

Teknik Bilimler Dergisi

e-ISSN: 3023-591X

Journal of Technical Sciences



İMTİYAZ SAHİBİ (OWNER)

Prof. Dr. Nedim SÖZBİR, Düzce Üniversitesi Rektörü (Rector of Düzce University)

EDİTÖR KURULU (EDITORIAL BOARD)

Baş Editör (Editor in Chief)

Dr. Ali Etem GÜREL, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Editör Yardımcıları (Deputy Editors)

Dr. Gökhan YILDIZ, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Dr. Ümit AĞBULUT, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye

Alan Editörleri (Section Editors)

Dr. Akif KETEN, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Dr. Asghar ZAJKANİ, Imam Khomeini International University, İran

Dr. Balakrishnan DEEPANRAJ, Prince Mohammad Bin Fahd University, Suudi Arabistan

Dr. Benjamin DURAKOVIĆ, International University of Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

Dr. Cüneyt UYSAL, Karabük Üniversitesi, Türkiye

Dr. Engin NAS, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Dr. Enver KÜÇÜKKÜLAHLI, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Dr. Ferzan KATIRCIOĞLU, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Dr. Filiz DURSUN, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Dr. Hüseyin BAKIR, Doğu Üniversitesi, Türkiye

Dr. İsmail İsa ATABEY, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Türkiye

Dr. Lütfullah KUDDUSİ, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye

Dr. Manzoore Elahi M. SOUDAGAR, Lishui University, Çin

Dr. Mehmet Murat TOPAÇ, Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye

Dr. Mert KILINÇEL, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Dr. Mohamed Sabar GAD, Fayoum Üniversitesi, Mısır

Dr. Mustafa KARAGÖZ, Karabük Üniversitesi, Türkiye

Dr. Navneet KHANNA, Institute of Infrastructure Tech. Research and Management,
Hindistan

Dr. Saeed YAGHOUBİ, Iran University Science, İran

Dr. Şenol ŞİRİN, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Dr. Ümit YURT, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Türkiye

Dr. Yunus BİÇEN, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Dr. Zafer CİNGİZ, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Teknik Editörler (Technical Editors)

Dr. Seymen ÇİFTÇİ, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Öğr. Gör. Ünal KAYA, Karabük Üniversitesi, Türkiye

Arş. Gör. Beyzanur YAVUZ, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Arş. Gör. Elif Eda TAKGİL, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Dil Editörü (Technical Editors)

Dr. Mesut KULELİ, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Türkiye

GENEL BİLGİLER (GENERAL INFORMATION)

Yayıncı (Publisher)

Düzce Üniversitesi/Düzce University

Web Sayfası (Web Page)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/duted>

Cilt (Volume)

3

Sayı (Issue)

1

Yıl (Year)

2025

Basım Tarihi (Date of Publication)

Haziran 2025/June 2025

Yayın Dili (Language)

Türkçe ve İngilizce/Turkish and English

Yayın Periyodu (Publication Period)

Yılda iki kez yayımlanır/Published two times in a year

Yayın Türü (Type of Publication)

Sürekli Yayın/Periodical

e-ISSN

3023-591X

Yazışma Adresi (Correspondence Address)

Düzce Meslek Yüksekokulu, Uzunmustafa Mahallesi, 81010, Merkez/Düzce

+90 380 524 00 98

duted@duzce.edu.tr

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Sayfa (Page)	Araştırma Makalesi (Research Article)
1-13	Optimization of Laser Cutting Parameters for Mild Steel using Regression Analysis and Differential Evolution Algorithm Sayit ÖZBEY, İsmet TIKIZ ve Aysen ŞİMŞEK KANDEMİR
14-29	Turkey's Nuclear Energy Ambitions: Past Efforts, Present Strategies, and Future Directions Muhammed Cihat MERCAN ve Ali İhsan AYGÜN
30-36	Düzce İli Belediye Atıklarının Yenilikçi Bir Yaklaşım ile Yönetilmesinin Sera Gazı Salım Azaltılmasına Etkisi <i>(The Effect on Greenhouse Gas Emission Mitigation by Innovative Municipal Solid Waste Management in Düzce Province)</i> Gül EROĞLU BULUT ve Özgür DOĞAN
37-45	İki Boyutlu Kanat Profili Kullanılarak Fırlatma Araçlarında Üfüt Olgusunun Araştırılması <i>(Research for Buffet Phenomenon in Launch Vehicles by Using Two-Dimensional Airfoil Profile)</i> Cihan YÜKSELSİN, Mustafa Özgür AYDOĞAN, Erkan AKAY ve Fatih YILMAZ
46-58	İmalat Yürütme Sistemlerine Genel Bakış ve Bir İmalat Firmasında Toplam Ekipman Etkinliği Analizi <i>(An Overview of Manufacturing Execution Systems and Overall Equipment Effectiveness Analysis in a Manufacturing Company)</i> Mustafa DENİZLİ

Research Article

Optimization of Laser Cutting Parameters for Mild Steel Using Regression Analysis and Differential Evolution Algorithm Sayit Özbey^a,  İsmet Tıkız^{a,*},  Aysen Şimşek Kandemir^b^aKocaeli University, Maritime Faculty, Department of Marine Engineering, Kocaeli, Türkiye.^bKocaeli University, Hereke Vocational School, Department of Statistics, Kocaeli, Türkiye.***Corresponding Author:** ismet.tikiz@kocaeli.edu.tr**Article Information:**

Received: 17/02/2025, Revision: 06/03/2025 Accepted: 17/03/2025

DOI: 10.70081/duted.1641355

ABSTRACT

The primary objective in the production of parts is to optimize the manufacturing process. As the industry recognizes the roughness of the cut product as one of the key criteria, it becomes critical to select the correct laser settings with minimum trial, error and at the lowest possible cost while using reliable techniques to achieve the desired surface finish. Due to the nonlinear nature of laser cutting, statistical analysis is necessary to obtain a satisfactory surface finish. In this study, experimental data sourced from literature were subjected to analytical processes. In the experimental design, L25 orthogonal array was used. The optimization process for the laser cutting parameters (laser power, cutting speed, and assist gas pressure) was implemented using regression analysis and a differential evolution algorithm. The regression model, with an R^2 value of 83.21%, accurately predicted roughness based on these parameters. The model's effectiveness was further supported by the high correlation ($R^2 = 86.6\%$) between the experimental and predicted results. Using the differential evolution optimization method, the minimum surface roughness was calculated as 0.442 μm . This study provides a method for identifying optimal laser settings to achieve the desired surface roughness based on the obtained results.

Keywords: *Laser Cutting, Differential Evolution, Roughness, Regression Analysis, Stochastic Optimization***I. INTRODUCTION**

Identifying optimal criteria is essential prior to employing optimization techniques, such as Differential Evolution (DE) and other evolutionary algorithms, in product development. To determine the effective parameters utilized during production, optimization techniques have been developed in the manufacturing sector (Nas & Özbek, 2020). Differential Evolution is an optimization algorithm known for its simplicity and robustness and is widely used to solve complex optimization problems (Kocak et al., 2024; Ozdemir et al., 2017; SHAH & Karabulut, 2022). DE, developed by (Storn & Price, 1997), is a population-based method in the evolutionary algorithms (EA) family (Ahmad et al., 2022). Unlike other traditional methods, DE generates new generations by recombining solutions with scaled difference vectors, and if the new solution outperforms the existing solution, the existing solution is replaced by this new generation (Price et al., 2006). The algorithm relies on a few specific parameters such as the scaling factor, crossover rate mutation and crossover are observed to play an important role in search performance (Qin et al., 2009). In another study (Y. Wang et al., 2024), a model for surface roughness prediction was proposed based on the DE algorithm combined with ensemble learning, aiming to explain the relationship between the machining parameters and surface roughness. Experiments on 3D-printed

components made of 316L stainless steel demonstrated that the proposed algorithm is more effective than other algorithms, with an average absolute percentage error approximately 42% lower than that of other algorithms. The DE algorithm is known for its straightforwardness and reliability in addressing non-linear and multi-modal optimization challenges. Unlike other algorithms such as Genetic Algorithms (GA) or Particle Swarm Optimization (PSO), DE is less sensitive to parameter settings and often provides better convergence in fewer iterations, making it more efficient for laser cutting parameter optimization.

Laser cutting is an important application of lasers in industry, especially for the processing of materials that are difficult to cut. In contrast to traditional machining methods, laser cutting is characterized by minimal material removal (Xiao et al., 2024), localized precise heat application to the workpiece (Madhava, 2024), minimal distortion (Samantaray et al., 2024), and the absence of tool wear (Begic-Hajdarevic et al., 2016). This technique uses a laser beam to supply thermal energy, which is then transformed into heat. Because the laser beam is electromagnetic radiation, it does not require mechanical cutting force, tool wear, or vibration, and can be focused on the material surface to an extremely small point. Thus, laser beam cutting can be used to cut soft or hard materials (Genna et al., 2020). In laser cutting, a localized increase in the surface temperature occurs due to the interaction of the laser beam with the electrons of the material, which absorb some of the energy. Melting, vaporization, or other chemical changes in the material may result from this increase. The wavelength and power density of the laser, as well as the chemical and physical properties of the material, such as thermal conductivity and absorption capacity, influence these phenomena, which in turn determine the laser-material interaction (Shugaev et al., 2020; Tamrin et al., 2021).

Surface roughness is a technical requirement for mechanical products and is used to measure product quality (Çaydaş & Haşçalık, 2008; Kasman, 2023; Suhail et al., 2010). One of the most important aspects of the functional performance of a part is ensuring the desired surface quality (Magdum et al., 2022; Zdravković et al., 2020). Production costs are significantly impacted by product surface roughness, which is a measure of product quality (Anuja Beatrice et al., 2014; Suhail et al., 2010). Higher manufacturing costs correlate with lower desired surface roughness (Ratnam, 2017). Prior to the production process, the selection of the appropriate cutting parameters is necessary to achieve the expected surface roughness (Aslan et al., 2007; Sharma et al., 2012; Tseng et al., 2016). Although it is usually desirable to reduce surface roughness in industry, the opposite situation may be desired in some studies. Ghalandarzadeh et al. (2023) found that zirconia samples treated with different laser power densities exhibited higher surface roughness compared to untreated samples. This increase in surface roughness corresponded to an increase in hydrophobicity, indicating a potential relationship between surface texture and wettability.

Laser surface treatment is a highly nonlinear process (Ozbey & Tıkız, 2024; Tamanna et al., 2019). Optimization of laser parameters and analysis of the changes that occur on the surface of the laser-machined material are of great importance for the manufacturing industry (2022; Ürgün et al., 2024). Accurate adjustment of these parameters plays a critical role in bringing the material properties to the desired level and increasing the efficiency of the production processes (Rouf et al., 2022). In literature, laser material interaction has been studied experimentally and analytically from different perspectives (Um et al., 2022; G. Wang et al., 2021). The various forms of selective laser-material interaction approaches and their properties utilized in biomedical devices and materials were presented by Um et al (2022). G. Wang et al. (2021) utilized laser direct deposition, an additive manufacturing technique, to produce W-Cu composite material. Experimental and simulation analyses were conducted to investigate laser-powder interaction and particle transport phenomena. The microstructure of mild steel samples was altered through the use of a diode laser with a maximum power output of 3.3 kW, combined with electrochemical processes in another study (Speidel et al., 2016). The findings showed that the exposed surface textures and the chemistry of the surfaces can be modified by combining laser pretreatment with EJM. In this case, the machined surface roughness was shown to increase from approximately 0.45 μm for untreated surfaces to roughly 18 μm for surfaces subjected to intensive laser pretreatment. In another study (Salleh et al., 2020), mild steel was subjected to surface hardening with a fiber laser with a

wavelength of 1060 nm. It was observed that higher laser power increased the surface hardness, but higher scanning speeds decreased the surface hardness. Laser material interaction can be studied with various optimization techniques. (Fan et al., 2023) used Taguchi Methods and Response Surface Method to improve surface roughness in laser-assisted rapid tool servo (LAM-FTS) machining of glass-ceramic materials. The results showed that the most effective parameters were laser power, spindle speed, feed rate and piezoelectric frequency, respectively. In other study (G. Wang et al., 2024), the optimal cleaning parameters were determined using the response surface method and the second-generation non-dominated sequencing genetic algorithm (NSGA-II) to improve the surface quality during laser removal of rust layers on Q390 steel. In the study, a mathematical model was established between input variables (laser power, cleaning speed, scanning speed and repetition frequency) and target values (surface oxygen content, rust layer removal rate and surface roughness). As a result of the study, surface corrosion was effectively removed, a distinct metal brightness was achieved, and a pre-weld surface treatment standard was achieved.

In this study, regression analysis and stochastic optimization were carried out for the laser cutting of mild steel. Experimental data were obtained from the literature and analytical processes were examined in detail. The laser parameters (laser power, cutting speed and assist gas pressure) were specified as inputs in 5 levels, and the response was considered roughness. The measurement analysis results were examined using Minitab 19 software for a 0.05 significance level ($\alpha = 0.05$) with an L25 Orthogonal Array. The regression equation was determined, and the surface roughness was optimized using the differential evolution algorithm. The originality of this study lies in the combination of regression analysis and DE algorithm to optimize the surface roughness during laser cutting. This combination offers an innovative and effective approach to optimize critical parameters such as surface roughness in laser cutting processes. While statistical analyses reveal the relationship between cutting parameters and surface roughness by modeling the effects of independent variables, the DE algorithm optimizes these parameters to improve both accuracy and efficiency in manufacturing processes. Unlike existing methods in literature, this novel approach allows for a more effective handling of nonlinear manufacturing processes.

II. MATERIAL METHODS

In this study, experimental data were obtained from (Madić & Radovanović, 2013). Madić and Radovanović used a 2.2 kW CO₂ laser for the laser cutting of commercial mild steel sheets with a thickness of 2 mm. The chemical compositions, (Samatham et al., 2017) mechanical and physical properties (Khan et al., 2013; Villavicencio & Guedes Soares, 2011) of mild steel are given in Table 1.

Table 1. Chemical composition (wt.%) (Samatham et al., 2017), physical and mechanical properties of mild steel (Khan et al., 2013; Villavicencio & Guedes Soares, 2011).

Chemical composition (wt.%)					
Sample	Fe	Si	Mn	P	C
Mild Steel	98.7	0.2	0.54	0.16	0.17
Mechanical properties					
Yield strength	Tensile strength	Hardness	Young's modulus	Poisson's ratio	
275 MPa	475 MPa	143 HB	206 GPa	0.3	
Physical properties					
Density	Thermal conductivity		Specific heat capacity	Melting Point	
7850 kg/m3	51.9 W/m. K		0.472 J/g °C	1523 °C	

The cutting process was performed in Gaussian distribution beam mode using 99.95% pure oxygen as the protective gas. With a 127 mm focal length focusing lens, the laser beam was focused on the sample surfaces. A conical nozzle (HK10) with a 1 mm diameter, a consistent stand-off distance of 0.7 mm was used to maintain between the nozzle and the workpiece. The parameters, including the focusing lens specifications, nozzle diameter, focus position, stand-off distance and sheet thickness, were held constant throughout the experiment (Madić & Radovanović, 2013). In their study, Madić and Radovanović (Madić & Radovanović, 2013) investigated the roughness of mild steel by varying laser parameters such as the laser power, cutting speed, and assist gas pressure. The specific process variables and their levels are listed in Table 2.

Table 2. Process parameters and experimental design levels (Madić & Radovanović, 2013).

Variables	Levels				
	1	2	3	4	5
Cutting speed, v (mm/min)	3000	4000	5000	6000	7000
Laser power, P (W)	700	900	1100	1300	1500
Assist gas pressure, p (bar)	3	4	5	6	7

This study employed five levels and three main laser parameters, namely, cutting speed, laser power, and assist gas pressure, to optimize the cutting process. The experimental design was created using an L25 orthogonal array, and MINITAB (Version 19) was employed as the statistical tool for its development. The experimental results and input parameters are given in Table 3.

Table 3. Experimental results (Madić & Radovanović, 2013).

Exp. No	Cutting speed (mm/min)	Laser Power (W)	Assist gas Pressure (bar)	Surface Roughness (μm)
1	3000	700	3	1.487
2	3000	900	4	1.29
3	3000	1100	5	2.073
4	3000	1300	6	2.477
5	3000	1500	7	2.937
6	4000	700	4	1.78
7	4000	900	5	1.707
8	4000	1100	6	2.337
9	4000	1300	7	3.307
10	4000	1500	3	1.19
11	5000	700	5	2.013
12	5000	900	6	2.017
13	5000	1100	7	2.603
14	5000	1300	3	1.173
15	5000	1500	4	1.38
16	6000	700	6	1.66
17	6000	900	7	1.71
18	6000	1100	3	0.963
19	6000	1300	4	1.007
20	6000	1500	5	1.143
21	7000	700	7	1.587
22	7000	900	3	0.832
23	7000	1100	4	0.903
24	7000	1300	5	0.88
25	7000	1500	6	1.073

Differential evolution is a powerful stochastic real parameter optimizing algorithm (Islam et al., 2012). DE is sensitive to the choice of mutation strategy and the settings of control parameters such as crossover rate, scale factor and population size (Mallipeddi & Suganthan, 2010; Saad et al., 2024). Because of these features, DE generates better optimal solutions for optimization issues involving experimental work and time constraints (Ahmed et al., 2020). The mathematical modeling of the Differential Evolution (DE) algorithm was done using Wolfram Mathematica. The steps used in the program are given below (Ceylan et al., 2023; Dash et al., 2023; Rubal & Kumar, 2018):

1. Define a population consisting of h points $\{a_1, a_2, \dots, a_h\}$, ensuring that h exceeds the total number of design variables.
2. Generate the population points randomly.
3. Utilize the real scaling factor rsf , defined as $a_{rsf} = a_w + rsf \cdot (a_u - a_v)$, to generate new iteration points based on the existing population.
4. Update a by modifying its j -th coordinate from a_{rsf} according to the probability P . In this stage, the "CrossProbability" parameter within Mathematica is set within the range $[0,1]$. If the constraint $f(a_i) > f(a_{new})$ is satisfied, the original point is retained instead of the newly generated point.
5. Evaluate the convergence by comparing the difference between the two most recently generated points. If this difference is below the specified tolerance, the algorithm halts. This hybrid approach can address problems involving integer variables or cases where the objective function is non-numeric.

The steps of the Differential Evolution Algorithm are presented in Figure 1.

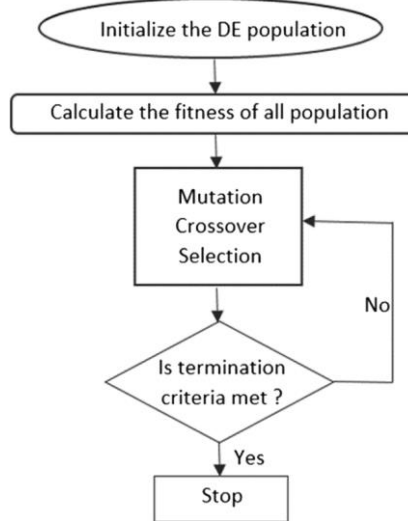


Figure 1. Steps for Differential Evolution Algorithm (Rubal & Kumar, 2018).

III. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, it is aimed to determine the laser parameters that would improve the surface properties of mild steel using statistical methods. To achieve the highest surface quality, surface roughness should be minimized. In the first part of this study, the response (roughness) values were assessed using the normality test. Probability charts are vital for examining whether a dataset matches a particular theoretical distribution. These plots compare the actual dataset with a theoretical distribution to test the hypothesis that a statistical sample derives from a specified distribution (Ferré, 2009). As shown in Figure 2, the P-value is greater than 0.05; therefore, the response values are normally distributed and follow almost a straight line; thus, surface roughness data can be used in statistical analysis.

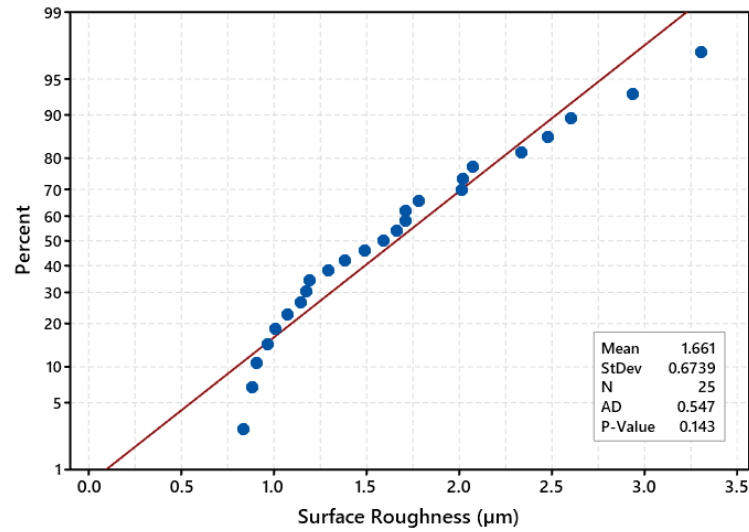


Figure 2. Probability plot of roughness.

Table 4 presents the correlation matrix. There is an inverse, moderate and statistically significant relationship between cutting speed and surface roughness, a strong and statistically significant relationship between assist gas pressure and surface roughness as in reference (Zeilmann & Conrado, 2022), and a weak and statistically insignificant relationship between laser power and surface roughness. In addition, as in reference (Erkan, 2023), while surface roughness decreases with increasing cutting speed, surface roughness increases with increasing assist gas pressure.

Table 4. Correlation matrix ((*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)) and (**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed))).

		Cutting Speed	Laser Power	Assist Gas Pressure	Surface Roughness
Cutting Speed	Pearson Correlation	1	0	0	-0.398*
	Sig. (2-tailed)		1	1	0.049
	N	25	25	25	25
Laser Power	Pearson Correlation	0	1	0	0.093
	Sig. (2-tailed)	1		1	0.657
	N	25	25	25	25
Assist Gas Pressure	Pearson Correlation	0	0	1	0.526**
	Sig. (2-tailed)	1.000	1.000		0.007
	N	25	25	25	25
Surface Roughness	Pearson Correlation	-0.398*	0.093	0.526**	1
	Sig. (2-tailed)	0.049	0.657	0.007	
	N	25	25	25	25

The multicollinearity between independent variables was checked. The variance inflation factor (VIF) < 10 and the condition index (CI) < 30 indicate that there is no multicollinearity problem among the independent variables.

Statistical regression analysis was performed to characterize the interaction between one or more independent variables and dependent variables. The objective of regression analysis is to determine how independent factors affect the dependent variable (Arnab, 2017; Freund et al., 2010; Thomasian, 2022). The regression equation ($R^2 = 83.21\%$) for the laser cutting process was determined in Equation 1 using Minitab 19.

$$\text{Surface Roughness } (\mu\text{m}) = 1.458 - 0.000276 \text{ Cutting speed (mm/min)} - 0.000032 \text{ Laser power (W)} + 0.3240 \text{ Assist gas pressure (bar)} \quad (1)$$

Contour and surface plots for surface roughness are given in Figures 3 and 4 respectively. The analysis shows that the laser parameters have a significant effect directly on the roughness and in interaction with each other. In contour plots, laser power and cutting speed have been observed to reduce roughness beyond a certain threshold value. Similarly, the roughness exhibits different trends with increasing pressure. In the surface plots, the relationship between these parameters is revealed in more detail and low roughness regions are identified.

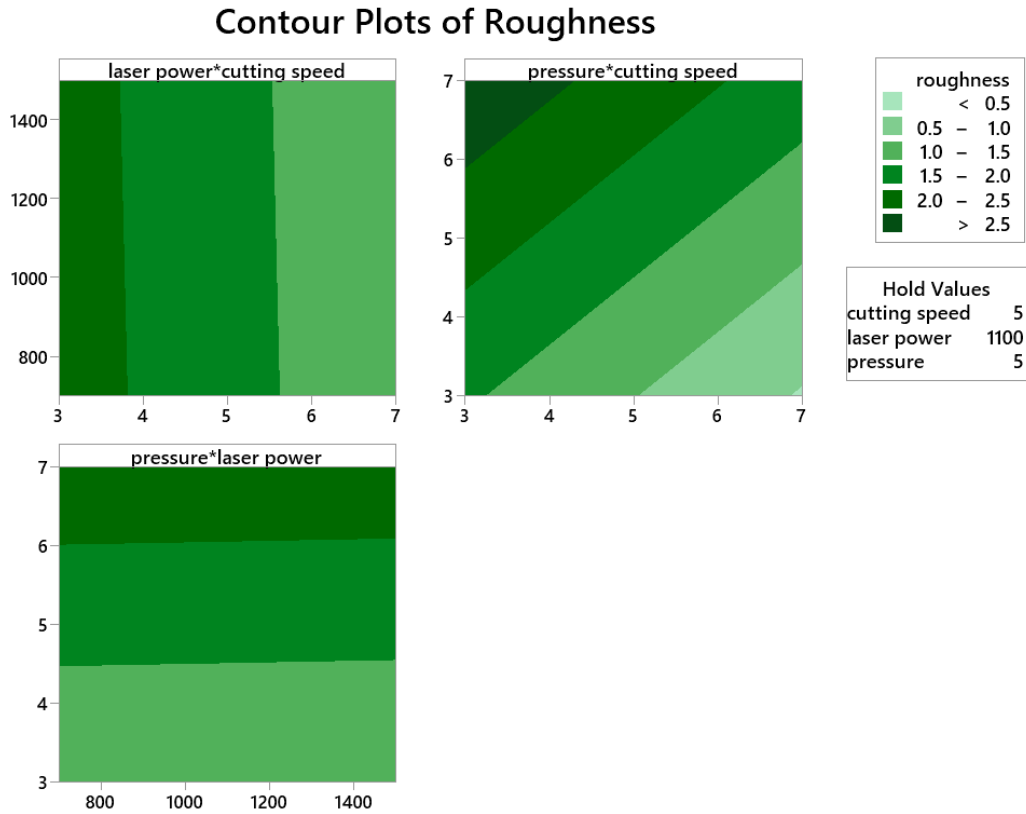


Figure 3. Contour plots of roughness.

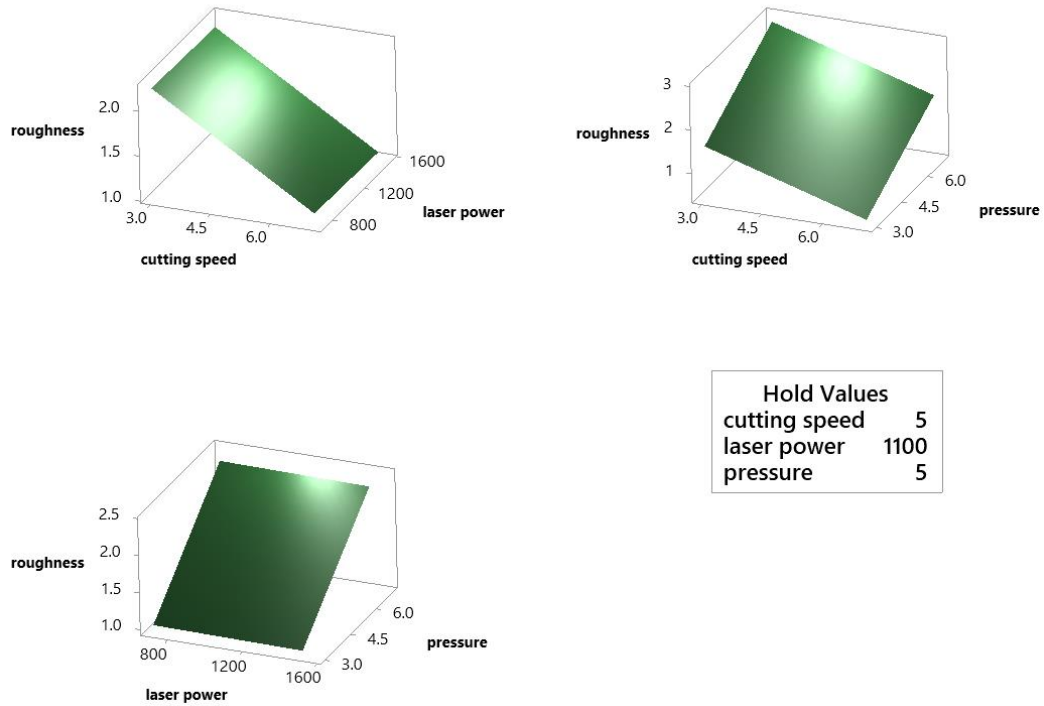


Figure 4. Surface plots of roughness.

After regression analysis, the estimated roughness was determined and compared with the experimental results. experimental and estimated results obtained by the second-order regression analysis are compared in Figure 5. The figure demonstrates a strong correlation between actual test results and predicted outcomes. The calculated coefficient of determination (R^2) values, reaching 86.6 %, for the equations used to determine the surface roughness, signify a high degree of accuracy. Consequently, the second-order regression model was effective for estimating surface roughness within the 95% CI.

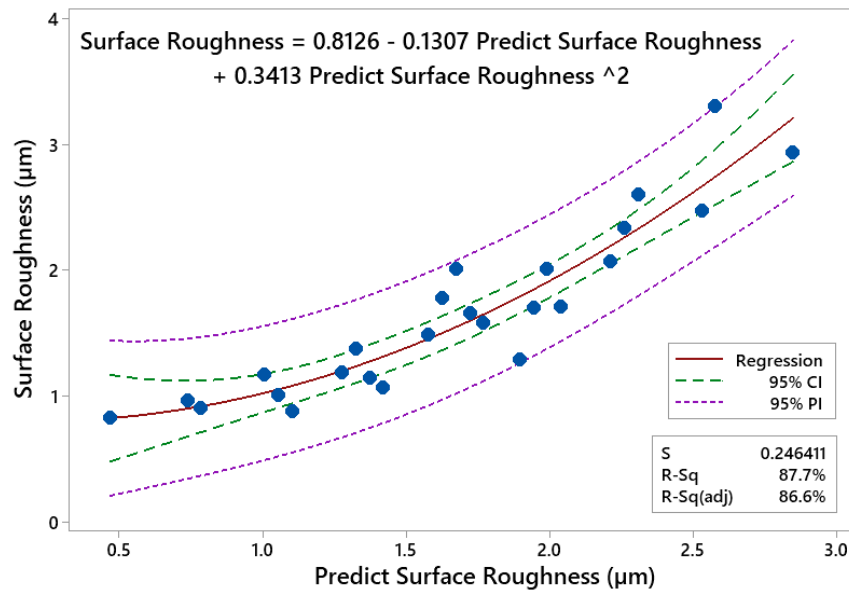


Figure 5. The quadratic regression model compared with the experimental roughness results.

In order to understand the effect of the laser parameters on the surface roughness, a Pareto chart is provided in Figure 6. In the Pareto chart, the standardized effect represents the magnitude and significance of the effect of each factor on the response variable (Hashem et al., 2018; Makableh et al., 2021). The red dashed line in the figure represents a boundary with a value of 2.080, which indicates the level of statistical significance (95% confidence interval). The laser parameter that has the most influence on the surface roughness is assist gas pressure and the second most influential parameter is the cutting speed. The laser power is statistically below the analytical limit of 2.080, i.e. the laser power does not have a statistically significant effect on the surface roughness. Possible reasons for the lack of effect of laser power on surface roughness could be the power range used or the type of laser used in the study. It can be concluded from these results that future studies should focus on laser parameters such as gas pressure and laser cutting speed of mild steel.

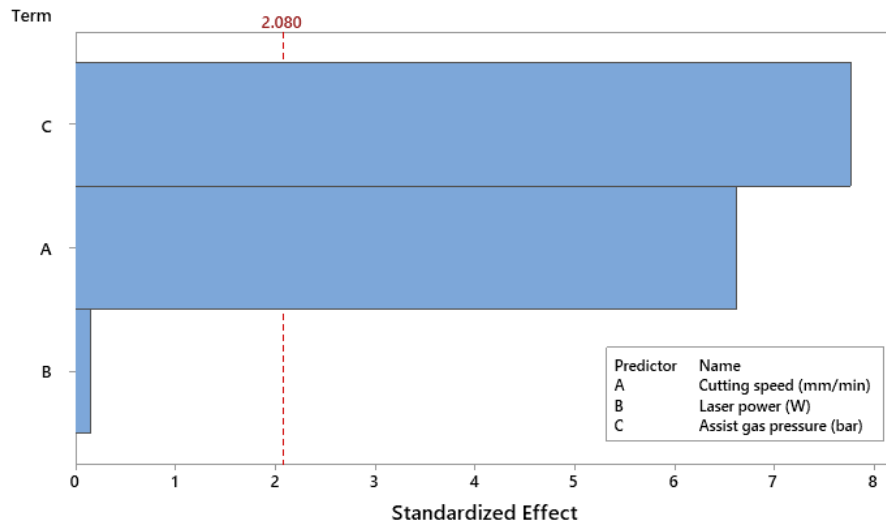


Figure 6. Pareto Chart of the Standardized Effects for Surface Roughness ($\alpha = 0.05$).

Differential evolution is a stochastic, population-based heuristic search approach for continuous domains, which is a subfield of evolutionary programming. Differential evolution is a straightforward, user-friendly, fast, and reliable heuristic technique (Karci, 2017). Table 5 shows the optimization results obtained using the differential evolution algorithm, which minimizes the surface roughness during laser cutting. The results show that the optimal parameter settings to achieve a minimum roughness value of $0.442 \mu\text{m}$ are a cutting speed of 7000 mm/min, laser power of 1500 W, and gas pressure of 3 bar.

Table 5. Optimization results of the differential evolution algorithm for roughness (a: Cutting speed (mm/min), b: Laser power (W), and c: Assist gas pressure (bar)).

Objective Function	Constrains	Min Roughness (μm)	Suggested Design
1.458 - 0.000276 a - 0.000032 b + 0.3240 c	$3000 \leq a \leq 7000$ $700 \leq b \leq 1500$ $3 \leq c \leq 7$	0.442	a = 7000 b = 1500 c = 3

Figure 7 shows how the differential evolution algorithm optimizes the objective function value during the iteration process. In the first iteration, there is a rapid decrease in the value of the objective function, and the solution stabilizes at about the 40th iteration. This indicates that the algorithm has reached an optimal solution. Differential Evolution is an efficient solution method for engineering design, hyperparameter optimization and similar problems.

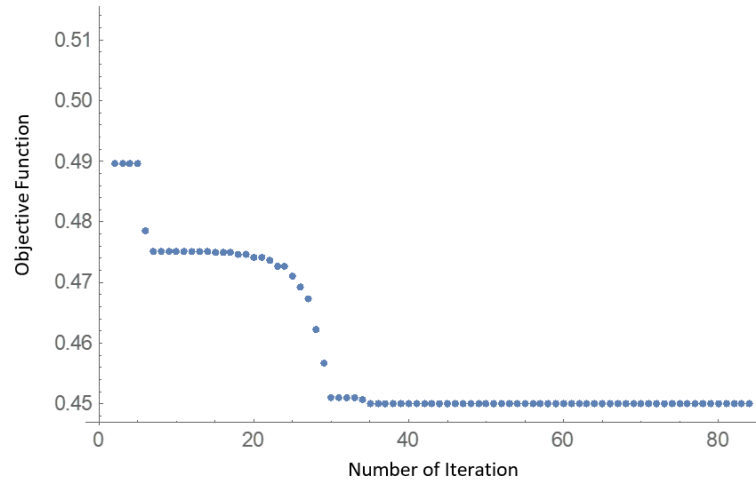


Figure 7. Convergence graphic for differential evolution algorithm.

In this study, it was observed that increasing laser power led to a significant increase in surface roughness. However, when laser power decreased, surface roughness showed a tendency to decrease as well. This is consistent with previous studies (Kim et al., 2022), where lower laser power resulted in minimal changes in surface roughness. In industrial applications, these findings can enhance the efficiency of laser cutting machines. For example, the combination of low laser power and high cutting speed can save time in rapid prototyping and mass production.

IV. CONCLUSIONS

The aim of this study was to determine the optimum cutting settings for achieving superior surface finish in laser cutting processes. First, normality tests confirmed that the surface roughness data followed a normal distribution, indicating their suitability for statistical analysis. Regression analysis showed a strong relationship between surface roughness and independent variables (cutting speed, laser power and auxiliary gas pressure), resulting in a regression equation with an R^2 value of 83.21%. The predictions of the model are in close agreement with the experimental results and demonstrate high accuracy, as evidenced by the R^2 value of 86.6%. Optimization by means of the DE algorithm determined the optimal parameters for the minimum surface roughness as 7000 mm/min cutting speed, 1500 W laser power, and a 3-bar auxiliary gas pressure, resulting in a minimum roughness of 0.442 μm . The results of this study are highly relevant for industries that utilize the laser cutting process for precision manufacturing, such as automotive, aerospace and metal fabrication. The combined use of regression analysis and differential algorithms can be applied to nonlinear manufacturing processes, offering a reliable and cost-effective parameter optimization approach. Overall, this study could contribute to reducing production costs and improving product quality in industrial settings. By optimizing laser cutting parameters, particularly for high-volume production, it is possible to achieve faster processing times, reduce energy consumption, and minimize material waste.

DECLARATIONS

Author Contributions: Conceptualization, S.O.; methodology, S.O. and A.K.; validation, S.O., I.T. and A.K.; research, S.O. ; references, S.O., I.T. and A.K; data editing S.O., I.T. and A.K; writing-original drafting, S.O. ; writing-review and editing, S.O., I.T. and A.K; checking, S.O., I.T. and A.K. All authors have read and accepted the published version of the manuscript.

Conflict of Interest Disclosure: The author(s) declare no conflict of interest.

Copyright Declaration: The authors own the copyright of their work published in the journal and their work is published under the CC BY-NC 4.0 licence.

Supporting Organizations: This research has not received any external funding.

Ethical Approval and Participant Consent: This article does not involve any human or animal subjects. Scientific and ethical principles were followed during the preparation of this study and all studies utilized are given in the bibliography.

Plagiarism Statement: This article was checked with a plagiarism program. No plagiarism was detected.

Availability of Data and Materials: The experimental data of this study is taken from the following article: <https://doi.org/10.1007/s40430-013-0008-z>

Use of AI Tools: Artificial intelligence tools used for language and readability improvements

REFERENCES

- Ahmad, M. F., Isa, N. A. M., Lim, W. H., & Ang, K. M. (2022). Differential evolution: A recent review based on state-of-the-art works. *Alexandria Engineering Journal*, 61(5), 3831–3872.
- Ahmed, Z. E., Saeed, R. A., Mukherjee, A., & Ghorpade, S. N. (2020). Energy optimization in low-power wide area networks by using heuristic techniques. In *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications* (pp. 199–223). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818880-4.00011-9>
- Anuja Beatrice, B., Kirubakaran, E., Ranjit Jeba Thangaiah, P., & Leo Dev Wins, K. (2014). Surface roughness prediction using artificial neural network in hard turning of AISI H13 steel with minimal cutting fluid application. *Procedia Engineering*, 97, 205–211.
- Arnab, R. (2017). Chapter 20 - Complex Survey Design: Regression Analysis. In R. Arnab (Ed.), *Survey Sampling Theory and Applications* (pp. 673–689). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811848-1.00020-0>
- Aslan, E., Camuşcu, N., & Birgören, B. (2007). Design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI 4140 steel (63 HRC) with Al2O3+TiCN mixed ceramic tool. *Materials & Design*, 28(5), 1618–1622.
- Begic-Hajdarevic, D., Pasic, M., Cekic, A., & Mehmedovic, M. (2016). Optimization of process parameters for cut quality in CO2 laser cutting using taguchi method. *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 27(1), 157–164.
- Çaydaş, U., & Haşcalık, A. (2008). Use of the grey relational analysis to determine optimum laser cutting parameters with multi-performance characteristics. *Optics and Laser Technology*, 40(7), 987–994.
- Ceylan, A. B., Aydın, L., Nil, M., Mamur, H., Polatoğlu, İ., & Sözen, H. (2023). A new hybrid approach in selection of optimum establishment location of the biogas energy production plant. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(7), 5771–5786.
- Dash, R., Rautray, R., & Dash, R. (2023). Utility of a Shuffled Differential Evolution algorithm in designing of a Pi-Sigma Neural Network based predictor model. *Applied Computing and Informatics*, 19(1/2), 22–40. <https://doi.org/10.1016/j.aci.2019.04.001>
- Erkan, Ö. (2023). Evaluation of the Relationship of Surface Roughness with Machining Parameters in Milling of AA 7075 Material with Experimental and Deform 3D Simulation. *Celal Bayar University Journal of Science*, 19(2), 175–182.
- Fan, M., Zhou, X., Chen, S., Jiang, S., & Song, J. (2023). Study of the surface roughness and optimization of machining parameters during laser-assisted fast tool servo machining of glass-ceramic. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 11(2). <https://doi.org/10.1088/2051-672X/acd5ec>
- Ferré, J. (2009). 3.02 - Regression Diagnostics. In S. D. Brown, R. Tauler, & B. Walczak (Eds.), *Comprehensive Chemometrics* (pp. 33–89). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-44452701-1.00076-4>
- Freund, R. J., Wilson, W. J., & Mohr, D. L. (2010). CHAPTER 7 - Linear Regression. In R. J. Freund, W. J. Wilson, & D. L. Mohr (Eds.), *Statistical Methods (Third Edition)* (Third Edit, pp. 321–374). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374970-3.00007-X>
- Genna, S., Menna, E., Rubino, G., & Tagliaferri, V. (2020). Experimental Investigation of Industrial Laser Cutting: The Effect of the Material Selection and the Process Parameters on the Kerf Quality. *Applied Sciences*, 10(14), 4956.
- Ghalandarzadeh, A., Javadpour, J., Majidian, H., & Ganjali, M. (2023). The evaluation of prepared microstructure pattern by carbon-dioxide laser on zirconia-based ceramics for dental implant application: an in vitro study. *Odontology*, 111(3), 580–599.
- Hashem, R. A., Samir, R., Essam, T. M., Ali, A. E., & Amin, M. A. (2018). Optimization and enhancement of textile reactive Remazol black B decolorization and detoxification by environmentally isolated pH tolerant *Pseudomonas aeruginosa* KY284155. *AMB Express*, 8(1), 83. <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0616-1>
- Islam, S. M., Das, S., Ghosh, S., Roy, S., & Suganthan, P. N. (2012). An Adaptive Differential Evolution Algorithm With Novel Mutation and Crossover Strategies for Global Numerical Optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 42(2), 482–500. <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2011.2167966>
- Karci, A. (2017). Differential Evolution Algorithm and Its Variants. *Anatolian Journal of Computer Sciences*, 2(1), 10–14.
- Kasman, S. (2023). Machining of Ti–6Al–4V alloy by fiber laser: Determining the effects of parameters on surface roughness. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 41(4), 770–780.
- Khan, A., Ndaliman, M. B., Ali, M. Y., & Lawal, S. A. (2013). Effect of Electrical Parameters on Performance of Cu–TiC Mixed Ceramic Compact Electrode in EDM Process. *2nd International Conference on Mechanical, Automotive and Aerospace Engineering (ICMAAE 2013)*, 1–6.

- Kocak, E., Ozsoy, V. S., & Orkcü, H. H. (2024). Modeling of wind speed using differential evolution: Istanbul case. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 42(3), 642–652.
- Madhava, P. (2024). Empirical Modeling and Analysis of Process Parameters in Laser Beam Cutting Process. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 13(1), 133–138.
- Madić, M., & Radovanović, M. (2013). Application of RCGA-ANN approach for modeling kerf width and surface roughness in CO₂ laser cutting of mild steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 35(2), 103–110.
- Magdum, V. B., Kittur, J. K., & Kulkarni, S. C. (2022). Surface roughness optimization in laser machining of stainless steel 304 using response surface methodology. *Materials Today: Proceedings*, 59, 540–546.
- Makableh, Y., Alzubi, H., & Tashtoush, G. (2021). Design and Optimization of the Antireflective Coating Properties of Silicon Solar Cells by Using Response Surface Methodology. *Coatings*, 11, 721.
- Mallipeddi, R., & Suganthan, P. N. (2010). Differential Evolution Algorithm with Ensemble of Parameters and Mutation and Crossover Strategies. In *Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing* (pp. 71–78). https://doi.org/10.1007/978-3-642-17563-3_9
- Nas, E., & Özbek, N. (2020). Optimization of the Machining Parameters in Turning of Hardened Hot Work Tool Steel Using Cryogenically Treated Tools. *Surface Review and Letters*, 27(5), 1950177.
- Ozbey, S., & Tıkız, I. (2024). Advanced Laser Material Processing Techniques. In *Interdisciplinary Studies on Contemporary Research Practices in Engineering in the 21st Century- VI* (pp. 103–120). Ozgur Publication. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub426.c1849>
- Ozdemir, O., Bettemir, O. H., & Firat, M. (2017). Minimum-Cost Design of Water Distribution Line with Differential Evolution Algorithm. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 8(3), 189–198.
- Price, K., Storn, R. M., & Lampinen, J. A. (2006). *Differential evolution: a practical approach to global optimization*. Springer Science & Business Media.
- Qin, A. K., Huang, V. L., & Suganthan, P. N. (2009). Differential Evolution Algorithm With Strategy Adaptation for Global Numerical Optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13(2), 398–417.
- Ratnam, M. M. (2017). 1.1 Factors Affecting Surface Roughness in Finish Turning. In *Comprehensive Materials Finishing* (pp. 1–25). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09147-5>
- Rouf, S., Raina, A., Irfan Ul Haq, M., Naveed, N., Jeganmohan, S., & Farzana Kichloo, A. (2022). 3D printed parts and mechanical properties: Influencing parameters, sustainability aspects, global market scenario, challenges and applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 5(3), 143–158.
- Rubal, & Kumar, D. (2018). Evolving Differential evolution method with random forest for prediction of Air Pollution. *Procedia Computer Science*, 132, 824–833.
- Saad, A., Engelbrecht, A. P., & Khan, S. A. (2024). An Analysis of Differential Evolution Population Size. *Applied Sciences*, 14(21), 9976.
- Salleh, M. N. M., Ishak, M., Aiman, M. H., Zaifuddin, Q., & Quazi, M. M. (2020). The effect of laser surface hardening on the surface hardness of mild steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 788(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/788/1/012014>
- Samantaray, S. R., Pradhan, S., Dhupal, D., Padhan, S., & Das, S. R. (2024). Comparative performance investigation and sustainability evaluation between hot-AJM and AJM during machining of zirconia ceramic using Al₂O₃ abrasives. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 46(5), 263. <https://doi.org/10.1007/s40430-024-04836-8>
- Samatham, M., Venkata, A., Vardhan, V., & Reddy, N. V. (2017). Experimental Investigation on Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of Steels and Titanium. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 7(3), 845–850.
- SHAH, A. F. M. S., & Karabulut, M. A. (2022). Optimization of drones communication by using meta-heuristic optimization algorithms. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 40(1), 108–117.
- Sharma, A., Raju, P. S., Gopichand, A., & Subbaiah, K. V. (2012). Optimization of Cutting Parameters on Mild Steel With Hss & Cemented Carbide Tipped Tools Using Ann. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 1(3), 226–228.
- Shugaev, M. V., He, M., Levy, Y., Mazzi, A., Miotello, A., Bulgakova, N. M., & Zhigilei, L. V. (2020). Laser-Induced Thermal Processes: Heat Transfer, Generation of Stresses, Melting and Solidification, Vaporization, and Phase Explosion. In *Handbook of Laser Micro- and Nano-Engineering* (pp. 1–81). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69537-2_11-1
- Speidel, A., Lutey, A. H. A., Mitchell-Smith, J., Rance, G. A., Liverani, E., Ascari, A., Fortunato, A., & Clare, A. (2016). Surface modification of mild steel using a combination of laser and electrochemical processes. *Surface and Coatings Technology*, 307, 849–860.
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341–359.
- Suhail, A. H., Ismail, N., Wong, S. V., & Abdul Jalil, N. A. (2010). Optimization of Cutting Parameters Based on Surface Roughness and Assistance of Workpiece Surface Temperature in Turning Process. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(1), 102–108.
- Tamanna, N., Crouch, R., & Naher, S. (2019). Progress in numerical simulation of the laser cladding process. *Optics and Lasers in Engineering*, 122(May), 151–163.

- Tamrin, K. F., Moghadasi, K., Jalil, M. H., Sheikh, N. A., & Mohamaddan, S. (2021). Laser Discoloration in Acrylic Painting of Visual Art: Experiment and Modeling. *Materials*, 14(8), 2009. <https://doi.org/10.3390/ma14082009>
- Thomasian, A. (2022). Chapter 9 - Structured, unstructured, and diverse databases. In A. Thomasian (Ed.), *Storage Systems* (pp. 493–563). Morgan Kaufmann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-32-390796-5.00018-8>
- Tseng, T.-L. (Bill), Konada, U., & Kwon, Y. (James). (2016). A novel approach to predict surface roughness in machining operations using fuzzy set theory. *Journal of Computational Design and Engineering*, 3(1), 1–13.
- Um, S.-H., Hwang, S.-W., Grigoropoulos, C. P., Jeon, H., & Ko, S. H. (2022). Recent advances in selective laser–material interaction for biomedical device applications. *Applied Physics Reviews*, 9(4). <https://doi.org/10.1063/5.0101634>
- Ürgün, S., Yiğit, H., Fidan, S., & Sınmazçelik, T. (2024). Optimization of Laser Cutting Parameters for PMMA Using Metaheuristic Algorithms. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(9), 12333–12355.
- Villavicencio, R., & Guedes Soares, C. (2011). Numerical modelling of the boundary conditions on beams stuck transversely by a mass. *International Journal of Impact Engineering*, 38(5), 384–396.
- Wang, G., Deng, J., Lei, J., Tang, W., Zhou, W., & Lei, Z. (2024). Multi-Objective Optimization of Laser Cleaning Quality of Q390 Steel Rust Layer Based on Response Surface Methodology and NSGA-II Algorithm. *Materials*, 17(13). <https://doi.org/10.3390/ma17133109>
- Wang, G., Qin, Y., & Yang, S. (2021). Characterization of laser-powder interaction and particle transport phenomena during laser direct deposition of W–Cu composite. *Additive Manufacturing*, 37, 101722.
- Wang, Y., He, Z., Xie, S., Wang, R., Zhang, Z., Liu, S., Shang, S., Zheng, P., & Wang, C. (2024). Explainable prediction of surface roughness in multi-jet polishing based on ensemble regression and differential evolution method. *Expert Systems with Applications*, 249, 123578.
- Xiao, G., Ni, Y., Liu, Z., He, Y., & Li, X. (2024). Research on material removal of Ti-6Al-4V by laser-belt machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 130(11–12), 5533–5546.
- Zdravković, V., Palija, T., & Karadolamovic, Z. (2020). Influence of thermal modification of ash wood (*fraxinus excelsior* L.) and machining parameters in cnc face milling on surface roughness using response surface methodology (RSM). *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2(11), 231–241.
- Zeilmann, R. P., & Conrado, R. D. (2022). Effects of cutting power, speed and assist gas pressure parameters on the surface integrity cut by laser. *Procedia CIRP*, 108(C), 367–371.

Research Article

Turkey's Nuclear Energy Ambitions: Past Efforts, Present Strategies, and Future Directions

 Muhammed Cihat Mercan^{a,*},  Ali İhsan Aygün^b

^aMarmara University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering, Istanbul, Türkiye.

^bDüzce University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Düzce, Türkiye.

* Corresponding Author: cihat.mercan@hotmail.com

Article Info:

Received: 17/02/2025, Revision: 10/04/2025, Accepted: 22/04/2025.

DOI: 10.70081/duted.1641366

ABSTRACT

Nuclear power plants, popularized by the promise of decreasing dependency on foreign resources and providing supply security, meet 10% of the world's energy needs as of 2023. Having had this desire for a long time, Turkey wants to have a nuclear-installed power of 10,000 MW according to its energy production targets. In this context, Turkey seems close to realizing this desire of more than half a century with its Akkuyu and Sinop Nuclear Power Plants. Yet, Turkey follows a different path compared to countries with a nuclear past and took its first concrete steps with an intergovernmental agreement signed with Russia. In this study, the main motivation pushing Turkey to this path, the country's technical capacity, and its strategy are evaluated. Besides that, the current and possible prospective hazards are indicated. In addition, the contribution of these plants to meet the electricity demand as well as reducing dependency on external resources and the current account deficit have been examined. Turkey's nuclear energy initiative's environmental, economic, and political dimensions have also been addressed, and its long-term strategic impacts have been analyzed. The study also details the potential impact of nuclear energy investments on Turkey's energy supply security. The study, which also includes a SWOT analysis, predicts that Turkey's intergovernmental agreement-based initiative will serve as an important reference for other future initiatives.

Keywords: Akkuyu Nuclear Power Plant, Energy Policy, Nuclear Energy, Nuclear Energy in Turkey, Sinop Nuclear Power Plant.

I. INTRODUCTION

Due to increasing population and technological advancements, energy demand continues to rise in developing countries. The intermittent nature of existing renewable energy sources such as solar and wind energy (Elbol & Dikmen, 2023), the high costs required for large-scale power generation, and the low availability to meet instantaneous demand appear to be disadvantages for these sources (Basit et al., 2020; Maradin, 2021). Therefore, hydrocarbon-based fossil fuels have always had a larger share in meeting the increasing demand than other primary energy sources. This leads to problems such as environmental pollution, high emissions and global warming. Herein, nuclear energy has a significant role on the table with its ability to help decarbonize the electricity supply. Nuclear power plants play a significant role in securing global pathway to net zero. The journey of atomic nuclei, which started with the first power plant opened in Russia in 1954, extends to the present day. Nuclear power plants, which are not only a scientific development but also closely related to world politics, met 10% of the world's

electricity demand in 2023 and became the second largest source of low-emission (i.e. non-fossil) electricity after hydropower (Schneider & Froggatt, 2020).

The aim of this study is to reveal the reason for Turkey's desire to build a nuclear power plant, country's infrastructure and the chosen path to build it. Despite the global emphasis on nuclear energy, limited research has been conducted on the specific strategies and challenges faced by Turkey in its pursuit of nuclear energy. This study aims to fill this gap by providing a comprehensive evaluation of Turkey's nuclear energy strategy, its technical capacity, and potential risks. It will also be examined the country's failed attempts and the pros and cons of its new strategy. In this study, Turkey's energy outlook will be discussed in Section 2 and the history of nuclear energy in the world will be discussed in Section 3. Following this, in Section 4, the history of Turkey's attempts to establish nuclear power plants, the country's motivation, capacity and strategy in this field will be examined. In the same section, the impact of this investment on the cost of electricity and SWOT analysis of nuclear energy in Turkey will be discussed. In Section 5, the impacts of Turkey's approach will be discussed.

II. TURKEY'S ENERGY OUTLOOK

While Turkey exhibited an average economic growth trend of 4.8% between 2014 and 2023, the average increase in electricity consumption remained around 2.9% (SHURA, 2023). Although the relation between growth rate and electricity consumption is not always directly proportional, it is often an important indicator. In 2024, Turkey generated around 349 GWh of electricity. Of this amount, 35.2% was obtained from coal, 21.5% from hydroelectric power plants, 18.9% from natural gas, 10.5% from wind energy, 7.5% from solar energy, and the rest from other sources as it is seen in Figure 1 (*Türkiye Ministry of Energy*, 2025). As can be seen from the current situation, Turkey is a foreign-dependent country for energy, and dependence on imported fossil fuels poses a risk in terms of energy supply.

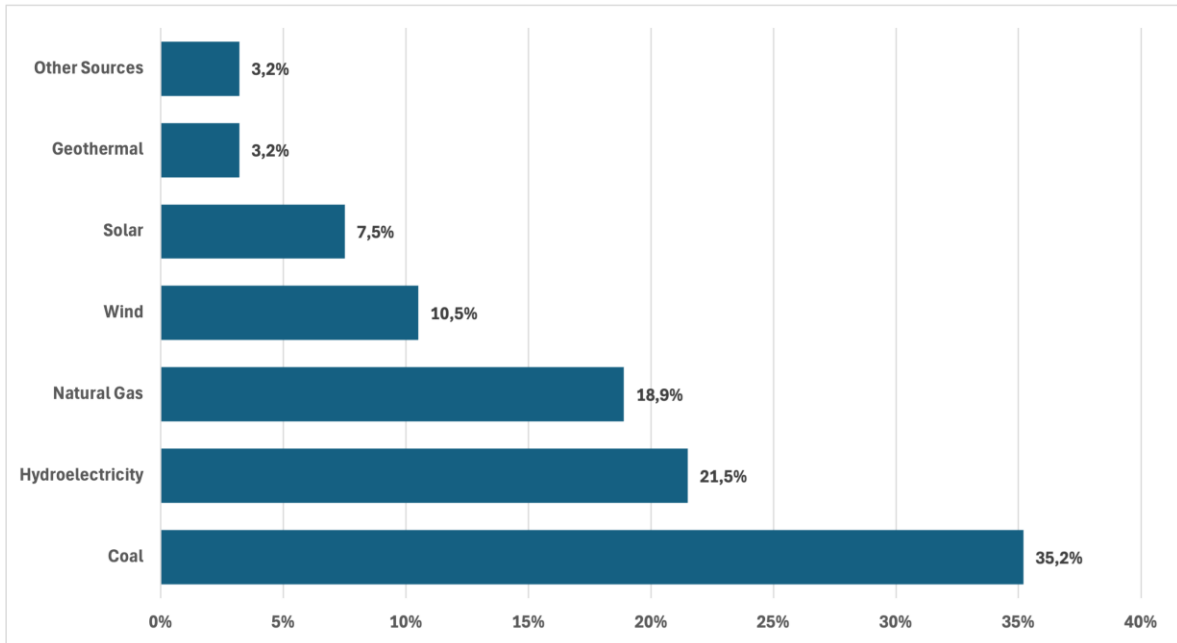


Figure 1. Distribution of Turkey's Production of Electricity in 2024 Based on Resources (*Türkiye Ministry of Energy*, 2025).

In 2022, Türkiye's reliance on imported fuels for generating electricity rose from 41% to 43%. This trend has persisted for the past four years, with no signs of improvement. The increase in import dependency can be attributed to the growing use of fossil fuels in electricity generation (Gümüş, 2024). Being a poor country in terms of fossil fuels such as oil, natural gas, and coal with high thermal value, the natural gas reserves discovery in the Black Sea offshore in 2020 is promising for Turkey (*BBC News Turkish*, 2023). According to the national targets, Turkey aims to supply 30% of the total electricity production from renewable energy sources and to commission a nuclear power plant with an installed capacity of 10,000 MW (Melikoglu, 2016).

III. NUCLEAR ENERGY OUTLOOK

A. Technology

Nuclear energy is the enormous amount of energy released from the disintegration (fission) of heavy atomic nuclei due to neutron capture and the merging (fusion) of light atomic nuclei at very high temperatures (WNA, 2024). This emerging energy is utilized in producing electricity through thermal processes in a nuclear power plant. Currently, nuclear power plants operate using a fission reaction mechanism. During nuclear fission, a neutron collides with a uranium atom used as fuel, causing the atom to split and releasing a significant amount of heat and radiation energy. The energy released during nuclear fission can be calculated using Einstein's mass-energy equivalence principle, given by the Equation 1:

$$E = \Delta m \cdot c^2 \quad (1)$$

where:

- E is the energy released (in joules),
- Δm is the change in mass (in kilograms), and
- c is the speed of light in a vacuum (3×10^8 meters per second).

When a uranium-235 nucleus undergoes fission, a small amount of mass is lost, which is then converted into a large amount of energy. If the mass defect (Δm) is approximately 0.1% of the original mass, the released energy can be substantial as stated in Eq. 2.

$$\begin{aligned} \Delta m &\approx 0.001 \times m_{U-235} \\ E &= 0.001 \times m_{U-235} \times (3 \times 10^8)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

where m_{U-235} is the mass of a uranium-235 nucleus (approximately 3.9×10^{-25} kg). Substituting the values, on Eq. 3 we get:

$$\begin{aligned} E &\approx 0.001 \times 3.9 \times 10^{-25} \times 9 \times 10^{16} \\ E &\approx 3.5 \times 10^{-11} \text{ joules per fission reaction} \end{aligned} \quad (3)$$

This heat energy is converted into steam from water and sent to a turbine, which then generates electricity through a generator to reach the end user. Nuclear energy is used not only in electricity generation, but also in diagnosis and treatment in the health sector, defense industry, archaeological remains, and space studies. The energy density of uranium, the nuclear fuel, is very high compared to other traditional energy sources such as coal and oil (*Euronuclear*, 2024). Moreover, since they operate safely, their environmental damage is low. It also has low greenhouse gas emissions compared to fossil fuels, which have a high carbon footprint.

B. History

Established with the promise of cheap energy, nuclear power plants increased their popularity after the oil crisis in the 1970s with their promise of reducing dependence on external resources and ensuring supply security (IEA, 2023). Nuclear power is currently the second-largest form of low-emission energy globally, following hydropower and surpassing wind or solar PV. In developed countries, it is the primary source of low-emission electricity. Despite a period of slow growth after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station incident, changing policies are now opening up opportunities for a resurgence in nuclear power (IEA, 2022). At the end of 2023, 440 nuclear power reactors were operating in 32 countries around the world with a total capacity of 390 GW. These reactors meet 10% of the world's energy needs, avoiding 1.5 gigatonnes (Gt) of global emissions and 180 billion cubic meters (bcm) of global gas demand per year (Schneider & Froggatt, 2020). As of July 2024, 60 power reactors are in the process of construction in the world (WNA, 2024). Although the amount of electricity generated by nuclear power plants experienced a decline from 2010 to 2012, it has been in an upward trend after this period as is seen in Figure 2 (WNA, 2024). According to STEPS, nuclear power capacity is projected to increase from 417 GW in 2022 to 620

GW in 2050, with most growth occurring in China and other emerging market and developing economies. Meanwhile, advanced economies are focusing on extending the lifetime of existing facilities and considering new projects to offset retirements.

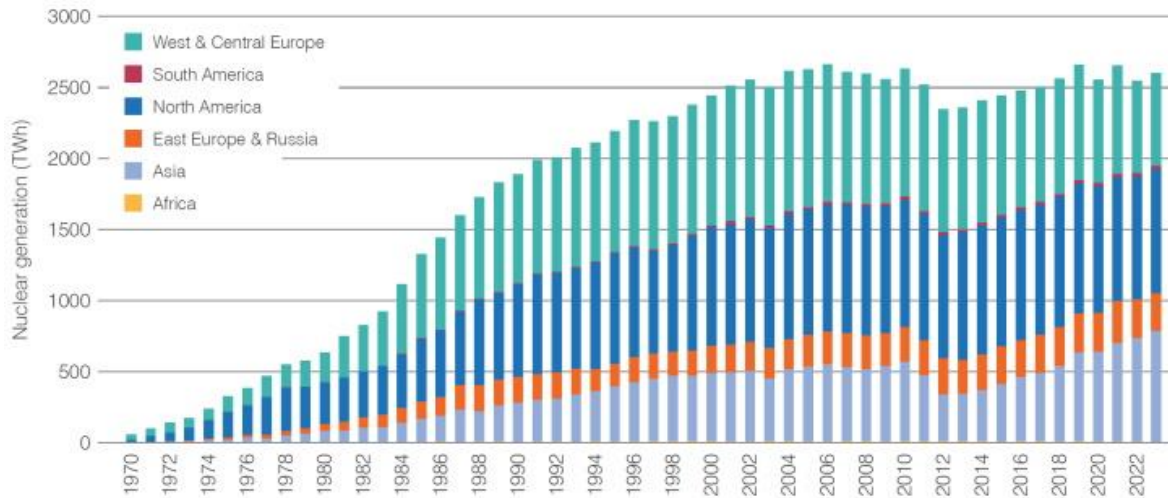


Figure 2. World's Nuclear Power Plant Energy Generation Trend (WNA, 2024).

The decision to install nuclear power plants is not usually made based on requests by the public, but rather by the decision of states. Generally, countries that make this decision are labor-intensive countries like Russia, China, and India. It is observed that developed countries that have completed their heavy industry phase and stabilized their economies tend to remain distant from nuclear power plants. The reason for this may be that the share of nuclear power plants in total electricity production reaches the saturation point, the low population growth rate, and the shrinkage in industrial growth rates (Temurçin & Aliagaoglu, 2003).

Currently, countries can be divided into four groups based on their approach to nuclear power plants (Melikoglu, 2016):

- Countries in the Middle East, North Africa, and South America prioritize economic development.
- Countries such as Russia, Canada, India, and the United States have increased security measures.
- Countries like Japan, Spain, and Portugal currently have a stable approach and are slowing down their nuclear development.
- Countries like Germany and Sweden have announced that they will slow down and eventually end their nuclear efforts.

China can be considered an exception to this classification, with 150 nuclear reactors planned to be built by 2035 (Ezell, 2024). In 2022, thirteen nations generated a minimum of 25% of their electricity from nuclear power. Among them, France derives approximately 70% of its electricity from nuclear energy, while Ukraine, Slovakia, Belgium, and Hungary rely on nuclear power for about half of their electricity. Turkey is among the countries that prioritize economic development in the first group.

However, this picture started to change as of 2022. According to the European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators (ACER), retail electricity prices were on average 30% higher on an annual basis in February 2022 (ACER, 2022). Energy security concerns and the recent spike in energy prices, especially following Russia's invasion of Ukraine, have caused governments to rethink their energy security strategies and emphasized the value of a diverse mix of non-fossil and domestic energy sources. Currently, 60 reactors are under construction with a total capacity of 61 GW. Of these, 26.3 GW are being built in China, 5.4 GW in India, 4.4 GW in Turkey, 4.4 GW in Egypt, 3.8 GW in Russia, 3.3 GW in the UK, and 14 GW in the remaining countries combined (IAEA, 2024). In addition, the United Kingdom, France, China, Poland, and India have recently announced energy strategies that give nuclear power important roles. Belgium and Korea have recently withdrawn plans to phase out existing nuclear power plants

(Schneider & Froggatt, 2020). The status of nuclear power plants in the world as of 2023 can be seen in Table 1.

Table 1. The Status of Nuclear Power Plants in the World as of 2023 (Schneider & Froggatt, 2020).

Shut Down Reactors	5
Reactors Whose Construction Started This Year	7
Reactors Under Construction	60
Total Reactor Number	440
Total Installed Power	390 GWe

In addition to the construction of new reactors, life extension of existing reactors seems to be an important step for governments in recent times. Most of the existing reactors are now at the aging stage. Life extension of existing nuclear power plants seems to be one of the most important steps toward the net-zero target in 2050. Currently, reactors over 30 years old account for 63% of the total capacity. At this point, it is an important indicator that the US has given 20-year life extensions to its 88 reactors with 40-year operating licenses, France and Belgium offer 10-year life extensions, Hungary, Finland, Czechia, and the United Kingdom offer 20-year life extensions to reactors (Schneider & Froggatt, 2020). Similar to the 1973 oil crisis, the current energy crisis could lead to a similar resurgence of nuclear energy. The policy environment is changing, creating opportunities for the return of nuclear power.

In recent years, the costs of establishing a nuclear power plant have risen with increased safety measures and accidents. Additional costs due to safety, financial liabilities in crediting, and nuclear wastes are the main reasons for this increment.

The safety assessment of nuclear accidents and situations caused by nuclear energy is made according to the International Nuclear and Radiological Event Scale (INES). The first three levels are considered as “incident” and the last four are considered as “accident” on the scale, which includes levels from 1 to 7. While the nuclear accidents that took place in Chernobyl in 1986 and Fukushima in 2011 were classified as the 7th level, which is the highest level, the Three Mile Island accident that occurred in the USA in 1979 was rated as the 5th level. According to the INES scale, there have been 16 incidents that are level 4 and higher, which are considered accidents, between 1952 and 2020 (Wikipedia, 2020). There have been hundreds of events in the lower levels, four of which took place in 2020 (IAEA, 2024).

When an accident occurs in a nuclear power plant it is accepted that the material and moral damage will be much more than the benefit that the power plant has provided to society until then. Moreover, it is necessary to distinguish between the risk and the size of accidents in nuclear power plants (Gürbüz, 2011). Although there is a lower risk of a major accident occurring, the impact and damage will be national rather than local. Radioactive material released after such accidents has long-term effects such as leukemia, infertility, cancer, and hereditary diseases. In addition, since the 1950s, when nuclear power plants were first established, radioactive substances have been observed in the teeth and bones of children, and there has been an increase in breast cancer in women (Kaya, 2012).

One of the most important parameters used when comparing energy production facilities is the chemicals they release into the environment and their effects on the environment in general. As it is known, polluting gases such as sulfur dioxide (SO₂), nitrogen oxide (NO_x), and carbon monoxide (CO) are released during electricity generation from fossil fuels. These gases trigger global warming by causing the greenhouse effect (Kaya, 2012). Nuclear power plants produce minimal greenhouse gas emissions during operation. According to the International Atomic Energy Agency (IAEA), the lifecycle emissions of nuclear energy, including mining, fuel processing, and waste management, are comparable to those of wind and solar power (IAEA, 2020). Additionally, according to World Nuclear Association’s (WNA) study, greenhouse gas emissions that occur in nuclear power plants is lower than renewable energy-based emissions (Kok & Benli, 2017).

The production of nuclear weapons is another issue to be considered when nuclear energy is in focus. These weapons are used three days apart for the first and last time in the human history. On August 6,

1945, the world's first deployed atomic bomb was dropped over the Japanese city of Hiroshima and three days later this time over the city of Nagasaki. In addition, more than 200 thousand people lost their lives in these cities, and the effects of cancer, hereditary diseases, and disabilities continue.

IV. TURKEY'S NUCLEAR ENERGY OUTLOOK

A. History

Turkey's history with nuclear energy dates back to 1956 when the country signed an information-sharing agreement with NATO in the nuclear field. That same year, the Atomic Energy Commission (AEK) was established to oversee studies on atomic energy. In 1957, Turkey joined the International Atomic Energy Agency (IAEA), a United Nations organization. And the first nuclear research center was built in Çekmece, Istanbul in 1962. Although a feasibility study for a nuclear power plant was launched in 1972 and the Akkuyu location was chosen, the project was not realized. Turkey made several attempts to launch tenders for nuclear power plants in 1976, 1983, 1993, and 1997. However, these attempts were cancelled following the 1979 Three Mile Island and 1986 Chernobyl accidents. After experiencing an energy shortage in 2000, Turkey reconsidered the idea of establishing a nuclear power plant.

When nuclear energy comes to the table for a country, it can be evaluated in three main sections. These are the reason why nuclear energy is demanded, namely the motivation, the financial, technological, and institutional infrastructure of the requesting country, namely the capacity, and which approach the requesting country adopts for this initiative, namely the strategy (Jewell & Ates, 2015).

A.A.1 Motivation

Many countries identify security of energy supply, meeting increasing electricity demand due to industrialization, reducing dependence on imported energy sources, combating global warming and preventing nuclear proliferation as the main motivating factors for investment in nuclear energy. In the case of Turkey, the main factors are security of supply, increasing electricity demand, reducing the current account deficit and employment. Turkey is heavily dependent on foreign energy sources as it has limited fossil energy resources other than lignite (Temurçin & Aliğaoğlu, 2003). Moreover, dependence on natural gas in energy production increases external dependence and poses a threat to security of supply. However, electricity generated from renewable energy sources cannot provide a stable generation performance due to its intermittent nature, making it a complementary energy source.

According to a study carried out by the Ministry of Energy and Natural Resources, the annual electricity demand was expected to increase by 6.3% in low demand prediction for the 2009-2018 period (TEIAS, 2009). However, this increase took place at 3.9% between these years, which means there was an increase in demand that was even below the low prediction. Ministry of Energy and Natural Resources does not have a study after this date, however, in another study (Bayrak, 2020) the annual average increase was predicted as 4.32%. If none of the licensed and pre-licensed projects are carried out, in 2025, it is estimated that the installed power reserve will be 35.9%, the project production reserve will be 20.3%, and the reliable generation reserve, which indicates the situation where all resources have the worst conditions, will be 2.8%. This demonstrates that if there is no addition to the current power plants, there will be no supply issues with the current capacity until the end of the year 2025. If that is the case, meeting the increasing demand is questionable. One also needs to take into consideration that the nuclear fuel for power plants cannot possibly be produced and processed in Turkey, which means that it is going to be imported. In addition, considering the amount of electricity to be paid in foreign currency for which a purchase guarantee is given, the issue of reducing foreign dependency and current account deficit should be reconsidered. It is clear that with the energy to be produced from this power plant, the need for imported natural gas and coal will decrease, but it should not be ignored that the compensation for this will not be done by the use of the country's resources, but by an energy production dependent on foreign resources. In the case of Akkuyu NPP, since this facility is the first nuclear power plant with the build-own-operate model in the world and the domestic industry contribution will be very low due to the

nature of this investment model, it seems that the main priority of this project is to meet the country's energy needs (TÜBA, 2019).

When evaluated in terms of employment, in a VVER type power plant with 2000 MW power, it is expected for approximately 3500 staff to work in the power plant. It can be estimated that up to twice the number of staff will be employed in the power plant with a power of 4800 MWe to be established in Akkuyu (TASAM, 2012).

A.A.2 *Capacity*

The capacity section includes criteria such as the country's financial capability, appropriate legislation, academic infrastructure and qualified manpower. Turkey has a unique approach to capacity as it has agreed with the Russian government to build the Akkuyu nuclear power plant on a build-own-operate model, with the high investment cost covered by the Russian company. In addition, 300 Turkish students have so far studied in Russia at undergraduate level as part of the agreement (Defensehere, 2023). This arrangement allows Turkey to subcontract in areas it is currently unable to fulfill. While Turkey has previous experience with nuclear energy, it is unclear whether its academic infrastructure is ready and compliant with existing standards. While Turkish legislation is in line with international standards, it lacks detailed provisions on waste and spent fuel disposal, which in the case of the Akkuyu plant is the responsibility of the Russian company.

A.A.3 *Strategy*

The third section, Strategy, discusses the country's approach to nuclear energy. It covers topics such as using domestic resources, importing technology from foreign countries, and evaluating public opinion on nuclear energy. Turkey emphasizes the "national energy" title in their approach to nuclear energy, but in the case of the Akkuyu instance, the nuclear power plant will be owned by a Russian company and the fuel and main human resource will be provided by Russia. This is an unprecedented approach in the history of nuclear energy, as it's the first time a country has allowed another country to build a nuclear power plant on its soil (Jewell & Ates, 2015). This approach reflects Turkey's past failures in attempting to develop nuclear energy. According to World Bank data, Turkey has been one of the 35 most politically unstable countries in the world on average between 1996 and 2019 (Worldbank, 2019). In such an environment, and despite economic development, there has been a lack of demand for nuclear energy, which has propelled the country towards this approach. Furthermore, the state's decision on nuclear energy in Turkey holds more weight than the public's view of nuclear energy. To properly address this topic, it is important to first examine the social acceptance of nuclear energy. There are three main elements related to the acceptance of nuclear energy in societies: the safe operating condition of the facilities, the management of nuclear waste, and nuclear armament (Jewell & Ates, 2015).

In Turkey, there has been an "event" in which Cobalt 60 capsules were sold to junk dealers, which was evaluated as 3rd level on the INES scale (Ovalı, 2021). This event, which took place when there was no nuclear power plant in Turkey, as well as the fact that there is a high number of worker deaths and worker accident rates should be considered in terms of the culture of radiation safety. In addition, under Article 52 of the Radioactive Waste Management Regulation, the person authorized to operate the facility bears the responsibility for the storage and disposal of spent fuel and radioactive waste generated in nuclear facilities. In this context, the Russian company that is going to operate Akkuyu NPP is responsible for decommissioning the plant and managing the waste and fuel. Nuclear facility operators will store the low and intermediate-level waste within the facility and establish another facility for storing spent fuel. For the Sinop NPP project, under the agreement made with the Japanese government, the Republic of Turkey is responsible for managing radioactive waste and fuel. In addition, as stated before, Turkey, which made its stance on nuclear armament clear with the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons which it signed in 1980, has stated that it will not produce nuclear weapons and will only use this technology for peaceful purposes. As is known, nuclear power does not directly activate nuclear weapons programs. Also, having a nuclear energy program is not a requirement to have a weapons program. Yet, it should not be forgotten that having nuclear power can be an important factor in terms of military deterrence.

Because a country's nuclear energy experience (human resources, energy independence, etc.) can be considered a move that will strengthen its hand in international politics.

Despite initial skepticism, there has been a positive shift in Turkey's approach towards nuclear energy. However, this perspective began to change after a series of accidents. The Chernobyl disaster, which took place in close proximity to Turkey, had a radioactive impact on tea and hazelnut production in the Black Sea region (CNN Türk, 2018). This raised concerns about the safety of these crops and prompted questions about the overall safety culture. Even though the topic has been on the agenda many times, the public's opinion on this subject has not become clear. Although subjects such as energy supply security, reducing the current account deficit and employment are important factors in creating a positive public opinion; accident risk, nuclear waste, and communal experiences cause social uncertainty in this regard.

At this point, one can open a parenthesis to question which technology society will use and how. Because the technology society will use should be evaluated morally, not economically. If a technology promises serious economic prosperity to the country and society, yet if it poses a threat to the future of that society, then the economic parameters are insignificant. Especially if it is a technology that will affect not only the current period but also the future periods (as in the case of nuclear technology) then this selection should be examined very well. The Stockholm Declaration published in 1972 touches on this subject by stating "People have the fundamental right to favorable living conditions, equality and freedom in an environment of a quality conducive to a dignified and decent life" (Kaya, 2012). Arising from this responsibility, the necessity of an Environmental Impact Assessment (EIA) report for activities that may cause environmental problems has come to the agenda of the whole world and has become mandatory in Turkey in 1983. However, it should not be forgotten that reservations such as harm to human health and environmental impact put not only the countries investing in this energy but also all regions where nuclear facilities are located at risk.

For Turkey, it is necessary to compose a National Nuclear Energy Program and determine the related strategies. This is of critical importance in terms of inspection and regulation. In this regard, an in-depth safety philosophy should be a roadmap for a safe nuclear power plant installation. In-depth safety philosophy consists of legislation, inspection, and accident procedures in the design, and it includes systems from the fuel pallets in the innermost part of the reactor to the safety shells constructed as layers (TÜBA, 2019).

The developments in the safety field are usually shaped by experiences following nuclear accidents. During the Fukushima NPP accident, it was not completely clear which institution had the responsibility regarding nuclear safety. In this regard, by carefully examining this incompatibility in the pre-accident legislation of Japan, it should be clearly stated in the legislation which institutions to these authorities and responsibilities belong to. Turkey is adding the international safety principles determined after the Fukushima accident to its legislation. Moreover, the institution or organization responsible for the implementation of licensing and regulatory activities should be independent of the political authority. During the Fukushima NPP accident, the nuclear operations regulatory agency was subordinate to the country's energy supply authority. Similarly, the institution that will supervise the power plant in Turkey is the state institution, the Turkish Atomic Energy Authority. It is a contradiction that a government agency affiliated with the Ministry of Energy and Natural Resources undertakes the independent supervision of a project to be made with an interstate agreement.

B. Reserves of Turkey Nuclear Power Plants

Turkey's uranium reserves are about 12 thousand tonnes (Uranium and Thorium in the World and in Turkey, 2017). Therefore, fuel for nuclear plants, enriched uranium, and operating technology used in these nuclear power plants should be imported. In addition to uranium, studies are being carried out to use thorium as nuclear fuel. Turkey's thorium reserves are around 370 thousand tonnes, which corresponds to around 6% of the world's reserves (MTA, 2017). Besides the fuel alternatives uranium and thorium, boron mine can play a significant role in controlling the reaction rate within the reactor as

it is good at neutron capture. Moreover, boron-doped materials can be used in the cooling function of the reactors (IAEA, 1996). Turkey has 73% of the world's boron reserves (Etimaden, 2019).

In the case of nuclear technology, uranium enrichment studies take an important place in the context of international politics. In a sense, Turkey's failure in nuclear power plants in its previous five initiatives cannot be fully understood without considering the political pressures of western states. However, in the last 15 years, the reactions against establishing nuclear power plants and the related embargoes have left their place for uranium enrichment studies (MUSIAD, 2021). In this conjuncture of events, where the same situation applies to not only Turkey but also Iran, criticism against nuclear facility establishment projects focuses on the topic of uranium enrichment studies. This can also be understood as a desire to remain dependent on these countries for fuel rods.

C. Akkuyu Nuclear Power Plant

Even though Turkey's ambitions in this area became more defined, it was unsuccessful in its first nuclear power plant tender in 1968-1969 due to economic and political problems. In the early 1970s, a feasibility study was carried out regarding the places where nuclear power plants could be established and Mersin-Akkuyu, Sinop-Inceburun, and Kırklareli-Igneada regions came to the fore. The second attempt in 1975-1976 failed due to the external embargoes following Cyprus Peace Operation in 1974. Turkey has put its stance on nuclear armament, which had developed in parallel with the nuclear energy discussions, with the Nuclear Non-Proliferation Treaty (NPT) it signed in 1980, stating that it will not produce nuclear weapons and will only use this technology for peaceful purposes. Although the steps accelerated with the establishment of the Turkish Atomic Energy Authority (TAEK) in 1982, the third attempt in 1982-1985 ended with uncertainties in legal regulation. After the Chernobyl disaster in 1986, Turkey suspended its nuclear power plant plans for a while, and lastly, Turkey's attempt in 1998-2000 was unsuccessful due to the violation of tender specifications and allegations of bribery (Özalp, 2017). Nuclear power plant installation attempts, which fluctuated throughout the following years, became an important item on the agenda once again with Turkey Electricity Trade and Contracting Inc.'s (TETAS) tender for the electricity purchase in connection with the power plant installation in Mersin-Akkuyu. But the tender in this attempt was canceled because of the absence of any bids other than Rosatom, the Russian State Nuclear Energy company. Following this event, in the sixth and last attempt; the "Agreement on Cooperation on the Establishment and Operation of a Nuclear Power Plant in the Akkuyu Field in the Republic of Turkey" was signed between the Republic of Turkey and the Government of the Russian Federation, thereby ending the long-running process with an intergovernmental agreement (Artantas, 2024). In 2013, a similar agreement was signed with Japan for the establishment of a nuclear power plant in Sinop.

The power plant being built in Akkuyu, consisting of 4 VVER-1200 type reactors with a total power of 4800 MWe, is similar to Russia's water-cooled type (PWR) Kalininskaya Nuclear Power Plant. It is based on the NPP-2006 serial project and is expected to meet about 10% of Turkey's electricity needs when fully operational by the end of 2028 (Report News Agency, 2023). Lightly enriched uranium dioxide will be used as fuel in the Akkuyu NPP, which will be operated by the Russian consortium, with an expected operational lifespan of 60 years (Akkuyu NPP, 2024). The average cost of power plant is estimated to be 20 billion dollars, and the first unit is expected to come to life in 2025, with the remaining units becoming operational sequentially until 2028 (WNA, 2024a). As of February 2025, the commissioning and testing phase of the onshore pumping station of the first unit of the power plant started and current status of the plant construction is as shown in Figure 3 (WNN, 2025).



Figure 3. Start-up work under way for pumping station of the first unit of the power plant (WNN, 2025).

Akkuyu NPP, Turkey's first large-scale nuclear power plant project, is predicted to make a significant contribution to meeting the country's electricity demand and reducing foreign dependency. The construction of the Akkuyu NPP is expected to reduce Turkey's dependence on natural gas imports, especially from Russia. It is also anticipated that the plant will contribute to the decrease of the current account deficit by reducing the country's energy import bill. However, concerns about safety, environmental impact, and economic viability remain. The BOO model, which involves foreign ownership and operation of the plant, has raised questions about long-term strategic control and the security implications of relying on a foreign entity for a critical national infrastructure project.

D. Sinop Nuclear Power Plant

In addition to the Akkuyu NPP, Turkey signed another intergovernmental agreement with Japan for the construction of the Sinop NPP in 2013 (NEI, 2013). This plant was initially planned to be built by a consortium led by Mitsubishi Heavy Industries and Itochu Corporation, with technical cooperation from France's Areva. The Sinop NPP, intended to have four ATMEA1 reactors with a combined power of 4800 MWe, faced significant challenges and ultimately did not progress under the original consortium. The first reactor was targeted to become operational by the late 2023, and all four reactors are expected to be operational by the 2030s (Akyüz, 2017). Unfortunately, the project, which was launched in 2013, was halted in 2019 due to cost increases.

Recently, Turkey's Nuclear Energy Company (TÜNAŞ) was granted "Owner" status in 2023 to lead the Sinop project, reflecting a new direction in Turkey's nuclear energy ambitions (NBP, 2023). But Turkey is still negotiating with Russia and South Korea as potential partners for the Sinop NPP (Power Technology, 2024). Environmental and legal processes are also ongoing within the scope of the project, in which Russia seems to be at the forefront. The cost estimate for the Sinop NPP has significantly increased, with recent reports indicating a potential investment of approximately \$40 billion (Daily Sabah, 2023). This project aims to enhance Turkey's energy security, create jobs, and foster economic growth through the development of local industries related to nuclear power.

E. Cost of Electricity

For the sustainable development and growth of a country, energy must be supplied continuously, in the desired quality, with a reasonable price, clean, and safely (Özalp, 2017). One of these criteria is to examine whether the electricity to be generated from nuclear power plants has a reasonable price.

It is planned to produce 35 TWh of electricity per year from the Akkuyu NPP, which will be established under the agreement with Russia, and 34 TWh of electricity per year from the Sinop NPP (Kok & Benli, 2017). If these two power plants were currently operating, they would have met 21% of Turkey's 327

TWh (TEIAS, 2023) electricity demand in 2023. With the liberalization of the electricity market in Turkey, many privatizations have occurred in this sector, and the state has turned from being a service provider public institution to a structure that oversees the electricity market. In this context, Turkey has guaranteed that it will purchase 50% of the electricity to be produced from the power plant to be built in Akkuyu from the Russian company for 15 years for 12,35/kWh US dollar cents. The 2023 yearly average of the Market Clearing Price (PTF) in the Day-Ahead Market in the Turkish Electricity Market was 9.656 USD per kWh (EPIAŞ, 2025). Similarly, the guarantee of purchase was given to the Japanese consortium for 11.80 US dollar cents per kWh (Nogay, 2016). In addition, the cost of electricity is constantly increasing due to the ongoing exchange rate fluctuations in Turkey.

As the cost of establishing nuclear power plants is high, companies that build nuclear power plants look for a guarantee of purchase and some incentives in the countries where the plants are to be established. A similar situation holds for Renewable Energy Resources Support Mechanism (YEKDEM), where the Turkish state used an incentive mechanism for energy production from renewable sources and gave a 10-year purchase guarantee. In theory, it is reasonable for Turkey to give such a guarantee to Russia for Akkuyu NPP. However, in an assurance like this, the price per kWh must be competitive.

When nuclear energy is on the agenda, the preference for renewable energy sources over nuclear power plants is one of the most widely opposed arguments. When a nuclear power plant and a solar power plant with the same installed capacity are compared, nuclear power plants have 8 times more electricity generation potential (Karaveli et al., 2015). Moreover, nuclear power plants would be more advantageous compared to conventional thermal power plants in the case of a carbon tax in the future.

The economic viability of nuclear power is influenced by several factors including initial capital costs, operational and maintenance costs, fuel costs, and decommissioning costs. To evaluate the economic feasibility of nuclear power in Turkey, we can use the Levelized Cost of Electricity (LCOE), which represents the per-unit cost (typically in USD per MWh) of building and operating a generating plant over an assumed financial life and duty cycle.

The LCOE can be calculated using the Eq. 4 below:

$$LCOE = \frac{\sum_t (I_t + M_t + F_t) / (1+r)^t}{\sum_t (E_t) / (1+r)^t} \quad (4)$$

where:

- I_t is the investment expenditures in the year t ,
- M_t is the operation and maintenance expenditures in the year t .
- F_t is the fuel expenditures in the year t ,
- E_t is the electricity generation in the year t ,
- r is the discount rate, and
- t is the year of the study.

By comparing the LCOE of nuclear energy with that of renewable sources such as wind and solar, as well as fossil fuels, Turkey can make informed decisions on its energy mix.

In the generation of fuel-based electricity, the ratio of the total cost of the fuel to the production cost is 80-85% for natural gas, 45-50% for coal, and 10-15% for nuclear. For example, if fuel prices are doubled, the cost of electricity increases by 66% in natural gas plants, 31% in coal plants, and only 9% in nuclear power plants. This clearly shows the importance of nuclear power plants in establishing a sustainable energy policy (Kok & Benli, 2017). Yet, the situation is slightly different in terms of the Levelized electricity cost. The Levelized Cost of Electricity produced from nuclear power plants has increased from \$117/MWh in 2015 to \$155/MWh in 2019 and the same cost is around \$40/MWh and \$41/MWh for solar and wind power (Bayrak, 2020). As it can be seen, while the cost of electricity produced from sources such as solar and wind decreases depending on the developments in production and installation, electricity cost in nuclear energy increases with the effect of safety-related costs. However, prolonging the operational life of existing nuclear power plants for unit electrical power

generation appears to have the lowest Levelized Cost of Electricity of all energy sources compared to installing new power plants (IEA & NEA, 2020).

Using the high amount of heat that is released while generating electricity from nuclear power plants will also increase the general efficiency of these systems. One can benefit from the waste heat obtained from these power plants in hydrogen production, water treatment, process heat as well as district heating.

F. SWOT Analysis

SWOT analysis is a strategic planning technique that provides assessment tools by identifying the internal and external factors affecting a business or investment. It helps to make more careful and informed decisions by assessing internal factors such as strengths or weaknesses and external factors such as opportunities and threats. This section presents a SWOT analysis of some of the factors considered in this study. Turkey's approach to nuclear energy is shown in Table 2 with strengths, weaknesses, opportunities and threats.

Table 2. SWOT Analysis of Nuclear Energy in Turkey.

Strengths	Weaknesses
• High capacity factor • High process heat • Low carbon emissions • Reliable base-load electricity • High boron and thorium reserves • The government's strong commitment to the nuclear power sector • Strategic location to serve as a transit hub for energy exports	• Low uranium reserves • The presence of another country's power plant on its territory • High security costs • Imported uranium supply • Low public acceptance • Limited experience and infrastructure in nuclear energy • Dependence on foreign technology and expertise
Opportunities	Threats
• Commercialization of new types of thorium-fueled reactors • Use of boron doped materials in reactor cooling • Reliable source for achieving sustainability goals • An option to fight climate change • Small modular reactors • Ability to diversify the energy mix and reduce dependence on imported energy sources	• High rates of occupational accidents and worker fatalities in Turkey • Continued dependence on foreign fuel • Terror threat • Political risks under intergovernmental agreements • Public opposition to nuclear power and accident potential

F.A.1 Strengths

The high capacity factor and reliable base-load electricity of nuclear power plants provide a steady and dependable source of energy. Additionally, the low carbon emissions of nuclear energy align with the global push towards reducing greenhouse gas emissions and combatting climate change. The country's abundant reserves of boron and thorium, as possible nuclear fuels, are another strength. The government's strong commitment to developing the nuclear energy sector further strengthens Turkey's position in this field. The strategic location of the country also provides opportunities for it to serve as a transit hub for energy exports, further expanding its reach in the energy sector.

F.A.2 Weaknesses

A poor reserve of uranium can limit the country's ability to produce nuclear energy domestically. Furthermore, having another country's power plant located on its territory may pose regulatory and

safety concerns, as well as limit the country's control over its energy production. High safety costs associated with nuclear energy, as well as the reliance on imported uranium supplies, can also impact the financial viability of the energy sector. Additionally, low public acceptance of nuclear energy can create challenges in gaining support for new projects and ensuring the long-term success of the sector. Finally, the limited experience and infrastructure in nuclear energy, as well as the dependence on foreign technology and expertise, can limit the country's ability to develop and maintain a robust nuclear energy sector.

F.A.3 Opportunities

The commercialization of new types of Thorium-fueled reactors and the use of boron-doped materials in reactor cooling can increase the efficiency and safety of the country's nuclear energy infrastructure. Additionally, in the event of a future carbon tax, nuclear power plants may become more financially advantageous compared to thermal power plants. Nuclear energy can also play a role in the fight against climate change by providing a low-carbon source of energy. The development of small modular reactors can increase the flexibility and scalability of the energy sector, while reducing the costs associated with building and maintaining large power plants. Finally, the ability to diversify the energy mix and reduce reliance on imported energy sources can increase the country's energy independence and security.

F.A.4 Threats

High occupational accident rates and worker fatalities in the country raise concerns about the safety of the workforce in the energy sector. Additionally, the continued dependence on foreign fuel can increase the country's vulnerability to supply disruptions and price fluctuations. The terror threat and political risks associated with intergovernmental agreements pose additional challenges to the stability and security of the energy sector. Finally, public opposition to nuclear energy, as well as the potential for accidents, can limit support for new projects and damage the reputation of the nuclear energy.

V. CONCLUSION AND POLICY IMPLICATIONS

Turkey is a foreign-dependent country that meets most of its electricity production with fossil fuels. This situation carries risks in terms of supply security. To eliminate these risks, as stated in Turkey's goals, the country desires to invest in renewable energy sources while realizing the establishment of a nuclear power plant it aimed for more than half a century. However, Turkey's path in this regard contradicts one of its main motivations, reducing dependency on external resources, as the fuel to be used in these power plants will be produced and processed abroad and then imported. In addition, the guarantee of purchase given in foreign currency does not seem to be a factor that can reduce the current account deficit. Akkuyu NPP is going to be constructed with the build-own-operate investment model, the first of its kind in the sector, and will be the first nuclear power plant to be owned by a country that is within the borders of another country.

Turkey is a country that does not have a good report in terms of safety culture. A high number of worker deaths and a high rate of work accidents should be taken into account for the culture of radiation safety. In this context, which institutions have the authority and responsibility should be clearly stated in the legislation. In addition, the authority and responsibilities of the institution that will execute licensing and regulatory activities should be clearly defined and should have a supervisory and regulatory mechanism independent of the state structure. Similarly, it should be clearly stated by whom and how the nuclear wastes generated in the power plants will be disposed of.

It is expected for nuclear energy to have a significant function in a sustainable energy policy. Studies on using thorium as the nuclear fuel and the use of boron reserves in controlling reaction rate and as a coolant in the power plants would be an important step for Turkey, which is advantageous in the reserves of these two mines. Moreover, with the commercialization of new thorium-fueled reactors, foreign dependence on fuels can be prevented.

The previous approach of western countries to the establishment of nuclear power plants, which is one of the most important reasons behind Turkey's unsuccessful attempts has now left its place to

uranium enrichment studies and fuel rods. It should be kept in mind that this perception change in the international public opinion reflects positively on Turkey's nuclear power plant projects, but if the next step is taken with further nuclear development studies, there may be reactions, embargoes, and international sanctions once again. For this reason, providing domestic equipment and technology support in such situations is of great importance in terms of reducing foreign dependency.

Overall, Turkey's approach to nuclear energy faces a mix of challenges and opportunities. While the high capacity factor, low carbon emissions, and strong government commitment offer advantages, the limited experience and infrastructure, dependence on foreign technology and fuel, and public opposition pose significant threats. However, the commercialization of new reactors, flexibility of small modular reactors, and potential for reduced carbon emissions and energy independence are opportunities for the country to further develop its nuclear energy sector.

Turkey, as in the examples of South Korea and Japan, desires to construct the third nuclear power plant with its resources after taking these steps. Therefore, Turkey sees these first steps as a transition period. Yet, Japan was only able to build its sixth nuclear power plant with its resources, while South Korea built its ninth nuclear power plant with its resources (Jewell & Ates, 2015). Considering these situations, the time elapsed between the first nuclear power plant and the first domestic nuclear power plant seems to be longer than Turkey envisages.

Despite such negative indicators, Turkey's desire to accelerate its steps in the field of nuclear energy may stem from its desire as a developing country to diversify its resources and meet its increasing energy needs from a reliable source. And it seems that the future of nuclear energy in the world will be based on agreements between governments and Turkey's initiative will provide a significant reference for other initiatives in the future.

DECLARATIONS

Acknowledgments: The author(s) have no acknowledgments for any individual(s) and/or institution(s).

Author Contributions: Conceptualization, M.C.M.; methodology, M.C.M. and A.I.A.; validation, M.C.M.; investigation, M.C.M.; resources, M.C.M.; data curation, M.C.M.; writing—original draft preparation, M.C.M. and A.I.A.; writing—review and editing, M.C.M. and A.I.A.; supervision, M.C.M. and A.I.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Conflict of Interest Statement: The author(s) declare no conflict of interest.

Copyright Statement: The authors retain the copyright of their work published in the journal, and the work is published under the CC BY-NC 4.0 license.

Funding/Supporting Organizations: This research did not receive any external funding.

Ethical Approval and Informed Consent: This article does not contain any studies involving human or animal subjects. Scientific and ethical principles have been followed during the preparation of this study, and all sources used have been cited in the references.

Plagiarism Statement: This article has been checked using plagiarism detection software. No plagiarism has been detected.

Availability of Data and Materials: Data sharing is not applicable.

Use of AI Tools: The author(s) declare that no Artificial Intelligence (AI) tools were used in the preparation of this manuscript.

REFERENCES

- ACER. (2022). ACER's Final Assessment of the EU Wholesale Electricity Market Design.
- Akkuyu NPP. (2024). About the project. <https://akkuyu.com/en/about/history> (Accessed on: April 2, 2024)
- Akyüz, E. (2017). Advantages and Disadvantages of Nuclear Energy in Turkey: Public Perception. *Eurasian Journal of Environmental Research*, 1(1), 1–11.
- Artantas, O. C. (2024). Türkiye's nuclear energy aspirations: Policy challenges and legal trajectory. *The Journal of World Energy Law & Business*, 17(3), 201–214.

- Basit, M. A., Dilshad, S., Badar, R., & Sami Ur Rehman, S. M. (2020). Limitations, challenges, and solution approaches in grid-connected renewable energy systems. *International Journal of Energy Research*, 44(6), 4132–4162.
- Bayrak, Y. (2020). Yakın Dönem (2020- 2025) Elektrik Üretim-Tüketim Projeksiyonuna Yönelik Bir Çözümleme. TMMOB.
- BBC News Turkish. (2023). Karadeniz gazı Türkiye'nin enerjide dışa bağımlılığına ne kadar çözüm olabilir? <https://www.bbc.com/turkce/articles/cnl92vnqwpzo> (Accessed on: April 2, 2024)
- CNN Türk. (2018). Çernobil faciası neydi, Türkiye'yi nasıl etkilemişti? <https://www.cnnturk.com/turkiye/chernobil-faciasi-neydi-turkiyeyi-nasil-etkilemist-664222> (Accessed on: April 2, 2024)
- Daily Sabah. (2023). Türkiye to attract \$40B investment for 2nd nuclear plant. <https://www.dailysabah.com/business/energy/turkiye-to-attract-40b-investment-for-2nd-nuclear-plant> (Accessed on: April 12, 2024)
- Defensehere. (2023). Rusya, Akkuyu NGS için 40 Türk öğrenciye daha eğitim verecek. <https://www.defensehere.com/tr/rusya-akkuyu-ngs-icin-40-turk-ogrenciye-daha-egitim-vercek> (Accessed on: June 5, 2024)
- Elibol, E., Dikmen, O. (2024). Long-term performance investigation of different solar panels in the West Black Sea Region. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26, 875–899.
- EPİAŞ. (2025). Transparency Platform. EPİAŞ Transparency Platform. <https://seffaflik.epias.com.tr/home> (Accessed on: April 12, 2024)
- Etimaden. (2019). TÜRKİYE'DE BOR. <https://www.etimaden.gov.tr/turkiyede-bor> (Accessed on: April 12, 2024)
- Euronuclear. (2024). Fuel comparison. <https://www.euronuclear.org/glossary/fuel-comparison/> (Accessed on: April 12, 2024)
- Ezell, S. (2024). How Innovative Is China in Nuclear Power? Information Technology.
- Gümüş, B. S. (2024). Türkiye Elektrik Görünümü 2024. EMBER.
- Gürbüz, Ö. (2011). Blog—Yetiş başbakanım tüp patladı! Blogspot. <https://ozgurgurbuz.blogspot.com/2011/04/yetis-basbakanm-tup-patladi.html> (Accessed on: April 12, 2024)
- IAEA. (1996). Processing of Nuclear Power Plant Waste Streams Containing Boric Acid.
- IAEA. (2020). Climate Change and Nuclear Power 2020.
- IAEA. (2024). Latest Events. <https://www-news.iaea.org> (Accessed on: April 23, 2024)
- IAEA. (2024). Power Reactors Under Construction. <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/UnderConstructionReactorsByCountry.aspx>
- IEA. (2022). Nuclear Power and Secure Energy Transitions: From today's challenges to tomorrow's clean energy systems <https://doi.org/10.1787/aca1d7ee-en>
- IEA. (2023). World Energy Outlook 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> (Accessed on: April 23, 2024)
- IEA, NEA. (2020). Projected Costs of Generating Electricity 2020 Edition.
- Jewell, J., & Ates, S. A. (2015). Introducing nuclear power in Turkey: A historic state strategy and future prospects. *Energy Research & Social Science*, 10, 273–282.
- Karaveli, A. B., Soytaş, U., & Akinoglu, B. G. (2015). Comparison of large scale solar PV (photovoltaic) and nuclear power plant investments in an emerging market. *Energy*, 84, 656–665
- Kaya, İ. S. (2012). Nükleer Enerji Dünyasında Çevre ve İnsan. *Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 12(1), 71–90.
- Kok, B., & Benli, H. (2017). Energy diversity and nuclear energy for sustainable development in Turkey. *Renewable Energy*, 111, 870–877.
- Maradin, D. (2021). Advantages and Disadvantages of Renewable Energy Sources Utilization. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11(3), 176–183.
- Melikoglu, M. (2016). The role of renewables and nuclear energy in Turkey's Vision 2023 energy targets: Economic and technical scrutiny. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1–12.
- MTA. (2017). Uranium and Thorium in the World and in Turkey.
- MUSIAD. (2021). Çerçeve Magazine.
- NBP. (2023). TÜNAŞ Granted Owner Status To Build Türkiye's 2nd Nuclear Power Plant—Sinop. <https://www.nuclearbusiness-platform.com/media/insights/tunas-granted-owner-status-to-build-turkiyes-2nd-nuclear-power-plant-sinop>

- NEI. (2013). Turkey and Japan agree framework for Sinop nuclear plant. <https://www.neimagazine.com/news/turkey-and-japan-agree-framework-for-sinop-nuclear-plant/> (Accessed on: June 5, 2024)
- Nogay, H. S. (2016). Accelerating the Transition to Nuclear Energy Systems in Turkey.
- Ovalı, E. (2021). RADYASYON KAZALARI. Türk Hematoloji Derneği. <https://www.thd.org.tr/thddata/books/29/radyasyon-kazalari-ercument-ovalı.pdf> (Accessed on: June 5, 2024)
- Özalp, M. (2017). Türkiye’de Nükleer Enerji Kurulumunun Enerjide Dışa Bağımlılık ve Arz Güvenliğine Etkisi. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 18(2), 175–188.
- Power Technology. (2024). Turkey continues negotiations over new nuclear power plants. <https://www.power-technology.com/news/turkey-continues-negotiations-with-russia-china-and-south-korea-on-nuclear-development/>
- Report News Agency. (2023). Energy Minister: Akkuyu NPP to cover 10% of Türkiye’s electricity needs. <https://report.az/en/energy/energy-minister-akkuyu-npp-to-cover-10-of-turkiye-s-electricity-needs/> (Accessed on: June 5, 2024)
- Schneider, M., & Froggatt, A. (2020). *The World Nuclear Industry Status Report 2020* (pp. 203–209). https://doi.org/10.1142/9789811213953_0021
- SHURA. (2023). Türkiye Enerji Dönüşümü Görünümü 2023.
- TASAM. (2012). Türkiye 2023 Uluslararası Nükleer Teknoloji Transferi Kongresi Sonuç Raporu ve Bildirgesi.
- TEIAS. (2009). Türkiye Elektrik Enerjisi 10 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu (2009 – 2018).
- TEIAS. (2023). 2023 Yılı Elektrik Üretim-Tüketim Raporu. <https://www.teias.gov.tr/aylik-elektrik-uretim-tuketim-raporlari> (Accessed on: December 11, 2024)
- Temurçin, K., & Aliagaoglu, A. (2003). Nükleer Enerji ve Tartışmalar Işığında Türkiye’de Nükleer Enerji Gerçeği. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 1(2), 25–39.
- TÜBA. (2019). Nükleer Enerji Raporu.
- Türkiye Ministry of Energy. (2025). *Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources*. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> (Accessed on: December 21, 2024)
- Wikipedia. (2020). International Nuclear Event Scale. https://en.wikipedia.org/wiki/International_Nuclear_Event_Scale (Accessed on: December 21, 2024)
- WNA. (2024). World Nuclear Performance Report 2024.
- WNA. (2024a). Nuclear Power in Turkey. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/turkey> (Accessed on: September 3, 2024)
- WNN. (2025). Start-up work under way for Akkuyu pumping station. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/start-up-work-under-way-for-akkuyu-pumping-station> (Accessed on: October 13, 2024)
- Worldbank. (2019). Worldwide Governance Indicators. <https://www.worldbank.org/en/publication/worldwide-governance-indicators/interactive-data-access> (Accessed on: October 13, 2024)

Araştırma Makalesi (Research Article)

Düzce İli Belediye Atıklarının Yenilikçi Bir Yaklaşım ile Yönetilmesinin Sera Gazı Salımının Azaltılmasına Etkisi

 **Gül Eroğlu Bulut^{a,*}**,  **Özgür Doğan^b**

^aDüzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı, Düzce, Türkiye.

^bTÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Kocaeli, Türkiye.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author): guleroglubulut@duzce.edu.tr

Makale Bilgileri (Article Info):

Geliş (Received): 18/11/2024, Revizyon (Revision): 31/03/2025, Kabul (Accepted): 22/04/2025.

DOI: 10.70081/duted.1587184

ÖZET

Günümüzde artan enerji ihtiyacı nedeniyle ülkeler, bu talebi karşılamak için farklı kaynaklardan yararlanmaktadır. Farklı enerji kaynaklarından biri de biyobozunur atıklardan elde edilen enerjidir. Biyobozunur atıklar ev ve işyerlerinden toplanarak çöp alanlarına taşınan atıkların %50-60 oluşturmaktadır. Bu çalışmada 2025-2035 yılları arasında Düzce ili nüfus projeksiyon değerleri belirlenmiş, kişi başı atık üretim miktarı tespit edilmiş ve gelecekte üretilecek atık miktarı hesaplanmıştır. Bu yıllar içerisinde oluşacak katı atık içeriğinde bulunan biyobozunur atıklardan potansiyel biyogaz oluşum miktarı belirlenmiş ve buna göre enerji değeri hesaplanmıştır. En son olarak da biyobozunur yapıdaki atıklardan elde edilen elektrik üretimi analizi yapılmıştır. Düzce ilindeki evsel atıkların bir biyogaz tesisinde değerlendirilmesi ile 2025 yılında biyobozunur atıklar kullanılarak 3,4 MWh'lık elektrik üretimi gerçekleştirilecek 2035 yılında bu yaklaşık olarak 1,5 kat artarak 5,3 MW ulaşacaktır. 2035 yılında Düzce ilinde oluşması beklenen 170685 ton/yıl biyobozunur atıktan elde edilecek biyogazın elektrik enerji üretiminde kullanılması durumunda 20,07 Mton CO₂ eşdeğer sera gazı salımında azalma sağlanabileceği tespit edilmiştir. Belediye atıklarından evsel organik atıklarının ayrıştırılıp sıfır atık uygulamasına göre yönetilmesi, döngüsel ekonomi kavramına uygunluk ve iklim değişikliği uyum ve azaltım politikasına katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Atık, Biyobozunur, Biyogaz, Düzce.

The Effect on Greenhouse Gas Emission Mitigation by Innovative Municipal Solid Waste Management in Düzce Province

ABSTRACT

Due to the increasing energy demand today, countries benefit from different energy sources to meet their energy demands. One of the different energy sources is the energy obtained from biodegradable waste. Biodegradable waste constitutes 50-60% of the waste collected from homes and workplaces and transported to landfills. In this study, the population projection values of Düzce province between 2025 and 2035 were determined, the amount of waste production per capita was determined and the amount of waste to be produced in the future was calculated. The potential amount of biogas formation from biodegradable waste in the solid waste content to be generated during these years has been determined and the energy value has been calculated. Finally, electricity production obtained from biodegradable waste was analyzed. By utilizing domestic wastes in a biogas facility in Düzce province, 3.4 MWh of

electricity will be produced using biodegradable wastes in 2025. In 2035, this will increase approximately 1.5 times and reach 5,3 MW. It has been determined that a reduction in greenhouse gas emissions of 20.07 Mton CO₂ equivalent can be achieved if the biogas obtained from 170685 tons/year of biodegradable waste expected to be generated in Düzce Province in 2035 is used in electrical energy production. Segregation of domestic organic waste from municipal waste and managing it according to zero waste application will contribute to the concept of circular economy and climate change mitigation and adaptation policy.

Keywords: *Biodegradable waste, Biogas, Düzce, Waste.*

I. GİRİŞ

Artan dünya nüfusu ile birlikte üretim ihtiyacı da artış göstermektedir ve dolayısıyla üretim-tüketim alışkanlıkları farklılaşmaktadır. Bununla birlikte özellikle kentlerde üretilen katı atık miktarlarında artış gözlenmektedir. 1970’li yıllardan itibaren atıkların düzensiz (vahşi) depolanması sorun oluşturmaya başlamıştır ve gelişmiş ülkelerde düzenli depolama yaygınlaşmıştır. Sonrasında ise yakma, gazlaştırma ve kompostlaştırma gibi alternatif atık bertaraf teknolojileri gelişmeye başlamıştır (Gültekin, 2021).

Teknolojik gelişmeler ve dünya nüfusundaki artış gibi sebeplerle dünyada enerjiye olan talep artmaktadır. Kentsel atıkların organik kısmından elde edilebilecek enerji hem yenilenebilir enerji uygulaması olup hem de karbondioksit ve metan emisyonlarını azaltmaya fayda sağlamaktadır. Kentsel atıklardan sağlanan enerji, bölgesel enerji ihtiyacını karşılamaya katkı sağlayacaktır (Kankılıç ve Topal, 2015).

Bu çalışma Düzce ili belediye atığı yönetimi için 2025-2035 yılları arası nüfus verileri ve atık miktarının projeksiyonu ve evsel katı atıkların biyobozunur yapıdaki kısımlarının değerlendirilmesi üzerine incelemeleri içermektedir.

Düzce ili iki metropol il (Ankara ve İstanbul) arasında batıda Sakarya, güney ve güney doğudan Bolu ve kuzeydoğudan Zonguldak illeri ile çevrilidir. 1999 yılına kadar Bolu iline bağlı bir ilçe iken 1999 yılı depremden sonra il olmuştur. Düzce ili yüzölçümü 2 574 km² olup rakımı 160 m’dir. Kuzey Karadeniz’de 22 km kıyı şeridinde sahiptir.

Düzce Türkiye Cumhuriyeti’nin Karadeniz Bölgesi’nin batı Karadeniz Bölümü’nde yer alan ilidir. 2023 yılı Düzce ili nüfusu 409865’dir. 2023 yılı sonu nüfus verilerine göre % 69,75 i şehirlerde yaşamaktadır. Düzce ili merkez ilçeyle beraber 8 İlçe, 10 belediye, bu belediyelerde 115 mahalle ve ayrıca 278 köy vardır.

Bu çalışmada Düzce ili merkez ve 8 ilçeye ait belediyelerin atık projeksiyonu ve atıklarından elektrik enerjisi ve ısı enerjisinin 2025-2035 yılları arasındaki projeksiyonu belirlenmiş olup, özellikle ülkemizin enerji üretimi konusunda dışa bağımlılığı azaltma konusunda belediye atıklarının gerek elektrik gerekse enerji ihtiyaçlarının karşılanması konusunda önem arz ettiği hususunun bilinci ile belediye atıklarından evsel organik atıklarının ayrıştırılıp sıfır atık uygulamasına göre yönetilmesi ve bunun sonucunda sağlanacak sera gazı azaltım potansiyeli hesaplanmıştır.

II. MATERYAL METOT

A. Nüfus Projeksiyonu

Düzce ili 2025-2035 yılları nüfus projeksiyonu hesapları, TÜİK, Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi (ADNKS) sonuçları, 2023 verilerine göre (TÜİK, 2024) yıllık nüfus artış hızı alınarak hesaplanmıştır. Nüfus artışı Düzce ili merkez ve ilçelere göre farklılık göstermektedir. Yıllık ortalama nüfus artış hızına göre Düzce ili merkez ve ilçelerde 2025-2035 yılları arasında nüfus artışı olması beklenirken Çilimli ilçesinde yıllık ortalama artış hızı negatif olarak -0,0284443 değer göstererek yıllara göre nüfus değerinde azalma olması beklenmektedir. En yüksek artış oranı ise Yığılca ilçesinde yıllık ortalama artış hızı 0,0716101’dir.

B. Kişi Başı Atık Oluşum Projeksiyonu

Belediyeler tarafından ya da belediyeler adına toplanan atıklar belediye atıklarını temsil etmektedir. Belediye atığının büyük çoğunluğu evsel atıklardan oluşmaktadır. Ancak ticaretten, ofis binalarından, kurumlardan ve küçük işletmelerden alınan atıklar da toplam belediye atığına dahil edilmektedir. Her sene kişi başı ortalama belediye atık miktarı artış hızı Türkiye'nin ekonomik büyüme hızı baz alınarak 1,03 alınmıştır ve 2025-2035 yılları arasındaki kişi başı oluşan atık miktarı projeksiyonu hesaplanmıştır (Tablo 2).

C. Toplan Atık Oluşum Miktarı Projeksiyonu

Düzce ili Merkez ve ilçeleri için hesaplanan 2025-2035 yılları arası nüfus değerleri ve hesaplanan kişi başına düşen atık miktarı değerleri kullanılarak Düzce ili Merkez ve ilçeleri 2025-2035 yılları arası toplam belediye atık oluşum miktarları hesaplanmıştır (Tablo3).

D. Düzce İli Belediye Atığı Bileşenleri

Düzce ilinde oluşan belediye atığı içeriğine ait yüzdesel atı atık dağılımı bilgileri "Düzce İli Katı Atık Yönetim Planı" için yapılan çalışmalardan faydalanılmıştır. Belediye atığı içeriğinin yüzdesel dağılımı Tablo 1'de yer almaktadır (TÜBİTAK MAM, 2017).

Tablo 1. Belediye Atıklarının Bileşenleri ve Yüzdesel Değerleri (TÜBİTAK MAM, 2017).

Atıkların Bileşenleri	Yüzdesel Dağılımı, %
Kağıt-Karton	15,26
Cam	4,67
Plastikler	8,05
Metaller	3,02
Mutfak Atıkları	29,79
Tehlikeli Atıklar	1,02
Park-Bahçe Atıkları	0,45
Diğer	37,74

Atıklar biyobozunur atık, geri kazanılabilir atık ve diğer (inert) atıklar olarak 3 ayrı başlığa ayrılmaktadır. Biyobozunur atıklar, mikroorganizmalar tarafından biyolojik süreçlerle ayrıştırılabilen atıkları kapsamaktadır. Geri kazanılabilir atıklar ise, ambalaj atıkları ve enerji geri kazanımında kullanılan atıklardan oluşmaktadır. Kağıt atıkların %40'ının biyobozunur atık kompozisyonuna ekleneceği ancak %60'lık kısmın geri kazanılabileceği düşünülmüştür (TÜBİTAK MAM 2017). Buna göre biyobozunur atık bileşenleri belirlenmiş olup, Tablo 2'de yüzdesel dağılımları verilmektedir.

Tablo 2. Biyobozunur Atıkların Bileşenleri ve Yüzdesel Değerleri (TÜBİTAK MAM, 2017).

Biyobozunur Atık Bileşenleri	Yüzdesel Dağılımı, %
Kağıt-Karton	7,19
Mutfak Atıkları	29,79
Park-Bahçe Atıkları	0,45
TOPLAM	34,84

E. Düzce İli Biyobozunur Atık Miktarının Belirlenmesi

Düzce ilinde 2025-2035 yılları arasında oluşması beklenen biyobozunur atık miktarı, aynı yıllar arasında oluşması beklenen toplam belediye atığı miktarı ve %34,84 olarak belirlenmiş olan biyobozunur atık içerik yüzde dağılım oranı kullanılarak hesaplanmıştır.

F. Biyogaz Oluşum Miktarının ve Elektrik Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi

Düzce ilinde 2025-2035 yılları arasında oluşması beklenen biyobozunur atıkların biyogaz tesislerinde değerlendirilmesi sonucunda elde edilebilecek biyogaz ve metan gazı miktarı elektrik enerjisi ve ısı enerjisi miktarının belirlenmesi, oluşması beklenen katı atık miktarı projeksiyonu ve belediye atığının içerisinde bulunan biyobozunur atık dağılımına göre hesaplanmıştır. Üretilen biyogaz miktarının hesaplanmasında biyogaz oluşum miktarı 137,5 Nm³/ton biyobozunur atık olarak alınmıştır. Biyogazın

metan içeriği ortalama %50 ve metanın ısı gücü de 9,9 kWh/Nm³ olarak kabul edilmiştir. Elde edilen gazın bir biyogaz tesisinde yakılarak ısı ve enerjiye dönüştürüleceği varsayılmıştır. Elde edilen toplam enerjinin biyogaz tesislerindeki enerji ve ısı verimleri dikkate alınarak yaklaşık olarak %40'ının elektrik enerjisine, %50'sinin ısı enerjisine dönüşeceği, %10 da kaçak olacağı kabul edilmiştir (Çelik, 2019).

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Düzce ili 2025-2035 yılları nüfus projeksiyonu sonuçlarına göre ilçeler bazında yıllık nüfus artış hızlarının farklı olması sebebiyle nüfus artışı Düzce ili merkez ve ilçelere göre farklılık göstermektedir. Buna göre Düzce ili merkez nüfusu 2035 yılında 272350 kişiye ulaşacağı beklenirken, il genelinde toplam nüfusun 484237 kişi olacağı öngörülmektedir (Tablo3).

Tablo 3. Düzce ili ilçelerinin 2025-2035 yılları arası nüfus verileri.

İlçe	Yıllık Ortalama Artış Hızı	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Düzce Merkez	0,0040269	260572	261621	262675	263733	264795	265861	266932	268007	269086	270169	271257	272350
Akçakoca	0,0328825	42723	44128	45579	47078	48626	50225	51876	53582	55344	57164	59044	60985
Cumayeri	0,0560441	16993	17945	18951	20013	21135	22319	23570	24891	26286	27759	29315	30958
Çilimli	-0,0284443	18554	18026	17513	17015	16531	16061	15604	15160	14729	14310	13903	13508
Gölyaka	0,0197530	21376	21798	22229	22668	23116	23572	24038	24513	24997	25491	25994	26508
Gümüşova	0,0207986	17556	17921	18294	18674	19062	19459	19864	20277	20698	21129	21568	22017
Kaynaşlı	0,0111847	20910	21144	21381	21620	21862	22106	22353	22603	22856	23112	23370	23632
Yığılca	0,0716101	16018	17166	18395	19712	21124	22636	24257	25994	27856	29850	31988	34279

Her sene kişi başı ortalama belediye atık miktarı artış hızı Türkiye'nin ekonomik büyüme hızı dikkate alınmış ve 2025-2035 yılları arasındaki kişi başı oluşan atık miktarı projeksiyonu hesaplanarak Tablo 4'de verilmiştir. Buna göre 2035 yılında Düzce ilinde oluşması beklenen kişi başı atık miktarı 2,77 kg olarak belirlenmiştir.

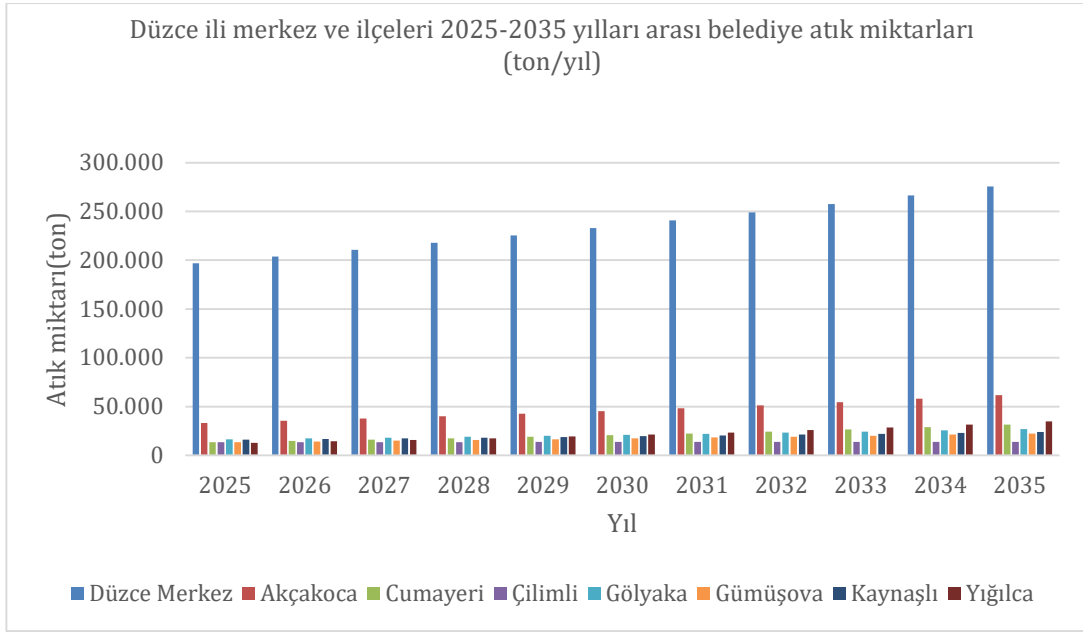
Tablo 4. Düzce ilinin 2025-2035 yılları arası kişi başına düşen atık miktarı (Kg/Kişi-Gün).

İl Kodu	İl	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
81	Düzce	2,002	2,063	2,124	2,188	2,254	2,321	2,391	2,463	2,537	2,613	2,691	2,772

2025-2035 yılları arasında oluşması beklenen atık miktarlarına bakıldığında ise en yüksek belediye atığı artışının nüfus artışıyla bağlantılı olarak Yığılca ve Cumayeri ilçelerinde olacağı (2 katından fazla) hesaplanmıştır. Çilimli ilçesinde nüfus artışının olmayacağı öngörüldüğü için belediye atığında da bir artış olmayacağı hesaplanmıştır (Tablo5). Şekil 1'de Düzce ili merkez ve ilçeleri 2025-2035 yılları belediye atık miktarları grafik olarak gösterilmiştir.

Tablo 5. Düzce ili merkez ve ilçeleri 2025-2035 yılları arası belediye atık miktarları (ton/yıl).

İlçe	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Düzce Merkez	190449	196953	203678	210633	217826	225264	232957	240911	249138	257646	266444	275542
Akçakoca	31226	33220	35342	37599	40001	42555	45273	48165	51241	54514	57996	61700
Cumayeri	12420	13509	14695	15984	17386	18911	20570	22374	24337	26472	28794	31320
Çilimli	13561	13570	13580	13589	13599	13608	13618	13628	13637	13647	13656	13666
Gölyaka	15624	16410	17236	18104	19016	19973	20978	22035	23144	24309	25533	26818
Gümüşova	12831	13491	14185	14914	15681	16488	17335	18227	19164	20150	21186	22275
Kaynaşlı	15283	15918	16579	17267	17984	18731	19508	20318	21162	22040	22956	23909
Yığılca	11708	12922	14263	15743	17377	19180	21170	23366	25791	28467	31420	34681



Şekil 1. Düzce ili merkez ve ilçeleri 2025-2035 yılları arası belediye atık miktarları (ton/yıl).

Düzce ilinde 2035 yılında oluşması beklenen toplam belediye atığı miktarı 489911 ton/yıl olarak belirlenmiş olup, biyobozunur atık miktarı ise 170685 ton/yıl olarak oluşacağı hesaplanmıştır (Tablo6).

Tablo 6. Düzce ili 2025-2035 yılları biyobozunur evsel katı atık miktarı.

Yıl	Toplam Atık Miktarı	Biyobozunur Atık Yüzdesi (%)	Biyobozunur Atık (ton/yıl)	Biyobozunur Atık (ton/gün)
2025	315994	34,84%	110092	302
2026	329557	34,84%	114818	315
2027	343834	34,84%	119792	328
2028	358868	34,84%	125030	343
2029	374710	34,84%	130549	358
2030	391410	34,84%	136367	374
2031	409024	34,84%	142504	390
2032	427614	34,84%	148981	408
2033	447244	34,84%	155820	427
2034	467985	34,84%	163046	447
2035	489911	34,84%	170685	468

Tablo 7' de belirtildiği üzere, biyometanizasyon tesisinde geri kazanılma potansiyeli bulunan biyobozunur atık miktarı 2035 yılında 170685 ton/yıl ile maksimum değerine ulaşması beklenmektedir. Biyobozunur atıkların biyometanizasyon tesisinde parçalanması sonucu oluşan biyogazın kojeneratif enerji tesisinde yakılmasıyla elde edilen elektrik enerjisinin 2025 yılında yaklaşık 3,42 MW/saat, 2035 yılında ise yaklaşık 5,3 MW/saat elektrik enerjisi elde edilmesi beklenmektedir. Kojeneratif enerji santralinde oluşacak ısı enerjisinin, düzenli depolama tesisine en yakın uzaklıkta bulunan yerleşim yerinin ısıtılması amacıyla veya seracılıkta kullanılabileceği düşünülmektedir.

Tablo 7. Biyometanizasyon tesisinde oluşan ürünlerin miktarı.

Yıl	Biyobozunur Atık Miktarı (ton/yıl)	Biyogaz Miktarı (Nm ³ /yıl)	Metan Gazı Miktarı (Nm ³ /yıl)	Metan Gazı Miktarı (Nm ³ /saat)	Toplam enerji (kWh)	Elektrik enerjisi %40 (kWh)	Isı enerjisi %50 (kWh)
2025	110092	15137686	7568843	864	8554	3422	4277
2026	114818	15787447	7893723	901	8921	3568	4460
2027	119792	16471362	8235681	940	9307	3723	4654
2028	125030	17191595	8595797	981	9714	3886	4857
2029	130549	17950466	8975233	1 025	10143	4057	5072
2030	136367	18750475	9375237	1 070	10595	4238	5298
2031	142504	19594307	9797153	1 118	11072	4429	5536
2032	148981	20484855	10242427	1 169	11575	4630	5788
2033	155820	21425235	10712617	1 223	12107	4843	6053
2034	163046	22418805	11209402	1 280	12668	5067	6334
2035	170685	23469186	11734593	1 340	13262	5305	6631

Toplam sera gazı emisyonlarında 2022 yılında CO₂ eşdeğer olarak en büyük payı %71,8 ile enerji kaynaklı emisyonlar alırken bunu sırasıyla %12,8 ile tarım, %12,5 ile endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı ve %2,9 ile atık sektörü takip etti. Enerji sektörü emisyonları 2022 yılında, 1990 yılına göre %179,8 artmakla beraber bir önceki yıla göre %1,4 azalarak 400,6 Mton CO₂ eşdeğer olarak hesaplanmıştır (TUİK, 2024). Enerji sektörü kaynaklı Türkiye ortalaması kişi başı CO₂ eşdeğer oluşum miktarı 4,7 ton CO₂ eşdeğer/kişi olarak belirlenmiştir.

Düzce ilinde biyobozunur atıkların çevre dostu biyolojik proses kullanılarak elektrik enerjisi üretiminde kullanılması neticesinde 2035 yılında 13262 kWh elektrik enerjisi üretim potansiyeli bulunduğu saptanmıştır. Ülkemizde elektrik enerjisi üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonu 0,439 ton CO₂ eşdeğer/kWh (ETKB, 2024) olarak, biyobozunur atıklardan biyolojik yöntem ile elde edilecek olan biyogazın kullanılması durumunda ise 54,6 ton CO₂ eşdeğer/TJ (ÇŞİDB,2017) sera gazı emisyonu oluşmaktadır. Bu durumda 2035 yılı için, 170685 ton/yıl biyobozunur atıktan elde edilecek biyogazın 45835200 kWh/yıl elektrik üretimi için kullanılmasından 0,023 Mton CO₂ eşdeğer sera gazı oluşması beklenirken, şebekeden alınacak aynı miktar elektrik üretimi için hesaplanan sera gazı emisyonu 20,1 Mton CO₂ eşdeğer olarak tespit edilmektedir.

IV. SONUÇLAR

Düzce ili merkez ve 8 ilçeye ait belediyelerin atık projeksiyonu ve atıklarından elektrik enerjisi ve ısı enerjisinin 2025-2035 yılları arasındaki projeksiyon gösterilmiştir. Özellikle ülkemizin enerji üretimi konusunda dışa bağımlılığı azaltma konusunda belediye atıklarının gerek elektrik gerekse enerji ihtiyaçlarının karşılanması konusunda önem arz etmektedir. Bu sebeple belediye atıklarından evsel organik atıklarının ayrıştırılıp enerji ve kompost elde edilmesinde kullanılması, kâğıt ambalaj, plastik, cam ve metallerin ekonomiye kazandırılacak şekilde sıfır atık uygulamasına göre yönetilmesi nihai depolama ve bertaraf maliyetlerini düşürecek olup, döngüsel ekonomi kavramına uygunluk sağlamış olacaktır. Yenilikçi yaklaşım olarak biyobozunur atıkların bir biyogaz tesisi ile biyogaz ve elektrik enerjisi üretiminde kullanılması durumunda 2025 yılında 3,4 MWh'lık elektrik üretimi gerçekleştirilebilecek olup, bu değer 2035 yılında yaklaşık olarak 1,5 kat artarak 5,3 MW ulaşabilecektir. 2035 yılında Düzce ilinde oluşması beklenen 170685 ton/yıl biyobozunur atıktan elde edilecek biyogazın elektrik enerji üretiminde kullanılması durumunda 20,07 Mton CO₂ eşdeğer sera gazı salımında azalma sağlanabileceği tespit edilmiştir.

BEYANLAR

Teşekkürler: Yazar/Yazarların herhangi bir kişi ve/veya kuruma teşekkürü bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları: Kavramsallaştırma, Ö.D. ve G.E.B.; metodoloji Ö.D. ve G.E.B.; doğrulama, Ö.D. ve G.E.B.; araştırma, Ö.D. ve G.E.B.; kaynaklar, Ö.D. ve G.E.B.; veri düzenleme, Ö.D. ve G.E.B.; yazma-orijinal taslak hazırlama, Ö.D. ve G.E.B.; yazma-inceleme ve düzenleme, Ö.D. ve G.E.B.; denetim, Ö.D. ve G.E.B.. Tüm yazarlar, makalenin yayınlanmış versiyonunu okumuş ve kabul etmiştir.

Çıkar Çatışması Açıklaması: Yazar/Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemektedir.

Telif Hakkı Beyanı: Yazar/Yazarlar, dergide yayınlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptir ve çalışmaları CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayınlanmaktadır.

Destekleyen/Destekleyen Kuruluşlar: Bu araştırma herhangi bir dış fon almamıştır.

Etik Onay ve Katılımcı Onayı: Bu makale insan veya hayvan denekleriyle ilgili herhangi bir çalışma içermemektedir. Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulmuş ve yararlanılan tüm çalışmalar kaynakçada verilmiştir.

İntihal Beyanı: Bu makale intihal programıyla taranmıştır. İntihal tespit edilmemiştir.

Veri ve Materyallerin Kullanılabilirliği: Veri paylaşımı geçerli değildir.

YZ Araçlarının Kullanımı: Yazar/Yazarlar, bu makalenin oluşturulmasında Yapay Zeka (YZ) araçlarını kullanmadığını beyan etmektedir.

KAYNAKLAR

- Çelik, S. (2019). Kütahya ili evsel biyobozunur atıkların biyogaz potansiyelinin değerlendirilmesi. Yüksek Lisans tezi. Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
- ÇŞİDB, (2017). T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı İklim Değişikliği Başkanlığı sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ Biyokütle ile İlgili Hususlara İlişkin Rehber
- ETKB, (2024). Türkiye Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri Bilgi Formu, Etkb-Evçed-Frm-042 Rev.01, 12.03.2024
- Gültekin, U. (2021). Balıkesir büyükşehir belediyesi evsel atıklarının projeksiyonu ve biyogaz potansiyelinin belirlenmesi. Yüksek Lisans tezi. Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye.
- Kankılıç, T., ve Topal, H. (2015). Belediye atıklarından düzenli depolama sahalarında biyogaz ve enerji üretimi. *Mühendis ve Makine*, 56(669), 58-69.
- TÜBİTAK MAM (2017). Ö. Doğan, vd. Katı atık planı ve il atık yönetim planlarının hazırlanması 5158801 Düzce ili atık yönetim planı. 20.06.2017 Gebze, Kocaeli.
- TÜİK, (2024). <https://nir.tuik.gov.tr/> (Erişim tarihi: 06.05.2024)
- TÜİK, (2024). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2022-53701>, 30 Ocak 2025

Araştırma Makalesi (Research Article)

İki Boyutlu Kanat Profili Kullanılarak Fırlatma Araçlarında Üfüt Olgusunun Araştırılması

 Cihan Yükselsin,  Mustafa Özgür Aydoğan,  Erkan Akay,  Fatih Yılmaz*

Tusaş Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş., Ankara, Türkiye.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author): fatihyilmaz80itu@gmail.com

Makale Bilgileri (Article Info):

Geliş (Received): 17/03/2025, Revizyon (Revision): 09/05/2025, Kabul (Accepted): 16/05/2025.

DOI: 10.70081/duted.1659672

ÖZET

Hava araçlarının tasarımı ve işletilmesi için orijinal hava aracı üreticilerinin tip tasarımlarında dikkate alması gereken kurallar, uluslararası havacılık örgütleri tarafından düzenlenmektedir. Bu kurallar, fırlatma ve uzay araçlarının emniyetli görev yapabilecek şekilde tasarlanmasını sağlar. Emniyetli bir tasarımda yapısal bütünlük, uzay araçlarının boyutlandırılmasını ve ağırlığını doğrudan etkileyen, odaklanılması gereken ana konulardan biridir. Transonik akışlarda şok dalgalanmaları sonrasında basınç salınımları olarak ortaya çıkan ve dinamik bir olgu olan üfüt olgusu, yapısal bütünlüğü riske atmaktadır. Aerodinamik kontrol yüzeyleri üzerinde düzensiz kuvvetlere sebep olan üfüt kaynaklı basınç salınımları, uçuş kontrol sisteminin hassasiyetini de olumsuz yönde etkileyebilir. Üfüt kaynaklı basınç dalgalanmaları, rüzgâr tüneli gibi test ortamlarında ölçülebilmektedir; ancak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) gibi analiz yöntemleri ile tam olarak tespit edilmesi konusu henüz araştırma aşamasındadır. Bu çalışmada, üfüt kaynaklı salınımların tespit edilmesi ve yük spektrumunun oluşturulması için iki boyutlu bir model üzerinde gerçekleştirilen HAD analiz sonuçları sunulmaktadır. Elde edilen sonuçların, gelecekteki çalışmalar için bir temel oluşturması amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Aerodinamik, Üfüt, Fırlatma Aracı, Yük, Yapısal.

Research for Buffet Phenomenon in Launch Vehicles by Using Two-Dimensional Airfoil Profile

ABSTRACT

The rules for design and operation of aircrafts that the aircraft manufacturers must comply with in their type designs are regulated by international aviation organizations. These obligations require that launching and space vehicles be designed to operate safely. Structural integrity is one of the main issues to focus on for safety, which affects the sizing and weight of spacecraft. Buffet is a dynamic phenomenon that occurs due to pressure oscillations after shock-induced separations in transonic flows and compromises the structural integrity. These oscillations may also cause unsteady forces on the aerodynamic control surfaces, affecting the sensitivity of the flight control system. Buffet-induced pressure fluctuations are measured in test environments such as wind tunnels, but their precise detection using analysis methods such as Computational Fluid Dynamics (CFD) is still under research. In this study, the results of CFD analyses performed on a two-dimensional model for the detection of buffet-induced oscillations are presented and generation of the load spectrum. The study and the obtained results are intended to serve as a basis for future research activities.

Keywords: *Aerodynamics, Buffet, Launch Vehicle, Load, Structural.*

I. GİRİŞ

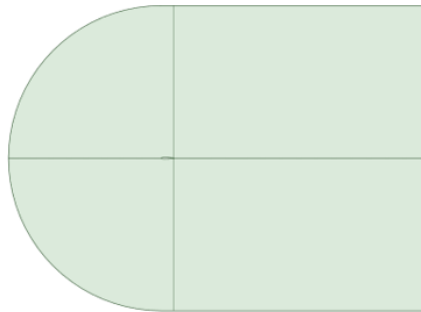
Üfüt, hava araçlarının yapısal bütünlüğünü tehlikeye atan ve yorulma dayanımlarını ciddi bir şekilde etkileyen akış ayrılması veya şok kaynaklı kanat üzerinde titreşime sebebiyet veren dinamik bir olgudur. Uçak tip sertifikası sürecinde CS/FAR 23, 25 gibi standartlarda bu olgunun tasarım esnasında incelenmesi gerektiğiyle alakalı gereksinimler bulunmaktadır. Dünya genelindeki fırlatma aracı kazaları incelendiğinde “Mercury Atlas 1” gibi kazaların doğrudan üfüt olgusu ile alakalı olduğu görülmektedir. Bu sebeple, fırlatma araçlarında da üfüt, incelenmesi gereken kritik bir fenomendir.

Üfüt olgusunun oluşumunun tanımlanması adına literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Lee (2001), çalışmada bu fenomeni literatürde bulunan birçok makaleyi derleyerek derinlemesine özetlemiştir. NACA0012 Profilinde üfüt olgusu, transonik akış için çeşitli çalışmalarla incelenmiştir. McDevitt ve Okuno (1985), NACA0012 profili için transonik hızlarda çeşitli deneyler gerçekleştirmiş ve seçilen hücum açısı değerleri için kanat profili üzerinden basınç dağılımlarını okumuşlardır. Bu sayede kritik açılardaki salınımları gözlemleyebilmişlerdir. Balakumar ve arkadaşları (2023), literatürdeki çalışmaları derleyerek NACA0012 profilinin çeşitli transonik hızlarda üfüt başlangıçlarını URANS ve Eddy metotları kullanarak tespit etmişlerdir. NASA, transonik üfüt çalışmalarında fırlatma araçlarında bu olgunun analiz ile elde edilmesinin pratik olmadığını, dolayısıyla testler ile inceleme yaptıklarını belirtmişlerdir (Piatak ve ark., 2015). Bununla birlikte, literatürde yapılan çalışmalar da incelendiği zaman bu olgunun başlangıçlarının tespit edilmesinin analizler ile de mümkün olduğu gözükmemektedir. Literatürde, NACA0012 profili için ses-altı hızlarda üfüt incelenmesine rastlanılmamıştır.

Ses-altı hızlar için daha önce yapılan bir çalışma bulunmamasından ve transonik hız için birçok veri seti olmasından dolayı bu çalışmada NACA0012 kanat profili için hem ses-altı hem de transonik hızlarda üfüt başlangıçlarının tespit edilmesi amaçlanıp, çalışmanın ileride nelere katkı sağlayabileceği sonuçlar bölümünde tartışılmıştır.

II. MATERYAL METOT

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri, sektörde ve akademik çalışmalarda aktif bir şekilde kullanılan Fluent® yazılımı ile iki boyutlu bir şekilde gerçekleştirilmiş olup, Akış hacmi için NASA'nın NACA0012 validasyon çalışması referans alınmıştır. (2D NACA0012 Airfoil Validation, 2022. https://turbmodels.larc.nasa.gov/naca0012_val.html) Nihai olarak oluşturulan akış hacmi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Akış Hacmi.

Ses-altı analizler için hız olarak 0,3 Mach, transonik analizler için 0,7 Mach kullanılmıştır. Türbülans modeli olarak ise sektörde güvenilirliğini kanıtlamış olan K-W SST modeli tercih edilmiştir. Üfüt tespiti için akış ayrılmaları önemli bir rol oynadığı için “ $Y+<1$ ” modellemesi yapılmıştır. Zamana bağlı olarak yapılan analizlerde zaman adımı 0,005 saniye olarak seçilmiştir. Ses-altı analizlerde, 25° hücum açısına kadar hassas bir çözümlemeyle üfüt olgusu tespiti sağlanmış olup, transonik analizlerde düşük hücum açılarında şok oluşumu kaynaklı üfüt tespit edildiği için 9° hücum açısına kadar çözümleme yapılmıştır.

Transonik akış, ses altı ve ses üstü akış özelliklerini aynı anda barındıran, yaklaşık olarak 0,8 – 1.2 Mach sayısı aralığındaki akışlardır. NACA0012 gibi simetrik profillerde 0,7 Mach akış hızında bile lokal olarak akış hızı şok kaynaklı 1 Mach ve üzerine ulaştığı için bu hızlar da transonik olarak kabul edilmektedir.

Transonik hızlarda havanın yoğunluğu basınç ile ciddi bir şekilde değişime uğradığı için akış sıkıştırılabilir olarak kabul edilmektedir. Anderson (2003), (1) ve (2) numaralı denklemler ile havanın incelenen hızı için statik basınç ve statik sıcaklık değerlerinin tespit edilebileceğini belirtmiştir. P_0 statik basıncı, P toplam basıncı, T_0 statik sıcaklığı, T toplam sıcaklığı, γ hava için 1,4 sabit katsayıyı, M ise hızı ifade etmektedir.

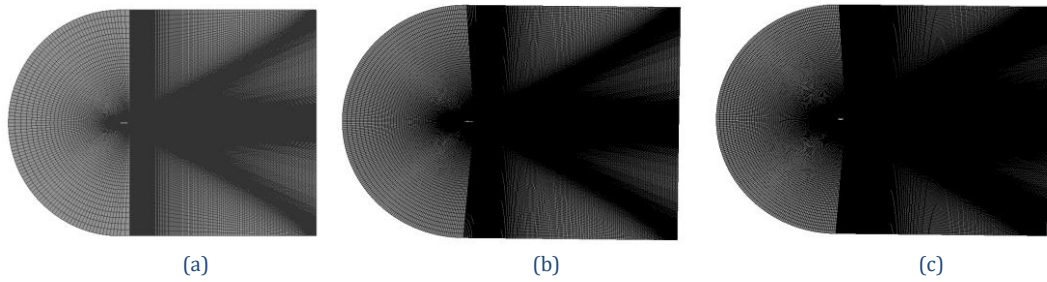
Çalışmada incelenen 0,7 Mach hızı için 73048 Pa statik basınç ve 283,24 K statik sıcaklık, ilgili denklem çözümlenmeleri sonucunda analizlerin girdi verileri olarak kullanılmıştır.

$$\frac{P_0}{P} = \left[1 + \left(\frac{\gamma-1}{2} \right) M^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (1)$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \left(\frac{\gamma-1}{2} \right) M^2 \quad (2)$$

A. Ses-altı Analiz Çözüm Ağı Validasyonları

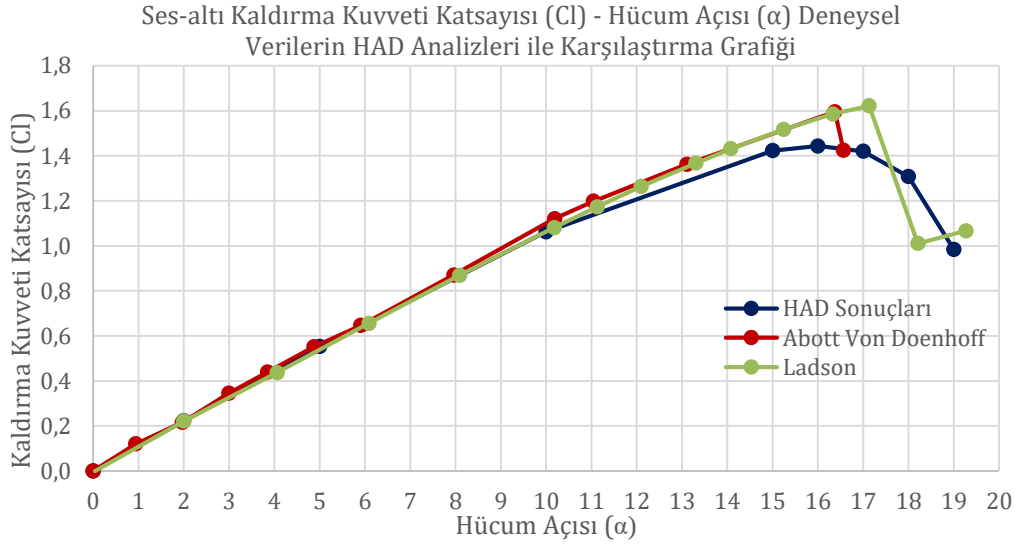
Ses-altı analizlerin validasyonu kapsamında NASA'nın NACA0012 profili validasyonu için yayımlanmış olduğu deneysel kaldırma kuvveti katsayısı (C_l) verileri referans alınmış ve HAD analizleri ile karşılaştırılmıştır (2D NACA0012 Airfoil Validation, 2022, https://turbmodels.larc.nasa.gov/naca0012_val.html). Analizler, 0,15 Mach hız ve 10,18° hücum açısı değeri için gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de belirtildiği üzere kaba, orta ve sık olmak üzere toplamda üç adet çözüm ağı modellenmiş olup orta olarak modellenen çözüm ağına kaldırma katsayısı 1,0761 olarak hesaplanmış ve deneysel verilerden sapma %1 altına indiği için bu çözüm ağı modelinin kullanılması uygun değerlendirilmiştir. Çözüm ağı modellerinin hepsinde, çarpıklık (*Skewness*) kalite kriteri "<0,8" hesaplanmıştır. Tablo 1'de çözüm ağlarına ait detaylı bilgiler yer almaktadır. HAD ve deneysel verilerin karşılaştırmalı kaldırma kuvveti katsayısı – hücum açısı (α) grafikleri, Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 2. Ses-altı Çözüm Ağı Modelleri, (a) Kaba Çözüm Ağı, (b) Orta Çözüm Ağı, (c) Sık Çözüm Ağı.

Tablo 1. Ses-altı Çözüm Ağı Validasyon Hata Oranları.

Çözüm Ağı Sıklığı	Eleman Sayısı	Kaldırma Katsayısı HAD Sonucu (C_l)	Kaldırma Katsayısı Deneysel Sonuç (C_l)	Kaldırma Katsayısı Hata Oranı (%)
Kaba	101200	1,0210	1,0809	5,54
Orta	252600	1,0761		0,44
Sık	432800	1,0793		0,14



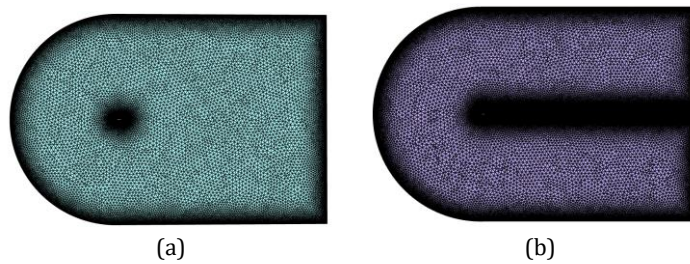
Şekil 3. Ses-altı Kaldırma Kuvveti Katsayısı - Hücum Açısı Deneysel Verilerin HAD Analizleri ile Karşılaştırılması.

B. Transonik Analiz Çözüm Ağı Validasyonları

Maani ve arkadaşları (2018), yapmış olduğu çalışmada NACA0012 profili, 0,7 Mach, 1m veter uzunluğu için kanat profilinin üst ve alt yüzeylerinin basınç katsayısı (C_p) dağılımlarının ve kaldırma kuvveti katsayılarının deneysel sonuçlarıyla bir karşılaştırma yapmıştır.

Bu çalışmada, Maani ve arkadaşlarının (2018) yapmış olduğu analizler referans alınarak Şekil-4'te gözüktüğü üzere kaba ve sık olmak üzere iki farklı çözüm ağı modellemesi yapılmış olup, analizler $1,55^\circ$ hücum açısı değeri ve 0,7 Mach hız için gerçekleştirilmiştir. Çözüm ağı modellerinin hepsinde çarpıklık (*Skewness*) kalite kriteri " $<0,85$ " olarak hesaplanmıştır.

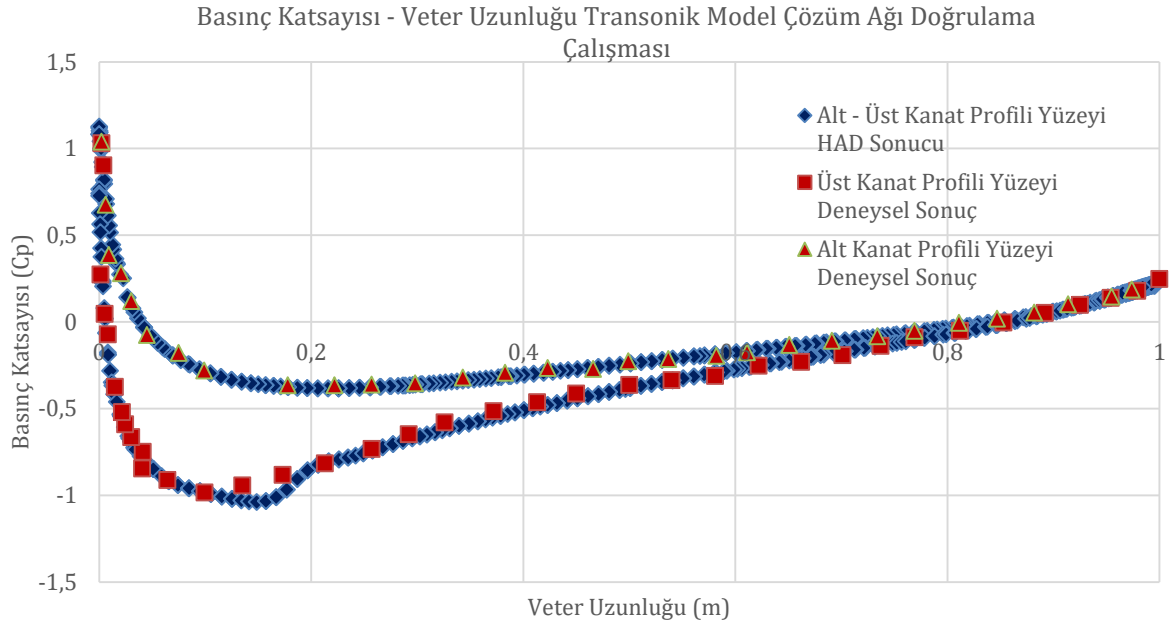
Sık olarak modellenen çözüm ağında, kaldırma kuvveti katsayısı 0,2430 olarak hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlara bakıldığında ise sapma oranı %1'in altına indiği görülmektedir. Bu sebeple; kaba ve sık olmak üzere iki farklı çözüm ağı karşılaştırmasının, transonik analizlerde yeterli olacağı değerlendirilmiştir. Bu çalışma ışığında, sık çözüm ağı modelinin kullanılması uygun görülmüştür. Tablo 2'de çözüm ağlarına ait detaylı bilgiler yer almaktadır. Şekil 5'te ise, kanat profilinin üst ve alt yüzeylerinin basınç katsayıları deneysel veriler ve HAD analizleri ile karşılaştırılmış olup, sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 4. Transonik Çözüm Ağı Modelleri, (a) Kaba Çözüm Ağı, (b) Sık Çözüm Ağı.

Tablo 2. Transonik Çözüm Ağı Validasyon Hata Oranları.

Çözüm Ağı Sıklığı	Eleman Sayısı	Kaldırma Kuvveti Katsayısı HAD Sonucu (C_l)	Kaldırma Kuvveti Katsayısı Deneysel Sonuç (C_l)	Kaldırma Kuvveti Katsayısı Hata Oranı (%)
Kaba	1167291	0,2444	0,2390	1,42
Sık	2388034	0,2430		0,84



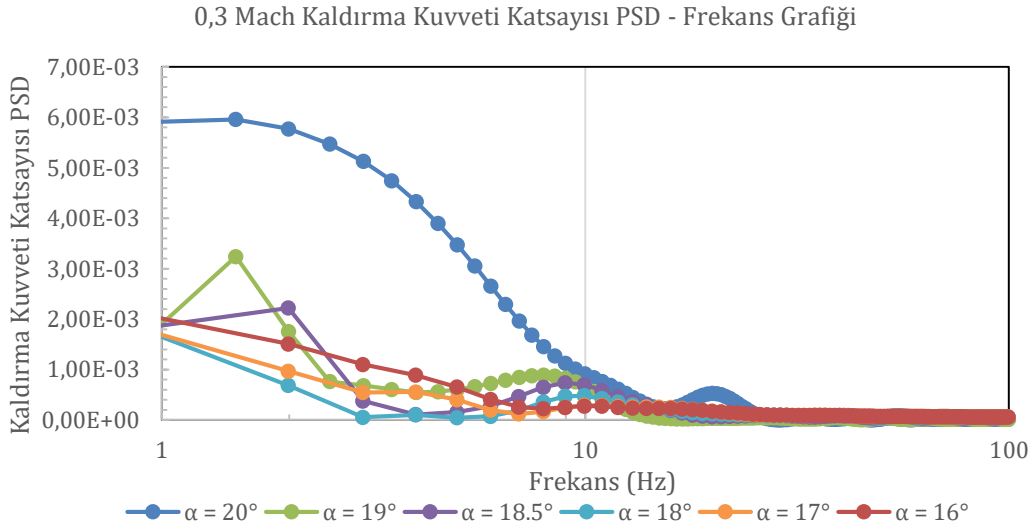
Şekil 5. Basınç Katsayısı - Veter Uzunluğu Transonik Model Deneysel Veriler İle HAD Analizinin Karşılaştırılması.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan analizlerde, zamana bağlı olarak elde edilen kaldırma kuvveti katsayısı sonuçlarını anlamlandırmak için, belirli hücum açılarında ilgili parametrenin Güç Spektrum Yoğunluğu (PSD) dönüşümleri yapılarak frekans tanım kümesinde karşılaştırmalı sonuçlar sunulmuştur.

A. Ses-altı Akış

0,3 Mach hava akış hızı, dolayısıyla Ses-altı akış için kaldırma kuvveti katsayısı Güç Spektrum Yoğunluğu (PSD) - Frekans (Hz) grafikleri Şekil 6'da sunulmuştur.

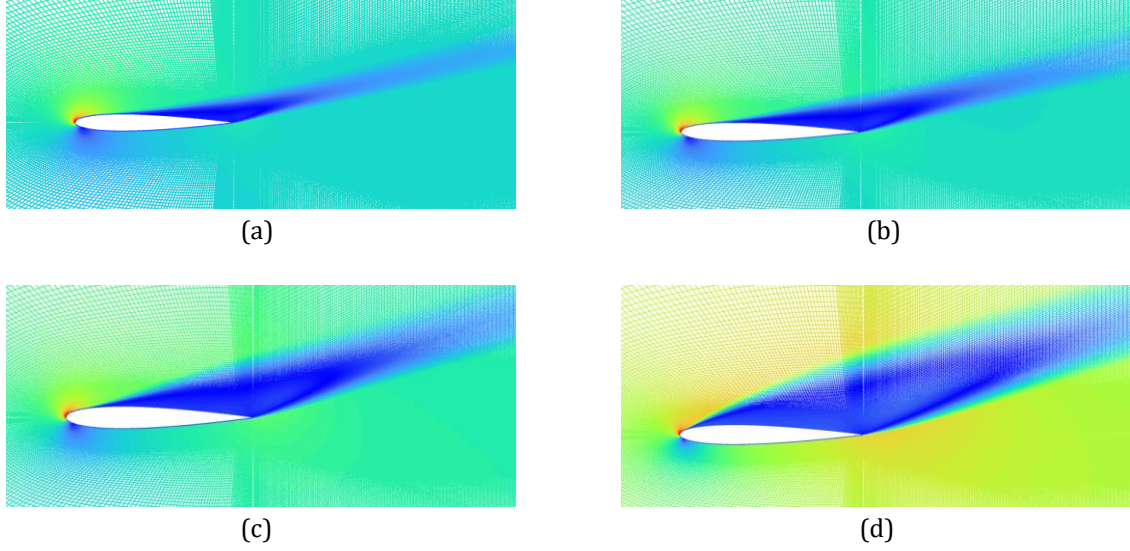


Şekil 6. 0,3 Mach Kaldırma Kuvveti Katsayısı PSD - Frekans Grafiği.

HAD analizi sonuçları, NACA0012 profili için 0,3 Mach akış hızında ve 18,5° hücum açısında, kaldırma kuvveti katsayısının PSD değerlerinde belirgin tepe noktalarının ortaya çıkmaya başladığını ve bunun üfüt başlangıcına işaret ettiğini göstermektedir. Ses-altı akışlarda akış ayrılmasının, üfütün tetikleyicisi olduğu göz önüne alındığında ve bununla beraber Şekil-3'teki HAD analizi ve deneysel veriler

karşılaştırıldığında, üfüt başlangıç açısının $18,5^\circ$ hücum açısı değeri olarak tespit edilmesi, tutarlı bir bulgu olarak değerlendirilmektedir.

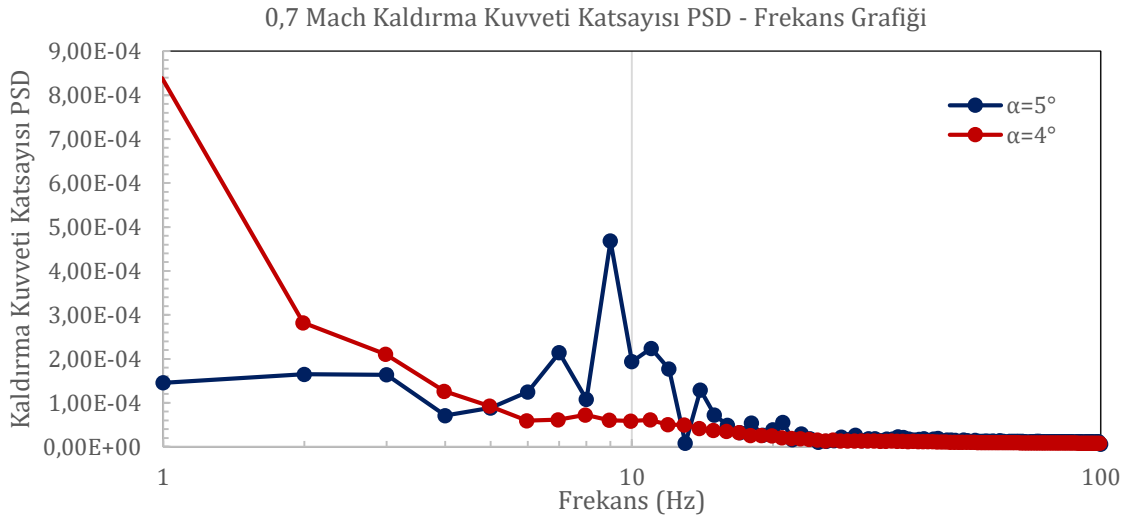
Şekil 7'de, 0,3 Mach hızındaki HAD analizine ait akış vektörleri, üfüt başlangıcından itibaren sunulmuştur. Bu vektörler incelendiğinde, mavi renkli kontur ani hız düşüşleri ile beraber akış ayrılmalarını göstermektedir, bu sebeple; akış ayrılmalarının hücum açısı arttıkça daha da arttığı anlaşılmaktadır.



Şekil 7. 0.3 Mach Akış Ayrılma Vektörleri, (a) 18° Hücum Açısı, (b) $18,5^\circ$ Hücum Açısı, (c) 19° Hücum Açısı, (d) 20° Hücum Açısı.

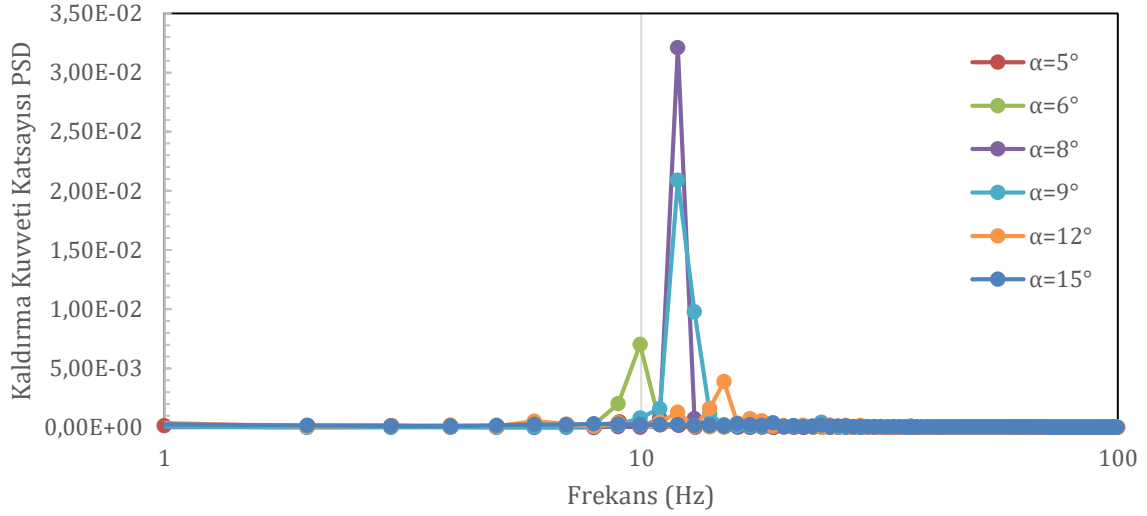
B. Transonik Akış

0,7 Mach akış hızı, dolayısıyla transonik akış için kaldırma kuvveti katsayısı PSD - Frekans grafikleri Şekil 8 ve Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 8. 0,7 Mach Kaldırma Kuvveti Katsayısı PSD - Hz Grafiği (4° - 5° Hücum Açıları).

0,7 Mach Kaldırma Kuvveti Katsayısı PSD - Frekans Grafiği



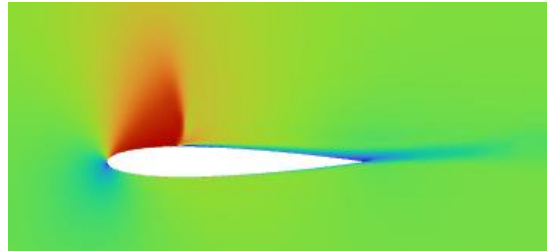
Şekil 9. 0,7 Mach Kaldırma Kuvveti Katsayısı PSD-Hz Grafiği.

Iovnovich ve Raveh (2012), çalışmasında NACA0012 profili kapsamında transonik hızlar için analizler gerçekleştirmiş olup, “üfüt başlangıcı”, “tam gelişmiş üfüt” ve “üfüt ötelenmesi” kavramlarını kullanmıştır. Bu kavramlar sırasıyla üfütün başlangıç hücum açısı, üfütün tam geliştiği hücum açısı ve üfütün azalmaya başladığı hücum açısı anlamlarına gelmektedir.

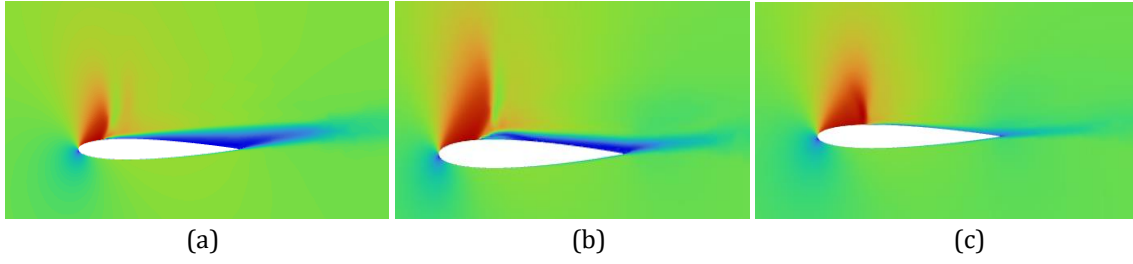
HAD analizleri sonucunda, NACA0012 profilinde 0,7 Mach hızında üfüt, 5° hücum açısı değerinde başlamaktadır. Üfütün daha erken başlamasının sebebi ise bu hızlarda havanın sıkıştırılabilir gaz özelliği göstermesinden kaynaklı olarak şok oluşumudur. Şekil 10’da bu olgu gözlenmektedir.

6° hücum açısı değerinde kaldırma kuvveti katsayısına ait PSD değerlerinde gözle görülür bir artış görülmektedir. Iovnovich ve Raveh (2012) çalışmasında, 6° hücum açısı bölgesini “tam gelişmiş üfüt” olarak tanımlamıştır. Şekil 11’de görüleceği üzere, bu hücum açısı değerinde şok oluşumu, bir döngüye girmektedir. Daha önce belirtildiği üzere, bu çalışmada zaman adımı olarak 0,005 saniye seçilmiş olup (a)’da birinci saniye, (b)’de ikinci saniye ve (c)’de üçüncü saniye çözümleri verilmektedir. Şok olgusu, kanat profilinin ön kanat ucu ile ortası arasında değişmektedir. Fakat bu çalışma, üfüt etkisinin 8° hücum açısına kadar bir artış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Yani, 6° hücum açısı değerinde üfüt etkisi dramatik bir şekilde artmakta olup, 8° hücum açısı değerinde maksimum gelişmişlik açısına gelmektedir.

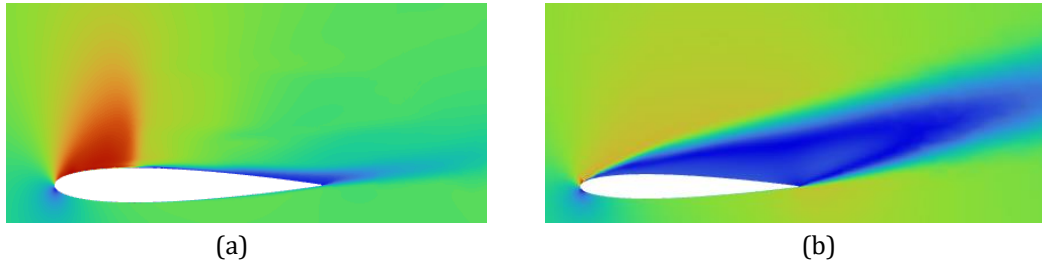
9° hücum açısında kaldırma kuvveti katsayısına ait PSD değerleri azalma trendine geçmiş olup, burası üfütün azalmaya başladığı açı olarak tespit edilmiştir. 15° hücum açısı değerinde ise üfüt etkisini kaybetmiştir. Şekil 12’de bu bölgeler için hız akış kontörleri gözükmemektedir.



Şekil 10. 5° Hücum Açısı İçin Hız Akış Kontörü.



Şekil 11. 6° Hücüm Açısı Gelişmiş Üfüt Döngüsü, (a) 1. Zaman Adımı (1 saniye), (b) 2. Zaman Adımı (2 saniye), (c) 3. Zaman Adımı (3 saniye).



Şekil 12. 9-15 Hücüm Açısı Değerleri Hız Kontürleri, (a) 9° Hücüm Açısı, (b) 15° Hücüm Açısı.

IV. SONUÇLAR

Bu araştırmada, NACA0012 profilinin ses-altı ve transonik akış formlarında üfüt fenomeni başlangıcı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Üfütün, 0,3 Mach ses-altı akış hızında akış ayrılması kaynaklı olarak 18,5° hücüm açısı civarında başladığı tespit edilmiştir, 0,7 Mach transonik akış hızında ise, oluşan şok dalgası ile beraber 5° hücüm açısı civarında başladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, transonik akışta 6°- 8° hücüm açılarında üfüt olgusu tam gelişirken, 9° hücüm açısı değerinden sonra azalma trendine geçmektedir. Bu bilgiler ışığında, transonik hızda şok kaynaklı oluşan üfütün, ses-altı hızda akış ayrılması sonucu oluşan üfütten daha önce ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

Bu çalışma, üfütün kanat profilleri üzerinde önerilen analizler ile ön tespitinin yapılp, tasarım boyutlandırma çalışmalarının yapılabilmesini sağlar. Öte yandan, önerilen çalışmada iki boyutlu model kullanıldığından, yapının titreşim karakteristiği, deformasyonu ve yorulma dayanımına etkisi hakkında bilgi vermemektedir.

Gelecek araştırmalar, üç boyutlu geometriler üzerinden titreşim spektrumlarının tespit edilerek, yapı üzerindeki deformasyon ve yorulma etkisinin değerlendirmesini konu alabilir.

BEYANLAR

Teşekkürler: Çalışmanın gerçekleştirilmesinde katkıda bulunan Tusaş Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş.'ye ve tüm ekip çalışanlarına teşekkür ederiz.

Yazarın Katkıları: Kavramsallaştırma, F.Y.; metodoloji, C.Y., M.Ö.A. ve F.Y.; doğrulama, M.Ö.A.; araştırma, C.Y., M.Ö.A. ve F.Y.; kaynaklar, C.Y.; veri düzenleme, C.Y, M.Ö.A. ve E.A.; yazma-orijinal taslak hazırlama, C.Y., M.Ö.A. ve E.A.; yazma-inceleme ve düzenleme, C.Y. ve M.Ö.A.; denetim, F.Y. Tüm yazarlar, makalenin yayınlanmış versiyonunu okumuş ve kabul etmiştir.

Çıkar Çatışması Açıklaması: Yazar/Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemektedir.”

Telif Hakkı Beyanı: Yazarlar, dergide yayınlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptir ve çalışmaları CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayınlanmaktadır.

Destekleyen/Destekleyen Kuruluşlar: Araştırma herhangi bir dış fon almamıştır.

Etik Onay ve Katılımcı Onayı: Bu makale insan veya hayvan denekleriyle ilgili herhangi bir çalışma içermemektedir. Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulmuş ve yararlanılan tüm çalışmalar kaynakçada verilmiştir.

İntihal Beyanı: Bu makale intihal programıyla taranmıştır. İntihal tespit edilmemiştir.

Veri ve Materyallerin Kullanılabilirliği: Veri paylaşımı geçerli değildir.

YZ Araçlarının Kullanımı: Yazar/Yazarlar, bu makalenin oluşturulmasında Yapay Zeka (YZ) araçlarını kullanmadığını beyan etmektedir.

KAYNAKLAR

- Lee, B. H. K. (2001). Self-Sustained Shock Oscillation on Airfoils at Transonic Speeds. *Prog. Aerosp. Sci*, 37(2), 147-196.
- Piatak, D. J., Sekula, M. K., Rausch, R. D., Florance, J. R., Ivanco, T. G. (2015). Overview of the Space Launch System Transonic Buffet Environment Test Program. [Online]. Erişim: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20150006848>
- McDevitt, J. B., Okuno, A. F. (1985). Static and Dynamic Pressure Measurements on a NACA 0012 Airfoil in the Ames High Reynolds Number Facility. [Online]. Erişim: <https://ntrs.nasa.gov.tr/citations/19850019511>
- Anderson, J. D. (2003). *Modern Compressible Flow: With Historical Perspective*. Yayın Yeri: McGrawHill, 79-81.
- Iovnovich, M., Raveh, D. E. (2012). Reynolds-Averaged Navier-Stokes Study of the Shock-Buffet Instability Mechanism. *AIAA Journal*, 50(4), 880-890.
- Balamukar, P., Iyer, P., Malik, M. R. (2023). Turbulence Simulations of Transonic Flows over an NACA-0012 Airfoil. [Online]. Erişim: <https://ntrs.nasa.gov.tr/citations/20220018292>
- Maani, R. E., Radi, B., Hami, A. E. (2018). CFD Analysis of the Transonic Flow over a NACA 0012 Airfoil. *Incertitudes et Fiabilité des Systèmes Multiphysiques*, 2(2), 1-7.
- NASA. (2022). 2D NACA 0012 Airfoil Validation Case. [Online]. Erişim: https://turbmodels.larc.nasa.gov/naca0012_val.html

Araştırma Makalesi (Research Article)

İmalat Yürütme Sistemlerine Genel Bakış ve Bir İmalat Firmasında Toplam Ekipman Etkinliği Analizi

 Mustafa Denizli

Düzce Belediye Başkanlığı, Düzce, Türkiye.

Sorumlu Yazar (Corresponding Author): mustafadenizli@outlook.com

Makale Bilgileri (Article Info):

Geliş (Received): 14/04/2025, Revizyon (Revision): 26/04/2025, Kabul (Accepted): 16/05/2025

DOI: 10.70081/duted.1675495

ÖZET

MES (Manufacturing Execution System) imalat alanındaki makineler, çalışanlar ve süreçler arasında dijital bir köprü kurarak; imalat süreçlerinin gerçek zamanlı izlenmesini, düzenlenmesini ve kontrol edilmesini sağlayan bir yazılım sistemidir. Dijital dönüşüm ve teknolojik gelişmelerle birlikte işletmelerdeki birçok süreç bilgisayar tabanlı hâle gelmiştir. Bu durum, cihazların uzaktan kontrolünü, veri alışverişini ve süreçlerin optimizasyonunu mümkün kılmıştır. MES sistemleri; üretimde verimliliği artırmak, hataları azaltmak ve kaynak kullanımını iyileştirmek açısından kritik bir rol oynamaktadır. Ancak buna rağmen Türkiye'deki MES kullanım oranı hâlen düşük seviyelerde olup küresel ortalamanın gerisindedir. Bu durum, yerli işletmelerin dijitalleşme sürecinde MES sistemlerine daha fazla ilgi göstermeleri ve yatırım yapmaları gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, MES ile ilgili temel bilgiler, sistemlere ilişkin standartlar ve iletişim protokolleri ele alınmakta; ayrıca örnek bir firmada gerçekleştirilen Toplam Ekipman Etkinliği (OEE) analizi ile verimlilik artışına yönelik iyileştirme alanları, üretim kayıplarının nedenleri ve çözüm önerileri ortaya konulmaktadır. Elde edilen bulguların, gelecekteki akademik araştırmalara ve endüstriyel uygulamalara farkındalık sağlaması ve katkı sunması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: İmalat Yürütme Sistemleri, Dijital Dönüşüm, Üretim Verimliliği, İletişim Protokolleri, Toplam Ekipman Etkinliği

An Overview of Manufacturing Execution Systems and Overall Equipment Effectiveness Analysis in a Manufacturing Company

ABSTRACT

MES (Manufacturing Execution System) is a software system that provides real-time monitoring, regulation and control of manufacturing processes by establishing a digital bridge between machines, employees and processes in the manufacturing field. With digital transformation and technological developments, many processes in businesses have become computer-based. This has made it possible to remotely control devices, exchange data and optimize processes. MES systems play a critical role in increasing efficiency in production, reducing errors and improving resource utilization. However, despite this, the MES usage rate in Türkiye is still low and lags behind the global average. This situation reveals that domestic businesses need to show more interest and invest in MES systems in the digitalization process. This study covers basic information about MES, standards and communication protocols related

to the systems; and also, with the Total Equipment Effectiveness (OEE) analysis carried out in a sample company, improvement areas for efficiency increase, causes of production losses and solution suggestions are revealed. The findings are aimed to raise awareness and contribute to future academic research and industrial applications.

Keywords: Manufacturing Execution Systems, Digital Transformation, Production Efficiency, Communication Protocols, Overall Equipment Effectiveness.

I. Giriş

İmalat Yürütme Sistemi (MES), üretim süreçlerinde şeffaflık sağlayan, görev dağılımını optimize eden, malzeme yönetiminde tasarruf sunan, kalite yönetimine uyumlu ve performans analizine olanak tanıyan kapsamlı bir bilgi sistemidir. MES 1990'ların ortalarından beri geliştirilmiştir (Chen ve Voigt, 2020). Günümüzde rekabetçi piyasalarda öne çıkmanın en etkili yollarından biri, müşteri memnuniyetini artırmaktır. Bu doğrultuda, işletmelerden hızlı ve yüksek kalite standartlarına uygun üretim gerçekleştirmeleri beklenmektedir. Bu beklentileri karşılayabilmek için işletme bünyesindeki tüm kaynakların etkin ve verimli şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Tam da bu nedenle, üretim sürecinde makinelerin duruş sürelerini minimize etmek, sevkiyat süreçlerini iyileştirmek, makineler arası veri toplamak, imalatı verimli hale getirmek ve çalışan görevlerini etkin biçimde yönetmek için MES sistemlerine duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır (Qiu ve ark, 2015; Qu ve ark, 2014). Bu optimize çalışmaları, uluslararası bir eğitim derneği olan MESA (Manufacturing Execution Solutions Association) tarafından 11 temel işlevi kapsayacak şekilde MES'in temelini oluşturmak amacıyla ortaya konmuştur. Bunlar ayrıntılı planlama, kaynak yönetimi, belge yönetimi, malzeme ve stok yönetimi, performans analizi, tedarik yönetimi, bakım yönetimi, süreç yönetimi, kalite yönetimi, veri toplama ve ürün takibi şeklindedir (Kletti, 2007). MES'in bu işlevlerle birlikte uygulanması popüler hâle gelmekte endüstriyel uygulama çeşitliliğinde artış olduğunu göstermektedir (Arica ve Powell, 2017). Kocabay, yapmış olduğu çalışmada üretime dâhil olmayan siparişlerin üretim hattına eklenmesi halinde, hangi proseslerde gecikmeler yaşanacağı, nerede dar boğazların ortaya çıkacağı ve hangi ürünlerin sevkiyatlarının gecikeceği gibi olumsuz durumları önceden tahmin edecek şekilde birleşik modelleme dili kullanarak bir sistem tasarlamış ve karar vericilerin işini kolaylaştıracak bir başarı elde etmiştir (Kocabay, 2019). Halıcı, imalat alanındaki bir işletmede ERP (Kurumsal Kaynak Planlaması) ve MES sisteminin entegre çalışmasını sağlayarak, üretim süreçlerini izlenebilir hâle getirmiş, maliyet hesaplamaları noktasında çözümler üretmiş, verimliliği düşürecek unsurları optimize etmiş, üretim verimliliğini arttırmış ve ileriye yönelik tavsiyelerde bulunmuştur (Halıcı, 2022). Literatürdeki farklı bir çalışmada MES sistemlerinin akıllı fabrikaların oluşmasında kilit rol oynadığı belirtilmiş, işletmelerin gelecekte rekabetçilik anlayışı için MES sistemlerine yatırımlar yapacağı savunulmuştur (Mantravadi ve Møller, 2019). İsveç'te faaliyet gösteren bir otomotiv firmasında yer alan 13 adet CNC makinesinden oluşan üretim hattında darboğazları tespit etmek amacıyla çalışma yürütülmüştür. Çalışma kapsamında geliştirilen yapay zeka çözümü, MES'ten elde edilen zaman serisi verileri üzerinde makine öğrenimi gibi teknikleri kullanarak, zamanla değişkenlik gösteren üretim sistemlerinde karşılaşılan darboğazların tespitine olanak sağlamıştır (Bokrantz ve ark, 2024). Bir talaşlı imalat firmasının üretim süreçlerini yeniden yapılandırmak için ISA-95 standardı ile MESA-MES modelini referans alarak bazı öneriler sunulmuştur. Bu öneriler ile üretim sürecinde karşılaşılan temel sorunların tespit edilmesini ve bu sorunlara yönelik yeniden yapılandırma faaliyetlerinin MES sistemi üzerinden planlanması hedeflenmiştir. Üretim sürecine ait kritik veriler toplanarak karar destek mekanizmaları güçlendirilmiştir. Çalışma, MES yazılımı entegrasyonundan önce süreçlerin yeniden yapılandırılmasının önemini vurgularken, üretim operasyonları yönetimine odaklanmakta; bakım, kalite ve envanter yönetimi gibi diğer ISA-95 alanlarının da gelecekteki çalışmalar için potansiyel araştırma konuları olduğunu ortaya koymaktadır (Liao, 2024). Bir başka çalışmada MES sistemlerinin üretim süreçlerinin performans ve operasyonel sağlamlığı değerlendirilmiştir. Üretim hatlarında nasıl uygulandığı açıklanmış, anahtar performans göstergeleri kullanımıyla sistem verimliliği ölçülmüştür. MES sistemlerinin yalnızca izleme yapmadığı aynı zamanda karar destek mekanizmaları sağladığı, sistem arızaları ve değişken koşullar altında esnekliği arttırdığı

sonucuna ulaşılmıştır (Gendre, 2016). Dijital ikiz temelli bir mimarinin geliştirilmiş olduğu bir çalışmada MES sisteminden faydalanılmış fiziksel üretim hattının sekronize çalışması sağlanmıştır. Bunun sonucunda hata tespiti ve müdahale süresinde %14,2 oranında iyileşme görülmüştür. Mobil robotların engel aşma senaryolarında ise ortalama %21,1 oranında zaman tasarrufu elde edilmiştir (Caiza ve Sanz, 2024). Üretim sistemlerinde verimliliğin artırılması amacıyla geliştirilen performans ölçüm araçları arasında OEE analizi bulunmaktadır. Özellikle ekipman duruş sürelerinin azaltılması yoluyla endüstriyel performansın iyileştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. OEE bileşenleri üzerinden yapılan değerlendirme, üretim hatlarında karşılaşılan kesintiler, hız düşüşleri ve kalite kayıpları gibi temel verimsizlik alanlarını görünür kılarak, sürekli iyileştirme faaliyetlerine katkı sağladığı savunulmuştur (Rathi, 2023). OEE, ekipmanların planlanan üretim süresi içindeki gerçek üretkenliğini ölçerek kayıpların sistematik biçimde analiz edilmesini sağlar. Böylece, operasyonel mükemmelliğe ulaşma yolundaki çabalarına somut katkılar sunar (Brodny ve Tutak 2019). Örneğin bir işletmede gerçekleştirilen mobil tabanlı MES sistemi sayesinde manuel toplanan verilerde oluşan hata payı ve gecikmeler minimize edilmiştir. Özellikle çalışma sonucunda OEE göstergesi açısından iyileşme görülmüştür. MES uygulaması öncesinde %79,9 olan OEE değeri, uygulama sonrasında %86,6'ya yükselmiştir (Mohamed ve Alraddadi, 2024). Farklı bir çalışmada, hassas metal işleme alanında faaliyet gösteren küçük ölçekli bir imalat firmasında iş emirleri ve üretim verileri dijital ortamda toplanarak gerçek zamanlı izleme sistemleriyle entegre edilmiştir. Gerçek zamanlı veri toplama, iş emri takibi ve üretim durumu görselleştirme sistemlerinin uygulanmasıyla birlikte, üretim süreci verimlilik, kalite, maliyet ve teslimat göstergeleri açısından analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, aylık üretim miktarında %7'lik bir artış gözlemlenmiş; ürün hata oranı %0,4'ten %0,3'e gerileyerek kalite iyileşmiştir. İşçilik ve zaman tasarruflarıyla üretim maliyeti %10 oranında azaltılmış, teslimat uyum oranı ise %92'den %93'e yükselmiştir (Shin ve ark, 2023). Bu bulgular, MES sistemlerinin küçük ve orta ölçekli işletmelerde dahi üretim verimliliğini anlamlı ölçüde artırabildiğini ve akıllı fabrika teknolojilerinin bu ölçekte uygulanabilirliğini açıkça ortaya koymaktadır. MES sistemlerinin kalite, verimlilik ve kaynakların etkin kullanımını önemli ölçüde iyileştirdiği görülmektedir. Fakat ülkemizdeki işletmelerde MES kullanım düzeyi henüz istenilen seviyelere ulaşamamış olup, bu alanda yapılan araştırmalar da oldukça sınırlı kalmaktadır. Özellikle MES Komitesi tarafından gerçekleştirilen çalışmalara göre Türkiye'de MES sistemlerinin kullanım oranı yaklaşık %12 seviyelerindeyken, küresel ölçekte bu oranlar çok daha yüksektir (Sarp, 2022). Bu fark, Türkiye'deki işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerinde MES sistemlerine daha fazla odaklanmaları gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, (MES) ile ilgili literatürde yer alan genel tanımların incelenmesi, ardından örnek bir imalat firmasında Toplam Ekipman Etkinliği (OEE) metriği üzerinden gerçekleştirilen detaylı performans analizi ve MES sistemlerinin üretim süreçlerine olan etkisinin nicel olarak değerlendirilmesidir. Böylelikle, MES sistemlerinin üretime sağladığı somut katkılar ortaya koyularak, Türkiye'deki imalat sanayisinde bu sistemlerin kullanımının yaygınlaştırılmasına yönelik farkındalık oluşturulması hedeflenmektedir.

II. MES SİSTEMLERİNE İLİŞKİN STANDARTLAR

MES sistemleri, çeşitli kuruluşlar tarafından ele alınmakta olup temel hedefleri MES sisteminin sahip olması gereken önemi kazandırmak, korumak ve düzenlemektir. Burada 5 temel standarttan bahsedilecektir.

A. MESA (Manufacturing Execution Solutions Association)

MES kavramını ilk defa belirleyen kuruluş olma özelliğini taşımaktadır. Bu konudaki en detaylı çalışmalar MESA'da bulunmaktadır.

- Detaylı planlama: Siparişlerin, makinelerin sınırlı kapasitesi ve diğer kaynaklarla uyumlu bir şekilde sırasıyla ve zaman açısından optimize edilmesi.
- Kaynak yönetimi: Cihazlar, makineler, araçlar gibi kaynakların yönetimini ve izlenmesini sağlama.
- Doküman yönetimi: Ürün, süreç, tasarım ya da sipariş bilgileri ile kaliteyi güvence altına almak için yardımcı olan iş talimatlarının yönetimi ve dağıtımını uygulama.

- Malzeme yönetimi: Üretimde kullanılan girdi malzemeleri ve ara ürünlerin yönetimi, stok takibi ve malzeme tasarrufu sağlama.
- Performans analizi: Ölçülen ve kaydedilen gerçek değerlerin, işletme hedefleri, müşteri hedefleri vb. ile karşılaştırılması ve değerlendirilmesi.
- Sipariş yönetimi: Operasyonların kontrolü ve tanımlanması, iş merkezlerine ve personele sevk edilmesi.
- Bakım yönetimi: Makinelerin ve tesislerin performans hedeflerine ulaşabilmesi için uygun önlemlerin planlanması ve uygulanması.
- Süreç yönetimi: Üretim tesisinde, planlanan ve mevcut yüklemelere ve spesifikasyonlara göre iş akışının kontrolü ve yönetimi.
- Kalite yönetimi: Ürün ve süreçlerin kaydedilmesi, izlenmesi, analiz edilmesi ve ideal değerlere karşı doğrulanması.
- Veri toplama: Süreç verilerinin, malzeme ve hammadde, personel işlemlerinin, makine fonksiyonlarının ve kontrollerinin görselleştirilmesi, kaydedilmesi, toplanması ve organize edilmesi.
- Ürün takibi: Bir ürünün üretimiyle ilgili tüm olayların belgelenmesi. Girdi malzemelerinin ve çevresel koşulların ayrıntılarının kaydedilmesi (Kletti, 2007).

MESA, yukarıda görüldüğü gibi MES fonksiyonlarının operasyonel düzeyde nasıl tanımlanması gerektiğine ilişkin kapsamlı bir rehber sunmaktadır. Bu rehber, MES projelerinin planlanması ve değerlendirilmesinde önemli bir referans kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Örneğin, bir fabrikada makine duruş sürelerinin analizi için MESA'nın OEE metodolojisi kullanılabilir.

B. ISA-95

ISA-95, aynı zamanda ANSI/ISA-95 veya IEC 62264 olarak da bilinen, üretim kontrol sistemleriyle entegre çalışmayı hedefleyen uluslararası bir standartlar setidir. Üretim ortamındaki farklı kontrol seviyelerini ve bunların birbirleriyle olan bağlantılarını içerir.



Şekil 1. ISA-95 Modeli seviyeleri

- Seviye 0 - Fiziksel üretim süreçleri: Seviye 0, bir tesisin çalıştırılmasının fiziksel süreçlerini açıklar. Sahadaki veya zemindeki makineler ve diğer varlıklara atıfta bulunur.
- Seviye 1 - Üretim sürecini algılama ve yönlendirme: Seviye 1, verilerin toplanmasını ve fiziksel süreçlerin manipülasyonunu açıklar. Üretimi algılayan veya etkileyen sensörler, akıllı cihazlar, vanalar ve diğer cihazları ifade eder.
- Seviye 2 - Kontrolün izlenmesi ve denetlenmesi: Seviye 2, üretim ortamındaki fiziksel süreçlerin izlenmesini ve denetlenmesini açıklar. PLC tabanlı kontrol sistemleri, Dağıtık Kontrol Sistemleri (DCS) ve diğer kontrol aygıtlarını ifade eder.

- Seviye 3 - Üretim operasyonları yönetimi: Seviye 3, üretim yürütme sistemlerini (MES) ve üretim operasyonlarını yöneten denetleyici kontrol ve veri toplama (SCADA) gibi diğer sistemleri açıklar. ISA-95 standardı öncelikle seviye 3 ve 4 arasındaki arayüz ile ilgilenir.

- Seviye 4 - İş planlama ve lojistik: Seviye 4, bir işletmeyi yönetmeyle ilgili tüm faaliyetleri açıklar. Kurumsal kaynak planlama (ERP) sistemlerini içerir (ISA, 2025).

ISA-95 standardı MES sistemlerinin kurumsal (ERP) sistemlerle nasıl entegre edilmesi gerektiğini katmanlı bir model ile açıklamakta; bilgi akışının nereden nereye ve hangi tür verilerle gerçekleşeceğini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, MES sistemlerinin yalnızca operasyonel bir araç olmaktan çıkıp, kurumsal karar destek sistemlerinin etkin bir parçası haline gelmesini sağlamaktadır. Örneğin, bir üretim emrinin ERP sisteminden MES'e iletilmesi ya da ekipman verimliliğine ilişkin verilerin SCADA sisteminden analitik platformlara aktarılması gibi süreçlerde, ilgili standartlar referans alınmaktadır. Bu sayede, MES sistemleri yalnızca operasyonel bir araç olmanın ötesine geçerek, stratejik karar destek mekanizmalarının da önemli bir bileşeni hâline gelmektedir.

C. NAMUR

NAMUR, proses endüstrisinde üretim süreçlerini yönetmek için gereken ölçüm, kontrol ve otomasyon sistemlerinin standartlarını belirleyen uluslararası bir kullanıcı derneğidir. MES'in bu standartları kullanması, NAMUR'un önerdiği kalite ve güvenlik standartlarını karşılamaya yardımcı olur ve üretim süreçlerinin daha verimli hale gelmesini sağlar. NAMUR kılavuzları şu üç konuya özellikle vurgu yapmaktadır:

- Çalışılabilirlik: Farklı sağlayıcılardan gelen sistemlerin bir arada sorunsuzca çalışmasını temin etmek.

- Dijital dönüşüm: Modüler otomasyon ve dijital ikizler gibi yenilikçi dijital teknolojilerin kullanımını teşvik etmek.

- Operasyonel güvenlik: Tehlikeli çalışma ortamlarında güvenlik önlemleri ve güvenilirliği artıracak yapılar oluşturmak (Promanagecloud, 2025).

NAMUR'un, proses endüstrisine özgü yaklaşımı özellikle MES sistemlerinin kontrol sistemleriyle entegrasyonu açısından önem arz etmektedir. Sürekli üretim yapan tesislerde güvenlik, izlenebilirlik ve otomasyon sistemleriyle bütünleşik yapıların kurulması yönünde NAMUR'un sunduğu öneriler yol gösterici niteliktedir. Örneğin, NAMUR NE 107 standardı, bir basınç sensöründe meydana gelebilecek arıza durumlarının nasıl sınıflandırılacağını ve bu durumların operatörlere nasıl bildirileceğini tanımlamaktadır. Bu yaklaşım, özellikle sürekli üretim yapan tesislerde hem güvenliği hem de verimliliği birlikte sağlamaktadır.

D. VDI

2004 yılında kurulmuş olan VDI (Alman Mühendisler Birliği) mevcut bulgular, standartlar ve piyasadaki gelişmeleri dikkate alarak kaliteyi sağlamak için uluslararası düzeyde standartlar belirler. MES sistemleri de VDI'nın katkı sağladığı konular arasındadır. VDI birliğine göre MES sistemlerinin aşağıdaki konularda optimize çalışmaları yapmaları gerekmektedir. Bunlar; ayrıntılı planlama ve ayrıntılı zamanlama kontrolü, işletme kaynakları yönetimi, malzeme yönetimi, personel yönetimi, veri toplama ve işleme, arayüz yönetimi, performans analizi, kalite yönetimi ve bilgi yönetimi şeklindedir (Kletti, 2007).

VDI standartları, MES sistemlerinin yazılım ve donanım bileşenlerinin mühendislik tasarımıyla uyumlu bir biçimde yapılandırılmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle VDI 5600, üretim yönetimi yazılımlarının sistematik olarak sınıflandırılması ve değerlendirilmesi için kullanılmaktadır. Örneğin, VDI 5600 standardı, bir MES yazılımının üretim planlama, bakım yönetimi veya enerji izleme gibi modüllerinin nasıl yapılandırılacağını detaylandırmaktadır. Ayrıca, enerji verimliliği (VDI 4602) ve sürdürülebilir üretim gibi konularda da yol gösterici bir nitelik taşımaktadır.

E. NIST

Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST), Amerika Birleşik Devletleri Ticaret Bakanlığı'na bağlı bir federal kuruluştur. NIST'in temel görevlerinden biri, imalat süreçlerinde kullanılan ölçüm sistemlerini ve standartları geliştirmeyi sağlamaktır. 2000 yılında, Object Management Group (OMG) tarafından MES İmalat Yürütme Sistemleri alanına ilişkin bilgi talebine yanıt olarak bir rapor yayımlanmıştır. Bu raporda MES sistemlerinin standartlaştırılmasına yönelik yaklaşımlar ele alınmış ve referans çerçeveler sunulmuştur. Tıpkı VDI tarafından geliştirilen standartlarda olduğu gibi, NIST'in geliştirdiği yaklaşım MESA standartlarını temel alır. Bu standartlara dayanarak, birden fazla yazılım bileşeninin entegrasyonu yoluyla oluşturulan Dağıtık MES (Distributed MES) sistemleri için bir yapı tanımlamaktadır. Bu bağlamda NIST, MES sistemlerinin bir bütün olarak çalışmasını sağlayan yazılım bileşenleri arasında birlikte çalışabilirliği artırmak, veri bütünlüğünü sağlamak ve üretim operasyonlarının dijital yönetimini standartlaştırmak amacıyla önemli katkılar sunmaktadır (Barkmeyer, 1999). NIST, MES sistemlerinin entegrasyonunda karşılaşılan siber tehditlere karşı koruma sağlarken, akıllı üretim modelleri (dijital ikiz, IoT) için birlikte çalışabilirliğini de sağlamaktadır. Örneğin, bir enerji şirketi, NIST'in kılavuzlarını kullanarak bulut tabanlı üretim verilerinin şifrelenmesini ve anomali tespit sistemlerini yapılandırabilmektedir.

Günümüz üretim ortamlarında MES sistemleri, yalnızca üretim süreçlerini yönetmekle kalmayıp; aynı zamanda kalite kontrol, bakım yönetimi, iş gücü planlaması ve üretim izlenebilirliği gibi çok çeşitli işlevleri de bünyesinde barındırmaktadır. Ancak bu işlevlerin nasıl yapılandırılacağı ve hangi sistemlerle ne düzeyde entegrasyon sağlanacağı konularında bir standartlaşma eksikliği dikkat çekmektedir. Bu noktada, yukarıda bahsedilen standartlar, MES sistemlerinin kurumsal ve teknik altyapısının şekillendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Tablo 1. Farklı Standartlar Tarafından Belirtilen MES İşlevleri (Schmidt ve ark, 2011).

	MESA	NAMUR	VDI	NIST
İşgücü Yönetimi	X		X	
Gereksinim Planlaması		X		
Brüt Planlama		X		
Detaylı Planlama	X	X	X	X
Kalite Yönetimi	X	X	X	X
Ürün Stok Yönetimi	X	X		X
Kaynak Yönetimi	X		X	X
Ekipman Yönetimi	X		X	X
Üretim Kontrolü	X	X		
İzlenebilirlik / Ürün Geçmişi	X			X
Üretim Raporlama	X		X	X
Makine Kontrolü	X			
Üretim Verisi Toplama	X		X	X
Ana Veri Yönetimi	X	X	X	X

Tablo 1'de görüldüğü gibi farklı standartlara göre tanımlanan MES işlevleri karşılaştırıldığında, bu sistemlerin sahip olması gereken fonksiyonlar konusunda evrensel düzeyde üzerinde uzlaşılmış, kapsamlı ve tekil bir standardın bulunmadığı görülmektedir. Her bir standardın farklı önceliklere, sektörel ihtiyaçlara veya uygulama senaryolarına göre çeşitli MES bileşenlerine vurgu yapması, bu sistemlerin yapısal çeşitliliğini ve uygulama esnekliğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, MES sistemlerinin kapsamı ve işlevsel yetkinlikleri, benimsenen standartlara ve işletmenin üretim stratejisine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu durum, MES sistemlerinin geliştirilmesinde ve uygulanmasında esnek ve çözümlerin önemini vurgulamaktadır.

III. MES SİSTEMLERİNE İLİŞKİN İLETİŞİM PROTOKOLLERİ

İmalat süreçlerini verimli ve doğru bir şekilde izleyebilmek ve farklı cihazlardan verilerin alınabilmesi için bazı iletişim protokollerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu protokoller aracılığı ile veriler merkezi bir MES sistemine iletilebilmektedir. İletişim protokolleri, cihazların ve sistemlerin farklı standartlarda ve farklı

üreticilerden olmasına rağmen uyumlu bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. MES sistemleri makinelerden, sensörlerden ve diğer cihazlardan veriler toplayabilmektedir. Örneğin, üretim hızı, sıcaklık, basınç, çevrim süresi, makine bazında harcanan enerji miktarı, makinenin çalışıyor duruyor bilgisi, elektriksel arızalar vb. gibi verileri alabilmektedir. Bu veriler, üretim sürecinin izlenmesi ve yönetilmesi için kullanılmaktadır.

A. MODBUS PROTOKOLÜ

Modbus, endüstriyel sistemlerde en yaygın kullanılan protokollerden biri olarak öne çıkmaktadır. Kolay entegrasyonu, açık kaynak yapısı ve geniş donanım uyumluluğu, bu protokolü birçok endüstride standart hale getirmiştir. Modbus, 1979 yılında Modicon adlı firma tarafından geliştirilmiştir (Vadi ve ark, 2014). Açık bir protokol olması sebebiyle bu protokolü kullanmak isteyen cihazlar rahatlıkla veri alışverişi sağlayıp kullanabilmektedir. Modbus protokolü, master-slave (efendi-köle) mimarisine dayalı bir haberleşme yöntemidir. Modbus haberleşmesinde tüm iletişim master tarafından başlatılmaktadır. Slave cihazlar, gelen isteklere göre veri sağlar veya belirlenen işlemleri gerçekleştirir, ancak master'ın komut vermediği durumlarda pasif kalmaktadır.

B. PROFIBUS PROTOKOLÜ

1987 yılında EN50170 ve EN50224 standartlarına uygun olarak tasarlanan Profibus (Process Field Bus) bir iletişim protokolüdür. Bu protokol, FMS, PA ve DP gibi farklı iletişim modları sunarak, veri iletiminde RS-485 ve IEC 61158-2 gibi endüstriyel protokoller ile fiber optik iletişim teknolojileri ile esnek çözümler sağlamaktadır (Yılmaz, 2006). Profibus, otomasyon sistemlerinde, saha cihazları yönetimi ve dağıtık kontrol sistemleri gibi alanlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir.

C. PROFINET PROTOKOLÜ

Profinet (Process Field Network) PROFIBUS International (PI) organizasyonu tarafından standart hale getirilmiş bir endüstriyel haberleşme protokolüdür (Feld, 2004). Profinet, Ethernet tabanlı yapısı ile düşük gecikme süresi ve yüksek veri iletim hızı sağlayabilmektedir. Profinet OSI modeline dayanır ve bunun üzerinde çalışan bir TCP/IP yapısına sahiptir. Profinet IO, Profinet CBA, Profinet IRT adıyla farklı haberleşme modelleri bulunmaktadır (Krutz, 2005).

D. ETHERCAT PROTOKOLÜ

EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology), yüksek hızda veri aktarımı ve düşük gecikme süreleri sağlayan bir endüstriyel Ethernet tabanlı iletişim protokolüdür. 2003 yılında Alman mühendislik firması Beckhoff Automation tarafından geliştirilmiştir. Bu teknoloji, özellikle otomasyon ve endüstriyel kontrol sistemlerinde saha cihazları arasındaki veri iletimini iyileştirmek için tasarlanmıştır (Ethercat, 2025). EtherCat'in temel özelliklerinden biri, dağıtılmış zamanlama sistemidir. Her bir cihaz, veri aldığı ve bir sonraki cihaza ilettiğinde, iletilen verilere bir zaman etiketi ekler. Master cihaz gelen verileri toplarken, her cihazın gecikmesini kolayca analiz edebilmektedir. Ağdaki tüm slave cihazları yönetilebilmektedir.

E. RS-232 PROTOKOLÜ

1960'larda Electronic Industries Association (EIA) tarafından standartlaştırılmış olup, özellikle düşük maliyetinden kaynaklı endüstride tercih edilmektedir. Tek uçlu (single-ended) bir yapıdadır ve $\pm 3V$ ile $\pm 15V$ arasında değişen gerilim seviyeleriyle çalışmaktadır. Maksimum önerilen mesafesi 15 metre olup, 9600 bps, 115200 bps gibi baud hızlarını desteklemektedir. Elektromanyetik girişime karşı hassas olup, uzun mesafeler için kullanılmamaktadır. Eski üretim sistemleriyle entegrasyon gerektiğinde RS-232 hâlâ önemli bir haberleşme seçeneği olarak kullanılmaktadır (Yetişken, 2010).

F. RS-485 PROTOKOLÜ

RS-485, geniş mesafelerde güvenilir veri iletişimi sağlayan bir seri haberleşme protokolüdür. Maksimum 1.2 km mesafeye kadar veri aktarımına imkân tanımaktadır. Tek bir iletişim hattı üzerinde 32

verici eş zamanlı olarak çalışabilmektedir. Elektromanyetik girişime karşı daha dayanıklı bir haberleşme sunmak için veri iletiminde bir pozitif (+) ve bir negatif (-) sinyal kullanarak dengeli bir sinyal iletimi gerçekleştirmektedir. Aynı ağda birden fazla verici cihazın haberleşmesine olanak tanımaktadır (Erkan, 2007).

G. MQTT PROTOKOLÜ

MQTT TCP/IP üzerine inşa edilmiş bir iletişim protokolüdür (Kraijak ve Tuwanut, 2015). Ağ üzerindeki veri trafiğini minimize etmesi ve mesaj başlığının yalnızca 2 bayt gibi düşük bir boyuta sahip olması, düşük güç tüketimi, güvenilirliği, açık kaynak yapısı ve ekonomik olması sebebiyle sınırlı kaynaklara sahip kablosuz sensör ağlarında geniş çapta tercih edilmektedir. MQTT, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve M2M (Makineden Makineye) iletişim uygulamaları için uygun özellikler sunmaktadır.

IV. TOPLAM EKİPMAN ETKİNLİĞİ (OEE)

Toplam Ekipman Etkinliği (OEE), bir ekipmanın gerçek üretim miktarının, o ekipmanın en verimli koşullarda ulaşabileceği maksimum üretim kapasitesine oranı olarak tanımlanabilir. Toplam Verimli Bakım (TPM) yaklaşımından türeyen OEE, Japonya'daki Tesis Bakım Enstitüsü'nde Seiichi Nakajima tarafından geliştirilmiştir. Burada temel amaç, sağlanabilecek en faydalı verimliliği sağlamak ve kayıpları tamamen ortadan kaldırmaktır (Nakajima, 1988). OEE hesaplamasında kullanılan üç adet ölçüt vardır. Bu ölçütler kullanılabilirlik, performans ve kalite şeklindedir. Üç ölçütün çarpılması ile bulunmaktadır.

$$OEE = Kullanılabilirlik \times Performans \times Kalite \times 100 \quad (1)$$

OEE değeri sonuçları yüzde olarak gösterilmektedir. Hepsinin veriminin ayrı ayrı hesaplanmaları ise aşağıdaki şekilde bulacağız.

$$Kullanılabilirlik = \frac{\text{Toplam Çalışma Süresi} - \text{Toplam Duruş Kayıpları Süresi}}{\text{Toplam Çalışma Süresi}} \times 100 \quad (2)$$

$$Performans = \frac{\text{Üretimde Gerçekleşen Miktar}}{\text{Teoride Gerçekleşmesi Beklenen Miktar}} \times 100 \quad (3)$$

$$Kalite = \frac{\text{Üretimde Gerçekleşen Miktar} - \text{Hatalı Üretim Miktarı}}{\text{Üretimde Gerçekleşen Miktar}} \times 100 \quad (4)$$

Çıkan sonuçlar uluslararası düzeyde farklı sektörlerde kabul edilen ortalama değerlerle karşılaştırılabilir.

V. BULGULAR VE TARTIŞMA

Toplam Ekipman Literatürde, OEE ölçümünün ideal kabul edilen değerleri belirlenmiş olup Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. OEE Dünya Standartları (Igbokwe ve Godwin, 2021).

OEE Bileşenleri	Standart Değerler
Kullanılabilirlik	%90 ve üzerinde olmalı
Performans	%95 ve üzerinde olmalı
Kalite	%99 ve üzerinde olmalı
Genel OEE	%85 ve üzerinde olmalı

Bu çalışmada dünya standartlarının referans değerleri esas alınarak OEE (Toplam Ekipman Etkinliği) analizi, küçük ölçekli bir makine imalat firmasında gerçekleştirilmiştir. Söz konusu işletme, metal işleme sektöründe faaliyet göstermekte olup toplamda 4 personeliyle çalışmaktadır. Firma, özel parça üretimi ve makine imalatı gibi işler yapmaktadır. Veri toplama süreci manuel olarak operatörler desteği ile

gerçekleşmiş ve 30 gün olarak kayıt altına alınmıştır. Toplanan veriler duruş süreleri, üretim adetleri, arıza, takım kırılması ve hatalı parça üretimi gibi parametreleri içermektedir. Firma, haftanın yedi günü faaliyet göstermekte olup, 08:00 – 24:00 saatleri arasında iki vardiya halinde üretim yapmaktadır. Günlük toplam çalışma süresi, yemek molaları hariç tutulduğunda 14 saat olarak uygulanmaktadır. Bu çalışma modeli dikkate alınarak, OEE hesaplamalarında kullanılacak olan teorik toplam çalışma süresi ve olası üretim kayıpları detaylı biçimde analiz edilmiştir. İmalat firmasında işlenen parçalar, alüminyum alaşımlı malzemeden imal edilen motor gövdeleridir. Bu parçalar üzerinde CNC dik işleme merkezi kullanılarak frezeleme, delik delme ve kılavuz çekme işlemleri uygulanmaktadır. İşlem sırasında parçaların eş merkezliliğini ve ölçü bütünlüğünü korumak büyük önem arz etmektedir. Özellikle deliklerin eksenel doğruluğunun sağlanabilmesi amacıyla, iki farklı operasyonun gerektirdiği bağlama işlemleri arasında oluşabilecek zaman kayıplarını önlemek için divizör kullanılmıştır. Bu sayede, bağlama süreleri optimize edilmiş ve işlem tekrarı sırasında zaman tasarrufu sağlanmıştır. Delik delme operasyonunun ardından, delik iç yüzeylerinde yüzey kalitesini artırmak ve pürüzlülüğü azaltmak amacıyla ezerek parlatma işlemi uygulanmıştır. Talaşsız bir işlem olan ezerek parlatma, malzeme yüzeyinde plastik deformasyon oluşturarak daha düzgün, parlak ve aşınmaya dirençli bir yüzey elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 2. CNC Tezgâhında işlem gören alüminyum motor gövdesi.

İşleme süreci, bir adet motor gövdesi için ortalama 5 dakika sürmektedir. Üretim süresinin analizinde arıza, bakım ve takım değişimi gibi plan dışı kesintiler plansız duruşlar kapsamında değerlendirilmiştir. Öte yandan, operatör molaları ve planlanmış vardiya dışı süreler ise planlı duruşlar altında toplanmıştır. İlgili üretim sürecine ait dakika ve adet bazlı veriler Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3. İmalat Firmasındaki Üretim Süreleri ve Kalite Göstergeleri.

Gruplar	Süre - Adet
Çalışma süresi	25200 dak
Plansız duruş kayıpları	355 dak
Planlı duruşlar	3600 dak
İdeal çevrim süresi	5 dak
Sağlam üretilen parça	3826 adet
Hatalı üretilen parça	297 adet
Gerçekleşen üretim	4123 adet
Teorik üretim	4249 adet

Yukarıda yer alan verilere göre OEE'nin temel bileşenleri olan kullanılabilirlik, performans ve kalite ölçütleri ayrı ayrı hesaplandığında aşağıdaki şekilde çıkmaktadır. Tablo 4'te toplam ekipman etkinliği sonuçları yer almaktadır.

$$Kullanılabilirlik Etkinliği = \frac{25200 - (355 + 3600)}{25200} \times 100 = \%84,30 \quad (5)$$

$$Performans Etkinliği = \frac{4123}{4249} \times 100 = \%97,03 \quad (6)$$

$$Kalite Etkinliği = \frac{4123 - 297}{4123} \times 100 = \%92,79 \quad (7)$$

$$Genel OEE = 0,8430 \times 0,9703 \times 0,9279 \times 100 = \%75,91 \quad (8)$$

Tablo 4. Toplam Ekipman Etkinliği Sonuçları.

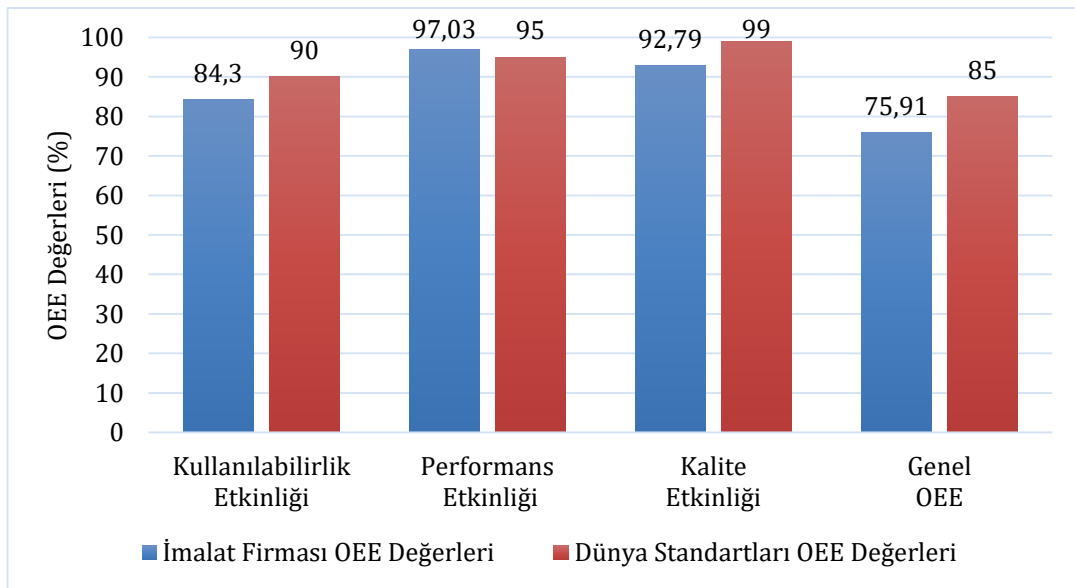
OEE Bileşenleri	Değerler (%)
Kullanılabilirlik etkinliği	84,30
Performans etkinliği	97,03
Kalite etkinliği	92,79
Genel OEE	75,91

İmalat firmasında yürütülen üretim süreçlerine ilişkin Toplam Ekipman Etkinliği (Overall Equipment Effectiveness - OEE) analizi kapsamında üç temel bileşen ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu analiz neticesinde, kullanılabilirlik etkinliği %84,30, performans etkinliği %97,03 ve kalite etkinliği %92,79 olarak hesaplanmıştır. Bu üç bileşenin çarpımı ile elde edilen genel OEE değeri ise %75,91 olarak bulunmuştur. Elde edilen OEE sonuçlarının, sektör genelinde kabul gören dünya standartları ile karşılaştırılması Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. Firmadaki OEE Sonuçlarının Dünya Standartları İle Karşılaştırılması.

OEE Bileşenleri	İmalat Firmasına Göre OEE değerleri (%)	Dünya Standartlarına Göre OEE değerleri (%)
Kullanılabilirlik etkinliği	84,30	90
Performans etkinliği	97,03	95
Kalite etkinliği	92,79	99
Genel OEE	75,91	85

Bu karşılaştırma, mevcut durumun değerlendirilmesi ve iyileştirme alanlarının tespit edilmesi açısından önemli bir referans oluşturmaktadır. Firmadaki OEE sonuçlarının dünya standartları ile karşılaştırılmasının sütun grafiği Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. OEE Sonuçlarının Karşılaştırıldığı Sütun Grafiği.

Yukarıdaki hesaplamalar doğrultusunda, imalat firmasının OEE bileşenlerinde dünya standartlarına ulaşabilmesi için bazı stratejik iyileştirmeler yapılmalıdır. Özellikle, kullanılabilirlik etkinliği bileşeninde yaklaşık %6,75 oranında bir artış sağlanması gerekmektedir. Bu artış, üretim ekipmanlarında duruş sürelerinin azaltılması ve bakım süreçlerinin optimize edilmesiyle mümkün olabilir. Kalite etkinliği açısından ise, firmanın mevcut değeri %92,79 iken, %99 seviyesine ulaşabilmesi için %6,70'lik bir artışa ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, üretim süreçlerinde hata oranlarının düşürülmesi ve kalite kontrol mekanizmalarının güçlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Genel OEE değeri, %75,91 seviyesinde olup, dünya standardı olan %85'e ulaşması için yaklaşık %11,97 oranında bir artış gerektirmektedir. Bu artışların sağlanabilmesi için bu aşamada gördüğümüz kadarıyla kesme sıvısı seçimi, parça işlenirken zamandan tasarruf edilebilmesi için kılavuz çekme işlemlerinin kılavuz çekme makinesinde yapılması, uygunsuz kesme parametreleri, uygun takım seçimi ve işleme sırasında motor gövdesinin titreşmesini engellemek için daha stabil bağlama yöntemleri uygulanması gerektiği firmaya bildirilmiştir.

VI. SONUÇLAR

MES sistemlerinin entegrasyonu, endüstri 4.0 hedefleri doğrultusunda dijitalleşen üretim ortamlarında verimliliğin artırılması için kritik bir öneme sahiptir. Cihazların uzaktan kontrol edilebilmesi, veri alışverişi içerisinde girmesi ve alınan bu veriler sonucunda optimizasyon ve analiz yapabilme beklentilerini karşılayacak çözüm MES sistemleridir. Endüstride MES'in sağlayabileceği gerçek zamanlı veri toplama ve izleme kabiliyeti, karar destek sistemlerinin etkinliğini artırarak işletmeye rekabet, tasarruf ve iş gücünde performans katkısı sağlayacaktır. MES sistemleri uygulanan işletmelerde üretim döngüsü kısalmakta, ürünlerin daha kısa sürede tamamlanmasını sağlamaktadır. Bu sayede teslimat süreleri azalır, üretim hızı ve kapasitesi artmaktadır. Bu çalışmada, İmalat Yürütme Sistemleri (MES) üzerine genel bir çerçeve sunulmuş ve MES'in üretim süreçlerindeki yeri, MES sistemlerine ilişkin standartlar ve iletişim protokollerinden bahsedilmiştir. Ardından, bir imalat firmasında MES kapsamında uygulanan Toplam Ekipman Etkinliği (OEE) analizi çalışması yapılmıştır. Analiz sonucunda, kullanılabilirlik, performans ve kalite oranları detaylı şekilde hesaplanarak mevcut üretim sisteminin verimliliği ölçülmüştür. Elde edilen bulgulara göre %84,30 olarak ölçülen kullanılabilirlik oranı, dünya standardı olarak kabul edilen %90 seviyesinin bir miktar altında kalmaktadır. Bu durum, üretim sırasında planlanmamış duruşların ve geç başlama gibi zaman kayıplarının mevcut olduğunu göstermektedir. Bakım süreçlerinin gözden geçirilmesi ve duruş nedenlerinin detaylı analizi, kullanılabilirliğin artırılması açısından önem taşımaktadır. Firmanın performans etkinliği değeri %97,03 olup, dünya standardı olan %95'in üstünde kalmaktadır. Kalite etkinliği ise %92,79 olup, dünya standardı olan %99'un altında kalmaktadır. Kalite iyileştirme faaliyetleriyle, hatalı üretim oranının daha da düşürülmesi mümkündür. Firmanın toplam OEE değeri %75,91 olarak hesaplanmıştır. Bu oran, dünya standardı olan %85'in altındadır. Bu farkın temel nedeni, kullanılabilirlik ve kalite etkinliklerinde gözlemlenen düşüklüklerdir. Yapılan çalışmada OEE analizinin üretim süreçlerinin darboğazlarını belirlemede ve sürekli iyileştirme faaliyetlerine yön vermede etkin bir araç olduğunu ortaya koymuştur. Alüminyum işleme sürecinde kesici takım seçimi, kesme sıvısı özellikleri ve uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi, işlem verimliliği ve yüzey kalitesi açısından büyük önem taşımaktadır. Yapışmayı önlemek ve talaş tahliyesini kolaylaştırmak için genellikle sülfür içeren kesme yağları kullanılmalıdır. Ayrıca, sürtünmeyi ve malzeme yapışmasını azaltmak amacıyla TiN kaplamalı kesici takımlar tercih edilmeli, bunun yanında alüminyuma özel keskin kenar geometrisine sahip takımlar kullanılmalıdır. Kesme parametreleri olarak, yüksek kesme hızı, uygun ilerleme oranı ve derinlik kontrolü, alüminyumun yumuşak yapısı nedeniyle talaş kırma ve ısı birikimini önlemede kritik rol oynayacaktır. Özellikle içten soğutmalı kesici takımlar, kesme sıvısının takım-talaş temas bölgesine etkin bir şekilde ulaşmasını sağlayarak hem sürtünmeyi azaltır hem de talaşın kırılarak kolayca uzaklaştırılmasına yardımcı olacaktır. Bu sayede, takım ömrü uzatılırken yüzey kalitesi de artırılabilir. Bu şekilde, doğru kesme parametreleri, uygun takım seçimi ve kesme sıvısı kombinasyonu, alüminyum işlemede verimliliği ve iş parçası kalitesini önemli ölçüde iyileştireceğinden firmanın OEE değerlerinin dünya standartları değerlerine yükseltilebilmesi mümkün olacaktır.

BEYANLAR

Teşekkürler: Bu çalışmada sağladıkları saha uygulama imkânları dolayısıyla SCDEMAK firmasına teşekkür ederim.

Yazarın Katkıları: Çalışmanın tüm aşamaları Yazar tarafından yürütülmüştür.

Çıkar Çatışması Açıklaması: Yazar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemektedir.

Telif Hakkı Beyanı: Yazar, dergide yayınlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptir ve çalışmaları CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayınlanmaktadır.

Destekleyen/Destekleyen Kuruluşlar: Bu araştırma herhangi bir dış fon almamıştır.

Etik Onay ve Katılımcı Onayı: Bu makale insan veya hayvan denekleriyle ilgili herhangi bir çalışma içermemektedir. Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulmuş ve yararlanılan tüm çalışmalar kaynakçada verilmiştir.

İntihal Beyanı: Bu makale intihal programıyla taranmıştır. İntihal tespit edilmemiştir.

Veri ve Materyallerin Kullanılabilirliği: Veri paylaşımı geçerli değildir.

YZ Araçlarının Kullanımı: Yazar, bu makalenin oluşturulmasında Yapay Zeka (YZ) araçlarını kullanmadığını beyan etmektedir.

KAYNAKLAR

- A. Schmidt, B. Otto, and H. Österle, "A Functional Reference Model for Manufacturing Execution Systems in the Automotive Industry," in *Wirtschaftsinformatik*, 2011, p. Paper 89.
- Arica, E., & Powell, D. J. (2017, December). Status and future of manufacturing execution systems. In 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (pp. 2000-2004). IEEE.
- Barkmeyer, E., Denno, P., Feng, S., Jones, A., and Wallace, E. (1999). NIST response to MES request for information. NIST Response to RFI-3 MES Models, pages 2–4.
- Bokrantz, J., Subramaniyan, M., & Skoogh, A. (2024). Realising the promises of artificial intelligence in manufacturing by enhancing CRISP-DM. *Production Planning & Control*, 35(16), 2234-2254.
- Brodny, J. and M. Tutak. 2019. Analysing the utilisation effectiveness of mining machines using independent data acquisition systems: A case study. *Energies* 12(13).
- Caiza, G.; Sanz, R. An Immersive Digital Twin Applied to a Manufacturing Execution System for the Monitoring and Control of Industry 4.0 Processes. *Appl. Sci.* 2024, 14, 4125.
- Chen, X., & Voigt, T. (2020). Implementation of the Manufacturing Execution System in the food and beverage industry. *Journal of Food Engineering*, 278, 109932.
- Erkan M. (2007). Bilgisayar destekli veri toplama sisteminin doküman makinelerinde uygulanması. Yüksek Lisans Tezi. Uludağ Üniversitesi.
- EtherCAT Technology Group. (2025). Technology. [Online]. Erişim: <https://www.ethercat.org/en/technology.html>.
- Feld, J. PROFINET-scalable factory communication for all applications. In Proceedings of the IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, Vienna, Austria, 22–24 September 2004.
- Gendre, Y., Waridel, G., Guyon, M., Demuth, J. F., Guelpa, H., & Humbert, T. (2016). Manufacturing execution systems: Examples of performance indicator and operational robustness tools. *Chimia*, 70, 616–620.
- Halıcı, C. M. (2022). Kurumsal kaynak planlama sistemleri ile üretim yürütme sistemlerinin entegrasyonu: Makine imalat sektöründe bir uygulama. Yüksek lisans tezi, Konya Teknik Üniversitesi.
- Igbokwe, N. C., & Godwin, H. C. (2021). Maintenance performance evaluation and downtime analysis of manufacturing equipment in a food manufacturing company. *Journal of Engineering Research and Reports*, 100-107.
- International Society of Automation (ISA). (2025). ISA-95 Standard. [Online]. Erişim: <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-95-standard>.
- Kletti, J. (2007). Manufacturing Execution System – MES. Germany: Springer, 28-29 33-34 pp.
- Kocabay, İ. V. (2019). Dijital ikizler gömülü gerçek zamanlı üretim yürütme sistemi tasarımı: kitleleşme özelleştirme ile üretim yapan bir firmada uygulama. Yüksek lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi.

- Kraijak, S., & Tuwanut, P. (2015, October). A survey on internet of things architecture, protocols, possible applications, security, privacy, real-world implementation and future trends. In *Communication Technology (ICCT), 2015 IEEE 16th International Conference on* (pp. 26-31). IEEE.
- Krutz, R. L. (2005). *Securing SCADA Systems*. Indianapolis: Wiley.
- Liao, P. Y., Gong, D. C., & Zeng, Z. (2024). Enhancing Order Fulfillment Through Production Process Reengineering Using Manufacturing Execution System as a Reference Model. *IEEE Access*.
- Mantravadi S, Moller C. An overview of next-generation manufacturing execution systems: how important is MES for industry 4.0. 14th Glob Congr Manuf Manag (GCMM) 2019:588-95.
- Mohamed, M.M. and Alraddadi, A.S. (2024) Agile Factor Flexible Industry 4.0 with MES Manufacturing Execution System Along with ERP BackEnd Integration: Ready-Made Garments as a Case Study. *American Journal of Operations Research*, 14, 137-150.
- Nakajima S., *Introduction to TPM*, productivity press, Portland , 1988.
- ProManage. (2025). MES, MES 1.1, CMES, ISA-95, NAMUR – Why are there so many standards?. [Online]. Erişim: <https://promanagecloud.com/mes-mes-11-cmes-isa-95-namur-why-are-there-so-many-standards/>.
- Rathi, S. S., Sahu, M. K., & Kumar, S. (2023). Implementation of total productive maintenance to improve productivity of rolling mill. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 30(6): 882-890.
- Sarp, G. M. (2022). MES & MOM Satın Alma Rehberi. [Online]. Erişim: [http://theprowess.net/documents/mes_satin_alma_rehberi\(buyuk\).pdf](http://theprowess.net/documents/mes_satin_alma_rehberi(buyuk).pdf).
- Shin, S. U., Lee, H. M., & Park, S. H. (2023). Research on Precision Processing Production System based on Manufacturing Execution System. *Journal of Digital Policy*, 2(4), 17-23.
- Vadi, S., Guler, N., & Bayındır, R. (2014). Endüstriyel Alanlarda Kullanılan Veri İletim Tekniklerinin Karşılaştırılması. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 2(1), 181-188.
- Yetişken, F. M. (2010). Elektrik sayaçlarının uzaktan okuma teknikleri ve prototip geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- Yılmaz C, Üncü İS. (2006). Profibus-Dp ağ tabanlı bina otomasyonu tasarımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(2), 161-166.
- Qiu, X., H. Luo, G. Xu, R. Zhong and G. Q. Huang (2015). Physical assets and service sharing for IoT-enabled Supply Hub in Industrial Park (SHIP). *International Journal of Production Economics*, 159, 4-15.
- Qu T, Lei SP, Chen YD, Wang ZZ, Luo H, Huang GQ (2014) Internet-of-Things-enabled Smart Production Logistics Execution System Based on Cloud Manufacturing. In: *Proceedings of ASME 2014 Conference on Manufacturing Science and Engineering Conference*.