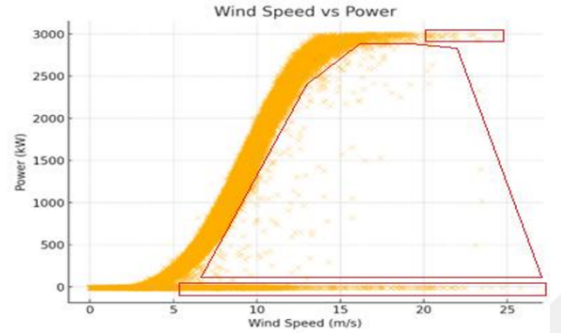


Figure 2. Outliers
(Aykırı Noktalar)

The lowest region indicates points where the turbine is not generating energy or is drawing power, and if included in machine learning, it will degrade data quality and negatively impact prediction performance. The middle region may contain measured values in cases such as SCADA system errors, sensor errors, etc. The highest error values indicate deviations in the plateau region. When selecting the DBSCAN algorithm parameters used to remove these regions from the data, the algorithm was adjusted to select the best parameters, and the epsilon value was determined based on the k-distance parameter (Figure 3). The fundamental premise underlying the DBSCAN algorithm is as follows: assuming there is a set of points in space for clustering, an ‘ ϵ ’ value is also assumed to be the proximity distance relative to certain points. ‘ ϵ ’ defines the maximum distance between two points for them to be considered part of the same cluster. ‘MinPts’ indicates the minimum number of points required to form a cluster. The epsilon value of 0.025 was found to be optimal. All parameters used are shown in Table 2.

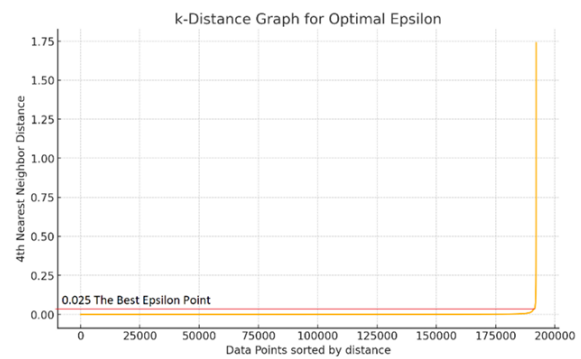


Figure 3. K-distance plot for optimal epsilon
(Optimal epsilon için k- mesafe grafiği)

Table 2. DBSCAN parameters
(DBSCAN parametreleri)

DBSCAN Parameters	Value
k- Distance	4
Min_samples	5
epsilon	0.025

The cleaned power curves together with the outlier determined as a result of the operations performed are presented in Figure 4.

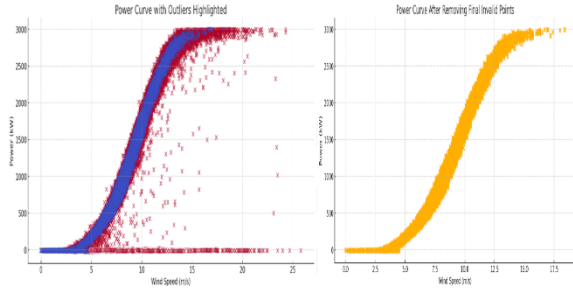


Figure 4. Outliers and cleaned dataset after DBSCAN

(Aykırı Noktalar ve DBSCAN sonrası temizlenmiş dataset)

An examination of the DBSCAN process reveals that the ideal power curve has been achieved. The most crucial consideration here is, of course, minimizing data loss. Because in the real world, data is valuable and fuels machine learning algorithms, used to improve their work and learning. Since time series forecasting will also be conducted at this stage, care was taken to ensure the data structure was not disrupted. The data timeframe was increased from 10 minutes to 10 minutes and 25 seconds during this stage, ensuring minimal impact on the study. Of the 192,082 data points in the data set, 6,901 were identified as outliers. This means 3.6% of the data set was lost. The temporal characteristics of the data set were not compromised. [49-50-51-52-53] have demonstrated that, in operational forecasting models, retraining the model without the missing inputs yields better performance than imputing the missing values through regression based on the available inputs. When the mentioned studies and the general literature are examined, removing noisy data in the range of '1% to 5%' is considered acceptable.

After DBSCAN part, normalization applied to cleaned dataset. That preprocessing step is critical to ensuring that machine learning models interpret features uniformly and that variables with larger numerical ranges do not suppress and mislead the learning process [54]. Common normalization techniques include minimum-maximum scaling, which maps values to a predefined range (e.g., [0, 1]), and z-score standardization, which centers the data around a zero

mean with unit variance [55-56]. In this study, we used the minimum-maximum normalization [0,1], which is also frequently used in the literature.

2.4. Feature Engineering (Öznitelik Mühendisliği)

Even if to obtain the correct power curve for the study, it is still impossible to completely clean the data from SCADA. Furthermore, losing large datasets would compromise the accuracy of the study. Since hybrid deep neural networks were used in this phase of the study, the steps used in the general literature were applied. Creating the x and y components of the wind direction for wind power estimation (Figure 5) and adding these data to the dataset is a common approach in wind energy forecasting studies. These components are crucial features for accurately predicting wind power production and optimizing turbine performance [57].

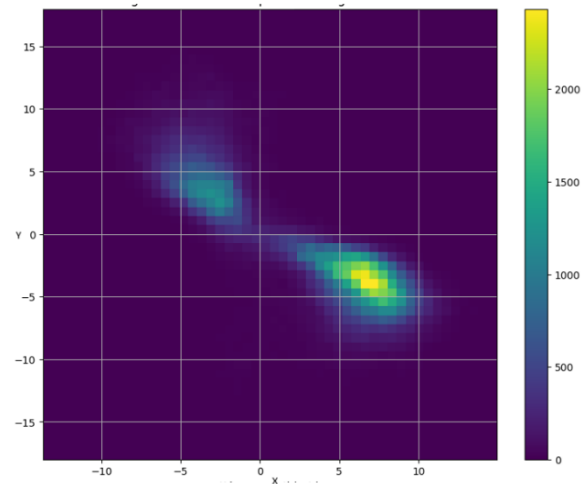


Figure 5. x and y components of wind
(Rüzgarın x ve y componentleri)

Additionally, in studies using time-series data, it is important to increase model accuracy by leveraging information obtained from past observations. To achieve this, time lags must be added.

Furthermore, in studies conducted with time series data, it is important to increase model accuracy using information obtained from past observations. To achieve this, time lags must be added. The six time lags estimated within the scope of the study were added to the dataset as $t+1$, $t+2$, $t+3$, $t+4$, $t+5$, and $t+6$. In addition to these data, coding time variables as sine and cosine provides a continuous representation that eliminates the arbitrary discontinuities found in other coding methods. Time data was also added as "Hourcos-Hoursin -DayofWeekSin-DayofWeekCos-MonthSin-MonthCos". In addition, the cubed wind speed (*WindSpeedCube*) was added to the dataset as a

rolling mean for each feature (e.g., *PowerRollingMean*).

2.4.1 RFECV (*RFECV*)

It is a frequently used method in the literature that systematically removes weaker features from a model and validates the performance at each step, demonstrating a wrapper-based approach to feature selection. Initially, a selected base model (e.g., a linear model or a tree-based estimator) is trained using all candidate features. Then, features deemed least important based on model-specific importance scores or coefficient sizes are removed. This process continues iteratively, reducing the feature set and retraining the model each time. Simultaneously, cross-validation is used to evaluate the predictive performance of each reduced model and helps identify the optimal feature subset that balances simplicity and accuracy [58]. Consequently, RFECV promotes a more interpretable model, reduces the risk of overfitting, and can significantly reduce computational burden by focusing on the most effective predictors [59]. After applying RFECV, 39 of the 60 features in the dataset were selected, as seen in Figure 6, and the machine learning phase started.

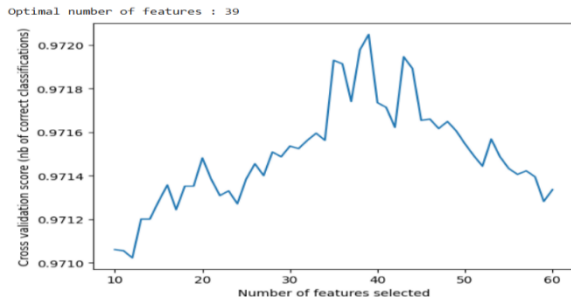


Figure 6. RFECV results
(*RFECV sonuçları*)

Selected attributes are also seen in Table 3. Also, feature importance shown in Figure 7.

Table 3. Parameters Selected by RFECV
(*RFECV ile Seçilen parametreler*)

Selected Parameters	WindSpeedCube, WindSpeed, Power_lag_1, WindSpeed_lag_1, PitchAngle, Power_lag_3, Power_lag_2, PowerRollingMean, Power_lag_4, WindSpeed_lag_5, WindSpeed_lag_2, WindSpeedRollingMean, Power_lag_5, y_com, x_com, WindSpeed_lag_3, Power_lag_6, PitchAngle_lag_3, PitchAngle_lag_2, PitchAngle_lag_1, WindSpeed_lag_6, WindSpeed_lag_4, PitchAngle_lag_5, PitchAngle_lag_4, y_com_lag_2, y_com_lag_1, x_com_lag_5, x_com_lag_3, x_com_lag_1, PitchAngle_lag_6, WindDirection, y_com_lag_6, x_com_lag_4, x_com_lag_2, x_com_lag_6, WindDirection_lag_4, WindDirection_lag_3, WindDirection_lag_2, WindDirection_lag_1
----------------------------	--

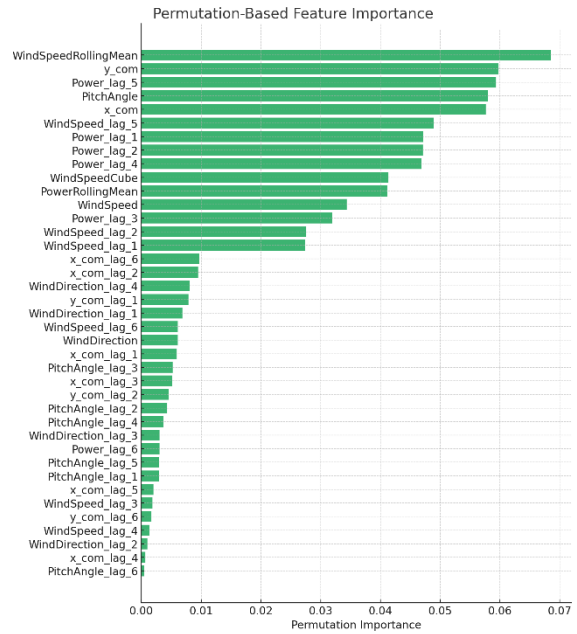


Figure 7. Feature Importance
(*Feature Importance Scores*)

2.5. Deep Learning Algorithms (*Derin Öğrenme Modelleri*)

For time-series forecasting, the dataset was divided into 144 steps, and six-hour samples were generated. From these samples, we attempted to predict the values that could occur in the first six steps, or the first hour. The results obtained by machine learning algorithms learning from each 144-hour time window were compared with their unique capabilities. A forward-looking forecasting process based on the Fixed-Origin Rolling Window approach has been implemented.

Within the scope of the study, SDAE was selected as the Baseline model and CNN-LSTM and GRU-LSTM were used as the main comparison models.

2.5.1. SDAE Model (*SDAE Modeli*)

SDAE, used in this study, is defined as an extension of traditional autoencoders, distinguished by its ability to extract clean and meaningful features from noisy data. The architecture essentially consists of an encoder, a bottleneck layer, and a decoder. The encoder progressively transforms the input data into a lower-dimensional representation, while the decoder aims to reconstruct the original data from this representation. The SDAE architecture provides a powerful deep learning model that can be effectively used for both reconstruction and prediction tasks on

time series data. Used SDAE architecture presented in Figure 8.

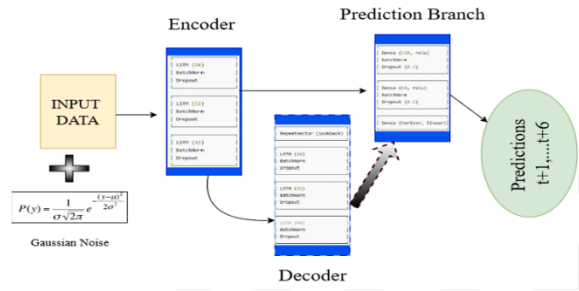


Figure 8. SDAE architecture
(SDAE mimarisi)

This architecture is an LSTM-based stacked autoencoder with added denoising capabilities for time series forecasting. Gaussian noise is injected into the multivariate input sequence from SCADA during training, allowing the model to learn to extract meaningful patterns from the corrupted data. The encoder consists of consecutive LSTM layers (64, 128, and 16 nodes). After each layer, Batch Normalization (which stabilizes training) and Dropout (which reduces overfitting) are applied. This layer compresses the dynamics in the past window to produce a latent representation. The decoder reconstructs the input by multiplying this representation to the target window length with RepeatVector and re-expanding it with LSTM layers (32, 64, and 80 nodes). This enhances the noise-free representation through a reconstruction loss such as the mean square error. Simultaneously, the encoder output is fed into the prediction branch (dense layers containing BatchNorm/Dropout), which produces multi-step outputs ($t+1 \dots t+6$); i.e., the architecture is optimized for both denoising (reconstruction) and multi-step forward prediction in a multi-task manner. Batch size selected as 32, number of epochs is 100 and early stop patience is 10. As a result, the model exhibits noise-resilience, high generalization, and more stable performance in short- to medium-term time series predictions.

2.5.2. CNN- LSTM Model (CNN- LSTM Modeli)

This model integrates CNNs and LSTM networks, leveraging the strengths of both architectures to extract spatial features and model temporal dependencies from sequential data, respectively. In the architecture used (Figure 9) in this study, LSTM layers sequentially process the repetitive vector and attempt to capture the temporal dependencies and dynamics in power generation data. The use of multiple LSTM layers allows for a deep recurrent architecture capable of learning increasingly complex temporal patterns, such as seasonal trends, daily

cycles, or long-term changes in power generation. The "Time Distributed" label associated with the LSTM layers is included in the template to indicate that the LSTM output is distributed across time steps, producing a series of predictions for each time point within the output horizon. Parameters shown in Table 4.

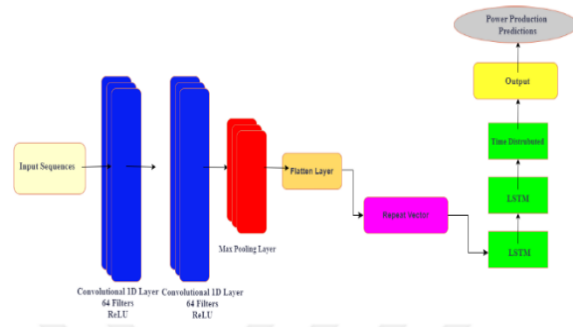


Figure 9. CNN-LSTM architecture
(CNN-LSTM mimarisi)

Table 4. Selected values in architecture
(Mimaride seçilen değerler)

Hyperparameter	Value
conv1_filters	64
conv1_kernel	2
Add_conv_layer	True
conv2_filters	64
conv2_kernel	2
lstm1_units	64
lstm2_units	32
dense_units	16
dropout	0,1
Batch size	32
learning_rate	0.0001
Number of epochs	100
Early stopping patience	10

2.5.3. GRU- LSTM Model (GRU- LSTM Modeli)

The GRU-LSTM architecture presented in this study exemplifies a complex hybrid recurrent neural network framework designed for multi-horizon time series forecasting in the field of wind power forecasting. This sequential double-recursive architecture utilizes a hierarchical approach where input temporal data is first passed through the GRU layer, which acts as an initial feature extractor capable of capturing relevant patterns in multivariate time series data. The GRU layer processes the input tensor and transforms it into a latent representation, effectively encoding the temporal dynamics present in the wind power data. Each processed sequence is then subjected to batch normalization to stabilize and accelerate the learning process, which is expected to

further improve the model's convergence properties during training. Following the GRU process, the normalized latent representations are fed to the LSTM layer, which further enhances temporal feature extraction through more complex gating mechanisms. The LSTM layer attempts to effectively capture both short-term dependencies and long-term temporal correlations in the data by creating a higher-level abstraction of temporal patterns. This dual iterative architecture attempts to leverage the complementary strengths of both iterative units. The GRU algorithm's processing efficiency and ability to mitigate the vanishing gradient problem with fewer parameters, coupled with LSTM's advanced memory cell structure, which excels at preserving information across extended sequences, were instrumental in creating such a hybrid architecture. The prediction phase consists of a sequence of fully connected layers interspersed with dropout regularization to prevent overfitting. Specifically, the final hidden state from the LSTM layer is extracted and passed through the dropout layer, followed by a fully connected layer with ReLU activation. Following another dropout layer, the final fully connected layer produces a six-dimensional output vector representing predictions for six future time horizons (Figure 10).

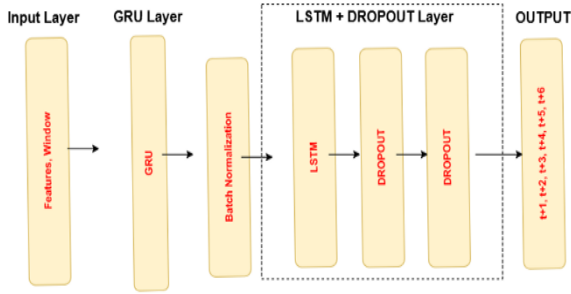


Figure 10. GRU-LSTM architecture
(GRU-LSTM mimarisi)

Parameters shown in Table 5.

Table 5. Selected values in architecture
(Mimaride seçilen değerler)

Hyperparameter	Value
gru_hidden_size	64
lstm_hidden_size	32
num_layers	2
batch_size	32
dropout	0,2
learning_rate	0.0001
Number of epochs	100
Early stopping patience	10

2.5.4. Optuna Hyperparameter Optimization (Optuna Hiperparametre Optimizasyonu)

The performance of a machine learning algorithm is directly proportional to how it is designed. At this stage, the parameter assignments used in the design and constituting the whole are needed. These parameters are generally referred to as "hyperparameters." Accurately determining these hyperparameter values and integrating them into the model is crucial [60].

[61] reported that Optuna's main search function, the Tree-Structured Parzen Estimator, outperforms Grid Search and Random Search on many hyperparameter optimization problems. Another important reason is its mechanism for stopping "unnecessary" or inefficient trials. This approach is referred to as "pruning". The ranges of hyperparameter spaces explored for the SDAE, CNN-LSTM, and GRU-LSTM algorithms in this study are summarized in Tables 6, 7, and 8.

Table 6. SDAE Hyperparameter Search Ranges
(SDAE Hiperparametre arama uzayı)

Hyperparameter	Min Value	Max Value
encoder_lstm1_units	8	256
encoder_lstm1_dropout	0.1	0.5
encoder_lstm2_units	8	256
encoder_lstm2_dropout	0.1	0.5
decoder_lstm1_units	8	256
decoder_lstm1_dropout	0.1	0.5
decoder_lstm2_units	8	256
decoder_lstm2_dropout	0.1	0.5
dropout	0,1	
learning_rate	0.0001	0.1
activation_func	RELU Sigmoid	Tanh Softmax

Table 7. CNN-LSTM Hyperparameter Search Ranges
(CNN-LSTM Hiperparametre arama uzayı)

Hyperparameter	Min Value	Max Value
conv1_filters	32	128
conv1_kernel	2	5
Add conv layer	True	False
conv2_filters	16	64
conv2_kernel	2	5
lstm1_units	32	128
lstm2_units	16	64
Dense units	16	64
Dropout	0.1	0.5
learning_rate	0.0001	0.1
Activation func	RELU Sigmoid	Tanh Softmax

Table 8. GRU-LSTM Hyperparameter Search Ranges
(GRU-LSTM Hiperparametre arama uzayı)

Hyperparameter	Min Value	Max Value
Gru hidden size	16	128
Lstm hidden size	16	128
num layers	2	5
Batch size	16	64
dropout	0,1	0.5
learning rate	0,1	0,0001
Activation func	RELU Sigmoid	Tanh Softmax

Also, To ensure reproducibility of Optuna hyperparameter optimization experiments, the key parameters used and their computational costs are presented in the Table 9.

Table 9. Optuna Experiment Settings
(Optuna Deney Ayarları)

Parameters	SDAE	CNN-LSTM	GRU-LSTM
Trials	100	100	100
Objective Metric	RMSE	RMSE	RMSE
Pruning	Median Pruner	Median Pruner	Median Pruner
Pruning Frequency	3 epochs	3 epochs	3 epochs
Train/ Test (%)	70/30	70/30	70/30
GPU	Tesla K80 (single)	Tesla K80 (single)	Tesla K80 (single)
Total Optimization Time	~28 Hours	~36 Hours	~45 Hours
Random Seed	42	42	42

3. RESULTS (SONUÇLAR)

3.1. SDAE Results (SDAE Sonuçları)

The SDAE model's best parameters were first selected using the Optuna hyperparameter search tool (Table 9), and the estimation phase was initiated. During the estimation phase, the "Early Stop" mechanism was used to avoid overfitting or underfitting. These processes were also monitored using the resulting "Loss Plot" (Figure 11). Table 11 presents the results obtained for each estimation step.

Table 10. SDAE Selected Hyperparameter by Optuna
(Optuna tarafından seçilen SDAE Hiperparametreleri)

Hyperparameter	Selected Value
encoder lstm1 units	32
encoder lstm 1dropout	0.2
encoder lstm2 units	66
encoder lstm 2dropout	0.2
decoder lstm1 units	34
decoder lstm 1dropout	0.2
decoder lstm2 units	33
decoder lstm 2dropout	0.2
dropout	0,3
learning rate	0,0001
Activation func	Tanh

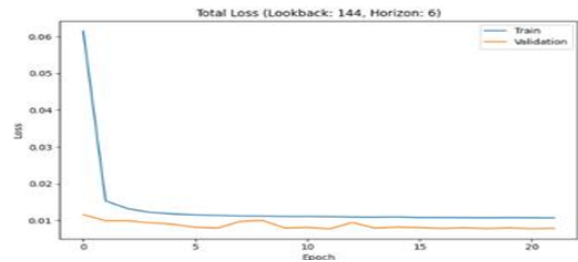


Figure 11. SDAE Loss
(SDAE Kayıp)

Table 11. SDAE Model Metrics
(SDAE Model Metrikleri)

Step	MAE	RMSE	R ²
t+1	0.0557	0.0802	0.8853
t+2	0.0663	0.0971	0.8417
t+3	0.0728	0.1093	0.8092
t+4	0.0785	0.1152	0.7818
t+5	0.0831	0.1273	0.7583
t+6	0.0874	0.1334	0.7367

These error metrics indicate that the model's prediction performance gradually decreases as the number of steps increases. While the MAE (0.0557) and RMSE (0.0802) values were relatively low in the first step, R² (0.885) was high, indicating that the model initially explained 88.5% of the variance and provided a good fit. However, by step 6, a significant increase in the MAE (0.087) and RMSE (0.133) values indicates that the prediction errors increased both in absolute and percentage terms, and the model weakened in long-term predictions. The decrease in R² to 0.737 indicates that the model's explanatory power has decreased over time, with error accumulation particularly significant after step 4. Consequently, while the model performs acceptable in short-term forecasts, its reliability decreases as the number of

steps increases. This suggests the need for revision or a different model approach.

3.2. CNN-LSTM Results (CNN-LSTM Sonuçları)

The CNN-LSTM model's best parameters were first selected using the Optuna hyperparameter search tool (Table 12), and the estimation phase was initiated. During the estimation phase, the "Early Stop" mechanism was used to avoid overfitting or underfitting. These processes were also monitored using the resulting "Loss Plot" (Figure 12). Prediction results shown in Figure 13 as graphic. Table 13 presents the results obtained for each estimation step.

Table 12. CNN-LSTM Selected Hyperparameter by Optuna

(Optuna tarafından seçilen CNN-LSTM Hiperparametreleri)

Hyperparameter	Selected Values
conv1 filters	76
conv1 kernel	3
Add conv layer	True
conv2 filters	23
conv2 kernel	2
lstm1 units	98
lstm2 units	31
Dense units	55
dropout	0.3
Learning rate	0.0001
Activation func	RELU

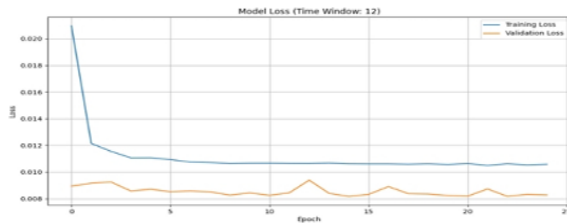


Figure 12. CNN-LSTM Loss
(CNN-LSTM Kayıp)

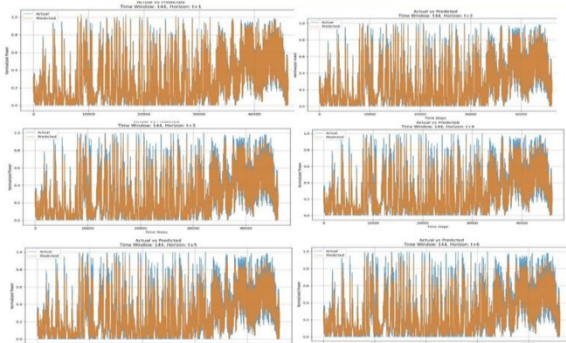


Figure 13. CNN-LSTM Predictions
(CNN-LSTM tahminleri)

Table 13. CNN- LSTM Model Metrics
(CNN-LSTM Model Metrikleri)

Step	R ²	MAE	MSE	RMSE
t+1	0.9922	0,0173	0.0009	0.0237
t+2	0.9273	0,0452	0.0056	0.0686
t+3	0.8645	0,0574	0.0083	0.0862
t+4	0.8408	0,0649	0.0111	0.0974
t+5	0.8111	0,0711	0.0119	0.1056
t+6	0.7882	0.0763	0.0135	0.1123

Evaluating the results of the CNN-LSTM model, R² values, which measure the portion of difference in the dependent variable explained by the model, were significantly high across all horizons. They ranged from 0.9922 at t+1 to 0.7882 at t+6. At the shortest horizon (t+1), an R² of 0.9922 appears to indicate a very good fit, indicating that the model captures nearly all the variability in the data. However, as the forecast horizon lengthens, R² gradually decreases to 0.7882 at t+6. Although this decrease is expected due to increased uncertainty at longer horizons, the model maintains strong explanatory power (over 0.78) even at t+6, reflecting robust forecasting ability across the periods considered. MAE, which measures the average magnitude of errors in forecasts, increased steadily from 0.0174 at t+1 to 0.0764 at t+6. This trend suggests that the model's absolute forecast errors increase as the forecast horizon lengthens. The low MAE of 0.0173 at t+1 underscores high near-term accuracy, while the increase to 0.0763 at t+6 indicates a moderate increase in error, consistent with the difficulties of forecasting further into the future. The MSE and RMSE metrics, which emphasize larger errors due to squared terms, follow a similar pattern of increase across horizons. MSE increased from 0.0009 at t+1 to 0.0135 at t+6, while RMSE increased from 0.0226 to 0.1113 over the same period. The low MSE and RMSE values at t+1 (0.0237 and 0.1123, respectively) highlight the model's sensitivity to short-term forecasts. However, the gradual increase in both metrics reflects the increasing dispersion of errors as the horizon expands, and the RMSE at t+6 (0.1123) indicated that larger errors begin to have a more pronounced impact on overall performance.

3.3. GRU-LSTM Results (GRU-LSTM Sonuçları)

The CNN-LSTM model's best parameters were first selected using the Optuna hyperparameter search tool (Table 14), and the estimation phase was initiated. During the estimation phase, the "Early Stop" mechanism was used to avoid overfitting or underfitting. These processes were also monitored using the resulting "Loss Plot" (Figure 14). Prediction

results shown in Figure 15 as graphic. Table 15 presents the results obtained for each estimation step.

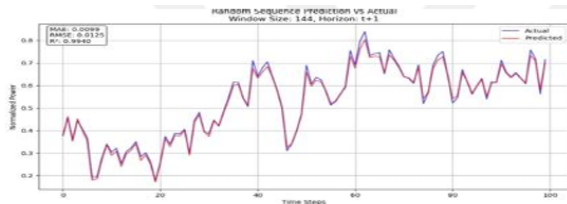
Table 14. GRU-LSTM Selected Hyperparameter by Optuna

(Optuna tarafından seçilen GRU-LSTM Hiperparametreleri)

Hyperparameter	Selected Value
Gru hidden size	113
Lstm hidden size	118
Num layers	1
Batch size	26
dropout	0.17
learning rate	0.006
Activation func	RELU



Figure 14. GRU-LSTM Loss



(CNN-LSTM Kayıp)
Figure 15. GRU-LSTM Predictions
(CNN-LSTM tahminleri)

Table 15. GRU- LSTM Model Metrics
(GRU- LSTM Model Metrikleri)

Adım	R ²	MAE	MSE	RMSE
t+1	0.9985	0.0085	0.0001	0.0131
t+2	0.9215	0.0470	0.0058	0.0798
t+3	0.8712	0.0621	0.0081	0.0930
t+4	0.8353	0.0702	0.0109	0.1011
t+5	0.8044	0.0778	0.0127	0.1116
t+6	0.7792	0.0835	0.0141	0.1198

When evaluating the results of the GRU-LSTM model, R² values, which measure the portion of difference in the dependent variable explained by the model, are as effective as CNN-LSTM models. They ranged from 0.9985 at t+1 to 0.7792 at t+6. MAE, which measures the average magnitude of errors in predictions, increased steadily from 0.085 at t+1 to 0.0835 at t+6. This trend indicates that the model's absolute prediction errors increase as the forecast horizon extends. However, it can still be said to be as

effective as the CNN-LSTM model. The MSE and RMSE metrics follow a similar pattern of increase across horizons. The MSE increased from 0.0001 at t+1 to 0.0141 at t+6, while the RMSE increased from 0.0131 to 0.1198 over the same period. The low MSE and RMSE at t+1 highlight the model's sensitivity to short-term forecasts. However, the gradual increase in both metrics reflects the increasing dispersion of errors as the horizon expands, and the RMSE at t+6 indicates that larger errors begin to have a more pronounced impact on overall performance.

4. CONCLUSION AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

When the components of the data processing and modeling pipeline proposed in this study for ultra-short-term (t+1...t+6; first 60 minutes) wind power forecasting are evaluated as a whole, two key findings emerge: (i) preprocessing and feature selection steps that improve data quality significantly contribute to forecasting performance; (ii) hybrid deep learning architectures (CNN-LSTM and GRU-LSTM) significantly outperform the baseline model (SDAE). Specifically, DBSCAN's denoising, Min-Max normalization, trigonometric time codes, and delay features, followed by RFECV's selection of 39 out of 60 features, created a more consistent and generalizable representation space for the models to learn from. This holistic design, combined with Optuna's progressive hyperparameter search and pruning mechanisms, increased both training efficiency and forecast accuracy.

While the baseline model (SDAE) provided an acceptable starting point over the first horizon step (MAE=0.0557; RMSE=0.0802; R²=0.8853 for t+1), errors accumulated and the explained variance decreased significantly as the horizon expanded (MAE=0.0874; RMSE=0.1334; R²=0.7367 for t+6). This pattern suggests that error propagation has a stronger impact on the baseline architectures in multi-step predictions.

In contrast, the CNN-LSTM model performed strongly across all horizons, capturing almost all of the variability in the data at t+1 with R²=0.9922 and MAE=0.0173. Although a natural decrease was observed as the horizon extended to t+6 (R²=0.7882; MAE=0.0763; RMSE=0.1123), the model remained stable, maintaining over 78% of the explained variance. These results demonstrate that the architecture, which combines the spatial/pattern extraction power of convolution layers with the temporal dependence modeling of LSTM, is advantageous for multivariate and high-frequency SCADA data.

The GRU-LSTM model produced the best error at the first step of horizon ($t+1$) ($MAE=0.0085$; $RMSE=0.0131$; $R^2=0.9985$) and stood out in terms of sensitivity to sudden/local dynamics. However, as the horizon extended, a difference emerged in favor of CNN-LSTM; at $t+6$, GRU-LSTM had $R^2=0.7792$; It was observed that the MAE decreased to levels of 0.0835, meaning that CNN-LSTM remained somewhat more stable over long horizons. This finding suggests that GRU's advantage of fast convergence with fewer parameters translates into ultra short term sensitivity, while CNN-LSTM's advantage of long horizon robustness, thanks to its feature hierarchy and deeper temporal modeling capacity, translates into long horizon robustness.

Comparatively, the relative improvements over the baseline model are striking: at step $t+1$, CNN-LSTM reduced MAE compared to SDAE by $\approx 70\%$, while GRU-LSTM reduced it by $\approx 85\%$. At step $t+6$, the improvement for CNN-LSTM was $\approx 12.7\%$, while that for GRU-LSTM was $\approx 5.6\%$. This situation rationalizes the preference for "GRU-LSTM for ultra short term, CNN-LSTM for longer horizons." Therefore, a hybrid operating policy can be recommended for practical use: for example, GRU-LSTM can be used for monitoring and instantaneous control (precedent ramp rate management, torque/pitch micro-adjustment), while CNN-LSTM can be used for market bids and throttling/balancing planning, minimizing total operating costs.

The contribution of preprocessing deserves special emphasis. With DBSCAN, the power curve approached its ideal form with only 3.6% data extraction, minimizing anomaly-induced deviations. While noise removal in the range of 1–5% is considered acceptable in the literature, maintaining the time interval of 10 min $\rightarrow$ 10 min 25 s ensured that the time series integrity was not compromised. The 39 features selected after RFECV (e.g., WindSpeedCube, delayed power/speed, x-y components, rolling averages, trigonometric time codes) reduced the risk of over-learning and reduced computational overhead. These two steps, combined with subsequent Optuna-based hyperparameter search and early stopping, have been shown to stabilize training and enable steady convergence in loss curves.

4.1. Limitations,

The study based on single turbine data. This situation is insufficient to measure the spread of the study on a field basis. This is insufficient to gauge the study's potential for widespread use in the field. Conducting experiments on different numbers of turbines and

across fields, rather than limiting the scope to a single turbine, would be beneficial for widespread use.

Although the current study focuses on point forecasts. However, in energy markets and grid management, not only the prediction of a point but also the uncertainty of that prediction (e.g., 90% confidence interval) is of vital importance.. Also, rolling origin or walk-forward validation strategies can be applied for a more rigorous generalization test in future studies.

Error accumulation is inevitable in multi-step (sequence-to-sequence) estimation; this is confirmed by the significant increase in metrics at steps $t+4$ and beyond. Furthermore, although some hyperparameters, such as the learning rate (0.006) chosen for GRU-LSTM, provide high convergence rates, robustness checks are recommended through distribution analysis and repetition experiments with different random seeds.

FUNDING (MADDİ DESTEK)

The authors stated that the study was not supported by any institution, organization or fund.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

There is no any acknowledgements

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZAR KATKI ORANLARI)

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI)

There is no any conflict of interest

DATA AVAILABILITY (VERİ ERİŞİLEBİLİRLİĞİ)

Dataset is available upon requested.

ETHICAL STATEMENT (ETİK BEYAN)

There is no any ethical statement need.

DECLARATION OF AI USAGE (YAPAY ZEKA KULLANIM BEYANI)

No artificial intelligence tools were used

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Behera, P., Sethi, N., Dash, D. P., Usman, M., & Sahu, P. K. (2025). "Pathways to achieve carbon neutrality in emerging economies: Catalyzing the role

- of renewable energy, green growth”, ICT, and political risk. *Renewable Energy*, 243, 122514.
- [2] Kok, B., Benli, H., "Energy diversity and nuclear energy for sustainable development in Turkey", *Renewable energy*, 111 (2017): 870-877.
- [3] M. C. Senel, E. Koc, 2015. "Wind Energy in the World and Turkey Condition-General Evaluation," *Journal of Engineers and Machinery*, volume 56, issue 663, p. 46-56.
- [4] Teke, O. (2025). "Analysis of Performance Results of Models Created for Wind Power Estimation (PhD. Thesis)". Iskenderun Technical University Energy Institute, Hatay.
- [5] Ayar B., Gülten Yalçın Z., Dağ M., (2023). "Harvesting the Wind: A Study on the Feasibility and Advancements of Wind Energy in Turkey". *European Journal of Science and Technology Special Issue* 49, 43-49.
- [6] Albostan, A., Çekiç, Y. and Eren, L. 2009. "The Impact of Wind Energy on Turkey's Supply Security", *Gazi University Faculty of Engineering and Architecture Journal*, 24 (4): 641-649.
- [7] Zheng, Z., Yang, Y., Liu, J., Dai, H.-N., & Zhang, Y. (2019). "Deep and embedded learning approach for traffic flow prediction in urban informatics". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(10), 1-13. <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2909904>
- [8] Pandit, R., Astolfi, D., & Durazo-Cardenas, I. (2023). "A review of predictive techniques used to support decision making for maintenance operations of wind turbines". *Energies*, 16(4), 1654. <https://doi.org/10.3390/en16041654>.
- [9] Tekin, S. F., Fazla, A., & Kozat, S. S. (2021). "Numerical weather forecasting using convolutional-LSTM with attention and context matcher mechanisms". arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.00696>
- [10] Liu, Z., Guo, H., Zhang, Y., & Zuo, Z. (2025). A "Comprehensive Review of Wind Power Prediction Based on Machine Learning: Models, Applications, and Challenges". *Energies*, 18(2), 350. <https://doi.org/10.3390/en18020350>
- [11] Kang, B., Xu, Z., He, W., Ding, G., Han, W., Sun, M., et al. (2024). "Research on the double-layer clustering method of residential energy use characteristics under the background of energy system energy savings and carbon reduction". *Front. Energy Res.*, 11, 1326257. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1326257>
- [12] Kariniotakis, G., Pinson, P., Siebert, N., Giebel, G., & Barthelmie, R. (2004, October). "The state of the art in short term prediction of wind power – from an offshore perspective". In *SeaTech Week – Ocean Energy Conference ADEME-IFREMER*, Brest, France. HAL. <https://hal.science/hal-00529338>. Last Access Date: 10.02.2025
- [13] Yang, T., Yang, Z., Li, F., & Wang, H. (2024). "A short-term wind power forecasting method based on multivariate signal decomposition and variable selection". *Applied Energy*, 360, 122759. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122759>
- [14] Yi, L., Chen, B., Zhan, J., Wang, Y., Huang, Y., Long, J., & Sun, T. (2025). "Multi-scale spatial-temporal interactive network for wind turbine ultra-short-term power prediction" L. Yi et al. *The Journal of Supercomputing*, 81(8), 906.
- [15] Deng, Y. C., Tang, X. H., Zhou, Z. Y., Yang, Y., & Niu, F. (2025). "Application of machine learning algorithms in wind power: a review". *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 47(1), 4451-4471.
- [16] Ghanbari, E., & Avar, A. (2025). "Short-term wind power forecasting using the hybrid model of multivariate variational mode decomposition (MVMD) and long short-term memory (LSTM) neural networks". *Electrical Engineering*, 107(3), 2903-2933.
- [17] Rosca, C. M., & Stancu, A. (2025). "A Comprehensive Review of Machine Learning Models for Optimizing Wind Power Processes". *Applied Sciences*, 15(7), 3758.
- [18] Elsaraiti, M., & Merabet, A. (2021). "A comparative analysis of the arima and lstm predictive models and their effectiveness for predicting wind speed". *Energies*, 14(20), 6782.
- [19] Feng, C., Cui, M., Hodge, B. M., & Zhang, J. (2017). "A data-driven multi-model methodology with deep feature selection for short-term wind forecasting". *Applied Energy*, 190, 1245-1257
- [20] Paik, C., Chung, Y., & Kim, Y. J. (2023). "Power Curve Modeling of Wind Turbines through Clustering-Based Outlier Elimination". *Applied System Innovation*, 6(2), 41. <https://doi.org/10.3390/asi6020041>

- [21] Zhao, Y., Ye, L., Wang, W., Sun, H., Ju, Y., and Tang, Y. (2018). "Data-driven correction approach to refine power curve of wind farm under wind curtailment". *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(1), 95-105. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2717021>
- [22] Veljanovski, G., Popovski, P., Atanasovski, M., & Kostov, M. (2022). "Implementation of neural networks and feature selection for short term load forecast". 2022 57th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST), 229–232. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEST55464.2022.9828610>. Last Access Date: 10.02.2025
- [23] Afrasiabi, M., Mohammadi, M., Rastegar, M., & Afrasiabi, S. (2020). Advanced deep learning approach for probabilistic wind speed forecasting. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(1), 720-727.
- [24] Vincent, P., Larochelle, H., Lajoie, I., Bengio, Y., Manzagol, P. A., & Bottou, L. (2010). "Stacked denoising autoencoders: Learning useful representations in a deep network with a local denoising criterion". *Journal of machine learning research*, 11(12).
- [25] Liu, X., Zhang, L., Zhang, Z., Zhao, T., ve Zou, L. (2021b). "Ultra Short-Term wind power prediction model based on wrf wind speed prediction and CatBoost". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 838, 11-22. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/838/1/012001>
- [26] Tyass, I., Khalili, T., Mohamed, R., Abdelouahed, B., Raihani, A., & Mansouri, K. (2023). Wind speed prediction based on statistical and deep learning models. *International Journal of Renewable Energy Development*, 12(2), 288.
- [27] Yu, C., Yan, G., Yu, C., & Mi, X. (2023). Attention mechanism is useful in spatio-temporal wind speed prediction: Evidence from China. *Applied Soft Computing*, 148, 110864.
- [28] Yin, D., Zhao, L., Zhai, K., & Zheng, J. (2024). "S. Term Wind Power Prediction Based on Feature-Weighted and Combined Models". *Applied Sciences*, 14(17), 7698. <https://doi.org/10.3390/app14177698>
- [29] Alijoyo, F. A., Gongada, T. N., Kaur, C., Mageswari, N., Sekhar, J. C., Ramesh, J. V. N., El-Ebiary, Y. A. B. and Ulmas, Z. (2024). "Advanced Hybrid CNN-Bi-LSTM Model Augmented with GA And FFO For Enhanced Cyclone İntensity Forecasting". *Alexandria Engineering Journal*, 92, 346-357. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.02.062>
- [30] Dai, X., Liu, G. P., & Hu, W. (2023). "An online-learning-enabled self-attention-based model for ultra-short-term wind power forecasting". *Energy*, 272, 127173.
- [31] Nguyen, T. H. T., and Phan, Q. B. (2022). "Hourly day ahead wind speed forecasting based on a hybrid model of EEMD, CNN-Bi-LSTM embedded with GA optimization". *Energy Reports*, 8, 53-60. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.110>
- [32] Li, Q., Wang, G., Wu, X., Gao, Z., & Dan, B. (2024). "Arctic short-term wind speed forecasting based on CNN-LSTM model with CEEMDAN". *Energy*, 299, 131448. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131448>
- [33] Park, R.-J., Kang, S., Lee, J., and Jung, S. (2022). "CNN-LSTM based wind power prediction system to improve accuracy". *Renewable Energy*. 4(2), 144-166. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:24903056>. Last Access Date: 15.02.2025
- [34] Bilal, B., Adjallah, K. H., Sava, A., Yetilmezsoy, K., & Ouassaid, M. (2023). "Wind turbine output power prediction and optimization based on a novel adaptive neuro-fuzzy inference system with the moving window". *Energy*, 263(E), 126159. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126159>
- [35] Zhang, H., Zhao, L., and Du, Z. (2021). "Wind power prediction based on CNN-LSTM". *2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 3097-3102. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:24710878>. Last Access Date: 15.02.2025
- [36] Yong, B., Qiao, F., Wang, C., Shen, J., Wei, Y., & Zhou, Q. (2019). "Ensemble neural network method for wind speed forecasting". In *2019 IEEE International Workshop on Signal Processing Systems (SiPS)* (pp. 31–36). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SiPS47522.2019.9020410>. Last Access Date: 15.03.2025
- [37] Xin, Z., Liu, X., Zhang, H., Wang, Q., An, Z., & Liu, H. (2024). An enhanced feature extraction based long short-term memory neural network for wind power forecasting via considering the missing data reconstruction. *Energy Reports*, 11, 97-114.

- [38] Kuang, H., Guo, Q., Li, S., and Zhong, H. (2021). "Short-term wind power forecasting model based on multi-feature extraction and CNN-LSTM". IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 702, 43-49. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:23385927>. Last Access Date: 15.02.2025
- [39] Zhao, Z., Yun, S., Jia, L., Guo, J., Meng, Y., He, N., Li, X., Shi, J., & Yang, L. (2023). "Hybrid VMD-CNN-GRU-based model for short-term forecasting of wind power considering spatio-temporal features". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 121, 105982. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105982>
- [40] Zhang, D., Chen, B., Zhu, H., Goh, H. H., Dong, Y., & Wu, T. (2023). "Short-term wind power prediction based on two-layer decomposition and BiTCN-BiLSTM-attention model". *Energy*, 285, 128762. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128762>
- [41] Joseph, L. P., Deo, R. C., Casillas-Pérez, D., Prasad, R., Raj, N., & Salcedo-Sanz, S. (2024). "Multi-step-ahead wind speed forecast system: Hybrid multivariate decomposition and feature selection-based gated additive tree ensemble model". *IEEE Access*, 12, 58750-58777.
- [42] Mao, J., Zhao, J., Zhang, H., & Gu, B. (2025). A Novel Hybrid Deep Learning Model for Day-Ahead Wind Power Interval Forecasting. *Sustainability*, 17(7), 3239. <https://doi.org/10.3390/su17073239>
- [43] Emu, I. H., Rahman, M. S., Farzana, F., Islam, M. R., Shiam, I. F., & Sultana, A. (2024). "Wind power forecasting using long short-term memory (LSTM), gated recurrent unit (GRU) and hybrid model". 2024 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE), 1-6. <https://doi.org/10.1109/ECCE60783.2024.10533822>. Last Access Date: 18.02.2025
- [44] Lai, J.P., Lin, Y.L., Lin, H.C., Shih, C.Y., Wang, Y.P., & Pai, P.F. (2023). "Tree-Based Machine Learning Models with Optuna in Predicting Impedance Values for Circuit Analysis". *Micromachines*, 14(2), 265. <https://doi.org/10.3390/mi14020265>
- [45] Almarzooq, H., and Bin Waheed, U. (2024). "Automating hyperparameter optimization in geophysics with Optuna: a comparative study." *Geophysical Prospecting*, 72, 25-46. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.13484>
- [46] Hanifi, S., Cammarono, A., and Zare Behtash, H. (2024a). "Advanced hyperparameter optimization of deep learning models for wind power prediction". *Renewable Energy*, 221, 119-131. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119700>
- [47] Sun, T.-H., Wang, C.-C., Wu, Y.-L., Hsu, K.-C., & Lee, T.-H. (2023). Machine learning approaches for biomarker discovery to predict large-artery atherosclerosis. *Scientific Reports*, 13, 15809. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42338-0>
- [48] Chen, C. and Liu, L.-M. (1993), Forecasting time series with outliers. *J. Forecast.*, 12: 13-35. <https://doi.org/10.1002/for.3980120103>
- [49] Battaglia, F., and Cucina, D. (2020). "Outlier identifiability in time series". *Stat*, 9(1), 281-295. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/sta4.281>
- [50] Che, Z., Purushotham, S., Cho, K., Sontag, D., and Liu, Y. (2018). "Recurrent neural networks for multivariate time series with missing values". *Scientific Reports*, 8(1), 60-85. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24271-9>
- [51] Lee, K., Park, B., Kim, J., ve Hong, J. (2024). "Day-ahead wind power forecasting based on feature extraction integrating vertical layer wind characteristics in complex terrain". *Energy*, 288, 129-143. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129713>
- [52] Lipton, Z. Kale, D. Elkan, C. and Wetzel, R. (2015). "Learning to diagnose with LSTM recurrent neural networks." arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.03677>
- [53] Sriramalakshmi, P., Subhasree, V., Vondivillu, S. T., & Prakash, S. (2022, May). "Time Series Analysis and Forecasting of Wind Turbine Data". In *2022 International Virtual Conference on Power Engineering Computing and Control: Developments in Electric Vehicles and Energy Sector for Sustainable Future (PECCON)* (pp. 1-9). IEEE. Last Access Date: 15.03.2025
- [54] Ahsan, M. M., Mahmud, M. A. P., Saha, P. K., Gupta, K. D., & Siddique, Z. (2021). "Effect of Data Scaling Methods on Machine Learning Algorithms and Model Performance". *Technologies*, 9(3), 52. <https://doi.org/10.3390/technologies9030052>
- [55] Zhang, S., Zhang, C., and Yang, Q. (2003). "Data Preparation for data mining". *Applied Artificial Intelligence*, 17, 375-381. <https://doi.org/10.1080/713827180>

- [56] What Is Data Mining. (2006). "Introduction to data mining". In *Mining multimedia databases, mining time series*.
- [57] Zucatelli, P. J., Nascimento, E. G. S., Santos, A. A. B., Arce, A. M. G., and Moreira, D. M. (2019). "Study of wind speed forecasting applying computational intelligence". *Aerodynamics*. 4(2), 73-100. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89758>
- [58] Shi, K., Shi, R., Fu, T., Lu, Z., & Zhang, J. (2024). "A Novel Identification Approach Using RFECV–Optuna–XGBoost for Assessing Surrounding Rock Grade of Tunnel Boring Machine Based on Tunneling Parameters". *Applied Sciences*, 14(6), 2347. <https://doi.org/10.3390/app14062347>
- [59] Patel, S. K., Panchal, S. R., & Panchal, S. S. (2024, December 19). "Wind Nowcast On Radar Imagery Employing Deep Learning Technique". *Journal of Electrical Systems*, 20(3). <https://doi.org/10.52783/jes.7493>
- [60] Bergstra, J., and Bengio, Y. (2012). "Random search for hyper-parameter optimization". *J. Mach. Learn. Res.*, 13(2), 281-305.
- [61] Anande, T., Alsaadi, S. & Leeson, M. Enhanced Modelling Performance with Boosting Ensemble Meta-Learning and Optuna Optimization. *SN COMPUT. SCI.* 6, 12 (2025). <https://doi.org/10.1007/s42979-024-03544-3>