

## Impact Analysis of Cylindrical Steel Water Storage Tanks Under the Seismic Action

*Sismik Hareket Altında Silindirik Çelik Su Depolama Tanklarının Darbe Analizi*

Ali İhsan ÇELİK<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Kayseri University, Tomarza Mustafa Akıncioğlu Vocational High School, Tomarza, Kayseri, Turkey

### Abstract

Cylindrical steel liquid tanks are widely used to store various liquids such as water, oil and industrial chemicals. They are used in nuclear power plants for cooling purposes in recent years. Petroleum or other hazardous chemicals in steel liquid tanks can cause large financial and environmental damage due to damages in tanks during the earthquake. The main goal of this paper is to reveal buckling shapes of cylindrical steel tanks with nonlinear seismic analysis according to different roof shapes. Tanks were designed as open-roof, flat-roofed, conical-roofed and torispherical-roofed tanks. For this aim, El-Centro earthquake recording of 0.22 seconds was used for determining the significant shell buckling events. In addition, this earthquake values are ideal for impact analysis because ANSYS Workbench "Explicit Dynamics" tool provides very good results in the dynamic analysis of structures under destructive and short-term forces. In order to provide the interaction between the water and the tank wall, for tank "Lagrangian" and for water "Eulerian Body" mesh technique is preferred in the "Explicit Dynamics" model. As a result of this study, many collapse events were determined due to seismic ground motion in cylindrical steel liquid storage tanks. If the tank was closed in the shape of a torispherical, less buckling would occur in the tank.

**Keywords:** Cylindrical Steel Tanks, Nonlinear Analysis, Impact Analysis, Seismic Analysis.

### Öz

Silindirik çelik sıvı tankları, su, yağ ve endüstriyel kimyasallar gibi çeşitli sıvıları depolamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda nükleer santrallerde soğutma amaçlı kullanılmaktadırlar. Çelik sıvı tanklarındaki petrol veya diğer tehlikeli kimyasallar deprem sırasında tanklardaki hasarlar nedeniyle büyük mali ve çevresel hasara neden olabilir. Bu çalışmanın temel amacı, farklı çatı şekillerine göre doğrusal olmayan sismik analiz ile silindirik çelik tankların burkulma şekillerini ortaya çıkarmaktır. Tanklar açık çatılı, düz çatılı, konik çatılı ve kubbeli (torispherical) çatılı olarak tasarlanmıştır. Bu amaçla, önemli cidar burkulma şekillerini belirlemek için 0.22 saniyelik El-Centro deprem kaydı kullanılmıştır. Ayrıca bu deprem değerleri darbe analizi için idealdir çünkü ANSYS Workbench "Explicit Dynamics" aracı yapıların yıkıcı ve kısa süreli kuvvetler altında dinamik analizinde çok iyi sonuçlar verir. Su ve tank cidarı arasındaki etkileşimi sağlamak için, "Explicit Dynamics" modelinde tank için "Lagrange" ve su için "Eulerian Body" mesh tekniği tercih edilmiştir. Bu çalışma sonucunda, silindirik çelik sıvı depolama tanklarında sismik yer hareketinden kaynaklanan birçok çökme olayı tespit edilmiştir. Tankın çatısı kubbeli olduğunda, daha az burkulmanın meydana geldiği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Silindirik Çelik Tanklar, Doğrusal Olmayan Analiz, Etki Analizi, Sismik Analiz.

## I. INTRODUCTION

Seismic behaviour of cylindrical steel storage tanks is very complicated due to hydrostatic and hydrodynamic pressure on the shell. This complex issue attracts the attention of researchers studying in the field of civil engineering. Researchers have been looking for solutions to prevent tanks from collapsing during an earthquake for years. However, they were damaged again in the last earthquakes, such as Van (2011) earthquake, Emilia (2012) earthquake, South Napa (2014) earthquake. For this reason, comprehensive seismic analysis and efficient design of these structures are important. In fact, seismic ground motion causes hydrodynamic pressures of the fluids in them. There have been used different Seismic behaviour of cylindrical steel storage tanks is very complicated due to hydrostatic and hydrodynamic pressure on the shell. There have been used different technique for interaction between fluid and shell in the Finite Element Method (FEM) so far. Investigation behaviour of tanks and include fluids was carried out under seismic excitation by using FEM. More specifically, there are different paths within the commercial ANSYS program, which is widely used to simulate similar systems involving all solid analyses and solid mass interaction. ANSYS Workbench Explicit Dynamics tool is an excellent tool to perform many nonlinear structural mechanical analyses. For example, impact analysis from 1m/s up to 500 m/s, stress, high-frequency dynamic impact analysis, nonlinear large deformations, analysis of

include complex contact conditions, simulation of complex material flows, buckling and failure analysis, fastener analysis, rigid and flexible many analysis can be done such as body analysis [1]. It is possible to predict exactly the reaction of flowing fluids by contacting rapidly changing surfaces and surfaces by using algorithms based on first principles during simulation of events occurring within a few milliseconds by means of Explicit Dynamics tool. Simulations with longer duration can also be performed with this tool, but a longer wait is required for the simulation to finish [2].

Some researches were determined the seismic performance of cylindrical liquid storage tanks, considering dynamic fluid-structure interaction (FSI). Very thin sheets are preferred in the design and manufacture of steel liquid storage tanks. This preference is mostly due to economic concerns and easy design. This situation increases the importance of seismic analysis of steel liquid tanks [3-8]. Veletsos and Yang (1977); Haroun and Housner (1981) investigated the effect of hydrodynamic fluid-structure interaction on seismic response [6, 9]. Many researchers have conducted research on the seismic response of ground-supported tanks over the long time and have shown hydrodynamic outcome of the isolated structure [10, 11].

Virella et al., investigated the dynamic buckling of anchored cylindrical steel liquid tanks due to horizontal earthquake excitation. In their study, they found that buckling at the top of the cylindrical tank wall showed negative (inward) pressure in the area where the impulsive hydrodynamic pressure caused by the earthquake excitation exceeded the hydrostatic pressure [12]. Maekawa and Fujita proposed a nonlinear dynamic analysis method for the combined vibration between fluid and structure. They used a shell element which takes into account the geometry non-linear characteristics and a solid element following the Euler equation. ALE method was used in the analysis between fluid and structure and Explicit time integration method was used for time-history analysis [13]. Mittal et al, using the coupled Euler - Langrange formulation, investigated the maximum hoop stress and shear stresses occurring in the cylindrical steel tank wall under blasting. They observed that the stresses in the tank and the liquid sloshing heights increased with the decreasing distance of the explosive material and the increased aspect ratio from the height to the radius ratio [14]. One of the FEM studies about the steel liquid storage tanks involving the tank wall and tank-ground flexibility is performed by Nicolici and Bilegan, is a study of the modeling of fluid-structure interaction (FSI) of partially filled steel liquid tanks. In the modeling, they focused on computational fluid dynamics (CFD) analysis to estimate the effect of the amplitude wave amplitude, convective mode

frequency, pressure applied to walls, and sloshing. As a result of the analysis, it was determined that fluid structure interaction affected the sloshing effect and wall elasticity strengthened impulsive pressure [15]. Çelik et al. (2020), preferred the "Eulerian Body" mesh technique in "Explicit Dynamics" model to provide the interaction between the water and the tank wall. They made successful observations about the tank roof deformation as a result of the analysis [16].

According to the results obtained by Kamyar et al., (2018) working on how the method can be protective to determine the behavior of the tank under earthquake ground motion. It can be extended to other target spectra since the period change interval for steel tanks is not very wide and is always in the constant acceleration region of the spectrum. Buckling analysis plays an important role in the design of steel tanks due to their thin shell [17]. In the study by Buratti and Tavano (2014), in order to investigate various aspects of dynamic buckling, in the FEM model of the tank, mass addition method was used to model liquid. In particular, peak displacement and maximum relative displacement of the tank walls were considered in the study [18]. Djermane et al (2014), tried to compare the results of numerical analysis with tanks with different geometric parameters under three earthquake recordings with the dynamic buckling results obtained with two design standards in order to increase dynamic buckling resistance. In their comparison of large and long tanks, they stated that design standards need to be revised in order to determine dynamic buckling criteria [19].

Generally, there are four types of water storage tanks such as open-roof, flat-roofed, conical-roofed and torispherical-roofed tanks. Figure 1 shows the four tank types and some types of damage belonging to them.

In this study, deformations and buckles due to hydrodynamic pressures of four types of vertical cylindrical steel tanks filled with water observed under the seismic loading. Numerical simulations and analyses were performed with the "Explicit Dynamics" tool in ANSYS Workbench. In recent years, "Explicit Dynamics" FEM method is widely used in collision experiments and provides advantages in dealing with large-scale contact problems. Workbench Explicit Dynamics can solve a variety of non-linear problems, such as high-speed collisions in the three-dimensional non-linear structure, explosions and non-linear contact of metal formation and the effect of the load. The FEM method used in the aforementioned studies have not accurate the interaction between tank wall and water, contains deficiencies in nonlinear analysis. By using the "Explicit Dynamics" analysis method, ideal results can be obtained for the interaction between the tank wall and the liquid. This method was used by some

researchers for analysis of tanks which have been exposed to explosion from outside or are damaged due to explosions due to gas pressure. However, Explicit Dynamic method gave very good results in determining buckling shapes in tanks with under the seismic loading. The analyses were carried out in three different thicknesses with four cylindrical tanks such as open-roof, flat-roofed, conical-roofed and torispherical-roofed. Directional deformation and buckling results of the tank were observed under the El-Centro earthquake loading of 0.22 seconds. The El-Centro earthquake was preferred because it is one of a major earthquake commonly used in similar analyses.

It is possible to obtain the desirable performance and result in the analysis by using safe and reasonable values without spending much time. In this way, great advantages are provided in terms of cost and optimization. The natural vibration periods of these tanks are between 0.1 sec and 0.5 sec, so they may be

damaged due to the maximum earthquake energy. In this study, the damage status of the tanks is examined directly. Tank wall thickness was determined according to API650 design code (2013) [19]. In the Explicit Dynamics simulation method, the Eulerian Body mesh structure for the liquid, the Lagrangian mesh structure technique for the wall, the friction and dynamic interaction between the two are modeled accurately the liquid and tank wall movements are observed together. The types of damage occurring during the earthquakes and the buckling shapes obtained by this modeling technique of Explicit Dynamics show very similarities. In this way, simulations can be continued and many real damage shapes that can be obtained. Therefore, many damages of cylindrical tanks may be prevented by means of accurate simulation of collapse events. In the result of his paper, include suggestions to improve seismic performance of tanks and reduce the level of risk.



Figure 1. Types of cylindrical steel water tanks and their collapse

## II. EXPLICIT AND IMPLICIT FEM APPROACH

Explicit and implicit FEM analysis methods are used in analysis to obtain solutions of time-dependent ordinary and partial differential equations that require computer-based simulations in physical processes of products, and to obtain numerical approximations [20]. For all nonlinear and dynamic analyzes, both "implicit" and "explicit" methods are used to solve the problems when the forces applied in the boundary conditions need to be applied incrementally/gradually. Explicit methods go to the solution by considering the state of the system at a certain time after the current state of the system, implicit methods find a solution by using an equation that includes both the current state

of the system and the next state. Using very small-time steps without the need for convergence controls, the explicit method performs high-energy dynamic analysis by exceeding most of the limitations of the implicit method. It accurately simulates the propagation and interaction of stress waves due to sudden impacts or easily solves nonlinear structural problems due to impacts [21].

In linear problems, partial differential equations simplify the matrix equation as follows:

$$[K] \{x\} = \{f\} \quad (1)$$

k = hardness matrix

$x$  = displacement/deviation

$F$  = force

For nonlinear static problems:

$$[K(x)] \{x\} = \{f\} \rightarrow [k_0 + k_1.x + k_2.x^2 + \dots] \{x\} = \{f\} \quad (2)$$

Matrix equations for dynamic problems would be:

$$[M] \{x''\} + [C] \{x'\} + [K] \{x\} = \{f\} \quad (3)$$

$x'$  = velocity

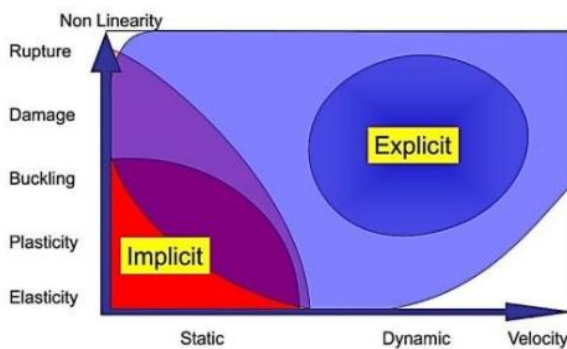
$x''$  = acceleration

$C$  = damping matrix

$M$  = mass matrix

If the strain rate/rate is equal to 10 units/second or more, the explicit method can be used. In this case, ballistic explosions, sudden hits, automotive accidents as well as sudden displacement simulations due to seismic movement can be performed. Earthquakes can sometimes extend for 45-60 seconds, but much more acceleration occurs in the first few seconds. Since the actual destructions and deformations occur in this range, so constructions can be simulated with short-term data.

As can be seen from Figure 2, it is seen that plasticity, buckling and acceleration increase depending on the stability, dynamism and gradually increasing speed. In the region where this increase is present, it seems more logical to make Explicit Dynamics analysis. Thus, it will be possible to capture the real damage situations of the structures.



**Figure 2.** Definition of Implicit and Explicit analysis [21]

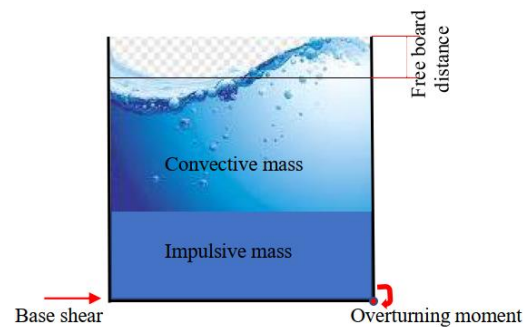
In Explicit dynamics analysis, depending on the rapidly changing time, the stress wave and loads spread immediately, and a dynamic response occurs from the structure. Momentum change has a significant effect between the moving object and the inertia, according to the analysis types. Nonlinear dynamic analysis can thus be simulated effectively. Explicit Dynamics tool contains menus in the form of a step-by-step one after the other. The menus are expanded at different stages of the analysis, offering

specific specifications for making various adjustments about objects, such as environmental factors, predicates, and contact surfaces [20].

**2.1. Design Method**

The diameter of the analyzed tank is 15.08 m, its height is 11.31 m, the height of the conical and trispherical roof is 2.96 m, the height of the water in the tank is 10 m, the tank wall thicknesses are 4, 6 and 8 mm, the tank steel density is 7850 kg/m<sup>3</sup>, the elastic modulus is 200 GPa, the density of water was determined as 1000 kg/m<sup>3</sup>, the poisson ratio of steel was 0.3, the poisson ratio of water was 0.5 and finally the bulk modulus of water was 44229 GPa. These values were determined by considering design codes of the American Petroleum Institute (API 650 (2013) for steel cylindrical water tanks [22].

Under dynamic seismic loading, impulsive mass occurs near the bottom of cylindrical steel liquid tanks and convective mass that gradually rises towards the top as shown in Figure 3. Impulsive and convective masses were calculated using the design standard developed for cylindrical and ground-supported vertical liquid tanks by API650. Model validation was performed by performing modal analysis of the calculated masses in FEM. The seismic analysis of the tanks was continued with geometric designs verified by modal analysis.



**Figure 3.** Representations dynamic behaviour of full tank

Results of the the API 650 formulation are shown below.

$$\begin{aligned} \text{The total volume of water} &= \pi R^2 h \\ &= \pi \times 7.54^2 \times 10 = 1780.4 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Mass Density of Water} &= 1000 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Thus, the total mass of water in the tank} \\ &= m_w = 1000 \times 1780.4 = 1780400 \text{ Kg} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Mass of impulsive equation } m_i &= m_w = \frac{\tanh\left(0.866 \frac{D}{H}\right)}{\left(0.866 \frac{D}{H}\right)} \\ m_i &= 1176875.813 \text{ Kg} \end{aligned}$$

Mass of convective equation

$$m_c = 0.455 * \pi * \rho l * R^3 * \tanh\left(1.84 \frac{H}{R}\right) \quad (3)$$

$m_c = 603291,22 \text{ Kg}$

The natural frequency of impulsive mass 3.26 Hz

Location of impulsive mass 3.75 m

Location of convective mass 7.60 m

The natural frequency of impulsive mass 3.26 Hz

The natural frequency of convective(sloshing) 0.246 Hz

The impulsive period  $T_i$  0.29 sec

The convective period  $T_c$  3.29 sec

Mass of Shell 5939.14 Kg

Weight of Fixed Roof 1146.58 Kg

Location of System hs 5.08 m

Sloshing height of Water d 0.96 m

Calculating the base shear  $V = 3613896.79 \text{ N}$

The Seismic Overturning Moment = 21875380.59 N

After the analytical calculation, modal analysis was performed with FEM. The results of the convective modal analysis performed using the FEM method in the ANSYS workbench software are shown in Figure 4. Both impulsive and convective frequency results are listed in Table 1 as comparison of API 650 and FEM [23].

The natural frequency results according to FEM modal analysis with API 650 analytical calculation are shown in Table 1.

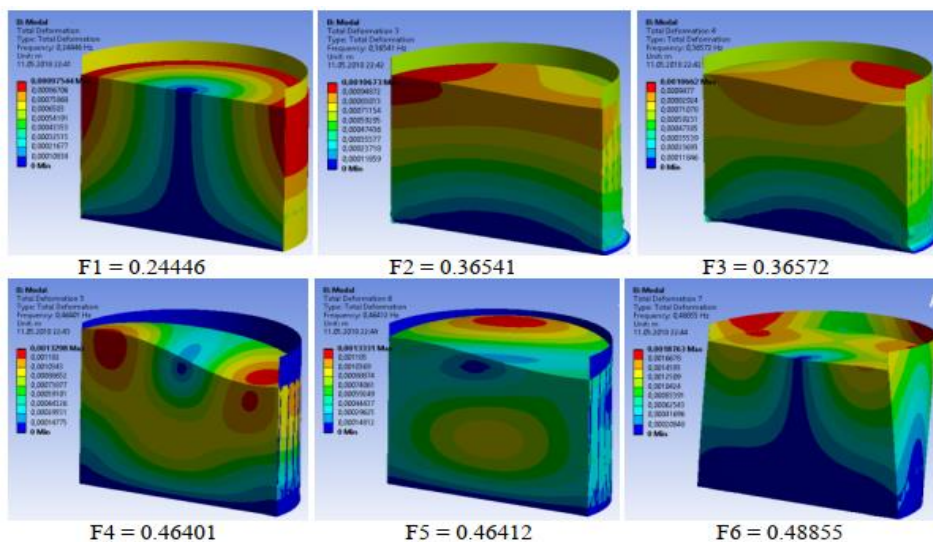


Figure 4. Modal analysis of convective mass

Table 1. The natural frequency results according to FEM modal analysis with API 650 analytical calculation

Mod. No	Impulsive Frequency (Hz)		Convective Frequency (Hz)	
	FEM Model	API650	FEM Model	API650
1	3.2319 Hz	3.26 Hz	0.24446 Hz	0.246 Hz
2	3.3836 Hz	NA	0.36541 Hz	NA
3	3.3858 Hz	NA	0.36572 Hz	NA
4	5.1838 Hz	NA	0.46401 Hz	NA
5	5.1852 Hz	NA	0.46412 Hz	NA
6	6.1697 Hz	NA	0.48855 Hz	NA

According to the model verified by analytical and modal analysis, four different tank models were designed for numerical simulation. The diameter of the tanks, shell thickness and the water levels they contain are the same. The most important feature that distinguishes Explicit Dynamics FEM analysis from other FEM techniques is the Lagrangian mesh structure for the steel body to use the Eulerian body mesh structure technique to model the water to provide interaction between the steel body and water.

The most important feature that distinguishes "Explicit Dynamics" finite element analysis from other finite element techniques is that it uses the Lagrangian network structure for the steel body to provide the interaction between the steel body and the water, and the Eulerian body network structure technique to model the water. In the model whose cross-section is seen in Figure 5, 24712 nodes and 22570 elements are used for a smooth network structure.

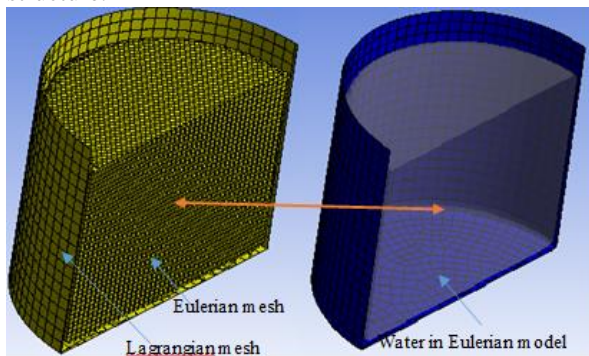


Figure 5. Shell and Water mesh model [16]

### 2.2. Theory of Dynamic Behaviour of Cylindrical Steel Tank

If there is no dynamic movement, the hydrostatic pressure acts on the cylindrical tank in the form of an increasing mass towards the bottom. However, when there is an earthquake that impulsive and convective dynamic water pressures occur as well as hydrostatic fluid pressure. When the tank moves, approximately one-third of the total liquid moves in the same direction with the tank, while the remaining water mass in the upper part shows the effect of convective sloshing in the opposite direction with the tank (Housner 1957) [24]. Since the hydrodynamic pressure moves in the same direction, it can cause damage to both the wall and the bottom of the tank. Liquid sloshing of upper side causes deformation in the upper areas of the tank. Static liquid pressure is effective only at the base (Figure 6 (a)), the effect on the walls is equal to both sides of the axis, so the value is zero. The hydrodynamic pressures originating from impulsive (rigid) and convective bodies, defined by Housner (1954) for the first time, are shown in Figure 6 (b) and (c) [22, 25].

With Explicit Dynamics analysis, events with a time scale of less than 1 second (usually 1 millisecond) can be simulated with geometric deformations such as hyperelastisite, plastic flows, faults and collapse [26]. Therefore, in order to observe plastic deformations caused by time-dependent short-term and rapidly changing loads in cylindrical steel tanks, Explicit Dynamics analysis was preferred.

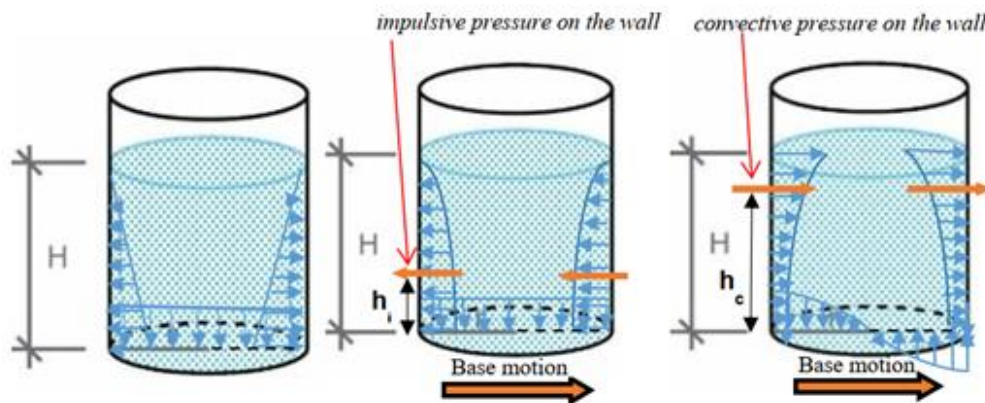


Figure 6. Theory of dynamics behaviour of cylindrical steel tank

### 2.3. Lagrangian and Eulerian References Frame

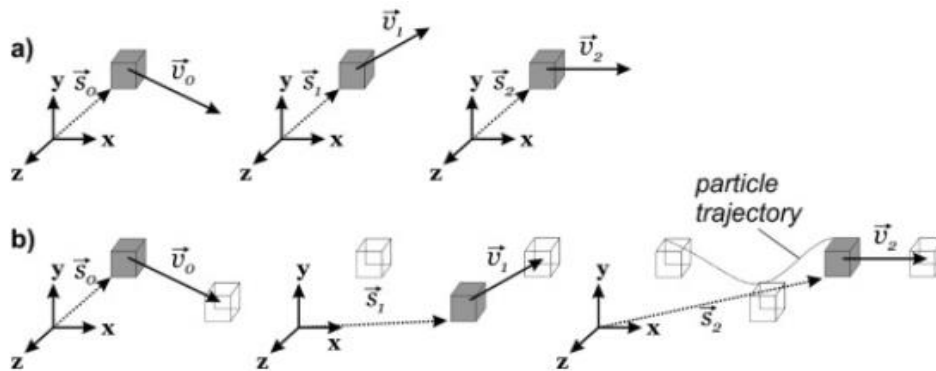
Lagrangian and Euler reference frames are utilized for modeling a unit operation. Euler Reference frames are preferred due to capability of more efficiently computational [26]. Control volumes fixed in space can be used by the Euler Reference frame. Mathematically, the derivation of the basic equations of fluid mechanics is carried out with a simple approach. It allows frequent changes of direction within the fluid control volume within the reference

frame [27]. Different eulerian references frame and lagrangian are shown in Figure 7a) The position vector in the Euler reference frame is not a function of time. Instead, the position vector  $s_1$  is identically located in  $s_0$ . The grid divided into cells in the Eulerian reference frame remains constant until the simulation ends. Thanks to this feature, large deformation problems can be simulated. The Lagrange reference frame, whose details are shown in Figure 7b), moves with the flow field. Initially, the control

volume of T0 has the velocity of the flow field  $v_0$  at position  $s_0$ . At T1, the control volume will have gone to  $s_1$  when it has the velocity of the flow field  $v_1$ . In the Lagrangian reference frame, the position vector is a function of time in contrast to the Eulerian reference frame. Connecting each position vector over time allows the particle trajectory to be reconstructed [26].

seeding small particles towards the flow field at their initial positions. The stream area is then recorded with a camera with very long exposure settings. The recorded image will highlight the movement of the particles in the form of trajectory lines as the particles move across the flow field. Naturally, the same is true for control volumes moved in the flow field.

Particle trajectories are used to visualize the flow field. Different  $s_A, 0, s_B, 0, s_C, 0$ , etc. indicated by



**Figure 7.** a) Eulerian frame of reference: fixed in space b) Lagrangian frames of reference: moving in space [27].

Lagrange and Eulerian reference frames can be converted to each other. The position of  $s_1$  in the Lagrangian reference frame depends on  $s_0$ . That is, the position vector appears as a function of the previous position. In the Eulerian frame of reference, the velocity and acceleration do not change, so the position vector appears only as a function of time.

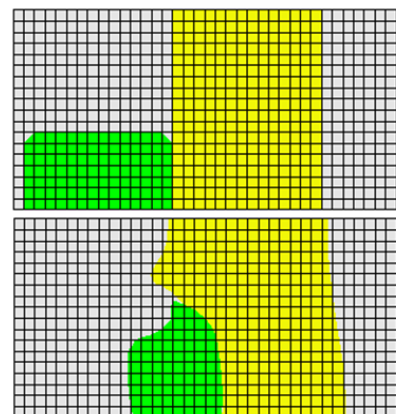
tanks, considering the calculation cost and material interface approach. During the simulation, the material flows from one cell to another. In some stages of the calculation, it is possible that a particular cell contains more than one material. Space is also considered a material in this sense; Figure 8 shows the flow of a material onto another material.

$$\text{Position} = s(t) \tag{4}$$

$$\text{Velocity} = \vartheta(t) = \frac{ds(t)}{dt} \tag{5}$$

$$\text{Acceleration} = a(t) = \frac{d\vartheta(t)}{dt} = \frac{d^2s(t)}{dt^2} \tag{6}$$

Velocity and velocity-dependent lagrange terms appear as derivatives of time in the eulerian frame of reference. The convective contribution of the moving fluid field can be expressed in these terms. In other words, when the fluid velocity is low, the importance of terms related to particle motion increases, while as the fluid velocity increases, the importance of terms related to particle motion decreases. This situation can be explained in the following way, the speed of the boat moving in the river depends firstly on the movement from the boat engine, secondly on the movement of the water in the river. If the engine of the boat is stopped, the motion will proceed only at the speed of movement of the water[27].



**Figure 8.** Flow of material in Eulerian references frame [28].

The liquid volume method is used to represent the material flow in each cell modeled in the eulerian reference frame. The sum of the volume of material flow occurring in a cell and the volume of the idle part is equal to 1. The calculation of this is shown in the formula below.

Analysis of liquid substances is used in Explicit Dynamics with the Euler frame of reference. Euler references framework can be used to observe large defects that may occur in structures such as water

$$\sum_{i=1}^{i=nm} F_i + F_{void} = 1 \tag{7}$$

Thanks to the eulerian reference frame, the stress, pressure and ratios of the material in a cell can be calculated, and a special process is used to calculate the resulting tensile tensor for the mass transfer and momentum transfer calculations of the cell surfaces [26].

#### 2.4. Explicit Liquid-Structure Interaction

Reference frames in the Explicit Dynamics system can act together simultaneously to combine each material in the analysis result. The organs in two different reference frames act as a whole by interacting with each other during the simulation. For example, when modeling water tanks containing liquid, the steel body can be modeled as a lagrangian body and the water inside as an eulerian body. The two of them use different meshing techniques, but the frames of reference allow them to interact and move together as a result of the analysis. Thanks to the interaction between eulerian and lagrangian bodies, high performance can be obtained, especially in bi-directional fluid structure[20].

When there is intersection between two bodies, the updated control volume emerges by solving the equations of the law of conservation of energy and the momentum of mass. The two-way fluid interaction occurs here depending on each other. The lagrangian body can be deformed by changing shape during simulation. Visible large deformations occur by causing wear on lagrangian body elements. As a result of these deformations, there is an update in the fasteners. During analysis the dominant eulerian cell size must remain at a minimum distance across the thickness of lagrangian objects. Otherwise, material leakage, ie irregular material flows, can be seen in the lagrange structure and eulerian region [20].

The Explicit Dynamics setup process consists of three consecutive steps, called preliminary, execution, and results. In the first step, the geometry is created using the Explicit Dynamics tool. Then characteristics of the water such as density and isotropic physical properties are defined via engineering data. The Poisson ratio value must have written as 0.49999999 because the water is not compressed.

### III. RESULTS AND DISCUSSIONS

#### 3.1. Observation of Axial Displacement

Axial displacement results are shown in Figures 9, 10, 11 and 12. As a result of the analysis, the simultaneous movement of the tank body, which is defined as the lagrangian body and the water body, which is defined as the eulerian body, shows that the Explicit Dynamics analysis results in success. Analysis results are observed on tank body, both full and half-sectioned. The churning due to the convective dynamic mass occurring in the upper part of the tanks is clearly visible. This situation can be explained with an example: If a bucket filled with

water is dropped hard on the ground, the bucket oscillates a few times and stops, but with the dynamic mass effect that occurs, the convective sloshing at the top side continues for a while. The situation of tanks damaged in the earthquake is somewhat similar to this example. Even if the tank oscillation due to ground shock stops, the water agitation due to the convective mass at the top continues for a while. In the open-roofed tank model shown in Figure 9, the maximum axial displacement was 1.19 m. Sivy and Musil,2017 obtained a convective sloshing height of 0.75 m in their analysis with an open-roofed tank [29]. The deformation convective that occurs towards the upper edges of the tank clearly shows the shaking effect.

Figure 10. shows axial displacement of flat-roofed. Compared to the flat-roofed tank model with the open-top, there doesn't seem to be much difference in terms of displacement. Thus, it can be concluded that roofing a cylindrical tank flat will not provide much benefit in terms of deformations that may occur. The biggest reason for this may be the changing pressure center due to the flatness on the tank. In Figure 10 maximum displacement occurred as 1.08 m. Flat roof tanks have been manufactured extensively in the past, Bayraktar et al, (2010). achieved a displacement of around 0.8 m in the 8 m height flat-roof tank, which their results were very close to each other. Modeling the water in the 11.31 m flat-roofed tank with the eulerian mesh also makes the numerical modeling of the tank special [8]. This causes them to take more damage. In other words, while the flat cover protects the water body from the open atmosphere pressure, it becomes the pressure center itself. In general, it is seen that convective sloshing is low and buckling occurs in the middle parts of the tank shell.

Figure 11. shows the conical-roofed tank model. With an axial displacement of 0.711 m, the conical-roofed tank may have better seismic performance than the open-roofed and flat-roofed models. Djermane et al., (1014) achieved a displacement of around 0.90 m in a conical-roof tank with similar characteristics [19]. The result obtained thanks to the Eulerian mesh technique can guide designers with more specific visuals effects. Hence, it was seen that the stresses were spread on the roof thanks to the conical roof geometry. This protects the tank body against deformations.

Finally, the torispherical-roofed tank is shown in Figure 12. The fact that the roof is torispherical, the stresses reduce. With a maximum displacement of 0.94 m, it contains less deformation than open and flat-roofed tanks. Nicolici and Bilegan. Nicolici and Bilegan, (2013) achieved 0.25 m of liquid sloshing with a smaller torispherical-roofed tank with an internal diameter of 3200 mm, a height of 3294 mm and a shell thickness of 10 mm [15]. Considering the tank size, the wave height in the water shows similarities. In addition, the visual result obtained in the Figure 12. is more realistic.





Nonlinear axial displacement started around 0.012 seconds in all tanks. The axial-displacement reached 1.233 m in 0.12 seconds while it was 1.19 m in the open-roofed tank model, and 1.15 m in the torispherical-roofed model. The convective sloshing effect is more pronounced on the upper side of the models with open-roof and flat-roofed.

**3.2. Observation of Buckling**

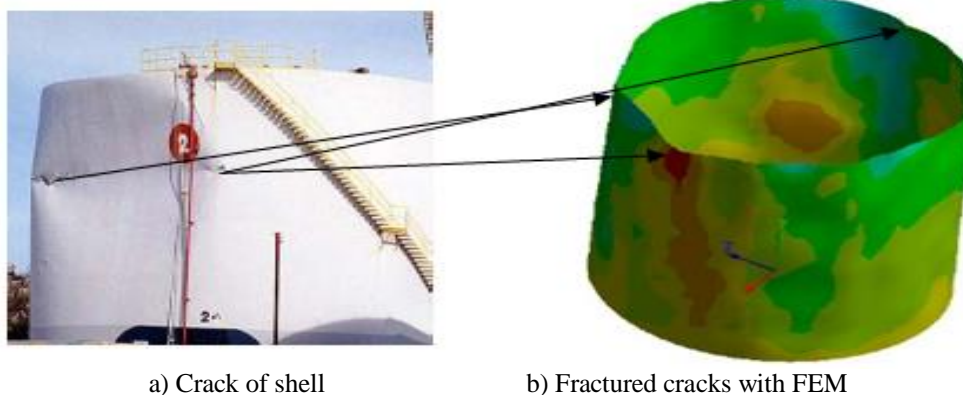
In steel liquid tanks, the convective sloshing effect due to seismic ground motion causes buckling, especially in the upper sides. One of the collapsed situations caused by convective sloshing is shown in Figure 13. Thanks to the Explicit Dynamics analysis, diamond-shaped buckling conditions were obtained.

As the earthquake duration increases, sprains may increase even more. But with the greatest acceleration in the first seconds, tanks can take great damage. These damage situations can be easily determined by the Explicit Dynamics analysis method and preventive measures can be taken. In a previous study, a protective system like seismic isolation in reinforced concrete structures was developed. [25]. Seismic isolation is placed under the bottom of the tank and damages that may occur during an earthquake are prevented by reducing the moment effect. The Explicit Dynamics analysis can serve for a guide before preventive measures are taken.

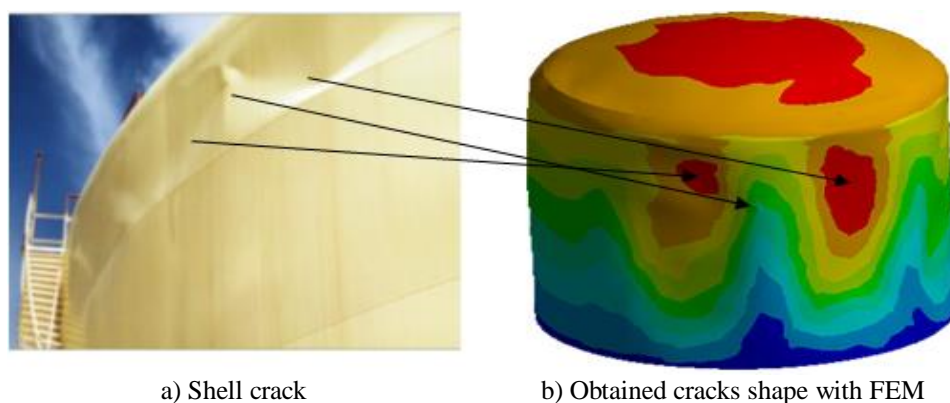
In Figure 14, images of a tank with a buckling shell and buckling obtained by Explicit Dynamics analysis are given. As can be seen in the figure, the effects of agitation on the upper parts of the shell are evident. The Explicit Dynamics FEM model is adept at capturing significant nonlinear changes. In terms of the accuracy of the analysis, it will be an important reference to obtain real and occurring buckling shapes with the Explicit Dynamics analysis.

In fact, a good roof design protects the tank body from damage. Considering the buckling conditions in Figure 15, some stress and buckling occurred in the conical and torispherical roofs, but there was not much damage to the tank body. The tank body is only slightly damaged from one side. This situation can be explained as follows, especially the conical and torispherical roof shape distributes the stresses properly and reduces the agitation effect of the liquid in the tank. This results in less buckling of the shell.

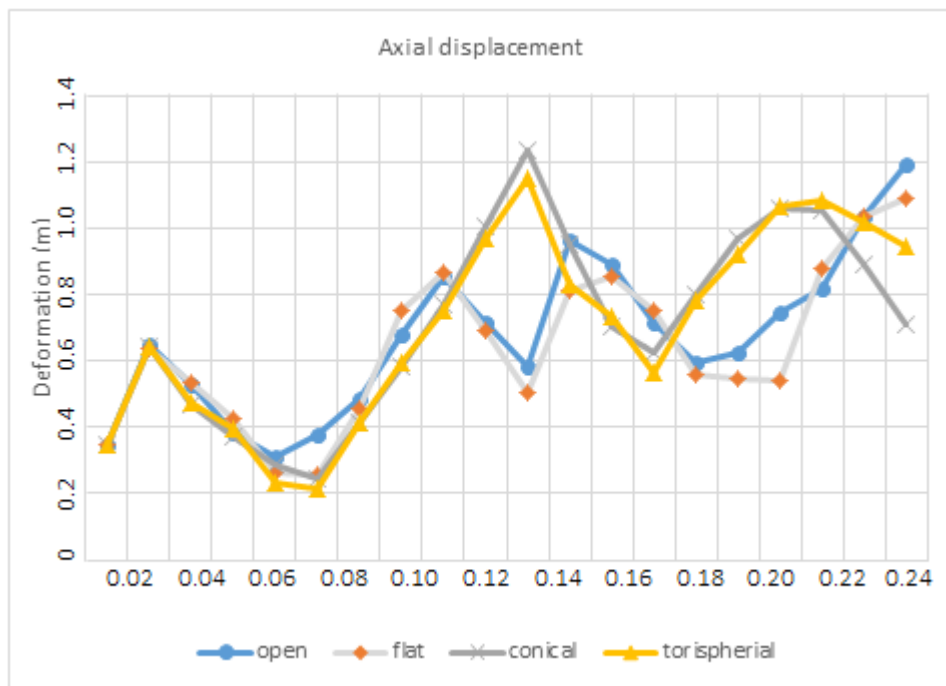
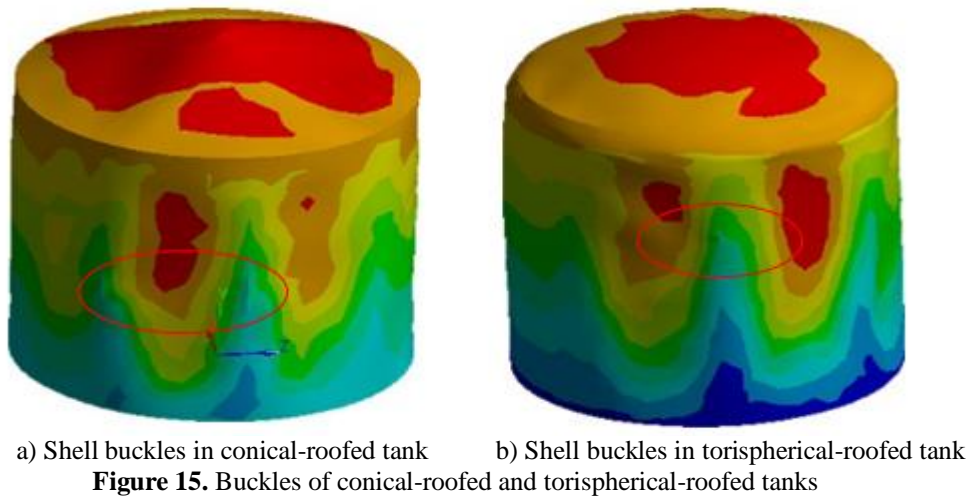
The axial displacement graph of all tanks is shown in Figure 16. The nonlinear deformation started after 0.02 seconds. Maximum displacement is 1.23 m in the conical-roofed version and 1.15 m in the torispherical-roofed version. With the convective sloshing effect, it showed itself with buckling in the shell in open and flat roofed models. Conical and torispherical roof models also contain less buckling of the tank body.



**Figure 13.** Shell buckling



**Figure 14.** Cracks of shell



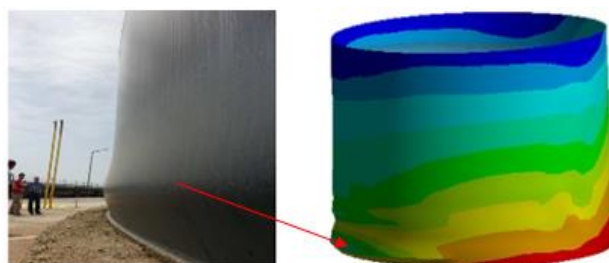
### 3.2.1. Evaluation of buckling for different thicknesses

The above analysis results were performed according to API 650 tank design code for tanks with 6 mm thickness. Analyses for tanks of 4 and 8 m thickness with the same specifications were mixed. The aim is here to measure the response of the roof type to nonlinear shape changes when the shell thickness decreases and loads. Firstly, the results obtained at 4 mm thickness were evaluated. The maximum displacement is 1.06 m in the open-roof model and 1.22 m in the flat-roof model. 1.05 m in conical-roof model, 0.98 m in torispherical-roofed model. axial displacement has occurred. Interestingly, the highest axial displacement occurred in the flat-roofed model. This result is that closing a cylindrical tank as flat does not cause any benefit in terms of damage that may occur. The biggest reason for this is that the flat roof becomes a pressure center and causes more

damage. The best results were obtained from the torispherical model. This means that even if the thickness decreases, the shape of the roof is torispherical-shaped, which means that it can distribute the stresses and prevent possible damages.

Elephant foot buckling is the most common type of damage to cylindrical steel liquid tanks. Thanks to this analysis the elephant foot buckling that seen in Figure 17 for the 4 mm thick tank was also obtained in the FEM model. The buckling obtained in the FEM model (Figure 17b) is very similar to the elephant foot buckling (Figure 17a) that occurred during the 1999 TÜPRAŞ refinery's earthquake. In fact, the occurrence of elephant foot buckling in tanks means that the structure is damaged and not collapsed. This is a desirable situation in structures that are not very rigid. That is the structure will take some damage, but not be

destroyed. However, thin-walled tanks that contain such dangerous liquids and hazardous substances must be rigidly designed. For a thin-walled steel structure, this does not cost much, and additional damages that fire and explosion are prevented. In summary, this buckling occurs when the crustal thickness decreases. Therefore, such damage can be prevented by preliminary studies.



a) Marmara earthquake (TÜPRAŞ 999)      b) FEM model result  
**Figure 17.** Elephant foot buckles of earthquake and FEM

#### IV. CONCLUSION

Seismic analysis of commonly used cylindrical liquid storage tanks and their protection against seismic effects are of direct interest to the field of civil engineering. It will be a good guide in terms of detecting the damages that may occur in these tanks in advance and taking measures against possible seismic effects. Many FEM analyzes have been made so far for cylindrical steel liquid tanks. Most of these analyzes have been carried out as static structures. In this study, the Explicit Dynamics analysis method, which is used in experiments such as sudden loading, explosion, slip and collision, is used in ANSYS Workbench. As a result of the analyzes obtained by the Explicit Dynamics tool, damage and buckling patterns of open-roof, flat-roofed, conical-roofed and torispherical-roofed tanks were obtained. These results give important clues about the damages that may occur during a possible earthquake. For the analysis, acceleration values of 0.22 seconds from the north-south composition of the el-Centro earthquake were used. In an earthquake, there can be many accelerated movements in a time period of 1 second. In addition, lagrangian and eulerian references were used together. The tank body modeled as lagrangian and the water body modeled as eulerian were allowed to move together in interaction during the analysis. In this way, the convective sloshing effect and buckling shapes formed by the water mass on the tank wall were obtained.

Tanks with 4 different roof types were analyzed first with 6 mm thickness and then with 4- and 8-mm shell thicknesses. In all analyses, axial displacement started to be evident after 0.02 seconds.

The results of the analysis existed, that is, it resulted in obtaining the buckling patterns of the tanks damaged in the earthquakes.

Depending on the earthquake ground motion, the liquid mass inside the tank gains dynamic motion along with the tank. This dynamic movement is defined as a convective liquid mass at the top of the tank. This mass continues the shaking effect even if the shaking stops. With this effect, it is more common especially in open-roof and flat-roofed models. In other words, sprains occur in the regions close to the upper edge with the effect of shaking.

Elephant foot and diamond-shaped buckling are common in cylindrical tanks containing liquids during earthquakes. Diamond shaped buckles were observed in the 6 mm thick tanks in the analysis made with Explicit Dynamics analysis. Elephant foot buckling was seen in 4 mm thickness. It is normal for elephant foot buckling to occur at low thickness, but diamond-shaped buckles at 6 mm thickness are not.

After this study, Explicit Dynamics analyzes can be made that simulates the discharge of water out of tanks containing liquid due to damage.



#### REFERENCES

- [1] Inc PDaD. Impact and Collision Analysis. (2020). <http://www.productdesign-development.com/pages/impact-analysis>.
- [2] ANSYS. (2021). Why use Explicit Dynamics?, [ansys-explicit-dynamics-brochure-140.pdf](https://www.ansys.com/ansys-explicit-dynamics-brochure-140.pdf)
- [3] Veletsos AS, Tang Y, Tang H., (1992), Dynamic response of flexibly supported liquid-storage tanks. *Journal of Structural Engineering*, 118:264-83.
- [4] Tang, Y. (1993). Dynamic response of tank containing two liquids. *Journal of engineering mechanics*. 119:531-48.
- [5] Hunt, B., Priestley, N., (1978). Seismic water waves in a storage tank. *Bulletin of the Seismological Society of Americ.*, 68:487-99.
- [6] Haroun, M., Housner, G., (1981). Earthquake response of deformable liquid storage tanks.
- [7] Hamdan, F. (2000). Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks. *Journal of Constructional steel research*, 53:307-33.
- [8] Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, AC., Türker, T. (2010) Effect of the model updating on the earthquake behavior of steel storage tanks. *Journal of Constructional Steel Research*, 66:462-9.
- [9] Veletsos, AS. V. (1977). Earthquake Response of Liquid-Storage Tanks.
- [10] Liang, B., Tang, J-x., (1994). Vibration studies of base-isolated liquid storage tanks. *Computers & structures*, 52:1051-9.
- [11] Chalhoub, M.S., Kelly, J.M. (1990). Shake table test of cylindrical water tanks in base-isolated structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 116:1451-72.
- [12] Virella, J.C., Godoy. L.A., Suárez, L.E. (2006). Fundamental modes of tank-liquid systems under

- horizontal motions. *Engineering Structures*, 28:1450-61.
- [13] Maekawa, A., Fujita, K. (2008). Explicit nonlinear dynamic analysis of cylindrical water storage tanks concerning coupled vibration between fluid and structure. *ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.*, 105-13.
- [14] Mittal, V., Chakraborty, T. Matsagar, V., (2014). Dynamic analysis of liquid storage tank under blast using coupled Euler–Lagrange formulation. *Thin-Walled Structures.*, 84:91-111.
- [15] Nicolici, S., Bilegan, R. (2013). Fluid structure interaction modeling of liquid sloshing phenomena in flexible tanks. *Nuclear Engineering and design*, 258:51-6.
- [16] Çelik, A. İ., Köse, M. M. , Akgül, T. & Apay, A. C. (2020). Yıkıcı Sismik Yükler Altında Silindirik Çelik Su Tanklarının Doğrusal Olmayan Analizi . *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B - Teorik Bilimler*, 8 (2) , 154-170 . DOI: 10.20290/estubtdb.50117
- [17] Kildashti, K., Mirzadeh, N., Samali, B. (2018). Seismic vulnerability assessment of a case study anchored liquid storage tank by considering fixed and flexible base restraints. *Thin-Walled Structures.*, 23:382-94.
- [18] Buratti, N., Tavano, M. (2014). Dynamic buckling and seismic fragility of anchored steel tanks by the added mass method. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43:1-21.
- [19] Djermame, M., Zaoui, D., Labbaci, B., Hammadi F. (2014). Dynamic buckling of steel tanks under seismic excitation: *Numerical evaluation of code provisions. Engineering Structures*, 70:181-96.
- [20] LeBoeuf, C. (2020). ANSYS explicit dynamics takes over when implicit isn't enough.
- [21] Çapar, Y. (2021). Sonlu Elemanlar Yönteminde İmplicit ve Explicit Yaklaşımı., <https://yasincapar.com/tr/sonlu-elemanlar-yontemde-implicit-vs-explicit-yaklasimi/>
- [22] Standard of API 650. (2001). Welded steel tanks for oil storage. *American Petroleum Institute.*
- [23] Çelik, A. İ., & Köse, M. M. (2020). Dynamic buckling analysis of cylindrical steel water storage tanks subjected to Kobe earthquake loading. *Steel Construction*, 13(2), 128-138.
- [24] Housner, G.W. (1957). Dynamic pressures on accelerated fluid containers. *Bulletin of the seismological society of America.*, 47:15-35.
- [25] Housner, G.W. (1954). Earthquake pressures on fluid containers.
- [26] Help of ANSYS software. (2021). Explicit Dynamic Analysis.
- [27] Carranza-Abaid, A., Jakobsen, J.P. A. (2020). Non-Autonomous Relativistic Frame of Reference for Unit Operation Design. *Computer Aided Chemical Engineering: Elsevier*, 151-6.
- [28] Rapp, B.E. (2016). Microfluidics: modeling, mechanics and mathematics: *William Andrew.*
- [29] Sivy, M., Musil, M. (2017). Seismic Design of Aboveground Storage Tanks Containing Liquid. *Compdyn.*

# İnşaat Sektöründeki Ergonomik Risklerin Değerlendirilmesi ve Bir Uygulama

## *Evaluation of Ergonomic Risks in the Construction Sector and an Application*

Alp ZORLUTUNA<sup>1</sup> , Hüseyin Selçuk KILIÇ<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Marmara Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, 34722, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Marmara Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 34840, İstanbul, Türkiye

### Öz

İnsanın etkileşimde bulunduğu bütün unsurları insanın özelliklerine uygun olacak şekilde tasarlamayı amaç edinen ergonomideki önemli konulardan bir tanesi de risk değerlendirmedir. Başta boyun, sırt, bilek, kol, omuz ve bacaklar olmak üzere çeşitli vücut bölgelerinin riske maruz kalma düzeyinin belirlendiği risk değerlendirmesinde Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi (REBA), Hızlı Üst Ekstremité Değerlendirmesi (RULA) ve Hızlı Maruziyet Değerlendirme (HMD) gibi çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Ancak risk seviyesi sektörlere göre değişmektedir. İnşaat sektörü en riskli sektörlerden biridir ve önemine binaen bu çalışmada ele alınmıştır. Bu çalışmanın amacı, en tehlikeli sektörlerden biri olan inşaat sektöründe ergonomik risk değerlendirme tekniklerini uygulayarak risk düzeylerini ortaya koymaktır. Ayrıca, diğer bir amaç da, ülkemizde, inşaat sektöründe, işverenler arasında Kas İskelet Hastalıklarının (KİH) önlenmesi veya ortaya çıkmasının azaltılması için erken aşamada proaktif risk değerlendirmesine sahip olmanın önemi konusunda bilgi ve farkındalık yaratmaktır. Çalışmada kullanılan metodoloji temel olarak beş adımdan oluşmaktadır. İnşaat sektörüne uygun Ergonomik Risk Değerlendirme (ERD) tekniklerinin belirlenmesi ile başlayan süreç, inşa sürecindeki sık tekrarlanan faaliyetlerin belirlenmesi, ERD tekniklerinin ilgili faaliyetler için uygulanması, karşılaştırılmalı analizlerin yapılması ve yorumlanması ile devam ederek, iyileştirme önerilerinin yapılması ile bitmektedir. Bir Türk inşaat firmasındaki riskleri ortaya çıkarmak için REBA, RULA ve HMD uygulanmıştır. İki farklı site inşaatının farklı kısımlarında yapılan incelemelerde; REBA metodu uygulandığında 7 duruşta yüksek risk, 5 duruşta orta risk; RULA metodu uygulandığında 8 duruşta çok yüksek risk, 4 duruşta orta risk; HMD metodu uygulandığında ise 2 duruşta çok yüksek risk, 7 duruşta yüksek risk, 3 duruşta ise düşük risk olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak elde edilen veriler göstermektedir ki; her ne kadar usta olarak adlandırılırsalar da, çalışanlar sağlıklı ve güvenli çalışmayı bilmemektedirler.

**Anahtar Kelimeler:** Ergonomi, Risk değerlendirme, İnşaat sektörü, REBA, RULA, HMD

### Abstract

Risk assessment is one of the important topics of ergonomics, which aims to design all the elements interacting with the human being by considering the properties of human beings. There are various methods, including Rapid Entire Body Assessment (REBA), Rapid Upper Limb Assessment (RULA) and Quick Exposure Check (QEC), which are used to determine the risk levels by considering mainly the body parts such as the neck, back, wrist, arms, shoulders and legs. However, the level of risk varies according to the sectors. The construction sector is one of the riskiest sectors and is discussed in this study due to its importance. The aim of this study is to reveal the risk levels by applying ergonomic risk assessment techniques in the construction sector, which is one of the most dangerous sectors. Besides, another aim is to raise knowledge and awareness about the importance of having proactive risk assessment at an early stage to prevent or reduce the occurrence of Musculoskeletal Diseases (MSD) among employers in the construction industry in our country. The methodology used in the study basically consists of five steps. The process, which starts with the determination of Ergonomic Risk Assessment (ERA) techniques suitable for the construction industry, goes on with the determination of frequently repeated activities in the construction process, the application of ERA techniques for the relevant activities, performing and interpretation of comparative analyses and finally ends with the improvement suggestions. REBA, RULA, and QEC were applied to reveal the risks in a Turkish construction company. In the examinations made in different parts of the construction of two different sites; When the REBA method is applied, 7 tasks indicate high risk, 5 tasks are at medium risk; When the RULA method is applied, very high risk is observed in 8 tasks, medium risk is observed in 4 tasks; When the QEC method is applied, it has been determined that it creates a very high risk in 2 tasks, high risk in 7 tasks, and low risk in 3 tasks. The resulting data show that; Although they are called masters, employees do not know how to work healthily and safely.

**Keywords:** Ergonomics, Risk assessment, Construction sector, REBA, RULA, QEC

## I. GİRİŞ

Ergonomi, insanlar ile makineler arasındaki etkileşimi ve etkileşimi etkileyen faktörleri ele alan (Erkan, 1997) ve iyileştirmeye çalışan bir yaklaşımdır. Bridger (2008)'ün de belirttiği gibi işçi ve iş koşulları arasında en uygun olanı tespit edip, çalışanlarının verimliliğini ve kalitesini en üst düzeye çıkarmayı amaçlar. Ergonomi ile varılmak istenen sonuç, sistemi kullanıcı özellikleriyle daha uyumlu hale getirmek için değiştirerek, çalışma

ortamının iş için daha güvenli ve daha uygun hale getirilmesidir. Ergonomi; insan ve çevre çalışmalarında antropometri, biyomekanik, genel mühendislik, fizyoloji, psikoloji ve fizik gibi birçok disiplini temel almaktadır (Laurig ve Vedder, 1998).

Ergonomi kapsamında ele alınan önemli konulardan bir tanesi de ergonomik risk değerlendirmedir. Ergonomik risk değerlendirme, bir bireyin iş istasyonunun ergonomisi ile ilişkili tehlikeleri ve riskleri değerlendirmeyi, tanımlamayı ve ortadan kaldırmayı amaç edinir. Bir ofis çalışanı için bir masa istasyonuna örnek olarak gösterilebilir (URL-1). Ergonomik risk değerlendirmeleri, çalışanların sağlık ve güvenliğini sağlamanın, verimliliklerini ve üretkenliklerini artırmanın bir parçasıdır. İş sağlığı ve güvenliği yönetim planının ayrılmaz bir parçasını oluşturdukları için risk değerlendirmeleri çok önemlidir. Tehlikeler ve riskler konusunda farkındalık yaratır. Kimlerin risk altında olabileceğinin belirlenmesi konusunda yardımcı olur. Ergonomik risk değerlendirmeleri özellikle tasarım veya planlama aşamasında yapıldığında yaralanmaları veya hastalıkları önleyebilir (URL-2).

Dünyaya paralel olarak Türkiye'de de iş kazalarına en çok rastlanıldığı sektörlerin başında inşaat sektörü gelir. İnşaat sektörü en riskli işkolları arasındadır. Bu sektörde çalışan işçiler, diğer sektörlerde çalışan işçilere göre 3-6 kat daha fazla kazaya uğrama tehlikesine sahip olduğu Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) verilerince kanıtlanmıştır. Türkiye'de inşaat sektörü; hem ölümlü, hem de sürekli iş göremezlik kaza sıklığının en çok yaşandığı sektördür. SGK verilerine göre, ülkemizde gerçekleşen tüm iş kazalarının % 9'u, ölümlü iş kazalarının % 28'i ve sürekli iş göremezliklerin % 18'nin inşaat sektöründe meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı tarafından hazırlanan Tehlike Sınıfları Yönetmeliğinde inşaat sektörü "*Çok Tehlikeli İşler*" sınıfında bulunmaktadır (Ceylan, 2014). Ülkemizde inşaat sektörü son on yıldır hızla büyümektedir. Buna rağmen inşaat sektörü, tüm sektörler arasında en düşük verimlilik oranlarından birine sahiptir. Bu sorunu çözmek için proje yöneticileri, personelin iş yükünü artırma (artan çıktı) veya belirli görevlere daha fazla (genellikle yetersiz eğitilmiş) işçi atama (zamanı azaltma) eğilimindedir. Ancak bu, personelin işle ilgili kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına maruz kalmasına neden olabilir ve bu durum zamanla devam ederse sağlık sorunlarına ve mali kayıplara yol açabilir.

Bu çalışmanın amacı, en tehlikeli sektörlerden biri olan inşaat sektöründe ergonomik risk değerlendirme tekniklerini uygulayarak risk düzeylerini ortaya koymaktır. Ayrıca, diğer bir amaç da, ülkemizde, inşaat sektöründe, işverenler arasında Kas İskelet Hastalıklarının (KİH) önlenmesi veya ortaya çıkmasının azaltılması için erken aşamada proaktif

risk değerlendirmesine sahip olmanın önemi konusunda bilgi ve farkındalık yaratmaktır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak öncelikle inşaat sürecindeki sık tekrar eden aktiviteler belirlenmiş ve onlara odaklanılmıştır. Ayrıca, REBA, RULA ve HMD tekniklerinin üçü de uygulanmış ve karşılaştırmalı olarak sonuçlar analiz edilmiştir. Son olarak, çalışmanın Türkiye'de yapılmış olması da uygulama yeri açısından farklılık göstermektedir.

Çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde yapılandırılmıştır. İkinci bölümde literatür taraması verilmiştir. Üçüncü bölüm uygulanan metodoloji kapsamındaki risk değerlendirme teknikleri hakkında bilgi vermektedir. İnşaat sektöründeki uygulama dördüncü bölümde verilmiştir. Nihai olarak da, beşinci bölümde sonuçlar sunulmuştur.

## II. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde, ergonomik risk değerlendirmeyi içeren çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında 1996'dan sonra yayınlanan makaleler değerlendirmeye alınmıştır. Toplam olarak 72 makale çözüm yöntemleri ve sektörleri açısından irdelenmiş ve Eklerde Tablo 2'de sunulmuştur. Ayrıca, çalışmalardan bazıları sektörlere göre aşağıda kısaca açıklanmıştır.

İnşaat sektöründe, Yubaidi (2015) duvar örme işi yapan 120 işçiye "*REBA*" metodu uygulamıştır. Benzer şekilde, Purnomo ve Apsari (2016) de çalışmalarında Endonezya'daki inşaat işçilerinin uygunsuz koşullar ve yüksek risk altında çalıştığını "*REBA*" metodu uygulayarak göstermişlerdir. Anwar vd. (2015) çalışmalarında duruş risk seviyesi ile işle ilgili kas-iskelet sistemi bozukluğu prevalansı arasındaki anlamlı ilişkiyi belirlemek için "*RULA*" ve "*Nordic Kas-İskelet Sistemi Anketi*" metodlarını kullanmışlardır. Seo (2016) çalışmasında aşırı fiziksel taleplerin inşaat operasyonları üzerindeki etkisine dair anlayışı geliştirmek için işçilere "*REBA*", "*RULA*", "*OWAS*" ve "*PATH*" metodlarını uygulamıştır. Vachhani vd. (2016) çalışmalarında konut şantiyesinde farklı faaliyetler için ergonomik risk faktörlerini belirlemek üzere işçilere "*REBA*" ve "*Hızlı Maruziyet Değerlendirme*" metodlarını uygulamışlardır. Kathiravan ve Gunarani (2018) çalışmalarında elle malzeme taşıma, duvarcılık ve sıva işleri gibi birincil konut işlerini analiz etmek için 40 işçide REBA ve RULA metodlarının uygulamasını yapmışlardır.

Giyim sektöründe, Polat ve Kalaycı (2016) çalışmalarında Türkiye'deki hazır giyim sektöründeki işçilerin risk değerlendirmesini yapmak için giyim fabrikası çalışanlarına REBA metodunu uygulamışlardır. Zahid vd. (2016) ise çalışmalarında bir giysi imalat sanayinde çalışan işçilerin ergonomik risk seviyesini belirlemek üzere *REBA* ve "*RULA*" metodlarını kullanmışlardır.

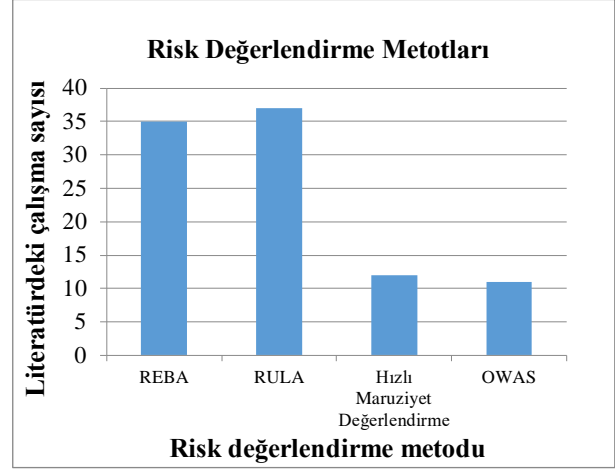
Tarım ve orman sektöründe, Manz ve Silver (2013) domates işçilerinin ergonomik stres seviyelerini anlamak için Amerika'daki tarım (domates) işçilerine “REBA” metodunu uygulamışlardır. Cremasco vd. (2019) çalışmalarında bir ağaç yonga makinesinin elle beslenmesi sırasında operatör ve biyomekanik postural aşırı yüklenme riskinin değerlendirilmesinde daha etkili ve uygun yöntemi belirlemek amacıyla RULA ve REBA'yı karşılaştırmışlardır.

Konfeksiyon/dikiş sektöründe, Najarkola ve Mirzaei (2012) çalışmalarında bir tekstil fabrikasında çeşitli işler yapan işçilerdeki üst ekstremitte kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının risk faktörlerini değerlendirmek için RULA ve “Nordic Kas-İskelet Sistemi Anketi” uygulamışlardır. Shah ve Vyas (2015) çalışmalarında kas-iskelet sistemi bozukluğu riskini bulmak ve el sanatlarında risk alanlarını sınıflandırmak için 70 işçiye “REBA” metodunu uygulamışlardır.

İmalat sektöründe, Ansari ve Sheikh (2014) çalışmalarında imalat ünitesindeki işçilerin yüksek risk altında çalıştığını göstermek için küçük ölçekli özel imalat atölyesi işçilerine “REBA” ve “RULA” metodlarını uygulamışlardır. Ayub ve Shah (2018) çalışmalarında işe bağlı kas-iskelet sistemi hastalıklarının tekrarlanma sıklığını belirlemek için imalat atölyesi çalışanlarına “RULA”, “Hızlı Maruziyet Değerlendirme” ve “ANOVA” metodlarını uygulamışlardır. Öngel vd. (2017) çalışmalarında kalıp fabrikası çalışanlarına dinamik, statik duruşlar ve gerekli düzenlemeler konusunda önerilerde bulunmak için kalıp fabrikası çalışanlarında “REBA” ve

“RULA” metodlarının uygulamasını gerçekleştirmişlerdir.

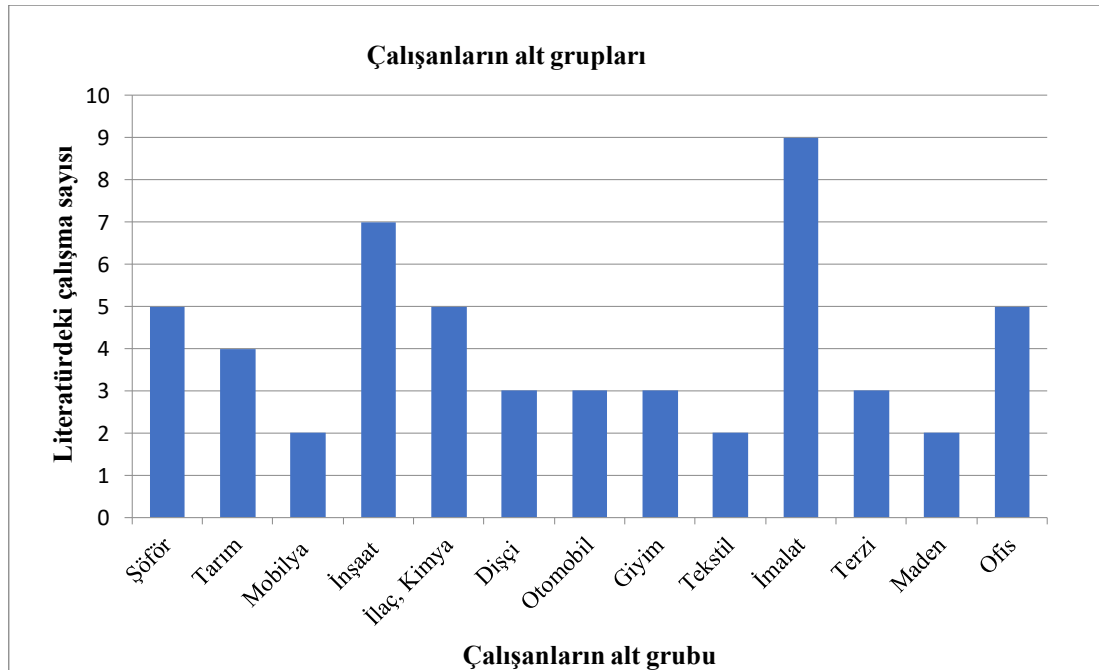
İncelenen çalışmalarda RULA ve REBA tekniklerinin sık olarak kullanıldığı gözlenmiştir. Diğer tekniklere ilişkin frekanslar da Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Risk Değerlendirme Metodları

Yine, incelenen çalışmalarda İmalat ve İnşaat sektörlerinde en fazla uygulama olduğu görülmektedir. Diğer sektörlerle ilişkin frekanslar da Şekil 2’de sunulmuştur.

İncelenen literatür araştırması sonucunda görülmektedir ki REBA, RULA ve HMD teknikleri inşaat sektöründe karşılaştırmalı olarak bir arada kullanılmamıştır. Bu çalışmayla birlikte bu noktada bir katma değer ortaya konulacaktır.



Şekil 2. Çalışanların alt grupları



### III. METODOLOJİ VE KULLANILAN ERGONOMİK RİSK DEĞERLENDİRME TEKNİKLERİ

Çalışma kapsamında izlenen genel metodoloji adım adım açıklanmış ve uygulanan teknikler hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

#### 3.1. Önerilen Metodoloji

Çalışmada kullanılan metodoloji Şekil 3'de gösterildiği üzere temel olarak beş adımdan oluşmaktadır. İnşaat sektörüne uygun Ergonomik Risk Değerlendirme (ERD) tekniklerinin belirlenmesi ile başlayan süreç, iyileştirme önerilerinin yapılması ile bitmektedir. Uygulama kısmında bu adımlara ilişkin açıklamalar yapılmıştır.



Şekil 3. Çalışma kapsamında kullanılan metodoloji

#### 3.2. Uygulanan Teknikler

İnşaat sektörünün ortamına uygun olan ve pratik olarak sıklıkla kullanılan üç ergonomik risk değerlendirme tekniği seçilmiştir. ROSA tekniği gibi ofis ortamına uygun olan ve özel ekipman gerektiren Sırt Omurları İzleme Monitörü (Lumbar Motion Monitor-LMM) teknikleri kullanılmamıştır. Kullanılan teknikler hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

#### 3.2.1. RULA

Hızlı Üst Ekstremité Değerlendirmesi veya RULA yöntemi, İngiltere'deki Nottingham Üniversitesi'ndeki ergonomistler Dr. Lynn McAtamney ve Profesör E. Nigel Corlett tarafından geliştirilmiştir. RULA, işle ilgili üst ekstremité bozukluklarının risklerini tahmin etmek için kullanılan postüral bir değerlendirme yöntemidir (Hignett ve McAtamney, 1995).

RULA ergonomik değerlendirme aracı, boyun, gövde ve üst ekstremitelerdeki iş görevlerinin/taleplerinin biyomekanik ve postural yük gereksinimlerini dikkate alır (URL-3).

RULA gelişimi üç aşamada meydana gelmiştir. Bu aşamalar;

- Çalışma duruşunu kaydetme yöntemi geliştirme,
- Puanlama sistemi geliştirme
- Risk seviyesine rehberlik eden eylem düzeyi ölçeğinin geliştirilmesidir (Romman, 2015).

RULA eylem seviyeleri, bir kişinin yaralanma risk derecesinin bir fonksiyonu olarak çalışma şeklini değiştirme ihtiyacı konusunda uyarı verir (URL-4).

Bu seviyeler;

- Eylem seviyesi 1: RULA skoru 1-2, kişinin iş pozisyonunda yaralanma riski olmadan en iyi pozisyonda çalıştığı anlamına gelir (McAtamney ve Corlett, 1993).
- Eylem seviyesi 2: RULA skoru 3-4, kişinin iş duruşundan dolayı bazı yaralanma riski oluşturabilecek bir duruşta çalıştığı anlamına gelir ve bu skor büyük olasılıkla vücudun bir kısmının sapsmış ve garip olması nedeniyle pozisyon araştırılmalı ve düzeltilmelidir (McAtamney ve Corlett, 1993).
- Eylem seviyesi 3: RULA skoru 5-6, kişinin iş duruşundan yaralanma riskiyle kötü bir duruşta çalıştığı ve yakın bir gelecekte bir yaralanmayı önlemek için bunun nedenlerinin araştırılması ve değiştirilmesi gerektiği anlamına gelir (McAtamney ve Corlett, 1993).
- Eylem seviyesi 4: RULA skoru 7-8, kişinin en kötü duruşta, iş duruşundan hemen bir yaralanma riskiyle çalıştığı ve bunun bir yaralanmayı önlemek için derhal araştırılması ve değiştirilmesi gerekliliği anlamına gelir (URL-5).

#### 3.2.2. REBA

REBA, Hignett ve McAtamney tarafından işe bağlı kas-iskelet sistemi hastalıkları riskini ve tüm vücut duruşunu değerlendirmek için bir araç olarak geliştirilmiştir. REBA, sağlık hizmetleri ve diğer hizmet endüstrilerinde bulunan öngörülemeyen çalışma duruşlarının tipine duyarlı olması için özel

olarak tasarlanmış bir uygulayıcıdır ve alan aracına yönelik olarak algılanan bir ihtiyacı doldurmak için geliştirilmiştir (URL-6).

REBA, işe bağlı kas-iskelet sistemi hastalıkları risklerini ve çeşitli çalışma duruşlarını değerlendirmek için hızlı ve kolay bir önlem sağlar. Vücudu, hareket düzlemlerine göre bağımsız olarak kodlanacak bölümlere ayırır. Sonrasında tüm vücuttaki kas aktivitesi için durgun, dinamik, hızlı bir şekilde değişen veya sabit olmayan bir şekilde ve elle taşıma işleminin gerçekleşebileceği bir puanlama sistemi sunar (Hignett ve McAtamney, 1995; Coyle, 2005; Madani ve Dababneh, 2016).

### 3.2.3. HMD

Hızlı Maruziyet Değerlendirme Metodu (QEC), Birleşik Krallıkta 1996 ve 1998 yılları arasında geliştirilen; sırt, omuz/kol, bilek/el ve boynu ve aynı zamanda titreşimi etkileyen işle ilgili kas-iskelet sistemi risk faktörlerine maruz kalmayı değerlendirmek için geliştirilen genel bir gözlemsel yöntemdir (Bridger, 2008).

Hızlı Maruziyet Değerlendirme yöntemi, hem ergonomi uzmanlarının hem de uzmanların gereksinimlerini karşılamak için özel olarak tasarlanmış olup, bununla birlikte hem gözlemciyi hem de çalışanı iş görevinin puanlamasına da dahil eder (Oliv vd., 2019).

Farklı vücut bölgeleri için vücut duruşu, hareketin tekrarı, kuvvet/yük ve görev süresi için maruz kalma seviyelerini tahmin eder. Maruz kalma seviyeleri daha sonra her bir vücut bölgesi, titreşim ve iş stresi için toplam puanlarla birleştirilir (Oliv vd., 2019).

## IV. İNŞAAT SEKTÖRÜNDE UYGULAMA

Çalışma kapsamındaki metodoloji inşaat sektöründe faaliyet gösteren bir firmada adım adım uygulanmıştır. İlgili firma 1980 yılından beri Edirne’de inşaat sektöründe çalışmalarını sürdürmektedir. İlgili firmanın kooperatif site inşaatında çeşitli gözlemler yapılmıştır. Metodoloji kapsamındaki uygulama adımları aşağıdaki şekildedir:

*Adım 1 (İnşaat sektörüne uygun ERD tekniklerinin belirlenmesi):*

Yapılan literatür taramalarından sonra İnşaat sektörüne uygun ERD teknikleri REBA, RULA ve HMD olarak belirlenmiştir. Bu teknikler hakkında üçüncü bölümde bilgi verilmiştir.

*Adım 2 (İnşa sürecindeki sık tekrar eden faaliyetlerin belirlenmesi):*

Yapılan incelemelerden sonra inşa sürecindeki en sık tekrar eden ve en kötü duruş pozisyonlarının olduğu faaliyetler harç hazırlama, duvar örme, harç karma, demir bağlama, temel bohçalama, kalıp çakma, sıva harcı hazırlama, sıva alçısı çekme ve file çekme

işlemleri olarak belirlenmiştir.

*Adım 3 (ERD tekniklerinin ilgili faaliyetler için uygulanması):*

REBA tekniği için çalışanların en kötü duruşları seçildikten sonra boyun, gövde ve bacaklar için puanlar verilerek A skoru belirlenmiştir. Üst kol, alt kol ve bilek için puanlar verilerek B skoru belirlenmiştir. A ve B değerleri tabloda birleştirilerek C skoru elde edilmiştir. C skoruna çalışanın sıklık ve koşullarını belirten Aktivite skorunda eklendikten sonra REBA Skoru elde edilmiştir.

RULA tekniği için çalışanların en kötü duruşları seçildikten sonra üst kol, alt kol ve el bilekleri için puanlar verilerek A skoru belirlenmiştir. Boyun, gövde ve bacaklar için puanlar verilerek B skoru belirlenmiştir. A skoruna yük ve kavrama puanları eklenerek Bilek ve Kol skoru, B skoruna yük ve kavrama puanları eklenerek Boyun, Gövde, Bacak skoru elde edilmiştir.

HMD tekniği için formdaki bel, omuz/kol, el/bilek ve boyun ile ilgili sorular cevaplanmıştır. Ağırlık, süre, araba kullanma, titreşim, iş temposu ve stres soruları ise çalışan tarafından cevaplanmıştır. El/Bilek, Omuz/Kol, Bel, Boyun puanları toplanarak toplam skor elde edilmiştir. Toplam skor maksimum olası skor olan 176’ya bölündükten sonra HMD puanı belirlenmiştir.

*Adım 4 (Karşılaştırmalı analizlerin yapılması ve yorumlanması):*

9 farklı işlemde 12 tane duruşun analizi yapılmıştır. İlgili faaliyetlerin risk seviyeleri uygulanan üç teknik için de belirlenmiştir. Risk seviyeleri için yapılması gereken değişikliklerin ve gözlemlerin aciliyet durumu belirtilmiştir. İşçi görüşmesine ve ilk gözleme dayalı olarak; en zor duruşlar ve iş görevleri, en uzun süre sürdürülen ve en yüksek kuvvet yüklerinin meydana geldiği duruşlar işlemlerin seçilmesindeki faktörler olmuştur. Şekil 4’de gösterilen harç hazırlama işlemine ilişkin bütün tekniklerin detay uygulama adımları Eklerde Tablo 3-5’te verilmiştir. Diğer süreçlere ilişkin tekniklerin de uygulama sonuçları Tablo 1’de sunulmuştur.



Şekil 4. Harç Hazırlama İşlemi

Harç hazırlama, duvar örme, harç karma, demir bağlama, temel bohçalama, kalıp çakma, sıva harcı hazırlama, sıva alçısı çekme ve file çekme işlemlerine

odaklanılmıştır. İncelenen işlemlerde REBA, RULA ve HMD teknikleri karşılaştırılmıştır.

**Tablo 1.** Tüm İşlemlerin REBA, RULA ve HMD Sonuçları

İş no	İş tanımı	REBA SKORU	REBA'YA GÖRE	RULA SKORU	RULA'YA GÖRE	HMD SKORU	HMD'YE GÖRE
1	Harç hazırlama	9	Yüksek	6	Orta	0,56	Yüksek
2	Duvar örme	10	Yüksek	7	Çok yüksek	0,6	Yüksek
3	Harç karma	9	Yüksek	7	Çok yüksek	0,73	Çok yüksek
4	Duvar örme	7	Orta	7	Çok yüksek	0,66	Yüksek
5	Demir bağlama	7	Orta	7	Çok yüksek	0,69	Yüksek
6	Demir bağlama	10	Yüksek	7	Çok yüksek	0,74	Çok yüksek
7	Temel bohçalama	6	Orta	5	Orta	0,36	Düşük
8	Temel bohçalama	8	Yüksek	6	Orta	0,34	Düşük
9	Kalıp çakma	5	Orta	7	Çok yüksek	0,6	Yüksek
10	Sıva harcı hazırlama	10	Yüksek	7	Çok yüksek	0,67	Yüksek
11	Sıva alçısı çekme	6	Orta	6	Orta	0,59	Yüksek
12	File çekme	9	Yüksek	7	Çok yüksek	0,3	Düşük

Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, REBA yönteminin maksimum 10 puan, RULA yönteminin maksimum 7 puan ve HMD yönteminin maksimum 0,73 puan olduğu görülmektedir. Uygulama sonuçlarına tek tek bakıldığında; REBA % 58,33 (7/12) yüksek riskli sonuç verirken, RULA % 66,67 (8/12) yüksek riskli, HMD %75 (9/12) çok yüksek ve yüksek riskli sonuç vermiştir. Yüksek riskleri tespit ederken 3 metotta birbirleriyle benzer sonuçlar verirken, REBA ve RULA orta riskleri, HMD ise düşük riskleri tespit ederek farklılık göstermiştir. REBA ve RULA yüksek riskleri tespit etmekte HMD'den daha başarılı sonuçlar vermektedir.

Bulgular incelendiğinde, REBA yönteminin maksimum 10 puan, RULA yönteminin maksimum 7 puan ve HMD yönteminin maksimum 0,73 puan olduğu görülmektedir. Uygulama sonuçlarına tek tek bakıldığında; REBA % 58,33 (7/12) yüksek riskli sonuç verirken, RULA % 66,66 (8/12) yüksek riskli, HMD %75 (9/12) çok yüksek ve yüksek riskli sonuç vermiştir.

Tüm işlemler incelendiğinde; duvar örme, harç karma, demir bağlama ve sıva harcı hazırlama işlemleri en yüksek riskli işlemler olarak öne çıkmıştır.

Duvar örme işlemi için REBA skoru 10 olup yüksek risklidir ve acil iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. RULA skoru 7 olup çok yüksek risklidir ve zaman kaybedilmeden acil iyileştirmeler yapılmalıdır. HMD skoru 0,6 olup yüksek risklidir ve yakın zamanda daha fazla gözlem ve değişiklikler yapılmalıdır.

Harç karma işlemi için REBA skoru 9 olup yüksek risklidir ve acil iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. RULA skoru 7 olup çok yüksek risklidir ve zaman kaybedilmeden acil iyileştirmeler yapılmalıdır. HMD skoru 0,73 olup çok yüksek risklidir ve hemen daha fazla gözlem ve değişiklikler yapılması zorunludur.

Demir bağlama işlemi için REBA skoru 10 olup yüksek risklidir ve acil iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. RULA skoru 7 olup çok yüksek risklidir ve zaman kaybedilmeden acil iyileştirmeler yapılmalıdır. HMD skoru 0,74 olup çok yüksek risklidir ve hemen daha fazla gözlem ve değişiklikler yapılması zorunludur.

Sıva harcı hazırlama işlemi için REBA skoru 10 olup yüksek risklidir ve acil iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. RULA skoru 7 olup çok yüksek risklidir ve zaman kaybedilmeden acil iyileştirmeler yapılmalıdır. HMD skoru 0,67 olup yüksek risklidir ve yakın zamanda daha fazla gözlem ve değişiklikler yapılmalıdır.

#### *Adım 5 (İyileştirme önerilerinin yapılması):*

Tüm duruşları daha güvenli hale getirmek için sabitleyiciler, manuel işlemleri ortadan kaldıran otomatik sistemler ve yükleri azaltacak daha hafif malzemeler iyileştirme önerileri olarak sunulmuştur.

Duvar örme işleminde tuğladan daha büyük ve ağırlık olarak karşılaştırıldığında daha hafif olan “gaz betonların” kullanılması riskleri azaltacaktır. Söz konusu bu hafiflik; hem bina yükünü azalttığı için kolonlara daha az yük binmesini sağlar hem de

ergonomik açıdan çalışanlar için faydalı olacaktır.

Harç karma işlemi için önceden karıştırılmış harç ve harç karışımı kullanılmalıdır. Tüm kuru malzemeler, bir forklift veya kamyonla taşınır ve manuel kullanımdan kaynaklanan yaralanma riskini ortadan kaldırır.

Demir bağlama işleminde işçilerin otomatik demir bağlama makinesi kullanmasıyla birlikte hem duruşlarındaki bilek zorlanmaları ortadan kalkmış olacak, hem de manuel bağlamaya oranla daha hızlı bağlama yapılacaktır. Bu sayede zaman ve maliyet tasarrufu sağlanacaktır.

Sıva harcı hazırlama işlemi için çalışan tarafından mikserin işlem boyunca taşınmasına engel olunmalı ve bu işlem için mikserin kova üstüne sabitlenerek taşıyıcı bir sistem ile taşınması sağlanmalıdır.

## V. SONUÇLAR

Çalışanların etkileşimde bulunduğu bütün unsurları çalışanların daha konforlu, güvenli ve verimli çalışabilmesi için en iyilemeyi hedef edinen ergonomi bilimindeki önemli konulardan birisi de ergonomik risk değerlendirmedir. Son yıllarda iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının artmasıyla birlikte konu daha da fazla önem kazanmıştır. Bu çalışma kapsamında risk düzeyinin yüksek olduğu inşaat sektörü ele alınmış ve ergonomik risk değerlendirme tekniklerinin karşılaştırmalı uygulaması yapılmıştır.

Ergonomik risk değerlendirme metodlarının uygulanması ile her bir işlem için risk puanı elde edilmiştir. REBA metodu uygulandığında 7 duruşta yüksek risk, 5 duruşta orta risk; RULA metodu uygulandığında 8 duruşta çok yüksek risk, 4 duruşta orta risk; HMD metodu uygulandığında ise 2 duruşta çok yüksek risk, 7 duruşta yüksek risk, 3 duruşta ise düşük risk olduğu tespit edilmiştir. Bu tespitler doğrultusunda risk taşıyan hareketleri en aza indirebilmek için iyileştirmeler önerilmiştir. Ancak sadece çalışanların duruş ve ekipmanla ilgili ergonomik riskleri değerlendirilmiş ve işyerlerindeki psikolojik faktörler çalışma dışı bırakılmıştır. Çalışma iş yerinde psikolojik faktörler değerlendirilerek daha da genişletilebilir.

Sonuç olarak elde edilen veriler göstermektedir ki; her ne kadar usta olarak adlandırılırsalar da, çalışanlar sağlıklı ve güvenli çalışmayı bilmemektedirler. Bu durumun en önemli nedeni, sağlık ve güvenlik eğitiminin her konuda yetersiz düzeyde olmasıdır. Bu nedenle ilk olarak yapılması gereken İSG eğitiminin okul öncesi kurumlara kadar indirilmesi ve bireylerin çocukluktan itibaren İSG eğitimi konusunda farkındalığının oluşmasının sağlanmasıdır. Bu çalışmada inşaat sürecindeki sık tekrarlanan aktivitelere odaklanılmıştır. Çalışmanın kapsamı diğer inşaat aktivitelerini de içerecek şekilde genişletilebilir.

Ayrıca, gerekli ekipmanın sağlanması durumunda LMM tekniği de uygulanarak daha objektif sonuçların elde edilmesi mümkün olabilecektir.

## KAYNAKLAR

- [1] Abedini, R., Choobineh, A., Soltanzadeh, A., Gholami, M., Amiri, F., & Hashyani, A. A. (2013). Ergonomic risk assessment of lifting activities; a case study in a rubber industry. *Jundishapur J Health Sci*, 5(1), 9-15.
- [2] Al Madani, D., & Dababneh, A. (2016). Rapid entire body assessment: A literature review. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(1), 107-118.
- [3] Ansari, N. A., & Sheikh, M. J. (2014). Evaluation of work Posture by RULA and REBA: A Case Study. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 11(4), 18-23.
- [4] Anwar, R., Mahmood, W., & Arshad, H. S. (2015). Ergonomics assessment and work-related musculoskeletal disorders in construction workers. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 5, 424-427.
- [5] Ayub, Y., & Shah, Z. A. (2018). Assessment of work related musculoskeletal disorders in manufacturing industry. *J Ergonomics*, 8(3), 1-5.
- [6] Batham, C., & Yasobant, S. (2016). A risk assessment study on work-related musculoskeletal disorders among dentists in Bhopal, India. *Indian Journal of Dental Research*, 27(3), 236.
- [7] Bridger, R. (2008). *Introduction to ergonomics*. Crc Press.
- [8] Ceylan, H. (2014). Türkiye'de inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının analizi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 6(1), 1-6.
- [9] Chakravarthy, S. P., KM, S., & GL, S. (2015). Ergonomics study of automobile assembly line. *IJRMEE*, 2(5), 110-114.
- [10] Chantaramanee, N., Taptagaporn, S., & Piriyaarasarth, P. (2015). The assessment of occupational ergonomic risks of handloom weaving in northern Thailand. *Science & Technology Asia*, 29-37.
- [11] Comper, M. L. C., & Padula, R. S. (2013). Ergonomic risk assessment in textile industry workers by two instruments: quick exposure check and job factors questionnaire. *Fisioterapia e Pesquisa*, 20, 215-221.
- [12] Coyle, A. (2005). Comparison of the Rapid Entire Body Assessment and the New Zealand Manual Handling'Hazard Control Record', for assessment of manual handling hazards in the supermarket industry. *Work*, 24(2), 111-116.
- [13] de Oliveira, C. C., de Paula Xavier, A. A., Ulbricht, L., Moro, A. R. P., & Belinelli, M. M. (2018). Health in the rural environment: a postural evaluation of milking workers in Brazil. *Cahiers Agricultures*, 27(3), 35004.

- [14] Djiono, Y. K., & Noya, S. (2013). Working Posture Analysis and Design Using RULA (Rapid Upper Limb Assessment) Method in Production Process at PT. Indana Paint. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 12(2), 111-125.
- [15] Erdinç, O. (2015). Applications of Quick Exposure Check in industrial tasks and a proposed improvement. *assessment*, 13, 16.
- [16] Erkan, N., 1997. *Ergonomi. M.P.M Yayınları*, Yayın No: 373, Ankara
- [17] Fazli, B., Sharif Poor, Z., Mehrparvar, A. H., & Jafari, S. M. (2019). Evaluation of the posture of bank employees by using two methods RULA and OCRA. *Journal of Research and Health*, 9(3), 212-219.
- [18] Garkaz, A., Kurd, N., & Moatamedzade, M. (2014). Ergonomic assessment of Sina car montage industry employees\working positions by REBA (Rapid entire body assessment). *Journal of Basic Research in Medical Sciences*, 1(3), 52-59.
- [19] Ghazali, M. F., Salleh, M. M., Zainon, N., Zakaria, S., & Asyraf, C. D. M. (2009, December). RULA and REBA Assessments in Computer Laboratories. In *Proceeding of National Symposium on Advancements in Ergonomics and Safety 2009* (pp. 146-149).
- [20] Gómez-Galán, M., Pérez-Alonso, J., Callejón-Ferre, Á. J., & Sánchez-Hermosilla-López, J. (2018). Assessment of postural load during melon cultivation in Mediterranean greenhouses. *Sustainability*, 10(8), 2729.
- [21] Gorde, M. S., & Borade, A. B. (2019). The ergonomic assessment of cycle rickshaw operators using rapid upper limb assessment (rula) tool and rapid entire body assessment (reba) tool. *System Safety: Human-Technical Facility-Environment*, 1(1).
- [22] Habibi, E., Zare, M., Haghi, A., Habibi, P., & Hassanzadeh, A. (2013). Assessment of physical risk factors among artisans using occupational repetitive actions and Nordic questionnaire. *International Journal of Environmental Health Engineering*, 1(1), 1-6.
- [23] Herzog, N. V., Beharic, R. V., Beharic, A., & Buchmeister, B. (2015). Ergonomic analysis and simulation in department of ophthalmology. *Procedia Manufacturing*, 3, 128-135.
- [24] Hignett, S., & McAtamney, L. (2000). Rapid entire body assessment (REBA). *Applied ergonomics*, 31(2), 201-205.
- [25] Imran, R. A., Bakri, I., Mulyadi, A. Y., & Yadri, A. (2018). Worker Posture and Fatigue Assessment of Manual Handling Reject Sample in Sample House of Nickel Extraction Process. *Kes Mas: Jurnal Fakultas Kesehatan Masyarakat*, 12(1), 45-52.
- [26] İşler, M., Küçük, M., & Guner, M. (2018). Ergonomic assessment of working postures in clothing sector with scientific observation methods. *International journal of clothing science and technology*.
- [27] Jahangiri, M., Moussavi Najarkola, S. A., Gholami, T., Mohammadpour, H., Jahangiri, A., Hesam, G., & Jalali, M. (2015). Ergonomics intervention to reduce work-related musculoskeletal disorders in a lead mine. *Health Scope*, 4(4).
- [28] Jahanimoghadam, F., Horri, A., Hasheminejad, N., Nejad, N. H., & Baneshi, M. R. (2018). Ergonomic evaluation of dental professionals as determined by rapid entire body assessment method in 2014. *Journal of Dentistry*, 19(2), 155.
- [29] Justavino, F. C., Ramirez, R. J., Perez, N. M., & Borz, S. A. (2015). The use of OWAS in forest operations postural assessment: advantages and limitations. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. Series II*, 8(2), 7.
- [30] Kaliniene, G., Ustinaviciene, R., Skemiene, L., Vaiciulis, V., & Vasilavicius, P. (2016). Associations between musculoskeletal pain and work-related factors among public service sector computer workers in Kaunas County, Lithuania. *BMC musculoskeletal disorders*, 17(1), 1-12.
- [31] Kathiravan, S., & Gunarani, G. I. (2018). Ergonomic performance assessment (EPA) using RULA and REBA for residential construction in Tamil Nadu. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(4), 836-843.
- [32] Kazemi, S., SAVAS, S., & Aydos, L. (2016). Evaluation of Ergonomic Postures of Physical Education and Sport Science by REBA and Its Relation to Prevalence of Musculoskeletal Disorders. *International Journal of Sport Culture and Science*, 4(3), 260-266.
- [33] Khandan, M., Vosoughi, S., Poursadeghiyan, M., Azizi, F., Ahounbar, E., & Koohpaei, A. (2018). Ergonomic assessment of posture risk factors among Iranian Workers: An alternative to conventional methods. *Iranian Rehabilitation Journal*, 16(1), 11-16.
- [34] Kundu, A., & Gaur, R. (2015, August). Validation of RULA, REBA in agriculture works in Indian context. In *Proceedings of the 9th Triennial Congress of the IEA, Melbourne, Australia* (pp. 9-14).
- [35] Labbafinejad, Y., Danesh, H., & Imanizade, Z. (2017). Assessment of upper limb musculoskeletal pain and posture in workers of packaging units of pharmaceutical industries. *Work*, 56(2), 337-344.
- [36] Laurig, W., & Vedder, J. (1998). The Nature and Aims of Ergonomics. *Encyclopaedia of Occupational Health and Safety*, WLaJ Vedder, Editor.
- [37] Legault, É. P., Cantin, V., & Descarreaux, M. (2014). Assessment of musculoskeletal

- symptoms and their impacts in the adolescent population: adaptation and validation of a questionnaire. *BMC pediatrics*, 14(1), 1-8.
- [38] Mali, S., & Vyavahare, R. (2015). RULA analysis of work-related disorders of foundry industry worker using digital human modeling (DHM). *Int Res J Engin Technol*, 2(5), 1373-8.
- [39] Manavakun, N. (2004). A comparison of OWAS and REBA observational techniques for assessing postural loads in tree felling and processing. In *FEC-FORMEC-2004 Conference*.
- [40] Manz, L. N. (2013). Tomato worker ergonomics: REBA panel evaluation of job tasks using video.
- [41] Marcon, M., Pispero, A., Pignatelli, N., Lodi, G., & Tubaro, S. (2017). Postural assessment in dentistry based on multiple markers tracking. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops* (pp. 1408-1415).
- [42] Massaccesi, M., Pagnotta, A., Soccetti, A., Masali, M., Masiero, C., & Greco, F. (2003). Investigation of work-related disorders in truck drivers using RULA method. *Applied ergonomics*, 34(4), 303-307.
- [43] McAtamney, L., & Corlett, E. N. (1993). RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied ergonomics*, 24(2), 91-99.
- [44] McAtamney, L., & Hignett, S. (1995, December). REBA: a rapid entire body assessment method for investigating work related musculoskeletal disorders. In *Proceedings of the 31st annual conference of the Ergonomics Society of Australia* (pp. 13-15). Melbourne: The Society.
- [45] Meksawi, S., Tangtrakulwanich, B., & Chongsuvivatwong, V. (2018). Musculoskeletal disorder and rapid upper limb assessment scoring among rubber tappers. *Ergonomics International Journal*, 2(6), 000163.
- [46] Micheletti Cremasco, M., Giustetto, A., Caffaro, F., Colantoni, A., Cavallo, E., & Grigolato, S. (2019). Risk assessment for musculoskeletal disorders in forestry: A comparison between RULA and REBA in the manual feeding of a wood-chipper. *International journal of environmental research and public health*, 16(5), 793.
- [47] Mirmohamadi, M., Seraji, J. N., Shahtaheri, J., Lahmi, M., & Ghasemkhani, M. (2004). Evaluation of risk factors causing musculoskeletal disorders using QEC method in a furniture producing unite. *Iranian Journal of Public Health*, 33(2), 24-27.
- [48] Mokarami, H., Kalteh, H. O., & Tajpoor, A. (2017). Analysis of body postures for preventing musculoskeletal disorders among tractor drivers in Iran. *Journal of Health Sciences & Surveillance System*, 5(3), 100-106.
- [49] Moussavi, N. S. A., & Mirzaei, R. (2012). Evaluation of upper limb musculoskeletal loads due to posture, repetition, and force by rapid upper limb assessment in a textile factory. *Health Scope*, 1(1), 18-24.
- [50] Nadri, H., Fasih, F., Nadri, F., & Nadri, A. (2013). Comparison of ergonomic risk assessment results from Quick Exposure Check and Rapid Entire Body Assessment in an anodizing industry of Tehran, Iran. *Journal of Occupational Health and Epidemiology*, 2(4), 195-202.
- [51] Namwongsa, S., Puntumetakul, R., Neubert, M. S., Chaiklieng, S., & Boucaut, R. (2018). Ergonomic risk assessment of smartphone users using the Rapid Upper Limb Assessment (RULA) tool. *PLoS one*, 13(8), e0203394.
- [52] Norhidayah, M. S., Mohamed, N. M. Z. N., Mansor, M. A., & Ismail, A. R. (2016). A study of postural loading in Malaysian mining industry using rapid entire body assessment. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 74, p. 00014). EDP Sciences.
- [53] Ojha, P., & Vinay, D. (2018). Assessment of physical fitness and postural discomfort among assembly workers. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(1), 1812-1814.
- [54] Oliv, S., Gustafsson, E., Baloch, A. N., Hagberg, M., & Sandén, H. (2019). The Quick Exposure Check (QEC)—Inter-rater reliability in total score and individual items. *Applied ergonomics*, 76, 32-37.
- [55] Öngel, K., Eser, U., & Neseli, C. (2017). Application of Ergonomic Risk Analysis Methods in a Mold Manufacturing Period and Regulatory Recommendations. *Smyrna Tip Dergisi*, 44-49.
- [56] Özel, E., & Çetik, O. (2010). Mesleki Görevlerin Ergonomik Analizinde Kullanılan Araçlar ve Bir Uygulama Örneği. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (022), 41-56.
- [57] Pandey, K., & Vats, A. (2012). An OWAS-based analysis of workers engaged in brick making factories, Faizabad District of Uttar Pradesh, India. *Journal of Ergonomics*, 2(02).
- [58] Patel, T. N. (2017). Evaluation of driving-related musculoskeletal disorders in motorbike riders using Quick Exposure Check (QEC). *Biomedical Research (0970-938X)*, 28(5).
- [59] Plantard, P., Shum, H. P., Le Pierres, A. S., & Multon, F. (2017). Validation of an ergonomic assessment method using Kinect data in real workplace conditions. *Applied ergonomics*, 65, 562-569.
- [60] Polat, O., & Kalayci, C. B. (2016, May). Ergonomic risk assessment of workers in garment industry. In *Eight international conference on textile science & economy VIII, Zranjanin, Sarbia* (pp. 16-21).

- [61] Purnomo, H., & Apsari, A. E. (2016). REBA analysis for construction workers in Indonesia. *Journal of built environment, Technology and Engineering*, 1(9), 104-110.
- [62] Rabiul Ahasan, M., Väyrynen, S., & Kirvesoja, H. (1996). Physical workload analysis among small industry activities using postural data. *International journal of Occupational safety and ergonomics*, 2(1), 27-34.
- [63] Rahman, M. N. A., Jaffar, M. S. M., Hassan, M. F., Ngali, M. Z., & Pauline, O. (2017, August). Exposure level of ergonomic risk factors in hotel industries. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 226, No. 1, p. 012018). IOP Publishing.
- [64] Saftarina, F., Mayasari, D., & Octaviani, D. (2017). Analysis of work posture Using Rapid Entire Body Assessment (REBA) as the risk factor of work related musculoskeletal Disorders in Inter-provincial Bus Drivers.
- [65] Seo, J. (2016). *Evaluation of Construction Workers Physical Demands Through Computer Vision-Based Kinematic Data Collection and Analysis* (Doctoral dissertation).
- [66] Sha, Z. A., Amjad, A., Ashraf, M., Mushtaq, F., & Sheikh, I. (2016). Ergonomic risk factors for workers in garments manufacturing—A case study from Pakistan. In *Proceedings—International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*.
- [67] Shah, C., & Vyas, N. J. (2015). Musculo-skeletal disorders (MSDs) risk assessment in traditional small scale industries by using REBA (rapid entire body assessment) method. *International Journal of Science and Research*, 4(6), 280-283.
- [68] Sinden, K. E. (2014). *Identifying Determinants of Firefighter Work Health and Task Performance: Implications for Injury Management* (Doctoral dissertation).
- [69] Siregar, I., Fuad, R., & Hanifah, Y. (2017). Work Posture Assessment with Application (Quick Exposure Check) at Boiler Stations.
- [70] Souza, J. A. C. D., & Mazini, M. L. (2017). Ergonomics posture and movement analyses of supermarket checkout operators in the city of Cataguases, MG. *Gestão & Produção*, 24, 123-135.
- [71] Takanokura, M., Tanaka, T., Watanabe, I., Kakehi, M., Nojri, H., Murata, H. & Nakamura, M. (2017). Posture-Based Risk Assessment for Improvement of Physical Workload: Case Study for an Assembly Line. *Journal of Japan Industrial Management Association*, 67(4E), 338-347.
- [72] Teeravarunyou, S. Development of Computer Aided Posture Analysis for Rapid Upper Limb Assessment with Ranged Camera.
- [73] Tofan, A. P., Eka, R., & Rahma, R. A. (2017). Analysis of Factors Causing Musculoskeletal Disorders using Rula (Rapid Upper Limb Assessment) Method in Computer Operators. *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 12(2), 323-340.
- [74] Upasana, V. D. (2017). Work posture assessment of tailors by RULA and REBA Analysis. *Int. J. Sci. Environ. Technol*, 6, 2469-2474.
- [75] URL-1 < <http://www.ioh.net/ergonomic-assessments>>, alındığı tarih 07.02.2021.
- [76] URL-2 < [https://www.ccohs.ca/oshanswers/hsprograms/ris\\_k\\_assessment.html](https://www.ccohs.ca/oshanswers/hsprograms/ris_k_assessment.html) >, alındığı tarih 07.02.2021.
- [77] URL-3 < <https://ergo-plus.com/rula-assessment-tool-guide/>>, alındığı tarih 07.02.2021.
- [78] URL-4 < [https://www.physio-pedia.com/Rapid\\_Upper\\_Limb\\_Assessment\\_\(RULA\)](https://www.physio-pedia.com/Rapid_Upper_Limb_Assessment_(RULA))>, alındığı tarih 07.02.2021.
- [79] URL-5 < <https://www.morganmaxwell.co.uk/rapid-upper-limb-assessment-rula-worksheets-tool-free-pdf-download/>>, alındığı tarih 07.02.2021
- [80] URL-6 <<https://katalog.marmara.edu.tr/veriler/yordambt/cokluortam/A/F/A/B/D/6045d72deaae.pdf>>, alındığı tarih 07.02.2021.
- [81] Vachhani, T. R., Sawant, S. K., & Pataskar, S. (2016). Ergonomics Risk Assessment of Musculoskeletal Disorder on Construction Site. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, 3(3), 228-231.
- [82] Yadi, Y. H., Kurniawidjaja, L. M., & Susilowati, I. H. (2018). Ergonomics intervention study of the RULA/REBA method in chemical industries for MSDs' risk assessment. *KnE Life Sciences*, 181-189.
- [83] Yasobant, S., Chandran, M., & Reddy, E. M. (2015). Are bus drivers at an increased risk for developing musculoskeletal disorders. *An ergonomic risk assessment study. J Ergonom*, 2015.
- [84] Yazdanirad, S., Khoshakhlagh, A. H., Habibi, E., Zare, A., Zeinodini, M., & Dehghani, F. (2018). Comparing the effectiveness of three ergonomic risk assessment methods—RULA, LUBA, and NERPA—to predict the upper extremity musculoskeletal disorders. *Indian journal of occupational and environmental medicine*, 22(1), 17.
- [85] Yubaidi, R. S. (2015, May). Ergonomics Review Of Brick Wall Installation Labour Using Rapid Entire Body Assessment (REBA) Method. In *ASEAN/Asian Academic Society International Conference Proceeding Series*.
- [86] Zamanian, Z., Daneshmandi, H., Setoodeh, H., Nazaripoor, E., Haghayegh, A., & Sarvestani, S. S. (2014). Risk assessment of musculoskeletal disorders and determination of the associated factors among workers of a dairy products factory.

- [87] Weigall, F., Simpson, K., Bell, A. F., & Kemp, L. (2005). An assessment of the repetitive manual tasks of cleaners.
- [88] Wibisono, C., & Triyanti, V. (2016). Work Risk Assessment Towards Wood Furniture Production Activities Using Manual Task Risk Assessment Method and Rodgers Muscle Fatigue Analysis Method. In *Proceeding of 9th International Seminar on Industrial Engineering and Management, ISSN* (Vol. 197, pp. 1-8).
- [89] Xu, Y. W., Cheng, A. S., & Li-Tsang, C. W. (2013). Prevalence and risk factors of work-related musculoskeletal disorders in the catering industry: A systematic review. *Work*, 44(2), 107-116.

## EKLER

**Tablo 2.** Ergonomik Risk Değerlendirme Çalışmaları Literatürü

Yazar (Yıl)	Metodoloji	Çalışma alanı
Ahasan vd. (1996)	OWAS	Bir endüstri işletmesindeki 48 erkek işçi
Massaccesi vd. (2003)	RULA	77 kamyon şoförü
Manavakun (2004)	REBA, OWAS	Yaşları 28 ile 42 arasında değişen 4 işçi
Mirmohamadi vd. (2004)	NMQ, QEC	İran'da bir mobilya üretim hattındaki 500 işçi
Weigall vd. (2005)	ManTRA, RULA	Avustralyadaki temizlik çalışanları
Ghazali vd. (2009)	REBA&RULA	Universiti Malaysia Perlis'teki Üretim Okulu'ndaki bilgisayar laboratuvarlarındaki öğrenciler
Özel ve Çetik (2010)	OWAS	Kütahya'da kiremit fabrikasının yükleme bölümünde çalışan yaşları 25-45 arasında değişen 38 işçi
Habibi vd. (2012)	NMQ, OCRA	İsfahan'daki 94 erkek zanaatkar
Najarkola ve Mirzaei (2012)	RULA&NMQ	Tekstil fabrikası çalışanları
Pandey ve Vats (2012)	OWAS	Tuğla fabrikası çalışanları
Abedini vd. (2013)	NMQ, NIOSH, MAC	Kauçuk endüstrisindeki çeşitli bölümlerden seçilen 136 erkek işçi
Comper ve Padula (2013)	QEC, JFQ	Bir tekstil fabrikasının dikiş bölümünde çalışan 102 kadın ve 5 erkek işçi
Djiono ve Noya (2013)	RULA	Solvent Bazlı boya üretimi yapan tesis çalışanları
Manz ve Silver (2013)	REBA	Amerika'daki tarım(domates) işçileri
Nadri vd. (2013)	REBA, QEC, NMQ	Tahran'da eloksallı ve alüminyum profil üreten fabrikadaki çeşitli işlemlerde bulunan 82 işçi
Xu (2013)	RULA, OWAS, NIOSH	Hong Kong'ta Çin restoranlarında ve fast food restoranlarında çalışan catering endüstrisindeki işçiler
Ansari ve Sheikh (2014)	REBA&RULA	Küçük ölçekli özel imalat atölyesi
Garkaz vd. (2014)	REBA, NMQ	Farklı bölümlerden 60 mesleki görevi olan 120 işçi
Legault vd. (2014)	NMQ	61 ergen
Teeravarunyou (2014)	RULA	Bilgisayar iş istasyonundaki 13 çalışan
Zamanian vd. (2014)	NMQ, QEC	100 erkek çalışan (21-41 yaş)
Amara ve Gaur (2015)	REBA, RULA, NMQ	25 tarım işçisi
Anwar vd. (2015)	RULA&NMQ	İnşaat işçileri
Chakravarthy vd. (2015)	RULA, OWAS	Otomobil montaj hattı çalışanları
Chantaramanee vd. (2015)	RULA, ACGIH-HAL, SI	105 işçi
Erdoğan (2015)	QEC	Otuz bir makine dikiş operatörü
Jahangiri vd. (2015)	QEC	İran'ın Erak şehrindeki maden çalışanları (40 kişi)
Justavino vd. (2015)	OWAS	Orman işlerinde çalışan bir işçi
Mali ve Vyavahare (2015)	RULA&DHM	Dökümhane çalışanları
Ricco ve Yubaidi (2015)	REBA	Duvar örme işi yapan 120 işçi
Shah vd. (2015)	REBA&RULA	Giyim fabrikası çalışanları



Shah ve Vyas (2015)	REBA	70 sağlıklı işçi (50 kadın, 20 erkek)
Yasobant vd. (2015)	REBA, RULA, QEC, NMQ	280 otobüs şoförü
Batham ve Yasobant (2016)	REBA&NMQ	Hindistan'ın Bhopal şehrindeki dişçiler
Kaliniene vd. (2016)	RULA, NMQ	513 kamu hizmeti ofisi çalışanı
Kazemi vd. (2016)	REBA, NMQ	260 beden eğitimi ve spor bilimleri öğrencisi
Norhidayah vd. (2016)	REBA	Malezyada madencilik sektörü çalışanları
Polat ve Kalaycı (2016)	REBA	Giyim fabrikası çalışanları
Purnomo ve Apsari (2016)	REBA	Endonezyadaki bir inşaatçı çalışan işçiler
Ramasamy vd. (2016)	QEC REBA, RULA, OWAS,	Hintli motorsiklet sürücüleri
Seo (2016)	PATH	Amerika'daki inşaat işçileri
Vachhani vd. (2016)	REBA, QEC	Farklı bölümlerde çalışan 90 inşaat işçisi
Wibisono ve Triyanti (2016)	ManTRA, Rodgers Kas Analizi Metodu	Ahşap mobilya üretimi yapan atölye çalışanları
Labbafinejad vd. (2017)	RULA	İlaç endüstrilerinde paketleme üniteleri
MacDermidand vd. (2017)	REBA, RULA, OWAS, NIOSH	İtfaiyeciler
Marcon vd. (2017)	RULA, NERPA	Milano şehrindeki dişçiler
Mokarami vd. (2017)	REBA	İranlı traktör sürücüleri
Öngel vd. (2017)	REBA&RULA	Kalıp fabrikası çalışanları
Plantard vd. (2017)	RULA	Bir araba üreticisi fabrikasındaki 7 işçi
Prasetya vd. (2017)	RULA	Darussalam Üniversitesindeki bilgisayar operatörleri
Rahman vd. (2017)	WERA, QEC	Malezya yarımadasındaki 65 otel çalışanı
Saftarina vd. (2017)	REBA	101 otobüs sürücüsü
Siregar vd. (2017)	QEC	Çiftlik işçileri
Souza ve Filho (2017)	RULA	14 süpermarket satın alma operatörü
Takanokura vd. (2017)	REBA&RULA	Üretim hattındaki iş istasyonlarında çalışan 4 işçi
Upasana ve Vinay (2017)	REBA&RULA	Pantnagar'daki 60 erkek terzi
Ayub ve Shah (2018)	RULA, QEC, ANOVA REBA&RULA, OWAS,	İmalat atölyesi çalışanları
Galán vd. (2018)	OCRA, VIRA	İspanyadaki bir sera çalışanları
Imran vd. (2018)	REBA	7 işçi
İşler vd. (2018)	REBA, OWAS, PLIBEL	8 farklı Giyim fabrikası çalışanları
Jahanimoghadam vd. (2018)	REBA	90 diş hekimi
Kathiravan ve Gunarani (2018)	REBA&RULA	6 konut inşaat sahasından 40 işçi
Khandan vd. (2018)	REBA, RULA, NERPA	Dört şirketin operasyonel birimlerinin 455 çalışanı
Meksawi vd. (2018)	RULA	Asyada plastik yalıtım bandı çalışanları
Namwongsa vd. (2018)	RULA	30 tane akıllı telefon kullanıcısı
Ojha ve Vinay (2018)	REBA	Hindistanda otomobil sektöründeki montaj hattı çalışanları
Oliveira vd. (2018)	REBA	Brezilya'nın Paraná eyaletinde bulunan 156 mandıra çiftliğinden 163 tarım işçisi
Yadi vd. (2018)	REBA&RULA	Kimya endüstrisindeki iş istasyonlarında çalışan askıya alma çalışanları
Yazdanirad vd. (2018)	RULA, LUBA, NERPA	İlaç fabrikası, otomotiv ve montaj sektörü
Cremasco vd. (2019)	REBA&RULA	Tarım ve ormancılık operatörleri
Fazli vd. (2019)	RULA, OCRA	80 banka çalışanı
Gorde ve Borade (2019)	REBA&RULA	Yaşları 23 ile 55 arasında değişen erkek operatörler

**Tablo 3.** Harç Hazırlama İşlemine İlişkin REBA Değerlendirme Sonuçları

Boyun	2	Üst kollar	2
Gövde	4	Alt kollar	1
Bacaklar	4	Bilek	2
Duruş Skoru A	8	Duruş Skoru B	2
Yük	0	Kavrama	1
A skoru	8	B skoru	3
C skoru	8	Aktivite skoru	1
<b>REBA Skoru</b>	9	Risk Seviyesi/Önlem	Yüksek, Kısa zaman içerisinde değişiklik gerekli

**Tablo 4.** Harç Hazırlama İşlemine İlişkin RULA Değerlendirme Sonuçları





Üst kollar	2	Boyun	3
Alt kollar	1	Gövde	4
Bilek/Bilek Bükme	3/1	Bacaklar	1
A skoru	3	B skoru	5
Kavrama	1	Kavrama	1
Yük	0	Yük	0
Bilek ve kol skoru	4	Boyun, Gövde, Bacak skoru	6
<b>RULA Skoru</b>	6	Risk Seviyesi/Önlem	Orta risk, daha fazla inceleme ve kısa zamanda değişiklik gerekli

**Tablo 5.** Harç Hazırlama İşlemine İlişkin HMD Sonuçları

<b>El/Bilek</b>			<b>Omuz/Kol</b>		
Tekrarlanan Hareket & Kuvvet	F2-K2	6	Yükseklik & Ağırlık	H1-C1	2
Tekrarlanan Hareket & Süre	F2-J3	8	Yükseklik & Süre	C1-J3	6
Süre & Kuvvet	J3-K2	8	Süre & Ağırlık	J3-H1	6
Bilek Postürü & Kuvvet	E2-K2	6	Sıklık & Ağırlık	D2-H1	4
Bilek Postürü & Süre	E2-J3	8	Sıklık & Süre	D2-J3	8
<b>Toplam Skor</b>		36	<b>Toplam Skor</b>		26
<b>Bel</b>			<b>Boyun</b>		
Bel postürü & Ağırlık	A2-H1	4	Boyun Duruşu & Süre	G2-J3	8
Bel postürü & Süre	A2-J3	8	Görsel Dikkat & Süre	L1-J3	6
Süre & Ağırlık	J3-H1	6	<b>Toplam Skor</b>		14
Statik Postür & Süre	B4-H1	4	Araba Kullanma	M2	4
Sıklık & Ağırlık		0	Titreşim	N1	1
Sıklık & Süre	B4-J3	0	İş Temposu	P2	4
<b>Toplam Skor</b>		22	Stres	Q3	9
El/Bilek+Omuz/Kol+Bel+Boyun Skoru		98	<b>HMD Skoru</b> 98/176=0,56		Yüksek Risk

# Endüstriyel Atık Çamurlardan Elde Edilen Vitrikiye Ürünlerle İlgili Bir Değerlendirme

## *An Evaluation of the Vitrified Products from Industrial Waste Sludges*

Bengisu BOZKURT<sup>1</sup> , Zerrin GÜNKAYA<sup>1</sup> , Aysun ÖZKAN<sup>1</sup> , Göktuğ GÜNKAYA<sup>2</sup> , Müfide BANAR<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye  
<sup>2</sup> Cam Bölümü, Güzel Sanatlar Fakültesi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye

### Öz

Endüstriyel faaliyetler sonucu oluşan arıtma çamurlarının geri kazanımı, arıtımı veya bertarafı tüm dünyada en önemli çevresel sorunlar arasındadır. Atık çamurların yönetiminde yaygın olarak kullanılan yakma, depolama, susuzlaştırma veya tarım alanlarında kullanma gibi yöntemler bu atıkların içerisindeki ağır metallerin uzaklaştırılmasında yetersiz kalmaktadır. Bu atıkların çevre için risk oluşturması ve arıtma maliyetleri gibi sorunların yanı sıra doğal kaynakların da her geçen yıl azaldığı düşünüldüğünde, oluşan atık çamurların değerlendirilerek ikincil malzemelere dönüştürülmesinin önemi artmaktadır. Bu bağlamda vitrifikasyon yöntemi, atıklardan yapı malzemeleri (cam-seramik, tuğla, pigment vb.) üretmenin yanı sıra atıkların içerisindeki ağır metallerin stabilizasyonunu da sağlayan, döngüsel ekonomi yaklaşımıyla örtüşen bir yöntem olarak dikkati çekmektedir. Bu makalede, endüstriyel arıtma çamurlarının katma değeri olan ürünlere dönüştürülmesi noktasında, arıtma çamurlarının vitrifikasyonu ve vitrikiye ürünlerin kullanım alanları ile ilgili çalışmalar incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ağır Metal, Atık Çamur, Stabilizasyon, Vitrifikasyon, Yapı Malzemeleri

### Abstract

Recovery, treatment or disposal of sewage sludge resulting from industrial activities are among the most important environmental problems in the world. Common methods used in the management of waste sludge, such as incineration, landfilling, dehydration or use in agricultural areas, are insufficient in removing the heavy metals in these wastes. Considering that these wastes pose a risk to the environment and problems such as treatment costs and the decreasing of natural resources, the importance of recovery the waste sludge into secondary materials increases. In this context, vitrification method, which also provides the stabilization of heavy metals in wastes, draws attention as a method that applied to produce construction materials (glass-ceramic, brick, pigment, etc.) from these wastes in connection with the concept of circular economy. In this article, studies on vitrification of sewage sludge and usage areas of vitrified products were examined at the point of transforming industrial waste sludges into products with added value.

**Keywords:** Construction Materials, Heavy Metal, Stabilization, Vitrification, Waste Sludge

## I. GİRİŞ

Hızla büyüyen dünya nüfusunun taleplerini karşılamak için artan endüstrileşme faaliyetleri ile birlikte atık oluşumu da hızla artmıştır [1,2]. Oluşan bu endüstriyel atıkların büyük bir miktarını atık çamurlar oluşturmaktadır. Bileşimi fazlasıyla kompleks olan ve ağır metaller gibi birçok farklı kirleticiyi de bünyesinde barındıran [3] atık çamurların bertaraf maliyetleri, işletmeleri gün geçtikçe daha da zora sokan bir durum haline gelmiştir [4]. 2017 yılında dünya genelinde ortaya çıkan toplam arıtma çamuru (kuru bazda) miktarının 45 milyon ton olduğu düşünüldüğünde, bu çamurların arıtılması ve bertarafının sağlanması konuları aciliyet kazanmış; giderek azalan hammadde kaynakları da göz önüne alınarak, döngüsel ekonomi kavramıyla bağlantılı şekilde bu atıkları hammadde olarak kullanma fikri gündeme gelmiştir [5,6].

Arıtma çamuru, inşaat sektöründe kullanılan kilin de bileşiminde bulunan  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  bileşiklerini bünyesinde barındırır. Bu kimyasal bileşimin benzerliği sayesinde, arıtma çamuru kil yerine kullanılabilir bir hammadde haline gelerek tuğla, seramik malzeme ve hafif agregalar gibi yapı malzemelerinin üretiminde kullanılabilir [7,8,9]. Ayrıca kilin dünyanın pek çok yerinde azalan hammadde kaynaklarından birisi olması ve eldesinin ortaya çıkardığı yüksek çevresel etki nedeniyle, geleneksel hammaddelerin yerine sürdürülebilir malzemelerin kullanılması gerektiği fikri önem kazanmıştır. Bu bağlamda başta Çin olmak üzere bazı ülkeler, tuğla kullanımına sınırlandırma getirerek, seramik ürünler elde etmek için endüstriyel atıkların kullanılmasını önermişlerdir [10]. Çevresel faktörlerin yanı sıra çimentoya olan talebin artması da inşaat sektörünü atık malzeme kullanımına yönlendirmiştir [11,12].

Çamur arıtımında kullanılan geleneksel yöntemleri yakma, depolama, stabilizasyon/solidifikasyon, inşaat malzemesi olarak kullanma oluşturmaktadır [13]. Ancak, atıkların düzenli depolanması için ayrılacak alanların sınırlı olması bu yöntem için kısıtlayıcı etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Aynı zamanda, çamurun depolanması durumunda, içerisinde düşük miktarlarda da olsa bulunan ağır metallerin çevreye sızma riski devam etmektedir [14]. Yakma işlemi de ancak maliyeti fazla olan modern yakma tesislerinde gerçekleştirilebilmektedir [15].

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇŞB)'nin entegre çevre bilgi sistemi bünyesindeki Atık Beyan Sistemini (TABS) kullanarak atık beyanında bulunan 66.478 adet tesisten sağlanan verilere göre, 2018 yılında ortaya çıkan atıkların 1.513.624 tonunu tehlikeli atıklar oluşturmaktadır. Bu tehlikeli atıklar içerisinde arıtma çamurlarının miktarı 110.605 tondur. ÇŞB tarafından yayınlanan Tehlikeli Atık İstatistikleri Bülteni (2020)'ne göre, beyan edilen toplam 1.513.624 ton tehlikeli atığın %84,99'u geri kazanılmak üzere atık işleme tesislerine, %13,26'sı ise bertaraf edilmek üzere sterilizasyon, düzenli depolama ve yakma tesislerine gönderilmiş, %1,15'i stok, %0,60'ı ise ihraç edilmiştir [16].

Bu bağlamda, ülkemizdeki arıtma çamuru miktarının fazlalığı ve halen döngüsel ekonomi kapsamında değerlendirilememesi, bu çalışmanın çıkış noktasını oluşturmuş ve ağır metal içerikli endüstriyel nitelikli arıtma çamurlarından ikincil bir malzeme üretmek amacıyla uygulanan vitrifikasyon yöntemi ve bu yolla elde edilen vitrifiye ürünlerin özellikleri ile ilgili çalışmalar incelenerek değerlendirme yapılmıştır. Çalışmanın, gelecekte yapılacak uygulamalar için bir temel oluşturması hedeflenmiştir.

## II. VİTRİFİKASYON YÖNTEMİ

Bir stabilizasyon yöntemi olan vitrifikasyon ile atık bertarafı, 1950'lerde nükleer atıkların radyoaktif elementlerini immobilize etmek amacıyla uygulanmaya başlanmış olup [17] zamanla kullanım alanı genişletilerek diğer tehlikeli atık türleri için de kullanılabilir hale gelmiştir [18]. İşlem sonucu ortaya çıkan ve camsı veya kristal bir yapıda olan nihai ürün, sızmaya karşı dirençli, doğal granit veya mermerden daha dayanıklı özelliktedir [19].

Vitrifikasyon, kirlenmiş toprakları, gömülü tehlikeli atıkları ve toksik çamurları 1600 ila 2000 °C'ye kadar çıkabilen yüksek sıcaklıklardaki elektrikli bir fırında (ex-situ vitrifikasyon, ESV) ya da direkt olarak kirlenmiş bir sahada (in-situ vitrifikasyon, ISV) eriterek tehlikesiz hale getirme işlemi olarak tanımlanır. Bu teknoloji, kirlenmiş toprak veya çamurları, Joule kanununda belirtildiği şekilde elektrik akımının yarattığı ısı ile eriterek içerisindeki tehlikeli organik veya inorganik bileşenlerin yok edilmesi esasına dayanmaktadır [19].

Vitrifiye edilmiş atıklar üzerinde yapılan çalışmalar, elde edilen cam ürünün çimento da dahil olmak üzere diğer atık formlarına göre 10.000 kat daha dayanıklı olabileceğini ortaya koymuştur. ABD Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency, USEPA), vitrifikasyon yönteminin tehlikeli atıklar ve radyoaktif atıklar için "Mevcut En İyi Tekniklerden" (Best Available Techniques, BAT) biri olduğunu belirtmiştir [20].

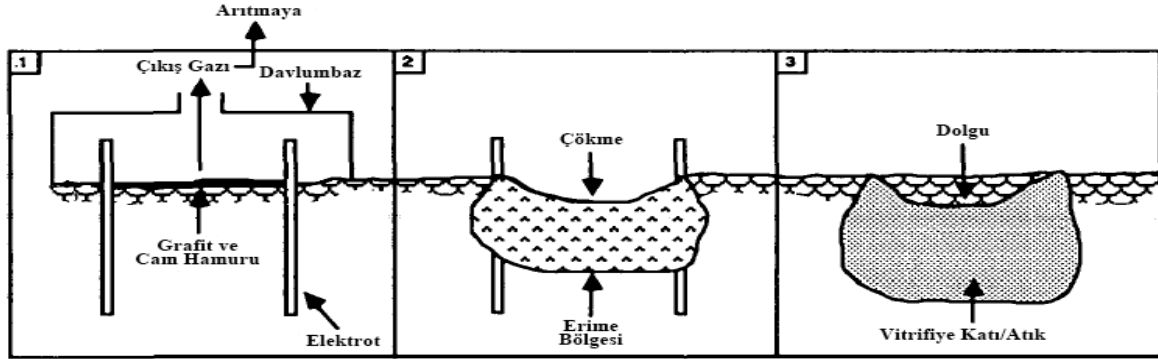
Yüksek enerji gerektirmesi sebebiyle pahalı olan bu süreç sonunda elde edilen güvenli ve çoğunlukla iyi mukavemet ve yalıtım değerlerine sahip olan ürünlerin pazarlanması ile üretim maliyetlerinin bir kısmını geri kazanmak mümkündür [21]. Vitrifikasyonun birçok avantajına rağmen maliyetinin fazla olması nedeniyle, tehlikeli atıkların stabilizasyonunda kullanımı kabul görmekte yavaş kalmıştır. Bu nedenle, içerisindeki ağır metalleri uzun vadede sızma riski olan çimentolu matrislerde sabitleme yöntemi, düzenli depolama sahalarında bertaraf ve hatta yasadışı giderme yöntemleri gibi daha kolay ve ucuz yollar tercih edilmiştir. Ancak, vitrifikasyon ile elde edilen cam ürünü atıl bir malzeme veya yalnızca düşük değerli uygulamalarda kullanılacak bir hammadde olarak değerlendirmek yerine katma değerli ve rekabetçi bir ürün olarak ele almak, maliyetlerin karşılanmasıyla birlikte kâr etmeyi de sağlayacaktır. Diğer yandan Avusturya'da nakliye dahil olmaksızın atık çamurun düzenli depolama ile bertaraf maliyetinin 130-200\$/ton, Hollanda'da yıllık 30-40 milyon Euro, İngiltere'de ise yıllık 5,5 milyon Euro [22] olması da atık çamurdan vitrifikasyon ile yeni ürünlerin eldesini alternatif bir yöntem olarak gündeme getirmektedir.

Vitrifikasyon sonrası nihai ürünün güvenilirliğini belirlemek amacıyla, Toksikite Karakteristik Liç Prosedürü (TCLP) geliştirilmiştir. Katı, sıvı ve çok fazlı atıklarda bulunan organik ve inorganik bileşenlerin hareketliliğini tespit etmek amacıyla geliştirilen TCLP [23], depolama sahasındaki bir atığın çevreye sızmasını simüle edecek şekilde tasarlanmış bir laboratuvar testidir. Bu teste göre, sıvı:katı oranı 20:1 olacak şekilde, katı faz uygun ekstraksiyon sıvısı ile 18±2 saat boyunca 30±2 rpm'de çalkalanarak ekstrakte edilir. Bu yöntem, atık içerisindeki ve vitrifikasyon sonrası stabilize olmuş ürünlerdeki metallerin sızma davranışı ve potansiyel çevresel riskleri hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlar [24].

In-situ vitrifikasyon, kirlenmiş toprakları yerinde iyileştirme için kullanılan bir ısı işlem teknolojisidir. İşlem görecekle araziye kare oluşturacak şekilde yerleştirilen dört adet elektrot ile toprak elektriksel olarak ısıtılarak cam benzeri inert bir malzemeye dönüşümü sağlanır. Elektrotlar arasına ince bir tabaka halinde grafit ve cam hamurundan oluşan karışım yerleştirilerek başlangıçta elektriksel olarak iletken olmayan toprağın ısıtılması gerçekleştirilir. Vitrifiye

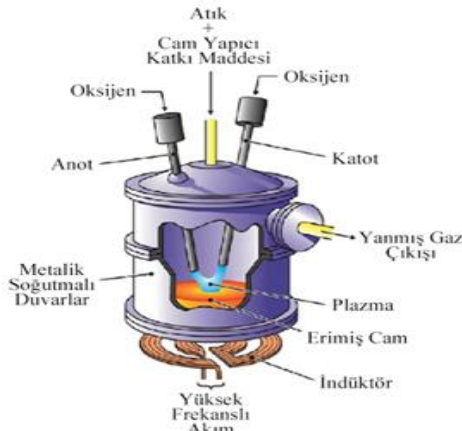
edilen alanı kapsayan davlumbaz sistemi ile işlem sırasında açığa çıkan gazlar çevreye salınmadan burada toplanır. ISV teknolojisi, çok çeşitli atık türleri (radyoaktif, organik veya inorganik) ile kirlenmiş toprakların, herhangi bir kazı ve nakliye olmaksızın direkt olarak o alanda iyileştirilmesine olanak sağlar

ve bu sayede oluşabilecek ekstra maliyetlerin de önüne geçilmiş olunur [25,26,27]. Tipik bir ISV arıtma işleminin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. ISV sistemi [27]

Ex-situ vitrifikasyon teknolojisinde, kirlenmiş topraklara, tortulara ve çamurlara yapılan silis ilavesiyle bu malzemelerin elektrikli bir fırında oksit camlara dönüşümü sağlanır. Vitrifikasyonun başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, belirlenen atığa uygun cam bileşimlerinin geliştirilmesi ve bu atık ile katkı maddelerini tehlikeli emisyonlar oluşturmadan kararlı bir cama dönüştürebilen cam eritme teknolojisi gereklidir. Ex-situ vitrifikasyonda, tehlikeli atık içerisindeki inorganik bileşenler stabilize hale gelirken, bu işlemde kullanılan yüksek sıcaklık (1500 °C'nin üzerinde) sayesinde, atıkta bulunan antrasen, bis (2-etilheksil ftalat) ve pentaklorofenol de ayrıştırılır. Sonuç olarak, toksik bileşenler çevreye tehdit oluşturmayacak şekilde elde edilen ürün içerisinde sabitlenirler. Bu da, kimyasal olarak toksik olmayan camsı malzemeyi, yeniden kullanım veya güvenli bir şekilde depolama için uygun hale getirir [19,28,29]. ESV için kullanılan elektrikli fırın sistemi Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Elektrikli fırın vitrifikasyon sistemi [30]

### III. VİTRİFİYE ÜRÜNLER

Uygulanan vitrifikasyon yöntemi sonucu ortaya çıkan vitrifiye ürünleri elde etmede izlenen yol Şekil 3'te

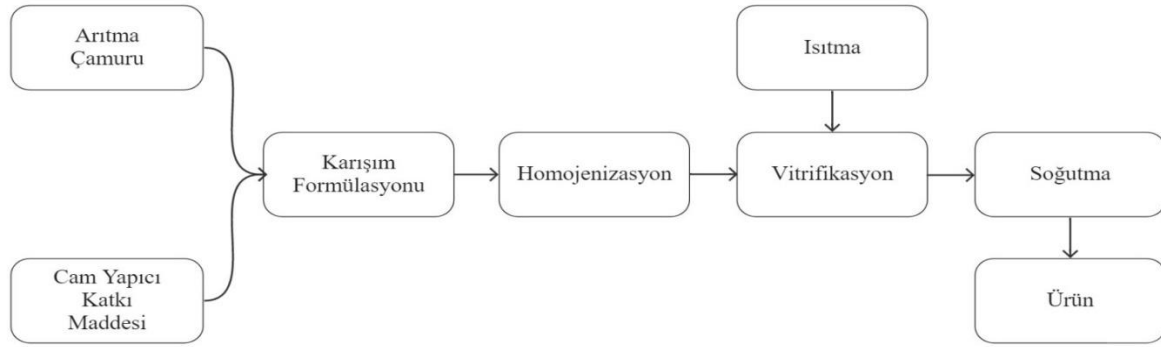
şematik olarak verilmiştir. Endüstriyel arıtma çamurlarından vitrifikasyon yöntemiyle elde edilen cam/cam seramik, seramik tuğla/briket, pigment ve diğer ürünler olmak üzere 4 başlıkta ele alınan uygulamalar özet olarak Tablo 1'de verilmiş, alt başlıklarda ise detaylı olarak incelenmiştir.

#### 3.1. Cam/Cam-Seramik Ürünler

Doğal hammaddelerin, çeşitli endüstrilerden kaynaklanan ve büyük miktarlarda açığa çıkan atık çamurlar ile ikamesi cam ve cam-seramik ürünler elde etmede popülerlik kazanmıştır. Bu ürünler üretim koşullarına ve üretimde kullanılan malzemelere bağlı olarak, sıfır gözenekli bir yapıda olup, yüksek mekanik performansına sahip olabilir veya mükemmel yalıtım özellikleri gösteren fazlasıyla gözenekli bir yapı da sergileyebilirler [32].

Garcia-Valles vd. (2007), plastik ve metal yüzey işleme fabrikasından alınan galvanik çamur ile belediye atık su arıtma tesisinden alınan arıtma çamuru karışımının vitrifiye edilmesiyle elde ettikleri nihai ürünün fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Katma değerli bu ürünün kullanılabilirliğini görmek için doğal bir malzeme olan bazalt kaya, orijinal cam ve cam-seramik ile karşılaştırmışlar ve elde edilen cam-seramik malzemenin, doğal ve ticari ürünler yerine kullanılabilir özelliklere sahip rekabetçi bir ürün olduğunu belirtmişlerdir [33].

Silva vd. (2008) granit çamuru ve metal elektrokaplama tesisinden gelen galvanik atık ile gerçekleştirdikleri vitrifikasyon sonucunda, atık bileşiminde yüksek oranda bulunan demir iyonları sayesinde, ağırlıkça %30, %40 ve %50 atık katkılı camların çok yüksek derecede hidrolitik direnç gösterdiği ve en dirençli soda-kireç hidrolitik camlarına (yani şişe camı) benzer sabit bir çözünme hızına sahip olduğunu belirtmişlerdir [34].



Şekil 3. Vitrifikasyon ile arıtma çamurundan ürün eldesinin şematik gösterimi [31]

Tablo 1. Endüstriyel arıtma çamurlarına uygulanan vitrifikasyon çalışmaları

Kullanılan Arıtma Çamuru Türü	Ön İşlem	Elde Edilen Ürün/Olası Kullanım Şekli	Sızma Davranışı	Önemli Notlar	Kaynak
Galvanik çamur, altın madenciliği arıtma çamuru	Gerekli değil	Cam/Farklı renk ve özelliklerde cam	Düşük	SiO <sub>2</sub> kaynağı olarak maden arıtma çamuru kullanımı ile hammaddelerin korunması, metal stabilizasyonu	[33]
Granit çamuru, metal elektrokaplama çamuru	Gerekli değil	Cam/Soda-kireç borosilikat cam	Düşük	Kimyasal olarak kararlı camların nispeten düşük bir sıcaklıkta (1100 °C'den fazla olmayan) dökülebilmesi	[34]
Ağır metal alçıtaşı, dekupaj çamuru	Tavsiye edilir	Cam/Yüksek dayanıma sahip cam	Düşük	Çamur bertarafı, ağır metal stabilizasyonu, endüstriyel üretim potansiyeli	[35]
Galvanik çamur, belediye atık su arıtma çamuru	Tavsiye edilir	Cam/Basınç dayanımı yüksek cam-seramik	Düşük	Doğal ve ticari ürünlerle ikamesi yapılabilecek rekabetçi bir ürün	[36]
Dekupaj çamuru, paslanmaz çelik çürufu, cam kırıntısı	Gerekli değil	Cam/İnşaat malzemesi olarak kullanım	Düşük	Dekupaj çamuru ilavesinin kristalizasyon sıcaklığını düşürmesi, yüksek mekanik özellikler	[37]

Cam atığı, asit nötralizasyon tuzları, arıtma çamuru	Tavsiye edilir	Cam/Basınç dayanımı yüksek cam-seramik	Düşük	Nihai ürünün geleneksel doğal malzemelere (kil ve kum) kıyasla maliyeti önemli ölçüde azaltması	[38]
<i>Galvanik çamur</i>	<i>Gerekli değil</i>	Cam/İnşaat sektöründe yalıtım malzemesi	Düşük	Tehlikesiz atık özellikleri taşıyan nihai ürün	[40]
Sodyum kromat çamur atığı	<i>Gerekli değil</i>	Cam/Bazalt cam-seramiklere benzer yüksek dayanıma sahip cam	Düşük	Çamur bertarafı, ağır metal stabilizasyonu, endüstriyel üretim potansiyeli	[41]
Magnox çamur atığı	Gerekli değil	Cam/Borosilikat cam	Düşük	Baz camın tek başına eritilmesi ile mullit potada meydana gelen hasarın Magnox çamur atığı ilavesi ile ortadan kalkması	[42]
Galvaniz çamur, atık cam	Gerekli değil	Tuğla/İnşaat sektöründe yapı malzemesi	Düşük	Atık cam ilavesi ile düşük su emilimi ve yüksek basınç dayanımı	[48]
Akü endüstrisinden kaynaklanan arıtma çamuru	Gerekli değil	Tuğla/İnşaat sektöründe yapı malzemesi	Düşük	Aynı sıcaklıkta ateşlenen geleneksel tuğlalara göre yaklaşık 1,5 kat fazla basınç dayanımı	[13]
Elektrokaplama çamuru	Gerekli değil	Tuğla/İnşaat sektöründe yapı malzemesi	Düşük	Çamur bertarafı, ağır metal stabilizasyonu, endüstriyel üretim potansiyeli	[49]
Atık su nötralizasyon sürecinden kaynaklanan Fe içerikli atık çamur	Gerekli değil	Tuğla/Isı yalıtım malzemesi	Düşük	Demir bazlı çamur sayesinde nispeten düşük sıcaklıklarda üretim	[39]

Cr/Ni/Cu kaplama çamuru	Tavsiye edilir	Pigment/Gri ve siyah renk veren pigment	Düşük	Nihai ürünün SO <sub>2</sub> salınımı nedeniyle güvenlik endişesi	[50]
Elektrokaplama çamuru	Gerekli değil	Pigment/Sarı ve yeşil renk veren pigment	Düşük	Tüm numuneler için %99.99'dan fazla ağır metal stabilizasyon verimi	[51]
Elektrokaplama çamuru, endüstriyel kırmızı çamur	Gerekli değil	Pigment/Kahverengi ve siyah renk veren pigment	Düşük	Ticari pigmentlerle karşılaştırılabilir stabilite ve renklendirme gücü	[52]
Elektrokaplama çamuru	Gerekli değil	Külçe, cüruf/ Yol döşemesi veya yapı malzemesi	Düşük	Potansiyel ikincil kaynak niteliğinde nihai ürünler	[53]
Elektrokaplama çamuru	Gerekli değil	Külçe/Çelik üretim işlemlerinde katkı maddesi veya izabe tesislerine gönderim	Düşük	En az %95 metal geri kazanımı	[54]
Seramik çamuru, atık cam	Gerekli değil	Kil boru/İnşaat sektöründe yapı malzemesi	Düşük	Geleneksel üretime kıyasla 200 °C daha düşük sıcaklıkta ateşleme	[55]
Seramik çamuru, geri dönüştürülmüş cam	Gerekli değil	Seramik karo/Seramik karo üretiminde astar	Düşük	Seramik karo üretimi için gerekli olan maliyetin önemli ölçüde azalması	[56]

Pan vd. (2015), ağır metal alçı taşı ve dekapaj çamurundan elde ettikleri cam-seramiklerin 5,3 GPa'lık yüksek bir mikro sertlik, 206 MPa'dan daha yüksek bir eğilme mukavemeti ve %0,13'ün altında kalan su emme oranı ile iyi mekanik özellikler sergileyen ürünler olduğunu belirtmişlerdir [35].

Özdemir vd. (2011), metal kaplama tesisinden kaynaklanan galvanik çamur atığının cam üretiminde kullanım potansiyelini araştırmış ve 1350 °C'de gerçekleştirdikleri vitrifikasyon işlemi için SiO<sub>2</sub> kaynağı olarak başka bir atık olan altın madenciliği

arıtma çamurunu kullanmışlardır. Galvanik çamur katkısı ağırlıkça %10 ve %20 olacak şekilde işlem gerçekleştirilmiş ve bunun sonucunda koyu yeşil (%10) ve kahverengi-mor (%20) renkte iki farklı cam elde edilmiştir. Yapılan çamur ilavesi ile cam ürünün amorf özelliklerinin bozulmadığı; metal salınımının da USEPA limit değerlerinin altında kaldığı belirtilmiştir. Bu çalışma sonucunda, katkı maddelerinin miktarları değiştirilerek farklı renk ve özelliklerde cam ürünlerin geliştirilebileceği öne sürülmüştür [36].



Yang vd. (2016), paslanmaz çelik çürufu ve cam kırıntısından (çüruf/cam kırıntısı kütle oranı 0,78:1,00) oluşturdukları karışıma dekupaj atık çamurunu (Şekil 4) da belli oranlarda (ağırlıkça %0, %7, %14 ve %21) ekleyerek elde ettikleri cam-seramiklerin özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, %14'e kadar yapılan atık çamur ilavesi ile su absorpsiyonunda azalma olurken, yoğunlukta artma olduğu gözlemlenmiş, buna bağlı olarak dekupaj atık çamuru katkısının elde edilen cam-seramik üründe fiziksel ve mekanik özellikleri büyük ölçüde arttırdığı bildirilmiştir. Bu çalışmada aynı zamanda, liç testleri sonucunda cam-seramiklerdeki ağır metal konsantrasyonlarının USEPA limit değerlerinin çok altında kaldığı belirlenmiş ve bu dayanıklı nihai ürünlerin güvenle inşaat malzemesi olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır [37].

Mymrin vd. (2016), 1050 °C'de geleneksel yöntemlerle hazırlanan seramiklerin bükülme direnç değeri olan 4,7 MPa'a karşılık, endüstriyel atıklardan elde edilen seramiğin (Şekil 4) bükülme direncini 18,4 MPa olarak bulmuşlardır [38].

Felisberto vd. (2018), galvanik çamurda bulunan kükürt ve karbonatların ayrışmasıyla açığa çıkan gazların cam matriste hapsolmesiyle, yoğunluğu düşük olan gözenekli yapılar elde etmişlerdir. Bu ürünlerin inşaat sektöründe yalıtım malzemesi olarak kullanıma uygun olduğu Starostina vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada [39] da kanıtlanmıştır [40].

Ballesteros vd. (2019) gerçekleştirdikleri çalışmada, kromat atıklarının vitrifikasyonu ile elde edilen cam-seramiklerin mekanik davranışını incelemişler ve elde edilen ürünlerin mukavemetinin geleneksel cam-seramiklerin mukavemet değerlerine kıyasla daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır [41].

Tan vd. (2019) yaptığı çalışmada, yakıt depolama havuzlarından kaynaklanan ve içerdiği önemli miktarda Mg ile U elementleri nedeniyle orta seviyeli radyoaktif atık sınıfına giren, hem metalik hem de oksit/hidroksit fazları içeren Magnox çamur atığının stabil hale getirilmesi için büyük miktarlarda demir içeren borosilikat cam bileşimi geliştirmişlerdir. Kullanılan baz camın yüksek Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği nedeniyle tek başına eritilmesi mullit potada hasara neden olmuş, ancak Magnox çamur atığının ilave edilmesi ile hasar büyük ölçüde engellenmiştir. Buna rağmen, %30'un üzerinde çamur ilavesinde gözlenen artık Mg parçacıklarının varlığı, atık yüklemesi arttıkça atıktaki bulunan Mg parçacıklarının hepsinin eriyik içinde çözünemeyeceğini düşündürmüş ve atık yüklemesini sınırlandıran faktör olmuştur. Geliştirilen bu cam ürünün doğru işleme koşulları altında, içeriğindeki ağır metalleri bünyesinde tutabileceği ve güvenle kullanılabilceği sonucuna varmışlardır [42].

### 3.2. Seramik Tuğla/Briket

Tuğla veya briket üretimi için kil yerine alternatif olarak çeşitli endüstrilerden kaynaklanan ve büyük miktarlarda açığa çıkan atık çamurların kullanılması son yıllarda yapılan pek çok araştırmanın konusu olmuştur. Demir içerikli çamurun, elde edilen tuğlanın mekanik özellikleri ve işlem sıcaklığındaki azalma konusunda olumlu etkilere sahip olduğu belirtilmiştir [43,44,45]. Ayrıca birçok çalışma, tuğla karışımına çamur eklenmesinin su emiliminde bir azalmaya neden olduğunu ortaya koymuştur [46].

Bir başka çalışmada Weng vd. (2003), tuğla kalitesinin, kullanılan atık çamur miktarına ve ateşleme sıcaklığına bağlı olduğunu, çünkü bu iki faktörün tuğlaların büzülmesine, su emilimine ve basınç dayanımına etki ettiğini belirtmişlerdir [47].

Mao vd. (2019), %30'a kadar artan cam miktarı ve fırın sıcaklığı ile galvaniz çamur katkılı tuğlaların basınç mukavemetinin de arttığını gözlemlemişler ancak, 1050 °C sıcaklıkta ve %30 atık cam ilavesinde ağır metallerin sızabilirliğinin limit değerleri aştığını da belirtmişlerdir. Bu yüzden, bu çalışma için, 950 °C sıcaklıkta ağırlıkça %15 atık cam ile %10 galvaniz çamuru karışımı tuğla üretimi için optimum koşullar olarak belirlenmiştir [48].

Kulkarni vd. (2019) çalışmalarında, akü endüstrisinden kaynaklanan atık çamur ile hazırladıkları tuğlaların (Şekil 4) basınç dayanımını arttırdığını gözlemlemişlerdir. 1000 ve 1050 °C'de ateşlenen %5 çamur katkılı tuğlaların basınç dayanımının, aynı sıcaklıkta ateşlenen geleneksel tuğlaların basınç dayanımının sırasıyla 1,2 ve 1,36 katı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca CaO içeriğine sahip akü çamurunun, tuğlalara sarı ve bej ile açık kahverengi arasında renk verdiği saptanmış; beyaz veya sarı tuğlaların genellikle kırmızı tuğlalardan daha pahalı olması nedeniyle, akü çamuru ilavesinin tuğla üretiminde faaliyet gösteren endüstriler için kârlı olabileceği sonucuna varılmıştır [13].

Bunlara karşılık Zhang vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, elektrokaplama çamurunun kil tuğla (Şekil 4) üretiminde hammadde olarak kullanım potansiyeli araştırılmış ve ağırlıkça %10'a varan çamur ilavesinin elde edilen ürünlerdeki basınç dayanımını 23,5 MPa'dan 15,5 MPa'ya düşürdüğü, su emilimini %2,7'den 3,46'ya çıkardığı ve görünür gözenekliliğin de artan çamur oranıyla birlikte %1,8'den %3,15'e yükseldiği belirlenmiştir. Elektrokaplama çamuru ilavesi, ürünün mekanik ve fiziksel özelliklerini olumsuz yönde etkilese de standartları karşıladığı için yeterli bulunmuştur. Bu çalışma için belirlenen optimum çamur ilavesi mekanik özellikler dikkate alındığında ağırlıkça %8'in altında kalmış olmasına rağmen, elektrokaplama çamurundan tuğla üretiminin, çamur bileşiminde bulunan ağır metallerin stabilizasyonunda etkili

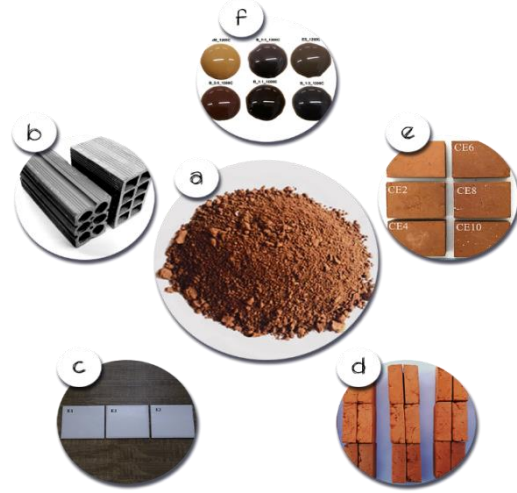
olacağı sonucuna varılmıştır [49]. Starostina vd. (2018) ise, atık suyun nötralizasyon işlemi sonucunda ortaya çıkan yüksek demir içerikli atık çamurları, seramik tuğla üretimi için ham yükün bileşiminde ağırlıkça %3 ila %30 oranında kullanmışlardır. Ancak artan çamur oranıyla birlikte seramik ürünlerdeki gözeneklilik de artmış, bu durum da fiziksel ve mekanik özelliklerin azalmasına neden olmuştur. Ham yüke ağırlıkça %5'e kadar yapılan çamur ilavesinin fiziksel ve mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemediği ve elde edilen ürünlerin ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır [39].

### 3.3. Pigment

Estetik açıdan ürünün çekiciliğini arttıran ticari pigmentlerin kullanımının yerine bir atığın değerlendirilmesi fikri son derece caziptir. Bu noktadan hareketle Gargori vd. (2018), Cr/Ni/Cu kaplama çamur atığının 110 °C'de kurutulmasının ardından 1100 °C'de fırınlanmasıyla elde edilen pigmentlerin seramik endüstrisinde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bunun sonucunda, atık çamurun kurutulmasıyla elde edilen pigmentlerin sır bünyelerine dahil edildiğinde kusurlara neden olduğunu; ancak 1100 °C'de fırınlanmış atık çamurdan elde edilen pigmentin sır bünyesinde herhangi bir kusura neden olmadığını ve sır gri ile siyah arasında değişen bir renk verdiğini bildirmişlerdir [50].

Mitiu vd. (2018), elektrokaplama çamurundan elde edilen çeşitli miktarlarda Cr ve Fe pigmentlerini, beyaz ve şeffaf sır bileşimlerine dahil ederek renkli seramik ürünler elde etmeyi amaçlamışlardır. Cr, Fe ve Zn'nin çözüldürülmesiyle gerçekleştirilen ekstraksiyon işlemi sonucunda yeşil krom pigmenti [Cr(OH)<sub>3</sub>], sarı krom pigmenti I (PbCrO<sub>4</sub>), sarı krom pigmenti II (BaCrO<sub>4</sub>) ve kırmızı demir pigmenti [Fe(OH)<sub>3</sub>] elde etmişlerdir. Bu pigmentleri farklı oranlarda sır bileşimlerine dahil ederek metal sızma değerleri izin verilenin altında kalan çevre dostu ürünler elde etmeyi başarmışlardır [51].

Carneiro vd. (2018) ise, seramik endüstrisinde kullanılan ticari pigmentlerin yerine endüstriyel atık olan kırmızı çamurun (RM (Red Mud)) ve elektrokaplama çamurunun (ES (Electroplating Mud)) farklı oranlarda (RM:ES = 1:1, 1:3, 3:1) karıştırılmasıyla elde edilecek pigment üretimi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bunun sonucunda, RM:ES = 1:1 ve 1:3 oranlarında 1200 °C'de hazırlanarak elde edilen pigmentlerin, ilave edildikleri şeffaf sırlara (Şekil 4) sırasıyla kahverengi ve siyah renk vererek ticari pigmentlerle benzer renklendirme özelliklerine sahip oldukları belirlenmiştir. Sonuç olarak bu çalışmalar ile seramik endüstrisinde kullanılmakta olan ticari pigmentler yerine atık bazlı pigmentlerin de kullanılabilceği açıkça görülmüştür [52].



**Şekil 4.** Arıtma çamurundan elde edilen yapı malzemeleri (a: kurutulmuş arıtma çamuru [37], b: seramik blok [38], c: seramik karo [56], d: renkli tuğla [13], e: kil tuğla [49], f: elde edilen pigmentleri içeren şeffaf sırlar [52])

### 3.4. Diğer Ürünler

Atık çamurun cam/cam-seramik, tuğla/briket ve pigment elde etmek için vitrifiye edilmesinin dışında birkaç farklı uygulama tespit edilmiştir. Chou vd. (2012), elektrokaplama tesisinden çıkan atık çamur içerisindeki değerli metalleri vitrifikasyon yöntemi ile geri kazanmak için araştırmalar yapmışlardır. Gerçekleştirdikleri vitrifikasyon işleminin ana ürünleri "külçe" ve yoğunluk farkı nedeniyle külçe yüzeyinde biriken "cüruf" olmuştur. Bu çalışmanın sonucu olarak, çoğunlukla silika ve kalsiyumdan oluşan cürufun, yol döşemesi veya yapı malzemesi olarak yeniden kullanılabilceği ortaya konulmuştur [53].

Huang vd. (2013) de, bir elektrokaplama tesisinden çıkan atık çamura mümkün olduğunca az katkı maddesi (kireçtaşı ve cam kırıntısı) ilavesiyle değerli metallerin geri kazanımı üzerinde çalışmışlardır. Katkı maddesi/çamur oranı 0,2 olduğunda elde edilen külçe miktarı ağırlıkça %57,6 ile maksimum seviyeye ulaşmış ve bu oranda külçe içerisindeki metal geri kazanımının (Ni-Fe alaşımı şeklinde) %95'ten yüksek olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak elde edilen alaşımın daha fazla metal geri kazanımı için izabe tesislerine gönderilebileceği veya doğrudan çelik üretim işlemlerinde bir katkı maddesi olarak kullanılabilceği bildirilmiştir [54].

Bu çalışmalardan farklı olarak, Al Hoseny vd. (2018), kil boruları üretmek için iki farklı endüstriyel atık olan seramik çamur atığı ve atık cam kırıntısının birlikte kullanımını değerlendirmişlerdir. Kırılma katsayısı üretilmek istenen bu borularla ilgili en önemli husus olduğundan optimum koşullar (min. 1050 °C fırın sıcaklığı, min. 1 saatlik ısıtma süresi, şişkinliği önlemek için %5 cam atığı ile max. %6,2 çamur seviyesi) bu faktör göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Belirlenen koşullarda elde edilen

borunun kırılma katsayısının, toprağa gömülü herhangi bir boyuttaki boru ve beton kızağa gömülü  $\geq 8''$  borular için minimum gereksinimi aşan eğilme mukavemeti gösterdiğini bildirmişlerdir [55].

Nandi vd. (2015), seramik karo üretim endüstrisinden kaynaklanan seramik çamuru ile geri dönüştürülmüş camın birlikte değerlendirilerek seramik karo üretiminde (Şekil 4) astar olarak kullanılabilme potansiyelini incelemişlerdir. Bu karışıma kireçtaşı, dolomit, uleksit (beyaz veya saydam bir borat minerali) ve potasyum nitrat hammadde olarak eklenerek 3 farklı formülasyon hazırlanmış ve içlerinde en yüksek seramik çamuru içeriğine sahip astar numunesi endüstriyel bir teste tabii tutulmuştur. Ticari ürünler baz alındığında, elde edilen ürünün sırlı seramik karoların üretiminde güvenle kullanılabilceği ortaya konmuştur [56].

#### IV. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Arıtma çamuru yönetimi, çevresel anlamda çözüm gerektiren önemli bir sorundur. Bununla birlikte, oluşan bu çamurların yapısında Fe, Al ve Ca başta olmak üzere çimento harçlarına ve ticari olarak kullanılan diğer yapı malzemelerine oksitler şeklinde eklenen pek çok değerli bileşiğin bulunması, hızla tükenen hammadde kaynaklarının ikamesine olanak sağlamaktadır. Oluşan atık çamurlardan ürün (cam/cam-seramik, tuğla/briket vb.) elde etmek için kullanılan vitrifikasyon işlemi, çamurun hammadde şeklinde geri kazanımına olanak sağlarken, aynı zamanda atık içerisindeki ağır metallerin stabilizasyonunu da gerçekleştirir. Diğer yöntemlere kıyasla fazla enerji kullanımına bağlı olarak artan maliyetler, elde edilen ürünün ticari olarak satışının gerçekleştirilmesiyle birlikte azaltılabilir. Bu yöntem, bileşimi karmaşık olan çok çeşitli atıklara uygulanabilir olmasıyla da dikkat çekicidir. Vitrifikasyon yönteminde kullanılan ısı işleminin neredeyse tüm organik bileşikler yok etme kabiliyeti sayesinde, atıkların bileşiminde bulunan, miktar ve çeşitlilik bakımından inanılmaz boyutlara ulaşabilen kirleticilerin belirlenmesi ve uygun atık bertaraf yönetiminin seçilmesi için harcanacak zaman ve maliyetten de tasarruf sağlanmış olunur. Bununla birlikte, arıtma çamurlarından yapı malzemeleri elde etmede kullanılacak tek bir metot geliştirmek mümkün değildir. Her bir arıtma çamurunun vitrifikasyonu için gerekli optimum şartlar kimyasal özelliklerine bağlı olarak değişecektir. Bu durum elde edilen malzemenin fiziksel ve mekanik yapısını da etkileyecektir. Arıtma çamurlarının yapı malzemeleri olarak kullanımındaki temel zorluk, artan çamur miktarı ile elde edilen üründe azalan dayanıklılık, artan gözeneklilik ve buna bağlı olarak su emme kapasitesindeki artış şeklindedir. Ancak bu durum üretilen malzemelerin kullanımının mümkün olmadığı anlamını taşımamaktadır. Ürünlerin doğru şekilde kategorize edilmesi ve uygun fiyatlandırılması ile kendine uygulama alanı bulması mümkündür. Buna

karşılık, içeriğinde yüksek oranda demir bulunan atıkların vitrifikasyonu ile elde edilen ürünlerde basınç dayanımı artarken, su emme kapasitesinde azalma meydana gelerek olumlu bir etkiye sahip olduğu yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır. Tüm bunların yanı sıra, üretilen malzemelerin çevre için risk oluşturmaması da kullanılabilir olması açısından en önemli etkenlerden biridir. İncelenen çalışmaların tümünde ağır metaller başarılı bir şekilde elde edilen ürün içerisinde hapsolmüştür. Sızma olsa dahi bu konsantrasyonlar limit değerlerinin altında kaldığından ihmal edilmektedirler. Sonuç olarak bu çalışma ile farklı endüstriyel proseslerden kaynaklanan atık çamurların başarılı bir şekilde vitrifiye edilerek, döngüsel ekonomi kavramına da uyacak şekilde inşaat sektöründe kullanılmak üzere katma değerli ürünlere dönüşebileceği ortaya konmuştur.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı (Proje No: 20ADP186 ve TÜBİTAK (Proje No: 120Y059) tarafından desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Christodoulou, A. ve Stamatelatos, K. (2016). Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide. *Water Sci. Technol*, 73, 453–462.
- [2] Yang, G., Zhang, G. ve Wang, H. (2015). Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China. *Water Res*, 78, 60–73.
- [3] Zaker, A., Chen, Z., Wang, X. ve Zhang, Q. (2019). Microwave-assisted pyrolysis of sewage sludge: a review. *Fuel Process. Technol*, 187, 84–104.
- [4] Maiden, P., Hearn, M., Boysen, R., Chier, P., Warnecke, M. ve Jackson, W. (2015). Alum Sludge Re-Use, Investigation (10OS-42) Prepared by GHD and Centre for Green Chemistry (Monash University) for The Smart Water Fund. Victoria, ACTEW Water & Seawater, Melbourne, Australia.
- [5] Zhang, Q., Hu, J., Lee, D.-J., Chang, Y. ve Lee, Y.-J. (2017). Sludge treatment: current research trends. *Bioresour. Technol*, 243, 1159–1172.
- [6] Lynn, C.J., Dhir, R.K. ve Ghataora, G.S. (2016). Sewage sludge ash characteristics and potential for use in bricks, tiles and glass ceramics. *Water Sci. Technol*, 74, 17–29.
- [7] Gherghel, A., Teodosiu, C. ve De Gisi, S. (2019). A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. *J. Cleaner Prod.*
- [8] Lynn, C.J., Dhir, R.K., Ghataora, G.S. ve West, R.P. (2015). Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. *Constr. Build. Mater*, 98, 767–779.

- [9] Świerczek, L., Cieřlik, B. M. ve Konieczka, P. (2018). The potential of raw sewage sludge in construction industry – A review. *Journal of Cleaner Production*, 200, 342–356.
- [10] Chen, Y., Zhang, Y., Chen, T., Zhao, Y. ve Bao, S. (2011). Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings. *Constr. Build. Mater*, 25 (4), 2107–2111.
- [11] Smol, M., Kulczycka, J., Henclik, A., Gorazda, K. ve Wzorek, Z. (2015). The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. *J. Clean. Prod*, 95, 45–54.
- [12] Supino, S., Malandrino, O., Testa, M. ve Sica, D. (2016). Sustainability in the EU cement industry: the Italian and German experiences. *J. Clean. Prod*, 112, 430–442.
- [13] Kulkarni, V. V., Golder, A. K. ve Ghosh, P. K. (2019). Production of composite clay bricks: A value-added solution to hazardous sludge through effective heavy metal fixation. *Construction and Building Materials*, 201, 391–400.
- [14] Salan, T. (2014). Atıksu Arıtma Çamurlarının Türkiye'deki Durumu ve Enerji Üretiminde Değerlendirilme Olanakları. *ICCI 2014, Conference Paper*, 190–195.
- [15] Mininni, G., Blanch, A., Lucena, F. ve Berselli, S. (2015). EU policy on sewage sludge utilization and perspectives on new approaches of sludge management. *Environ. Sci. Pollut. Res*, 22 (10), 7361–7374.
- [16] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2020). 2018 Yılı Tehlikeli Atık İstatistikleri Bülteni.
- [17] Jantzen, C. M. (2011). Historical development of glass and ceramic waste forms for high level radioactive wastes. *Handbook of Advanced Radioactive Waste Conditioning Technologies*, 159–172.
- [18] Bernardo, E., Scarinci, G. ve Colombo, P. (2017). Vitriification of Waste and Reuse of Waste-Derived Glass. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, 1–34.
- [19] Climate Policy Watcher, Ex Situ And In Situ Vitriification, <https://www.climate-policy-watcher.org/industrial-wastes/ex-situ-and-in-situ-vitriification.html>, (Nisan 2021).
- [20] Meegoda, J. N., Ezeldin, A. S., Fang, H.-Y. ve Inyang, H. I. (2003). Waste Immobilization Technologies. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 7(1), 46–58.
- [21] Cieřlik, B.M., Namieřnik, J. ve Konieczka, P. (2015). Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. *J. Cleaner Prod*, 90, 1–15.
- [22] De Carvalho Gomes, S., Zhou, J. L., Li, W. ve Long, G. (2019). Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 145, 148–159.
- [23] USEPA (1992). SW-846 Test Method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP).
- [24] Tang, Y., Wu, P., Shih, K. ve Liao, C. (2019). Industrial sludge for ceramic products and its benefit for metal stabilization. *Industrial and Municipal Sludge*, 253–293.
- [25] Buelt, J. L. ve Farnsworth, R. K. (1991). In Situ Vitriification of Soils Containing Various Metals. *Nuclear Technology*, 96(2), 178–184.
- [26] Byers, M. G., FitzPatrick, V. F. ve Holtz, R. D. (1991). Site Remediation by In Situ Vitriification. *Transportation Research Record*, 1312, 162–166.
- [27] USEPA (1989). Innovative Technology: In-Situ Vitriification. *Solid Waste and Emergency Response*, Directive 9200.5-251FS.
- [28] Climate Policy Watcher, Electric Furnace Vitriification System, <https://www.climate-policy-watcher.org/industrial-wastes/figure-5-electric-furnace-vitriification-system-courtesy-of-usepa.html>, (Nisan 2021).
- [29] Bernardo, E. ve Dal Maschio, R. (2011). Glass–ceramics from vitriified sewage sludge pyrolysis residues and recycled glasses. *Waste Management*, 31(11), 2245–2252.
- [30] Vernaz, E., Gin, S. ve Veyer, C. (2012). Waste Glass. *Comprehensive Nuclear Materials*, 5, 451–483.
- [31] Borowski, G. (2012). Suitability Tests of Fly Ashes Vitriification from Sewage Sludge Incineration. *Archives of Environmental Protection*, 38(2).
- [32] Chinnam, R.K., Francis, A.A., Will, J., Bernardo, E. ve Boccaccini, A.R. (2013). Review. Functional glasses and glass-ceramics derived from iron rich waste and combination of industrial residues. *J. Non Cryst. Solids*, 365, 63–74.
- [33] Garcia-Valles, M., Avila, G., Martinez, S., Terradas, R. ve Nogués, J. M. (2007). Heavy metal-rich wastes sequester in mineral phases through a glass–ceramic process. *Chemosphere*, 68(10), 1946–1953.
- [34] Silva, A. C., Mello-Castanho, S., Guitian, F., Montero, I., Esteban-Cubillo, A., Sobrados, I., Sanz, J. ve Moya, J. S. (2008). Incorporation of Galvanic Waste (Cr, Ni, Cu, Zn, Pb) in a Soda–Lime–Borosilicate Glass. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(4), 1300–1305.
- [35] Pan, D. A., Li, L. J., Yang, J., Bu, J. B., Guo, B., Liu, B., Zhang, S. G. ve Volinsky, A. A. (2015). Production of glass–ceramics from heavy metal gypsum and pickling sludge. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(9), 3047–3052.
- [36] Özdemir, Ö.D., Figen, A.K. ve Piřkin S. (2011). Utilization of Galvanic Sludge as Raw Material

- for Production of Glass. *International Conference on Chemistry and Chemical Process*, 10, 45–49.
- [37] Yang, J., Zhang, S.-G., Pan, D.-A., Liu, B., Wu, C.-L. ve Volinsky, A. A. (2016). Treatment method of hazardous pickling sludge by reusing as glass–ceramics nucleation agent. *Rare Metals*, 35(3), 269–274.
- [38] Mymrin, V., Alekseev, K., Catai, R. E., Nagalli, A., Aibuldinov, Y. K., Bekturganov, N. S., Rose, J. L. ve Izzo, R. L. S. (2016). Red ceramics from composites of hazardous sludge with foundry sand, glass waste and acid neutralization salts. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 753–761.
- [39] Starostina, I., Simonov, M., Volodchenko, A., Starostina, Y., Fomin, A. ve Fokina, E. (2018). The usage of iron-containing sludge wastes in ceramic bricks production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 365, 032066.
- [40] Felisberto, R., Santos, M. C., Arcaro, S., Basegio, T. M. ve Bergmann, C. P. (2018). Assessment of environmental compatibility of glass–ceramic materials obtained from galvanic sludge and soda–lime glass residue. *Process Safety and Environmental Protection*, 120, 72–78.
- [41] Ballesteros, S., Rincón-Mora, B., Jordán, M.M. ve Rincón, J.Ma. (2019). Vitrification of a sodium chromate waste and mechanical properties of a final glass-ceramic. *Materials Letters: X*, 100025.
- [42] Tan, S., Kirk, N., Marshall, M., McGann, O. ve Hand, R. J. (2019). Vitrification of an intermediate level Magnox sludge waste. *Journal of Nuclear Materials*, 515, 392–400.
- [43] Anderson, M., Biggs, A. ve Winters, C. (2003). Use of two blended water industry by-product wastes as a composite substitute for traditional raw materials used in clay brick manufacture. *Recycling and Reuse of Waste Materials*, 417–426.
- [44] Teixeira, S., Santos, G., Souza, A., Alessio, P., Souza, S. ve Souza, N. (2011). The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. *Appl. Clay Sci*, 53 (4), 561–565.
- [45] Kizinievič, O., Žurauskienė, R., Kizinievič, V. ve Žurauskas, R. (2013). Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. *Constr. Build. Mater*, 41, 464–473.
- [46] Wolff, E., Schwabe, W.K. ve Conceição, S.V. (2015). Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics. *J. Clean. Product*, 96, 282–289.
- [47] Weng, C.-H., Lin, D.-F. ve Chiang, P.-C. (2003). Utilization of sludge as brick materials. *Adv. Environ. Res*, 7 (3), 679–685.
- [48] Mao, L., Wu, Y., Zhang, W. ve Huang, Q. (2019). The reuse of waste glass for enhancement of heavy metals immobilization during the introduction of galvanized sludge in brick manufacturing. *Journal of Environmental Management*, 231, 780–787.
- [49] Zhang, M., Chen, C., Mao, L. ve Wu, Q. (2018). Use of electroplating sludge in production of fired clay bricks: Characterization and environmental risk evaluation. *Construction and Building Materials*, 159, 27–36.
- [50] Gargori, C., Prim, S. R., LLusar, M., Folgueras, M. V. ve Monrós, G. (2018). Recycling of Cr/Ni/Cu plating wastes as black ceramic pigments. *Materials Letters*, 218, 341–345.
- [51] Mituiu, M.A., Marcus, M.I., Vlad, M. ve Balaceanu, C.M. (2018). Stability of Ceramic Glazes Obtained by Valorification of Anorganic Pigments Extracted from Electroplating Sludge. *Revista de Chimie*, 69(3), 571–574.
- [52] Carneiro, J., Tobaldi, D. M., Capela, M. N., Novais, R. M., Seabra, M. P. ve Labrincha, J. A. (2018). Synthesis of ceramic pigments from industrial wastes: Red mud and electroplating sludge. *Waste Management*, 80, 371–378.
- [53] Chou, I.-C., Kuo, Y.-M., Lin, C., Wang, J.-W., Wang, C.-T. ve Chang-Chien, G.-P. (2012). Electroplating sludge metal recovering with vitrification using mineral powder additive. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 45–49.
- [54] Huang, R., Huang, K.-L., Lin, Z.-Y., Wang, J.-W., Lin, C. ve Kuo, Y.-M. (2013). Recovery of valuable metals from electroplating sludge with reducing additives via vitrification. *Journal of Environmental Management*, 129, 586–592.
- [55] Al Hoseny, N. F., Amin, S. K., Fouad, M. M. K. ve Abadir, M. F. (2018). Reuse of ceramic sludge in the production of vitrified clay pipes. *Ceramics International*, 44(11), 12420–12425.
- [56] Nandi, V. S., Raupp-Pereira, F., Montedo, O. R. K. ve Oliveira, A. P. N. (2015). The use of ceramic sludge and recycled glass to obtain engobes for manufacturing ceramic tiles. *Journal of Cleaner Production*, 86, 461–470.

## General Assessment of PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> in Ağrı City Centre

*Ağrı Şehir Merkezinde PM<sub>10</sub> ve SO<sub>2</sub>'nin Genel Değerlendirmesi*

Yiğitalp KARA<sup>1</sup> , Mehmet ÇİVİCİ<sup>2</sup> , Uygur KARTUM<sup>2</sup> , Rosa M. FLORES<sup>3\*</sup> 

<sup>1</sup>*Istanbul Technical University, Department of Meteorological Engineering, Faculty of Aeronautics and Astronautics, İstanbul, Turkey*

<sup>2</sup>*ITU Vocational and Technical Anatolian High School, İstanbul, Turkey*

<sup>3</sup>*Marmara University Department of Environmental Engineering, Engineering Faculty, İstanbul, Turkey*

### Abstract

The emission of air pollutants has been increasing dramatically because of the high-energy consumption and usage of transportation systems triggered by the industrial revolution. In addition, the development of technology, high demand for conventional sources, unplanned urbanization, and rapid growth of population are some of the most important factors for the increase of particulate matter (PM) and sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) in the last 20 years in Turkey. Ağrı, which is a rural province having more high plateau areas and agricultural lands than residential areas, is less affected by these factors compared to developed cities. In this work, variations of PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> concentrations were evaluated from January to December of 2018. Overall, it was found that SO<sub>2</sub> concentrations were well below the regulations, and the majority of the air pollution in Ağrı was due to PM<sub>10</sub>. Also, concentrations of PM<sub>10</sub> were higher than expected due to the location of the station. Hourly PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> concentrations ranged as 9.4-179.7 and 1.4-39.4 µg/m<sup>3</sup>, with average values of 52.1 and 8.3 µg/m<sup>3</sup>, respectively. According to the Turkish Aerosol Quality Index (AQI), daily PM<sub>10</sub> concentrations were 51% in the “good” class, 44% in the “moderate” class, and 5% in the “sensitive” class. While SO<sub>2</sub> measurement values were 100% in the “good” class in 2018. According to the results obtained in this work, it is recommended that more efforts are done to decrease emissions of PM<sub>10</sub> throughout the year, particularly during the heating season.

**Keywords:** Air Quality, Air Pollution, Diurnal Variation, Seasonal Variation, Rural Area, Turkey

### Öz

Sanayi devriminin tetiklediği yüksek enerji tüketimi ve ulaşım sistemlerinin kullanımı nedeniyle hava kirleticilerinin miktarı önemli ölçüde artmaktadır. Ayrıca, teknolojinin gelişmesi, geleneksel kaynaklara olan yüksek talep, plansız kentleşme ve hızlı nüfus artışı, Türkiye’de son 20 yılda partikül maddenin (PM) ve sülfür dioksitin (SO<sub>2</sub>) artışının en önemli sebeplerinden bazılarıdır. Yerleşim alanlarına göre daha fazla kırsal alanı ve tarım arazisine sahip kırsal bir il olan Ağrı, gelişmiş illere göre bu faktörlerden daha az etkilenmektedir. Bu çalışmada, 2018 yılının Ocak-Aralık ayları arasında PM<sub>10</sub> ve SO<sub>2</sub> konsantrasyonlarının değişimleri değerlendirilmiştir. Genel olarak, SO<sub>2</sub> konsantrasyonlarının yönetmeliklerin oldukça altında olduğu ve Ağrı'daki hava kirliliğinin büyük kısmının PM<sub>10</sub>'dan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Ayrıca, İstasyonun konumundan dolayı partikül madde konsantrasyonları beklenenin üstünde çıkmıştır. Saatlik PM<sub>10</sub> ve SO<sub>2</sub> konsantrasyonları 9,4-179,7 ve 1,4-39,4 µg/m<sup>3</sup> arasında değişirken, ortalama değerler ise sırasıyla 52,1 ve 8,3 µg/m<sup>3</sup> olarak tespit edilmiştir. Hava kalitesi indeksine (AQI) göre günlük PM<sub>10</sub> konsantrasyonlarının %51’i “iyi”, %44’ü “orta” ve %5’i “hassas” sınıfta bulunmuştur. 2018 yılında SO<sub>2</sub> ölçüm değerleri % 100 “iyi” sınıfında yer alırken. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre PM<sub>10</sub> emisyonlarının azaltılması için yıl boyunca ve özellikle ısıtma mevsiminde daha fazla çaba harcanması önerilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Air Quality, Air Pollution, Diurnal Variation, Seasonal Variation, Rural Area, Turkey

## I. INTRODUCTION

Air pollution is considered as the most important environmental problem. It can be defined as organic and inorganic pollutants whose concentrations exceed air quality standards determined by various sources in a certain place. Pollutants causing a decrease in the air quality can be classified into two groups as aerosols and gases. Particulate matter (PM) consists of suspended solid- and liquid-phase substances in the air and poses the most significant threat to health [1]. Particles such as dust, pollen, or mold in the atmosphere with 10 microns or less in diameter are called PM<sub>10</sub>. Particles which are formed as a result of combustion, organic compounds with 2.5 microns or less in diameter, are called PM<sub>2.5</sub>. Besides the physical properties of particulate matter, its chemical composition is also very important for health. Particulate matter can contain heavy metals such as mercury, lead, cadmium, and carcinogenic chemicals, and pose a significant threat to health [2]. Also, Sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) is an invisible gas with a strong odor and decreases air quality by creating toxicity for living creatures and the general ecosystem.

Many countries around the world have prepared various regulations, restrictions, and emergency plans on pollutant concentrations to reduce their potential harm. In order to achieve this, data is provided in real-time from in-situ measurement stations installed in many locations. In the world, there are various thresholds and categorizations for gases and aerosols to find out whether the atmosphere is polluted or not. For example, the US-EPA Air quality index (AQI) which is adapted by most of the countries according to their own legislation is used for daily reporting of air quality (Table 1).

There are various sources of PM and SO<sub>x</sub>. For example, volcanic activities, forest fires, organic decay, and dust transport are some examples of natural pollutant sources. Also, transportation (motor vehicles, aircraft, ships, etc.), fossil fuel usage, industrial processes, agricultural activities, solid waste storage areas can be examples of anthropogenic sources of these pollutants [4]. The existence and impact of the various pollution sources listed above vary depending on location and time. There are many environmental and biological effects of PM and SO<sub>x</sub>. For example, decrease in incoming solar radiation and visibility, decrease in the efficiency of the various agricultural products caused by a decrease in sunlight, and negative effects on aquatic ecosystems due to air-water transfer are also important effects of PM and SO<sub>x</sub>. Furthermore, long-range transport from desert dust and other urban areas affects the marine ecosystem, and human health such as respiratory issues and toxicity due to the complex chemical composition such as metals in inhalable particles [5][6].

In the world, there are many studies conducted in terms of finding out atmospheric pollution in cities. For example, In Tehran, AQI has been calculated for PM<sub>2.5</sub> and it was found that for 4 years consisting of the 2010-2013 period, the air quality exceeded the “good” class by falling in the category of “unhealthy

for sensitive groups” [7]. Also, in China, it was found that the average API-derived PM<sub>10</sub> concentrations have been declined continuously according to the daily air quality reports taken from 86 cities [8]. In India Kerala, six major sites have been studied in terms of the intensity of air pollution by applying AQI. It was found that most of the air pollution in those sites was caused by particulate matter and the most polluted district was Ernakulam due to the existence of both, residential and industrial areas [9].

In Turkey, there have been many studies conducted about SO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub>. However, there is a limited number of articles in the literature that analyze or evaluate air pollution for the province of Ağrı. One of the most recent studies assesses the air quality of Turkey by extracting a general picture of PM<sub>10</sub> distribution in the provinces of Turkey [10]. Another study uses GIS to create spatial distribution maps to determine spatial patterns of PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> [11]. Also, there is a study examining the effects of meteorological parameters such as temperature, pressure, and wind on PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> concentrations [12]. Another study is about analyzing daily PM<sub>10</sub> data in 2014 in Eastern provinces statistically [13]. Lastly, Iğdır, which is one of the eastern provinces like Ağrı, the amount of particulate matter is high due to the heating season in which poor-quality fuel is used in the winter and due to the dust coming from the dirt roads in the summer according to 2014-2019 period [14]. It is clear that the studies investigating the particulate matter and sulfur dioxide for the province of Ağrı are not enough.

The first aim of this study is to examine and evaluate daily, monthly, and annual changes of PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> concentrations measured in the city center of Ağrı. In addition, another aim is to provide a useful statistical analysis to evaluate the overall air pollution in Ağrı with respect to Air Quality Indices (AQI) and regulations.

**Table 1.** US-EPA AQI and breakpoints [3]

Air Quality Index	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )		NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	CO (µg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )		PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	
	1H Mean	24H Mean	1H Mean	8H Mean	8H Mean	1H Mean	24H Mean	24H Mean	
0-50	0-93		0-102	0-5,2	0-108		0-54	0.0-12,0	Good
51-100	94-200		103-192	5,3-11	109-248		55-154	12,1-35,4	Moderate
101-150	201-493		193-689	11,1-14,5	249-328		155-254	35,5-55,4	Sensitive
151-200	494-810		690-1242	14,6-18	329-408		255-354	55,5-150,4	Unhealthy
201-300	811-1609		1243-2380	18,1-35,5	409-808		355-424	150,5-250,4	Bad
301-400	1.610-2.141		2.381-3.145	35,6-47,1	809-1.008		425-504	250,5-350,4	Dangerous
401-500	2.142-2.674		3.146-3.910	47,2-58,8	1.009-1.208		505-604	350,5-500,4	Dangerous

## II. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Study Area

Ağrı is located at 39.7191° North latitude and 43.0506° East longitude (Figure 1). The provincial center of Ağrı was established at an altitude of 1,640 meters above sea level. The province has gained importance due to its location on the road connecting Anatolia with Iran [15]. 46% of the lands of the province of Ağrı are mountains, 29% are plains, and 25% are plateaus. Many peaks are found in Ağrı whose heights exceed 3,000 meters, including 5,137 m (Büyük Ağrı Mountain) and 3,896 m (Küçük Ağrı Mountain) [16]. Ağrı Province with a total population of 551,177, ranks 38 of 81 cities in terms of the total population in Turkey. In 2013, Turkey's arithmetic population density was 85.97 km<sup>-2</sup>, and the number of people per km<sup>2</sup> in Ağrı was 48.45 [17]. It is clear that settlement, transportation, and construction difficulties due to the complex topography cause a decrease in the socio-economic value of the region, which is strongly related to population.

Ağrı province has a severe terrestrial climate. In general, from West to East in the region, the continent is even more affected by the reduction of the sea effect and the increase of the altitude which causes a change in wind pattern. Under the influence of terrestrial polar air masses that come from Siberia, the winters tend to be harsh and long [18]. In addition, the climate in this region falls in the “Dsb” class defined as having continental climate: severe winter, dry, and cool summer, according to the Köppen-Geiger climate classification which is one of the most frequently used climate classification methods in the world [19].

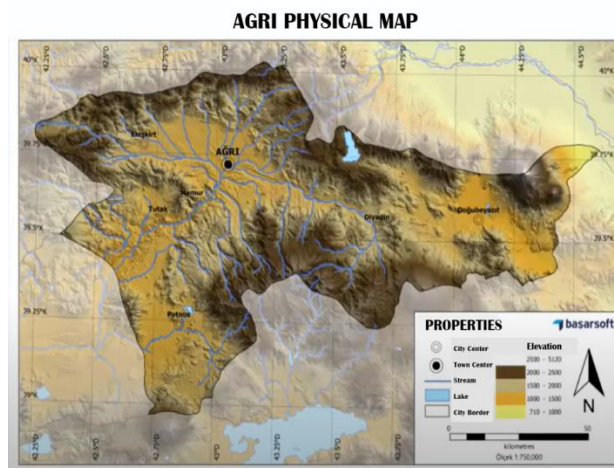


Figure 1. Ağrı topographic map [20]

### 2.2. Information About the Station’s Location and Topography

Stad Street is located 10 meters east of the sampling station and Erzurum Boulevard is located 170 meters south. There are official institution buildings, workplaces, and residences heated by natural gas and coal after 40 meters of the station. Also, Ağrı Sugar Factory that uses natural gas as fuel is located 3.8 km northwest of the station. However, this factory is not

subjected to the continuous emission measurement communique (SEÖS), which defines the principle of continuous measurement, monitoring, and transfer process the pollutant data to the ministry system by the local administrations. The location of the station in the middle of two-way single-lane dirt roads is particularly vulnerable to rising dust due to large vehicle crossings. In addition, there is a wall of the stadium to the east of the station. Also, there is an agricultural land in the north of the station, residential areas in the northeast, east, and south, and a construction area in the southwest direction (Figure 2).

In the province of Ağrı, the city center, which is around 200-250 meters lower than the surrounding elevations, follows the characteristics of a valley (Figure 3). Due to this geographical structure, the winds causing the dispersion of air pollution become difficult to enter the inner part of the city. In addition, the topography allows the formation of an inversion layer, especially at night when atmospheric stability is high.

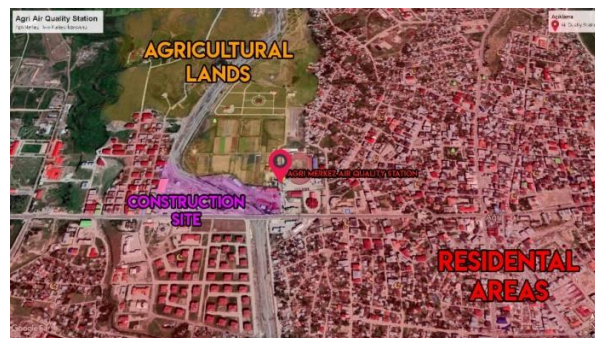


Figure 2. Ağrı Merkez AQI station (Google Earth)

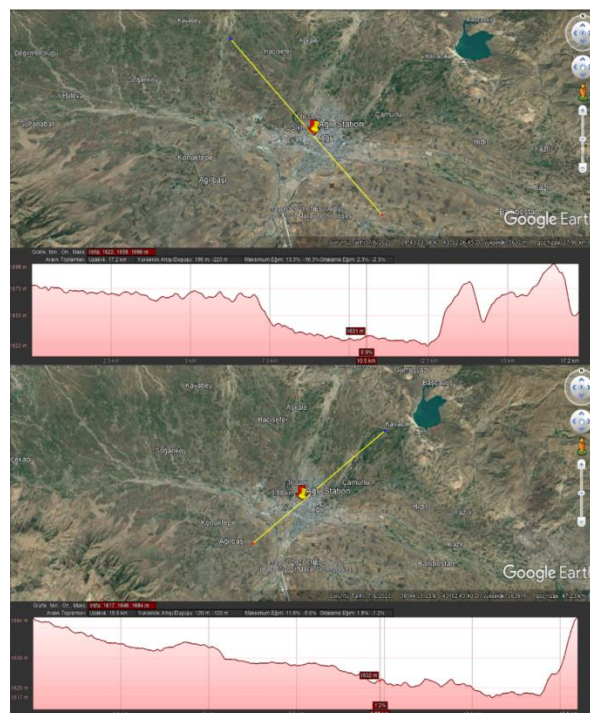


Figure 3. Air Quality Station Centered Topography and Elevation of Ağrı (Google Earth)



### 2.3. Data

In this study, hourly pollution data ( $PM_{10}$  and  $SO_2$ ) were obtained from the Ministry of Environment and Urbanization of the Permanent Monitoring Center [21]. Also, hourly wind speed and direction data were gathered from the Turkish State Meteorological Service. The time period of this study was taken as 01.01.2018 - 31.12.2018.

### 2.4. Methodology

$PM_{10}$  and  $SO_2$  concentrations were obtained from the National Air Quality Monitoring Network (AQMN) in Turkey from January to December 2018 for the station in Ağrı (Merkez) (Latitude: 43.0402; Longitude: 39.7205; Altitude: 1,640 m) (Figure 2). The AQMN is operated and maintained by the Ministry of Environment and Urbanization of Turkey. The automatic  $PM_{10}$  and  $SO_2$  measurements are performed according to EU regulations. For  $SO_2$ , the TSE - TS EN 14212 measurement method is a technique for the measurement of the concentration of sulfur dioxide by using ultraviolet fluorescence. According to equations (1) and (2) the fluorescent signal is directly proportional to the  $SO_2$  concentration (Eq. 1, Eq. 2) [22].

$$I_f = \frac{K_f I_o \alpha \varphi [SO_2]}{K_f + K_d + K_q [M]} \quad (1)$$

Since  $K_f$ ,  $K_d$ ,  $K_q$ ,  $[M]$ ,  $I_o$ , and  $\varphi$  are constants, then:

$$I_f \propto [SO_2] \quad (2)$$

Where the  $I_f$ : intensity of florescence,  $I_o$ : incident of light density,  $\alpha$ : absorbtion coeff. Of  $SO_2$ ,  $\varphi$ : length of light path through sample,  $[SO_2]$ : Sulfur dioxide concentration,  $K_f$ : rate constant, fluorescence,  $K_d$ : rate constant, dissociation,  $K_q$ : rate constant, quenching,  $[M]$ : concentration of quenching molecules.

For PM, the TSE - TS EN 14212 measurement method which is a technique about the determination of the concentration of suspended particles in the atmosphere by using gravimetric method (Eq. 3) [23]. Gravimetric method is a quantitative analysis method based on weighing the substance to be analyzed directly.

$$PM_{10 a} = \frac{(W_f - W_i)(10^6)}{V_a} \quad (3)$$

Where the  $W_i$ : Initial weight of filter collecting,  $PM_{10}$  particles (g),  $W_f$ : Final weight of filter collecting  $PM_{10}$  particles (g),  $PM_{10 a}$ : Mass concentration of  $PM_{10}$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $V_a$ : Total air sampled in ambient conditions volume units (local  $\text{m}^3$ )

All graphics were made with R programming language (RStudio Version 1.2.5033) and the Openair Package [24] which is commonly used in environmental studies. Also, the analysis was made with MS Excel. While the data was being graphed, 5% lower and upper parts of the dataset having outliers were discarded. Because outliers affect the mean and other statistical parameters in calculations in a way that detracts from the actual.

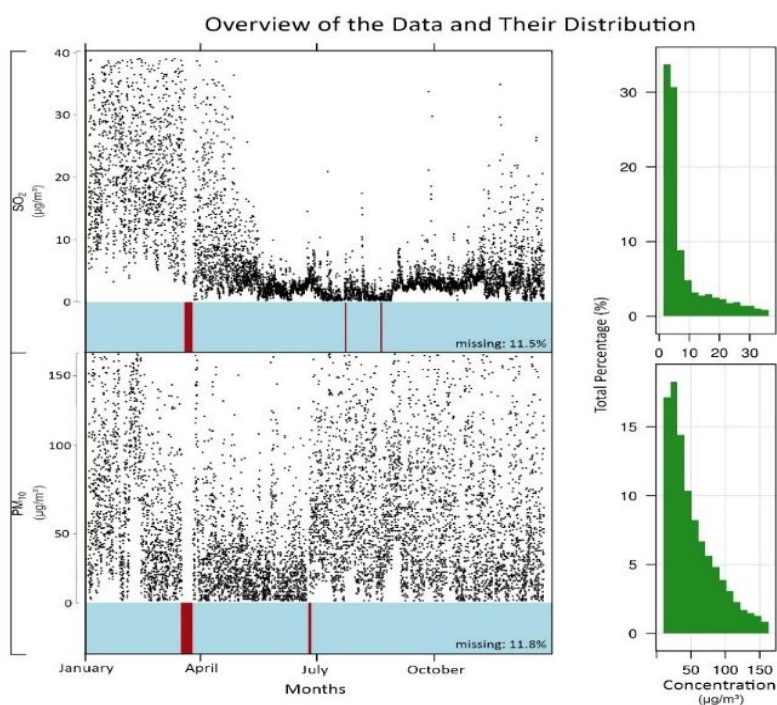
### III. RESULTS

According to Fig. 4, for  $PM_{10}$ , there was a total of 11.8% missing data in March and July. For  $SO_2$  there was a total of 11.5% missing data in March, July, and August. The reasons for this lack of data availability may be device replacement and maintenance that ensure high quality of the data. According to Table 2, the yearly average values of  $PM_{10}$  and  $SO_2$  were measured as 52.1 and 8.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively. Also, the extreme values corresponding to 75 percent were measured as 71.9 and 9.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively.

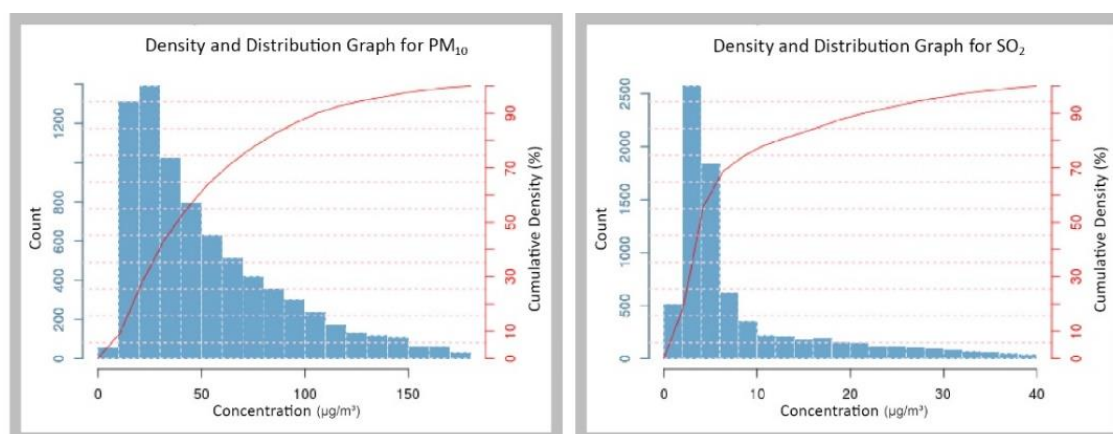
As seen in Figure 5, roughly 25% of the measured hourly  $PM_{10}$  concentrations, were in the range of 50-90  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , which is the limit indicating medium air pollution according to the Common Air Quality Index (CAQI) used in European Cities [25]. According to the CAQI, high air pollution was observed 15% of the time in 2018 since hourly  $PM_{10}$  concentrations were in the range of 90-180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . On the other hand, very high air pollution ( $> 180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) was not observed in 2018. As shown in Fig. 4, the majority (75 %) of the hourly  $SO_2$  concentrations were below 9.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , while 84% of the data was observed in the range of 1.4-16.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , where the density is highest.

**Table 2.** Descriptive statistics of hourly  $PM_{10}$  and  $SO_2$  concentrations ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in 2018

Variable	$PM_{10}$	$SO_2$
Number of Measurements	8719	8719
Percentage of Available Data	89	89
Minimum Value	9.4	1.4
1 <sup>st</sup> Quarter Value	23.8	3.3
Mean	52.1	8.3
Medium	41	4.6
3 <sup>rd</sup> Quarter Value	71.9	9.5
Maximum Value	179.7	39.4
Standard Deviation	36.5	8.2



**Figure 4.** Overview  $PM_{10}$  and  $SO_2$  concentrations and their distribution in 2018



**Figure 5.** Density and distribution graphs of hourly-averaged pollutants

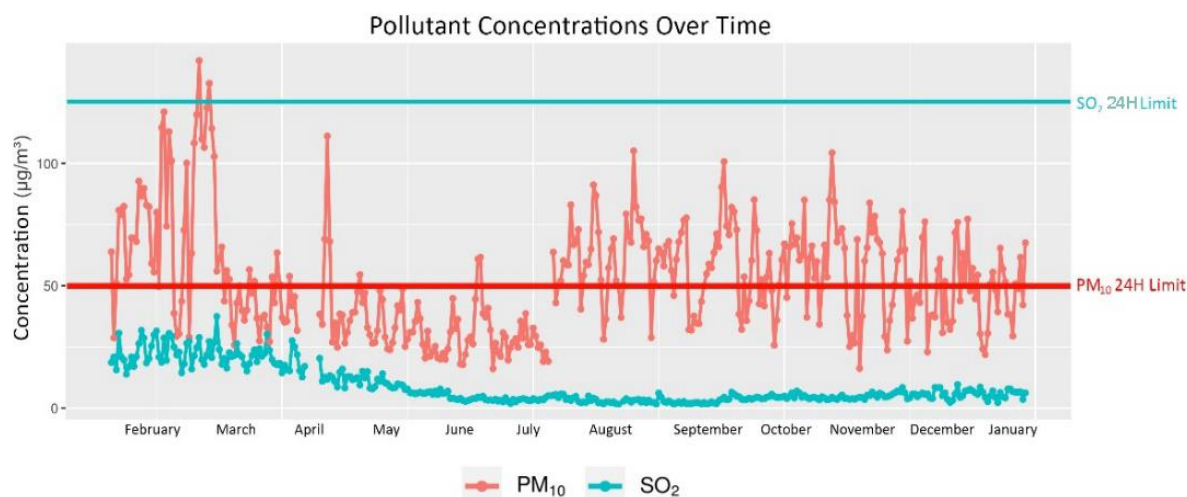
Figure 6 and Figure 7 show the time series of daily average of  $PM_{10}$  and hourly average of  $SO_2$  in 2018. According to the figure, it is seen that although there is a decrease in the concentration of  $SO_2$  over the middle of the year, all concentrations are well below the daily national air quality standard of  $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Fig. 6).  $PM_{10}$  concentrations show greater interannual variations than  $SO_2$  as various peaks are observed throughout the year. These variations may be due to changes in emission sources and mostly the location of the station. The extreme values observed are: The highest  $PM_{10}$  daily average of  $142 \mu\text{g}/\text{m}^3$  was observed in winter on Monday Feb 05, 2018, while the lowest  $PM_{10}$  daily average of  $16.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  was observed in summer on Saturday Jun 02, 2018 (Fig 6). The highest  $SO_2$  hourly average of  $39.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  was observed on March 15, 2018 23:00, while the lowest  $SO_2$  hourly average of  $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  was observed in 09.06.2018 10:00 (Table 2, Fig. 7). As it can be observed, for both,  $PM_{10}$  and  $SO_2$ , the maximum and

minimum concentrations occur during the winter/heating season and summer seasons, respectively. The main reason for this is that the station is located right on the side of the dirt road, and dust is removed from the ground in any vehicle passage, especially in the summer and autumn seasons.

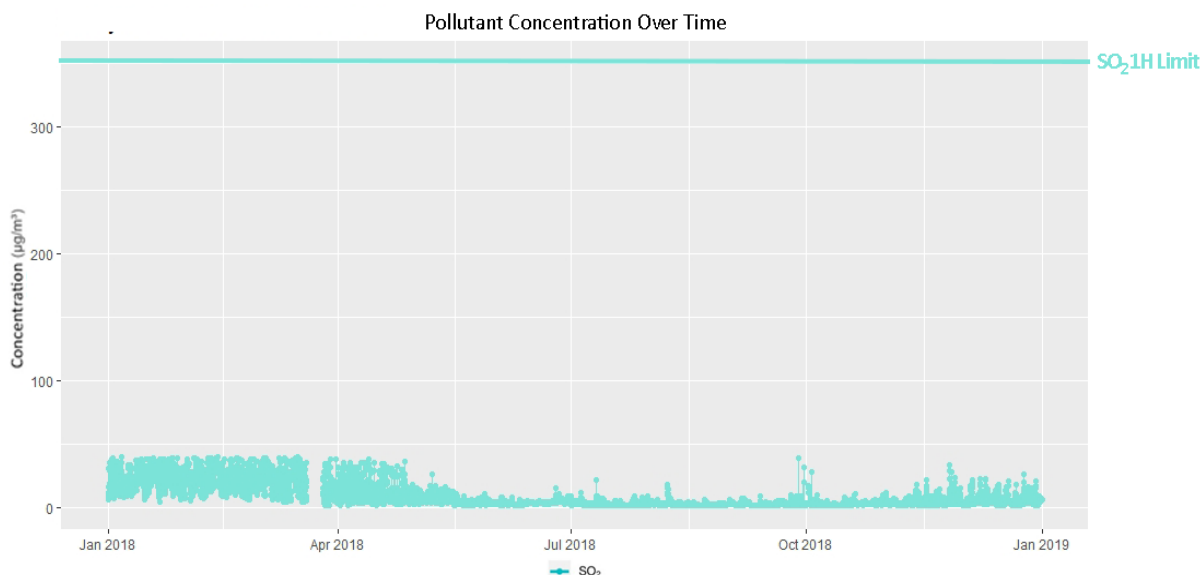
Figure 8 shows hourly, daily, and monthly variations of  $PM_{10}$  and  $SO_2$  concentrations normalized by the yearly average concentrations of  $52.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $8.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectively. When it is examined on a daily basis, there is not much difference in the average pollutant concentration between weekdays (Monday-Friday). However, slightly higher pollutant concentrations were found on Tuesday and Thursday compared to other days. The highest value for  $PM_{10}$  ( $179.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) was measured at 00:00 on 01.11.2018, while the highest value for  $SO_2$  ( $39.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) was measured at 12:00 on 12.02.2018.

On a monthly scale, the atmosphere has more PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> generally in winter months (Jan-Mar) because of heating from generally conventional resources. In addition, it was observed in the normalized graph that the sulfur dioxide concentration difference between winter and summer was much higher than the particulate matter concentration difference. This naturally shows that the need for residential heating decreases in the summer months. In other words, the source of the particulate matter in the atmosphere in Ağrı during the summer period mostly results from the transportation and location of the station.

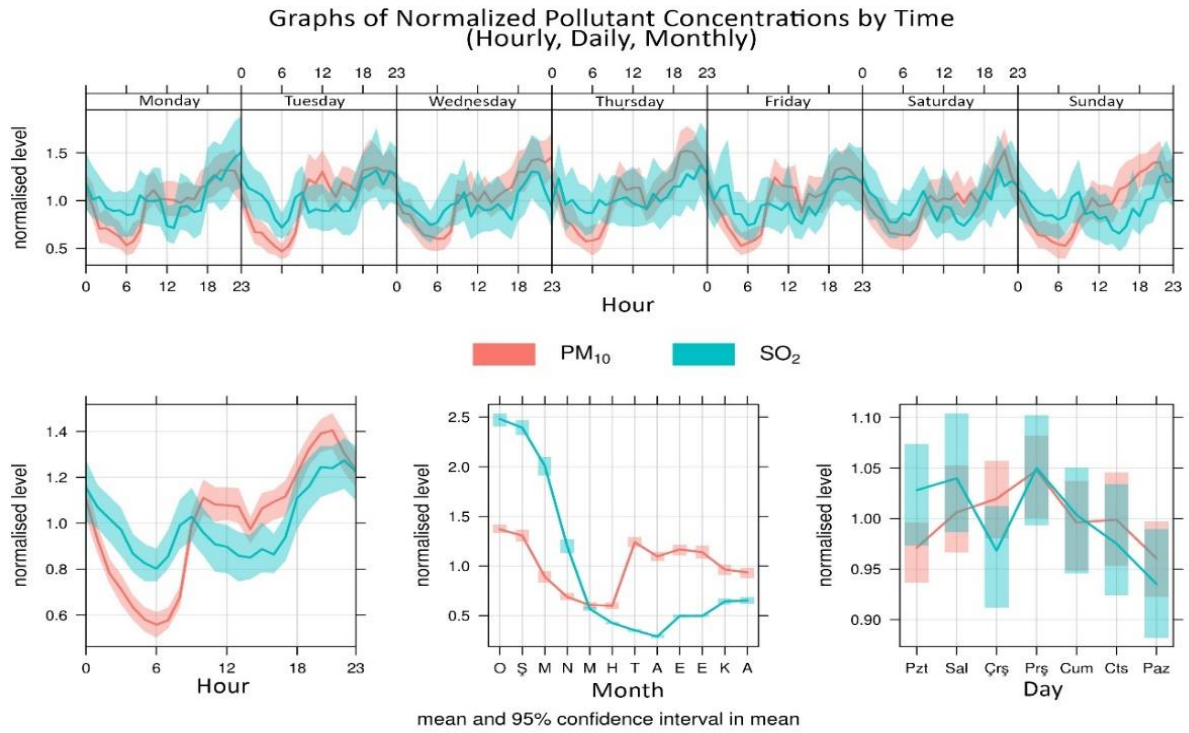
Meteorological factors play a significant role on the levels of air pollution due to transport, transformation, and dispersion of air pollutants. Since Ağrı province has mountainous terrain around it, wind direction is determined by the effect of topography as mentioned in the previous section. According to the obtained wind data, the dominant wind direction was determined as north in different seasons in 2018, particularly in summer and winter (Figure 9).



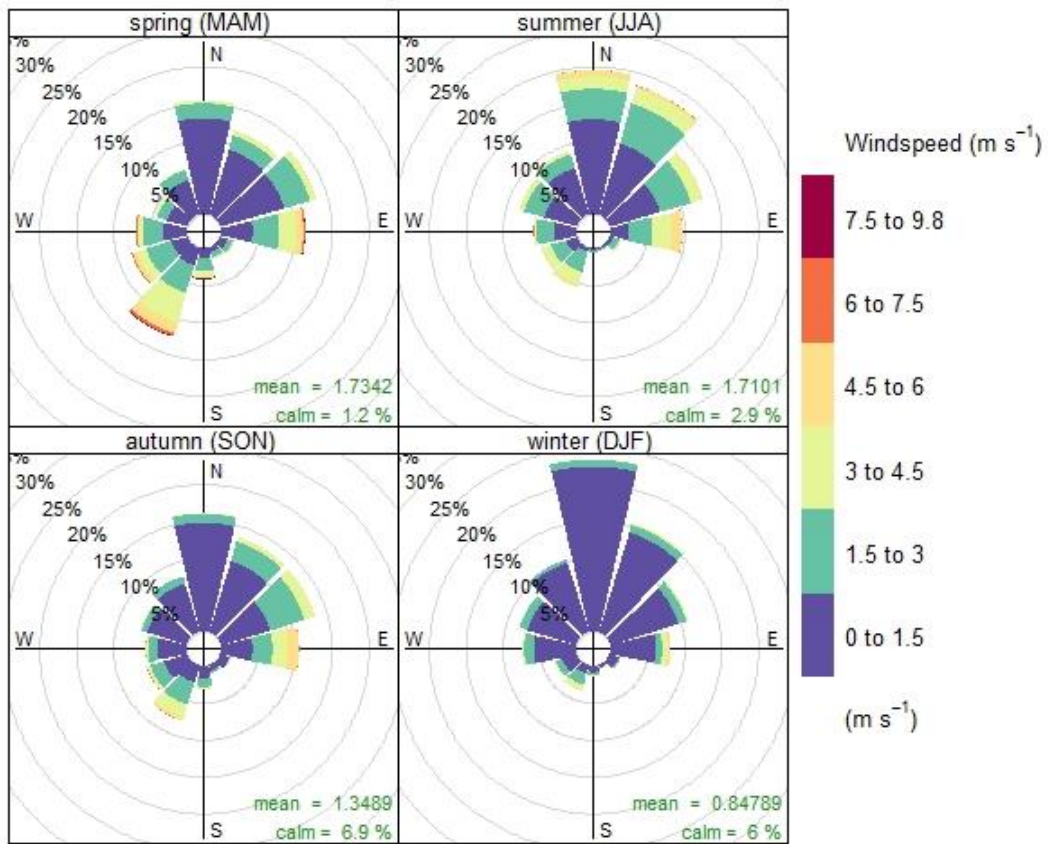
**Figure 6.** Time series of daily average concentrations of PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> in 2018. The red line is an indicator for the Turkish limit of daily SO<sub>2</sub> (125 µg/m<sup>3</sup>) and PM<sub>10</sub> (50 µg/m<sup>3</sup>)



**Figure 7.** Time series of hourly concentrations of SO<sub>2</sub> in 2018. The blue line is an indicator for the Turkish limit of hourly SO<sub>2</sub> (350 µg/m<sup>3</sup>)



**Figure 8.** Normalized graphs of pollutants by time (hourly, daily, monthly)



**Figure 9.** Seasonal wind rose of Agri in 2018

According to Figure 10 and Figure 11, it can be clearly seen that pollution forms from different directions during the year, and it intensifies especially around the station and in the East in winter because of low wind speed values (0 to 1.5 m/s). Considering that there are residential areas in the North and East of the station, the type of pollution may be considered to be residential, especially in the winter and spring months. In the spring, an increase in both  $PM_{10}$  and  $SO_2$  concentrations was observed from the East and mostly from the southwest direction. Considering the wind speed, the pollution here is thought to be caused by the construction and from the southwestern settlements. Also, it can be seen that the construction area in the Southwest direction creates particulate pollution in various time periods.

The reason for the high amount of particulate matter, especially in summer, is a situation that occurs due to the location of the station. Since the location of the station is in the middle of the two lanes of dirt road, the vehicles passing over the road remove the dust on the ground. Therefore, the measured particulate matter concentrations in the summer and autumn months are found to be much higher than expected. In addition, this information was confirmed by the Ministry of Environment and Urbanization (Y. Kara, personal communication, March 29, 2021), which is the owner of the station.

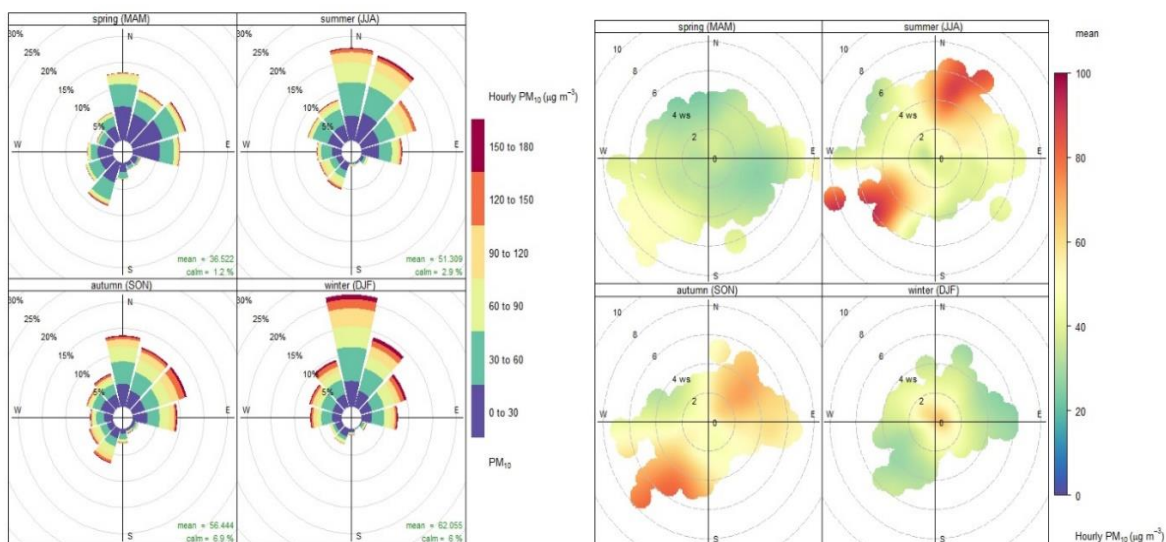


Figure 10.  $PM_{10}$  Pollution rose (left) and Polar plot (right) during various seasons

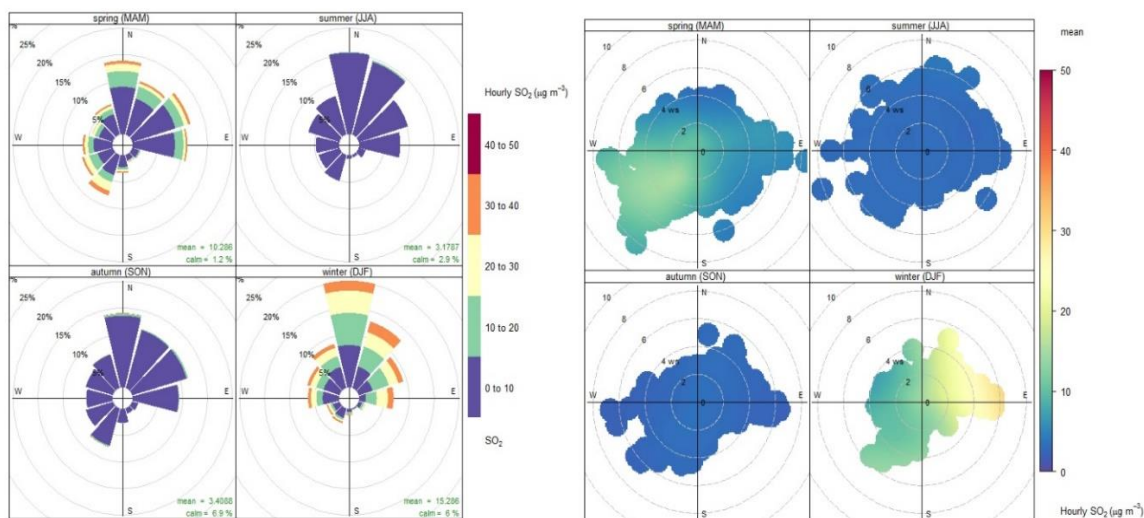


Figure 11.  $SO_2$  Pollution rose (left) and Polar plot (right) during various seasons

Diurnal variations of PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> during the weekdays and weekends are shown in Figures 12 and 13, respectively. On the hourly scale on weekdays (Figure 12), there is a decrease in the concentration of both PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> between the hours 00:00 and 06:00 because of fewer anthropogenic activities. In addition, it is clearly seen that pollutant concentrations increase between 06:00 to 12:00 and 17:00 to 20:00 because of various activities such as mining, construction, heating, and driving due to commuting. The highest hourly average PM<sub>10</sub> concentration observed on weekdays was 72.2 µg/m<sup>3</sup> at 20:00 and the lowest value was 28.4 µg/m<sup>3</sup> at 06:00. On the other hand, the highest hourly average SO<sub>2</sub> was 10.7 µg/m<sup>3</sup> at 22:00 and the lowest value 6.5 µg/m<sup>3</sup> at 06:00. In addition, on hourly scale on weekends (Figure 13), the variation of both pollutants is similar to weekdays. However, at 14:00 there is a decrease in the concentration of PM<sub>10</sub> which is not observed on weekdays. Also, a slightly

stronger diurnal cycle is observed during the weekends, with concentrations increasing rapidly at 8:00 and remaining relatively constant and high until 17:00 when they continue to increase. During the weekends, the highest average hourly PM<sub>10</sub> concentration was observed as 75.9 µg/m<sup>3</sup> at 21:00 and the lowest as 30 µg/m<sup>3</sup> at 07:00. The highest hourly average value of SO<sub>2</sub> was observed as 10.3 µg/m<sup>3</sup> at 22:00 and the lowest value as 5.8 µg/m<sup>3</sup> at 15:00. Also, the particulate matter and sulfur oxide gas concentrations do not likely increase depending on each other and thus may have different sources. According to the diurnal variations observed in Figs. 12 and 13, it is possible that the primary factor causing the increase of air pollution due to atmospheric particles is vehicle emissions using conventional energy sources, while the use of coal may be the main cause for sulfur dioxide emission, in addition to particulate matter.

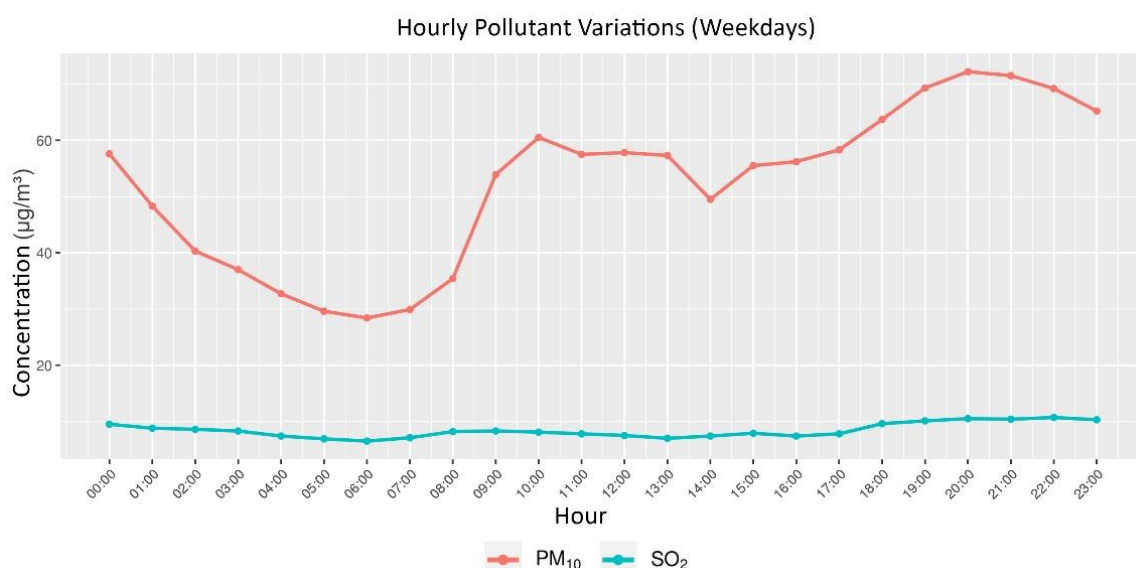


Figure 12. Diurnal variations of PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> during the weekdays (Mon-Fri)

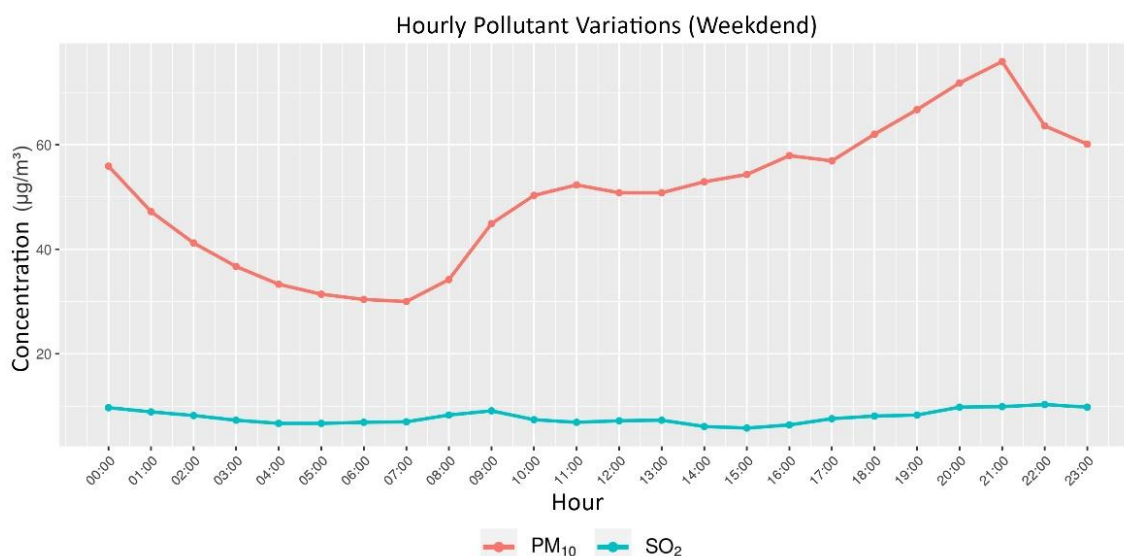


Figure 13. Diurnal variations of PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> during the weekends (Sat-Sun)

### IV. DISCUSSION

#### 4.1. National Air Quality Index (NAQI)

The National Air Quality Index was created by adapting the EPA Air Quality Index to our national legislation and limit values. The NAQI is calculated for 5 basic pollutants which are particulate matter (PM<sub>10</sub>), carbon monoxide (CO), sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>), and ozone (O<sub>3</sub>). The ranges of the air quality index applied in Turkey are shown in Table 3.

In order to find the daily concentrations of pollutants, the 24-hour average of the data was calculated. These calculated values were compared with the PM<sub>10</sub> (daily) and SO<sub>2</sub> (hourly) concentration thresholds in the National Air Quality Index (Table 3) in order to determine how many days, the atmosphere was polluted on a yearly and seasonal basis. The seasonal analysis showed that the most decrease in the air quality was observed during the winter (64%) and

autumn (60%) according to Table 4. Also, it was found that the cleanest season in 2018 was spring and the most polluted season was winter.

Figure 14 shows the AQI applied to both pollutants during the calendar year of 2018. According to the AQI, it was found that for PM<sub>10</sub> 51% were observed in the “good” class, 44% in the “moderate” class and 5% in the “sensitive” class in terms of 24h mean value. When SO<sub>2</sub> measurement values were analyzed as a percentage, it was observed that 100% of the data were in the “good” class in terms of 1-h mean value in Ağrı. According to the results, air pollution in Ağrı mostly results from particulate pollution. In addition, the concentrations of sulfur dioxide gases resulting from the sources used for heating are very low. Considering that the station is located near one of the crowded boulevards of Ağrı, it is seen that the source of pollution is linear-based pollutant rather than areal pollution source.

Table 3. National Air Quality Index [26]

Index	AQI	SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	CO [µg/m <sup>3</sup> ]	O <sub>3</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	PM <sub>10</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]
		1 H. Mean	1 H. Mean	8 H. Mean	8 H. Mean	24 H. Mean
Good	0 – 50	0-100	0-100	0-5500	0-120	0-50
Moderate	51 – 100	101-250	101-200	5501-10000	121-160	51-100
Sensitive	101 – 150	251-500	201-500	10001-16000	161-180	101-260
Unhealthy	151 – 200	501-850	501-1000	16001-24000	181-240	261-400
Bad	201 – 300	851-1100	1001-2000	24001-32000	241-700	401-520
Dangerous	301 – 500	>1101	>2001	>32001	>701	>521

Table 4. Descriptive statistics of 24-h and 1-h average pollutants according to season

Months	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) (24-h)				SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) (1-h)			
	Spring	Summer	Autumn	Winter	Spring	Summer	Autumn	Winter
1st Quarter	18.21	24.99	25.30	26.64	4.19	2.10	2.09	5.68
Median	28.00	43.98	45.94	46.80	6.71	2.88	2.73	13.94
Mean	34.44	51.28	53.69	55.37	10.29	3.14	3.43	15.27
3rd Quarter	42.55	71.98	76.88	79.46	13.69	3.74	3.73	22.24
Polluted Days (%)	10	56	60	64	0	0	0	0

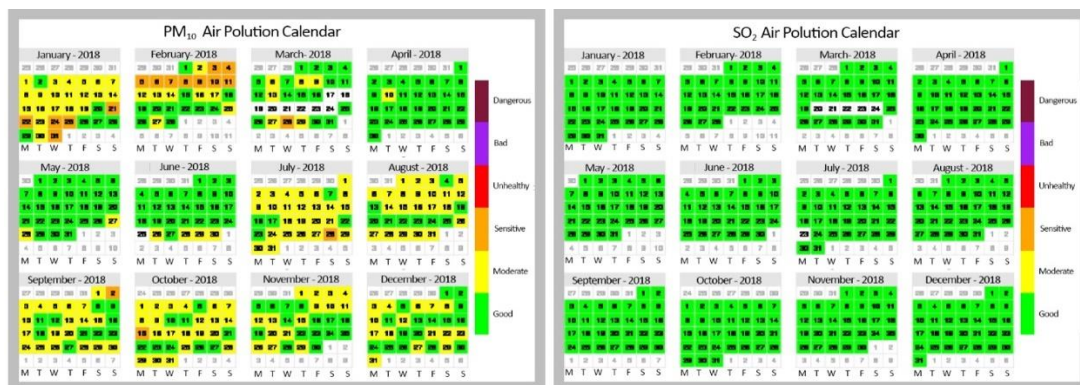


Figure 14. Pollution calendars for both pollutants

## V. CONCLUSIONS

In this work, PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> concentrations were investigated in the rural area of Ağrı in 2018. Their hourly, daily, and seasonal variations were discussed and the concentrations were compared to regulations and recommendations in order to evaluate the overall air quality of Ağrı during the whole year. Overall, it was found that SO<sub>2</sub> concentrations were well below the regulations, and the majority of the air pollution in Ağrı was due to PM<sub>10</sub>. Hourly PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> concentrations ranged as 9.4-179.7 and 1.4-39.4 µg/m<sup>3</sup>, with average values of 52.1 and 8.3 µg/m<sup>3</sup>, respectively. Hourly concentrations are a better indicator of air quality than daily-averaged concentrations. According to the Common Air Quality Index (CAQI) applied to hourly PM<sub>10</sub> concentrations, the population in Ağrı was exposed to medium and high air pollution 25 and 15% of the time in 2018, respectively. While averaged-daily SO<sub>2</sub> concentrations were well below the Turkish limit of 125 µg/m<sup>3</sup>, PM<sub>10</sub> concentrations exceeded the daily limit of 50 µg/m<sup>3</sup> at all months, except in Apr-Jun, 2018. As commonly observed in other residential sites, both, PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub>, showed the maximum and minimum concentrations during the winter and summer seasons, respectively. This behavior may be due to a combination of emission sources and meteorology, particularly the use of coal for residential heating and transportation, and most importantly due to the location of the air quality station. Since the station is in the middle of dirt roads, dust resuspension may be partly responsible for concentrations observed in the summer and autumn months.

The statistical analysis showed that 56-60% of the days in 2018 were classified as polluted in summer, autumn, and winter. According to the Air Quality Index of Turkey, using daily-averaged PM<sub>10</sub> concentrations as indicators, the air quality in Ağrı was classified as good, moderate, and sensitive 51, 44, and 5 % of the time in 2018, respectively. According to the results obtained in this work, it is recommended that more efforts are done to decrease emissions of PM<sub>10</sub> throughout the year and to change the location of the station. In future studies, the time period should be expanded to obtain a long-term perspective.

## ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank the Ministry of Environment and Urbanization of Turkey and the Turkish State Meteorological Service for providing the air quality and meteorological data, respectively. We would also like to extend our sincere thanks to Prof. Dr. Hüseyin TOROS who gave us support for conducting this study.

## REFERENCES

[1] Kara, Y., Kahya, C., Öztopal, A. (2019). Marmara Bölgesi İçin Uydu Verileri Kullanılarak PM<sub>10</sub> Tespiti, Conference Paper:

IV. Meteorolojik Uzaktan Algılama Sempozyumu 11-15 Kasım, Antalya. Retrieved from:

<http://uzalmet.mgm.gov.tr/tammetin/2019/16.pdf> [Access Date: June 26, 2020]

- [2] T.C Sağlık Bakanlığı. (2018). Hava Kirliliği ve Sağlık Etkileri. Retrieved from <https://hsgm.saglik.gov.tr/> [Access Date: June 27, 2020]
- [3] EPA. (2012). Air Quality Index (AQI). Air Quality Communication Workshop. San Salvador, El Salvador. April 16-17, 2012. Retrieved from: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-05/documents/zell-aqi.pdf>
- [4] Demirarslan, K., Akıncı, H. (2016). Doğu Karadeniz Bölgesindeki Partikül Madde Dağılımlarının Coğrafi Bilgi Sistemleri Yardımıyla Belirlenmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*. <https://doi.org/10.21324/dacd.29373>
- [5] Yatkin, S., Bayram, A. (2007). İzmir Havasındaki Partikül Madde Kirliliği: Ölçüm Ve Değerlendirme. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9 (2), 15-27. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumffmd/issue/40864/493366>
- [6] Flores, R. M., Kaya, N., Eşer, Ö., Saltan, Ş. (2017). The effect of mineral dust transport on PM<sub>10</sub> concentrations and physical properties in Istanbul during 2007–2014. *Atmospheric Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.07.009>
- [7] Motesaddi Zarandi, S., Hashempour, Y., & Nowrouz, P. (2017). Characterizing of Air Pollution in Tehran: Comparison of Two Air Quality Indices. *Civil Engineering Journal*, 3, 749–758. <https://doi.org/10.21859/cej-030911>
- [8] Wang, L., Zhang, P., Tan, S., Zhao, X., Cheng, D., Wei, W., Su, J., & Pan, X. (2013). Assessment of urban air quality in China using air pollution indices (APIs). *Journal of the Air & Waste Management Association*, 63(2), 170–178. <https://doi.org/10.1080/10962247.2012.739583>
- [9] Jyothi, S. N., Kartha, K., Divesh, Mohan, A., Pai U, J., & Prasad, G. (2019). Analysis of Air Pollution in Three Cities of Kerala by Using Air Quality Index. *Journal of Physics: Conference Series*, 1362(1), 012110. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1362/1/012110>
- [10] Erdun, H., Öztürk, A., Çapraz, Ö., Toros, H., Dursun, S., Deniz, A. (2015). Spatial Variation of PM<sub>10</sub> in Turkey. Conference Paper: VII. Atmospheric Science Symposium, 28, 30 April 2015, İstanbul.
- [11] Akyürek, Ö., Arslan, O., Karademir, A. (2013). SO<sub>2</sub> ve PM<sub>10</sub> Hava Kirliliği Parametrelerinin CBS ile Konumsal Analizi: Kocaeli Örneği . 4.



- Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi (pp.1-12). Ankara, Turkey
- [12] Sari, M. F., & Esen, F. (2019). PM10 Ve SO2 Konsantrasyonları Ve Meteorolojik Parametrelerin Konsantrasyonlar Üzerine Etkileri. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.598226>
- [13] Dolar, A., Saraç, H. (2015). Investigation of Air Quality with PM10 in the Eastern Provinces of Turkey. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 5 (4), 25-32. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jist/issue/15546/385188>
- [14] Güçük, C., Şahin, E., Bektaş, M., Aras, E., Çinicioğlu, R., Domaç Z., Nazaroğlu M., Bingül Z., Toros H. (2019). Evaluation of PM10 Behaviour in Iğdır. *Journal of Research in Atmospheric Science*, 2019 (1), 1-9.
- [15] Ağrı İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü. (n.d). Ağrı İlinin Coğrafi Konumu. Retrieved from <https://agri.ktb.gov.tr/TR-103446/cografikonumu.html> [Access date 24.06.2020]
- [16] Yazgan, Ş., Kadanalı, E. (2012). Ağrı İlinin Kırsal Turizm Potansiyelinin Değerlendirilmesi. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal Ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 2012 (1), 5-10. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/kmusekad/issue/10214/125524>
- [17] Korkusuz, T. (2015). Ağrı İlinin İdari Coğrafya Analizi.Coğrafya'ya Adanmış Bir Ömür. Edition: 1.Publisher: Pegem
- [18] Kaya, F. (2014). Doğu Anadolu Karasal İkliminin Belirgin Olarak Yaşandığı Yörelere Biri Olan Ağrı İlinin İklim Özellikleri. *The Journal of Academic Social Science Studies*. Doi: <http://dx.doi.org/10.9761/JASSS2330>
- [19] MGM. (2016). Köppen İklim Sınıflandırmasına Göre Türkiye İklimi. Retrieved from [https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/iklim\\_siniflandirmalari/koppen.pdf](https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/iklim_siniflandirmalari/koppen.pdf) [Access Date: 17/06/2020]
- [20] Başarsoft. (n.d). Ağrı İli Fiziki Haritası. Retrieved from: <https://www.basarsoft.com.tr/harita-nedir/> [Access Date: 14.06.2020]
- [21] Republic of Turkey Ministry of Environment and Urbanization. (n.d) “Ulusal Hava Kalite İzleme Ağı” Retrieved from <https://www.havaizleme.gov.tr> [Access Date: 14.06.2020]
- [22] EPA Air Pollution Training Institute. (2014). Sulfur Dioxide Measurement Principles and Calibration Procedures. Retrieved from [https://www.apti-learn.net/lms/register/display\\_document.aspx?DIID=673](https://www.apti-learn.net/lms/register/display_document.aspx?DIID=673). [Access date: 17/06/2020]
- [23] California Air Resources Board. (2018). Standart Operating Procedure For Determination of PM10 Mass by Gravimetric Analysis. Retrieved from: <https://ww3.arb.ca.gov/aaqm/sop/mld016.pdf>. [Access Date: 17/06/2020]
- [24] Carlsow DC, Ropkins K (2012). “openair — An R package for air quality data analysis.” *Environmental Modelling & Software*, 27–28(0), 52–61. ISSN 1364-8152, doi: 10.1016/j.envsoft.2011.09.008.
- [25] Van Den Elshout, S., Léger, K., & Heich, H. (2014). CAQI common air quality index - update with PM2.5 and sensitivity analysis. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.060>
- [26] Ankara Büyükşehir Belediyesi. (2017). Ankara Çevre Düzeni Planı Açıklama Raporu (Report No. 2038). İmar ve Şehircilik Dairesi Başkanlığı. Retrieved from [https://ankara.bel.tr/Plan\\_Aciklama\\_Raporu/plan\\_aciklama\\_raporu.html](https://ankara.bel.tr/Plan_Aciklama_Raporu/plan_aciklama_raporu.html) [Access Date: 17/06/2020]

## En Uygun Tersine Lojistik Hizmet Sağlayıcısının Bulanık Grup Karar Verme Yaklaşımı Altında Belirlenmesi

### *Selection of the Appropriate Reverse Logistics Provider Under Fuzzy Group Decision Making Approach*

Tolga GEDİKLİ<sup>1</sup> , Beyzanur ÇAYIR ERVURAL<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Konya Gıda ve Tarım Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Müh. Böl., Konya, Türkiye

<sup>2</sup> Konya Gıda ve Tarım Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Müh. Böl., Konya, Türkiye

#### Öz

Günümüz pazar koşullarında işletmeler lojistik operasyonlarını maliyet ve rekabet avantajı sağlayacak etkin bir stratejiyle sürdürmek zorundadır. Müşterilerden gelen fiyat baskıları ve özellikle politik, ekonomik ve çevresel hassasiyetler gereği, ürün geri dönüşüm süreçleri -yani ürünün geri kazanılarak yeniden değerlendirilmesi- tersine lojistik (TL) uygulamalarını gerektirmektedir. İşletmeler için, TL yönetiminde genellikle özel bilgi sistemlerine sahip bir altyapı ve iadelerin işlenmesi için özel ekipmanlar gereklidir. Bu nedenle çoğu işletme sınırlı kaynakları ve teknik yeterlilikleri nedeniyle TL faaliyetlerini üçüncü parti TL sağlayıcılarına (3PTLS) devretmektedir. Uygun 3PTLS seçim süreci işletmelerin ekonomik karlılığına ve uzun vadeli gelişimine katkı sunması nedeniyle stratejik olarak önemli bir karardır. 3PTLS seçim kararı, çok sayıda belirsizlik içermesi ve karmaşık doğası gereği çok kriterli karar verme (ÇKKV) problemi olarak ele alınmaktadır. Bu çalışmada, en iyi 3PTLS seçimi için insan düşüncelerindeki belirsizlik ve karmaşıklığı daha iyi yansıtmak amacıyla Pisagor bulanık kümelerle dayalı bir grup karar verme modeli olarak Pisagor bulanık TOPSIS yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Modelin uygulanabilirliği, bir pil üretim şirketinden alınan verilere dayanan deneysel bir çalışma ile gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar diğer karar verme yöntemleriyle (bulanık TOPSIS, bulanık COPRAS ve klasik TOPSIS) karşılaştırılmış ve çözüm üstünlükleri sunulmuştur. Ayrıca önerilen modelin kararlılığını ve uygulanabilirliğini değerlendirmek için duyarlılık analizi yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Tersine Lojistik, Çok Kriterli Karar Verme, Grup Karar Verme, Pisagor Bulanık TOPSIS, Bulanık COPRAS

#### Abstract

In today's market conditions, companies have to maintain their logistics operations with an effective strategy that will provide cost and competitive advantage. Pricing pressures from customers, and specifically due to political, economic and environmental sensitivities, require reverse logistics (RL) applications in product recycling processes, that is, for recycling and re-evaluation of the product. Companies usually require an infrastructure with special information systems and particular equipment for processing returns in RL management. For this reason, most companies transfer their RL activities to third-party RL providers (3PRLP) due to their limited resources and technical capabilities. The appropriate 3PRLP selection process is a strategically important decision because of its contribution to the economic profitability and long-term development of businesses. 3PRLP selection decision is considered as a multi-criteria decision-making (MCDM) problem due to their high number of uncertainties and their complicated natures. In this study, a multi-criteria group decision-making model based on Pythagorean fuzzy sets was modeled using the Pythagorean fuzzy TOPSIS method to better reflect the uncertainty and complexity in human views/opinions for the best 3PRLP selection. The applicability of the model has been demonstrated and tested by an experimental study based on data from a battery manufacturing company. The obtained results were compared with other decision-making methods (fuzzy TOPSIS and fuzzy COPRAS and classical TOPSIS) and solution advantages were presented in the study. In addition, sensitivity analysis was applied to evaluate the stability and applicability of the proposed model.

**Keywords:** Reverse Logistic, Multi-Criteria Decision Making, Group Decision Making, Pythagorean Fuzzy TOPSIS, Fuzzy COPRAS

## I. GİRİŞ

Günümüz rekabet koşullarında, işletmelerin tedarik zinciri yönetimi ile lojistik faaliyetlerine daha fazla önem vermeleri gerektiği daha iyi anlaşılmaktadır [1]. Çoğu işletme, tedarik zinciri ağındaki karmaşık ve zor yapı ile tam olarak mücadele edemeyeceğini düşündüğünden lojistik faaliyetlerini dış kaynak desteğiyle üçüncü parti lojistik sağlayıcıları ile yürütmektedir. Bu sayede işletme kendi üretim ve yatırım politikalarına daha iyi odaklanabilmekte ve ürün-malzeme dağıtım sürecini yani lojistik faaliyetlerini farklı bir işletme desteğiyle sürdürerek karlılığını dengelemektedir. İşletmeler müşterilerin farklı beklentisine ve piyasadaki dinamiklere göre hareket etmektedir [2]. Örneğin, günümüzde ekolojik, ekonomik ve politik dengeler gereği ürün geri dönüşüm süreci tersine lojistik (TL) uygulamalarıyla ciddi önem taşımaktadır.

TL terimi ilk olarak Stock [3] tarafından kullanılmıştır. TL, iade edilen üründen elde edilen değer en üst seviyeye çıkartılması veya toplam TL maliyetinin en aza indirilmesi amacıyla, hammadde, yarı mamul, mamul ve ilgili bilginin tüketim noktasından başlangıç noktasına kadar verimli ve uygun maliyetli akışının planlanması, uygulanması ve kontrol edilmesi sürecidir. TL faaliyetleri, kamera, cep telefonu, fotokopi makinesi gibi elektronik cihazlar, otomotiv sanayi, plastik malzeme, halı, kitap, kâğıt ve kimyasal/tıbbi ürün imalatı gibi birçok sektörde uygulanmaktadır [4].

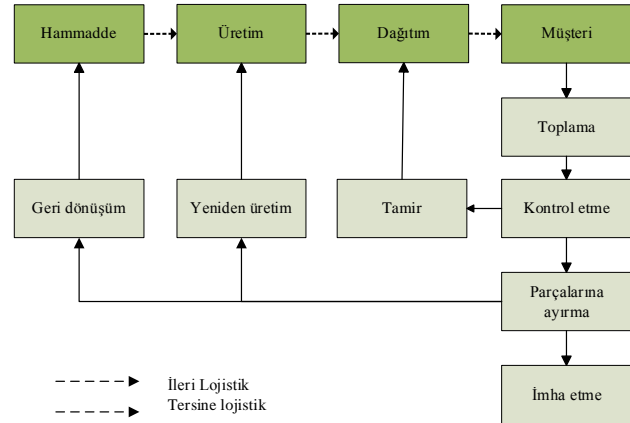
Doğal enerji kaynaklarının tükenmesi ve ömrünü tamamlamış ürünlerin imha edilmesinden kaynaklanan kirlilik çağımızın en önemli sorunlarından biridir. Etkin bir TL süreci, kuruluşların enerji kaynaklarını verimli kullanmasına ve ekonomik ve çevresel faktörler arasında sağlıklı bir denge kurulmasına yardımcı olmaktadır [4], [5]. Son yirmi yıl içinde, gelişmiş ülkelerde kullanım ömrü dolan/tamamlanan ürünlerin geri kazanımına yönelik yasalar artmış ve bu durum ürün ömrünün etkin bir şekilde değerlendirilerek yönetilmesini gerektirmiştir. Ürünlerin yeniden değerlendirilmesine yönelik ilginin artması, yalnızca çevre bilincinin artmasından değil, aynı zamanda yeniden kullanım faaliyetlerine katılımın birçok endüstride daha karlı olduğunun kanıtlanmış olmasıyla ilgilidir. TL'nin verimli bir şekilde uygulanması, toplama, inceleme, depolama, geri dönüşüm, yeniden üretim, yenileme, onarım ve imha etme gibi ters tedarik zinciri faaliyetlerini gerçekleştirmek için uygun lojistik ağının kurulmasını gerektirir [5]. İade edilen ürünler, çalışanların bilgisi dahilinde toplanır, incelenir ve sınıflandırılır. Ürünlerin geri kazanılmasının, ürünlerin imha edilmesinden daha ekonomik olup olmayacağını belirlemek için çalışanlar iadenin kabul edilip edilmeyeceğini ve alınacak önlemleri düzenlemekle sorumludur [4].

İleri lojistik ve TL temelde iki farklı önemli özelliğe sahiptir. İlki, TL'nin kısmi onarım, yeniden üretim, geri dönüşüm ve imha etme gibi daha geniş bir operasyon yelpazesini kapsamasıdır [6]. İkincisi ise TL'de müşteri istekleri ve aktif katılımları önemli rol oynamasıdır. İleri lojistik ve TL'nin temel akış diyagramı Şekil 1'de sunulmuştur [7].

Son zamanlarda TL, aşağıdaki ana nedenlerle hem işletmelerin hem de bu konuda çalışan araştırmacıların ilgisini çekmiştir [8].

- Lojistik yönetimi ve çevrenin korunmasına ilişkin yasalar, kuruluşların, sürdürülebilirlik gereksinimlerinin bir parçası olarak kullanım ömrü dolan ürünlerin toplanmasını zorunlu kılmıştır.
- Hızla gelişen e-ticaret sektöründeki yüksek iade oranları, TL'nin ortaya çıkışını da teşvik etmiştir. Örneğin, online alışveriş için ürün iade oranı% 8-% 12'dir [6].

- Tüketiciler arasında çevrenin korunması konusunda artan farkındalık, işletmelere çevreye zarar verecek atıkları imha etmeye zorlamaktadır.



Şekil 1. TL faaliyetlerinin temel akış diyagramı [7]

İşletmelerin TL faaliyetlerini yürütmek için üç seçeneği vardır:

- Süreci şirket içinde yönetmek;
- Bağlı bir şirket kurarak veya satın alarak yönetmek;
- Bu işlevi dışardan bir şirkete yaptırmak.

Birçok şirket, TL faaliyetlerini kendi içinde yönetmek için yeterli altyapıya ve kapasiteye sahip olmadığı için TL'yi şirket içinde uygulamakta zorlanmaktadır. Ayrıca bir lojistik şirketi kurmanın veya satın alma işleminin taşıdığı bazı sorumluluklar ve ciddi riskler mevcuttur ve başlıca bir faaliyet olan lojistik aktiviteleri işletmenin asıl işlerinin yürütmesini olumsuz olarak etkileyebilir. Dolayısıyla, işletmenin TL faaliyetlerini dışardan temin etme seçeneği, bir işletmenin hem ekonomik verimliliğini hem de sürdürülebilir uzun vadeli kalkınmasını sağlamak için gereklidir. TL eylemi için dış kaynak kullanımı kararları değerlendirilirken, dikkate alınması gereken temel faktör, gerekli TL ağı için uygun bir üçüncü parti/taf TL sağlayıcısının (3PTLS) varlığıdır. Üçüncü parti lojistiği, geri dönüş operasyonlarının uygulanması, verilerin izlenmesi/toplanması için özel bilgi sistemlerine, geri dönüşlerin işlenmesi için özel ekipmanlara ve standart üretim süreçleri konusunda eğitilmiş uzmanlara ihtiyaç duyan özel bir altyapı gerektirdiğinden, 3PTLS'ler TL faaliyetlerinin önemli oyuncularını olmuşturlar. 3PTLS dış kaynak hizmetlerinin temel avantajı, bu 3PTLS'lerin ileri akışları kesintiye uğratmadan şirketlerin yeni bir işe, yeni bir pazara girmesine olanak sağlaması ve lojistik maliyetleri büyük ölçüde azaltmasıdır. Şirketlerin TL faaliyetlerini dış kaynaklara yaptırmalarının bazı nedenleri şu şekilde sunulabilir [5]:

- 3PTLS'nin eksiksiz tersine tedarik zinciri çözümleri sunmak için gelişmiş bilgi sistemi yeteneklerine ve son teknoloji ürünü nakliye,

malzeme taşıma ekipmanlarına ve depolama tesislerine sahiptirler.

- TL, bir şirketin temel faaliyetleri olmayabilir. Dolayısıyla, ikincil bir faaliyet olarak görüldüğünde verimsiz olabilir. Şirketler, tersine lojistiği dış kaynak kullanarak, temel yetkinliklerine odaklanabilir.
- 3PTLS ölçek ekonomilerinin avantajını kullanabileceğinden dış kaynak kullanım maliyetlerini azaltabilir.
- TL, dış kaynak kullanım döngü süresini ve teslimat performansını iyileştirerek satış sonrası hizmette müşteri memnuniyetini artırır.

Uygun 3PTLS'yi seçmek, şirket ile sağlayıcı arasındaki başarılı işbirliği sağlarken, uygun olmayan bir 3PTLS seçmek kaynak verimliliğini azaltarak operasyonel riskleri artırmaktadır. Bu nedenle, 3PTLS etkin bir biçimde değerlendirilmesi ve seçilmesinde uygun araçlarının geliştirilmesi önemli bir konu haline gelmiştir [8]. TL sağlayıcısının seçimi, farklı tipte kriterleri ve alternatifleri, farklı karar modellerinin kombinasyonunu, grup karar verme sürecini ve çeşitli belirsizlik biçimlerini içerdiğinden bir 3PTLS'yi seçmenin en iyi yolunu bulmak zordur. Bu nedenle, seçim sürecindeki önemli konu, doğru TL sağlayıcısını seçmek için uygun bir yöntem geliştirmektir [5].

Literatürde 3PTLS konusunda yapılan çalışmaların oldukça sınırlı olduğu ve Türkiye'deki uygulamaların da yetersiz olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada, Pisagor bulanık TOPSIS yöntemi en uygun 3PTLS değerlendirilmesinde ilk kez kullanılarak, belirsizlik altında çok boyutlu bir pil imalat şirketinin verilerine dayanan deneysel bir uygulama üzerinde gerçekleştirilmiştir [5]. Böylece bu alanda uygulanabilirliği ve yöntemin sağladığı çözüm üstünlüğü araştırılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca, çalışmada Pisagor bulanık TOPSIS, bulanık TOPSIS [5], bulanık COPRAS ve klasik TOPSIS yaklaşımları ayrı ayrı değerlendirilerek karşılaştırılmıştır. Daha sonra Pisagor bulanık TOPSIS yöntemi için kriter ağırlıklarına dayalı bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir.

## II. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

TL ilk olarak 1990'larda ortaya çıksa da son yıllarda, imalat firmalarının talebi nedeniyle TL ve 3PTLS'ne yönelik endüstriyel uygulamaların ve akademik araştırmaların sayısı giderek artmaktadır [9]. Bir çok bilinçli işletme tersine tedarik zinciri uygulamalarını rekabet avantajı sağlayacak bir yönetim stratejisi olarak kabul etmiştir [6]. Literatür araştırmalarına göre, Agrawal vd. [10] bu konuda 1986-2015 yılları arasında yayınlanan 240'tan fazla makaleyi ele almıştır. Govindan vd. [11] ise TL'de sadece 2007 ve 2013 yılları arasında yayınlanan 150'den fazla makaleyi incelemiştir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar, hukuki, çevresel, sosyal ve ekonomik

nedenlerle TL'ye olan ilginin sürekli arttığı yönünde olmuştur. Ayrıca, yapılan araştırmalara göre TL faaliyetleri bir işletmenin ekonomik ve ekolojik performansı üzerinde olumlu etki sağladığı anlaşılmıştır [10], [11].

Tedarikçi seçim problemi karmaşık bir karar problemi olduğu için sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak için birçok yöntem geliştirilmiştir. Tedarikçilerin kapsamlı değerlendirilmesi için değerlendirme kriterlerinin hem nicel hem de nitel yönleri içermesi beklenmektedir. Bu nedenle nicel ve nitel kriterleri birlikte entegre edebilen Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri yaygın biçimde kullanılmaktadır [8]. Son yıllarda tedarikçi seçimi ve dış kaynak kararları alanlarında araştırmalar yapılmış ve probleme yönelik farklı çözüm metodolojileri sunulmuştur. Literatür incelendiğinde, 3PTLS seçimi için birçok ÇKKV yönteminin kullanıldığı görülmektedir. Bununla birlikte, 3PTLS seçim problemi için en sık kullanılan yaklaşımlar Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) [4], [12], Analitik Ağ Süreci (ANP) [9], [13], Veri Zarflama Analizi (DEA) [14], TOPSIS [12] ve bazı matematiksel modeller olduğu gözlenmiştir [15], [16].

3PTLS seçim problemi literatürde elektronik (örneğin, cep telefonları veya bilgisayarlar) endüstrisi, plastik, kâğıt ve halı geri dönüşümü, pil ve tıbbi cihaz üretimi, çelik işletmesi gibi birçok alanda uygulanmıştır. Li vd. [9] ve Prakash ve Barua [12] elektronik endüstrisinde, Tavana vd. [13] plastik geri dönüşüm endüstrisinde, Senthil vd. [4] boru imalat fabrikasında, Govindan vd. [17] lastik üretim fabrikasında, Ravi [18] bilgisayar şirketinde, Govindan ve Murugesan [19] ve Kannan vd. [5] pil geri dönüşüm endüstrisinde işletmeler için en uygun 3PTLS'yi seçmişlerdir. Yapılan çalışmalarda küçük boyutlu modeller klasik dilsel hesaplamalar kullanılarak değerlendirilmiş, dolayısıyla kısıtlı arama uzayından çözümler sağlanmaya çalışılmıştır. TL sürecinin karmaşık yapısı, içeriğinde hem niteliksel ve/veya niceliksel veri kümesi barındırması ve karar verici mekanizmasındaki belirsizlik problemin etkin biçimde değerlendirilmesini güçleştirmektedir. Bu durum temelde 3PTLS seçim modellerinin güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir [8]. Bu nedenle, diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada Pisagor bulanık kümeler kullanılarak insan düşüncesindeki karmaşıklık ve belirsiz yapının daha iyi yansıtılarak daha iyi modellenmesi amaçlanmıştır.

## III. MATERYAL VE YÖNTEM

### 3.1. Pisagor Bulanık Kümeler (Pythagorean fuzzy sets)

Yager [20] tarafından önerilen Pisagor bulanık kümeler, sezgisel bulanık kümeler üzerinden geliştirilmiş bir bulanık kümedir. Pisagor bulanık kümeler, sezgisel bulanık kümelerin belirsizliği ele

alamayacağı durumlarda kullanılabilmesi nedeni ile belirsizlik içeren problemleri çözmek için sezgisel bulanık kümelerden daha güçlü ve esnekler [21], [22]. Pisagor bulanık kümeler, sezgisel bulanık kümeler gibi üyelik derecesi ve üye olmama derecesi ile karakterize edilir ve üyelik derecesi ile üye olmama derecesinin karelerinin toplamının bir veya birin altında olması şartına dayanmaktadır.

Bu bölümde, aşağıdaki bölümlerde kullanılacak olan Pisagor bulanık kümeler ve Pisagor bulanık sayılar ile ilgili bazı temel kavramlar açıklanmaktadır.

**Tanım 3.1:** Sezgisel bulanık küme  $A$ , sonlu küme  $X$  olarak şöyle yazılabilir [23]:

$$A = \{ \langle x, A(\mu_A(x), v_A(x)) \rangle \mid x \in X \}$$

burada  $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$  üyelik derecesini ve  $v_A(x): X \rightarrow [0,1]$  üye olmama derecesini tanımlamaktadır. Her  $x \in X$  için  $\mu_A(x)$  ve  $v_A(x)$ ,  $0 \leq \mu_A(x) + v_A(x) \leq 1$  olarak ifade edilir. Tereddüt derecesi  $\pi_A(x)$  ise  $\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - v_A(x)$  olarak ifade edilir.

**Tanım 3.2:** Pisagor bulanık küme  $P$ , sonlu küme  $X$  olarak şöyle yazılabilir [23]:

$$P = \{ \langle x, P(\mu_P(x), v_P(x)) \rangle \mid x \in X \}$$

burada  $\mu_P(x): X \rightarrow [0,1]$ , üyelik derecesini ve  $v_P(x): X \rightarrow [0,1]$  üye olmama derecesini göstermektedir. Her  $x \in X$  için  $\mu_P(x)$  ve  $v_P(x)$ ,  $(\mu_P(x))^2 + (v_P(x))^2 \leq 1$  olarak ifade edilir. Tereddüt derecesi  $\pi_P(x)$ ,  $\pi_P(x) = \sqrt{1 - \mu_P^2(x) - v_P^2(x)}$  olarak ifade edilir.

**Tanım 3.3:**  $P_i = (\mu_{P_i}, v_{P_i}) (i = 1, 2, \dots, n)$  Pisagor bulanık sayılarının  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  ve  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$  ağırlık vektörü ile Pisagor bulanık ağırlıklı ortalama (PFWA) operatörü yardımıyla aşağıdaki gibi birleştirilir [24], [25].

$$\begin{aligned} PFWA(P_1, P_2, \dots, P_n) &= w_1 P_1 \oplus w_2 P_2 \oplus \dots \oplus w_n P_n \\ &= P \left( \sqrt{1 - \prod_{j=1}^n (1 - (\mu_{P_j})^2)^{w_j}}, \sqrt{\prod_{j=1}^n (v_{P_j})^{w_j}} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

**Tanım 3.4:**  $P_1 = P(\mu_{P_1}, v_{P_1})$  ve  $P_2 = P(\mu_{P_2}, v_{P_2})$  Pisagor bulanık sayılar ve  $\lambda > 0$  olsun. Bu iki bulanık sayı arasındaki işlemler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [22], [23].

$$P_1 \oplus P_2 = P \left( \sqrt{\mu_{P_1}^2 + \mu_{P_2}^2 - \mu_{P_1}^2 \mu_{P_2}^2}, \sqrt{v_{P_1} v_{P_2}} \right) \quad (2)$$

$$P_1 \otimes P_2 = P \left( \mu_{P_1} \mu_{P_2}, \sqrt{v_{P_1}^2 + v_{P_2}^2 - v_{P_1}^2 v_{P_2}^2} \right) \quad (3)$$

$$\lambda P_1 = P \left( \sqrt{1 - (1 - \mu_{P_1}^2)^\lambda}, (v_{P_1})^\lambda \right), \quad \lambda > 0 \quad (4)$$

$$P_1^\lambda = P \left( (\mu_{P_1})^\lambda, \sqrt{1 - (1 - v_{P_1}^2)^\lambda} \right), \quad \lambda > 0 \quad (5)$$

**Tanım 3.5:** İki Pisagor bulanık küme arasındaki uzaklık aşağıdaki gibi tanımlanır [26].

$$\begin{aligned} d(P_1, P_2) &= \sqrt{(\mu_{P_1}^2 - \mu_{P_2}^2)^2 + (v_{P_1}^2 - v_{P_2}^2)^2 + (\pi_{P_1}^2 - \pi_{P_2}^2)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

### 3.2. Pisagor Bulanık TOPSIS Yöntemi

Grup karar verme probleminin Pisagor bulanık sayılarla etkin bir şekilde ele alınması için, en uygun alternatifin pozitif ideal çözümden en kısa mesafede ve negatif ideal çözümden en uzak mesafede olması ilkesine dayanan bir Pisagor bulanık TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Pisagor bulanık TOPSIS yönteminin adımları aşağıdaki gibidir [26].

Pisagor bulanık verilerden oluşan bir grup karar verme problemi için, uygun alternatifler kümesi  $A_i = \{A_1, A_2, \dots, A_l\}$ , kriterler kümesi  $C_j = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$  ve uzmanlar kümesi  $U_k = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$  olarak tanımlanır.  $n$  tane uzman  $l$  tane alternatifi  $m$  tane kriter açısından değerlendirir ve  $x_{ij}^{(k)} = (\mu_{ij}^{(k)}, v_{ij}^{(k)}, \pi_{ij}^{(k)})$  olarak temsil edilen  $X^{(k)} = (x_{ij}^{(k)})_{l \times m}$  Pisagor bulanık karar matrisi oluşturulur.

Adım 1. Uzman ağırlıklarının hesaplanması.  
 $P_k = [\mu_k, v_k, \pi_k]$   $k$ . uzman değerlendirmesi için Pisagor bulanık sayılar olsun.  $k$ . uzman için ağırlık aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\sigma_k = \frac{\left( \mu_k + \pi_k \left( \frac{\mu_k}{\mu_k + v_k} \right) \right)}{\sum_{k=1}^n \left( \mu_k + \pi_k \left( \frac{\mu_k}{\mu_k + v_k} \right) \right)} \quad (7)$$

burada  $\sum_{k=1}^n \sigma_k = 1$  ve  $\pi_k = \sqrt{1 - \mu_k^2 - v_k^2}$  olarak tanımlanır.

Adım 2. Pisagor bulanık ağırlıklı ortalama (PFWA) kullanılarak uzman görüşleri birleştirilir.

$$\begin{aligned} x_{ij} &= PFWA_\sigma(X_{ij}^{(1)}, X_{ij}^{(2)}, \dots, X_{ij}^{(n)}) \\ &= \sigma_1 X_{ij}^{(1)} \oplus \sigma_2 X_{ij}^{(2)} \oplus \dots \oplus \sigma_n X_{ij}^{(n)} \\ &= \left( \sqrt{1 - \prod_{k=1}^n (1 - (\mu_{ij}^{(k)})^2)^{\sigma_k}}, \sqrt{\prod_{j=1}^n (v_{ij}^{(k)})^{\sigma_k}} \right) \\ &= \left( \sqrt{\prod_{k=1}^n (1 - (\mu_{ij}^{(k)})^2)^{\sigma_k} - \left( \prod_{k=1}^n (v_{ij}^{(k)})^{\sigma_k} \right)^2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Adım 3.  $w_j^{(k)} = [\mu_j^{(k)}, v_j^{(k)}, \pi_j^{(k)}]$  k. uzmanın  $C_j$  kriteri için Pisagor bulanık sayılar değerlendirmesi olsun. Uzmanların kriterler hakkındaki görüşleri, her bir kriterin ağırlığını belirlemek için PFWA operatörü kullanılarak birleştirilir.

$$w_j = PFWA_{\sigma} (w_j^{(1)}, w_j^{(2)}, \dots, w_j^{(n)})$$

$$= \sigma_1 w_j^{(1)} \oplus \sigma_2 w_j^{(2)} \oplus \dots \oplus \sigma_n w_j^{(n)}$$

$$= \left( \sqrt{\frac{1 - \prod_{k=1}^n (1 - (\mu_j^{(k)})^2)^{\sigma_k}}{\prod_{k=1}^n (1 - (\mu_j^{(k)})^2)^{\sigma_k}}}, \sqrt{\frac{\prod_{k=1}^n (v_j^{(k)})^{\sigma_k}}{\prod_{k=1}^n (v_j^{(k)})^{\sigma_k}}}, \sqrt{\frac{\prod_{k=1}^n (\pi_j^{(k)})^{\sigma_k}}{\prod_{k=1}^n (\pi_j^{(k)})^{\sigma_k}}} \right) \quad (9)$$

Adım 4. Birleştirilmiş ağırlıklı Pisagor bulanık karar matrisi Tanım 3.4'te verilen çarpma operatörü kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$x'_{ij} = x_{ij} \otimes w_j \quad (10)$$

Adım 5.  $J_1$  fayda tipi kriter,  $J_2$  maliyet tipi kriter olsun. Pisagor bulanık pozitif ideal ve negatif ideal çözüm aşağıdaki gibi elde edilir.

$$A^+ = \{ \langle C_j, \mu_{A^+ w}, v_{A^+ w} \rangle | C_j \in C, j = 1, 2, \dots, m \} \quad (11)$$

$$A^- = \{ \langle C_j, \mu_{A^- w}, v_{A^- w} \rangle | C_j \in C, j = 1, 2, \dots, m \} \quad (12)$$

Adım 6. Her bir alternatifin Pisagor bulanık pozitif ideal ve negatif ideal çözüme olan uzaklığı belirlemek için Öklid mesafesi kullanılır. İki Pisagor bulanık sayı arasında normalize edilmiş Öklid mesafesi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$D(A_i, A^+) = \sqrt{\frac{1}{2m} \sum_{j=1}^m \left[ \frac{(\mu_{A_i w}^2(C_j) - \mu_{A^+ w}^2(C_j))^2}{\mu_{A_i w}^2(C_j) + \mu_{A^+ w}^2(C_j)} + \frac{(v_{A_i w}^2(C_j) - v_{A^+ w}^2(C_j))^2}{v_{A_i w}^2(C_j) + v_{A^+ w}^2(C_j)} + \frac{(\pi_{A_i w}^2(C_j) - \pi_{A^+ w}^2(C_j))^2}{\pi_{A_i w}^2(C_j) + \pi_{A^+ w}^2(C_j)} \right]} \quad (13)$$

$$D(A_i, A^-) = \sqrt{\frac{1}{2m} \sum_{j=1}^m \left[ \frac{(\mu_{A_i w}^2(C_j) - \mu_{A^- w}^2(C_j))^2}{\mu_{A_i w}^2(C_j) + \mu_{A^- w}^2(C_j)} + \frac{(v_{A_i w}^2(C_j) - v_{A^- w}^2(C_j))^2}{v_{A_i w}^2(C_j) + v_{A^- w}^2(C_j)} + \frac{(\pi_{A_i w}^2(C_j) - \pi_{A^- w}^2(C_j))^2}{\pi_{A_i w}^2(C_j) + \pi_{A^- w}^2(C_j)} \right]} \quad (14)$$

$i = 1, 2, \dots, l.$

Adım 7. Görelî yakınlık katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\zeta(A_i) = \frac{D(A_i, A^-)}{D_{max}(A_i, A^-)} - \frac{D(A_i, A^+)}{D_{min}(A_i, A^+)}, i = 1, 2, \dots, l. \quad (15)$$

Görelî yakınlık katsayısı bir alternatifin Pisagor bulanık pozitif ideal çözüme ne kadar yakın olduğunu ve Pisagor bulanık negatif ideal çözümden ne kadar

uzak olduğunu ölçer.  $\zeta(A_i) \leq 0 (i = 1, 2, \dots, l)$  gösterimine sahip  $\zeta(A_i)$  değeri ne kadar büyükse  $A_i$  alternatifi tercih edilebilir olur.

Adım 8. Alternatifler azalan sırada sıralanır ve en büyük görelî yakınlık katsayısına sahip olan alternatif en uygun alternatif olarak seçilir.

### 3.3. Bulanık COPRAS Yöntemi

COPRAS (COMplex PROportional ASsesment – Karmaşık Nisbi Değerlendirme) yöntemi, kriterlerin fayda ve maliyet yönlü oluşlarını dikkate alarak seçenekleri değerlendiren ve sıralayan bir çok kriterli karar verme yöntemidir.

Bulanık COPRAS yönteminin adımları aşağıdaki gibidir [27], [28].

Adım 1. Karar vericiler tarafından kullanılan dilsel ifadeler tanımlanır.

Adım 2. Bulanık karar matrisi oluşturulur.

$$\tilde{X} = [\tilde{x}_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 & \dots & K_n \\ A_1 & \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ A_2 & \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_m & \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix}$$

$$i = 1, 2, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, \dots, n$$

$$\tilde{x}_{ij} = (\tilde{x}_{ij1}, \tilde{x}_{ij2}, \tilde{x}_{ij3}),$$

Adım 3. Kriter ağırlıkları belirlenir.

Adım 4. Grup karar verme için  $K$  adet karar vericiden oluşan uzman görüşleri Eşitlik (16) kullanılarak birleştirilir.

$$\tilde{x}_{ij1} = \min\{\tilde{x}_{ijk1}\}; \tilde{x}_{ij2} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \tilde{x}_{ijk2}; \tilde{x}_{ij3} = \max\{\tilde{x}_{ijk3}\} \quad (16)$$

burada  $\tilde{x}_{ijk} = (\tilde{x}_{ijk1}, \tilde{x}_{ijk2}, \tilde{x}_{ijk3})$  olarak tanımlanır.

Adım 5. Bulanık karar matrisi Eşitlik (17) kullanılarak durulaştırılır ve durulaştırılmış bulanık karar matrisi oluşturulur.

$$x_{ij} = \frac{[(\tilde{x}_{ij3} - \tilde{x}_{ij1}) + (\tilde{x}_{ij2} - \tilde{x}_{ij1})]}{3} + \tilde{x}_{ij1} \quad (17)$$

Adım 6. Normalize karar matrisi Eşitlik (18) kullanılarak oluşturulur.

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (18)$$

Adım 7. Ağırlıklı normalize karar matrisi Eşitlik (19) ile oluşturulur.

$$\hat{x}_{ij} = \bar{x}_{ij} \cdot w_j \quad (19)$$

Adım 8. Fayda ve maliyet ölçütlerini baz alan toplam ağırlıklı normalize değerler Eşitlik (20) kullanılarak hesaplanır.

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^k \hat{x}_{+ij}, i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, k$$

$$S_{-i} = \sum_{j=k+1}^n \hat{x}_{-ij}, i = 1, 2, \dots, m \quad j = k + 1, k + 2, \dots, n \quad (20)$$

Adım 9. Görelî önem değerleri Eşitlik (21) kullanılarak hesaplanır.

$$Q_i = S_{+i} + \frac{\sum_{i=1}^n S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_{-i}}} \quad (21)$$

Adım 10. Performans indeksi değeri Eşitlik (22) ile hesaplanır.

$$P_i = \left[ \frac{Q_i}{Q_{max}} \right] \cdot 100\% \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (22)$$

burada  $Q_{max} = \max\{Q_i\}, i = 1, 2, \dots, n$  olarak tanımlanır.

Adım 11. Alternatifler performans indeksine göre büyükten küçüğe doğru sıralanır ve en iyi alternatif seçilir.

### 3.4. TOPSIS Yöntemi

TOPSIS yöntemi, Hwang ve Yoon [29] tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemin temel mantığı, seçilen alternatifin pozitif ideal çözümden en kısa mesafeye ve negatif ideal çözümden en uzak mesafeye sahip olması gerektiğidir [30], [31].

TOPSIS yöntemi adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1. Uzman görüşleri birleştirme operatörleri kullanılarak birleştirilir.

Adım 2. Ağırlıklı normalleştirilmiş  $v_{ij}$  değeri, Eşitlik (23) kullanılarak hesaplanır.

$$v_{ij} = w_i \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^J f_{ij}^2}}, j = 1, \dots, J; i = 1, \dots, n \quad (23)$$

burada  $w_i$  i. kriterin ağırlığıdır ve  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$  denklemi sağlanır.

Adım 3. Pozitif ideal çözüm  $A^*$  ve negatif ideal çözüm  $A^-$  Eşitlik (24) ve (25) kullanılarak aşağıdaki gibi belirlenir.

$$A^* = \{v_1^*, \dots, v_n^*\} = \{(max_j v_{ij} | i \in I'), (min_j v_{ij} | i \in I'')\} \quad (24)$$

$$A^- = \{v_1^-, \dots, v_n^-\} = \{(min_j v_{ij} | i \in I'), (max_j v_{ij} | i \in I'')\} \quad (25)$$

burada  $I'$  fayda kriterlerini,  $I''$  ise maliyet kriterlerini belirtir.

Adım 4. Her bir alternatifin pozitif ideal ve negatif ideal çözümden uzaklığı Öklid mesafesi ile Eşitlik (26) ve (27) kullanılarak hesaplanır.

$$D_j^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^*)^2}, j = 1, \dots, J. \quad (26)$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^-)^2}, j = 1, \dots, J. \quad (27)$$

Adım 5. Görelî yakınlık katsayısı ( $C_j^*$ ) Eşitlik (28) kullanılarak hesaplanır.

$$C_j^* = \frac{D_j^-}{D_j^* + D_j^-}, j = 1, \dots, J \quad (28)$$

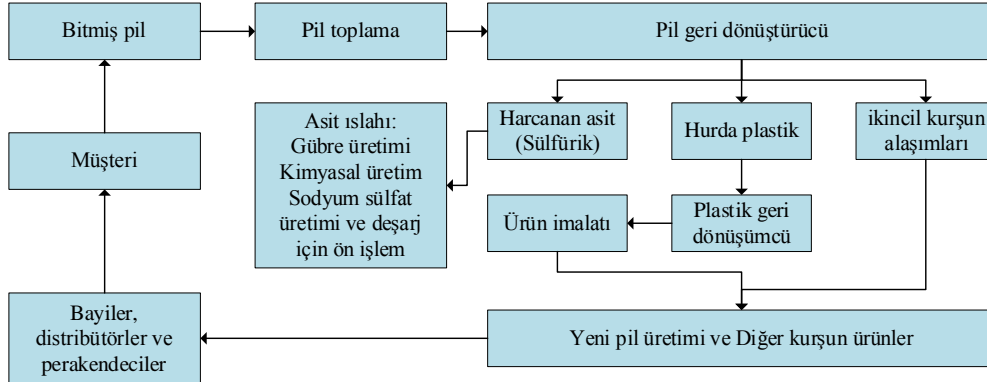
Adım 6. Alternatifler görelî yakınlık katsayısına göre büyükten küçüğe doğru sıralanır ve ilk sıradaki alternatif en iyi alternatif olarak seçilir.

## IV. UYGULAMA

Bu çalışmada, bir pil üretim şirketinden alınan verilere dayanan deneysel bir uygulama yapılmıştır [5]. Kannan vd. [5] çalışmalarında IMS (Interpretive Structural Modeling) ve bulanık TOPSIS yöntemlerini kapsayan karar verme modelini, Hindistan'da pil ile ilgili tüm parçaların üretim şirketleri tarafından geri dönüştürüldüğü ve yeniden kullanıldığı bir pil geri dönüşüm endüstrisine uygulamıştır. Pil üretiminde oluşan toplam maliyeti azaltmak için, kullanım ömrünü tamamlamış piller 3PTLS tarafından toplanır ve geri dönüşüm işlemine başlamak için bileşenlerine ayrılır. Daha sonra ikincil kurşun alaşımları, hurda plastik ve harcanan sülfürik asit daha fazla geri dönüşüm işlemi için ayrıştırılır. Son olarak, eski pillerden geri dönüştürülen plastik, pil kapakları ve kılıfları üretmek için kullanılır; ikincil kurşun alaşımları yeni pil ızgaraları ve bileşenleri üretmek için kullanılır; Sülfürik asit kristalleri gübre üretimi, kimyasal üretim ve deşarj için ön işlem gibi çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Şekil 2, detaylı olarak süreç hakkında bilgi vermektedir.

### 4.1. Kriterlerin Belirlenmesi

3PTLS seçim problemi için yedi değerlendirme kriteri Tablo 1'deki gibi tanımlanmıştır [4], [5]:



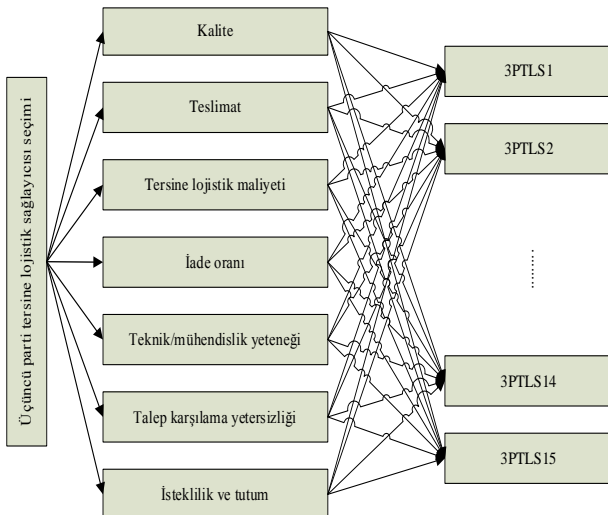
Şekil 2. Kurşun-asit pil geri dönüşüm süreci

Tablo 1. Kriterler ve açıklamaları

Kriterler	Açıklama	Referans
Kalite	Ürün performansını, kalitesini ve 3PTLS'nin kalite farkındalığını, hizmetin zamanında yapılmasını, denetim yöntemlerini ve sorunlarla başa çıkma becerisini içerir.	Chen vd. [8], Govindan vd. [6]
Teslimat	3PTLS'nin teslimat programlarını karşılama yeteneğini ifade eder. Teslimatın esnekliğini ve güvenilirliğini, teslim süresini vb. kapsar.	Senthil vd. [4], Kannan vd. [5]
TL maliyeti	3PTLS'nin seçilmesi sonucunda ortaya çıkabilecek maliyetleri ifade eder. Örneğin, envanter maliyeti, nakliye maliyeti, malzeme maliyeti, muayene maliyeti, paketleme maliyeti, stok maliyeti vb.	Chen vd. [8], Govindan vd. [6]
İade oranı	Geri dönüşüm işlemi için iade edilen ürünün kalite spesifikasyonlarını tutarlı bir şekilde karşılayamaması anlamına gelir.	Kannan vd. [5]
Teknik/Mühendislik Yeteneği	İş için gerekli teknik ve mühendislik altyapısını içerir. Örneğin, gelişmiş ekipman seviyesi, işleme yeteneği, teknik işgücünün kullanılabilirliği, TL işlevini gerçekleştirme yeteneği vb.	Govindan vd. [6], Kannan vd. [5]
Talep karşılama yetersizliği	Beklenen talebin karşılanamaması, yani, geri dönüş koordinasyonunu iyi yönetememek anlamına gelir.	Guarnieri vd. [32], Kannan vd. [5]
İsteklilik ve Tutum	3PTLS'nin alıcıya karşı tutumunu ve işi yapma istekliliğini ifade eder.	Chen vd. [8], Kannan vd. [5]

#### 4.2. Pisagor Bulanık TOPSIS Yönteminin Uygulanması

Geri dönüşüm sürecine dahil olan bir pil üretim işletmesi, TL faaliyetleri için uygun bir TL sağlayıcısını belirlemek istemektedir. Ele alınan vaka çalışmasında en uygun 3PTLS'yi seçmek için beş karar vericiden oluşan bir komite kurulmuştur. Bu 3PTLS seçim karar problemi yedi kriter ve on beş alternatiften oluşmaktadır. Problemin hiyerarşik yapısı Şekil 3'te gösterildiği gibidir.



Şekil 3. Karar probleminin hiyerarşik yapısı.

Pisagor bulanık TOPSIS yönteminin hesaplama prosedürü aşağıdaki gibidir.

Karar vericiler, Tablo 2 ve Tablo 3'te gösterilen kriterlerin ve alternatiflerin önemini değerlendirmek için dilsel ifadeleri kullanır. Ele alınan problem için beş karar vericinin belirlediği kriterlerin ağırlıkları Tablo 4'te gösterilmiştir. Adım 1'de beş karar vericinin ağırlıkları eşit alınmıştır.

Tablo 2. Kriterlerin ve uzmanların değerlendirilmesi için dilsel ifadeler [26]

Dilsel ifadeler	Pisagor bulanık sayılar ( $\mu, v$ )
Çok Yüksek (ÇY)	[0.90, 0.20]
Yüksek (Y)	[0.80, 0.45]
Orta (O)	[0.65, 0.50]
Düşük (D)	[0.40, 0.60]
Çok Düşük (ÇD)	[0.20, 0.90]

Tablo 3. Alternatiflerin değerlendirilmesi için dilsel ifadeler [33]

Dilsel ifadeler	Pisagor bulanık sayılar ( $\mu, v$ )
Çok İyi (Çİ)	[0.85, 0.15]
İyi (İ)	[0.75, 0.25]



Biraz İyi (BI)	[0.65, 0.35]
Orta (O)	[0.55, 0.45]
Biraz Kötü (BK)	[0.35, 0.65]
Kötü (K)	[0.25, 0.75]
Çok Kötü (ÇK)	[0.15, 0.85]

**Tablo 4.** Beş karar vericiden alınan kriterlerin önem dereceleri

Kriterler	KV <sub>1</sub>	KV <sub>2</sub>	KV <sub>3</sub>	KV <sub>4</sub>	KV <sub>5</sub>
Kalite (C1)	ÇY	Y	O	Y	Y
Teslimat (C2)	Y	Y	ÇY	Y	Y
TL maliyeti (C3)	ÇY	Y	ÇY	ÇY	Y
İade oranı (C4)	ÇY	D	Y	O	O
Teknik/Mühendislik yeteneği (C5)	O	O	Y	Y	D
Talep karşılama yetersizliği (C6)	D	O	ÇD	D	O
İsteklilik ve tutum (C7)	Y	ÇD	Y	O	ÇY

Adım 2’de Eşitlik (8)’de gösterildiği gibi PFWA birleştirme operatörü kullanılarak uzman görüşleri birleştirilmiş ve birleştirilmiş Pisagor bulanık karar matrisi Tablo 5’te verilmiştir.

Adım 3’te Eşitlik (9)’da verilen PFWA operatörü kullanılarak aşağıdaki kriter ağırlık matrisi oluşturulmuştur:

$$W_{\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7\}} = \begin{bmatrix} 0.81 & 0.39 & 0.44 \\ 0.83 & 0.38 & 0.41 \\ 0.87 & 0.28 & 0.41 \\ 0.74 & 0.42 & 0.52 \\ 0.70 & 0.50 & 0.52 \\ 0.51 & 0.60 & 0.61 \\ 0.76 & 0.45 & 0.47 \end{bmatrix}^T$$

Ağırlıklı birleştirilmiş Pisagor bulanık karar matrisi Eşitlik (10) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 6’da sunulmuştur.

**Tablo 5.** Birleştirilmiş Pisagor bulanık karar matrisi

Alternatifler	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
3PTLS1	(0.57, 0.44, 0.7)	(0.73, 0.28, 0.63)	(0.73, 0.28, 0.63)	(0.71, 0.29, 0.64)	(0.26, 0.75, 0.61)	(0.76, 0.24, 0.6)	(0.59, 0.41, 0.69)
3PTLS2	(0.23, 0.79, 0.58)	(0.23, 0.79, 0.58)	(0.66, 0.34, 0.66)	(0.64, 0.36, 0.68)	(0.73, 0.28, 0.63)	(0.74, 0.26, 0.62)	(0.39, 0.62, 0.68)
3PTLS3	(0.39, 0.62, 0.68)	(0.73, 0.28, 0.63)	(0.74, 0.26, 0.62)	(0.28, 0.73, 0.63)	(0.74, 0.26, 0.62)	(0.51, 0.5, 0.7)	(0.59, 0.41, 0.69)
3PTLS4	(0.74, 0.26, 0.62)	(0.51, 0.5, 0.7)	(0.26, 0.75, 0.61)	(0.81, 0.2, 0.56)	(0.77, 0.23, 0.59)	(0.76, 0.24, 0.6)	(0.27, 0.74, 0.61)
3PTLS5	(0.77, 0.23, 0.59)	(0.49, 0.52, 0.7)	(0.51, 0.5, 0.7)	(0.61, 0.39, 0.69)	(0.71, 0.29, 0.64)	(0.77, 0.23, 0.59)	(0.26, 0.75, 0.61)
3PTLS6	(0.28, 0.73, 0.63)	(0.42, 0.59, 0.68)	(0.59, 0.41, 0.69)	(0.22, 0.79, 0.58)	(0.64, 0.36, 0.68)	(0.26, 0.75, 0.61)	(0.37, 0.64, 0.67)
3PTLS7	(0.77, 0.23, 0.59)	(0.68, 0.32, 0.66)	(0.29, 0.72, 0.63)	(0.26, 0.75, 0.61)	(0.77, 0.23, 0.59)	(0.61, 0.39, 0.69)	(0.42, 0.59, 0.68)
3PTLS8	(0.62, 0.38, 0.68)	(0.3, 0.71, 0.64)	(0.71, 0.29, 0.64)	(0.64, 0.36, 0.68)	(0.71, 0.29, 0.64)	(0.77, 0.23, 0.59)	(0.74, 0.26, 0.62)
3PTLS9	(0.61, 0.39, 0.69)	(0.68, 0.33, 0.66)	(0.77, 0.23, 0.59)	(0.47, 0.54, 0.7)	(0.43, 0.58, 0.69)	(0.61, 0.39, 0.69)	(0.59, 0.41, 0.69)
3PTLS10	(0.71, 0.29, 0.64)	(0.68, 0.32, 0.66)	(0.71, 0.3, 0.64)	(0.77, 0.23, 0.59)	(0.64, 0.36, 0.68)	(0.45, 0.56, 0.7)	(0.67, 0.34, 0.67)
3PTLS11	(0.64, 0.36, 0.68)	(0.27, 0.74, 0.61)	(0.76, 0.25, 0.6)	(0.41, 0.62, 0.67)	(0.68, 0.32, 0.66)	(0.78, 0.22, 0.58)	(0.67, 0.33, 0.66)
3PTLS12	(0.61, 0.39, 0.69)	(0.57, 0.43, 0.7)	(0.74, 0.26, 0.62)	(0.64, 0.36, 0.68)	(0.29, 0.72, 0.63)	(0.71, 0.29, 0.64)	(0.73, 0.28, 0.63)
3PTLS13	(0.24, 0.77, 0.59)	(0.28, 0.73, 0.63)	(0.74, 0.26, 0.62)	(0.26, 0.75, 0.61)	(0.67, 0.34, 0.67)	(0.64, 0.36, 0.68)	(0.73, 0.28, 0.63)
3PTLS14	(0.77, 0.23, 0.59)	(0.73, 0.28, 0.63)	(0.49, 0.52, 0.7)	(0.59, 0.41, 0.69)	(0.74, 0.26, 0.62)	(0.67, 0.34, 0.67)	(0.81, 0.2, 0.56)
3PTLS15	(0.62, 0.38, 0.68)	(0.68, 0.32, 0.66)	(0.45, 0.56, 0.7)	(0.64, 0.36, 0.68)	(0.7, 0.31, 0.65)	(0.28, 0.73, 0.63)	(0.39, 0.62, 0.68)

**Tablo 6.** Ağırlıklı birleştirilmiş Pisagor bulanık karar matrisi

Alternatifler	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
3PTLS1	(0.46, 0.56, 0.69)	(0.6, 0.46, 0.65)	(0.63, 0.38, 0.67)	(0.53, 0.5, 0.69)	(0.18, 0.82, 0.55)	(0.39, 0.63, 0.67)	(0.45, 0.58, 0.68)
3PTLS2	(0.18, 0.82, 0.54)	(0.19, 0.82, 0.54)	(0.58, 0.43, 0.69)	(0.47, 0.54, 0.7)	(0.51, 0.55, 0.66)	(0.38, 0.64, 0.67)	(0.29, 0.71, 0.64)
3PTLS3	(0.31, 0.69, 0.65)	(0.6, 0.46, 0.65)	(0.65, 0.37, 0.67)	(0.21, 0.78, 0.59)	(0.52, 0.55, 0.66)	(0.26, 0.72, 0.64)	(0.45, 0.58, 0.68)
3PTLS4	(0.6, 0.46, 0.66)	(0.42, 0.6, 0.68)	(0.22, 0.77, 0.6)	(0.6, 0.46, 0.66)	(0.54, 0.54, 0.65)	(0.39, 0.63, 0.67)	(0.2, 0.8, 0.56)
3PTLS5	(0.63, 0.44, 0.64)	(0.4, 0.62, 0.68)	(0.45, 0.55, 0.71)	(0.45, 0.55, 0.7)	(0.5, 0.56, 0.67)	(0.39, 0.63, 0.67)	(0.2, 0.8, 0.56)
3PTLS6	(0.23, 0.77, 0.59)	(0.35, 0.67, 0.66)	(0.52, 0.48, 0.71)	(0.16, 0.83, 0.53)	(0.45, 0.59, 0.67)	(0.13, 0.85, 0.51)	(0.28, 0.73, 0.63)
3PTLS7	(0.62, 0.45, 0.64)	(0.56, 0.48, 0.67)	(0.25, 0.75, 0.61)	(0.19, 0.8, 0.57)	(0.54, 0.54, 0.65)	(0.31, 0.68, 0.66)	(0.32, 0.7, 0.64)
3PTLS8	(0.5, 0.52, 0.69)	(0.25, 0.76, 0.6)	(0.62, 0.39, 0.68)	(0.47, 0.54, 0.7)	(0.5, 0.56, 0.67)	(0.39, 0.63, 0.67)	(0.56, 0.51, 0.65)
3PTLS9	(0.5, 0.53, 0.69)	(0.56, 0.49, 0.67)	(0.67, 0.36, 0.65)	(0.35, 0.64, 0.68)	(0.3, 0.71, 0.64)	(0.31, 0.68, 0.66)	(0.45, 0.58, 0.68)
3PTLS10	(0.58, 0.47, 0.67)	(0.56, 0.48, 0.67)	(0.62, 0.4, 0.68)	(0.57, 0.47, 0.67)	(0.45, 0.59, 0.67)	(0.23, 0.75, 0.62)	(0.51, 0.54, 0.67)
3PTLS11	(0.52, 0.51, 0.68)	(0.22, 0.79, 0.58)	(0.66, 0.36, 0.66)	(0.3, 0.71, 0.64)	(0.47, 0.57, 0.67)	(0.4, 0.63, 0.67)	(0.51, 0.54, 0.67)
3PTLS12	(0.5, 0.53, 0.69)	(0.47, 0.55, 0.69)	(0.65, 0.37, 0.67)	(0.47, 0.54, 0.7)	(0.2, 0.8, 0.56)	(0.36, 0.65, 0.67)	(0.55, 0.51, 0.66)
3PTLS13	(0.2, 0.81, 0.56)	(0.23, 0.77, 0.59)	(0.65, 0.37, 0.67)	(0.19, 0.8, 0.57)	(0.46, 0.58, 0.67)	(0.33, 0.67, 0.67)	(0.55, 0.51, 0.66)
3PTLS14	(0.62, 0.45, 0.64)	(0.6, 0.46, 0.65)	(0.42, 0.57, 0.7)	(0.44, 0.56, 0.7)	(0.52, 0.55, 0.66)	(0.34, 0.66, 0.67)	(0.61, 0.48, 0.63)
3PTLS15	(0.5, 0.52, 0.69)	(0.56, 0.48, 0.67)	(0.39, 0.61, 0.69)	(0.47, 0.54, 0.7)	(0.48, 0.56, 0.67)	(0.14, 0.84, 0.53)	(0.29, 0.71, 0.64)

Pisagor bulanık pozitif ideal ve negatif ideal çözüm sırasıyla Eşitlik (11) ve (12) formülleri kullanılarak bulunmuştur. Bulunan Pisagor bulanık pozitif ideal ve negatif ideal çözüm değerleri aşağıdaki gibidir.

$$A^+ = \left\{ \begin{array}{l} (0.63, 0.44, 0.64), (0.6, 0.46, 0.65), (0.67, 0.36, 0.65), \\ (0.60, 0.46, 0.66), (0.54, 0.54, 0.65), \\ (0.40, 0.63, 0.67), (0.61, 0.48, 0.63) \end{array} \right\}$$

$$A^- = \left\{ \begin{array}{l} (0.18, 0.82, 0.54), (0.19, 0.82, 0.54), (0.22, 0.77, 0.60), \\ (0.16, 0.83, 0.53), (0.18, 0.82, 0.55), \\ (0.13, 0.85, 0.51), (0.20, 0.80, 0.56) \end{array} \right\}$$

Her bir alternatifin Pisagor bulanık pozitif ideal ve negatif ideal çözümden uzaklıkları Eşitlik (13) ve (14)'te gösterildiği gibi Öklid uzaklığı kullanılarak ve görelî yakınlık katsayısı Eşitlik (15) kullanılarak

hesaplanmıştır. Pisagor bulanık pozitif ideal ve negatif ideal çözümden uzaklıklar, alternatiflerin görelî yakınlık katsayıları Tablo 7'de verilmiştir.

Alternatiflerin  $3PTLS_i = (i = 1, 2, \dots, 15)$  görelî ağırlıklarına göre sıralandığında aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$3PTLS_{10} > 3PTLS_{14} > 3PTLS_9 > 3PTLS_8 > 3PTLS_{12} > 3PTLS_1 > 3PTLS_{11} > 3PTLS_5 > 3PTLS_3 > 3PTLS_{15} > 3PTLS_4 > 3PTLS_7 > 3PTLS_{13} > 3PTLS_2 > 3PTLS_6$$

Bu sonuçlara göre,  $3PTLS_{10}$  alternatifi şirket için en uygun TL sağlayıcısı olarak seçilmiştir.

**Tablo 7.** Pisagor bulanık TOPSIS analiz sonuçları

Alternatifler	$D(A_i, A^+)$	$D(A_i, A^-)$	$\zeta(A_i)$	Pisagor Bulanık TOPSIS
3PTLS1	0.154	0.322	-0.939	6
3PTLS2	0.256	0.251	-2.395	14
3PTLS3	0.190	0.290	-1.471	9
3PTLS4	0.227	0.297	-1.908	11
3PTLS5	0.188	0.293	-1.438	8
3PTLS6	0.286	0.182	-2.967	15
3PTLS7	0.236	0.273	-2.089	12
3PTLS8	0.144	0.317	-0.832	4
3PTLS9	0.138	0.307	-0.786	3
3PTLS10	0.082	0.342	-0.001	1
3PTLS11	0.184	0.295	-1.391	7
3PTLS12	0.145	0.317	-0.844	5
3PTLS13	0.255	0.251	-2.378	13
3PTLS14	0.108	0.343	-0.314	2
3PTLS15	0.191	0.277	-1.522	10

**4.3. Bulanık COPRAS Yönteminin Uygulanması**

Bulanık COPRAS yönteminin hesaplama adımları aşağıdaki gibidir.

Karar verici görüşleri Tablo 8'deki dilsel ifadeler yardımıyla dönüştürülmüş ve bulanık karar matrisi oluşturulmuştur. Daha sonra uzman görüşleri Eşitlik (16) kullanılarak birleştirilmiş ve Tablo 9'da sunulmuştur.

Ardından, bulanık karar matrisi Eşitlik (17) kullanılarak durulaştırılan karar matrisi Tablo 10'da verilmiştir.

Eşitlik (18) kullanılarak karar matrisi normalize edilmiştir. Elde edilen normalize karar matrisi ile Eşitlik (19) kullanılarak ağırlıklı karar matrisi oluşturulmuş ve Tablo 11'de sunulmuştur.

Fayda ve maliyet ölçütleri Eşitlik (20), görelî önem değerleri Eşitlik (21) ve her bir alternatifin performans indeksleri Eşitlik (22) kullanılarak hesaplanmış ve hesaplama sonuçları Tablo 12'de sunulmuştur.

**Tablo 8.** Alternatiflerin değerlendirilmesi için dilsel ifadeler

Dilsel ifadeler	Üçgensel bulanık sayılar
Çok İyi (Çİ)	(9, 10, 10)
İyi (İ)	(7, 9, 10)
Biraz İyi (Bİ)	(5, 7, 9)
Orta (O)	(3, 5, 7)
Biraz Kötü (BK)	(1, 3, 5)
Kötü (K)	(0, 1, 3)
Çok Kötü (ÇK)	(0, 0, 1)

Alternatifler performans indekslerine göre büyükten küçüğe doğru sıralandığında elde edilen sonuç aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}
3PTLS_{10} &> 3PTLS_1 > 3PTLS_{12} > 3PTLS_{14} > 3PTLS_8 \\
&> 3PTLS_9 > 3PTLS_3 > 3PTLS_{11} \\
&> 3PTLS_5 > 3PTLS_7 > 3PTLS_4 \\
&> 3PTLS_{15} > 3PTLS_{13} > 3PTLS_2 \\
&> 3PTLS_6
\end{aligned}$$

Bu sonuçlara göre,  $3PTLS_{10}$  alternatifi şirket için en uygun TL sağlayıcısı olarak seçilmiştir.

**Tablo 9.** Birleştirilmiş bulanık karar matrisi

Alternatifler	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
3PTLS1	(1, 4.5, 9)	(5, 6.67, 10)	(0, 1.67, 5)	(0, 2, 7)	(0, 1, 5)	(5, 7.33, 10)	(3, 4.83, 9)
3PTLS2	(0, 0.67, 5)	(0, 0.67, 5)	(0, 3, 7)	(0, 2.83, 7)	(5, 6.67, 10)	(5, 7, 10)	(0, 2.5, 7)
3PTLS3	(0, 2.5, 7)	(5, 6.67, 10)	(0, 1.33, 5)	(5, 7, 10)	(5, 7, 10)	(1, 3.83, 9)	(3, 4.83, 9)
3PTLS4	(5, 7, 10)	(1, 3.83, 9)	(5, 7.33, 10)	(0, 0.67, 5)	(5, 7.17, 10)	(5, 7.33, 10)	(0, 1.17, 5)
3PTLS5	(7, 7.67, 10)	(1, 3.5, 7)	(1, 4.5, 9)	(1, 3.17, 7)	(5, 6.83, 10)	(5, 7.17, 10)	(0, 1, 5)
3PTLS6	(0, 1.33, 5)	(0, 2.5, 7)	(1, 3.5, 7)	(7, 7.83, 10)	(3, 5.5, 10)	(0, 1, 5)	(0, 2.17, 7)
3PTLS7	(5, 7.17, 10)	(3, 6.17, 10)	(5, 6.83, 10)	(5, 7.33, 10)	(5, 7.17, 10)	(3, 5.17, 9)	(0, 2.5, 7)
3PTLS8	(3, 5.17, 10)	(0, 1.67, 5)	(0, 2, 7)	(0, 2.83, 7)	(5, 6.83, 10)	(5, 7.17, 10)	(3, 6.5, 10)
3PTLS9	(3, 5.17, 9)	(3, 5.67, 10)	(0, 1.17, 5)	(3, 5.17, 10)	(0, 2.83, 7)	(3, 5.17, 9)	(3, 4.83, 9)
3PTLS10	(3, 6.33, 10)	(3, 6.17, 10)	(0, 2, 5)	(0, 1.17, 5)	(3, 5.5, 10)	(1, 3.17, 7)	(3, 5.83, 10)
3PTLS11	(3, 5.5, 10)	(0, 1.17, 5)	(0, 1.5, 7)	(3, 6.17, 10)	(3, 6.17, 10)	(5, 7.5, 10)	(5, 6.17, 10)
3PTLS12	(3, 5.17, 9)	(3, 4.5, 9)	(0, 1.33, 5)	(0, 2.83, 7)	(0, 1.5, 5)	(3, 6.33, 10)	(5, 6.67, 10)
3PTLS13	(0, 0.83, 5)	(0, 1.33, 5)	(0, 1.33, 5)	(5, 7.33, 10)	(3, 5.83, 10)	(3, 5.5, 10)	(5, 6.67, 10)
3PTLS14	(5, 7.17, 10)	(5, 6.67, 10)	(3, 4.83, 9)	(1, 3.5, 7)	(5, 7, 10)	(3, 5.83, 10)	(5, 7.67, 10)
3PTLS15	(3, 5.17, 10)	(3, 6.17, 10)	(3, 5.17, 9)	(0, 2.83, 7)	(5, 6.5, 10)	(0, 1.33, 5)	(0, 2.5, 7)
Ağırlıklar	0.16	0.168	0.184	0.136	0.128	0.088	0.136

**Tablo 10.** Durulaştırılmış karar matrisi

Alternatifler	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
3PTLS1	4.833	7.222	2.222	3.000	2.000	7.444	5.611
3PTLS2	1.889	1.889	3.333	3.278	7.222	7.333	3.167
3PTLS3	3.167	7.222	2.111	7.333	7.333	4.611	5.611
3PTLS4	7.333	4.611	7.444	1.889	7.389	7.444	2.056
3PTLS5	8.222	3.833	4.833	3.722	7.278	7.389	2.000
3PTLS6	2.111	3.167	3.833	8.278	6.167	2.000	3.056
3PTLS7	7.389	6.389	7.278	7.444	7.389	5.722	3.167
3PTLS8	6.056	2.222	3.000	3.278	7.278	7.389	6.500
3PTLS9	5.722	6.222	2.056	6.056	3.278	5.722	5.611
3PTLS10	6.444	6.389	2.333	2.056	6.167	3.722	6.278
3PTLS11	6.167	2.056	2.833	6.389	6.389	7.500	7.056
3PTLS12	5.722	5.500	2.111	3.278	2.167	6.444	7.222
3PTLS13	1.944	2.111	2.111	7.444	6.278	6.167	7.222
3PTLS14	7.389	7.222	5.611	3.833	7.333	6.278	7.556
3PTLS15	6.056	6.389	5.722	3.278	7.167	2.111	3.167

**Tablo 11.** Ağırlıklı normalize karar matrisi

Alternatifler	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
3PTLS1	0.010	0.017	0.007	0.006	0.003	0.008	0.010
3PTLS2	0.004	0.004	0.011	0.006	0.010	0.007	0.006
3PTLS3	0.006	0.017	0.007	0.014	0.010	0.005	0.010
3PTLS4	0.015	0.011	0.024	0.004	0.010	0.008	0.004
3PTLS5	0.016	0.009	0.016	0.007	0.010	0.007	0.004
3PTLS6	0.004	0.007	0.012	0.016	0.009	0.002	0.006
3PTLS7	0.015	0.015	0.024	0.014	0.010	0.006	0.006
3PTLS8	0.012	0.005	0.010	0.006	0.010	0.007	0.012
3PTLS9	0.011	0.014	0.007	0.012	0.005	0.006	0.010
3PTLS10	0.013	0.015	0.008	0.004	0.009	0.004	0.011
3PTLS11	0.012	0.005	0.009	0.012	0.009	0.008	0.013
3PTLS12	0.011	0.013	0.007	0.006	0.003	0.006	0.013

3PTLS13	0.004	0.005	0.007	0.014	0.009	0.006	0.013
3PTLS14	0.015	0.017	0.018	0.007	0.010	0.006	0.014
3PTLS15	0.012	0.015	0.019	0.006	0.010	0.002	0.006

**Tablo 12.** Bulanık COPRAS analiz sonuçları

Alternatifler	$S_{+i}$	$S_{-i}$	$Q_i$	$P_i$	Bulanık COPRAS
3PTLS1	0.047	0.013	0.082	90.053	2
3PTLS2	0.031	0.017	0.058	63.818	14
3PTLS3	0.048	0.021	0.070	76.799	7
3PTLS4	0.047	0.028	0.063	69.581	11
3PTLS5	0.047	0.023	0.067	73.095	9
3PTLS6	0.028	0.028	0.044	48.168	15
3PTLS7	0.051	0.038	0.063	69.678	10
3PTLS8	0.047	0.016	0.075	82.498	5
3PTLS9	0.046	0.018	0.071	78.237	6
3PTLS10	0.051	0.012	0.091	100.000	1
3PTLS11	0.046	0.021	0.068	74.221	8
3PTLS12	0.047	0.013	0.081	89.440	3
3PTLS13	0.037	0.021	0.058	64.159	13
3PTLS14	0.062	0.026	0.080	87.430	4
3PTLS15	0.045	0.025	0.063	69.383	12

**4.4. TOPSIS Yönteminin Uygulanması**

TOPSIS yönteminin hesaplama adımları aşağıdaki gibidir. Birleştirilmiş karar verici görüşleri Tablo 13'te sunulmuştur.

Daha sonra, ağırlıklı normalize değerler ( $v_{ij}$ ) Eşitlik (23) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 14'te sunulmuştur.

Pozitif ideal ve negatif ideal çözüm değerleri sırasıyla Eşitlik (24) ve (25) kullanılarak bulunmuştur ve aşağıdaki gibi sunulmuştur.

$$A^+ = \{0.056, 0.057, 0.059, 0.053, 0.039, 0.028, 0.051\}$$

$$A^- = \{0.014, 0.016, 0.020, 0.013, 0.013, 0.009, 0.016\}$$

Her bir alternatifin pozitif ideal ve negatif ideal çözümden uzaklıkları Eşitlik (26) ve (27)'de

gösterildiği gibi Öklid uzaklığı kullanılarak elde edilmiştir. Daha sonra görelî yakınlık katsayısı ( $C_j^*$ ) Eşitlik (28) kullanılarak hesaplanmıştır. Pozitif ideal ve negatif ideal çözümden uzaklıklar ve alternatiflerin görelî yakınlık katsayıları Tablo 15'te verilmiştir.

Alternatifler görelî ağırlıklarına göre büyükten küçüğe doğru sıralandığında çıkan sonuç aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} 3PTLS_{10} &> 3PTLS_{14} > 3PTLS_1 > 3PTLS_{12} > 3PTLS_9 \\ &> 3PTLS_8 > 3PTLS_3 > 3PTLS_5 \\ &> 3PTLS_{15} > 3PTLS_{11} > 3PTLS_4 \\ &> 3PTLS_7 > 3PTLS_{13} > 3PTLS_2 \\ &> 3PTLS_6 \end{aligned}$$

Bu sonuçlara göre,  $3PTLS_{10}$  alternatifi şirket için en uygun TL sağlayıcısı olarak seçilmiştir.

**Tablo 13.** Birleştirilmiş karar matrisi

Alternatifler	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
3PTLS1	4.200	5.600	5.600	5.400	2.000	6.000	4.400
3PTLS2	1.600	1.600	4.800	4.800	5.600	5.800	3.000
3PTLS3	3.000	5.600	5.800	2.200	5.800	3.800	4.400
3PTLS4	5.800	3.800	2.000	6.400	6.000	6.000	2.000
3PTLS5	6.200	3.600	3.800	4.600	5.600	6.000	2.000
3PTLS6	2.200	3.000	4.400	1.600	4.800	2.000	2.800
3PTLS7	6.000	5.200	2.200	2.000	6.000	4.600	3.000
3PTLS8	4.600	2.400	5.400	4.800	5.600	6.000	5.600
3PTLS9	4.600	5.000	6.000	3.400	3.200	4.600	4.400
3PTLS10	5.400	5.200	5.400	6.000	4.800	3.400	5.000
3PTLS11	4.800	2.000	5.800	2.600	5.200	6.200	5.200
3PTLS12	4.600	4.200	5.800	4.800	2.200	5.400	5.600
3PTLS13	1.800	2.200	5.800	2.000	5.000	4.800	5.600
3PTLS14	6.000	5.600	3.600	4.400	5.800	5.000	6.400
3PTLS15	4.600	5.200	3.400	4.800	5.400	2.200	3.000
Ağırlıklar	0.160	0.168	0.184	0.136	0.128	0.088	0.136

**Tablo 14.** Ağırlıklı normalize matris

Alternatifler	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
3PTLS1	0.038	0.057	0.055	0.044	0.013	0.027	0.035
3PTLS2	0.014	0.016	0.047	0.040	0.037	0.027	0.024
3PTLS3	0.027	0.057	0.057	0.018	0.038	0.017	0.035
3PTLS4	0.052	0.039	0.020	0.053	0.039	0.027	0.016
3PTLS5	0.056	0.037	0.037	0.038	0.037	0.027	0.016
3PTLS6	0.020	0.031	0.043	0.013	0.032	0.009	0.022
3PTLS7	0.054	0.053	0.022	0.016	0.039	0.021	0.024
3PTLS8	0.041	0.024	0.053	0.040	0.037	0.027	0.045
3PTLS9	0.041	0.051	0.059	0.028	0.021	0.021	0.035
3PTLS10	0.048	0.053	0.053	0.049	0.032	0.016	0.040
3PTLS11	0.043	0.020	0.057	0.021	0.034	0.028	0.042
3PTLS12	0.041	0.043	0.057	0.040	0.014	0.025	0.045
3PTLS13	0.016	0.022	0.057	0.016	0.033	0.022	0.045
3PTLS14	0.054	0.057	0.035	0.036	0.038	0.023	0.051
3PTLS15	0.041	0.053	0.033	0.040	0.035	0.010	0.024

**Tablo 15.** Klasik TOPSIS analiz sonuçları

Alternatifler	$D_j^*$	$D_j^-$	$C_j^*$	TOPSIS
3PTLS1	0.037	0.072	0.661	3
3PTLS2	0.067	0.049	0.423	14
3PTLS3	0.049	0.066	0.572	7
3PTLS4	0.056	0.067	0.545	11
3PTLS5	0.049	0.063	0.564	8
3PTLS6	0.071	0.034	0.324	15
3PTLS7	0.059	0.062	0.510	12
3PTLS8	0.039	0.066	0.627	6
3PTLS9	0.039	0.065	0.628	5
3PTLS10	0.022	0.077	0.781	1
3PTLS11	0.051	0.061	0.546	10
3PTLS12	0.036	0.068	0.656	4
3PTLS13	0.065	0.053	0.451	13
3PTLS14	0.029	0.078	0.726	2
3PTLS15	0.046	0.059	0.562	9

#### 4.5. Sonuçların Karşılaştırılması

Pisagor bulanık TOPSIS yöntemi, klasik TOPSIS yöntemi, bulanık COPRAS yöntemi ve literatürde daha önce uygulanmış bulanık TOPSIS yöntemi [5] karşılaştırmalı olarak Tablo 16'da sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre Pisagor bulanık TOPSIS, klasik TOPSIS ve bulanık COPRAS yöntemlerinde alternatif 3PTLS<sub>10</sub>, bulanık TOPSIS yönteminde ise alternatif 3PTLS<sub>14</sub> en uygun alternatif olarak seçildiği görülmektedir. Ele alınan dört yöntemde de son sıradaki alternatif 3PTLS<sub>6</sub> olmuştur. Geri kalan alternatifler değerlendirildiğinde küçük farklılıklar

olmasına rağmen genel olarak benzer sıralamalar ortaya çıkmaktadır.

Belirsizlikle başa çıkabilmek için bulanık mantık ile entegre edilen ÇKKV problemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Pisagor bulanık kümeler insan düşüncelerindeki belirsizliklerle daha iyi başa çıkabilmek için ortaya atılmıştır [20]. Çalışma sonuçlarına bakıldığında sıralamada küçük değişiklikler olduğu görülmektedir. Bu değişikliklerin nedeni her yöntemin kendi içindeki çalışma prensibi ile alakalıdır.

**Tablo 16.** Farklı ÇKKV yöntemleri ile elde edilen alternatif sıralaması

Alternatif Sırası	Bulanık yaklaşımlar			Klasik yaklaşım
	Pisagor bulanık TOPSIS (Mevcut çalışma)	Bulanık TOPSIS [5]	Bulanık COPRAS (Mevcut Çalışma)	TOPSIS (Mevcut Çalışma)
1	3PTLS10	3PTLS14	3PTLS10	3PTLS10
2	3PTLS14	3PTLS10	3PTLS1	3PTLS14
3	3PTLS9	3PTLS8	3PTLS12	3PTLS1
4	3PTLS8	3PTLS12	3PTLS14	3PTLS12
5	3PTLS12	3PTLS1	3PTLS8	3PTLS9
6	3PTLS1	3PTLS9	3PTLS9	3PTLS8
7	3PTLS11	3PTLS4	3PTLS3	3PTLS3
8	3PTLS5	3PTLS5	3PTLS11	3PTLS5
9	3PTLS3	3PTLS11	3PTLS5	3PTLS15
10	3PTLS15	3PTLS3	3PTLS7	3PTLS11
11	3PTLS4	3PTLS15	3PTLS4	3PTLS4
12	3PTLS7	3PTLS7	3PTLS15	3PTLS7
13	3PTLS13	3PTLS2	3PTLS13	3PTLS13
14	3PTLS2	3PTLS13	3PTLS2	3PTLS2
15	3PTLS6	3PTLS6	3PTLS6	3PTLS6

#### 4.6. Duyarlılık Analizi

Kriter ağırlıklarına bağlı olarak alternatiflerin nihai sıralaması değişebilir. Karar vericilerin görüşleri kriter ağırlıklarını önemli ölçüde etkilediği için, kriter ağırlıkları değiştirilerek nihai sıralamanın sağlamlığı kontrol edilmelidir. Alternatif sıralamasının kriter ağırlığındaki küçük değişikliklere karşı çok duyarlı olması durumunda, modelin gözden geçirilmesi gerekmektedir [34].

Bu bölümde Pisagor bulanık TOPSIS yöntemi kullanılarak elde edilen sonuç üzerinden alternatiflerin

sırasının, kriter ağırlıklarındaki değişikliklere tepkisini ölçmek için yedi durumdan oluşan duyarlılık analizi yapılmıştır. Oluşturulan yedi farklı duyarlılık analizi Tablo 17’de verilmiştir.

Kriter ağırlıkları için yapılan duyarlılık analizi sonuçları Tablo 18’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, alternatif sıralamasında küçük değişiklikler olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum modelin kriter ağırlıklarındaki küçük değişikliklere karşı sağlam (robust) olduğunu göstermektedir.

**Tablo 17.** Duyarlılık analizi için oluşturulan durumlar

Kriterler	Durum 1			Durum 2			Durum 3			Durum 4			Durum 5			Durum 6			Durum 7		
	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$	$\mu$	$\nu$	$\pi$
C1	0.70	0.56	0.44	0.80	0.41	0.44	0.90	0.39	0.20	0.80	0.45	0.40	0.65	0.50	0.57	0.75	0.25	0.61	0.65	0.35	0.67
C2	0.70	0.58	0.41	0.80	0.44	0.41	0.90	0.38	0.20	0.80	0.45	0.40	0.65	0.50	0.57	0.75	0.25	0.61	0.65	0.35	0.67
C3	0.70	0.58	0.41	0.70	0.58	0.41	0.94	0.28	0.20	0.90	0.20	0.39	0.80	0.45	0.40	0.75	0.25	0.61	0.65	0.35	0.67
C4	0.70	0.49	0.52	0.70	0.49	0.52	0.88	0.42	0.20	0.65	0.50	0.57	0.80	0.45	0.40	0.85	0.15	0.50	0.85	0.15	0.50
C5	0.70	0.49	0.52	0.70	0.49	0.52	0.84	0.50	0.20	0.65	0.50	0.57	0.80	0.45	0.40	0.85	0.15	0.50	0.85	0.15	0.50
C6	0.70	0.37	0.61	0.50	0.61	0.61	0.77	0.60	0.20	0.40	0.60	0.69	0.65	0.50	0.57	0.65	0.35	0.67	0.75	0.25	0.61
C7	0.70	0.54	0.47	0.70	0.54	0.47	0.87	0.45	0.20	0.80	0.45	0.40	0.65	0.50	0.57	0.85	0.15	0.50	0.85	0.15	0.50

**Tablo 18.** Duyarlılık analizi sonuçları

Alternatif Sırası	Durum 1	Durum 2	Durum 3	Durum 4	Durum 5	Durum 6	Durum 7
1	3PTLS14	3PTLS10	3PTLS10	3PTLS10	3PTLS10	3PTLS14	3PTLS14
2	3PTLS10	3PTLS14	3PTLS14	3PTLS14	3PTLS14	3PTLS10	3PTLS10
3	3PTLS8	3PTLS8	3PTLS8	3PTLS8	3PTLS8	3PTLS8	3PTLS8
4	3PTLS12	3PTLS9	3PTLS12	3PTLS9	3PTLS12	3PTLS12	3PTLS12
5	3PTLS9	3PTLS12	3PTLS1	3PTLS12	3PTLS9	3PTLS9	3PTLS9
6	3PTLS1	3PTLS1	3PTLS9	3PTLS1	3PTLS1	3PTLS1	3PTLS1
7	3PTLS11	3PTLS5	3PTLS11	3PTLS11	3PTLS5	3PTLS11	3PTLS11
8	3PTLS5	3PTLS15	3PTLS5	3PTLS3	3PTLS11	3PTLS5	3PTLS5
9	3PTLS4	3PTLS11	3PTLS3	3PTLS5	3PTLS3	3PTLS3	3PTLS3
10	3PTLS3	3PTLS4	3PTLS15	3PTLS15	3PTLS4	3PTLS15	3PTLS4
11	3PTLS15	3PTLS3	3PTLS4	3PTLS4	3PTLS15	3PTLS4	3PTLS15
12	3PTLS7	3PTLS7	3PTLS7	3PTLS7	3PTLS7	3PTLS7	3PTLS7
13	3PTLS2	3PTLS2	3PTLS13	3PTLS13	3PTLS2	3PTLS2	3PTLS2

14	3PTLS13	3PTLS13	3PTLS2	3PTLS2	3PTLS13	3PTLS13	3PTLS13
15	3PTLS6	3PTLS6	3PTLS6	3PTLS6	3PTLS6	3PTLS6	3PTLS6

## V. BULGULAR VE TARTIŞMA

Doğal kaynakların hızlı tüketimi ve çevreye duyarlılık konusunda farkındalığın artması, işletmeleri tersine lojistiğin sürdürülebilir tedarik zinciri faaliyetleri gelişiminde önemli bir bileşen olduğunu ortaya koymaktadır. TL süreci etkin ve anlamlı biçimde tasarlanarak yönetilirse, karlılığı ve müşteri memnuniyetini artıracaktır. İşletmeler, kendi temel iş operasyonlarına odaklanmak ve maliyet verimliliği sağlamak için TL faaliyetlerini dış kaynaklara yaptırmaktadır. Bu nedenle, en iyi TL sağlayıcısının seçimi, genel olarak tedarik zinciri ağ mekanizmasının en önemli konularından biri haline gelmektedir.

Bir karar verme sürecinde, dilsel ifadelerin karar problemlerinde kullanılması, performans değerlerinin kesin değerlerle ifade edilemediği durumlarda oldukça yararlıdır. Bu çalışmada, literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak yeni geliştirilen son dönem bulanık yaklaşımlardan biri olan ve insan düşüncelerindeki belirsizliği diğer bulanık kümelerden daha iyi ele alabilen Pisagor bulanık küme temelli TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, dört farklı ÇKKV yöntemi kullanılarak en uygun 3PTLS seçimindeki etkisi araştırılmıştır. Pisagor bulanık TOPSIS yöntemi ile üçgensel sayılara dayalı bulanık TOPSIS ve bulanık COPRAS yöntemleri ve klasik TOPSIS yönteminden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca duyarlılık analizi uygulanarak modelin güvenilirliği test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, alternatiflerin sıralamasında küçük farklılıklar olmasına rağmen genel olarak yakın sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bu farklılıklar yöntemlerin çalışma prensiplerindeki hassasiyetten, kullanılan bulanık kümelerin olağan yapısından kaynaklanmaktadır. İşletmeler için 3PTLS'nin etkin bir biçimde değerlendirilmesi konusunda farklı bulanık yaklaşımların kullanılması, doğru karar vermelerine yardımcı olarak daha faydalı tercih yapmalarını sağlayacaktır.

Gelecek araştırmalar için, problem yapısı yeni değişkenler eklenerek geliştirilebilir ve yeni önerilen küresel bulanık kümeler (spherical fuzzy sets) ve nütrosifik bulanık kümeler (neutrosophic fuzzy sets) yardımıyla değerlendirilerek, elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir. Şirketlerin, TL seçimi için çeşitli ÇKKV yöntemlerinin karşılaştırıldığı bir karar destek sistemi tasarlanabilir. Ayrıca içinde bulunduğumuz pandemi süreciyle ilişkili olarak COVID-19 etkisinin TL tedarik zinciri faaliyetlerine etkisi araştırılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Koh, S. C. L., Demirbag, M., Bayraktar, E., Tatoglu, E. & Zaim, S. (2007). The impact of supply chain management practices on performance of SMEs. *Industrial*

*Management and Data Systems*, 107(1), 103–124.

- [2] Zaim, S., Sevkli, M. & Tarim, M. (2013). Fuzzy analytic hierarchy based approach for supplier selection. *Euromarketing and the Future* içinde (ss. 147–176).
- [3] James Stock. (1992). Reverse logistics: White paper. *Council of Logistics Management*.
- [4] Senthil, S., Srirangacharyulu, B. & Ramesh, A. (2014). A robust hybrid multi-criteria decision making methodology for contractor evaluation and selection in third-party reverse logistics. *Expert Systems with Applications*, 41(1), 50–58.
- [5] Kannan, G., Pokharel, S. & Kumar, P. S. (2009). A hybrid approach using ISM and fuzzy TOPSIS for the selection of reverse logistics provider. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(1), 28–36.
- [6] Govindan, K., Kadziński, M., Ehling, R. & Miebs, G. (2019). Selection of a sustainable third-party reverse logistics provider based on the robustness analysis of an outranking graph kernel conducted with ELECTRE I and SMAA, 85, 1–15.
- [7] Srivastava, S. K. (2008). Network design for reverse logistics. *Omega*, 36(4), 535–548.
- [8] Chen, Z.-S., Zhang, X., Govindan, K., Wang, X.-J. & Chin, K.-S. (2021). Third-party reverse logistics provider selection: A computational semantic analysis-based multi-perspective multi-attribute decision-making approach. *Expert Systems with Applications*, 166, 114051.
- [9] Li, Y., Kannan, D., Garg, K., Gupta, S., Gandhi, K. & Jha, P. C. (2018). Business orientation policy and process analysis evaluation for establishing third party providers of reverse logistics services. *Journal of Cleaner Production*, 182, 1033–1047.
- [10] Agrawal, S., Singh, R. K. & Murtaza, Q. (2015). A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resources, Conservation and Recycling*, 97, 76–92.
- [11] Govindan, K., Soleimani, H. & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603–626.
- [12] Prakash, C. & Barua, M. K. (2016). An analysis of integrated robust hybrid model for third-party reverse logistics partner selection under fuzzy environment. *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 63–81.

- [13] Tavana, M., Zareinejad, M., Santos-Arteaga, F. J. & Kaviani, M. A. (2016). A conceptual analytic network model for evaluating and selecting third-party reverse logistics providers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(5–8), 1705–1721.
- [14] Azadi, M. & Saen, R. F. (2011). A new chance-constrained data envelopment analysis for selecting third-party reverse logistics providers in the existence of dual-role factors. *Expert Systems with Applications*, 38(10), 12231–12236.
- [15] Suyabatmaz, A. Ç., Altekin, F. T. & Şahin, G. (2014). Hybrid simulation-analytical modeling approaches for the reverse logistics network design of a third-party logistics provider. *Computers & Industrial Engineering*, 70, 74–89.
- [16] Min, H. & Ko, H.-J. (2008). The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers. *International Journal of Production Economics*, 113(1), 176–192.
- [17] Govindan, K., Palaniappan, M., Zhu, Q. & Kannan, D. (2012). Analysis of third party reverse logistics provider using interpretive structural modeling. *International Journal of Production Economics*, 140(1), 204–211.
- [18] Ravi, V. (2012). Selection of third-party reverse logistics providers for End-of-Life computers using TOPSIS-AHP based approach. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 11(1), 24.
- [19] Govindan, K. & Murugesan, P. (2011). Selection of third-party reverse logistics provider using fuzzy extent analysis. *Benchmarking: An International Journal*, 18(1), 149–167.
- [20] Yager, R. R. (2013). Pythagorean fuzzy subsets. *2013 Joint IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting (IFSA/NAFIPS)* içinde (ss. 57–61). IEEE.
- [21] Ilbahar, E., Karaşan, A., Cebi, S. & Kahraman, C. (2018). A novel approach to risk assessment for occupational health and safety using Pythagorean fuzzy AHP & fuzzy inference system. *Safety Science*, 103, 124–136.
- [22] Onar, S. C., Oztaysi, B. & Kahraman, C. (2018). Multicriteria Evaluation of Cloud Service Providers Using Pythagorean Fuzzy TOPSIS. *Journal of Multiple-Valued Logic & Soft Computing*, 30(2–3), 263–283.
- [23] Zhang, X. & Xu, Z. (2014). Extension of TOPSIS to Multiple Criteria Decision Making with Pythagorean Fuzzy Sets. *International Journal of Intelligent Systems*, 29(12), 1061–1078.
- [24] Zhang, X. (2016). A Novel Approach Based on Similarity Measure for Pythagorean Fuzzy Multiple Criteria Group Decision Making. *International Journal of Intelligent Systems*, 31(6), 593–611.
- [25] Gedikli, T., Ervural, B. C. & Sen, D. T. (2021). Evaluation of Maintenance Strategies Using Pythagorean Fuzzy TOPSIS Method. *Advances in Intelligent Systems and Computing* içinde (C. 1197 AISC, ss. 512–521). Springer.
- [26] Akram, M., Dudek, W. A. & Ilyas, F. (2019). Group decision-making based on pythagorean fuzzy TOPSIS method. *International Journal of Intelligent Systems*, 34(7), 1455–1475.
- [27] Nguyen, H. T., Md Dawal, S. Z., Nukman, Y., Aoyama, H. & Case, K. (2015). An integrated approach of fuzzy linguistic preference based AHP and fuzzy COPRAS for machine tool evaluation. *PLoS ONE*, 10(9).
- [28] Khorasani, S. T. (2018). Green Supplier Evaluation by Using the Integrated Fuzzy AHP Model and Fuzzy Copras. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 2, 17–25.
- [29] Hwang, C. C.-L. & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications* (C. 186). New York: Springer.
- [30] Opricovic, S. & Tzeng, G.-H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445–455.
- [31] Gedikli, T. & Cayir Ervural, B. (2019). Selection Optimum Maintenance Strategy Using Multi-Criteria Decision Making Approaches. F. Calısır & O. Korhan (Ed.), *Industrial Engineering in the Digital Disruption Era* içinde (ss. 156–170). Springer.
- [32] Guarnieri, P., Sobreiro, V. A., Nagano, M. S. & Marques Serrano, A. L. (2015). The challenge of selecting and evaluating third-party reverse logistics providers in a multicriteria perspective: A Brazilian case. *Journal of Cleaner Production*, 96, 209–219.
- [33] Chen, T. Y. (2018). Remoteness index-based Pythagorean fuzzy VIKOR methods with a generalized distance measure for multiple criteria decision analysis. *Information Fusion*, 41, 129–150.
- [34] Chang, C.-W., Wu, C.-R., Lin, C.-T. & Chen, H.-C. (2007). An application of AHP and sensitivity analysis for selecting the best slicing machine. *Computers & Industrial Engineering*, 52(2), 296–307.



# Derin Öğrenme ile Görüntülerde Gürültü Azaltma Üzerine Kapsamlı Bir İnceleme

## *A Comprehensive Review of Image Denoising With Deep Learning*

Ahmet YAPICI<sup>1</sup> , M. Ali AKCAYOL<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Bilişim Sistemleri, 06680, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, 06560, Ankara

### Öz

Günlük hayatımızda ve bilimsel araştırmalarda gerçeğe yakın ve gürültüsüz görüntülere olan ihtiyaç artmaktadır. Ancak görüntüler, gürültü ile bozulmakta ve bu da görsel görüntü kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, görüntü özelliklerini kaybetmeden gürültüyü azaltmak için çalışmalar yapılmaktadır. Şimdiye kadar, gürültüyü azaltmak için çeşitli yöntemler önerilmiş olup, her yöntemin farklı avantajları bulunmaktadır. Bu makalede, alanında en iyi sonucu elde eden yöntemler hakkında bilgi verilerek, video ve sabit görüntülerinde gürültü azaltma alanında yapılan geleneksel gürültü giderme yöntemleri ve derin öğrenme yöntemlerine ait çalışmalar özetlenip, elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmaktadır. Yapılan araştırmalar deneylerin toplamsal beyaz Gauss gürültüsü durumuna odaklandığını göstermektedir. Görüntülerde gürültü giderme aşamasında zaman içerisinde geleneksel gürültü giderme yöntemleri, makine öğrenmesi yöntemleri, derin öğrenme yöntemleri ve diğer matematiksel yöntemler kullanılmış olup, derin öğrenme yöntemleri daha başarılı sonuçlar elde etmektedir. Ancak elde edilen verilere göre orijinal görüntü çiftlerine sahip olmadan modelin eğitilmesi konusunda çalışmaların yetersiz olduğu ve değişik gürültü seviyelerinde tek bir yöntemin başarılı olamadığı görülmüştür. İleride yapılacak çalışmalarda gerçek hayattaki görüntülerde var olan gürültülerin nasıl giderileceği konusuna daha detaylı odaklanılması gerektiği görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Görüntülerde gürültü giderme, Görüntü restorasyonu, Video üzerinde gürültü azaltma, Derin öğrenme tabanlı gürültü giderme.

### Abstract

In daily life and scientific searches, the need for real-like and denoised images is increasing. But images are distorted by noise, resulting in lower visual image quality. For this reason, noise removal studies are carried out on images to increase the quality. Until now, various methods have been proposed to decrease noise, each technique has different advantages. This paper gives information about the methods that achieve the best results in their field and summarizes the studies about traditional denoising and deep learning based denoising methods in the field of noise reduction in video and images and compares the studies with each other. Researches show that experiments focus on the case of additive white Gaussian noise. Traditional noise removal methods, machine learning methods, deep learning methods and other mathematical methods have been used in image denoising problem over time, and deep learning methods achieve more successful results. However, according to the obtained data, it has been seen that the studies on training the model without having the original image pairs were insufficient and a single method could not be successful at different noise levels. In future studies, it is necessary to focus on how to remove the noise in real-life images.

**Keywords:** Image denoising, Image restoration, Video denoising, Deep learning-based noise reduction.

## I. GİRİŞ

Günümüzde video ve görüntüler hayatın çeşitli alanlarında kullanılmaktadır. Görüntü aktarma ve görüntü yakalama işlemleri sırasında video ve görüntülerde bozulma, bilgisayarla görme uygulamalarında yaşanan problemlerin başında gelmektedir. Ortamın, aktarım kanalının ve çevresel faktörlerin etkisiyle görüntüler, elde etme, sıkıştırma ve aktarım sırasında gürültü ile karşılaşmakta ve bunun sonucunda, görüntü bilgisi bozulmakta ve veri kaybı ortaya çıkmaktadır.

Görüntüde gürültü giderme, gürültülü bir görüntüden gürültüyü kaldırmaktır. Kenar ve dokular yüksek frekanslı bileşenler olduğundan, bunları gürültüden arındırma sürecinde, gürültüyü ayırt etmek zordur ve gürültüden arındırılmış görüntüler bazı ayrıntıları kaybedebilir. Gürültü giderme aslında klasik bir sorun olup, uzun süredir üzerinde çalışılmasına rağmen, gürültü gidermenin ters bir problem olması ve tek çözümün olmaması nedeniyle çalışmalar hala devam etmektedir. Video ve görüntülerde gürültü gidermek için, farklı yaklaşımlar yıllar içerisinde kullanılmıştır. Kullanılan geleneksel yöntemlerde uzamsal alan yöntemleri ile alan dönüşüm yöntemlerinden faydalanılmaktadır. Geleneksel yöntemlerin çoğu görüntüde gürültü giderme konusunda oldukça

iyi bir performans elde etmelerine rağmen, elle ayarlanan parametrelere sahip olması ve eğitim aşamasında en iyileme yöntemlerine ihtiyaç duyulması nedenleriyle son zamanlarda derin öğrenme yöntemleri kullanılmaya başlanmıştır. Derin öğrenme yöntemleri gürültüyü gidermek için istatistiksel hesaplamalar yaparak orijinal görüntüyü elde etmeyi amaçlamaktadır. Kullanılan yöntemle bağlı olarak yapılan tekrarlı hesaplamalar sayesinde orijinal görüntü elde etme başarısı artmaktadır. Yapay sinir ağları, GPU alanında gelişmeler ve diğer yöntemlere göre daha iyi performans sergilemelerinden ötürü popülerlik kazanmış, yapılan çalışmalarda daha performanslı ve değişik verilerle çalışabilecek yöntemler geliştirilmeye çalışılmıştır. Ancak, yapılan çalışmalarda derin öğrenme yöntemlerinin, değişik gürültü seviyelerine ve türlerine karşı esnek olmadığı için yüksek seviyede gürültüyle karşılaştıklarında performansları ve başarıları yeterli seviyede olmadığı görülmektedir [1-6].

### 1.1. Görüntülerdeki Gürültü Türleri

Gürültü, istenmeyen işaretlere verilen genel bir ad olup, görüntüleri bulanıklaştırıcı, kirlenici, bozucu etkilere sahiptir. Görüntüye etkime şekillerine göre gürültü görüntü üzerinde farklı dağılımlara sahiptir. Bazı gürültü bileşenleri düzgün dağılımlı olmayan uzamsal özellikler göstermektedirler. Değişik tipteki gürültüler görüntü üzerinde farklı dağılımlara sahiptir. Toplamsal Beyaz Gauss Gürültüsü, görüntü verileri bir kanalda iletilirken, görüntüye ait işaretlerden bağımsız olarak hareket eden ve kendiliğinden ortaya çıkan istenmeyen işaretlerden etkilenmektedir. Görüntülerdeki gürültü genelde toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) olarak ifade edilmektedir. Gauss Gürültüsü aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir. Görülen değer  $v(i)$  ile gürültüden arındırılmış değer  $u(i)$  ile gürültü de  $n(i)$  ile gösterilir.

$$v(i) = u(i) + n(i) \quad (1)$$

Diğer bir gürültü türü olan çarpımsal gürültüsü daha çok sentetik açıklıklı radar, sonar, ultrason ve lazer görüntülerde ortaya çıkmaktadır. Benek gürültüsü, çarpımsal bir gürültü çeşididir. Çarpımsal gürültü görüntüdeki piksel değerine bağlı olarak; düşük değerli piksellerde küçük miktarlarda gürültü değeri ve yüksek değerli piksellerin daha büyük miktarlarda gürültü değeri içerdiği anlamına gelmektedir [7]. Çarpımsal bir gürültüyü aşağıdaki denklemle ifade etmek mümkündür.

$$F(x, y) = G(x, y) \cdot E(x, y) \quad (2)$$

Bu denklemde  $F(x, y)$  gürültülü görüntüdeki piksel değerleri,  $G(x, y)$  gürültüsüz görüntüdeki piksel değerleri ve  $E(x, y)$  her piksele eklenen çarpımsal gürültünün şiddetini ifade eder [8].

Diğer bir gürültü türü olan Nicemleme (quantization) gürültüsü, analog bir sinyalin dijital bir sinyale

dönüştürüp daha sonra tekrar analog bir sinyale çevrildiğinde oluşan bozulmaya veya sürekli bir sinyalin ayırık olarak ifade edilmesi sırasında oluşan bozulmaya verilen isimdir. Görüntülerde nicemleme gürültüsü görüntü elde etme sırasında meydana gelmektedir. Az bir nicemleme düzeyine sahip bir görüntünün genel görünümü, dalgalı olarak tanımlanabilir, yoğun renkteki alanlardaki ince dereceler kaybolmaktadır. Şekil 1'de gösterilen San Francisco görüntüsünün 4 bit ile nicemlemesi sonucu gökyüzündeki merdiven basamaklarına benzer görüntüler yer almaktadır [9]. Daha önce pürüzsüz olan görüntülerin yerini, birbirinden ayrılmış farklı bölgeler almıştır.



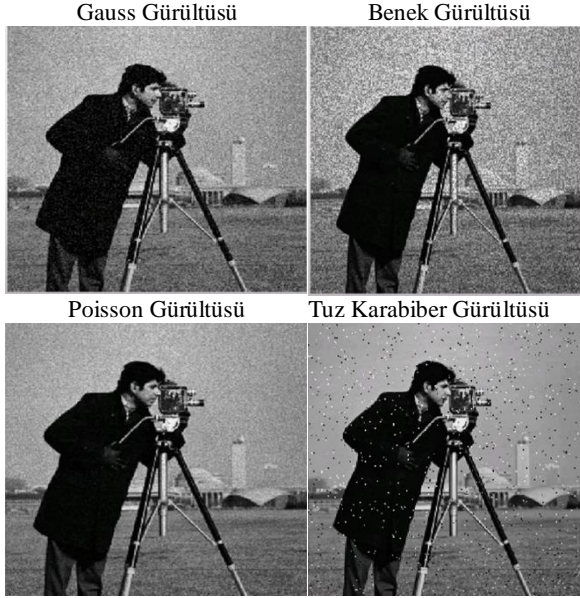
Şekil 1. Görüntünün 4 bit ile nicemlemesi [9]

Gürültü değişik metotlarla; medyan mutlak sapma [10], blok tabanlı sapma [11] ve temel bileşenler analizi ile [12] bulunmaktadır. Görüntülerde gürültünün gidermenin temel amacı, gürültülü veriden temiz görüntünün elde edilmesidir. Kenar ve dokular yüksek frekanslı bileşenler olduğundan, bunları gürültüden arındırma sürecinde, gürültüyü ayırt etmek zordur ve gürültüden arındırılmış görüntüler bazı ayrıntıları kaybedebilmektedir.

Görüntü kalitesi matematiksel olarak, sinyalin gürültüye oranı hesaplanarak bulunabilir. Görüntü kalitesini ölçmek için MSE, MAE, PSNR, FSIM, SSIM, RMSE gibi yöntemler bulunmaktadır. Gürültü giderme sonucu görüntünün kalitesi değerlendirmek, görüntü yapısı ve doku benzerliğini farklı şekilde ölçümlemek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar PSNR ve SSIM yöntemlerinin Gauss gürültüsüne karşı daha duyarlı olduğunu ortaya koymuştur [13]. Bu yüzden görüntülerde gürültü giderme yöntemlerinin doğruluğunu değerlendirmek için daha çok Tepe Sinyali Gürültü Oranı (PSNR) ve Yapısal Benzerlik Endeksi (SSIM) kullanılmaktadır [14].

Tuz karabiber gürültüsü, görüntülerde oluşan temel gürültülerden birisi olup, görüntü üzerine rastgele olarak dağıtılan beyaz ve siyah pikselleri ifade eder [15]. Görüntülerde ayrıca Gaussian, Benek ve Poisson

gürültüleri meydana gelebilmektedir. Görüntülerde meydana gelen gürültülerin görüntüyü nasıl etkilediği Şekil 2'de gösterilmektedir. Gauss gürültüsü genelde yetersiz aydınlatma, Benek gürültüsü ultrason, lazer veya sonar sebebiyle, Poisson gürültüsü ışığın yansımaları, Tuz karabiber gürültüsü çevredeki toz veya cihaz kaynaklı olarak görüntülerde bozulmaya neden olmaktadır.



Şekil 2. Görüntülerde bozulmaya neden olan gürültü türleri

## 1.2. Görüntülerde Bozulmanın Sebepleri

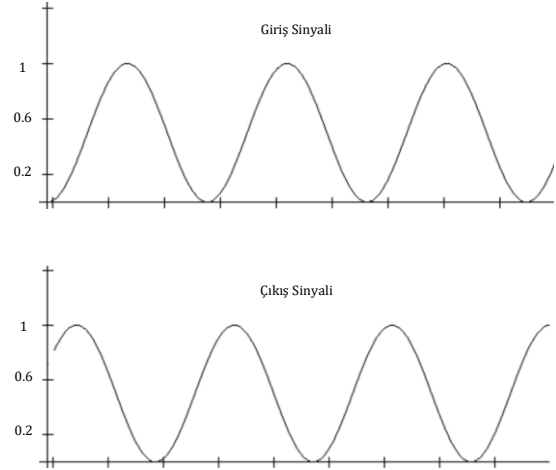
Video ve görüntüdeki gürültü, bilgisayarlı görü alanındaki temel sorunlardan biridir. Video ve görüntülerde gürültüye yol açan nedenler aşağıdaki bölümlerde açıklanmaktadır.

### a) Görüntü Aktarma Sırasında Verilerin Bozulması

İletim ortamının çeşidi, iletişim sağlayan cihaz mesafesi ve verinin iletim hızı görüntü kalitesini etkilemektedir. Veri iletimindeki bozulmalar; zayıflama, sınırlı bant genişliği, gecikme bozulması ve gürültü şeklinde ortaya çıkabilmektedirler [16].

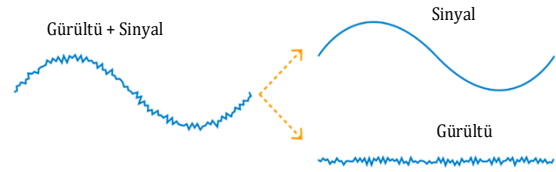
- Zayıflama: Kablo uzunluğu, merkeze olan uzaklık, ortamın direnci gibi nedenlerden dolayı sinyal gücü azalmaktadır. Sinyaldeki zayıflama ve kazanç, desibel (dB) ile ifade edilmektedir.
- Sınırlı bant genişliği: Bant genişliği, ağ performansını belirleyen ölçütlerden birisidir. İletim zamanı, mesaj boyutunun bant genişliğine oranını ifade eder ve bant genişliği düşük olan hattın mesaj iletim zamanı yüksek olmaktadır.
- Gecikme Bozulması: Kaynak sinyali ile, hedefe ulaşan sinyalin ilerleme hızlarında farklılık oluşursa hedefte sinyalin şekli değişmektedir. Şekil 3'de gecikme bozulması yaşanan giriş

sinyalinin, gecikmesi ile çıkışta gözlenen durumu gösterilmektedir.



Şekil 3. Sinyallerdeki gecikme bozulması

- Gürültü: Sinyalde bozulma yapan etkilerin tümüne verilen isimdir. Sinyal termal gürültü, indüklenen gürültü, karışma ve darbe gürültüsü ile bozulabilmektedir. Görüntü yakalama ve aktarma sırasında veriler gürültüden etkilenip, görüntünün kalitesi düşmektedir. Şekil 4'de gürültünün orijinal sinyali nasıl etkilediği gösterilmektedir.



Şekil 4. Sinyallerdeki gürültü [17]

### b) Görüntü Yakalama Sırasında Verilerin Bozulması

Video görüntüleri, periyodik gürültülerle bozulabilmektedirler. Dijital videolar genellikle, görüntü yakalama işlemi sırasında kameranın donanımı veya işleme yazılımı tarafından ortaya çıkan sorunlar nedeniyle görsel olarak bozulabilmektedir [18].

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

Görüntülerde gürültü giderme aşamasında zaman içerisinde geleneksel gürültü giderme yöntemleri, makine öğrenmesi yöntemleri, derin öğrenme yöntemleri ve diğer matematiksel yöntemler kullanılmıştır. Geleneksel yöntemlerden elde edilen tecrübeler ışında makine ve derin öğrenme yöntemlerinin donanım kullanma kabiliyetleri eklenerek yeni yöntemler geliştirilmiştir. İlerleyen bölümlerde geliştirilen geleneksel gürültü giderme yöntemleri ile derin öğrenme yöntemleri hakkında bilgi verilip bu alanda yapılan literatür çalışmaları açıklanacaktır.

### III. GELENEKSEL GÜRÜLTÜ GİDERME YÖNTEMLERİ

Görüntülerde gürültü giderme için kullanılan geleneksel yöntemler; alan dönüşüm yöntemleri ve uzamsal alan yöntemleri olarak iki gruba ayrılmaktadır [19]. Geleneksel yöntemler ile derin öğrenme yöntemleri Şekil 5'de gösterildiği şekilde sınıflandırılabilir.

#### 3.1. Uzamsal Alan Yöntemleri

Geleneksel yöntemlerden uzamsal alan filtrelemesinde, görüntü çerçevelere ayrılarak her çerçeveye ayrı ayrı filtreleme yapılmaktadır. Video üzerindeki her bir görüntü bir önceki görüntünün hareket etmesi, ekrandan bazı nesnelerin çıkması ve yeni nesnelerin ekrana girmesi ile oluşmaktadır. Bu yöntemde hem görüntülerde hem de video karelerindeki benzer çerçeveler bulunup gruplanarak, bu çerçevelerdeki gürültüler azaltılmaya çalışılır. Bu yöntemde kullanılan metotlar aşağıda belirtilmektedir.

##### a) Uzamsal Alan Filtreleme

Uzamsal alandaki gürültüyü gidermek için doğrusal filtreler kullanılmakta ancak görüntü dokularında kayıplar meydana gelebilmektedir. Gauss gürültüsü giderimi için ortalama filtreleme de [20] kullanılabilir olup, yüksek gürültülü görüntülerde bu filtre görüntüyü aşırı düzgün hale getirebilmektedir [21]. Bu durum için, Wiener filtrelemesi [22] kullanılabilir, ancak bu filtre görüntüdeki keskin kenarları bulanıklaştırabilmektedir. Medyan filtreleme [23] ve ağırlıklı medyan filtreleme [24] gibi doğrusal olmayan filtreler kullanılarak, gürültü seviyesi önceden bilinmeden gürültü giderilebilmektedir. Doğrusal olmayan, kenarı koruyan ve gürültü azaltıcı bir yumuşatma filtresi olarak Bilateral filtreleme [25],

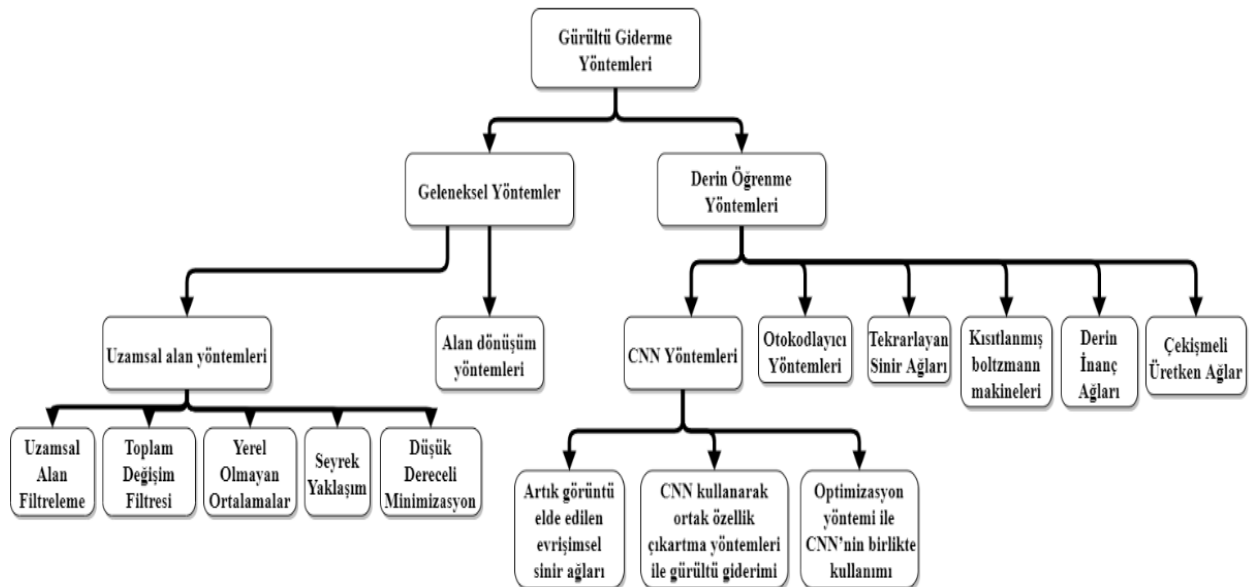
görüntülerin bozulmasını önlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Her pikselin yoğunluk değeri, yakındaki piksellerden alınan ağırlıklı ortalama yoğunluk değerleriyle değiştirilmektedir.

##### b) Toplam Değişim Filtresi

Varyasyon modelleri matematiksel görüntü işleme ve bilgisayarla görme alanında aktif araştırma alanlarından biri olmaya devam etmektedir [26]. Toplam varyasyon tabanlı görüntü restorasyon modelleri ilk olarak Rudin, Osher ve Fatemi (ROF) tarafından kenar koruma görüntü gürültü giderme konusundaki yapılan çalışmalarda ortaya çıkmıştır [27]. Eşyönsüz doku filtresi ROF modeli kullanılarak geliştirilen görüntü kalitesini arttırmaya yönelik kullanılan bir yöntemdir [28]. Kısmi diferansiyel denklemler tabanlı kenar koruma, gürültü gidermenin iyi bilinen örneklerinden biri olup, gürültü ortadan kaldırırken görüntülerdeki kenarları korumak için tasarlanmıştır. Yıllar içinde, ROF modeli diğer birçok görüntü restorasyon görevine genişletilip ve performansını artırmak için çeşitli şekillerde değiştirilmiştir. Bu gelişmelerden bazıları yeni algoritmalara, bazıları ise yeni modellere ve teorilere yol açmıştır [29]. Bu modeller, görüntülerde gürültü giderme, bulanıklık giderme, kör gürültü giderme ve görüntü iç boyama gibi görüntü restorasyon problemlerinde kullanılmaktadır [30].

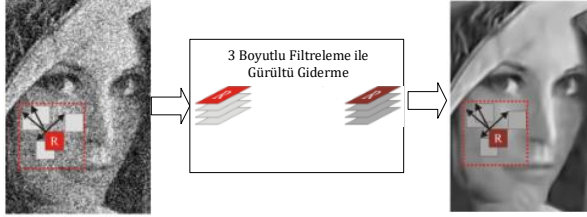
##### c) Yerel Olmayan Ortalamalar

Önemli detayların ve dokuların kaybolmasını engellemeyi amaçlayan bu yöntemde, görüntü çeşitli ölçeklerde alt parçalara ayrılıp görüntüye ait piksel değerlerinin ortalaması alınmaktadır [31].



Şekil 5. Görüntülerde gürültü azaltmada kullanılan geleneksel ve derin öğrenme yöntemlerinin sınıflandırılması

Hızlı Blok Eşleştirme ve 3 Boyutlu Filtreleme tekniğinde sabit görüntüler ve videoda benzer kareleri gruplayarak filtreleme yapmak için blok eşleştirme kullanılmaktadır. Bir çerçevenin, referans bir çerçeve ile benzerliği, belirtilen bir eşiğin altına düşerse gruplanıp, sonrasında 3 boyutlu filtre uygulanmaktadır [32]. Blok eşleme algoritması daha az hesaplama gerektirmektedir. Görüntünün içindeki bloklar kayar bir şekilde işlenip, işlenmiş olan bloğa benzer diğer bloklar aranarak blok eşleştirme yapılmaktadır [33]. Bu prosedürü tekrarlayan sürgülü pencereler (bloklar) için devam ettirdikten sonra, nihai tahmin, üst üste binen tüm blok tahminlerinin ağırlıklı ortalaması olarak hesaplanmaktadır. Gürültü kademeli olarak arttığında, BM3D'nin gürültü giderme performansı düşük kalmakta olup, özellikle düz alanlarda bozulmalar ortaya çıkmaktadır [34]. Bu yöntem görsel açıdan kaliteli bir sonuç elde etse de evrişimli sinir ağı (CNN) bazlı yöntemler BM3D yöntemine göre daha başarılı sonuçlar elde etmektedir [3]. Şekil 6'da Lena görüntüsünde gürültü giderme işlemi için blok olarak eşleştirilen benzer karelerin gruplanarak filtrelenmesi gösterilmektedir.



Şekil 6. Blok eşleme ve 3 Boyutlu filtreleme ile görüntülerde gürültü giderme işlemi [35]

VBM3D [36], VBM4D [37] blok eşleme ve 3 boyutlu filtreleme ile videolarda gürültüyü gidermek için kullanılmaktadır. VBM4D yöntemi ile nesnelerin hareketleri takip edilerek, bir önceki ve sonraki konumları bulunup, nesneler aynı ise gruplanarak filtreleme uygulanmaktadır. Bu yöntemde hareket vektörü ile cisimlerin takibi yapılmaktadır [38].

Yerel olmayan gürültü giderme modelleri görüntü restorasyon problemlerinde; gürültü giderme, iç boyama, ekleme yapma, görüntü sentezi için kullanılmaktadır. Bu modeller, görüntüleri bir dizi yerel komşuluk veya yama ile temsil eder ve gürültüyü tahmin etmeye çalışır. En Büyük Artçıl Kestirim (MAP) gürültülü görüntüden temiz bir yamayı tahmin etmek için kullanılabilir [39]. Bu yöntemde istatistiksel veriler kullanılarak görüntü üzerindeki bir değer tahmini yapılmaktadır. Gerçek gürültü giderme problemleri için, hipotez uzayı genellikle çok büyük veya sonsuzdur. MAP hipotezlerini bulmak, optimizasyon problemini çözme gerektirdiğinden, gürültü tahmini için yapılan işlemler daha kısa

sürmektedir [40]. Bu yöntem kenar ve dokuların korunmasında etkili bir çözüm sunmaktadır.

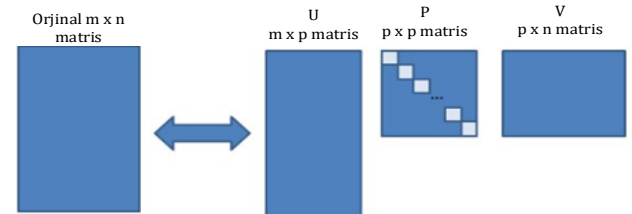
#### d) Seyrek Yaklaşım

Sınıflandırma problemleri bilinmeyen bir nesneyi doğru sınıfa atamayı amaçlamaktadır. Seyrek yaklaşım metodunda seyrek gösterim vektörü kullanılarak nesnelerin hangi sınıfa ait olduğu bulunmaktadır [41]. Bu yöntem görüntü işlemede kullanılarak görüntüdeki bazı özelliklerin daha kolay ortaya çıkmasını sağlamaktadır [42]. Destek Vektör Makineleri [43] ve Çekirdek Tabanlı Seyrek Temsil [44] bu yaklaşımı kullanan önemli yöntemlerdir. Yerel olmayan merkezi seyrek temsil (NCSR) modeli, yaygın olarak kullanılan görüntü gürültü giderme yöntemlerinden biri olup, yerel olmayan merkezi seyrek temsil hem pürüzsüz hem de dokulu bölgelerin yeniden yapılandırılmasında başarılı sonuçlar elde etmektedir [45]. Ancak seyrek yaklaşım tekniklerinin yinelenmeli sözlük öğrenme ve bilinmeyen seyrek katsayıların yerel olmayan tahminleri, hesaplama süresini uzatmakta ve uygulamalarda bu yöntemin kullanılabilirliğini sınırlamaktadır.

#### e) Düşük Dereceli En İyileme

Bu modelde, seyrek gösterim modelinden farklı olarak, benzer yamalar gruplanarak bir matris oluşturulmaktadır. Bu matrisin her bir sütununda, benzer yamalara ait veriler tutulmaktadır. Gürültü giderimi için düşük dereceli yaklaşımlar; düşük sıralı matris çarpanlarına dayalı yöntemler [46] ve nükleer norm en iyilemesine dayalı yöntemler (NNM) [47] olarak iki gruba ayrılmaktadır. Düşük sıralı matris çarpanlara ayırma, iki giriş arasındaki etkileşimleri bulmak ve ikili verileri analiz etmek için kullanılmaktadır [48]. Düşük dereceli model, gürültü gidermede iyi sonuçlar elde etmekte [49], ancak çok düşük veya çok yüksek gürültü değerlerinde ayrıntıların kaybolmasına neden olmaktadır.

Tekil Değer Ayrışımı (SVD), bir matrisi farklı boyutlara bölerek boyut azaltmayı amaçlamaktadır. Şekil 7'de verilerde Tekil Değer Ayrışımı yöntemi ile boyut azaltma işlemi gösterilmekte olup, matris 3 parçaya ayrılmıştır, orijinal veri bu matrisler kullanılarak elde edilebilmektedir [50].



Şekil 7. Verilerde Tekil Değer Ayrışımı yöntemi ile boyut azaltma [51]

K-Ortalamları kümeleme tekil değer ayrışımı (K-SVD), k-ortalamları kümeleme yönteminin geliştirilmiş hali olup, giriş verilerini geçerli sözlüğe dayanarak seyrek olarak kodlayıp, sözlükteki atomları verilere daha iyi uyacak şekilde güncelleyerek yinelemeli olarak çalışmaktadır [52]. K-SVD, görüntü işleme, ses işleme, biyoloji ve belge analizi gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Nükleer norm en iyilemesine dayalı yöntemler, tüm tekil değerleri eşit şekilde küçülterek matris sırasını yaklaşık olarak tahmin etmek için kullanılmaktadır. Nükleer norm en iyilemesine dayalı yöntemler baz alınarak, farklı boyutlardaki tekil değerlere uyarlanan ağırlık atayabilen ve yumuşak bir eşik yöntemi kullanan bir yöntem (WNNM) geliştirilmiştir. WNNM'nin gelişmiş gürültü giderme performansına sahip olup, yüksek gürültüde başarılı olması, yapay zekâ, görüntü işleme, örüntü tanıma, bilgisayarla görme gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmasına imkân sağlamıştır [53]. Düşük dereceli en iyileme yöntemi diğer gürültü azaltma yöntemlerinden daha iyi performans gösterse de yinelemeli artırım adımının işlem süresi uzun olmaktadır.

### 3.1. Alan Dönüşüm Yöntemleri

Dönüşüm tabanlı gürültü giderme yöntemleri, dönüşüm alanındaki bir sinyalin gürültüden daha seyrek gösterime sahip olduğu varsayımına dayanmaktadır [54]. Alan dönüşüm yöntemleri ilk olarak Fourier dönüşümü kullanılarak geliştirilmiştir. Zaman içerisinde kosinüs dönüşümü, dalgacık alanı yöntemleri [55], gibi çeşitli dönüşüm alanı yöntemleri ortaya çıkmıştır. Verilen gürültülü görüntülerde dönüştürme araçları olarak bağımsız bileşen analizi [56] ve temel bileşen analizi [12] fonksiyonları kullanılmıştır. Bağımsız bileşen analizi yöntemi normal dağılıma sahip olmayan verilerin gürültü azaltmasında başarıyla uygulanmıştır. Bu yöntemin dezavantajı, yüksek hesaplama maliyeti olup, kayan pencereler kullanıldığı için, aynı kareden gürültüsüz bir görüntü örneği gerektirmesidir.

Alan dönüşüm yöntemlerinden dalgacık alanı yöntemleri görüntülerde gürültü giderme alanında basit algoritmalar ile başarılı sonuçlar elde etmektedir. [57] Bu alanda geliştirilmiş yöntemleri 4 kategoride inceleyebiliriz.

1. Doğrusal filtreler, gürültü giderme için kullanılan sayısal filtrelerdir [58]. Gauss gürültüsünü azaltmak için uyarlamalı bir doğrusal filtre türü olan Wiener filtresi tercih edilmektedir. Bu filtre statiksel bir yaklaşımla hata karelerinin ortalamasını en aza indirmeye çalışarak filtrelenmiş görüntüyü üretmektedir
2. Dalgacık Dönüşümü gürültü gidermede alanında, doğrusal olmayan katsayı eşikleme tabanlı

yöntemler de kullanılmaktadır. Gauss gürültüsü dalgacık alanında küçük değerlerle temsil edilme eğilimindedir ve belirli bir eşik altındaki katsayıları sıfıra ayarlayarak (sert eşikleme) veya eşik üzerindeki katsayıların eşik mutlak değeri ile küçültüldüğü yumuşak eşikleme teknikleri ile gürültü giderilmektedir [59]. Dalgacık büzülme literatürünün çoğu, görüntüye uyarlanabilen veya uyarlanamayan optimal eşik seçme yöntemlerine dayanmaktadır. VisuShrink yaklaşımı, tüm dalgacık detay katsayıları için tek bir eşik değeri kullanmaktadır [60]. Bu eşik, ilave Gauss gürültüsünü ortadan kaldırırken, aşırı düzgülü görüntüler ortaya çıkabilmektedir. BayesShrink algoritması, her dalgacık alt bandı için farklı bir eşik kullanıldığı, uyarlanabilir bir yaklaşımdır [61].

3. Dalgacık katsayısı yaklaşımında, Dalgacık Dönüşümünün çoklu çözünürlüklü özelliklerinden yararlanır. Bu teknik, sinyali çoklu çözünürlüklerde gözlemleyerek farklı çözünürlüklerde sinyalin yakın korelasyonunu tanımlar. Bu yöntem gürültüleri gidermede başarılı olup, hesaplama açısından karmaşıktır. Dalgacık katsayılarının modellenmesi deterministik veya istatistiksel yöntemlerle olabilmektedir. Deterministik modelleme yöntemi, dalgacık katsayılarını temsil eden düğümler ile bir ağaç yapısını oluşturmaktadır.
4. Gürültü sinyalini ayrıştırmak için, Kırılmamış Dalgacık Dönüşümü (UDWT) de kullanılmıştır [62]. Yapılan bir çalışmada, azaltılmış bir dönüşüm yerine kırılmış bir dönüşüm kullanılarak eşiklemenin, gürültü giderme uygulamalarında sonucu 2,5 dB'den fazla iyileştirebileceği gösterilmiştir [63]. Bu yöntemin UDWT kullanımının gürültü gidermede başarısı yanında, bir hesaplama yükü de getirmektedir.

Fourier tabanlı dönüşüm yöntemlerinden birisi olan Ayrık Kosinüs Dönüşümü (DCT) filtreleme algoritması, görüntülere sabit veya uyarlanabilir şekilde seçilen bloklar halinde uygulanmaktadır. Ayrıca DCT yüksek veri sıkıştırma oranlarında yüksek kalite elde edebilmektedir [64]. DCT tabanlı filtreleme yönteminde dikey dönüşüm alanındaki bir bileşen büyük bir mutlak değere sahipse, bilgi olarak değerlendirilmekte; eğer bileşen bir eşikten sınıra yakın bir genliğe sahipse, o zaman gürültü olarak değerlendirilmektedir [65]. DCT tabanlı filtreleme görüntülerde gürültü giderme, uygun doku koruma ve kenar ve detayların korunmasını sağlamaktadır. Ancak gürültü giderimi için kullanılan yöntemlerin içinde bu yöntemin işlemci gereksinimi oldukça yüksek olmaktadır. Şekil 8'de 3 Boyutlu Ayrık Kosinüs Dönüşümü ile sıkıştırılan görüntünün tekrar oluşturulması gösterilmektedir.



Şekil 8. 3 Boyutlu Ayırık Kosinüs Dönüşümü ile görüntü sıkıştırma ve geri oluşturma [35]

Görüntülerde gürültü giderme için kullanılan yöntemlerin seyrek sinyal eşleştirme ve blok eşleştirme özelliklerine göre uyarlanabilir veya sabit olması ile blok eşleştirme durumları Tablo 1'de kıyaslanmaktadır.

Tablo 1. Görüntülerde gürültü giderme için kullanılan geleneksel yöntemlerin kıyaslanması [3]

Yöntem	Seyrek Sinyal Modeli		Blok Eşleştirme
	Sabitlik	Uyarlanabilirlik	
fBM3D [42]	✓		✓
3D DCT [43]	✓		
KSVD [47]		✓	
VBM3D [48]	✓		✓
VBM4D [48]	✓		✓

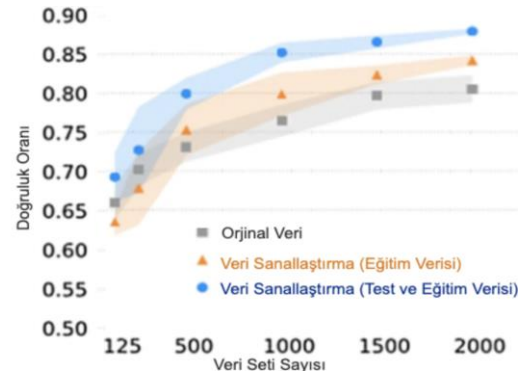
#### IV. DERİN ÖĞRENME YÖNTEMLERİNİN GÜRÜLTÜ GİDERME ÜZERİNDE KULLANILMASI

Görüntü üzerindeki gürültüleri gidermek için farklı derin öğrenme yöntemleri kullanılmaktadır. Kullanım kolaylığı, daha az kaynak tüketimi ve değişken gürültü türlerine uyarlanabilir oldukları için yapay sinir ağları görüntülerde gürültü azaltmak için tercih edilmektedir. Mevcut sinir ağı tabanlı yöntemlerin çoğu evrimsel sinir ağı tabanlı bir yaklaşım izlemektedir. Görüntülerde gürültü azaltmak için, derin öğrenme yöntemlerinden ilk olarak CNN mimarileri kullanılmaya başlanmıştır [66]. CNN tabanlı gürültü azaltma yöntemleri genel olarak diğer yöntemlere göre daha başarılı sonuç elde etmektedir [67, 68]. CNN ağlarında eklenen katmanlar yüksek düzey özelliklerin açığa çıkarılmasında ve görüntünün anlamlandırılmasında kullanılmaktadır.

Görüntülerde gürültü gidermenin başarısı orijinal görüntü ile gürültü giderme sonrası elde edilen görüntünün kıyaslanması ile ölçülebilmektedir. Ancak, gerçek hayatta çoğu zaman eşleştirilmiş gürültülü ve temiz görüntüler bulunmamaktadır. Bu durum eğitim ve test verilerini elde edilmeyi zorlaştırmaktadır. Tomografi, MR, ultrason, mikroskopik floresan

görüntüleri, uydu görüntüleri bu tür görüntüleme örnekleridir. Denetimli öğrenme, bozuk görüntü ve temiz görüntü çifti içeren bir regresyon modelidir. CNN modelleri görüntü çiftlerini kullanan ileri beslemeli evrim sinir ağlarıdır. DnCNN [69] gibi CNN tabanlı yöntemler, ek beyaz Gauss gürültüsünü kaldırmak için eşleştirilmiş temiz ve gürültülü verilerle derin bir sinir ağını eğiterek gürültüden arındırılmış görüntüler elde etmektedir. Denetimsiz öğrenme yöntemlerinde eğitim için temiz görüntü verisi olmadan veya gürültülü görüntü verisi olmadan gürültü doğrudan verilerden öğrenilerek giderilmektedir. Noise2Noise (N2N) [70], eşleştirilmiş bozuk gözlemlerden öğrenilen modeller gürültüyü ortadan kaldırmak için uygulanmaktadır. Noise2Self (N2S) [71] ve Noise2Void (N2V) [72], kör gürültü gidermek ve bir regresyon modeli eğitmek için kendi kendini denetleme stratejisini benimsemiştir. Bu, eğitim için gürültülü bir veri kümesi veya bir çift temiz görüntü, örneğin biyomedikal görüntü verisi bulamadığımız veri kümeleri için kullanılmaktadır.

Derin öğrenme modellerinin eğitimi modelin başarısında önemli ölçüde etkilidir. Gürültü giderme konusunda yapılan çalışmalarda artırılmış veri kümeleri ile çalışmak modelin performansını etkilemektedir [73]. Az veri ile yapılan çalışmalarda modelin ezberleme problemi ile karşılaşmaktadır. Görüntü verileri üzerinde döndürme, çevirme, ölçeklendirme, kırpma yöntemleri kullanılarak veri artırımı yapılmaktadır. Bir sınıflandırma çalışmasında test ve eğitim verisinin artırılmasının modelin doğruluk oranını etkilediği Şekil 9'da görülmektedir [74].



Şekil 9. Veri seti sayısının modelin doğruluk oranına etkisi [74]

#### 4.1. CNN Yöntemlerinin Gürültü Gidermede Kullanımı

Görüntülerde gürültü giderme için kullanılan yöntemler genel olarak ImageNet yarışmasındaki mimarilerden esinlenmektedir. ImageNet Büyük Ölçekli Görsel Tanıma Yarışması (ILSVRC), CNN mimarilerinin gelişimi ve tanınmasında önemli bir yere sahiptir [75]. LeNet CNN mimarisi, el yazısıyla yazılmış rakam tanıma başarılı olmuştur [76]. Ancak, LeNet mimarisi kaybolan eğitim sorunu, sigmoid [77] ve tanh [78] gibi aktivasyon fonksiyonlarının hesaplama maliyeti sorunlarına

sahiptir. 2012 yılında AlexNet [79] ile, grafik işlem birimi kullanılmış, rastgele kırma ile aşırı uyum sorunları çözülmüştür. Sigmoid yerine ReLU [80] kullanımı, değişken eğim inişinin hızını iyileştirmektedir. Ayrıca veri artırma yöntemi ile aşırı uyum sorunu çözülmüştür. AlexNet iyi bir performans elde etmesine rağmen, büyük konvansiyonel katmanlardan dolayı önemli bellek kullanımına sahiptir. Bu sebeple, akıllı kameralar gibi gerçek dünyadaki uygulamalarda kullanımını sınırlı kalmıştır. 2014-2016 döneminde, yazılım performansını artırmak ve hesaplama maliyetlerini düşürmek için küçük filtreli daha derin ağ mimarileri tercih edilmiştir. VGG [81], 2014'teki ImageNet yarışmasını kazanmak için küçük çekirdek boyutlarıyla daha fazla evrimsel sinir ağı oluşturmuştur. GoogLeNet [82], görüntü uygulamalarının performansını iyileştirmek için genişliği artırmıştır. GoogLeNet ayrıca parametre sayısını ve hesaplama maliyetini azaltmak için büyük bir evrimsel çekirdeği iki küçük evrimsel çekirdeğe dönüştürüp, başlangıç modülünü [83] kullanmıştır. GoogLeNet 22 katmanlı bir yapıya sahip olup, ardışık konvolüsyon ve havuzlama katmanları yerine birbirine bağlı modüller kullanan bir yapıya sahiptir [84]. VGG ve GoogLeNet yöntemleri görüntü uygulamaları için etkili olsa da ağ çok derin ise, eğimin kaybolmasına; ağ çok geniş ise, aşırı uyum sorununa neden olmaktadır. Bu sorunları çözmek için ResNet mimarisi [85] önerilmiştir. ResNet mimarisinde her bloğa artık öğrenme işlemi eklemiştir. Çekişmeli Üretken Ağlar (GAN) [86] üretken ve ayırt edici ağlardan oluşmaktadır. Üretken ağ, girdi verilerine göre örnekler oluşturmak için; ayırt edici ağ hem girdi örneklerinin hem de üretilen örneklerin doğruluğunu değerlendirmek için kullanılmaktadır. GAN yüz tanıma [87] ve karmaşık gürültülü görüntülerde, gürültü gideriminde kullanılmaktadır. Yukarıda bahsedilen evrimsel sinir ağları, görüntülerde gürültü giderimi için temel oluşturan ağlardır. Bu mimariler kullanılarak değişik gürültü giderme yöntemleri oluşturulmuştur.

#### Görüntülerde Gürültü Giderme İçin CNN Yönteminin Kullanımı

Görüntülerde gürültü giderimi için derin öğrenme mimarileri ilk olarak Zhou ve arkadaşları tarafından kullanılmıştır [88]. Hesaplama verimliliğinin artırılması ve performans arasında bir denge kurmak için ileri beslemeli ağlar önerilmiştir [89]. İleri beslemeli ağ, verilen gürültülü görüntüyü, evrimsel benzer olarak Kuwahara filtreleri ile düzeltmektedir. Daha sonra, ağın doğruluğunu artırmak ve gürültüden giderme performansını artırmak için en iyileme algoritmaları kullanılmıştır. Yeni bir ağ mimarisi tasarlanarak ağ derinliği artırılmış ve aktivasyon işlemi değiştirilerek gürültü ortadan kaldırılmıştır. Hücre sinir ağları (CENN), görüntülerde gürültüyü gidermek için şablonlu düğümler kullanılmaktadır [90]. Önerilen bu yöntem, başarılı gürültü giderme sonuçları elde

edebilmesine rağmen, parametrelerinin elle olarak ayarlanması gerekmektedir. Bu sorunu çözmek için azalan eğim inişi geliştirilmiştir. Hesaplama maliyetinin düşürmek için de evrimsel sinir ağları kullanılmaya başlanmıştır. Gürültü Gideren Evrimsel Sinir Ağları modeli konvolüsyon, toplu normalleştirme, düzeltilmiş doğrusal birim ve artık öğrenme ile görüntülerde gürültü giderme, süper çözünürlük ve JPEG görüntü bloklarında gürültü giderimi için kullanılmıştır [91]. Eşleştirilmemiş gürültülü görüntüleri işlemek için, çekişmeli üretici ağ (CBDNet) [92], biri gerçek gürültülü görüntünün gürültüsünü tahmin etmekten, diğeri ise gizli temiz görüntüyü elde etmekten sorumlu olan iki alt ağ tarafından verilen gerçek gürültülü görüntüden gürültüyü kaldırmıştır. Daha karmaşık bozuk görüntüler için, bulanıklık çizgisini ve gürültüyü tahmin etmek ve yüksek çözünürlüklü bir görüntüyü elde etmek için derin bir süper çözünürlük (DPSR) yöntemi [93] geliştirilmiştir.

#### *4.1.1. Gürültü gidermede kullanılan CNN mimarileri*

Görüntülerde gürültü giderme sırasında evrimsel sinir ağı modelini oluştururken, ek beyaz gürültülü görüntüler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ek beyaz gürültülü görüntüler Gaussian, Poisson, tuz ve karabiber ve çarpımsal gürültülü görüntüleri içermektedir [94]. Görüntülerden gürültüleri gidermek için CNN ağları kullanılarak 3 farklı yöntem uygulanmaktadır.

##### a) Artık görüntü elde edilen evrimsel sinir ağları

Bu yöntemde gürültü gideren CNN mimarisi, normal CNN'den farklı olarak; sonuç verisinde, orijinal görüntüye ait parçalar yerine gürültü görüntü elde edilmektedir. Gürültü görüntü orijinal görüntüden çıkartılarak temiz görüntü elde edilmektedir [95]. Bu sistemin oluşturulması için farklı mimariler aşağıdaki yöntemlerle tasarlanmaktadır.

- CNN'nin çoklu girişlerindeki özellikleri birleştirmek: Bu yöntemde farklı ağlardan çok sayıda girdi sağlayabilmek için girdi verisinin farklı perspektifleri kullanılabilir [96].
- Kayıp fonksiyonunun değiştirilmesi: Farklı kayıp fonksiyonları tasarlanarak mimari hızı değiştirilebilmektedir.
- CNN'nin derinliği veya genişliğini değiştirmek: Ağın derinliğini veya genişliğini artırarak gürültü giderme performansını iyileştirmek için alıcı alan boyutu büyütülebilmektedir [97].
- CNN'lere yardımcı eklentiler koymak: CNN'nin başarısını artırabilmek için aktivasyon fonksiyonu, genişletilmiş evrim, tam bağlı katman ve havuzlama işlemleri gibi eklentiler uygulanabilmektedir [98].



- CNN'de atlama bağlantıları veya kademeli işlemleri kullanmak: Derin katmanlarda tamamlayıcı bilgi sağlamak için atlama bağlantıları [99] veya kademeli işlemler [100] kullanılabilir.
- b) CNN kullanarak ortak özellik çıkartma yöntemleri ile gürültü giderimi

Bu yöntem, gürültü giderimi sırasında CNN yöntemi ile birlikte başarı elde etmiş mimariler birlikte kullanılmaktadır. Bir çalışmada dalgacık dönüşümü ve U-ağını kullanılmaktadır [101]. Bu yöntemi kullanan bir çalışmada yüksek boyutlu gürültülü görüntüler için, CNN ve boyutsal indirgeme yönteminin kombinasyonu kullanılmaktadır [102]. Bir diğer çalışmada görüntülerde gürültü giderimi için temel bileşen analizi içeren bir CNN kullanılmıştır [103]. Bu mimarinin ilk adımında, öznelik çıkarmak için evrişim işlemi ikinci adımda, elde edilen özelliklerin boyutunu azaltmak için Temel Bileşen Analizi kullanılmıştır. Üçüncü adımda ise temiz bir görüntüyü yeniden oluşturmak için evrişimler kullanılmıştır.

- c) En iyileme yöntemi ile CNN'nin birlikte kullanımı

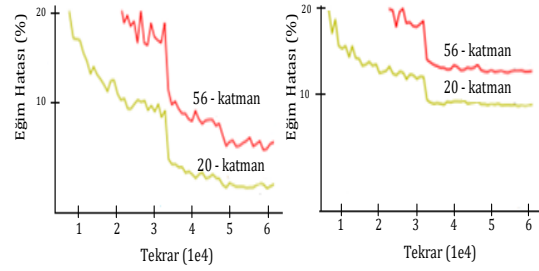
Bu yöntemde Çekişmeli Üretken Ağlar (GAN) kullanılmaktadır. Gürültü giderme hızını iyileştirmek için, en büyük artçıl kestirim (MAP) yöntemine sahip bir çekişmeli üretken ağ, gürültüyü tahmin etmek ve görüntü iç boyama ve süper çözünürlük gibi işlemler için kullanılmaktadır [104]. Gürültü giderme performansını iyileştirmek ve gürültülü bir görüntüyü pürüzsüz hale getirmek için CNN en iyileme yöntemi kullanılmaktadır [105].

#### 4.1.2. Gürültü gidermede kullanılan önemli CNN yöntemleri

Yukarıda bahsedilen CNN mimarileri kullanılarak farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu bölümde geliştirilen önemli yöntemlerden bahsedilmektedir.

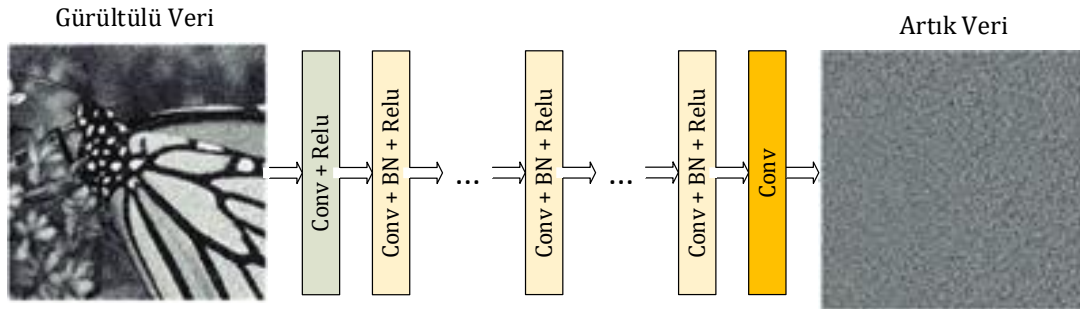
- a) Gürültü Gideren Evrişimsel Sinir Ağları

Gürültü Gideren Evrişimsel Sinir Ağları (DnCNN) görüntülerde gürültü azaltmak ve performanslı bir çözüm sunabilmek için hazırlanan bir yöntemdir [69]. DnCNN, veri sayısını azaltarak işlem performansını artırmaktadır. CNN ağlarında, ağı derinliği arttıkça hata miktarında da artış meydana gelmektedir. Şekil-10'da CIFAR-10 veri setinde 20 ve 56 katmanlı ağda meydana gelen eğitim ve test hataları gösterilmektedir. DnCNN sayesinde ağı derinliği artsa da hata miktarının artışı sınırlanmıştır.



Şekil 10. CIFAR-10 veri setinde 20 ve 56 katmanlı ağda meydana gelen eğitim ve test hataları [69]

Gürültü giderme için kullanılan yöntemlerin başarılı olmasına rağmen, iki büyük dezavantaja sahiptir. Birincisi, bu yöntemler genellikle test aşamasında sinir ağının en iyileme aşaması, gürültü giderme işlemi zaman alıcı hale getirmektedir [106]. İkincisi, modeller genel olarak elle seçilen parametreler sebebiyle, gürültü giderme aşamasındaki esnekliği düşüktür. Gürültü Gideren Evrişimsel Sinir Ağı bu sorunlara toplu normalleştirme ve artık ağ ile çözüm sunmaktadır. Toplu normalleştirmede daha yüksek öğrenme derecesi elde etmek için her katmanın çıkışında normalleştirme yapılmaktadır. Artık ağ sayesinde, elle seçilen parametreler ortadan kaldırılarak, kısayol bağlantıları oluşturulup, önceki çıktı değeri girdi değeri olarak mimaride kullanılmaktadır. Böylece daha derin bir öğrenme ağı oluşması sağlanmaktadır. DnCNN mimarisi Şekil 11'de gösterilmektedir.



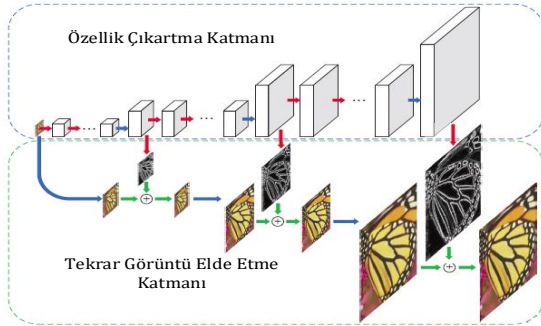
Şekil 11. Gürültü Gideren Evrişimsel Sinir Ağı mimarisi [69]

## b) Eğitilebilir Doğrusal Olmayan Reaksiyon Yayılması (TNRD)

Eşyönsüz yayılma yönteminde, filtreler, etki fonksiyonları ve diğer parametreler, doğrusal olmayan yayılma modellerinin aksine, kayıp tabanlı bir yaklaşımla, eğitim verilerinden eşzamanlı olarak öğrenilmektedir [107]. Bu model ilk olarak Perona ve Malik tarafından önerilmiş olup, görüntünün sınırlarını belirleme ve gürültü azaltmada başarılı bir yöntemdir. Bu yöntem, Gauss gürültüsünün giderilmesi, tek görüntüden süper çözünürlük görüntü elde etme ve JPEG görüntülerinde kayıp giderme işlemi için kullanılabilir.

## c) Laplas Piramit Süper-Çözünürlüklü Ağ (LapSRN)

Basamaklı alt ağlardan oluşan bir CNN ağıdır [108]. Yüksek çözünürlüklü bir ağ oluşturmak için kullanılmaktadır. Özellik çıkarım katmanı ile tersine evrimsel dönüşüm katmanlarının birlikte kullanıldığı CNN mimarisine sahip bir ağıdır. Şekil 12'de bu yöntem için mimari gösterilmektedir. Ağ 27 katmandan oluşmakta olup, düşük çözünürlüklü görüntüleri süper çözünürlüğe ulaştırmak için de kullanılmaktadır.



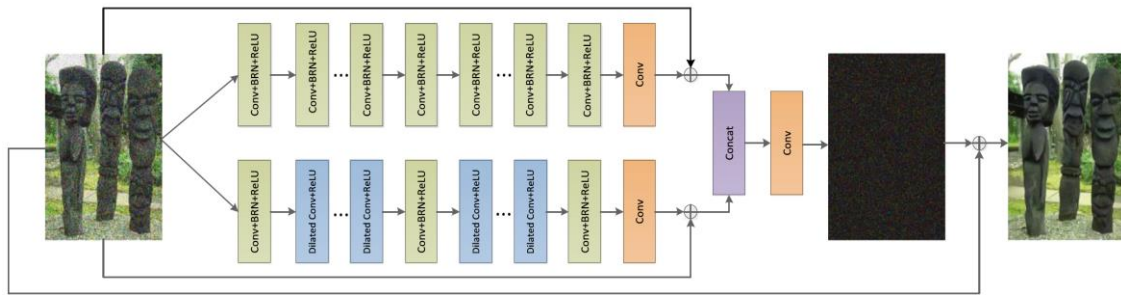
Şekil 12. LapSRN mimarisini [108]

## d) BRDNet

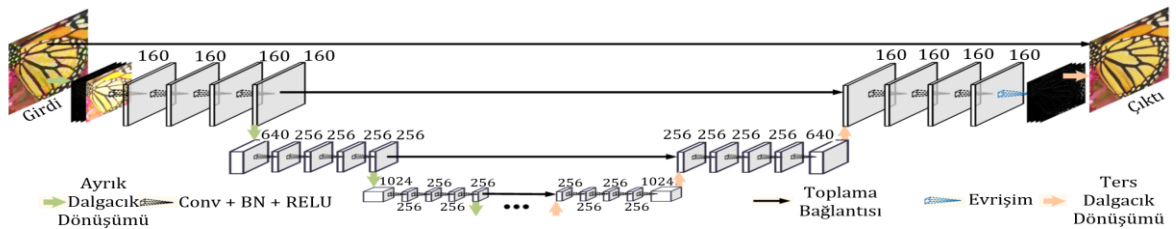
Derin evrimsel sinir ağlarında derinlik arttıkça sistemin eğitimi zorlaşmakta ve performans sorunları ortaya çıkmaktadır. BRDNet ağı genişliğini artırmak için iki ağı birleştirip daha fazla özellik elde etmeyi amaçlamaktadır [109]. Artık öğrenme, genişletilmiş evrimsel, görüntüleri gürültüden arındırmak ve daha fazla özellik elde etmek için kullanılmaktadır. Şekil 13'de BRDNet mimarisini gösterilmektedir. Mimari iki kısımdan oluşmakta olup, toplu yeniden normalleştirme katmanı yeşil ile, genişletilmiş evrimsel ağ katmanı mavi ile gösterilmektedir. Orijinal görüntüden önce gürültü elde edilmekte, gürültü orijinal görüntüden çıkartılarak temiz görüntü elde edilmektedir.

## e) Çok Seviyeli Dalgacık Evrimsel Sinir Ağı

Bu yöntemin amacı daha hızlı çalışan bir gürültü giderici model oluşturup, görüntünün kalitesini artırmaktır. Bunu sağlayabilmek için özellik haritalarının boyutu küçültülüp, kanalları azaltmak için bir konvolüsyon katmanı kullanılmaktadır. Genişleyen alt ağda, yüksek çözünürlüklü özellik haritalarını yeniden yapılandırmak için ters dalgacık dönüşümü uygulanmaktadır. Çok Seviyeli Dalgacık Evrimsel Sinir Ağı (MWCNN) görüntü geri yükleme alanında kullanılmaktadır. 2 boyutlu ayrık dalgacık dönüşümünün (DWT), biortogonal özelliği nedeniyle, orijinal görüntü ters dalgacık dönüşümü (IWT) ile doğru bir şekilde yeniden oluşturulabilir [101]. Şekil 14'de bir görüntünün çok seviyeli dalgacık evrimsel sinir ağı mimarisini ile ayrışması ve yeniden yapılandırılması gösterilmektedir.



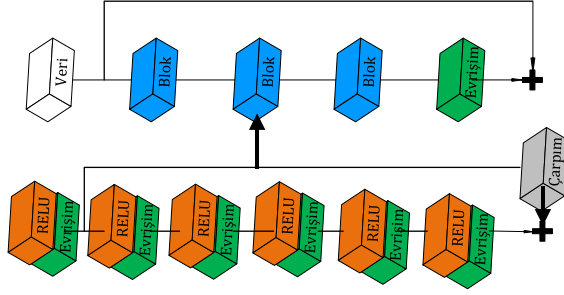
Şekil 13. BRDNet mimarisini [109]



Şekil 14. Bir görüntünün Çok Seviyeli Dalgacık Evrimsel Sinir Ağı mimarisini ile ayrışması ve yeniden yapılandırılması [101]

## f) CIMM

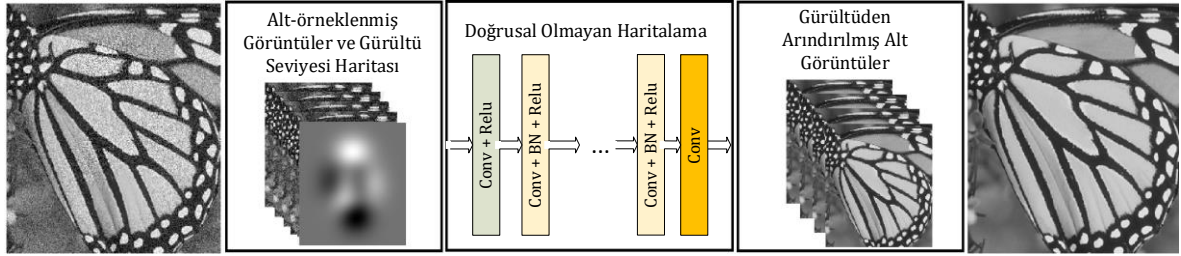
CIMM yönteminde görüntülerde gürültü giderme için Birim Eşleme Modülleri (CIMM) içeren tam evrişimli bir ağ modeli kullanılmıştır. CIMM mimarisi, eğitim açısını korumak için atlama bağlantıları olarak birim eşleştirmelerini kullanıp, önceden etkinleştirilen girdi alınmaktadır [110]. Ayrıca genişletilmiş çekirdekler kullanılarak, alıcı alanı genişletilmiştir. Şekil 15’de birim eşleme modülüne ait mimari gösterilmektedir.



Şekil 15. CIMM mimarisi [110]

## g) FFDNET

FFDNet gürültü seviyesi bilinmeyen görüntüler üzerinde gürültü giderme açısından, hızlı ve esnek bir yöntemdir [111]. İlk katman, gürültülü bir görüntüyü dört alt görüntüye yeniden şekillendiren tersine çevrilebilir bir alt örnekleme işlevine sahiptir. Her katman üç tür işlemten oluşmaktadır; ilk evrişim katmanı için “Conv + ReLU”, orta katmanlar için “Conv + BN + ReLU” ve son evrişim katmanı için “Conv” şeklindedir. Her evrişimden sonra özellik haritalarının boyutunu aynı tutmak için sıfır dolgu kullanılır. Son evrişim katmanından sonra, gürültüden arındırılmış görüntüyü elde etmek için giriş aşamasında uygulanan alt örnekleme operatörünün ters operatörü olarak yukarı ölçekleme işlemi uygulanır. Şekil 16’da FFDNet mimarisi gösterilmektedir. Karmaşıklık ve performans dengesini göz önünde bulundurarak, evrişim katmanlarının sayısı gri tonlamalı görüntü için 15 ve renkli görüntü için 12 olarak belirlenmiştir.

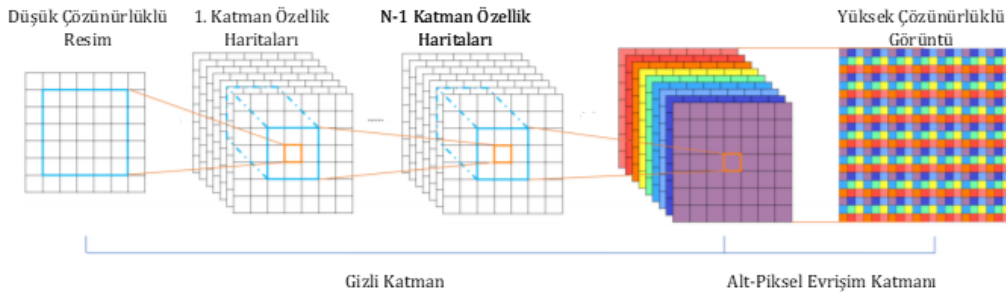


Şekil 16. FFDNet mimarisi [111]

## h) Verimli Alt-Piksel Evrişimli Sinir Ağı (ESPCN)

Düşük çözünürlüklü görüntülerden yüksek çözünürlüklü görüntülerin elde edilmesi için kullanılan bir yöntemdir [112]. Diğer yöntemlere göre farklılıkları aşağıda belirtilmektedir:

- Görüntülerin kaydırma adımı (stride) değeri, orijinal görüntüdeki her bir pikselin, eğitim verisinde bir kez gözükmeye sağlanacak şekilde ayarlanmaktadır.
- ReLU aktivasyon fonksiyonu yerine, Tanh aktivasyon fonksiyonu kullanılmaktadır.
- Algoritmada en fazla 100 tekrar kullanılmakta, kayıp fonksiyonunda değişim olmazsa tekrar bitirilmektedir.
- İlk öğrenme oranı 0.01 ile başlayıp, en son 0.0001 değerine ulaşmaktadır. Ara değerlerde maliyet fonksiyonunun sonucu bir eşikten küçük olduğunda, maliyet fonksiyonu kademeli olarak güncellenmektedir. Mimari, 3 evrişim katmanından oluşmakta olup, 2 katman özellik haritası çıkarmak için kullanılır, 1 katman düşük çözünürlüklü görüntüden süper çözünürlüklü görüntü elde etmek için kullanılmaktadır. Bu yönteme ait mimari Şekil 17’de gösterilmektedir.



Şekil 17. ESPCN mimarisi [112]

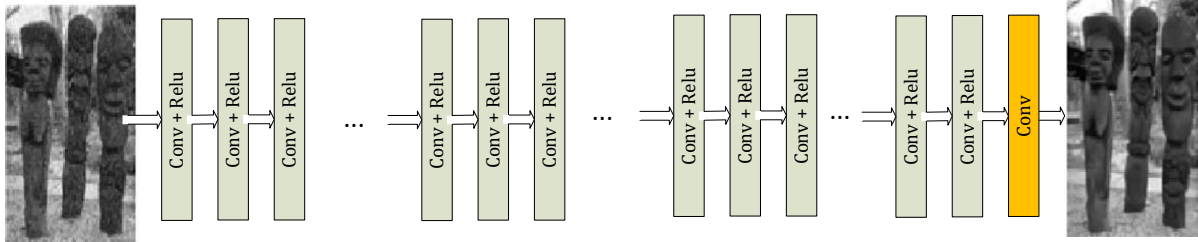
## i) ECDNET

ECNDNet mimarisi, genişletilmiş evrişim, artık öğrenme, toplu normalizasyon, evrişim ve ReLU'dan oluşur. Genişletilmiş evrişim 2., 5., 9. ve 12. katmanlarda uygulanmış olup, yakalanan bilgi artırılıp, hesaplama maliyeti düşürülmüştür. Önerilen ağın derinliği 17'dir [113]. Tasarlanan ağın mimarisi Şekil 18'de gösterilmektedir.

## j) Literatürde Yer Alan Diğer CNN Yöntemleri

ADNet yönetiminde gürültü seviyesi bilinmeyen gerçek gürültülü görüntülerde, gürültü gidermek ve düşük

frekanslı özellikleri düzleştirmek için artık bir yapı kullanılmaktadır [114]. EPLL yönteminde gürültü gidermek için Gauss Karışım Modeli kullanılmaktadır [115]. CSF, rastgele alan tabanlı bir mimari olan küçülme alanları öneren bir yapıya sahiptir [116]. PSN, yarı karesel bölme yönteminden ve yakın operatörlerden gelen öğelere dayalı olarak görüntü restorasyonu ilgili sorunları ele almak için kullanılmaktadır [117]. IRCNN yönteminde görüntüdeki gürültüyü tahmin etmek için yarı karesel bölme (HQS) ve CNN birlikte kullanılmaktadır [118].



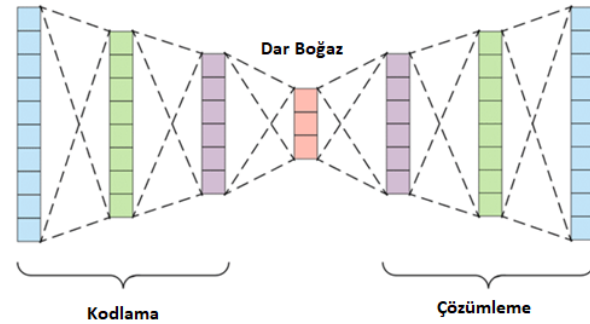
Şekil 18. ECDNET mimarisi [113]

#### 4.2. Görüntü Üzerinde Gürültü Giderimi İçin Kullanılan Otokodlayıcı Yöntemleri

Otokodlayıcılar, birden fazla gizli katmana sahip ileri beslemeli sinir ağlarıdır. Bu ağlar girdi verilerini çıkış katmanında yeniden elde etmeye çalışmakta olup, çıkış katmanındaki hedef veriler ile girdi verileri aynıdır [119]. Otokodlayıcılarda geri yayılım algoritmasında olduğu gibi gradyan alçalma yöntemini kullanarak eğitilmektedir. Otokodlayıcılar veri ve kod alanı arasında çift yönlü haritalandırma yapabilmektedir. Bir otokodlayıcıda fazla sayıda gizli katman kullanılarak büyük boyutlara sahip girdi verileri, çok daha az bir kod alanına kısıtlanabilir. Bununla birlikte birden fazla gizli katmana sahip bir sinir ağını eğitmek, alt seviyelerdeki gizli katmanların en iyileme aşamasından dolayı zordur.

Otomatik kodlayıcılar, girdi için sıkıştırılmış bilgi gösterimi gerçekleştiren bir darboğaz ağı içermektedir. Orta katmandaki nöron sayısı giriş katmanındaki nöron sayısından az ise ağ daha etkili bilgiyi çıkarmaktadır. Orta katmanın, gürültüleri gidererek görüntü kalıplarını oluşturmaya çalışmaktadır. Orta katmanda daha fazla nöron varsa, sinir ağına model öğrenme kapasitesi daha yüksek olduğundan, model giriş değerlerini kopyalayıp çıkış değerlerine yapıştırarak, gürültüyü öğrenecek ancak herhangi bir özelliği çıkarmayacaktır. Bu nedenle, darboğaz modeli gürültü giderme açısından önemlidir. Gürültüyü bir görüntüden çıkarmak için, görüntünün boyutsallığını azaltmak önemlidir. Otokodlayıcılar, doğrusal olmayan aktivasyon işlevleri ve çoklu katman yığını yardımıyla ağı doğrusal olmayan bir yapı sunmaktadır. Boyut azaltmanın ürünü olarak gürültülü

değerler, bu sinir ağı kullanılarak kolayca tespit edilebilmektedir. Şekil 17'de otokodlayıcılarda yapılan kodlama ve çözümleme işlemi görselleştirilmektedir.



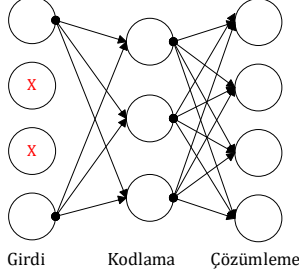
Şekil 17. Kodlama ve çözümleme işlemleri [120]

Otokodlayıcılar genelde veri boyutunun azaltılması için kullanılmakta olup, otokodlayıcı mimarisi özelleştirilerek özellik seçimi, çıkarımı ve gürültü giderimi için yaygın olarak da kullanılmaktadır. Gürültü giderimi için kullanılan otokodlayıcı mimarilerinden aşağıdaki bölümde bahsedilmektedir.

## a) Gürültü Gideren Otokodlayıcı

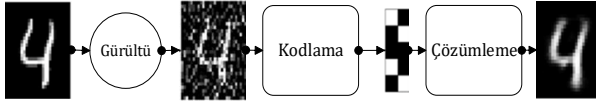
Otokodlayıcılarda, gizli katmanda girdilerden daha fazla düğüm olduğunda, ağ "boş işlev" olarak da adlandırılan, çıkış verisinin girdi verisine eşit olduğu ve otokodlayıcıyı yararsız olarak işaretlediği duruma neden olmaktadır. Otokodlayıcılarda bu durum, giriş değerlerinden bazıları rastgele devre dışı bırakılarak veya bazı veriler bilerek bozularak çözümlenmektedir.

Genel olarak, sıfıra ayarlanan giriş düğümlerinin yüzdesi %30 ile %50 arasında olmaktadır [121]. Gürültü gideren otokodlayıcıda bazı nöronların devre dışı bırakılması Şekil 19'da gösterilmektedir.



Şekil 19. Gürültü gideren otokodlayıcıda bazı nöronların devre dışı bırakılması [122]

Gürültü gideren otokodlayıcıda aşırı öğrenmeyi engelleyip, daha iyi görüntü elde etmek için önce gürültü eklenip, orijinal görüntünün tekrar elde edildiği işlem Şekil 20'de gösterilmektedir.



Şekil 20. Gürültü gideren otokodlayıcının yapısı [123]

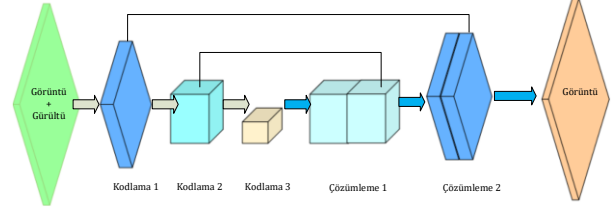
#### b) Yığıt Gürültü Gideren Otokodlayıcı

Otokodlayıcıda çözümleyici, gizli katman ve kodlayıcı kısımları yer almaktadır. Eğer ağa daha fazla gizli katman eklenirse, bu yapıya Yığıt Otokodlayıcı veya Derin Otokodlayıcı denilmektedir. Bu yöntem ile verilerin boyutu azaltılıp, daha çok sıkıştırılması sağlanmaktadır [124]. Gürültü gideren otokodlayıcılar, giriş verileri gürültü ile beslenen otokodlayıcılardır. Gürültüsüz veri ile çıkan veri karşılaştırılıp, hata oranı hesaplanmaktadır. Bu sayede, ağın ayrıntıları öğrenilmeyip, baskın özelliklerin öğrenilmesini sağlanmaktadır [121]. Yığıt Gürültü Gideren Otokodlayıcılarda da bazı nöronlar devre dışı bırakılarak daha derin bir ağın kurulması sağlanabilmektedir [125].

#### c) Evrimsel Gürültü Gideren Otokodlayıcı (CDAE)

Evrimsel Gürültü Gideren Otokodlayıcı yönteminde çözümleme işlemleri sırayla yapılmayıp, çözümleme işlemi kodlama ile birleştirilebilmektedir. Bu sayede bazı önemli veriler sıkıştırılmadan çıktı olarak kullanılabilir. Tıbbi görüntülerde gürültüyü gidermek için evrimsel gürültü gideren otokodlayıcılar kullanılmaktadır. Ayrıca görüntülerde filtreleme sonrası yeniden yapılandırma ve gürültü giderimi için de bu yöntem kullanılmaktadır. Şekil 21'de göğüs röntgen filmlerinde gürültü giderilmesi

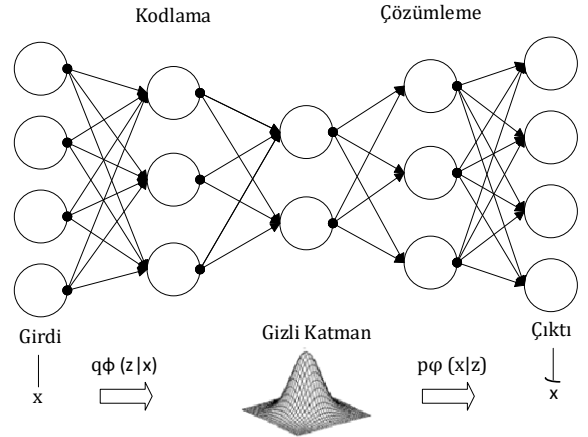
için kullanılan Evrimsel Gürültü Gideren Otokodlayıcı mimarisi gösterilmektedir.



Şekil 21. Göğüs röntgen filmlerinde kullanılan Evrimsel Gürültü Gideren Otokodlayıcı Mimarisi [6]

#### d) Gürültü Gideren Varyasyonel Otokodlayıcı

Seyrek otokodlayıcı yönteminde daha az veri ile işlem yapmak için veriler üzerinde deaktivasyon yapmadan aktivasyon fonksiyonları kullanılarak daha az sayıda nöronun aktive edilmesi sağlanmakta bu sayede performans korunup, otomatik kodlayıcının girdi verilerindeki gereksiz bilgiler yerine aslında istenen gösterimleri öğrenmesi sağlanmaktadır [126]. Bu mimariye benzer olarak Varyasyonel otokodlayıcı, gizli katmandaki vektörlerin dağılımını normal dağılıma zorlayan gözetimsiz ve üretken bir otokodlayıcı modelidir [127]. Varyasyonel otokodlayıcıda gizli katmana gauss eğrisinin uygulandığı mimari Şekil 22'de gösterilmektedir.



Şekil 22. Varyasyonel otokodlayıcı mimarisi [127]

Gürültü Gideren Varyasyonel Otokodlayıcı, Varyasyonel Otokodlayıcının gürültü giderimi üzerinde özelleştirilmesi sonucu bu yöntem ortaya çıkmıştır. Normal verilere gürültülü veriler eklenerek ağ üzerinde boş işlev olarak adlandırılan çıkış verisinin giriş verisine yaklaştığı sonuçlar önlenip, gizli katmanda işlem sonucunda normalleştirme yapılmaktadır. Değişimsel çıkarımı derin öğrenme ile birleştiren bir yaklaşımdır [128]. Bu yöntem gürültü gidermeyi ve düzenlemeyi tek bir üretken modelde birleştirmektedir. Varyasyonel Otokodlayıcının mimarisi geliştirilerek, bozulmuş görüntülerden temiz görüntü elde etmek ve görüntüleri sınıflandırmak için

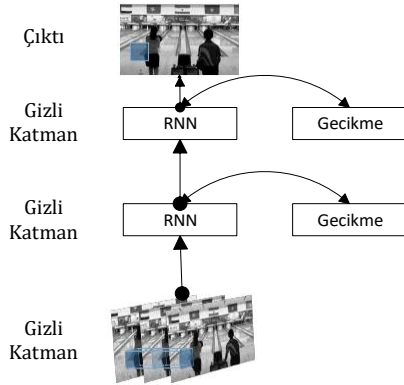
kullanılabilmektedir [129].

### 4.3. Görüntü Üzerinde Gürültü Giderimi İçin Kullanılan Diğer Derin Öğrenme Yöntemleri

Gürültü giderme aşamasında kullanılan diğer derin öğrenme yöntemleri aşağıda belirtilmektedir.

#### 4.3.1. Tekrarlayan sinir ağı

Tekrarlayan Sinir Ağı (RNN) mimarisinde ileri beslemeli ağlardan farklı olarak, geri yayılım algoritması kullanılmaktadır. Bu yöntemde giriş ve çıkış değeri arasındaki hata bulunarak, ağı eğitimi sırasındaki hata değeri düşürülmeye çalışılmaktadır. Yinelenen yapılar da sonuç, sadece o andaki girdi değerine bağlı olmadan, diğer girdilere de bağlı olarak hesaplanmaktadır. Tekrarlayan Sinir Ağı mimarisinde, t anındaki girdi verilerinin yanında, t-1 anından gelen gizli katman sonuçları da gizli katmanın t anındaki girdisi olmaktadır. Tekrarlayan Sinir Ağı kullanarak videolarda gürültü giderimi için yapılan çalışmada; videoda üst üste binen görüntüler kare kare ayrılmaktadır. Aynı görüntüye ait veriler liste haline getirilip, listedeki verilerin ortalama değerleri alınıp, orijinal veriler yerine yama veriler koyulmaktadır [130]. Videoda gürültü gidermek için oluşturulan Tekrarlayan Sinir Ağı Şekil 23'de gösterilmektedir.



Şekil 23. Videoda gürültü gideren Tekrarlayan Sinir Ağı modeli [130]

Tekrarlayan Sinir Ağı ile EKG sinyallerindeki gürültülerin giderimi için yapılan diğer çalışmada orijinal veriye yakın sonuçlar elde edilmiştir [131].

Uzun Kısa Süreli Bellekler bilgiyi uzun süre hatırlayarak, bağımlılık probleminin kurtulmak için tasarlanmıştır. Uzun Kısa Süreli Bellekler önceki verilerle yeni kararlar vermek, verileri ilerde kullanmak ve verileri depolamak amacıyla içinde kapılar barındırırlar, bu nedenle daha esneklerdir. Ancak daha çok işlem yapıp, daha fazla hafıza gereksinimine sahiptirler. Bilgisayarla çekilmiş akciğer tomografi görüntülerinde meydana gelen gürültülerin giderimi için Uzun Kısa Süreli Bellek yöntemi kullanılmış ve sinyal gürültü oranı, tepe sinyal gürültü oranı ve ortalama hataların karesi

değerleri kıyaslanınca gürültü gidermede başarılı olduğu tespit edilmiştir [132].

#### 4.3.2. Kısıtlanmış boltzmann makineleri

Kısıtlı Boltzmann Makinesi iki katmanlı sinir ağlarıdır. Gürültü oranı yüksek görüntülerde, Kısıtlanmış Boltzmann Makinesinde derin ağların kullanılması ile gürültü gideren otokodlayıcı ve diğer yöntemlerden daha iyi sonuçlar ortaya çıkmaktadır [133].

#### 4.3.3. Derin inanç ağları

Derin İnanç Ağları, özellik gösterimi ve çıkartılması için etkili bir araçtır. Kısıtlanmış Boltzmann Makineleri iki katmanlı bir yapıya sahip olduğu için bu ağı derinleştirmek amacıyla derin inanç ağları oluşturulmuştur. Derin İnanç Ağlarında üst katmanlardaki bağlantılar yönsüz olup, alt katlardaki bağlantılar yönlüdür [134]. Derin İnanç Ağları görüntülerde gürültü giderme için de kullanılmaktadır. Yapılan bir çalışmada, ilave beyaz gauss gürültüsü ile bozulmuş MNIST veri setine Derin İnanç Ağları uygulanarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir [135].

#### 4.4. Videolarda Gürültü Giderimi

Videolar görüntü karelerinin bir araya getirilmesi ile oluşmaktadır. Video akış özellikleri saniyedeki kare sayısı ile belirlenmektedir. Gürültü giderimi sırasında video görüntüleri, fotoğraf makinesindeki seri çekim görüntülerine benzer şekilde, karelere ayrıştırılır. Sonrasında görüntülerde kullanılan gürültü giderme teknikleri videoda gürültü azaltmak için uygulanmaktadır [136]. Videoda gürültüyü gidermek için uygulanan yöntemlerde öncelikle yerel olmayan yama yöntemi kullanılmış olup, sonrasında CNN yöntemleri kullanılarak video ve görüntü üzerindeki gürültü giderilmeye çalışılmıştır [137]. Video üzerinde gürültü giderme aşamasında görüntü geçişlerinde titremenin olmaması, detayların korunması, gürültü giderme süresi ve orijinal görüntüye yakınlık video üzerinde gürültü gidermedeki başarı ölçütleri arasında yer almaktadır. Görüntülerde gürültü gidermede başarı elde etmiş yöntemler videolara da uyarlanarak uygulanmıştır. Örneğin BM3D ve NLB yöntemleri görüntüler üzerinde uygulanırken, VBM4D ve VNLB video üzerinde uygulanmaktadır.

Video üzerinde gürültü giderme için uygulanan bir yöntemde, görüntülerde gürültü gidermeden farklı olarak, ardışıl karelerde benzer yamalar bulunarak, gürültü benzer yamalarda ortak olarak giderilmiştir [37]. Benzer yamaların bulunması, uzamsal olarak benzer komşu karelerin bulunması ve hareket tahmininin kullanılması ile gerçekleştirilmektedir. Uzamsal komşuların bulunması aşamasında, belirli bir pikselde veya yamada gürültü giderme işlemi yapılırken dizinin bitişik karelerinde de benzer

pikseller veya yamalarda da gürültü giderme işlemi yapılır. Hareket tahmini kullanılarak video üzerinde gürültü giderme performansını iyileştirilmektedir [138,139].

VNLB yama tabanlı, Bayes teoremi kullanılarak video üzerinde gürültü giderme için oluşturulan bir yöntemdir. Bu yöntem, benzer uzay-zaman yamalarının her grubu için bir Bayes modeli oluşturur. VBM4D blok eşleme ve 3 boyutlu filtreleme ile videolarda gürültüyü gidermek için kullanılan, nesnelerin hareketleri takip edilerek, benzer nesnelerin gruplanarak filtrelemenin yapıldığı yöntemdir [37].

DVDNet yönteminde, videodan gürültü giderme çalışmasında performans ve eğitim zamanı arasında bir denge kurmak için zamansal bilgiler birleştirilmiştir [140]. Bu yöntem geleneksel gürültü giderme yöntemleri ile CNN tabanlı gürültü gidermenin birlikte kullanıldığı bir yöntemdir. Belirli bir pikselde gürültü giderimi yaparken, algoritmanın sadece aynı karede değil, aynı zamanda dizinin bitişik karelerinde de benzer pikseller aranmaktadır. Hareket tahmini yöntemiyle videoda farklı çerçevelerdeki benzer görüntüler bulunup, düzleştirilerek görüntü geçişleri arasındaki titreşimler yok edilmektedir. Son olarak elde edilen görüntüye gürültü gideren evrişimsel sinir ağı yöntemi uygulanmaktadır. DVDNet yöntemi geliştirilip U-ağı uygulanarak FastDVDNet yöntemi geliştirilmiştir [141]. FITVNet yöntemi iki aşamalı bir gürültü giderme modeline sahiptir. İlk aşamada görüntü içindeki gürültü giderilmekte, ikinci aşamada ekran geçişlerindeki titreşimin azaltılması için, video üzerinde uzamsal ve zamansal gürültü giderme yöntemleri uygulanmaktadır [136]. Video üzerinde gürültü gideren diğer bir modelde eğitim verisi olmadan video üzerinde gürültü giderme işlemi yapılmaktadır [142]. Eğitim verisi olarak videonun kendisi kullanılarak, video kareleri transfer öğrenme tekniği ile önceden eğitilmiş bir gürültü giderme ağına ince ayar yapılarak, gürültü videolar için gürültü gideren bir model oluşturulmuştur. Bu modelde iki aşamalı bir CNN ağı kullanılarak temiz video görüntüleri elde edilmiştir.

## V. YÖNTEMLERİN KIYASLANMASI

Yapılan bir çalışmada geleneksel gürültü yöntemleri kıyaslanmıştır [49]. Bu çalışmada kullanılan geleneksel yöntemlerden Wiener filtreleri, görüntüler üzerinde ortalama kare tahminini yaparak gürültülü ve bulanık görüntülerin restorasyonu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Wiener filtreleme görüntü üzerindeki ayrıntıları korumaktadır. Bilateral Filtreleme gürültü giderme sürecini hızlandırmak için basit, kenar koruyucu, yinelemesiz bir yöntemdir. Her noktanın değeri yakınındaki noktaların ortalama yoğunluk

değerleri ile hesaplanmaktadır. PCA, veri kümelerini daha düşük boyutlara indirerek bir veri kümesini basitleştirmeye yönelik istatistiksel bir tekniktir, verileri küçülterek üzerindeki gürültüler giderilmektedir. Dalgacık dönüşüm yöntemi, bulanıklığın etkisini azaltmak için ortalama kare hatasını en aza indirmektedir, görsel olarak daha net görüntü elde etmektedir. BM3D görüntü parçaları, benzerlik temelinde birlikte gruplandırılmakta, gürültü için filtrelenmelerini ve farklı sinyallerini korumalarını sağlamak için ağırlık ortalaması alınarak filtreleme yapılmaktadır. Diğer yöntemlere göre PSNR değeri diğerlerine göre daha iyi sonuçlar ortaya koymaktadır, algılanabilir görsel sonuçlar elde etmişlerdir.

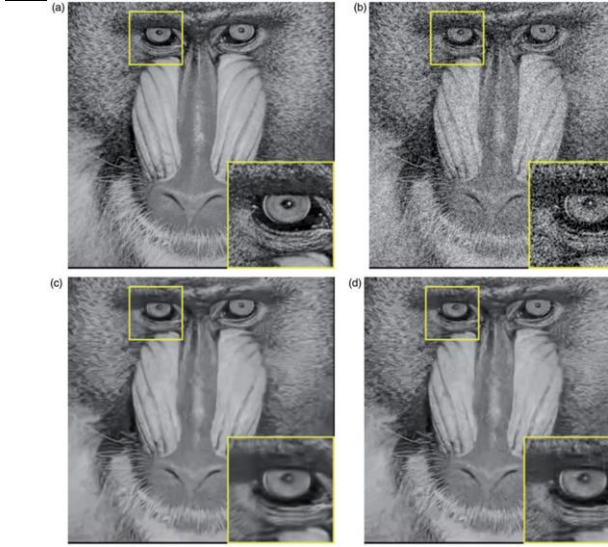
Bu çalışmada benzer görüntü parçalarını gruplamanın ve bunları birlikte filtrelemenin iyi sonuçları elde ettiği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2'de gösterilmektedir.

**Tablo 2.** Set12 veri seti ile 30 dB gürültü seviyelerinde gürültü giderme sonucu elde edilen PSNR değerleri [49]

Metot	PSNR	SSIM
Wiener filtering	27.81	0.707
Bilateral filtering	27.88	0.712
PCA	26.68	0.596
Wavelet transform domain method	21.74	0.316
BM3D	<b>31.26</b>	<b>0.845</b>

Bu geleneksel yöntemleri uygularken bazı zorluklar yaşanmaktadır. Wiener filtrelerinde en uygun pencere boyutunu ayarlamak zor olmaktadır. Bilateral Filtreleme gürültü giderme sonrası görüntüde istenmeyen kalıntılar bırakmaktadır, yüksek gürültülerde başarı oranı düşük kalmaktadır. PCA görüntü detaylarını ve dokuları korumada zorluk oluşturmaktadır. Dalgacık dönüşüm yöntemine ait sonuçlar ayrıntılı yapıları koruyamama ve görsel açıdan daha az başarılı görüntüler elde edilmektedir. BM3D diğer yöntemlere göre başarı elde etmiş olsa da yönteminde gürültü içeriğindeki artışla performans önemli ölçüde azalmaktadır.

Geleneksel yöntemlerde doğru parametreleri ayarlamak her zaman mümkün olmamakta ve elle ayarlanan parametreler ile modeller oluşturulmaktadır. Şekil-111'de, farklı gürültü giderme parametre ayarlarıyla BM3D'nin gürültü giderme sonuçlarına ait bir örnek gösterilmektedir [143]. Şekil 24'de göz çevresi bölgesindeki görüntü (d), görüntü (c)'den daha fazla ayrıntıyı korumaktadır. Bu örnek, parametre seçiminin, görüntüdeki tüm bölgelerde, özellikle dokulu görüntü bölgelerinde gürültü giderme üzerinde etkisinin olduğunu göstermektedir.



**Şekil 24.** Parametre seçiminin gürültü giderme üzerinde etkisi [143]

(a) Orijinal Görüntü; (b) Gürültü Eklenmiş Görüntü; (c) 1. Parametrelere Göre Gürültü Giderme Sonucu Elde Edilen Görüntü; (d) 2. Parametrelere Göre Gürültü Giderme Sonucu Elde Edilen Görüntü.

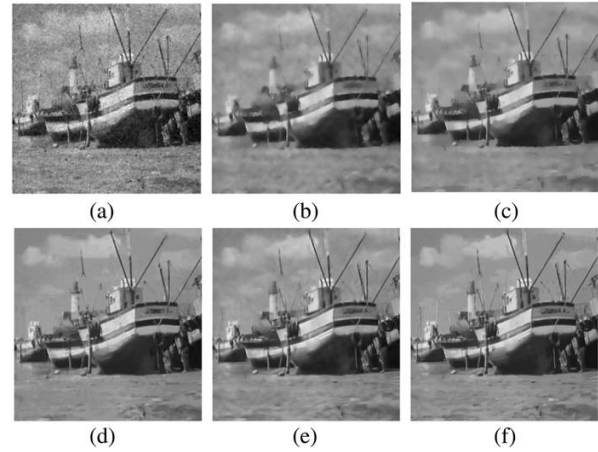
Derin öğrenme yöntemlerinin geleneksel yöntemlere üstünlüğü sadece parametre ayarlanması problemi ile sınırlı değildir. Gürültülerde bulunan yüksek frekanslı veriler kolaylıkla filtrelenebilmektedir. Fakat, asıl sinyal ile buna karışmış olan düşük frekanslı gürültünün ayırt edilmesi zor olduğu için düşük frekanslı gürültülerin filtrelenmesi de kolay olmamaktadır [49]. Geleneksel yöntemlerde gürültü türü ve dağılımına göre gürültüyü modelleyecek istatistiksel dağılım yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yüzden gerçek dünyadaki görüntülerde gürültü tek bir dağılımla ifade edilemediği gibi her zaman dağılımı doğru bir şekilde belirlemek de mümkün olmayabilmektedir. Örneğin tıbbi görüntü türleri içerisinde ultrason görüntüsü benek gürültüsü içerirken, Manyetik rezonans (MR) görüntüleri ise Rician gürültüsü içermektedir [49].

Görüntülerde gürültü giderirken homojen bölgelerin yumuşatılması, kenarların, dokuların ve noktasal sinyallerin korunması gibi ihtiyaçların geleneksel yöntemlerle yapılması kolay olmamaktadır. Görüntü gürültü giderme aşamasında orijinal görüntüyü elde etmeye çalışırken bazı zorluklarla karşılaşılabilir. Gürültü giderme sürecinde dikkat edilmesi gereken kuralları şu şekilde sıralayabiliriz [49]:

- Gürültü giderildikten sonra görüntü üzerindeki düz alanlar gürültü giderildikten sonra da pürüzsüz olmalıdır.
- Kenarlar bulanıklaşmadan korunmalıdır.

- Görüntü üzerindeki dokular korunmalıdır.
- Görüntü üzerinde yeni gürültüler oluşturulmamalıdır.

Şekil 25'deki gösterilen çalışmada, toplam değişim (TV) tabanlı yöntemin [144] gürültü giderme sonucunda dokuları yumuşattığı ve görüntüde kalıntılar ürettiği gösterilmektedir. Ayarlanabilir yerel olmayan ortalamaların düzenlenmesi yöntemi (R-NL) [145] ve yerel olmayan ortalamalar (NLM) [146] yöntemleri daha iyi performanslar elde edebilmesine rağmen, bu iki yöntem küçük yapıları eski haline getirmekte güçlük çekmektedir. Temsili düşük sıra tabanlı yöntemlerin (WNNM [47], LRA\_SVD [147]) ve seyrek kodlama şemasının (NCSR [148]) homojen bölgelerde daha iyi sonuçlar ürettiği görülmektedir.



**Şekil 25.** Bot görüntüsü üzerinde gürültü giderme sonucu elde edilen sonuçlar [49]

- (a) Toplam Değişim Tabanlı Düzenleme [144] (PSNR = 22.95 dB; SSIM = 0.456)  
 (b) NLM [146] (PSNR = 24.63 dB; SSIM = 0.589)  
 (c) R-NL [145] (PSNR = 25.42 dB; SSIM = 0.647)  
 (d) NCSR model [148] (PSNR = 26.48 dB; SSIM = 0.689)  
 (e) LRA\_SVD [147] (PSNR = 26.65 dB; SSIM = 0.684)  
 (f) WNNM [47] (PSNR = 26.97 dB; SSIM = 0.708)

Gözetimli sınıflandırmada temel problem sınıfı bilinmeyen test nesnesini, farklı bilinen sınıf seti içinden doğru sınıfa atamaktır. Bu sınıflandırmayı seyreklik tabanlı olarak yapmak istediğimizde, öncelikle nesne ve sözlük arasındaki ilişkiyi ifade eden seyrek gösterilim vektörünü elde etmemiz gereklidir [149]. Seyrek gösterime dayalı temsillerde iki ana problem mevcuttur. Birincisi, öğrenme verilerinden bir sözlük oluşturulması, ikincisi kodlanacak verinin oluşturulan bu sözlüğün atomlarının ağırlıklı toplamı olarak ifade edilen temsil ile asıl hali arasında en az uzaklık olacak şekilde ifade edilmesidir. Seyrek kodlama safhasında ise bir seferlik yapılan sözlük oluşturmanın ardından, nesne tanıma aşamasının



başında her bir görüntü var olan sözlük üzerinden seyrek olarak kodlanır. Kodlama problemi; eldeki test verisini, oluşturulan sözlük atomları cinsinden, minimum sayıda sözlük atomuna benzeterek orijinaline en yakın şekilde ifade etmeye çalışılmaktadır [150]. CNN yöntemleri seyrek yaklaşımlara benzer olarak görüntülerde seyrek etkileşim kullanmakta ve küçük çekirdekler ile görüntüyü filtrelemektedirler. Derin öğrenme modellerinde filtre bankaları eğitim esnasında oluşturulmaktadır. Bir sinir ağında evrişim işlemini kullanmanın yeniliği, filtreye ait ağırlık değerlerinin ağırlık eğitimi sırasında öğrenilmesidir. Filtre bankaları, görüntülerin doku özelliklerini çıkarmak için kullanılan ve doku analizinde yaygın olarak kullanılan araçlardır [151]. CNN'de bu filtrelerin tekrarlı öğrenme yapıları ile otomatik olarak oluşturulması sağlanmaktadır. Geleneksel yöntemlerde elle ayarlanan parametreler nedeniyle optimizasyon problemini çözmek için alternatif çözümler geliştirilmiştir [152]. Çoğu yöntem görüntüde gürültü giderme konusunda oldukça iyi bir performans elde etmelerine rağmen, elle ayarlanan parametrelere sahip olması, eğitim aşamasında optimizasyon yöntemlerine ihtiyaç duyulması gibi dezavantajlara sahiptir. Son zamanlarda, mimariler daha esnek hale geldikçe, derin öğrenme teknikleri bu dezavantajların üstesinden gelmeye başlamıştır [153-154].

Yapılan diğer çalışmada çeşitli gürültü seviyelerine sahip gri tonlamalı BSD68 test veri setindeki görüntülerin klasik yöntemler ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak gürültü giderme sonucu elde edilen ortalama PSNR (dB) ve SSIM sonuçları kıyaslanmıştır [155]. Elde edilen sonuçlara göre derin öğrenme yöntemi daha başarılı sonuç elde etmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3'de gösterilmektedir.

**Tablo 3.** Farklı standart sapma ile ilave beyaz Gauss gürültüsü tarafından bozulmuş BSD68 görüntüsü üzerindeki gürültü giderme sonuçlarının karşılaştırılması [155]

Gürültü Seviyesi	BM3D	WNNM	DnCNN
10	33.32	33.59	<b>33.88</b>
30	27.76	27.99	<b>28.36</b>
50	25.62	25.87	<b>26.23</b>
70	24.44	24.65	<b>24.90</b>

Otokodlayıcı gürültü giderme yöntemi ile CNN yöntemlerini kıyaslayabilmek için, CDAE ile DnCNN yöntemleri kullanılarak bir çalışma yapılmıştır.

CBSD400 veri setindeki  $\sigma=25$  gürültü seviyesine sahip 176x144 boyutundaki görüntüler kullanılarak görüntüler üzerindeki gürültüler iki yöntem kullanılarak giderilmiştir. CDAE otokodlayıcı yöntemi hızlı eğitim süresine ve basit bir mimariye sahiptir. Ancak bu yöntemde resim üzerindeki detayların kaybolduğu gözlemlenmiştir. DnCNN yöntemi eğitim süresi olarak CDAE yönteminden biraz daha uzun eğitim süresine sahip olmasına karşın orijinal resme yakınlığı ön plana çıkmaktadır. Tablo 4'de DnCNN ve CDAE yöntemlerinin CBSD400 veri setindeki  $\sigma=25$  gürültü seviyesine sahip görüntülerde gürültü giderme sonucu elde edilen ölçüm değerleri gösterilmektedir.

**Tablo 4.** DnCNN ve CDAE yöntemlerinin CBSD400 veri setindeki  $\sigma=25$  gürültü seviyesindeki görüntülerde gürültü giderme sonucu elde edilen ölçümler

Yöntem	PSNR (dB)	SSIM	Toplam Parametre	Süre (sn)
DnCNN	26.94	0.83	560,320	605
CDAE	23.62	0.73	1,349,059	50

Başka bir çalışmada farklı derin öğrenme yöntemleri ve geleneksel gürültü giderme yöntemleri kıyaslanmıştır. DnCNN yöntemi az gürültülü görüntülerde başarılı sonuçlar elde etmiştir. Gürültü seviyesi arttıkça FFDNet yöntemi daha başarılı sonuç elde etmeye başlamıştır [155]. Derin öğrenme yöntemleri ve geleneksel gürültü giderme yöntemlerinin gürültü giderme sonuçları Tablo 5'de gösterilmektedir.

**Tablo 5.** Farklı standart sapma ile ilave beyaz Gauss gürültüsü tarafından bozulmuş BSD68 görüntüsü üzerindeki gürültü giderme sonuçlarının karşılaştırılması [155]

Gürültü (dB)	BM3D	WNNM	DnCNN	FFDNet
15	31.07	31.37	<b>31.72</b>	31.62
25	28.57	28.83	<b>29.23</b>	29.19
50	25.62	25.87	26.23	<b>26.30</b>
75	24.21	24.40	<b>26.64</b>	24.78

Diğer bir çalışmada gürültü gidermede kullanılan geleneksel ve CNN yöntemlerinin PSNR değerlerine ve çalışma sürelerine göre daha geniş bir karşılaştırma yapılmıştır. Değişik gürültü giderme metodlarının Set12 veri setindeki farklı gürültü seviyelerine sahip görüntülerde gürültü giderme sonucu elde edilen PSNR (dB) değerleri Tablo 6'da gösterilmektedir [84].

**Tablo 6.** Set12 veri seti ile farklı gürültü seviyelerinde gürültü giderme sonucu elde edilen PSNR değerleri [84]

	Airplane	Barbara	Boat	C.man	Couple	House	Lena	Man	Monarch	Parrot	Peppers	Starfish	Ortalama
Gürültü	$\sigma = 15$												
BM3D [32]	31.07	33.10	32.13	31.91	32.10	34.93	34.26	31.92	31.85	31.37	32.69	31.14	32.37
WNNM [53]	31.39	<b>33.60</b>	32.27	32.17	32.17	35.13	34.27	32.11	32.71	31.62	32.99	31.82	32.70
EPLL [116]	31.19	31.38	31.93	31.85	31.93	34.17	33.92	32.00	32.10	31.42	32.64	31.13	32.14
CSF [117]	31.33	31.92	32.01	31.95	31.98	34.39	34.06	32.08	32.33	31.37	32.85	31.55	32.32
TNRD [110]	31.46	32.13	32.14	32.19	32.11	34.53	34.24	32.23	32.56	31.63	33.04	31.75	32.50
ECNDNet [114]	31.70	32.41	32.37	32.56	32.39	34.97	34.52	32.39	33.11	31.82	33.25	32.17	32.81
DnCNN [69]	31.70	32.64	32.42	32.61	32.47	34.97	34.62	32.46	33.09	31.83	33.30	32.20	32.86
PSN-K [118]	31.75	32.64	<b>32.52</b>	32.58	32.43	35.04	34.62	32.39	33.11	31.89	33.23	32.17	32.86
PSN-U [118]	31.61	32.49	32.41	32.04	32.43	35.03	34.56	32.37	32.93	31.62	33.21	31.94	32.72
CIMM [112]	31.77	32.74	32.44	32.61	32.52	35.21	34.69	32.50	33.33	<b>32.01</b>	33.21	<b>32.35</b>	32.95
IRCNN [119]	31.70	32.43	32.34	32.55	32.40	34.89	34.53	32.40	32.82	31.84	33.31	32.02	32.77
FFDNet [113]	31.57	32.54	32.38	32.43	32.46	35.07	34.62	32.41	32.66	31.81	33.25	31.99	32.77
BRDNet [111]	31.85	32.93	32.55	<b>32.80</b>	<b>32.62</b>	<b>35.27</b>	<b>34.75</b>	<b>32.50</b>	<b>33.35</b>	32.00	33.47	32.24	<b>33.03</b>
ADNet [115]	<b>31.86</b>	32.80	32.57	32.81	32.58	35.22	34.71	32.47	33.17	31.96	<b>33.49</b>	32.17	32.98
Gürültü	$\sigma = 25$												
BM3D [32]	28.42	30.71	29.90	29.45	29.71	32.85	32.07	29.61	29.25	28.93	30.16	28.56	29.97
WNNM [53]	28.69	31.24	30.03	29.64	29.82	33.22	32.24	29.76	29.84	29.15	30.42	29.03	30.26
EPLL [116]	28.61	28.61	29.74	29.26	29.53	32.17	31.73	29.66	29.39	28.95	30.17	28.51	29.69
CSF [117]	28.72	29.03	29.76	29.48	29.53	32.39	31.79	29.71	29.62	28.90	30.32	28.80	29.84
TNRD [110]	28.88	29.41	29.91	29.72	29.71	32.53	32.00	29.87	29.85	29.18	30.57	29.02	30.06
ECNDNet [114]	29.07	29.84	30.14	30.11	30.03	33.08	32.38	30.03	30.30	29.38	30.85	29.43	30.39
DnCNN [69]	29.13	30.00	30.21	30.18	30.12	33.06	32.44	30.10	30.28	29.43	30.87	29.41	30.43
PSN-K [118]	<b>29.28</b>	30.17	30.31	30.28	30.18	33.26	32.57	30.10	30.30	29.38	31.01	29.57	30.53
PSN-U [118]	29.06	29.94	30.25	29.79	30.12	33.23	32.45	30.05	30.17	29.25	30.90	29.30	30.38
CIMM [112]	29.23	30.29	30.30	30.26	30.24	<b>33.44</b>	<b>32.66</b>	<b>30.18</b>	<b>30.62</b>	29.61	30.87	<b>29.77</b>	<b>30.62</b>
IRCNN [119]	29.12	29.92	30.17	30.08	30.08	33.06	32.43	30.04	30.09	29.47	30.88	29.27	30.38
FFDNet [113]	29.04	30.01	30.25	30.10	30.20	33.28	32.57	30.11	30.08	29.44	30.93	29.32	30.44
BRDNet [111]	29.20	<b>30.34</b>	30.33	<b>31.39</b>	<b>30.28</b>	33.41	32.65	30.14	30.50	<b>29.55</b>	<b>31.04</b>	29.46	30.61
ADNet [115]	29.17	30.25	<b>30.37</b>	30.34	30.24	33.41	32.61	30.08	30.39	29.49	<b>31.14</b>	29.41	30.58
Gürültü	$\sigma = 50$												
BM3D [32]	25.10	27.22	26.78	26.13	26.46	29.69	29.05	26.81	25.82	25.90	26.68	25.04	26.72
WNNM [53]	25.42	<b>27.79</b>	26.97	26.45	26.64	30.33	29.25	26.94	26.32	26.14	26.95	25.44	27.05
EPLL [116]	25.31	24.83	26.74	26.10	26.30	29.12	28.68	26.79	25.94	25.95	26.80	25.12	26.47
CSF [117]	25.56	25.24	27.03	26.37	26.67	29.64	29.32	27.06	26.26	26.12	26.68	25.43	26.78
TNRD [110]	25.59	25.70	26.94	26.62	26.50	29.48	28.93	26.98	26.31	26.16	27.10	25.42	26.81
ECNDNet [114]	25.79	26.26	27.16	27.07	26.84	30.12	29.29	27.11	26.82	26.32	27.30	25.72	27.15
DnCNN [69]	25.87	26.22	27.20	27.03	26.90	30.00	29.39	27.24	26.78	26.48	27.32	25.70	27.18
PSN-K [118]	25.90	26.45	27.20	27.10	27.09	30.34	29.54	27.21	26.92	26.56	27.40	<b>25.84</b>	27.30
PSN-U [118]	25.89	26.56	27.27	27.21	27.04	30.21	29.54	27.23	26.93	26.62	27.53	25.63	27.31
CIMM [112]	<b>26.06</b>	26.62	27.36	<b>27.25</b>	<b>27.24</b>	<b>30.70</b>	29.65	27.26	<b>27.21</b>	26.53	27.54	26.05	<b>27.46</b>
IRCNN [119]	25.89	26.24	27.17	26.88	26.88	29.96	29.40	27.17	26.61	26.55	27.33	25.57	27.14
FFDNet [113]	25.89	26.45	27.33	27.05	27.08	30.37	29.66	<b>27.29</b>	26.81	26.57	27.54	25.75	27.32
BRDNet [111]	25.93	26.85	<b>27.38</b>	27.44	27.17	30.53	<b>29.73</b>	27.27	26.97	<b>26.66</b>	27.67	25.77	27.45
ADNet [115]	25.88	26.64	27.35	27.31	27.07	30.59	29.59	27.17	26.90	26.56	<b>27.69</b>	25.70	27.37

CNN yöntemleri gerçek görüntü ve gürültülü görüntü çiftlerini kullanarak model oluşturulmaktadır. Gerçek hayatta bu görüntü çiftlerini elde etmek her zaman mümkün olmamaktadır. GAN yöntemleri görüntülerde gürültü giderme için kullanılarak öncelikle gürültü tahmini yapılmakta, sonrasında orijinal görüntü elde edilmeye çalışılmaktadır. GAN yöntemleri hem gürültü giderme hem de görselin yüksek çözünürlükteki detaylarını koruma ve boyutlarını artırma çalışmalarında başarılı sonuçlar elde etmektedir [156].

Elde edilen sonuçlara göre her gürültü seviyesinde farklı yöntemlerin başarılı olduğu görülmektedir. Görüntü boyutu arttıkça gürültü giderme yöntemlerinin işlem süreleri de artmaktadır. Derin öğrenme yöntemleri kullanılarak geleneksel yöntemlere göre daha iyi sonuçlar elde edilmekte ancak gerçek görüntü çiftleri olmadan bazı derin öğrenme yöntemleri başarılı sonuçlar elde edememektedir. Yapılan araştırmalar deneylerin toplamsal beyaz Gauss gürültüsü durumuna odaklandığını göstermektedir. Yapılan çalışmalar görüntülerdeki gürültü seviyesi arttıkça, gürültü giderme sonucu elde edilen görüntünün orijinaline olan yakınlığının da azaldığını göstermektedir.

## VI. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu makalede görüntülerde gürültü giderme aşamasında uygulanan derin öğrenme yöntemleri ile geleneksel yöntemlerden bahsedilip, bu yöntemler arasında kıyaslama yapılmıştır. Görüntü üzerindeki gürültü karmaşıklığı ve bu gürültüleri hızlı ve doğru şekilde giderme ihtiyacı sebebiyle bu alandaki araştırmalar halen devam etmektedir. Geleneksel gürültü giderme yöntemleri kısa sürede gürültüleri giderebilmekte olup, elde edilen görüntülerdeki kenarlar ve dokular daha düz hale gelmektedir.

Derin öğrenme yöntemleri kullanılarak yapılan gürültü giderme çalışmalarında farklı gürültü türlerinde tek bir derin öğrenme yönteminin başarılı olmadığı, farklı gürültü seviyeleri, farklı görüntüler ve farklı çözünürlüklü görüntüler için farklı derin öğrenme yöntemlerinin başarılı olduğu görülmüştür.

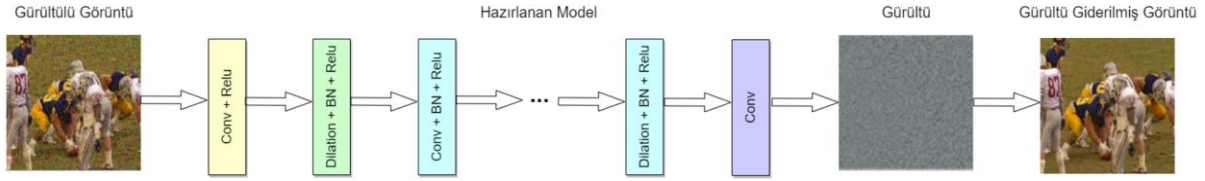
Ek beyaz gauss gürültüsünün giderilmesi konusunda birçok çalışma yapılmış olup, gerçek görüntülerdeki gürültünün karmaşıklığı ve orijinal görüntülerin olmaması nedeniyle görüntüler üzerinde doğru karşılaştırmalar yapılamamaktadır. Daha derin bir mimariye sahip ağlar, görüntü gürültü giderme sırasında daha iyi sonuçlar elde etmektedir. Bununla birlikte, daha derin ağlar daha fazla bellek tüketmekte, bu da aşırı uyum ve kaybolan eğitim sorununa neden olmaktadır. Tüm bu olumsuz yönlerin yanında gürültü giderme probleminde en başarılı sonuçlar CNN ve GAN yöntemleri ile elde edilmektedir.

### 6.1. CNN Mimarisinde Gürültü Giderme Sonucunu Olumlu Etkileyen Teknikler

Kullanım kolaylığı, daha az kaynak tüketimi ve değişken gürültü türlerine uyarlanabilir oldukları için yapay sinir ağları görüntülerde gürültü azaltmak için tercih edilmektedir. Oluşturulan evrimsel sinir ağlarında aşağıdaki tekniklerin kullanılması mimarilerin başarısını olumlu yönde etkilediği görülmüştür:

1. Alıcı alanı genişletmek, daha fazla bağlam bilgisi yakalayabilir. Alıcı alanın genişletilmesi, ağların derinliği ve genişliği artırılarak gerçekleştirilebilir. Ancak bu, daha yüksek hesaplama maliyetleri ve daha fazla bellek tüketimi gerektirmektedir. Bu sorunu çözmek için daha fazla uç bilgi sağlamada etkili olan genişletilmiş evrimsel kullanılmaktadır.
2. Seçilen kayıp fonksiyonu eğitim zamanını etkilemektedir. Seçilecek kayıp fonksiyonu eğitim süresini kısaltacak şekilde tercih edilmelidir.
3. Derin ağlar daha iyi gürültü giderimi sağladığı için, derin ağlar kullanılarak, ağlardaki performansı artırmak için de artık ağlar tercih edilmektedir.
4. CNN mimarisi içinde diğer tekniklerin koyulması daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. U-net ağının içine dalgacık dönüşümünün kullanılması bu tür kullanıma bir örnektir.
5. Eğitim verileri kullanılarak sanal verilerin oluşturulması daha fazla veri ile eğitim yapılmasını sağlamaktadır. Sanal eğitim verileri; eğitim verilerinin yatay ve dikey döndürülmesi, renklerin değiştirilmesi ile üretilebilmektedir.
6. Geleneksel yöntemler ile derin öğrenme yöntemlerinin beraber kullanılması video üzerinde gürültü giderme başarısını olumlu yönde etkilemektedir.

Literatür çalışmaları sonucu elde edilen bulgular, DnCNN yöntemi üzerinde uygulanarak yeni bir gürültü giderme modeli geliştirilmiştir. Elde edilen yeni model ile DnCNN yönteminin gürültü giderme başarısı kıyaslanmıştır. DnCNN yönteminin CBSD400 veri setindeki 180x180 boyutundaki görüntüler kullanılarak model eğitilmiştir. Oluşturulan modelde alıcı alan genişleterek daha fazla uç bilgi sağlanmıştır. Kayıp fonksiyonu DnCNN yöntemi ile aynı seçilmiş, DnCNN yönteminden daha derin bir ağ oluşturulmuştur. CBSD400 eğitim veri seti kullanılarak sanal verilerin oluşturulması sonucu daha fazla veri ile eğitim yapılmasını sağlanmıştır. Eğitim verisi artırılarak aynı model üzerinde yapılan çalışmada modelin artırılmış veri üzerinde daha iyi öğrenme sağladığı kayıp değerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Hazırlanan modele ait mimari Şekil 26'da gösterilmektedir.



Şekil 26. Yeni oluşturulan yöntemin mimarisi

Hazırlanan Gürültü giderme yöntemi 19 katmandan oluşmaktadır. İlk katman Conv+Relu, ikinci katman Dilation+BN+Relu, 3 ve 18. Katmanlar Conv+Bn+Relu, 19. Katman Conv katmanından oluşmaktadır. Çizelge 7’de model katmanları gösterilmektedir.

**Tablo 7.** Hazırlanan Gürültü giderme yöntemi katmanları

Katman No	Model
1	conv + relu
2	dilation + bn + relu (1)
3 ... 18	conv + bn + relu (16)
19	conv (1)

Tablo 8’de hazırlanan gürültü giderme yöntemi ile DnCNN yönteminin CBSD68 test veri setindeki 180x180 boyutundaki görüntüler kullanılarak gürültü giderme sonucu elde edilen ölçüm değerleri gösterilmektedir. Elde edilen yeni modelin DnCNN yöntemine göre daha başarılı sonuçlar elde ettiği görülmüştür.

**Tablo 8.** Hazırlanan Gürültü giderme yöntemi ile DnCNN yönteminin CBSD400 veri setindeki görüntüler kullanılarak CBSD68 test veri setindeki gürültüleri giderme sonucu elde edilen ölçüm değerleri

Yöntem	Eğitim Verisi Sayısı	Katman Sayısı	PSNR (dB)	SSIM
DnCNN	400	17	24.95	0.76
DnCNN	400	19	25.75	0.80
Yeni Model	400	19	26.76	0.85
<b>Yeni Model</b>	480	19	<b>26.89</b>	<b>0.86</b>

## VII. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Gürültü gidermede, gürültü giderme sonrası artık görüntülerin olmaması ve görüntünün düzgün özellikler ve kenarlar gibi niteliklerinin korunması önemli konulardır. Geleneksel yöntemlerden uzamsal alan yöntemleri kenarları korumada başarılı sonuçlar elde etmekte ancak düşük kontrastlı ayrıntıları korumada daha az başarılı olmaktadır. Alan dönüşüm yöntemleri kenarlardan çok düşük kontrastlı ayrıntıları koruyabilmektedir [157]. Önemli bilgileri koruyabilen çok sayıda uzamsal ve alan dönüşüm yöntemi filtreleri geliştirilmiş, ancak gürültü katsayıları arttıkça, artık gürültü kalıntıları oluşmakta ve gürültü giderme performansları azalmaktadır [158]. Derin öğrenmeye dayalı çalışmalarda farklı gürültü

türleri ve farklı görüntü çözünürlüklerinde tek bir derin öğrenme yönteminin başarı elde edemediği gözlenmiş olup, farklı gürültü seviyeleri ve farklı çözünürlükteki görüntüler için farklı derin öğrenme yöntemlerinin başarılı olduğu görülmektedir. İlave beyaz gauss gürültüsünün giderilmesiyle ilgili birçok derinlemesine araştırma yapılmasına rağmen, gerçek görüntülerdeki gürültünün karmaşıklığı ve orijinal görüntüye sahip olunmaması nedeniyle, kıyaslama yapılamamakta, gerçek görüntüde gürültü giderme üzerine yapılan çalışmalar sınırlı kalmaktadır. Gürültü giderimi sırasında daha derin mimariye sahip ağlar, daha başarılı sonuçlar elde etmektedir. Ancak daha derin ağlar, daha fazla bellek kaynağı harcamakta, aşırı öğrenme ve kaybolan eğim sorunları ortaya çıkmaktadır. İlave beyaz gauss gürültüleri gerçek hayattaki gürültüleri örnekleyememekte, bu ise yetersiz eğitim verilerini ortaya çıkarmaktadır.

Görüntüleme sistemindeki gürültü modeli çok karmaşık olduğundan ve yüksek kaliteli görüntüden gerçek gürültülü görüntünün sentezlenmesi zorlu bir problemdir. Ağ eğitimi gürültüden arındırmak için eşleştirilmemiş gürültülü ve temiz görüntülerden nasıl yararlanılacağı hala açık bir sorundur. [159]

Derin öğrenme yöntemleri geri beslemeli ağlar sayesinde kayıp değerlerini en aza indirebilmek için istatistiksel hesaplamalar yaparak orijinal görüntüyü elde etmeye çalışmaktadır. Kayıp fonksiyonları gürültü giderme ağlarının davranışını büyük ölçüde etkilediğinden, insan görsel sistemine iyi uyum iyi bir kayıp fonksiyonu bulmak önemli bir araştırma konusudur.

Gelecekteki çalışmalarda, gerçek hayattaki görüntülerde var olan gürültülerin nasıl giderileceği araştırılarak, derin öğrenme modellerinin, orijinal görüntü çiftlerine sahip olmadan eğitilmesi üzerine çalışmaların yapılması gerekmektedir. Geliştirilecek olan derin öğrenme mimarilerinin, kullanılan sistem kaynakları, eğitim süresi ve orijinal görüntüye olan yakınlık kriterleri göz önünde bulundurularak, çeşitli gürültü seviyelerinde de başarılı değerler elde etmesi gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Abiri, N., Linse, B., Edén, P., Ohlsson, M. (2019). Establishing strong imputation performance of a denoising autoencoder in a wide range of missing data problems, *Elsevier*, 137-146.

- [2] Zhou, C., Paenroth, R. (2017). Anomaly Detection with Robust Deep Autoencoders, *ACM KDD*, 13-17 Ağustos, Halifax, NS, Canada, 665-674.
- [3] Wen, B., Ravishankar, S., Bresler, Y. (2017). VIDOSAT: High-dimensional Sparsifying Transform Learning for Online Video Denoising, *IEEE Transactions on Image Processing*, 28(4), 1691-1704.
- [4] Chang, Y. (2019). Research on demotion blur image processing based on deep learning, *J. Vis. Commun. Image R. Elsevier*, 60, 371–379.
- [5] Erol A., Gürbüz M., Gangal, A. (2016). Video Görüntülerindeki Periyodik Gürültülerin Yok Edilmesi, *Researchgate*, 535-537.
- [6] Gondara, L. (2016). Medical image denoising using convolutional denoising autoencoders, *IEEE 16th International Conference on Data Mining Workshops*, 12-15 Aralık, Barselona, 241-246.
- [7] Hawwar, Y., Reza, A. (2002). Spatially adaptive multiplicative noise image denoising technique, *IEEE Transactions on Image Processing*, 11(12), 1397-1404.
- [8] Bioucas-Dias, J. M., Figueiredo, M. A. T., (2010). Multiplicative Noise Removal Using Variable Splitting and Constrained Optimization, *IEEE Transactions on Image Processing*, 19(7), 1720-1730
- [9] Bovik, A. (2000). *Handbook of Image and Video Processing*, Academic Press, Kanada, 330-331.
- [10] Leysa, C., Ley, C., Klein, O., Bernard, P., Licata, L. (2013). Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median, *Journal of Experimental Social Psychology*, 49(4), 764-766.
- [11] Shin, DH., Park RH., Yang S., Jung JH. (2005). Block-based noise estimation using adaptive gaussian filtering, *IEEE Trans Consum Electron*, 51(1), 218–226.
- [12] Jolliffe, I. (2005). *Principal component analysis*, 2. Baskı. New York, Springer-Verlag.
- [13] Horé, A., Ziou, D. (2010). Image quality metrics: PSNR vs. SSIM, *20th International Conference on Pattern Recognition*, 2366-2369.
- [14] Liu, D., Li, D., Song, H. (2016). Image Quality Assessment Using Regularity of Color Distribution, *IEEE Access*, vol. 4, 4478-4483.
- [15] Pratt, W. K., (2007). *Digital Image Processing*, Fourth Edition, John Wiley & Sons Inc.
- [16] Proakis, J., Salehi, M. (2002). *Communication Systems Engineering*, Second Ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, 217-267.
- [17] Paonessa, S. (2021). Reducing Signal Noise in Practice. <https://www.predig.com/whitepaper/reducing-signal-noise-practice> (21.01.2021).
- [18] Kong, X. (2003). Removing Periodic Noise in F-wave: A Dynamic Notch Filter Approach, *Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, 17-21 Eylül, Cancun, Meksika, 2503-2506.
- [19] Diwakar, M., Kumar, M. (2018). A review on CT image noise and its denoising, *Biomed Signal Process Control*, Nisan, Dehradun, 73–88.
- [20] Weizheng, X., Chenqi, X., Zhengru, J., Yueping, H. (2020). Digital Image Denoising Method Based on Mean Filter, *International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA)*, 857-859.
- [21] Tania, S., Rowaida, R. (2016). A Comparative Study of Various Image Filtering Techniques for Removing Various Noisy Pixels in Aerial Image, *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 9(3), 113-124.
- [22] Pratt, W. K. (1972). Generalized Wiener Filtering Computation Techniques, *IEEE Transactions on Computers*, C-21(7), 636-641.
- [23] Lee, Y., Kassam, S. (1985). Generalized median filtering and related nonlinear filtering techniques, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 33(3), 672-683.
- [24] Yin, L., Yang, R., Gabbouj, M., Neuvo, Y. (1996). Weighted median filters: a tutorial, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II Analog and Digital Signal Processing*, 43(3), 157-192.
- [25] Tomasi, C., Manduchi R. (1998). Bilateral filtering for gray and color images, *Sixth international conference on computer vision IEEE*, 7 Ocak, Bombay, India, 839–846.
- [26] Estrela V. V., Magalhães, H. A., Saotome, O. (2016). Total Variation Applications in Computer Vision, arXiv:1603.09599.
- [27] Rudin, L., Osher, S., Fatemi, E. (1992). Nonlinear Total Variation based Noise Removal Algorithms, *Physica D*, vol 60, 259–268.
- [28] Esedoglu, S., Osher, S. (2004). Decomposition of Images by the Anisotropic Rudin-Osher-Fatemi Model. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, vol 57, 1609–1626.
- [29] Chambolle, A., Caselles, V., Novaga, M., Cremers, D., Pock, T. (2009). An introduction to Total Variation for Image Analysis, *Radon Series Comp. Appl. Math*, 9, 263–340
- [30] Chan, T. F., Esedoglu, S., Park, F., Yip, A. (2004). Recent developments in total variation image restoration, *Mathematical Models of Computer Vision*, CAM Report 05-01, Department of Mathematics, UCLA.
- [31] Buades, A., Coll, B., Morel, J. M. (2005). A non-local algorithm for image denoising, *IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition*, San Diego, 2(2), 60–65.

- [32] Dabov, K., Foi, A., Katkovnik, V., Egiazarian, K. (2007). Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering, *IEEE Transactions on Image Processing*, 16(8), 2080-2095.
- [33] Mäkinen, Y., Azzari, L., Monge, E., Maggioni, M., Danielyan, A., Dabov, K., Foi, A., Katkovnik, V., Egiazarian, K. (2019). Image and video denoising by sparse 3D transform-domain collaborative filtering. <https://www.cs.tut.fi/~foi/3D-DFT/> (21.02.2021).
- [34] Dabov, K., Foi, A., Katkovnik, V., Egiazarian, K. (2009). BM3D image denoising with shape-adaptive principal component analysis, Signal processing with adaptive sparse structured representations, *SPARS'09- Signal Processing with Adaptive Sparse Structured Representations*, Saint Malo, France, DOI: 10.1109/TIP.2018.2865684.
- [35] Dabov, K., Foi, A., Katkovnik, V., Egiazarian, K. (2006). Image denoising with block-matching and 3D filtering, *Proceedings of SPIE*, 6064, 354-365.
- [36] Makkar, H., Lamba, O. (2017). An Improved VBM3D Filtering Technique for Removal Noise in Video Signals, *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, *ResearchGate*, 4(8), 584-591.
- [37] Maggioni, M., Boracchi, G., Foi, A., Egiazarian, K. (2012). Video denoising, deblocking, and enhancement through separable 4-D nonlocal spatiotemporal transforms, *IEEE Transactions on Image Processing*, 21(9), 3952–3966.
- [38] Khawase, S., Kamble, S., Thakur, N., Patharkar, A. (2017). An Overview of Block Matching Algorithms for Motion Vector Estimation, *Intelligent and Computing in Engineering*, Vol. 10 ISSN 2300-5963c, 217–222.
- [39] Delon, J., Houdard, A. (2018). Gaussian Priors for Image denoising, Bertalmío, Marcelo, *Denoising of Photographic Images and Video Fundamentals, Open Challenges and New Trends*, Advances in Computer Vision and Pattern Recognition book series (ACVPR), Springer.
- [40] Russel, S., Norvig, P. (2010). *Artificial Intelligence A Modern Approach*, Third Edition, Pearson Education.
- [41] Wright, J., Yang A. Y., Ganesh A., Sastry S. S., Ma, Y. (2009). Robust face recognition via sparse representation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 31(2), 210-227.
- [42] Deng, W., Hu, J., Guo, J. (2012). Extended SRC: Undersampled face recognition via intraclass variant dictionary, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 34(9), 1864-1870.
- [43] Zhang, L., Zhou, W. (2009). On the sparseness of 1-norm support vector machines, *Neural Networks*, 23(3), 373-385.
- [44] Gao, S., Tsang, I.W.H., Chia, L. T. (2010). Kernel sparse representation for image classification and face recognition, *11th Eur. Conf. Comput. Vis.*, 6314, 1-14.
- [45] Xu, S., Yang, X., Jiang, S. (2017). A fast nonlocally centralized sparse representation algorithm for image denoising, *Signal Processing*, Volume 131, 99-112.
- [46] Ji, H., Liu, C. Q., Shen, ZW., Xu, Y. H. (2010). Robust video denoising using low rank matrix completion, *IEEE computer vision and pattern recognition*, San Francisco, 1791–1798.
- [47] Gu, S. H., Xie, Q, Meng, D. Y, Zuo, W. M, Feng, X. C., Zhang, L. (2017). Weighted nuclear norm minimization and its applications to low level vision, *Int J Comput Vis*, 121(2), 183–208.
- [48] Ji, H., Huang, S. B., Shen, Z. W., Xu, Y. H. (2011). Robust video restoration by joint sparse and low rank matrix approximation, *SIAM J Imaging Sci*, 4(4), 1122–1142.
- [49] Fan, L., Zhang, F., Fan, H. (2019). Brief review of image denoising techniques, *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, 2(7).
- [50] Şeker, Ş. (2008). Tekil Değer Ayrışımı. <http://bilgisayarkavramlari.com/2008/12/29/tekil-deger-ayrisimi-singular-value-decomposition/>, (21.01.2021).
- [51] Hornick, M. (2016). Using SVD for Dimensionality Reduction. <https://blogs.oracle.com/r/using-svd-for-dimensionality-reduction>, (01.02.2021).
- [52] Aharon, M., Elad, M., Bruckstein, A. (2006). K-SVD: An Algorithm for Designing Overcomplete Dictionaries for Sparse Representation, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 54(11), 4311-4322.
- [53] Gu, S., Zhang, L., Zuo, W. Feng, X. (2014). Weighted nuclear norm minimization with application to image denoising, *2014 IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, Columbus, 2862–2869.
- [54] Mallat, S. (1998). *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, San Diego.
- [55] Bhuiyan, M., Ahmad, M., Swamy, M. (2008). Wavelet-based image denoising with the normal inverse Gaussian prior and linear MMSE estimator, *1st Image Processing*, volume 2, 203-217.
- [56] Hyvarinen, A., Oja, E., Hoyer, P., Hurri, J. (1998). Image feature extraction by sparse coding and independent component analysis, *IEEE 14th international conference on pattern recognition*, Brisbane, 1268–1273.
- [57] Nigam, V., Luthra, S., Bhatnagar, S. (2010). A Comparative Study of Thresholding Techniques for Image Denoising, *International Conference on Computer and Communication Technology*, Allahabad, 173-176.
- [58] Donoho, D. L., Johnstone, I. M. (1995). Adapting to unknown smoothness via wavelet

- shrinkage, *Journal of the American Statistical Association*, 90(432), 1200-1224.
- [59] Donoho, D. L. (1995). Denoising by soft-thresholding, *IEEE Trans. Information Theory*, 41(3), 613-627.
- [60] Biswas, M., Om, H. (2012). A New Soft-Thresholding Image Denoising Method, 2nd International Conference on Communication, Computing & Security [ICCCS-2012], 6, 10-15.
- [61] Chang, S. G., Yu, B., Vetterli, M. (2000). Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression, *IEEE Transactions on Image Processing*, 9(9), 1532-1546.
- [62] Starck, J., Fadili, J., Murtagh, F. (2007). The Undecimated Wavelet Decomposition and its Reconstruction, *IEEE Transactions On Image Processing*, 16(2).
- [63] Starck, J. L., Elad, M., Donoho, D. L. (2004). Redundant multiscale transforms and their application for morphological component analysis, *Adv. Imag. Electron Physics*, 287-348.
- [64] Barbero, M., Hofmann, H., Wells, N. (1991). DCT source coding and current implementations for HDTV, *EBU Technical Review*.
- [65] Lukin, V. V., Fevraleev, D. V., Nikolay, N., Abramov, S. (2010). Astola Discrete cosine transform-based local adaptive filtering of images corrupted by nonstationary noise, *Journal of Electronic Imaging*, 19(2).
- [66] Kim, J., Lee, J. K., Lee, K. M. (2016). Accurate image super-resolution using very deep convolutional networks, *IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 27-30 Haziran, Las Vegas, 1646-1654.
- [67] Wang, X., Chan, K., Yu, K., Dong, C., Loy, C. C. (2019). EDVR: Video restoration with enhanced deformable convolutional networks, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 1954-1963.
- [68] Lefkimmiatis, S. (2018). Universal denoising networks: A novel cnn architecture for image denoising, *CVPR*, 3204-3213.
- [69] Zhang, K., Zuo, W., Chen, Y., Meng, D., Zhang L. (2017). Beyond a Gaussian Denoiser: Residual Learning of Deep CNN for Image Denoising, *IEEE Transactions on Image Processing*, 26(7), 3142-3155.
- [70] Lehtinen, J., Munkberg, J., Hasselgren, J., Laine, S., Karras, T., Aittala, M., Aila, T. (2018). Noise2Noise: Learning image restoration without clean data, *ICML*, volume 80, 2965-2974.
- [71] Batson, J., Royer, L. (2019). Noise2self: Blind denoising by self-supervision, *arXiv:1901.11365*
- [72] Krull, A., Buchholz, T., Jug, F. (2019). Noise2void - learning denoising from single noisy images, *CVPR*, arXiv:1811.10980.
- [73] Alimovskia, E., Erdemira, G. (2021). Veri Artırma Tekniklerinin Derin Öğrenmeye Dayalı Yüz Tanıma Sisteminde Etkisi, *İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3(1): 76-80.
- [74] Fabio, P., Christina, V., Sandra, A., Eduardo, V. (2018). Data augmentation for skin lesion analysis, *ISIC skin image analysis workshop and challenge*, MICCAI.
- [75] Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L. J., Li, K., Fei-Fei, L. (2009). ImageNet: A Large-Scale Hierarchical Image Database, *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.
- [76] LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition, *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278-2324.
- [77] Szandala, T., (2020). Review and comparison of commonly used activation functions for deep neural networks, *Bio-inspired Neurocomputing*, 903, 203-224.
- [78] Ahn, H., Rhee, S. B. (2015). Research of Object Recognition and Tracking Based on Feature Matching, Park J., Stojmenovic I., Jeong H., Yi G. (eds) Computer Science and its Applications, Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 330, Springer, Berlin, Heidelberg, 1071-1076.
- [79] Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G. E. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks, *Advances, Neural Information Processing Systems*, Kasım 2012, NY United States, 1097-1105.
- [80] Nair, V., Hinton, G. E. (2010). Rectified linear units improve restricted boltzmann machines, *27th international conference on machine learning*, Haziran 2010, Haifa, Israel, 807-814.
- [81] Simonyan, K., Zisserman, A. (2014). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition, *arXiv:1409.1556*.
- [82] Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., Erhan, D., Vanhoucke, V., Rabinovich, A. (2015). Going deeper with convolutions, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Boston, USA, 1-9.
- [83] Lin, M., Chen, Q., Yan, S. (2013). Network in network, *Neural Computing and Applications*, *Journal of Computer and Communications*, 8(11), arXiv:1312.4400.
- [84] Chunwei, T., Lunke, F., Wenxian, Z., Yong, X., Wangmeng, Z., Chia-Wen L. (2020). Deep Learning on Image Denoising: An Overview, *Neural networks: the official journal of the International Neural Network Society*, 251-275. arXiv:1912.13171.
- [85] He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition, *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 27-30 Haziran, Las Vegas, NV, USA, 770-778.

- [86] Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., Bengio, Y. (2014). Generative Adversarial Networks, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 3(11), arXiv:1406.2661.
- [87] Tran, L., Yin, X., Liu, X. (2017). Disentangled representation learning gan for pose-invariant face recognition, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1415–1424.
- [88] Li, Y., Li, Z., Kejun, K. (2013). A novel image restoration method assisted by reference image in dual-energy CT, *2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, 1-4, DOI: 10.1109/NSSMIC.2013.6829279.
- [89] Wu, Y., Zhao, W., Zhang, Q. (2013). The improvement of audio noise reduction system based on LMS algorithm, *2013 International Conference on Computer Sciences and Applications*, 590-594.
- [90] LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. (2015). Deep learning, *Nature*, 521(7553), 436-444.
- [91] Ha, V. K., Ren, J., Xu, X., Zhao, S., Xie, G., Vargas, V. M. (2018). Deep Learning Based Single Image Super-Resolution: A Survey, *Advances in Brain Inspired Cognitive Systems BICS 2018*, Springer, vol 10989.
- [92] Guo, S., Yan, Z., Zhang, K., Zuo, W., Zhang, L. (2019). Toward convolutional blind denoising of real photographs, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 16-20 Haziran, CA, USA, 1712–1722.
- [93] Liu, H., Ruan, Z., Zhao, P., Dong, C., Shang, F., Liu, Y., Yang, L. (2020). Video Super Resolution Based on Deep Learning: A Comprehensive Survey, *Computer Science, Computer Vision and Pattern Recognition*, arXiv:2007.12928.
- [94] Farooque, M. A., Rohankar, J. S. (2013). Survey on various noises and techniques for denoising the color image, *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM)*, 2(11), 217–221.
- [95] Tian, C., Xu, Y., Fei, L., Yan, K. (2019). Deep Learning for Image Denoising: A Survey, *ICGEC 2018 Advances in Intelligent Systems and Computing*, Singapore, vol 834.
- [96] Jeon, W., Jeong, W., Son, K., Yang, H. (2018). Speckle noise reduction for digital holographic images using multi-scale convolutional neural networks, *Optics Letters*, 43(17), 4240–4243.
- [97] Liu, S., Deng, W. (2015). Very deep convolutional neural network based image classification using small training sample size, *IAPR Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR)*, 730-734.
- [98] Yu, F., Koltun, V., Funkhouser, T. (2017). Dilated residual networks, *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2017). arXiv: 1705.09914.
- [99] Chen, C., Xiong, Z., Tian, X., Wu, F. (2018). Deep boosting for image denoising, *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 4-8 Eylül, Munich, Germany, 3–18.
- [100] Tai, Y., Yang J., Liu, X. (2017). MemNet: a persistent memory network for image restoration, *IEEE Int. Conf. on Computer Vision (ICCV 2017)*, Venice, Italy, 4539–4547.
- [101] Liu, P., Zhang, H., Zhang, K., Lin, L., Zuo, W. (2018). Multi-level wavelet-cnn for image restoration, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 18-22 Haziran, Salt Lake City, Utah, 773–782.
- [102] Zhao, Y. Q., Yang, J. (2015). Hyperspectral image denoising via sparse representation and low-rank constraint, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(1), 296–308.
- [103] Bui A. T., Im, J. K., Apley, D. W., Runger G. C. (2019). Projection-free kernel principal component analysis for denoising, *Elsevier Neurocomputing*, 357, 163-176.
- [104] Cha, S., Park, T., Kim, B., Baek, J., Moon, T. (2021). GAN2GAN: Generative Noise Learning for Blind Denoising with Single Noisy Images, *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
- [105] Luo, Z., Chen, S., Qian, Y. (2019). A Deep Optimization Approach for Image Deconvolution, *Computer Vision and Pattern Recognition*, arXiv:1904.07516.
- [106] Wang, T., Sun, M., Hu, K. (2018). Dilated deep residual network for image denoising, *International Conference on Tools with Artificial Intelligence, ICTAI*, 6-8 Kasım, Boston, 1272-1279.
- [107] Chen, Y., Pock, T. (2016). Trainable nonlinear reaction diffusion: A flexible framework for fast and effective image restoration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(6), 1256-1272.
- [108] Lai, W. S., Huang J. B., Ahuja, N., Yang M. H. (2017). Deep Laplacian Pyramid Networks for Fast and Accurate Super-Resolution, *30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 21-26 Haziran, Honolulu, 5835-5843.
- [109] Tian, C., Xu, Y., Zuo, W. (2020). Image denoising using deep cnn with batch renormalization, *Neural Networks*, 121, 461–473.
- [110] Anwar, S., Huynh, C. P., Porikli, F. (2017). Chaining identity mapping modules for image denoising, arXiv:1712.02933.
- [111] Anandbabu, G., Merajothu, N., Kirankumar, G. (2018). Convolutional neural network based image denoising for better quality of images. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7, 356-361.



- [112] Shi, W., Caballero, J., Huszar, F., Totz, J., Aitken, A., Bishop, R., Rueckert, D., Wang, Z. (2016). Real-Time Single Image and Video Super-Resolution Using an Efficient Sub-Pixel Convolutional Neural Network, *IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 27-30 Haziran, Las Vegas, 1874-1883.
- [113] Tian, C., Xu, Y., Fei, L., Wang, J., Wen, J., Luo, N. (2019). Enhanced cnn for image denoising, *CAAI Transactions on Intelligence Technology*, 4(1), 17–23.
- [114] Tian, C., Xu, Y., Li, Z., Zuo, W., Fei, L., Liu, H. (2020). Attention-guided cnn for image denoising, *Neural Networks*, 124, 117-129.
- [115] Zoran, D., Weiss, Y. (2011). From learning models of natural image patches to whole image restoration, *IEEE International Conference on Computer Vision*, 6-13 Kasım, Barcelona, 479–486.
- [116] Schmidt, U., Roth, S. (2014). Shrinkage fields for effective image restoration, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 24-27 Haziran, Columbus, 2774–2781.
- [117] Aljadaany, R., Pal, D. K., Savvides, M. (2019). Proximal splitting networks for image restoration, *International Conference on Image Analysis and Recognition*, Springer, 3-17.
- [118] Zhang, K., Zuo, W., Gu, S., Zhang, L. (2017). Learning deep cnn denoiser prior for image restoration, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 21-27 Haziran, Honolulu, 3929–3938.
- [119] Bengio, Y. (2009). Learning deep architectures for AI, *Foundations and Trends in Machine Learning*, 2(1), 1–127.
- [120] Patilab, S., Naik, G., Pai, R., Gad, R. (2018). Stacked Autoencoder for classification of glioma grade III and grade IV, *Biomedical Signal Processing and Control*, Elsevier, 46, 67-75.
- [121] Vincent, P., Larochelle, H., Bengio, Y., Manzagol, P. (2008). Extracting and Composing Robust Features with Denoising Autoencoders, *25th International Conference on Machine Learning*, Haziran, Helsinki, Finland, 1096–1103.
- [122] Chinner, H. (2015). Denoising AutoEncoders, <http://www.rubylab.io/2015/04/28/denoising-autoencoder-tutorial/>, (01.11.2020).
- [123] Harish, H. (2019). Denoising AutoEncoders, <https://medium.com/@harishr2301/denoising-autoencoders-996e866e5cd0>, (01.11.2020).
- [124] Liu, G., Bao, H., Han, B. (2018). A Stacked Autoencoder-Based Deep Neural Network for Achieving Gearbox Fault Diagnosis, *Mathematical Problems in Engineering*, DOI: 10.1155/2018/5105709
- [125] Jozdani, S., Johnson, B., Chen, D. (2019). Comparing Deep Neural Networks, Ensemble Classifiers, and Support Vector Machine Algorithms for Object-Based Urban Land Use/Land Cover Classification, *Remote Sens*, 11(14), 1713s.
- [126] Ng, A. (2018), Sparse autoencoder, CS294A Lecture notes, [https://web.stanford.edu/class/cs294a/sparseAutoencoder\\_2011new.pdf](https://web.stanford.edu/class/cs294a/sparseAutoencoder_2011new.pdf), (07.04.2021).
- [127] Kingma, D., Welling, M. (2019). An Introduction to Variational Autoencoders, *Foundations and Trends in Machine Learning*, 12(2019), 307-392.
- [128] Im D., Im, J., Ahn, S., Memisevic, R., Bengio, Y. (2017), Denoising Criterion for Variational Auto-Encoding Framework, AAAI Publications, *Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2059-2065.
- [129] Creswell, A., Bharath, A. A. (2018). Denoising Adversarial Autoencoders, *arXiv:1703.01220v4*.
- [130] Chena, X., Songa, L., Yanga, X. (2016). Deep RNNs for Video Denoising, *Applications of Digital Image Processing*, SPIE vol 9971.
- [131] Antczak, K. (2018). Deep Recurrent Neural Networks for ECG Signal Denoising, 9(1), *arXiv:1807.11551*, 135s.
- [132] Rajeev, R., Samath, J., Karthikeyan, N. (2019). An Intelligent Recurrent Neural Network with Long Short-Term Memory (LSTM) BASED Batch Normalization for Medical Image Denoising, *Journal of Medical Systems*, Springer Science, 43(8), 234s.
- [133] Cho, K. (2013). Boltzmann Machines for Image Denoising, *Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN*, Springer, 10-13 Eylül, Sofia, 611-618.
- [134] Hinton, G. E., Salakhutdinov, R. R. (2006). Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks, *Science*, 313(5786), 504–507.
- [135] Keyvanrad, M., Pezeshki, M., Homayounpour, M. (2013). Deep Belief Networks for Image Denoising, *arXiv:1312.6158*.
- [136] Wang, C., Zhou, S. K., Cheng, Z. (2020). First image then video: A two-stage network for spatiotemporal video denoising, *arXiv:2001.00346*.
- [137] Sheeba, M. C., Seldev C. D. C. (2019). A review on video denoising methods, *2019 International Conference on Recent Advances in Energy-efficient Computing and Communication (ICRAECC)*, 1-6.
- [138] Arias, P., Morel, J. M. (2018). Video Denoising via Empirical Bayesian Estimation of Space-Time Patches, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 60(1). 70–93.
- [139] Buades, A., Lisani, J. (2016). Patch-Based Video Denoising With Optical Flow Estimation, *IEEE Trans. IP*, 25(6), 2573–2586.
- [140] Tassano, M., Delon, J., Veit, T. (2019). Dvdnet: A fast network for deep video denoising, *International Conference on Image*

- Processing (ICIP), IEEE, 22-25 Eylül, Taipei, 1805–1809.*
- [141] Paramkusam, A., Reddy, V. S. K. (2014). Two-layer motion estimation algorithm for video coding, *Electronics Letters*, vol 50, 276-278.
- [142] Chen, H., Jin, Y., Xu, K., Chen, Y., Zhu, C. (2021). Multiframe-to-Multiframe Network for Video Denoising, *IEEE Transactions on Multimedia*, DOI: 10.1109/TMM.2021.3077140.
- [143] Zhang, X., Yang, Y., Lin, L. (2018). Edge-aware image denoising algorithm, *Journal of Algorithms & Computational Technology*, Volume 13, 1–10.
- [144] Rudin, L. I., Osher, S., Fatemi, E. (1992). Nonlinear total variation based noise removal algorithms, *11th annual international conference of the center for nonlinear studies on experimental mathematics: computational issues in nonlinear science*, Elsevier North-Holland, Inc, New York, 259–268.
- [145] Sutour, C., Deledalle, C. A., Aujol, J. F. (2014). Adaptive regularization of the nl-means: application to image and video denoising, *IEEE Trans Image Process*, 23(8), 3506–3521.
- [146] Buades, A., Coll, B., Morel, J. M. (2005). A non-local algorithm for image denoising, *2005 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition, IEEE, San Diego*, 60–65.
- [147] Guo, Q., Zhang, C. M., Zhang, Y. F., Liu, H. (2016). An efficient SVD-based method for image denoising, *IEEE Transactions On Circuits And Systems For Video Technology*, 26(5), 868–880.
- [148] Dong, W. S., Zhang, L., Shi, G. M., Li, X. (2013). Nonlocally centralized sparse representation for image restoration, *IEEE Trans Image Process*, 22(4), 1620–1630.
- [149] Yeşiloğlu, A., Ekşioğlu, E. M. (2016). Seyrek İşaret İşlemede Sınıflandırma Uygulamaları ve Çekirdek Tabanlı Yaklaşımlar, *24.Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, Zonguldak*, 1157-1160.
- [150] Erdogan, H. T., Erdem, E., Erdem, A. (2013). Alan Kovaryansları İçin Grup Seyrekliğine Dayalı Seyrek Kodlama, *21. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, Girne, K.K.T.C.*, 1-3.
- [151] Andrearczyk, V., Whelan, P. F. (2016). Using Filter Banks in Convolutional Neural Networks for Texture Classification, *arXiv:1601.02919*.
- [152] Eslahi, N., Aghagolzadeh, Q. (2016). Compressive sensing image restoration using adaptive curvelet thresholding and nonlocal sparse regularization, *IEEE Trans. Image Process.*, 25(7), 3126-3140.
- [153] Lucas, A., Iliadis, M., Molina, R., Katsaggelos, A. K. (2018). Using deep neural networks for inverse in imaging: beyond analytical methods, *IEEE Signal Processing Magazine*, Ocak 2018, 35(1), 20-36.
- [154] Zhang, Y., Xiao, J., Peng, J., Zong, X. (2018). Kernel Wiener Filtering Model with Low-Rank Approximation for Image Denoising, *Information Sciences*.
- [155] Jain, V., Seung, H. (2009). Natural Image Denoising with Convolutional Networks, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 769–776.
- [156] Hüsem, H., Orman, Z. (2020). A Survey on Image Super-Resolution with Generative Adversarial Networks, *Acta Infologica*, 4(2), 139-154.
- [157] Donoho, D. L., Johnstone, J. M. (1994). Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage, *Biometrika*, 81(3), 425–455.
- [158] Girdher, A., Goyal, B., Dogra, A., Dhindsa, A., Agrawal, S. (2019). Image Denoising: Issues and Challenges, *Proceedings of International Conference on Advancements in Computing & Management (ICACM)*.
- [159] Gu, S., Timofte, R. (2019). A Brief Review of Image Denoising Algorithms and Beyond. Inpainting and Denoising Challenges, *The Springer Series on Challenges in Machine Learning*, 1-21.

## Jeneratör Kabinlerinin Akış Analizi ve Jeneratör Setinin Çalışabileceği Ortam Sıcaklığının Deneysel Olarak Belirlenmesi

*Flow Analysis of Generator Cabinets and Experimental Determination of the Ambient Temperature at Which the Generator Set Can Operate*

Barbaros MAZLUMCU<sup>1</sup> , Mustafa ATMACA<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Marmara Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, 34722, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, 34722, İstanbul, Türkiye

### Öz

Kabinli jeneratör setleri hem dış mekânda kullanıldığı hem de jeneratör setine koruma sağladıkları için tercih sebebidir. Jeneratör kabininin en önemli tasarım kriterlerinden biri kullanılan motorun soğutma performansıdır. Bu çalışmada, kabinli bir jeneratör setinin sayısal analizleri, ANSYS FLUENT 19.2 yazılımında, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bu sayısal analizler, deneysel analizlerle karşılaştırılmıştır. Jeneratör emiş bölgesi, atış bölgesi, emiş kesiti ve atış kesiti olarak dörde ayrılmış ve her bir bölgenin akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Tüm sistemin basınç farkı 1104C-44TAG2 motorunun verisinde izin verilen basınç farkı değerinden 14,25 Pa yüksek çıkmıştır. Bu farkın jeneratörün çalışma şartlarını ne kadar etkilediğini anlamak için HIOKI test cihazıyla deneyler yapılmış ve jeneratör setinin çalışabileceği maksimum sıcaklığın 3,9 °C düştüğü gözlemlenmiştir. Böylece, ileride yapılacak olan çalışmalara referans olunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Deneysel Analiz, Sayısal Analiz, HAD, Janset, Jeneratör Kabini, Basınç Farkı

### Abstract

Cabin generator sets have the benefit of outdoor use and protection for generator sets. One of the most important considerations in generator cabinet design is the cooling performance of the engine. In this study, experimental analysis for a generator set with a cabin is compared to numerical analysis performed using the computational fluid dynamics method in ANSYS FLUENT 19.2 software. Flow analysis is carried out on four areas of the generator, which are suction zone, discharge zone, suction section and discharge section. The pressure difference across the whole system is found to be 14.25 Pa higher than the pressure difference allowed for according to the 1104C-44TAG2 engine data. In order to understand how much this difference affects the operating conditions of the generator, experiments are carried out with the HIOKI tester. It has been observed that the maximum operating temperature of the generator set decreases by 3.9 °C. Thus, this paper becomes a reference for future studies.

**Keywords:** Experimental Analysis, Numerical Analysis, CFD, Genset, Generator Cabinet, Pressure Difference

## I. GİRİŞ

Günümüz dünyasında hem insanlar hem de endüstri için elektrik en önemli enerji kaynaklarından biridir. Teknolojinin gelişmesi ve insan nüfusunun her geçen gün artmasıyla elektrik ihtiyacı da artmaktadır. Aydınlatma, ısıtma, soğutma, iletişim, sağlık, ulaşım ve birçok sektör elektrik enerjisi sayesinde varlığını devam ettirebilmektedir. Elektrik üretimi için teknolojinin gelişmesine rağmen günümüzde elektrik kesintileri yaşanmaya devam etmektedir. Tüm temel ihtiyaçlar elektrik enerjisi sayesinde ayakta kalmaktadır ve elektrik kesintisi farklı sektörlerde ölümcül bir neden olabilir. Bu da acil durumlarda tek güç kaynağı olabilecek jeneratörlerin gerekliliğini beraberinde getirmektedir [1].

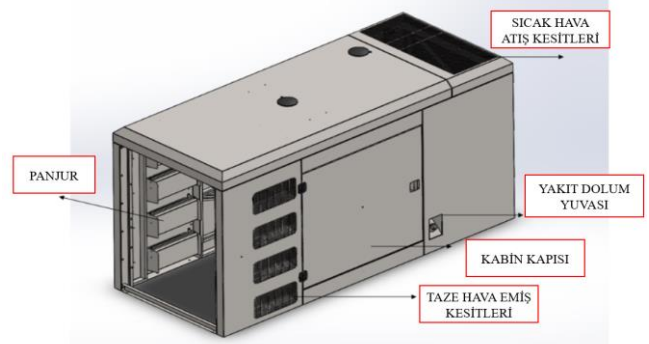
Jeneratörler mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler. Mekanik enerji kaynağı olarak su, buhar ve rüzgâr türbini kullanıldığı gibi çoğu zaman içten yanmalı motorlar da kullanılır. İçten yanmalı motorların kullanıldığı jeneratörler “Jeneratör Seti (JS)” diye adlandırılır. JS içten yanmalı motorun alternatör ile kullanıldığındaki ismidir. Günümüzde benzinli, dizel, gazlı ve hibrit olmak üzere farklı yakıtlarla çalışan jeneratör setleri mevcuttur [2]. Dizel jeneratörler (DJ) yüksek verimlilik ve düşük yakıt maliyeti nedeniyle en yaygın kullanılan jeneratörlerdir [1]. DJ’ ler kabinli ve kabinsiz olmak üzere iki farklı şekilde kullanılırlar. Kabinsiz jeneratörler genellikle iç mekânda kullanılırken, kabinli jeneratörler dış mekânda kullanılırlar. Jeneratör kabinlerinin işlevi, ilk olarak düzgün çalışma için uygun havalandırmayı sürdürmeli ikinci olarak gürültüyü standartlarla belirlenen değerin altında muhafaza etmelidir [3]. JS’ de genellikle 42 °C ve 50 °C radyatörler kullanılır ve bu sıcaklık, maksimum dış ortam sıcaklığını tarif eden değerdir. Kabinsiz bir şekilde kullanılan

jeneratörler, dış ortam sıcaklığı maksimum 42 °C veya 50 °C' de kullanılabilirler. Bu durum kabinli jeneratörlerde farklıdır. Kabinli jeneratörlerde radyatör fanının soğutma debisi, kabinsizdekine oranla daha verimsiz çalışır. Çünkü radyatör tarafından çekilen hava, kabinin emiş kesitlerinden girer ve kabinsiz makineye göre daha az miktarda hava çeker. Bu nedenle JS 'nin çalışabileceği ortamın sıcaklığı düşer. JS' nde havalandırma iyi olmadığı zaman, dahili ısı birikimi sıcaklığın sürekli yükselmesine neden olur. Jeneratörlerde termal ısı birikimi jeneratörün dinamik performansını, güvenilirliğini ve elektriksel performans göstergelerini düşürür [4]. Jeneratör setlerinin akış analizleri, kabinlerin soğutma performansları ve iç akış olan sayısal çalışmalar gibi literatürde bu çalışmaya yol gösterecek birçok araştırma mevcuttur. Bunların bazıları aşağıdaki gibidir:

Parthan V. ve ark. [1] tarafından jeneratör kabini tasarımı, kabinin panjur açıları değiştirilerek optimize edilmiştir. Panjur açısı ne kadar büyük olursa ısı aktarımının da o kadar büyük olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan optimizasyonlar sonunda, yağmur ve toz gibi maddeler dikkate alındığında, panjur açısını 30 °C ile 45 °C arasında tutmanın en iyi açı aralığı olduğu sonucuna varılmıştır. Babar G. [5] Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonları ile çok kısa bir süre içerisinde farklı modelleri denemiştir. Bu simülasyonlar, tasarım sürelerini azaltmaya yardımcı olmuş ve her modifikasyonun etkisini ölçmek için esneklik sağlamıştır. Yapılan çalışmayla, kabinin sıcak hava çıkış bölgesinin, akışa karşı fazla dirence sahip olduğu tespit edilmiştir. Daha sonra, kabin çıkışının yana taşınmasıyla, kabinin termal performansında büyük iyileşme sağlandığı da gözlemlenmiştir. Pandav P. ve ark. [2] yaptıkları sayısal analizlerin sonucunda, 40° panjur açısının kabin içi soğutmaya iyi yönde etkilediğini ve kabindeki sıcak havanın çıkış hızının arttığını gözlemlenmelerine karşın; panjurların 40° açılmasından dolayı gürültü seviyesinin de arttığını saptamışlardır. 30° açıda ise hem kabin içindeki hem de kabin dışındaki sıcaklık homojen, ayrıca gürültü seviyesi de 40°'ye oranla daha düşük olduğundan, 30° açının daha optimum olduğunu belirlemişlerdir. Jang J.Y. ve Tsai Y.C. [6] tarafından HAD yöntemi kullanarak kanatlı ısı değiştiricinin optimum panjur açısını bulmak için yöntem önerilmiştir. Minimum panjur sayısını bulabilmek için, 15° ile 45° arasında değişen panjur açılarının aynı sınır şartlarında sayısal analizleri gerçekleştirilmiş ve optimum panjur açısı bulunmaya çalışılmıştır. Jeneratör kabininin panjur optimizasyonunun yapılmasına bu çalışmalar katkı sağlamıştır. Sarınalı P. ve Sankaranarayana K. [7] tarafından LCV dizel motorun motor gücü için iki farklı susturucu modeli tasarlanmış ve bu modellerin akış analizleri ANSYS FLUENT programında oluşturulmuştur. Her iki model içinde aynı sınır şartları uygulanmış ve ikinci susturucunun dahili düzeni egzoz basıncını, birinci modele göre daha fazla

düşürdüğü sonucuna varılmıştır. Kabinin akış analizi de iç akış olduğundan susturucuların akış analizi, kabinin sayısal analizini kurgulamada yol gösterici olmuştur.

Bu çalışmadaki jeneratör setinde kullanılan motor modeli Perkins 1104C-44TAG2, alternatör modeli ise Leroy Somer TAL044C'dir. Tasarım aşamasında 110 kVA'lık 1104C-44TAG2 motorunun veri sayfasındaki bilgiler kullanılmıştır. 1104C-44TAG2 motoru 50°C ortam sıcaklığında çalışabilecek bir radyatöre sahiptir. Bu radyatörün fanı 3,3 kg/s 'lik bir kütleli debi ile havayı çekerek motoru soğutur. Bu soğutma sırasında radyatör fanının önünde ve arkasında basınç farkı oluşur. Bu farkın motor veri sayfasında verilen değerden yüksek olması durumunda, jeneratör setinin çalışabileceği maksimum ortam sıcaklığı değişir. Bu nedenle bu çalışmada, Solidworks programında tasarlanan kabinli jeneratörün çalışabileceği maksimum ortam sıcaklığını belirleyebilmek için ANSYS FLUENT 19.2 yazılımında hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle akış analizleri yapılmış ve bu analizler deneysel analizlerle karşılaştırılmıştır (Şekil 1). Kabinli jeneratör setinde kullanılan motorun ve alternatörün çalışırken oluşturduğu dahili ısı bilgileri, motorun ve alternatörün üretiminde kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin ısı iletim katsayıları, üretici firmalar tarafından paylaşılmamıştır. Bu nedenle, Sayısal çalışma akış eksenli yapılmıştır. Sayısal çalışma sonucunda tespit edilen, radyatörün önünde ve arkasında oluşan toplam basınç farkının, jeneratör setinin çalışma sıcaklığını nasıl etkilediğini anlamak için deneysel çalışmalar yapılmış ve öngörüler ortaya koyulmuştur.



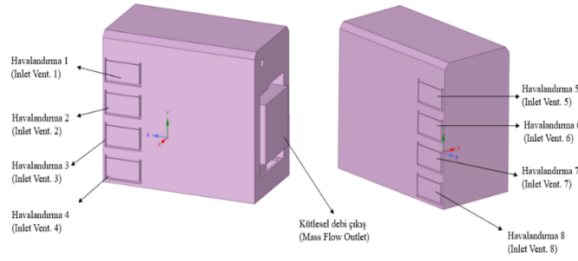
Şekil 1. 110PE5L jeneratör kabini

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Sayısal Çalışma

Jeneratör kabini taze hava emiş bölgesi ve sıcak hava atış bölgesi olarak iki ana bölüme ayrılmıştır. Taze hava emiş bölgesi jeneratörün arka tarafından (alternatörün olduğu taraf) radyatörün bittiği yüzeye kadar olan kısımdır. Sıcak hava atış bölgesi ise radyatörün matrisinden kabinin ön duvarına kadar olan kısımdır. Taze hava emiş bölgesi ve sıcak hava atış bölgelerinde radyatör fanının soğutma fan

debisiyle kabinin içine emilen havanın HAD analizleri ANSYS FLUENT 19.2 yazılımında yapılmıştır. Analizlerin gerçekleşmesi için akış alanı geometrik olarak çizilmiştir. ANSYS FLUENT programında analiz yaparken öncelikle akışkanın hareket alanının tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada akışkanın hareket alanı kabinin iç hacmidir. Kabinin iç hacminde akış alanına dahil olmayan kısımlar mevcuttur. Bunlar motor, alternatör, radyatör, susturucular, egzoz boruları ve panjur ceplerine gürültüyü engellemek için yapılandırılan süngerlerdir. Akış alanını doğru tanımlamak için kabinin toplam iç hacminden bu ürünlerin hacimleri çıkarılmıştır. Motor, alternatör ve radyatör detaylı birçok parçaya sahip olduğu için bu ürünlerin üç boyutlu çizimleri, onları tüm detayları ile çizmek yerine hacimsel olarak çizilmiş ve akış alanından çıkarılmıştır.



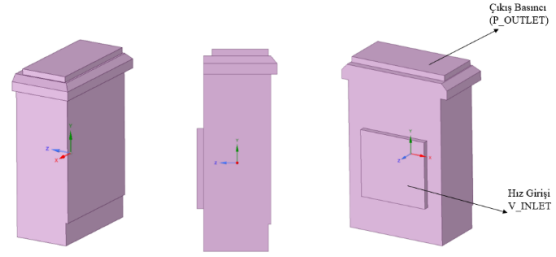
Şekil 2. Taze hava emiş bölgesinin akış alanı

Şekil 2’de gördüğümüz akış alanının ağ örme yöntemi olarak Tetrahedrons şekil seçilmiştir. Ardından sınır yüzeyleri belirlenmiştir. Akışkanın belirli bir debi ile çekildiği analizlerde, akışkanın çekildiği yüzey Mass Flow Outlet olarak tanımlanır [4]. Radyatörün matrisinden kabinin içine hava çekileceğinden radyatör matrisinin olduğu yüzey Mass\_Flow\_Outlet, kabine havanın girdiği yüzeylere ise Inlet\_Vent tanımı yapılmıştır. Diğer kısımlar ise duvar olarak tanımlanmıştır. HAD analizini yaparken doğru sonuca ulaşmak için sınır şartlarını ve fiziksel durumu bilmek çok önemlidir [8]. Geliştirilmiş duvar fonksiyonları HAD analizlerinde problemin daha detaylı incelenmesini sağlar [9]. Bu nedenle bu çalışmada, türbülans modeli olarak k-epsilon standart türbülans modeli geliştirilmiş duvar fonksiyonları seçilmiştir.

Tablo 1 ‘de Taze hava emiş bölgesinin sınır şartları gösterilmektedir.

Tablo 1. Taze hava emiş bölgesi sınır şartları	
Taze hava emiş bölgesi sınır şartları	
Mass Flow Outlet	3,3 kg/s
Inlet Vent	0 Pa
Akışkan cinsi	Hava
Yer çekimi ivmesi	-9,81 m/s <sup>2</sup>
Türbülans modeli	Standart K-epsilon türbülans modeli geliştirilmiş duvar fonksiyonları

Sıcak hava atış bölgesi radyatörün matrisinden kabinin ön duvarına kadar olan kısımdır. Atış tarafında radyatör fanının soğutma debisiyle, radyatör matrisinden atılan sıcak hava kabinin tavanından dışarı gönderilir. Taze hava emiş bölgesinin analizlerinde olduğu gibi sıcak hava atış bölgesinin de akış alanı çizilip sınır şartları belirlenmiştir (Şekil 3.).



Şekil 3. Sıcak hava atış bölgesi akış alanı

Giriş yüzeyi olarak radyatör matrisinin önü, çıkış yüzeyi olarak da jeneratör kabininden sıcak havanın çıktığı yer alınmıştır. Giriş yüzeyi V\_Inlet, çıkış yüzeyi P\_Outlet, iç tarafta akış alanı olmayan her yüzeye de WALL ismi tanımlanmıştır. Radyatör motor bloğundan aldığı sıcaklığı radyatör matrisinden dışarı atar. Bu nedenle, V\_Inlet yüzeyinden atılan havanın sıcaklığı dış ortam sıcaklığından fazladır. Motor verilerinden ve deney sırasındaki ölçümlerde atılan havanın sıcaklığının 60 °C olduğu gözlemlenmiştir. Dış ortam sıcaklığı ise 25 °C alınmıştır. V\_Inlet hızı olarak taze hava emiş bölgesinin analizlerinde elde edilen değer alınmıştır.

Tablo 2 ‘de Sıcak hava atış bölgesinin sınır şartları gösterilmektedir.

Tablo 2. Sıcak hava atış bölgesi sınır şartları	
Sıcak hava atış bölgesi sınır şartları	
V inlet	7,34 m/s
P outlet	0 Pa
Akışkan cinsi	Hava
Yer çekimi ivmesi	-9,81 m/s
Türbülans modeli	k-epsilon türbülans modeli geliştirilmiş duvar fonksiyonları
T <sub>sh</sub>	60°C
T <sub>or</sub>	25°C

Taze hava emiş bölgesinin analizlerinde, emiş kesitlerinden geçen hızın değeri 4,08 m/s olduğu için, emiş kesitlerinin sayısal analizlerinde V\_Giriş (V\_Inlet) hızı olarak 4,08 m/s girilmiştir. Tablo 3’ de emiş kesitlerinin sınır şartları gösterilmiştir. Sıcak hava atış bölgesinin analizlerinde ise, atış kesitlerinden geçen havanın hızı 7,08 m/s olduğu için, atış kesitlerinin sayısal analizlerinde V\_Giriş (V\_Inlet) hızı olarak 7,08 m/s girilmiştir. Tablo 4’de atış kesitlerinin sınır şartları gösterilmiştir.

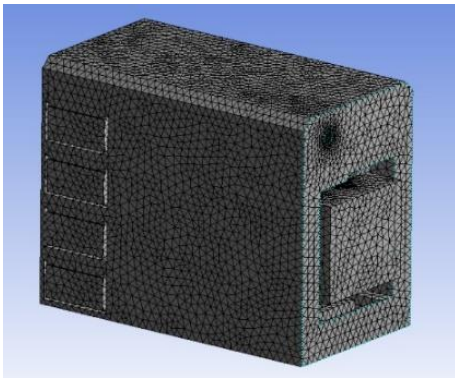
**Tablo 3.** Emiş kesitinin sınır şartları

Emiş kesitinin sınır şartları	
V inlet	4,08 m/s
P outlet	0 Pa
Akışkan cinsi	Hava
Yer çekimi ivmesi	-9,81 m/s
Türbülans modeli	Standart k-epsilon türbülans modeli geliştirilmiş duvar fonksiyonları

**Tablo 4.** Atış kesitinin sınır şartları

Emiş kesitinin sınır şartları	
V inlet	7,08 m/s
P outlet	0 Pa
Akışkan cinsi	Hava
Yer çekimi ivmesi	-9,81 m/s
Türbülans modeli	Standart k-epsilon türbülans modeli geliştirilmiş duvar fonksiyonları

Ağ kalitesini ve sayısını doğrulama, sayısal analizlerde gerçek sonuca ulaşmak için çok önemlidir. Yakut K. ve ark. [10] tarafından 5 farklı ağ sayısı oluşturularak sayısal analizler yapılmış ve en yüksek dördüncü ağ sayısı optimum ağ sayısı olarak seçilmiştir. En yüksek ağ sayısında analiz sonuçları hem kayda değer bir değişiklik göstermedikleri hem de analiz süresi uzadığı için bu ağ sayısı seçilmemiştir. Kutty A. H. ve Rojendran P. [11] tarafından küçük APC yavaş uçan pervane bıçağının HAD analizlerinde beş farklı ağ sayısının optimizasyonu yapılmıştır. Bu gerekçeyle, taze hava emiş bölgesinin akış analizinde 5 farklı ağ kalitesi oluşturularak aynı sınır şartlarında sayısal analizleri yapılmış ve basınç farkları karşılaştırılmıştır (Şekil 4).

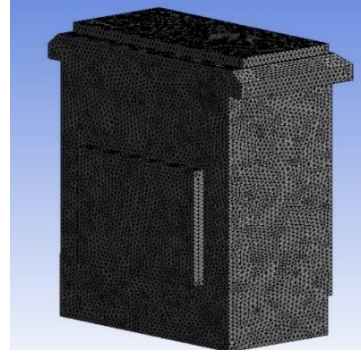
**Şekil 4.** Taze hava emiş bölgesi ağ yapısı

Tablo 5' de görüldüğü gibi, ağ sayısı arttıkça Mass Flow Outlet ile Inlet Vent 1 arasındaki basınç farkı artmış ve orta kaliteli ağ yapısı ve 550000-600000 aralığından sonra ağ sayısı artsa bile basınç farkının çok fazla değişmediği hatta azaldığı görülmüştür. Bu nedenle en uygun ağ kalitesi orta, ağ sayısı ise 550000-600000 arası olarak belirlenmiştir.

**Tablo 5.** Taze hava emiş bölgesi ağ kalitesi- basınç farkı

AĞ	Ağ kalitesi	Eleman Sayısı	Alt Düğüm Sayısı	Basınç Farkı
1	Standart	223698	43964	71,56
2	Seyrek	369884	76539	72,69
3	Orta	589637	101753	76,42
4	Orta -iyi	769332	146689	77,96
5	İyi	1156963	230723	74,69

Daha sonra, şekil 5' de gösterilmiş olan, sıcak hava atış bölgesindeki en uygun ağ kalitesinin ve sayısının belirlenmesi için, tablo 6 'da görüldüğü gibi 5 farklı kaliteli ağ yapısı için aynı sınır şartlarında sayısal analizler yapılmış ve V\_Giriş (V\_Inlet) ve P\_Çıkış (P\_Outlet) yüzeyleri arasındaki basınç farkı karşılaştırılmıştır. Bir noktadan sonra ağ kalitesi artsa bile basınç farkının değişmediği tespit edilmiştir. Bu nedenle optimum ağ kalitesi orta-iyi, ağ sayısı ise 420000-440000 aralığında belirlenmiştir.

**Şekil 5.** Sıcak hava atış bölgesi ağ yapısı**Tablo 6.** Sıcak hava atış bölgesinin ağ kalitesi- basınç farkı

AĞ	Ağ kalitesi	Eleman Sayısı	Alt Düğüm Sayısı	Basınç Farkı
1	Standart	173054	39156	31,74
2	Seyrek	232104	44778	35,37
3	Orta	293269	47653	35,57
4	Orta-iyi	428842	82174	36,02
5	İyi	778749	147689	36,23

## 2.2. Deneysel Çalışma

JS' nin ISO 8528-1 standardına göre belirlenmiş çalışma adımları vardır. Bunlar üçe ayrılır: anlık (STAND By), günlük (PRIME) ve sürekli (CONTINUOUS). Anlık çalışma dizel jeneratörün maksimum yükte yüklendiği durumdur ve %110 yük verilir. Ek olarak, bir yılda maksimum iki yüz saat çalışabilir. Günlük çalışma JS %100 yükte çalışabildiği, çalıştığı saat boyunca ortalama yükün %70 olduğu durumdur. JS' nin yedek enerji olarak kullanıldığı durumlarda önerilir. Sürekli çalışma JS' nin ana enerji kaynağı olarak kullanıldığı zamanki çalışma adımdır. Yakıt tedariki sağlandığı taktirde

kesintisiz çalışabilir ve ortalama yük seviyesi de %100 olarak bildirilmiştir [12]. Analizleri ve tasarımları tamamlanan jeneratör seti üretilmiştir. Üretilen jeneratör seti Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Üretilen jeneratör seti

Kabinli jeneratör setinin çalışabileceği maksimum ortam sıcaklığını bulabilmek için motor veri sayfalarında maksimum üst tank sıcaklığı verilir. Kabinli jeneratör setinin çalışabileceği maksimum ortam sıcaklığı ( $T_{JS}$ ) Perkins firması tarafından verilen aşağıdaki 1 numaralı denklem ile bulunur[13]:

$$T_{JS} = T_{MÜTS} - T_{GSS} + T_{OS} \quad (1)$$

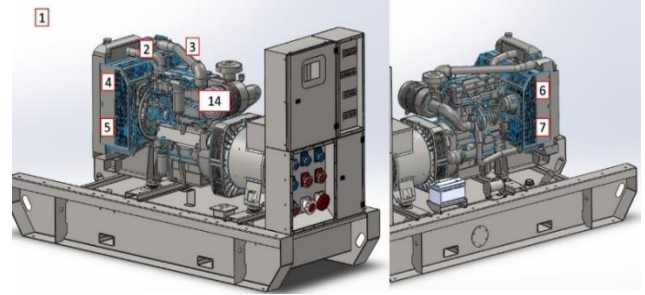
Üretilen jeneratör setinin sayısal çalışmalarla uyumlu olup olmadığını doğrulamak ve jeneratör setinin çalışabileceği maksimum ortam sıcaklığını belirlemek için Teksan Jeneratör firmasının test laboratuvarında uygulama testleri yapılmıştır. Test cihazı olarak çok kanallı taşınabilir bir veri kaydedici olan HIOKI LR 8402-20 kullanılmıştır. HIOKI' de sıcaklık ölçümü ısı çift (Termokupl) sensorlar ile yapılır. Isıl çift sensorlardan alınan sıcaklık verileri USB ile HIOKI yazılımına aktarılır ve HIOKI yazılımında anlık veriler Excel' e dönüştürülür. Deneye başlamadan deney düzeneği oluşturulmuştur. Önce ısı çiftler jeneratör setinin Perkins firması tarafından belirlenen bölgelerine takılmıştır (Tablo 7. Ve Şekil 8.). Şekil 7' de HIOKI cihazının kanallarına takılan ısı çiftler gösterilmiştir.

Tablo 7 'de Isıl çift takılan noktalar gösterilmektedir.

Tablo 7. Isıl çift takılan noktalar	
Termokupl takılan noktalar	
Ortam sıcaklığı	1
Suyun radyatöre giriş sıcaklığı	2
Suyun radyatörden çıkış sıcaklığı	3
Radyatör soğutma fanının sağ üst bölgesi	4
Radyatör soğutma fanının sağ alt bölgesi	5
Radyatör soğutma fanının sol üst bölgesi	6
Radyatör soğutma fanının sol alt bölgesi	7
Motorun hava filtresi	14



Şekil 7. HIOKI' de ısı çift takılan noktalar



Şekil 8. Jeneratör setinde ısı çift takılan noktalar

Isıl çiftlerin bu noktalara bağlanmasının amacı, hava filtresine giren havanın radyatör fanına gelene kadar ne kadar ısındığını görmek, motor blok suyunun radyatörde ne kadar soğuduğunu hesaplamak ve yapılan deneyin hangi ortam sıcaklığında yapıldığını belirlemektir.

### III. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Sayısal Çalışmaların Sonuçları

Tablo 8 'de taze hava emiş bölgesinin sayısal analizleri sonucunda yüzeylerde oluşan ortalama hız değerleri gösterilmiştir. Bu hız değerleri, sıcak hava atış bölgesinin ve emiş kesitlerinin sayısal analizlerinde kullanılmıştır.

Tablo 8. Sınır yüzeylerinin ortalama hızları

Sınır Yüzeyleri	Ortalama Hız
VENTİLASYON_GİRİŞ_1 (INLET_VENT_1)	4,08 m/s
VENTİLASYON_GİRİŞ_2 (INLET_VENT_2)	4,18 m/s
VENTİLASYON_GİRİŞ_3 (INLET_VENT_3)	4,12 m/s
VENTİLASYON_GİRİŞ_4 (INLET_VENT_4)	4,33 m/s
VENTİLASYON_GİRİŞ_5 (INLET_VENT_5)	4,09 m/s
VENTİLASYON_GİRİŞ_6 (INLET_VENT_6)	4,12 m/s
VENTİLASYON_GİRİŞ_7 (INLET_VENT_7)	4,11 m/s
VENTİLASYON_GİRİŞ_8 (INLET_VENT_8)	4,35 m/s
KÜTLESEL ÇIKIŞ (MASS_FLOW_OUTLET)	DEBİSİ 7,34 m/s

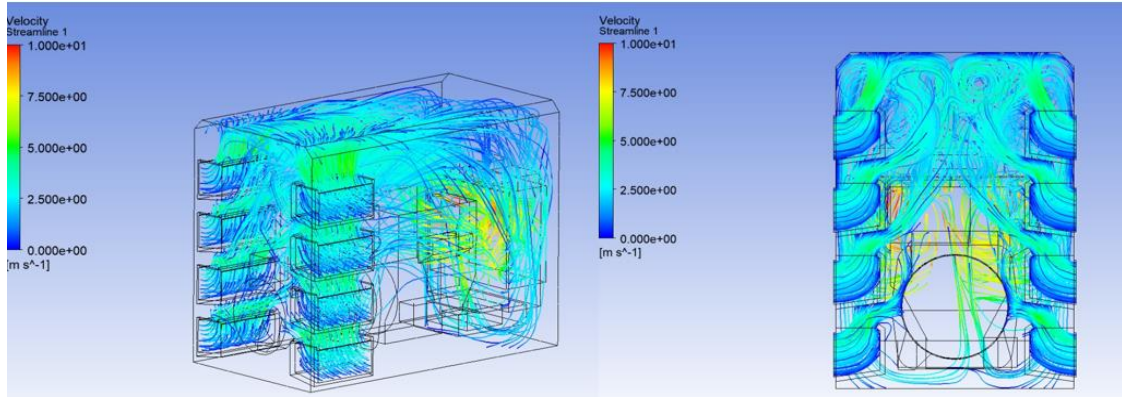
Hava radyatörün matrisinden 3,3 kg /s kütleli debi ile emiş kesitlerinden kabinin içine çekilmiştir. Kabinin içindeki havanın akım çizgilerinin bazı alanlarda hızlandığı görülürken, bazı alanlarda engellerle karşılaşarak yavaşladığı görülmüştür (Şekil 9.). Jeneratör çalışırken kabin içindeki sıcaklığı en fazla arttıran bölgeler motorun üst bölümü, manifold bölgesi ve egzoz borularının olduğu bölgelerdir. Ayrıca havanın genel olarak motorun üst bölgesinden hareket etmesi motorun hava filtresi için de faydalıdır. Radyatörden çekilen havanın bu bölgeleri soğutması gerekir. Şekil 10 'da ZY düzleminde  $x=0$  noktasında hız ve basınç konturları oluşturulmuştur. Panjurlardan kabinin içine emilen havanın büyük bir kısmının motor bloğunun üstünden geçerek radyatörden dışarı atıldığı gözlemlenmiştir. Panjurdan geçen hava, motorun hava filtresine çarpmış ve o bölgelerdeki basıncı arttırmıştır. Radyatörün üst kısmında radyatöre giremeyen akışkan kabinin üst bölgesindeki basıncı arttırmıştır. Panjurdan geçip kabin tavanına çarpan hava ise kabin tavanındaki basıncı arttırmıştır. Hızın arttığı ve akışın düzenli hale geldiği bölgelerde basıncın azaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 11'de ZY düzleminde  $x=0$  noktasında oluşturulan yüzey üzerinden alınmış hız ve basınç konturlarına baktığımızda radyatörden çıkan hava ideal dönüş çapını bulmaya çalışırken karşı duvara çarpmış ve akışkanın hızı yavaşlamıştır. Çarptığı

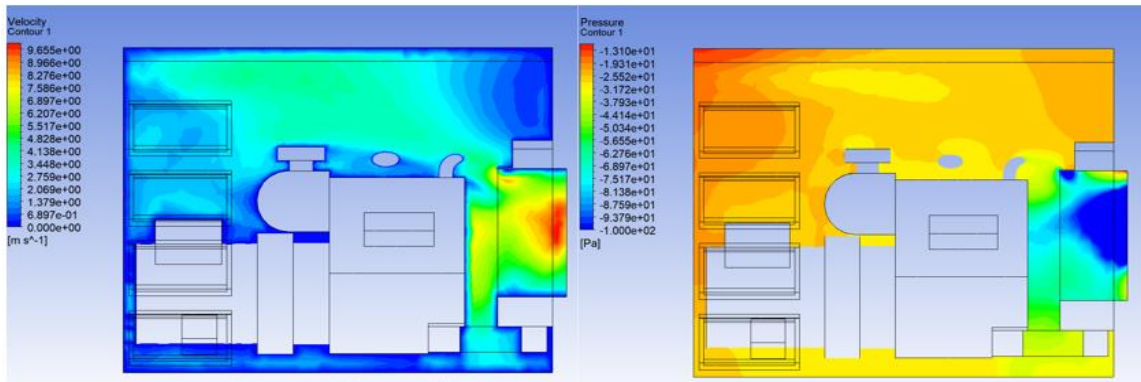
duvara yakın yerden akışkanın büyük bir kısmı dışarı atılmıştır. Radyatör matrisinin alt kısmında bulunan susturucunun etrafında akışın yavaşladığı ve girdap oluştuğu görülmüştür. Akışkanın yüksek basınçlara çıktığı yerler, akışın düzensiz olduğu, yavaşladığı ve girdap oluşturduğu alanlardır. Yatay susturucunun etrafında ve akışkanın duvara çarptığı alanda basıncın yüksek, havanın düzenli bir şekilde dışarı atıldığı yerlerde basıncın düşük olduğu tespit edilmiştir.

Emiş ve atış yüzeyleri perfore mantığıyla oluşturulmuş yüzeylerdir. Bu sayede jeneratör setini yabancı maddelerden korurlar. Emiş ve atış kesitlerinin analizleri de tamamlandıktan sonra jeneratör kabinin toplam basınç farkı bulunmuştur. Emiş kesitinde giriş ve çıkış yüzeyleri arasındaki 7,69 Pa basınç farkı oluşurken, atış kesitinde akışkanın hızının yüksek olmasından dolayı 19,12 Pa basınç farkı oluşmuştur. Şekil 12'deki emiş kesitlerinin hız ve basınç konturlarında hızın deliklerin kenarlarında azaldığı ortalarına doğru gidildikçe arttığı görülmüştür. Basıncın üst ve alt deliklerde yüksek olduğu, aynı zamanda deliklerin kenarlarında arttığı gözlemlenmiştir.

Şekil 13' de atış kesitinin hız ve basınç konturları verilmiştir. Sonuçlar emiş kesitinin analiz sonuçlarıyla benzerdir. Kesit kenarlarındaki hızlar, merkezdeki hızlara göre daha düşüktür.

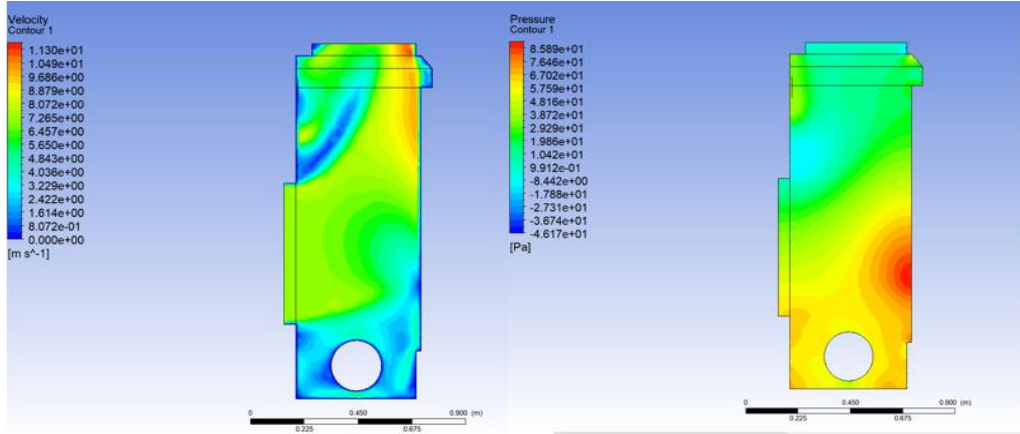


Şekil 9. Taze hava emiş bölgesi akım çizgileri

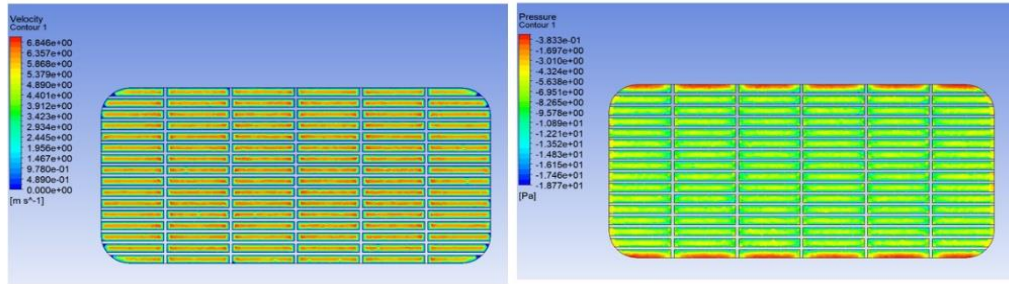


Şekil 10. Taze hava emiş bölgesi hız ve basınç konturları

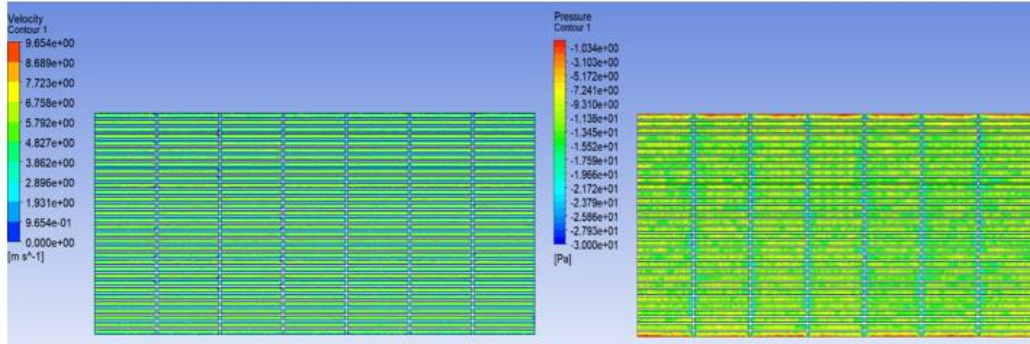




Şekil 11. Sıcak hava atış bölgesi hız ve basınç konturları



Şekil 12. Emiş kesitinin hız ve basınç konturları



Şekil 13. Emiş kesitinin hız ve basınç konturları

Jeneratör setinin taze hava emiş bölgesinin, sıcak hava atış bölgesinin ve emiş-atış kesitlerinin ayrı ayrı sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin her birinde eleman sayısından bağımsız çözümler yapılmış ve sınır şartları belirlenmiştir. Belirlenen bu adımlardan sonra jeneratör setinin toplam basınç farkı, radyatörün önünde ve arkasındaki basınç farkını oluşturmuştur. Bu fark, 1104-44TAG2 motorunun izin verdiği basınç farkı ile Tablo 9' da karşılaştırılmıştır.

Tablo 9' da sayısal analizler sonucunda elde edilen basınç farkı 139,25 Pa, motor verisinden radyatörün önünde ve arkasında oluşabilecek maksimum basınç farkı ise 125 Pa görülmüştür. Sayısal analizlerden elde edilen basınç farkı motor verisinden 14,25 Pa daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu farkın jeneratörün çalışabileceği maksimum ortam sıcaklığını nasıl etkileyeceği gerçekleştirilen deneysel analizlerle öngörülmüştür.

Tablo 9. Toplam basınç farkı

	Basınç Farkı (Pa)
Taze hava emiş bölgesinin akış analizleri sonucunda ortaya çıkan basınç farkı	76,42
Sıcak hava atış bölgesinin akış analizleri sonucunda ortaya çıkan basınç farkı	36,02
Emiş kesitinin akış analizleri sonucunda ortaya çıkan basınç farkı	7,69
Atış Kesiti sayısal analizleri sonucunda ortaya çıkan basınç farkı	19,12
Akış analizleri sonucunda sistemin toplam basınç farkı	139,25
Motor veri sayfasında radyatörün izin verdiği basınç farkı değeri	125

### 3.2. Deneysel Çalışmaların Sonuçları

Jeneratör seti ISO 8528-1 standardına göre belirlenmiş çalışma şartlarına uygun olarak yaklaşık 25 dakika boyunca %75, %100 ve %110 yük verilerek çalıştırılmıştır. Çalıştırılan yüklerde ısı çift bağlanan noktalar takip edilmiştir. Jeneratör setinin çalışabileceği maksimum ortam sıcaklığını bulabilmek için her bir yükte radyatöre giren suyun sıcaklığının çıkabileceği maksimum değer kaydedilmiştir. Tablo 10' da deney süresinin son 10 saniyesindeki verilerde, radyatöre giren suyun sıcaklığının 83,02 °C 'den sonra artmadığı görülmüştür. Radyatörden çıkan su 74,52 °C olduğu için radyatörün bu şartlar altında yaklaşık 8,5 °C 'lık bir soğutma sağladığı tespit edilmiştir. Suyun kaybettiği ısı, radyatör peteklerinden kabinin sıcak

hava atış bölgesine, oradan da sıcak hava emiş kesitlerinde kabin dışarı atılmıştır. Hava filtresine 22,35 °C sıcaklıkta gelen havanın, %75 ve %100 yüklerde olduğu gibi radyatöre yaklaştıkça sıcaklığının arttığı görülmüştür.

Tablo 11 'de ortam sıcaklığının 19,03 °C olarak ölçüldüğü bir yerde yapılan %110 yük koşulu olan anlık çalışma deneyinde, motor bloğundan radyatöre giren suyun maksimum sıcaklığının 83,02 °C olduğu, 110PE5L jeneratör setinde kullanılan motorun MÜTS değerinin ise 110 °C olduğu gözlemlenmiştir. Bu değerler neticesinde jeneratör setinin çalışabileceği maksimum ortam sıcaklığı 1 numaralı denklem göre 46,1 °C olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 10.** %110 yük sıcaklık-zaman sonuçları

Zaman	Ortam sıcaklığı	Radyatöre su girişi	Radyatörden su çıkışı	Radyatör Fanı Sağ Üst	Radyatör Fanı Sağ alt	Radyatör Fanı Sol Üst	Radyatör Fanı Sol ALT	Hava Filtresi
12:02:00	19	83,03	75,19	29,26	39,61	36,98	10,58	22,39
12:02:01	18,99	83	75,2	29,33	39,44	34,67	11,12	22,4
12:02:02	18,99	82,99	74,26	29,69	40,09	36,91	12,11	22,38
12:02:03	18,97	82,99	75,42	29,5	40,58	36,02	12,42	22,38
12:02:04	18,99	83,02	74,6	29,72	40,86	33,48	12,11	22,38
12:02:05	19,02	83,06	75,42	29,39	41,06	34,26	9,63	22,38
12:02:06	19,05	83,06	74,3	29,5	40,99	35,27	10,27	22,37
12:02:07	19,06	83,07	75,64	29,36	41,14	35,47	9,03	22,36
12:02:08	19,07	83,02	74,81	29,96	42,07	38,72	10,49	22,33
12:02:09	19,03	83,02	74,52	29,97	42,07	38,59	12,1	22,35

**Tablo 11.** Deney sonuçları

Maksimum Üst Tank Sıcaklığı (°C) ( $T_{MÜTS}$ )	Giren Suyun Sıcaklığı (°C) ( $T_{GSS}$ )	Deney Sırasında Ortamın Sıcaklığı (°C) ( $T_{OS}$ )	Jeneratör Setinin Çalışabileceği Maksimum Ortam Sıcaklığı (°C) ( $T_{IS}$ )
110	83,02	19,03	46,01

Literatüre bakıldığında, Hormozi ve ark. [14] ve İten ve ark. [15] tarafından benzer çalışmalar yapılmıştır. Onların yaptığı sayısal ve deneysel analizlerde, sınır şartları bilindiğinden sıcaklık eksenli bir karşılaştırma yapılabilmektedir. Bu çalışmada ise jeneratör setinde kullanılan 1104C-44TAG2 Perkins motorunun ısı bilgileri mevcut değildir. Kullanılan dizel motorun dahili ısı birikimi, motorun üretiminde kullanılan malzemelerin ısı iletim katsayıları bilinmediği için sayısal analizler sıcaklık eksenli yapılamamıştır. Jeneratör sektöründe, jeneratör setinin soğutma performansının ve jeneratör setinin çalışabileceği maksimum sıcaklığın belirlenebilmesi için motor veri sayfasından değerler alınmıştır. Bu değerler, maksimum üst tank sıcaklığı ile radyatör fanının önünde ve arkasında oluşabilecek maksimum basınç farkı değerleridir. Maksimum üst tank sıcaklığı, deneysel çalışmalarda jeneratörün çalışma sıcaklığını

belirlemek için kullanılırken, basınç farkı verileri ise yapılan akış analizlerinde sınır değeri olarak kullanılmıştır. Yapılan sayısal analizler sonucunda ortaya çıkan toplam basınç farkının, jeneratör setinin çalışma sıcaklığını nasıl etkilediği ile ilgili öngörüler ortaya konulmuştur.

Sayısal analizler sonucunda ortaya çıkan basınç farkı değerinin, motor verisinde izin verilen değerden yüksek çıkmasının nedenleri aşağıdaki gibidir:

- Tasarlanan kabinin gürültü seviyesinin düşük olması istendiği için çift susturucu kullanılmıştır. Bu durum atış bölgesinden dışarı atılan akışkanın, dışarı atılırken daha fazla engelle karşılaşmasına neden olmuş ve basınç farkını arttırmıştır.

- Kullanılan panjurun derinlik ölçüsü artırılarak basınç farkı düşürülebilir. Fakat, derinlik ölçüsünün artması, jeneratörün çalışması sırasında oluşan gürültünün dış ortama daha fazla aktarılmasına yol açacağı için derinlik ölçüsü artırılmamıştır.
- IP 23 standardı tasarım kriteri olarak belirlendiği için emiş ve atış kesitlerinde kullanılan şekillerin minimum ölçüsü 9 mm olarak belirlenmiştir. IP 23 standardının tasarım kriteri olarak belirlenmediği durumlarda 9 mm ölçüsü artırılabilir. Böylece akışkanın kabine girdiği ve çıktığı yüzeylerin alanı artacak ve ortaya çıkacak basınç farkı da düşecektir.
- Bu çalışmadaki kabin tasarımını sınırlandıran bir diğer etken, rakip firmaların jeneratör setlerinin boyutlarıdır. Atış bölgesinin uzunluğu artırılarak, akış alanı artırılabilir ve akışkanın dönüş çapına yaklaşılabilir. Bu durum da basınç farkını düşürecektir.

#### IV. SONUÇLAR

Bu çalışma, jeneratör kabini için akış analizleri, Taze hava emiş bölgesinin sayısal analizleri, sıcak hava atış bölgesinin sayısal analizleri ve havalandırma kesitlerinin sayısal analizleri olmak üzere 4 bölüme ayrılmıştır. Bu analizlerde ağ sayısı optimizasyonu yapılmış, ağ şekli ve türbülans modeli literatür çalışmalarından örnek alınarak seçilmiştir. Sistemin toplam basınç farkı, kullanılan motorun izin verdiği basınç farkından 14,25 Pa yüksek çıkmıştır. Bu farkın jeneratör setinin çalışma koşullarını nasıl etkilediğini bulmak için deneysel çalışma yapılmıştır.

Deneysel çalışma sonucunda jeneratör setinin maksimum çalışabileceği ortam sıcaklığı 46,01°C olarak belirlenmiştir. 14,25 Pa basınç farkı jeneratör setinin çalışma sıcaklığını 3,99°C düşürmüştür. Böylece, bu çalışmadaki 1104C-44TAG2 Perkins motoruna sahip imalatı yapılan kabinli jeneratör setinin, maksimum 46,01°C ortam sıcaklığına sahip coğrafyalarda rahatlıkla kullanılacağı belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada akış eksenli sayısal analizler yapılmış, analizler neticesinde ortaya çıkan basınç farkının jeneratör setinin çalışabileceği maksimum sıcaklığı nasıl etkilediği ile ilgili öngörülerde bulunulmuştur. Ayrıca, bu çalışmanın ileride yapılacak basınç farkı temelli problemlere referans olması amaçlanmıştır.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma için tasarlanan kabinli jeneratör setinin üretilmesini sağlayan ve deneysel çalışma için test laboratuvarının kullanılmasına izin veren TEKSAN Jeneratör firmasına çok teşekkür ederim.

#### KAYNAKLAR

- [1] Parthan, V., Shyamkumar, P., Nagajara, S., (2019). Canopy Design to Minimize

Restrictions and Maximize Heat Transfer. *AIP Conference Proceedings*, Pune, India, 20 December.

- [2] Pandav P.P., Barhatte S., Gokhale N., (2015). Thermal Optimization of Genset Canopy using CFD. *International Journal of Mechanical and Production*, 5, 19-26.
- [3] Yadav, P., Bankar, H., Karanth, N., (2017). "Acoustic Enclosure Optimization for a Higher Capacity Diesel Generator Set Using Statistical Energy Analysis (SEA) Based Approach. *SAE Technical Paper*, 26, 0188.
- [4] Chen,H., Zhang,Y., Shi M., Chen,Q., (2014). Numerical Simulation of Generator Air Duct Based on CFD Approach. *Applied Mechanics and Materials*, 644-650, 678-683.
- [5] Babar, G., (2017). CFD Driven Compact and Cost Effective Design of Canopy. *SAE Technical Paper*, 26-0254.
- [6] Jang, J., Y., Tsai, Y., C., (2011). Optimum Louver Angle Design For a Louvered Fin Heat Exchanger. *International Journal of The Physical Sciences*, 6-28, 6422-6438.
- [7] Saripalli, P., Sankaranarayana., K., (2015). CFD Analysis on Flow Through a Resistance Muffler of LCV Diesel Engine. *International Journal of Science, Technology and Society*, 3-4, 162-175.
- [8] Sulaiman, M., Y., Azraai, S., B., Abdullah, W., M., W., (2009). CFD Modelling of Air Flow Distribution From a Fan. *Proceeding of International Conference on Applications and Design in Mechanical Engineering (ICADME)*, Penang, Malaysia, 11-13.10.2009.
- [9] Okbaz., A., Onbaşıoğlu., H., Olcay., A., B., Pınarbaşı., A., (2017). Panjur Kanatlı Isı Değiştiricilerinin Performansının Deneysel ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yaklaşımı ile İncelenmesi. *Mühendis ve Makine*, 58-687, 41-55.
- [10] Khalaji,M., N., Osta, M., H., 4, K., (2018). Numerical Analysis of Heat Transfer of Hot Oil and Cold Water Fluids in a Concentric Type Heat Exchanger with Ansys Fluent. *International Journal of Innovative Research and Reviews*, 2-2, 24-27.
- [11] Kutty, H, A, Rojendran, P., (2017). 3D CFD Simulation And Experimental Validation of Small APC Slow Flyer Propeller Blade. *Aerospace*, 4,1-11.
- [12] Demir, B.T., (2015). Jeneratör Seçimi ve Senkronizasyon. 4. *Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi ve Sergisi*, İzmir, Turkey, 21-24 Ekim 2015.
- [13] Charlie, How to... Measure Ambient Clearance, For Open or Canopie Sets, <https://support.wellandpower.net/hc/en-us/articles/206023711-How-to-Measure->

- 
- [Ambient-Clearance-For-Open-or-Canopied-Sets](#), (05.11.2021).
- [14] Aliabadi, K., M., Zangouei, S., ve Hormozi, F., (2015). Performance of A Plate-Fin Heat Exchanger With Vortex-Generator Channels: 3D-CFD Simulation And Experimental Validation. *International Journal of Thermal Sciences*, 8, 180-192.
- [15] Iten, M., Liu, S., ve Shukla, A., (2018). Experimental Validation of An Air-PCM Storage Unit Comparing The Effective Heat Capacity And Enthalpy Methods Through CFD Simulations. *Energy*, 155, 495-503.

## Using Chaos Theory to Determine Average Prediction Times of Different Meteorological Variables: A Case Study in Sivas

*Farklı Meteorolojik Değişkenlerin Ortalama Öngörü Sürelerini Belirlemek İçin Kaos Teorisinin Kullanımı: Sivas Örneği*

Evren ÖZGÜR<sup>1</sup> , Mustafa Utku YILMAZ<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Istanbul Medeniyet University, Department of Civil Engineering, 34700, Istanbul, Turkey

<sup>2</sup> Kırklareli University, Department of Civil Engineering, 39100, Kırklareli, Turkey

### Abstract

Processes in the atmosphere can be described by nonlinear approaches since they depend on a large number of independent variables. Even a slight change in initial conditions can cause unpredictable results. Therefore, long-term prediction is not possible to obtain. This is usually called “sensitive dependence on initial conditions”. In this study, average prediction times were determined for different meteorological variables by using a nonlinear approach. Daily values of relative humidity, air temperature, and wind speed in Sivas for the period 2006-2010 were used. To implement the method, the first step is to reconstruct the phase space. Phase space has two embedding parameters, namely time delay and embedding dimension. Mutual Information Function (MIF) can be used to determine the optimal value of the time delay. It considers both linear and nonlinear dependencies in a time series. To define phase space, embedding dimension, which is the number of state variables that define the dynamics of a system, must be identified correctly. The algorithm to describe the dimension is called False Nearest Neighbors (FNN). In the study, average prediction times of variables were calculated by using maximum Lyapunov exponents. Average prediction times for relative humidity, temperature, and wind speed were determined as 6.2, 5.8, and 2.5 days, respectively. In addition, it is found that the sensitivity of measurements increases the prediction time. For relative humidity, the average prediction time can have a 50% increase with 10 times increase of sensitivity.

**Keywords:** Chaos, Lyapunov exponent, Meteorology, Phase space, Prediction

### Öz

Atmosferdeki süreçler çok sayıda bağımsız değişkene bağlı oldukları için doğrusal olmayan yaklaşımlarla tanımlanabilir. Başlangıç koşullarındaki küçük bir değişiklik bile, öngörülemeyen sonuçlara neden olabilir. Bu nedenle, uzun vadeli öngörü elde etmek mümkün değildir. Buna genellikle “başlangıç koşullarına hassas bağımlılık” denir. Bu çalışmada, doğrusal olmayan yaklaşım kullanılarak farklı meteorolojik değişkenler için ortalama öngörü süreleri belirlenmiştir. Çalışmada Sivas ilinde 2006-2010 dönemine ait günlük bağıl nem, hava sıcaklığı ve rüzgar hızı verileri kullanılmıştır. Yöntemi uygulamak için ilk adım, faz uzayının yeniden oluşturulmasıdır. Faz uzayının zaman gecikmesi ve embedding (gömme) boyutu olmak üzere iki gömme parametresi vardır. Zaman gecikmesinin optimum değerini belirlenmek için Karşılıklı Bilgi Fonksiyonu (MIF) kullanılabilir. MIF, bir zaman serisinde doğrusal ve doğrusal olmayan bağımlılıkları hesaba katar. Faz uzayını tanımlamak için, bir sistemin dinamiklerini tanımlayan durum değişkenlerinin sayısı olan gömme boyutu doğru bir şekilde tanımlanmalıdır. Bu boyutu tanımlayan algoritmaya Yanlış En Yakın Komşular (FNN) denir. Çalışmada maksimum Lyapunov üstelleri kullanılarak meteorolojik değişkenlerin ortalama öngörü süreleri hesaplanmıştır. Bağıl nem, sıcaklık ve rüzgar hızı için ortalama öngörü süreleri sırasıyla 6.2, 5.8 ve 2.5 gün olarak belirlenmiştir. Ayrıca ölçüm hassasiyetinin, öngörü süresini arttırdığı tespit edilmiştir. Bağıl nem için ortalama öngörü süresi, ölçüm hassasiyetinin 10 kat artmasıyla, %50 artışa sahip olabilmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Kaos, Lyapunov üsteli, Meteoroloji, Faz uzayı, Öngörü

## I. INTRODUCTION

Prediction of atmospheric variables is an important issue all over the world. There are several approaches in the literature for the prediction of meteorological parameters. However, most of the approaches are linear. On the other hand, as a generally known fact that atmospheric processes have complexity and are controlled by many different mechanisms. The studies of chaotic analysis in atmospheric sciences are limited because of their abovementioned complexity. Some of the nonlinear approaches that are used in meteorology are artificial neural networks, support vector regression algorithms, and chaos theory. Among these approaches, chaos theory seems to be more practical than the other methods in terms of being easily applicable [1].

Prediction of meteorological parameters is crucial for a great number of different areas. For example, prediction of air temperature is important for climate change, agricultural purposes, epidemic diseases control, etc. [2-5]. In addition, the prediction of wind speed is substantial for energy production in the renewable energy sector [6, 7].

Chaos theory was applied to a wide range of meteorological and hydrological variables such as streamflow [1, 8, 9], wind speed [10], evapotranspiration [11, 12], and temperature [13]. Most of the studies focused on fractal dimension and Lyapunov exponents which are the most important criteria of chaotic properties. The time series of the meteorological variables may be produced by a chaotic process since atmospheric variables can be controlled by many independent variables. If trajectories of dynamical systems merge in a specific subspace independent with initial conditions, it is called “attractor”. If it is not possible to make long-term predictions, it can be said that there is a dependency on initial conditions [14, 15].

Although chaos is defined as complexity in the literature, chaotic systems are not complex systems. Complex systems are those whose behavior cannot be controlled under any circumstances because they are not dependent on initial conditions. However, chaotic systems are systems that can be analyzed and controlled. The most important property of chaotic systems is their sensitivity to initial conditions. The chaotic behavior of a system is not only dependent on external factors but also closely related to the system's own internal dynamics and initial conditions. Chaotic systems show irregular behavior in the time dimension. If the initial state of any deterministic system and its equations are known, the next behavior of the system can be defined. In chaotic systems, it is crucial to know the initial values with accurate precision to fully determine the development of any system over time. Since the chaotic systems are nonlinear, the error will increase exponentially over time [16].

This study aimed to define the average prediction times of three different meteorological variables (relative humidity, temperature, and wind speed) by using a chaotic approach. Firstly, the phase space was reconstructed for each variable by using their observed data. Then, the average prediction time of selected meteorological variables was determined using the Lyapunov exponent which is one of the most important chaos criteria. Finally, the possible changes in prediction sensitivity with changing measurement sensitivity were also investigated.

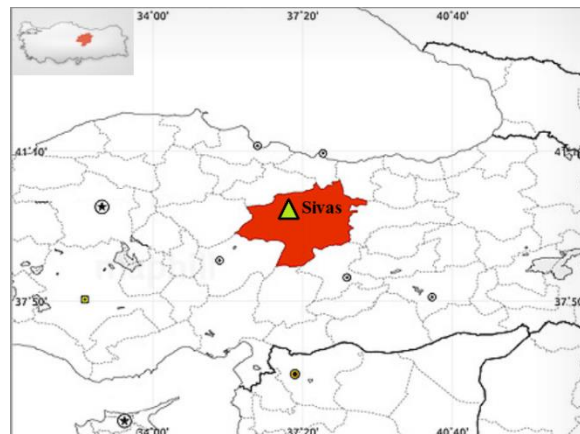
## II. MATERIAL AND METHOD

### 2.1. Data and Study Area

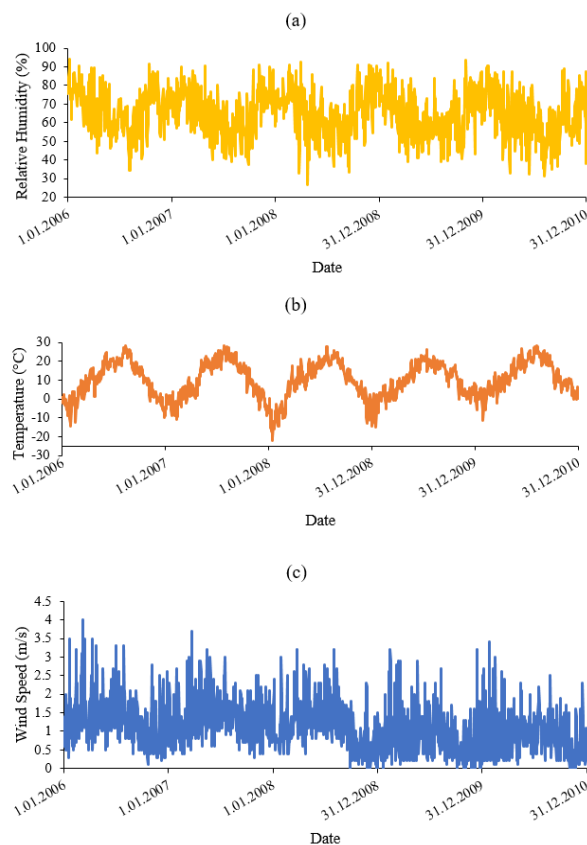
Before giving the properties of the study area, it is useful to explain the general characteristics of the climate of Turkey and the Central Anatolian Region. Turkey is affected by a subtropical climate regime that is called as “Mediterranean”. In summer, there are two dominant air masses (maritime polar (mP) and continental polar (cP)) in the country. On the other hand, northern and eastern parts of the country are affected by the Siberian high-pressure system in

winter. In the Central Anatolian Region, continental climate character is observed because of the topographic effect [17, 18].

In the study, daily relative humidity, temperature, and wind speed data of Sivas station obtained from the Turkish State Meteorological Service (MGM in Turkish acronym) were used. The altitude of the station is 1294 m asl. The observation period was taken to be 2006-2010. The coordinates of the meteorological station in Sivas are  $39^{\circ}44'37.3''\text{N}$  and  $37^{\circ}00'7.2''\text{E}$  (Figure 1). Figure 2 shows the time series of the variables used in the study.



**Figure 1.** Location of the meteorological station used in the study

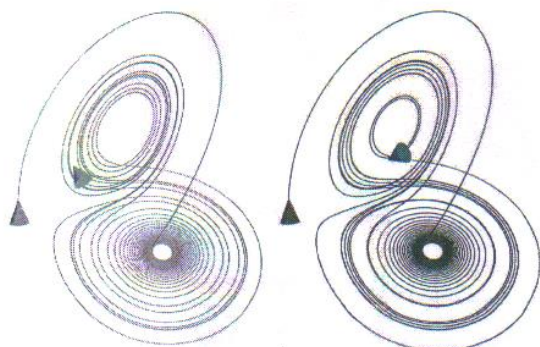


**Figure 2.** Time series of daily (a) relative humidity, (b) temperature, and (c) wind speed for 2006-2010

## 2.2. Methodology

### 2.2.1. Explanation of Lyapunov exponents

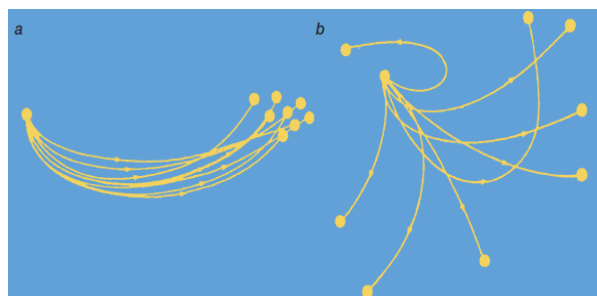
The reason why chaotic systems exhibit aperiodic dynamics is that each phase space curve has different exponential growth rates at almost the same initial conditions. This is called “sensitive dependence on initial conditions”. The Lyapunov exponent, also called stability exponent, is a measure of sensitivity to initial conditions. It is defined as the average of the local degrees of separation of neighboring curves in the phase space [19]. Figure 3 represents the trajectories of two attractors starting with different initial conditions.



**Figure 3.** Divergence of two orbits that have different initial points [20]

Although the difference between initial conditions is too little, an apparent difference between the final forms of the attractor can be easily seen [21].

Figure 4 shows the development of phase space for two weather predictions in a specific period. For initial conditions given in Figure 4(a), the predictions were stable and the reliability was very high. According to Figure 4(b), it can be said that a slight difference in initial conditions leads to larger differences in prediction. Predictions spread very wide areas in phase space. Thus, the atmosphere behaves chaotically and in this condition, it is hard to make a reliable prediction [22].



**Figure 4.** Time evolution of phase space for different weather predictions

Lyapunov exponents present the amount of convergence or divergence of nearby trajectories). Positive Lyapunov exponents exhibit divergence of the trajectories and chaotic process. In addition, the bigger Lyapunov exponent is an indicator of the shorter prediction time [23].

Lyapunov exponent represents the divergence degree of two nearby points in trajectory. The distance between two points is  $d_0$  in  $t=0$ , and change of distance with time can be expressed by using Equation (1):

$$d_0(t) = d_0 e^{\lambda t} \quad (1)$$

where  $\lambda$  parameter is named as Lyapunov exponent [24]. If any Lyapunov exponent of a system is greater than zero, this system is accepted to be chaotic. It was said that the higher positive Lyapunov exponent leads to lower future prediction reliability.

### 2.2.2. Reconstruction of phase space

Phase space reconstruction is a crucial process in time series prediction. Reconstructing a phase space of any system from observed data is a common procedure in nonlinear time series analysis [25]. Attractors of any dynamical system can be reconstructed by using the measured data. In order to reconstruct the phase space from any observed data, attractor information should be estimated from a given time series [14]. The time delay ( $\tau$ ) and embedding dimension ( $m$ ) are the two key parameters in the above-mentioned reconstruction process [26].

It is important to define the time delay accurately. If the time delay is chosen smaller than the typical period of the time series,  $x[n]$  and  $x[n+\tau]$  values are almost equal and the system does not have enough time to change its dynamics. On the other hand, if the time delay is defined as bigger, the difference between  $x[n]$  and  $x[n+\tau]$ . Thus, this leads to randomly distributed situations in the phase space. In order to obtain the optimum time delay, the mutual information function which was proposed by Fraser and Swinney [27] was applied to time series. Mutual information is defined as a quantity that measures the nonlinear interdependence between two random variables [10].

After obtaining the optimum time delay, the embedding dimension can be defined. The embedding dimension is the number of state variables that define the dynamics of any system. The most common method to obtain embedding dimension is the False Nearest Neighbors (FNN) approach. If any attractor is embedded in a phase space that has a lower dimension, some non-neighboring points of any single point seem like a neighbor. Besides, since the dimension is increasing, the percentage of false neighbors decreases. By plotting percentages of false

neighbors and embedding dimensions, the minimum percentage value is defined as the optimum embedding dimension [28].

2.2.3. Obtaining average prediction time by using Lyapunov exponent

As mentioned before, at least one of Lyapunov exponents must be greater than zero for a chaotic system. It will be hard to make a forward prediction while the Lyapunov exponent is getting bigger. The average prediction time of any meteorological variable can be given as Equation (2) below [29]:

$$T = 1/\lambda_{max} \ln(L/\epsilon) \tag{2}$$

where T is the prediction time, L is the attractor dimension,  $\epsilon$  is the measurement sensitivity. In the measurement system of our country, sensitivity can be accepted as 0.1. The dimension of an attractor is derived from the time series itself. Firstly, the original time series (x-axis) and lagged time series (y-axis) are plotted. The time lag is found by using the mutual information function algorithm. After plotting the original time series vs. lagged time series, the y-axis gives the attractor dimension of the parameter.

The embedding parameters, namely time delay ( $\tau$ ) and embedding dimension (m) were computed by using TISEAN (Time Series ANalysis) program [30]. Maximum Lyapunov exponents for each variable were calculated by using Nonlinear Dynamics Toolbox (NDT) program [31].

III. RESULTS AND DISCUSSION

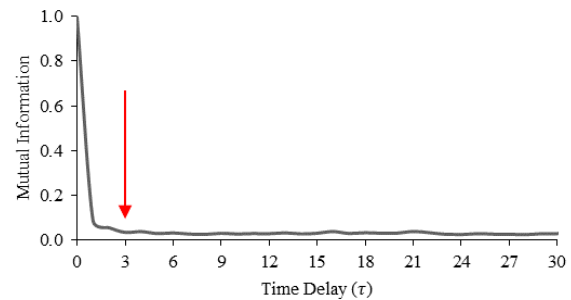
Table 1 represents the required parameters found in the study to define average prediction time. It is seen in Table 1 that embedding dimensions for relative humidity, temperature, and wind speed were obtained as 8, 12, and 10, respectively. Time delays of these three variables were attained as 6, 3, and 3, as well.

**Table 1.** Parameters required to calculate average prediction time

Variable	m (Embedding dimension)	$\tau$ (Time delay)	$\lambda_{max}$ (Maximum value of Lyapunov exponent)	L (Attractor dimension)
Relative Humidity	8	6	1.03	62
Air Temperature	12	3	1.04	43
Wind Speed	10	3	1.45	3.5

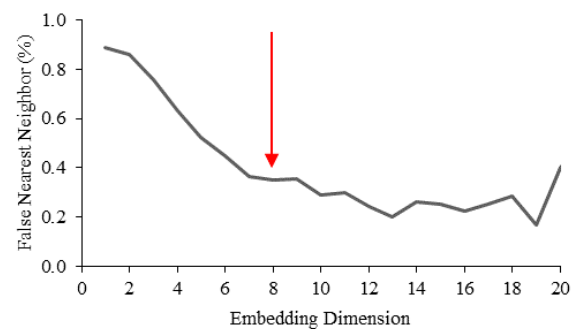
Figure 5 illustrates the mutual information function of wind speed values. The x-value of the first minimum of the mutual information function is accepted as the

optimum time delay. Thus, it is clearly said that the time delay of wind speed can be accepted as 3.



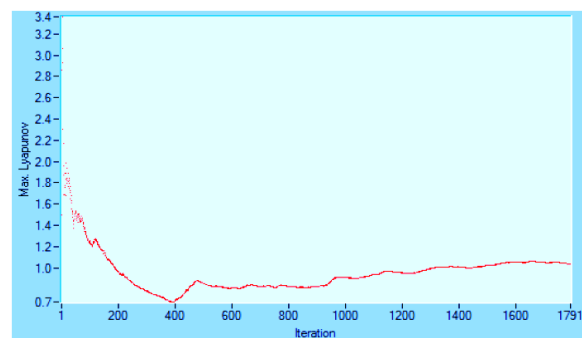
**Figure 5.** Mutual information function of wind speed values

Figure 6 shows the optimum embedding dimension of relative humidity values. The x-value of the first minimum of false nearest neighbor percentage can be accepted as embedding dimension. Therefore, the embedding dimension for relative humidity can be accepted as 8, as can be seen in Figure 6. After finding embedding parameters, maximum Lyapunov exponents for relative humidity, air temperature, and wind speed were 1.03, 1.04, and 1.45, respectively.



**Figure 6.** Embedding dimension vs false nearest neighbor for relative humidity values

Figure 7 represents the Lyapunov spectrums for air temperature. While looking at Figure 7, it is easily specified that the maximum Lyapunov value is fixed at a certain value. For air temperature, this value was obtained as 1.04.



**Figure 7.** Maximum Lyapunov exponent for air temperature values



Using Equation (2), it is possible to obtain the average prediction time for any variables. Table 2 represents the average prediction time for all variables. By using the findings above, the average prediction time for relative humidity, temperature, and wind speed was found as 6.2, 5.8, and 2.5 days, as well.

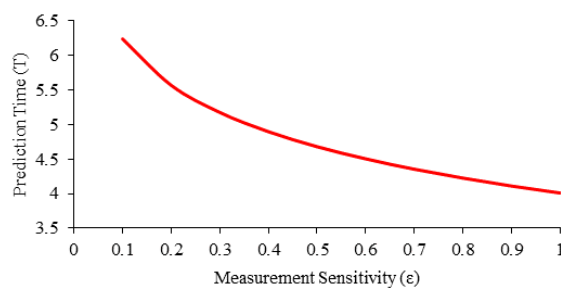
According to Table 2, relative humidity has the longest prediction time with nearly one week. A good relationship between maximum Lyapunov exponent value and average prediction time has been observed. While the Lyapunov exponent value is increasing, the average prediction time is decreasing, as well.

**Table 2.** Average prediction time for all variables

Variable	$\lambda_{\max}$	L	T
Relative Humidity	1.03	62	6.2 days
Air Temperature	1.04	43	5.8 days
Wind Speed	1.45	3.5	2.5 days

Finally, the average prediction time for different sensitivity was calculated while changing the sensitivity step by step. Figure 8 shows the average prediction time in relative humidity for different sensitivity values. As the sensitivity of the measurement system decrease, long-term prediction becomes more impossible.

The average prediction time is 6.2 days in 0.1 sensitivity for relative humidity, although that is 4.01 days in a 1.0 sensitivity value.



**Figure 8.** An example of average prediction time for different measurement sensitivity (relative humidity)

#### IV. CONCLUSION

As a generally known fact, long-term weather prediction is not possible because of the uncertainties in meteorological variables. Most of the variables in the atmosphere are controlled by a lot of independent variables. Thus, it is not easy to make a long-term prediction. A small difference in initial conditions of a variable produces higher differences in increasing time. This property is one of the most obvious criteria for chaotic behavior. Lyapunov exponent is a key element to determine predictability in any variable. The results obtained from the study will contribute to

decision-makers for planning and managing data-based sectors such as energy production, weather forecast, agricultural areas, etc. The findings obtained from this study might be helpful for a long-term prediction of any meteorologic variable. The magnitude of the positive Lyapunov exponent can be a good indicator for prediction time length. Besides, other factors such as measurement sensitivity should not be ignored for making an accurate prediction, as well. Finally, detailed studies should be conducted with more stations and more meteorological variables since the atmosphere has chaotic properties. As a future study, it is planned to apply the given method for other stations and other meteorological variables to obtain regional results all over the country.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors are grateful to the Turkish State Meteorological Service for providing the data that made this study possible.

#### REFERENCES

- [1] Yılmaz, M. U., Özgür, E., & Koçak, K. (2016). Monthly Streamflow Prediction of Yesilirmak Basin by Using Chaotic Approach. *International Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 9(2), 18-22.
- [2] Türkeş, M. (2008). Küresel iklim değişikliği nedir? Temel kavramlar, nedenleri, gözlenen ve öngörülen değişiklikler. *İklim Değişikliği ve Çevre*, 1(1), 26-37.
- [3] Senol, R. (2012). An analysis of solar energy and irrigation systems in Turkey. *Energy Policy*, 47, 478-486.
- [4] Peşkirioğlu, M., Özaydin, K. A., Özpınar, H., Nadaroğlu, Y., Aytaç Cankurtaran, G., Ünal, S., & Şimşek, O. (2016). Bitkilerin Sıcağa ve Soğuğa Dayanıklılık Bölgelerinin Türkiye Ölçeğinde Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Haritalanması. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 11-25.
- [5] Bian, L., Li, L., & Yan, G. (2006). Combining global and local estimates for spatial distribution of mosquito larval habitats. *GIScience & Remote Sensing*, 43(2), 128-141.
- [6] Duran, M. A., & Filik, Ü. B. (2015). Short-term wind speed prediction using several artificial neural network approaches in Eskisehir. In 2015 *International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, pp. 1-4. IEEE.
- [7] Liu, H., Chen, C., Tian, H. Q., & Li, Y. F. (2012). A hybrid model for wind speed prediction using empirical mode decomposition and artificial neural networks. *Renewable energy*, 48, 545-556.
- [8] Tongal, H. (2013). Nonlinear forecasting of stream flows using a chaotic approach and artificial neural networks. *Earth Sciences Research Journal*, 17(2), 119-126.

- [9] Albostan, A., & Onoz B. (2015). Günlük Akarsu Akımlarının Kaotik Analizinde Dalgacık Yaklaşımının Uygulanması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(1).
- [10] Özgür E., & Koçak K. (2011). Kaotik yaklaşımla kısa vade rüzgar hızı öngörüsü. *V. Atmosfer Bilimleri Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye.
- [11] Wang, W. G., Zou, S., Luo, Z. H., Zhang, W., Chen, D., & Kong, J. (2014). Prediction of the reference evapotranspiration using a chaotic approach. *The Scientific World Journal*, Article ID 347625
- [12] Vaheddoost, B., & Kocak, K. (2019). Temporal dynamics of monthly evaporation in Lake Urmia. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(3), 2451-2462.
- [13] Bahari, M., & Hamid, N. Z. A. (2019, June). Analysis and prediction of temperature time series using chaotic approach. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 286 p. 012027.
- [14] Koçak K. (1996). Kaotik Davranış Kriteri Olarak Fraktal Boyut Değişimi ve Dinamik Sistemlere Uygulanması. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- [15] Koçak K. (1997). Lokal Öngörü Yönteminin Yağış Verisine Uygulanması. *I. Ulusal Su Kaynaklarımız Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye.
- [16] Yılmaz, D., & Güler, N. (2006). Kaotik Zaman Serisinin Analizi Üzerine Bir Araştırma. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(4).
- [17] Tatlı, H., Dalfes, H. N., & Menteş, Ş. S. (2004). A statistical downscaling method for monthly total precipitation over Turkey. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 24(2), 161-180.
- [18] Tatlı, H., & Menteş, Ş. S. (2019). Detrended cross-correlation patterns between North Atlantic oscillation and precipitation. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(1), 387-397.
- [19] Eckmann, J. P., & Ruelle, D. (1985). Ergodic theory of chaos and strange attractors. *The theory of chaotic attractors*, 273-312.
- [20] Uzel S. (2008). Zaman serisi analizi üzerine bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- [21] Özgür E. (2010). Kaotik Yaklaşımla Rüzgar Hızı Öngörüsü. Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- [22] Koçak K. (2000). Kaos ve Atmosfer. *Tübitak Bilim ve Teknik*, 391, 94-97.
- [23] Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L., & Vastano, J. A. (1985). Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica D: nonlinear phenomena*, 16(3), 285-317.
- [24] Faure, P., & Korn, H. (2001). Is there chaos in the brain? I. Concepts of nonlinear dynamics and methods of investigation. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series III-Sciences de la Vie*, 324(9), 773-793.
- [25] Marwan, N., Romano, M. C., Thiel, M., & Kurths, J. (2007). Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics reports*, 438(5-6), 237-329.
- [26] Song, J., Meng, D., & Wang, Y. (2013). Analysis of chaotic behavior based on phase space reconstruction methods. *In 2013 Sixth International Symposium on Computational Intelligence and Design*, 2, pp. 414-417. IEEE.
- [27] Fraser, A. M., & Swinney, H. L. (1986). Independent coordinates for strange attractors from mutual information. *Physical review A*, 33(2), 1134.
- [28] Kennel, M. B., Brown, R., & Abarbanel, H. D. (1992). Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction. *Physical review A*, 45(6), 3403.
- [29] Schuster H. G. (1995). Deterministic chaos: an introduction, Third Edition, VCH.
- [30] Hegger, R., Kantz, H., & Schreiber, T. (1999). Practical implementation of nonlinear time series methods: The TISEAN package. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 9(2), 413-435.
- [31] Özgür, E., & Koçak, K. (2016). Investigation of Average Prediction Time for Different Meteorological Variables By Using Chaotic Approach. *In EGU General Assembly Conference*, EPSC201

## Benchmarking Urban Energy Efficiency with Deterministic and Stochastic Methods

*Kentsel Enerji Verimliliğinin Deterministik ve Stokastik Yöntemlerle Kıyaslanması*

Zühre AYDIN YENİOĞLU<sup>1</sup> , Züleyha Sara BELGE<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Energy Market Regulatory Authority, 06530 Çankaya, Ankara, Turkey

<sup>2</sup> Department of City and Regional Planning, Mersin University, 33110 Yenişehir, Mersin, Turkey

### Abstract

In urban sustainability researches, benchmarking methods have become the most needed ways to measure urban energy efficiency. Benchmarking the efficiency of urban energy with parametric and non-parametric methods are important cases within the energy field. Data Envelopment Analysis (DEA) and Stochastic Frontier Analysis (SFA) are ideal approaches to measure performance of various industries with multiple indicators. Stochastic method considers the noise in data and evaluates the critical success parameters of energy efficiency by separating noise from efficiency scores. This study evaluates urban energy efficiency by deterministic and stochastic ways with deploying DEA and SFA methodologies. The aim of the study is to show the effects and results of deterministic and stochastic approaches in urban energy efficiency measurement and to evaluate how Data Envelopment Analysis (DEA) and Stochastic Frontier Analysis (SFA) can be used to derive measures of efficiency and productivity change over time in complex multi-input contexts in the production and consumption of energy services. Using data gathered from Turkish Statistical Institute (TURKSTAT) and Energy Market Regulatory Authority (EMRA) Development Reports. In the study, 30 cities, which are accepted as metropolitans of Turkey by government, are selected as Decision Making Units (DMUs) of both methods. As a result, different efficiency estimates are presented and evaluated within the scope of statistical noise, multiple inputs and outputs by DEA and SFA methods.

**Keywords:** Urban Energy Efficiency; Urban Sustainability; Optimization for Energy Efficiency; Stochastic Frontier Analysis; Data Envelopment Analysis

### Öz

Kentsel sürdürülebilirlik araştırmalarında, kentsel enerji verimliliğini ölçmek için en çok ihtiyaç duyulan yöntemler kıyaslama yöntemleridir. Kentsel enerji verimliliğinin parametrik ve parametrik olmayan yöntemlerle kıyaslanması, enerji alanındaki önemli ihtiyaçlardır. Veri Zarflama Analizi (VZA) ve Stokastik Sınır Analizi (SSA), çeşitli endüstrilerin performansını çoklu göstergelerle ölçmek için ideal yaklaşımlardır. Stokastik yöntem, verilerdeki gürültüyü dikkate alır ve gürültüyü verimlilik puanlarından ayırarak, enerji verimliliğinin kritik başarı parametrelerini ortaya koyar. Bu çalışma, kentsel enerji verimliliğini VZA ve SSA metodolojilerini kullanarak deterministik ve stokastik yollarla değerlendirmektedir. Çalışmanın amacı, kentsel enerji verimliliği ölçümünde deterministik ve stokastik yaklaşımların sonuçlarını sunmak, VZA ve SSA etkinlik ölçümlerinin, zaman içinde çok çıktılı ve çok girdili enerji hizmetlerinin üretim ve tüketiminde, nasıl değişebileceğini göstermektir. Veri analizlerinde, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) ve Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) Kalkınma Raporlarından faydalanılmıştır. Türkiye'nin 30 metropolitani her iki yöntemde de Karar Verme Birimleri (KVB) olarak seçilmiştir. Sonuç olarak, VZA ve SSA yöntemleriyle, istatistiksel gürültü, çoklu girdiler ve çıktılar kapsamında farklı verimlilik tahminleri sunulmuş ve değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kentsel Enerji Verimliliği; Kentsel Sürdürülebilirlik; Enerji Verimliliğinde Optimizasyon; Stokastik Sınır Analizi; Veri Zarflama Analizi

## I. INTRODUCTION

Metropolitans are centers of energy demand, investment and consumption centers in the World [1]. Since there is a very rapid urbanization, urban energy efficiency becomes an important concept of urban sustainability. Measuring urban energy sustainability is a case for metropolitans to realize more sustainable urban energy development and to take consideration important achievement metrics of energy efficiency. Urban energy efficiency requires using less energy to produce expected factors. High-energy efficiency will reduce high investments and increase the social urban sustainability, necessary investments and environmental protection of world cities.

Realizing the needed determination of energy efficiency is critical to implement different approaches that maximize outputs and decrease investments [2]. Patterson who was the first researcher about energy efficiency, mentioned that there is no quantitative evaluation of efficiency which should be measured by a series of inputs and outputs [3].

Previous researches have indicated deterministic and classical methods, which present limited insight on the randomness and complexity of urban energy efficiency. Hence, these studies failed to gain stochastic techniques to measure the noise and uncertainty in data.

In recent years, more researches have been introduced different measuring methodologies to find solution for the complex questions of urban energy efficiency. Some of them studied economic situations depending on mathematical assumptions, the others implemented various kinds of models to see the high energy-consuming effect through critical and various parameters.

Between the econometric models and mathematical programming, two critical differences are the formulation of a production frontier function and the measurement of efficiency. The stochastic econometric model recognizes the effects of statistical noise in imprecise data, but since it is parametric, it requires determining a functional structure according to the type of process to be measured. It also provides for a statistical testing of hypotheses and the results of confidence intervals [4]. The mathematical programming approach is deterministic and non-parametric as DEA, and does not take error of data into calculations. It is a detailed model of multiple input output evaluation [5].

In this study, data analysis and benchmarking were made between 2018 and 2019, for the urban energy efficiency performances of 30 metropolitans in Turkey. There is a comparison of different deterministic and stochastic results of Stochastic Frontier Analysis (SFA) and Data Envelopment Analysis (DEA) for measurement of urban energy efficiency. This paper shows the strengths and weaknesses in estimating urban energy efficiency of these methods through noisy in energy data. Technical efficiencies of cities differ between two methods. Because in deterministic DEA approach there is no consideration of the uncertainty in data on the frontier. On the other hand, the SFA method allows calculating error in data. These approaches can be classified as parametric and non-parametric methods. In the parametric SFA method a cost or production frontier formulation is estimated statistically, but in the nonparametric DEA method mathematical programming techniques are used. This study is the first study used to show the effects and results of deterministic and stochastic approaches in urban energy efficiency measurement within BCC, CCR and Cobb-Douglas implementations.

The structure of the paper is organized as follows: The relevant literature was reviewed in Section 2 as 'Literature review'. The proposed approaches are presented in Section 3 as 'Methodology'. The

evaluation for urban energy efficiency of DMUs is implemented in Section 4 as 'Case study', and the paper is highlighted in Section 5 as 'Conclusion' and further research areas.

## II. LITERATURE REVIEW

The cities, which are economic and cultural activity centers, provide important life factors to both developed and developing countries [6], they are the consumer of energy and the determinants of urban energy efficiency. Urban energy consumption is also related with urban energy investments, climate, population density and economy. Hence local energy efficiency inspections, investment decisions and plans can increase global energy efficiency.

Doherty et al. [9] has presented the energy consumption of cities into three categories as; operational, embodied and transport energy.

World Energy Council [10], stated urban energy consumption through "economic improvement and the distribution of income, urban form and density profiles, urban culture and climate, demographic development, transition and age situation."

According to these definitions and perspectives, urban energy efficiency components in cities must be an integration of energy usage within lifecycle needs.

Forsström, et al. [11] introduced energy efficiency as the ratio of energy output and the energy input of the related factors. In this study, complex energy measurement output indicators were defined for service, process, goods and consumption. Energy efficiency is an important component of environmental sustainability and urban sustainable development. Natural energy resources are the results of ecological efficiency that can be defined as a part of sustainability. Hence, they said that; energy efficiency is a subset of ecological efficiency and sustainable development encompasses both of them [11].

There are different input and output parameters as energy efficiency measurement indicators. Patterson [3] has stated general energy efficiency factors as "thermodynamic, physical-thermodynamic, economic-thermodynamic and economic" groups. However, each group has strengths and weaknesses and in each of them allows choosing alternative indicators. For instance, energy intensity as energy consumption per unit of Gross Domestic Product (GDP) indicator shows total industry sectors' energy need to produce one unit of expected economic output.

There are many researches in literature on energy efficiency measurements. Keirstead [8] implemented three different approaches to investigate urban energy efficiency in United Kingdom. Keirstead [8] used ratio calculation, regression residuals and DEA methods.

The input indicators of DEA model were total energy consumption, land area, climate and population, while the output indicators were life expectancy, carbon dioxide emissions as undesirable output and access time to services.

Dizdarevic et al. [12] measured energy efficiency in the EU countries between 2000 and 2010. They implemented input-oriented CCR DEA model within capital, labour, and energy use as input parameters and gross domestic product as the output. Here, GDP was the most important factor because of the energy economy policies.

Li et al. [2] made energy efficiency calculation of high energy using industry by discussing the models BCC and CCR methods of DEA and SFA. This study presented an overview of energy efficiency measurement in high energy using industries. Economy, environmental factors, energy consumption, GDP, energy price and employees can be considered as indicators of linear frontier models. On the other hand, as technological indicators energy demand, resources can be considered as variables of constraint models. According to this study different implementations of energy efficiency measurement, DEA models are best approaches for multiple factors. In addition, energy-economic models enable authorities to make decisions and plans for future energy policies.

Yang et al. [13] represented a method of determining the energy intensive urban built environment for improving energy efficiency and understanding of how urban buildings consume energy. Building energy use may include imprecise, random error term shows unpredictable conditions like energy supply and demand imbalance, system faults, service quality, climate, weather uncertainty and data input failures. This randomness may have either positive or negative effect on measurement and can be interpreted as stochastic differences of energy efficiency. Since the random factors, uncertain situations and error in data have important impacts on building energy performance, this study utilized SFA to find out the efficiency frontier and to remove influences of random error [13].

Baycan and İlhan [14] aimed to measure urban energy efficiency by nonparametric DEA method and they calculated efficiency scores for 81 provinces of Turkey. They used population, area, energy

consumption, heating and cooling degrees as input factors, annual income, CO<sub>2</sub> emissions, average life expectancy as output factors. According to study; to make detailed and reliable studies in urban energy efficiency, there should be correct and high quality energy data, planned economical decisions and registered outputs, regular data evaluations of CO<sub>2</sub> emissions and energy efficient buildings in each city. Kuosmanen et al. [15] tried to show the best benchmarking method of energy efficiency with comparison of DEA, SFA and stochastic nonparametric envelopment of data (StoNED). They emphasized the importance of stochastic studies beside deterministic ones. Moutinho et al. [16] analyzed effect of urban air pollution in ecological efficiency through DEA and SFA in Germany. They found out that randomness and noisy in data like in climate change effects efficiency results.

In summary, SFA methodology contains calculation errors and provides the random instability of variables [2]. It leads to succession of measurement errors. On the other hand, it is hard to understand the determination of the error structure [18].

The deterministic approach DEA is a nonparametric linear programming methodology, which obtains an efficiency frontier using convex linear combination of factors. Besides, SFA requires a parametric expression of efficiency frontier function and supposes a compound error term, which stands for deviations from the frontier function. The compound error term means the sum of the stochastic inefficiencies and stochastic noise that is data error. StoNED is similar to SFA and DEA methods, with a compound stochastic error term and with a nonparametric, piecewise linear frontier function [22]. Lopes and Mesquita [23] showed that these models are preferred among the energy efficiency calculations for benchmarking.

In the study there are different measurement scores of urban energy efficiency with DEA and SFA models for 30 metropolitans in Turkey. These cities accepted as metropolitans by government according to their number of districts, service limits, total population, physical settlement status and economic development levels [17].

As a summary of the literature review, researches on energy efficiency benchmarking with DEA and SFA methods is presented below with Table 1.

**Table 1.** Literature review summary of the study.

Author(s)	Category	Study Descriptions
<b>Moutinho et al. (2021)</b>	Effect of urban air pollution in ecological efficiency through DEA and SFA in Germany.	Study found out that randomness and noisy in data like in climate change effects efficiency results.
<b>Yang et al. (2018)</b>	Energy efficiency and understanding of how urban buildings consume energy.	Building energy use may include imprecise, random error terms and this randomness may have either positive or negative effect on measurement and can be interpreted as stochastic differences of energy efficiency. Since the random factors, uncertain situations and error in data have important impacts on building energy performance, this study utilized SFA to find out the efficiency frontier and to remove influences of random error.
<b>Gil et al. (2017)</b>	Brazilian energy distribution benchmarking.	DEA efficiency scores of electricity distribution companies are calculated with higher scores than the original scores.
<b>Li et al. (2017)</b>	Energy efficiency calculation of high energy using industry by discussing the models BCC and CCR methods of DEA and SFA.	According to this study different implementations of energy efficiency measurement, DEA models are best approaches for multiple factors. In addition, energy-economic models enable authorities to make decisions and plans for future energy policies.
<b>Baycan and İlhan (2015)</b>	Urban energy efficiency measurement by nonparametric DEA method.	According to study; to make detailed and reliable studies in urban energy efficiency, there should be correct and high quality energy data, planned economical decisions and registered outputs, regular data evaluations of CO2 emissions and energy efficient buildings in each city.
<b>Kuosmanen et al. (2013)</b>	Study on the best benchmarking methods of energy efficiency with comparison of DEA, SFA and stochastic nonparametric envelopment of data (StoNED).	They emphasized the importance of stochastic studies beside deterministic ones.
<b>Lopes and Mesquita (2015)</b>	Study on benchmarking methods of energy efficiency with comparison of DEA, SFA and stochastic nonparametric envelopment of data (StoNED).	Showed that DEA, SFA and stochastic nonparametric envelopment of data (StoNED) models are preferred among the energy efficiency calculations for benchmarking.
<b>Doherty et al. (2013)</b>	Energy consumption in urban environments.	According to study; energy consumption of cities can be measured into three categories as; operational, embodied and transport energy
<b>Keirstead (2013)</b>	Benchmarking Urban Energy Efficiency	Study used ratio calculation, regression residuals and DEA methods. The input indicators of DEA model were total energy consumption, land area, climate and population, while the output indicators were life expectancy, carbon dioxide emissions as undesirable output and access time to services.

<b>Dizdarevic et al. (2012)</b>	Energy efficiency measurement in the EU countries.	They implemented input-oriented CCR DEA model within capital, labour, and energy use as input parameters and gross domestic product as the output. Here, GDP was the most important factor because of the energy economy policies.
<b>Forsström, et al. (2011)</b>	Energy efficiency study through, complex energy measurement output indicators defined for service, process, goods and consumption.	Energy efficiency is an important component of environmental sustainability and urban sustainable development. Natural energy resources are the results of ecological efficiency that can be defined as a part of sustainability. Hence, they said that; energy efficiency is a subset of ecological efficiency and sustainable development encompasses both of them
<b>Proposed Model</b>	In the paper, there are different benchmarking scores of urban energy efficiency measurement with deterministic and stochastic methods.	Study compared different deterministic and stochastic results of Stochastic Frontier Analysis (SFA) and Data Envelopment Analysis (DEA) for measurement of urban energy efficiency. This paper shows the strengths and weaknesses in estimating urban energy efficiency of these methods through noisy on the frontier. Technical efficiencies of cities differ between two methods.

### III. METHODOLOGY

As mentioned and overviewed in the literature part, there are two fundamental approaches, which are parametric analysis and nonparametric methods, applied to calculation of frontiers. The flowchart of the models are presented in Figure 1. Here SFA is the parametric analysis, DEA is the nonparametric method. The aim of using DEA and SFA methodologies in urban energy efficiency problem is measuring inefficiency of a DMU as the distance between an efficient DMU frontier and actual performance of the DMU and showing the divergent efficiency results of stochastic and deterministic methods. However, the two methods had different advantages and disadvantages. DEA needs no assumptions about the probability density of inputs and outputs on frontier. It joins noise as part of the efficiency score and assumes no errors and deviations from the efficient frontier. SFA allows deviations from the efficient frontier into a random error term that is statistical noise and a one-sided error term representing inefficiency. SFA needs the determination of a functional form for the frontier and assumptions about the distributions of the random error and inefficiency error terms. SFA can separate random noise from frontier.

#### 3.1. Data Envelopment Analysis

DEA is a mathematical analysis method that is used to evaluate the effectiveness of decision making units, that use multiple inputs to obtain multiple outputs. DEA was first presented by Farrell [19], then, the approach was introduced by Charnes et al. [20] who led the basis of a literature through operational research and economics. Charnes, Cooper and Rhodes [20] developed the first DEA application that was named the CCR model. Banker, Charnes and Cooper [21] studied the DEA to get a variable returns to scale

formulation of the CCR model that was named BCC model.

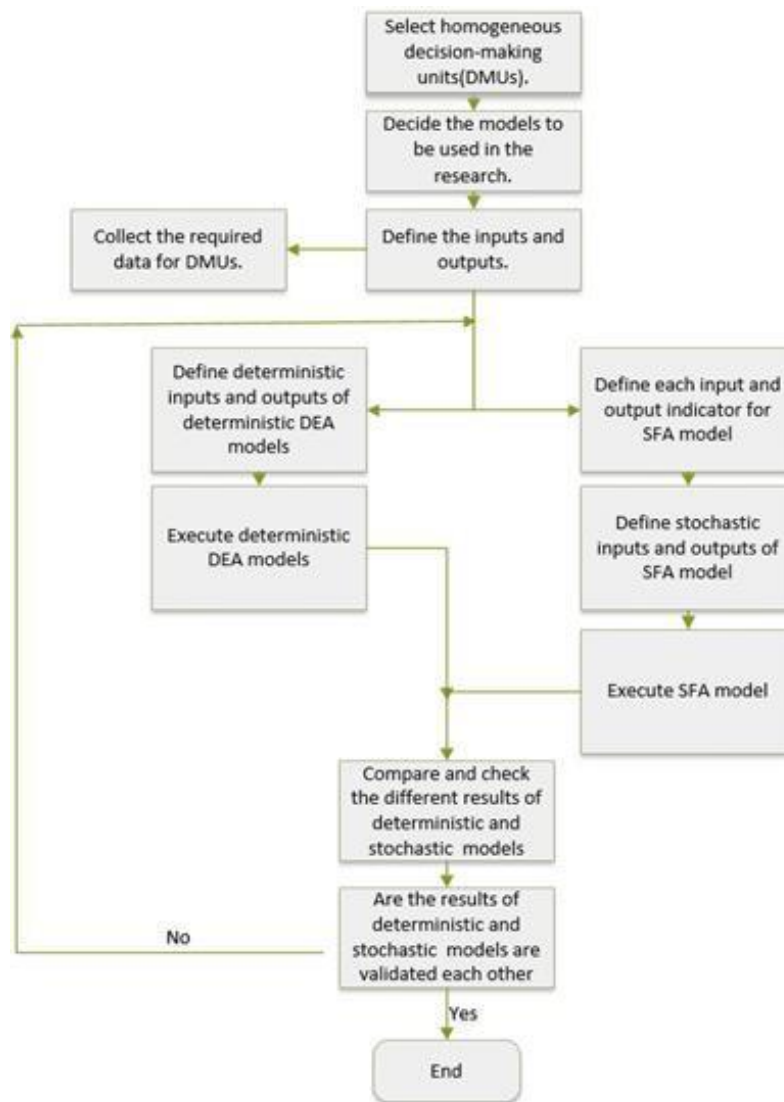
In this context, in our study a performance comparison was made by input oriented BCC and CCR DEA approaches. CCR model was used to analyze the set of DMUs that were using the production function with constant returns to scale. The reason for using CCR was to provide the possibility of separately calculating technical efficiency globally.

Technical efficiency calculates the DMU's overall success with related inputs. CCR model calculates the sector efficiency of a decision unit which contains technical and scale efficiency. In this approach the assumption is that outputs increase with an increase in inputs [2].

Mathematical equations of the input oriented and output oriented CCR models are given below. It is supposed that there are  $n$  homogenous DMUs ( $DMU_j, j = 1, \dots, n$ ) such that all of them use  $m$  inputs  $x_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) to obtain  $s$  outputs  $y_{rj}$  ( $r = 1, 2, \dots, s$ ),  $x_j = (x_{1j}, \dots, x_{mj})$  and  $y_j = (y_{1j}, \dots, y_{sj})$  which are nonnegative and nonzero vectors. The CCR model's production possibility set suggested by Charnes, Cooper, Rhodes in 1978 [20] is as follows:

$$T_{CCR} = \{(X, Y) / \sum_{j=1}^n (X_j \lambda_j) \leq X, \sum_{j=1}^n (Y_j \lambda_j) \geq Y, \lambda_j \geq 0, j = 1, \dots, n\}$$

CCR efficiency scores can be obtained by using the envelopment input-oriented and input-oriented equation (1), respectively where  $x_{ij}$  and  $y_{rj}$  represent the  $i$ th input and the  $r$ th output indicator vector of  $DMU_0$  under calculation in models.



**Figure 1.** The flowchart of the models for performance benchmarking of DMUs.

A DMU is named input oriented CCR efficient if its expected value in equation (1) is equal to unity.

$$\min \theta_0 + \varepsilon \left( \sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+ \right)$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j + s_i^- = \theta_0 x_{i0} \tag{1}$$

$$\sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j - y_{r0} - s_r^+ = 0$$

$$\lambda_j \geq 0, s_i^- \geq 0, s_r^+ \geq 0, i=1,2,\dots,m, r=1,2,\dots,s, j=1,2,\dots,n$$

The BCC model was based on variable returns to scale and derived by including CCR model convexity constraint. The effective BCC frontier, expressed in a tighter envelope, is closer to the decision units than the CCR frontier [21]. The BCC model obtains the pure technical efficiency of decision making unit locally. In the model assumption of variable returns to

scale means that the output indicators of model will not increase proportionally with an increase in input indicators [2].

The BCC production possibility set introduced by Banker, Charnes and Cooper in 1984 [21] is as follows:

$$T_{BCC} = \{(X, Y) / \sum_{j=1}^n (X_j \lambda_j) \leq X, \sum_{j=1}^n (Y_j \lambda_j) \geq Y, \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0, j = 1, \dots, n\}$$

A unit is called input oriented BCC efficient if its expected efficiency value in equation (2) is equal to 1.

$$\min \theta_0 - \varepsilon \left( \sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+ \right)$$

s.t.



$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n x_{ij}\lambda_j + s_i^- &= \theta_0 x_{i0} \\ \sum_{j=1}^n y_{rj}\lambda_j - y_{r0} - s_r^+ &= 0 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1 \\ \lambda_j &\geq 0, s_r^+ \geq 0, \end{aligned} \tag{2}$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad s_i^- \quad i=1,2,\dots,m, \\ r=1,2,\dots,s, j=1,2,\dots,n$$

Here the  $\lambda_j$  represent structural variables, the  $s_i^-$ ,  $s_r^+$  represent slacks and  $\varepsilon > 0$  is a “non-Archimedean infinitesimal” determined to be smaller than any positive real number. This means that  $\varepsilon$  is not a real number.

### 3.2. Stochastic Frontier Analysis

This section aims to introduce Stochastic Frontier Analysis, which is a parametric approach is used in efficiency and productivity measurement in the framework of mathematical and econometric assumptions. According to literature search, an overview of SFA models has been introduced in this part.

Researchers tried improving urban energy efficiency by considering investment and production. Farrell [24] presented SFA model to fill the gap between theoretical and empirical searches. This approach showed us that there was a parametric relation between model’s input and output indicators. In 1970s, SFA was first implemented in the evaluation of production function frontier by Aigner et al. [25].

The main feature of SFA is the estimation of a conventional function and the determination of efficiency or inefficiency by calculating the distance of each decision unit to the curve created by this function.

As emphasized before, the DEA method has deterministic structure so it ignores measurement errors. In SFA, frontier emphasizes the limit of production and stochastic term implies calculated error. Literature searches showed that the random indicators may affect production. Hence, the statistical error, which has normal and one sided distribution, included into the model. The SFA method fixes the disadvantages of measurement errors.

Aigner et al. [25] used cross-sectional data to estimate a production frontier, that was named a Cobb-Douglas production frontier. The Cobb-Douglas form of SFA model is a generally preferred functional form in stochastic frontier analysis studies. In SFA studies Cobb-Douglas production function is preferred because its various advantages such as its

understandable structure. Lau [33] has presented that, “this model makes computations easy and has the features of explicit representability, uniformity, parsimony and flexibility.”

Cobb-Douglas production frontier function’s form is given as in equation (3):

$$\ln(y_i) = \beta_0 + \sum_{n=1}^N \beta_n \ln x_{ni} - u_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \tag{3}$$

where  $y_i$  is the vector size of output that is produced by  $i$ th DMU,  $x_{ni}$  is the vector size of  $n$ th input that is used by  $i$ th DMU,  $\beta$  is unknown parameter and  $u_i$  is positive random variable that indicates technical inefficiency. But the equation (3) is a deterministic frontier as  $\exp(\beta_0 + \sum_{n=1}^N \beta_n \ln x_{ni})$ .

This deterministic frontier counts out the mathematical possibility of measurement error and statistical noises, and remarks all deviations from the frontier as only technical inefficiency [25]. Hence, stochastic production frontier function was presented by specifying random indicators that represented statistical noise.

In 1977, Aigner et al. [26] defined the model’s production function in deterministic and stochastic ways. Broeck et al. [27] introduced a new stochastic production function. They included symmetric random error for calculation of statistical noise. The formula is as follows.

$$y_i = f(x_i, \beta_i) + v_i - u_i = f(x_i, \beta_i) + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \tag{4}$$

where  $v_i$  independent random variable showing the  $N(0, \sigma_i^2)$  distribution and  $\varepsilon_i \leq 0$ . In the equation (4) it is assumed that  $\varepsilon_i$  is a composite error parameter consisting of two independent parameters,  $v_i$  and  $u_i$ .  $v_i$  includes noisy, errors that occur in determining the production function and also omissions caused by the independent parameter  $x$ .

If a DMU provides expected production with full efficiency, the technical efficiency is "1", but if it produces expected outputs under the optimal capacity its efficiency measure is less than 1, that is this DMU is inefficient. Another point to be considered is how the efficiency is calculated. If the problem is output maximization (production maximization), then the composite error term calculation is valid and it is  $\varepsilon_i = v_i - u_i$ . If the efficiency problem is input minimization (cost function), then the equation  $\varepsilon_i = v_i + u_i$  is valid [26].

In the paper FRONTIER Version 4.1 software was used for stochastic frontier analysis that transforms equation (4) to a logarithmic function as below equation (5) as in Broeck et al. [27].

$$\ln(y_i) = \beta_0 + \sum_{n=1}^N \beta_n \ln x_{ni} + v_i - u_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

Equation (5) represents the logarithm of inputs and outputs.

According to Coelli et.al. [28], Cobb-Douglas stochastic frontier function is as below:

$$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln x_i + v_i - u_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

$$y_i = \exp(\beta_0 + \beta_1 \ln x_i + v_i - u_i), i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

Since the study wants to use a production function and maximize our production, the usage of Cobb-Douglas production frontier function including cross-sectional data and supposing a half normal distribution is provided. In the urban energy efficiency study, the usage of the Cobb-Douglas production frontier is as below:

$$\ln(y_i) = \ln(x_i, \beta) + v_i - u_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

The SFA form of Cobb-Douglas production function is implemented for the years 2018-2019 and is modeled as follows.

$$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_1(\ln x_1) + \beta_2(\ln x_2) + \beta_3(\ln x_3) + \beta_4(\ln x_4) + v_i - u_i \quad (9)$$

In equation (8),  $y_i$  is the  $i$ th metropolitan's outputs' log,  $x_i$  is the  $i$ th metropolitan's inputs' logs,  $u_i$  is the  $i$ th metropolitan's inefficiency. In equation (9)  $x_1, x_2, x_3$  implies respectively; invoiced consumption (MWh), total installed power (MW), line length (Km) and population.

#### IV. CASE STUDY

Performance evaluation of urban energy efficiency includes the indicators of energy supply and demand balance, energy consumption, energy generation, energy investment components as installed power, line length and economy. With the optimal results of energy efficiency, GDP and investment are two important components. In energy efficiency studies, the importance of GDP had been realized by Hu and Wang [31].

Methodologies need to consider indicators to obtain the optimal outputs, Incomplete and uncertain data of energy industry is an important issue for efficiency measurement. Such that, according to deterministic models, the theory of probability is needed. As discussed widely in the literature, the major sources of uncertainty in the data used in the performance measurement of urban energy efficiency are costs, economy, data faults, energy demand and supply, regulatory issues such as unpredictability in the orders and laws. Deterministic solutions miss versatile decision-making and analysis processes. Because of these, in many industrial problems, managers deal with imprecise situations and random data. The noise

and randomness in data usually causes errors in frontier function and efficiency results. In these cases, data analysts can consider imprecise data as random indicators. By working with random inputs and outputs and realizing the possibility of uncertain situations, different perspectives of the available information can be detected in energy efficiency studies to make right energy policy. The main utility of random data in SFA models is the prediction of efficiencies in future optimization problems.

This study compares stochastic Cobb-Douglas production frontier including cross sectional data to maximize output, and input oriented deterministic CCR and BCC models. DEA and SFA are techniques that can be best measurement of urban energy efficiency of cities with multiple inputs and outputs.

#### 4.1. Indicators, Data Set and Data Statistics

In this part of the study, there is implementation of dataset from 2018 to 2019 to evaluate urban energy efficiency of Turkey's 30 metropolitans within stochastic and deterministic framework. Inputs are invoiced consumption (MWh), total installed power (MW), line length (Km) and population, while outputs are total generation (MWh), number of consumers and GDP per capita.

Descriptive statistics of the input and output indicators are presented in Table 2.

Table 3 and Table 4 show the logarithm of data that were added to Cobb-Douglas SFA model.

In addition to data set and basic descriptive statistics, correlation coefficients between variables used in the models were also calculated with SPSS in Table 5. This shows us an idea about the direction and size of the relationship between inputs and outputs.

Correlation coefficients of the data were obtained by using the averages of data indicators. According to Table 5, inputs and outputs have directly proportional relationship. It is also seen that all variables have a positive correlation with each other.

#### 4.2. Estimation of Results

In this section, efficiency results of models are discussed. The results of deterministic CCR model of expression (1) and BCC model of expression (2) were implemented on General Algebraic Modeling System (GAMS) mathematical programming and optimization system and SFA model of (9) were obtained from FRONTIER 4.1. Deterministic and stochastic results are included in Table 6 and Table 7 as follows.

**Table 2.** Descriptive statistics of the indicators

<b>Inputs</b>	<b>Mean</b>	<b>Median</b>	<b>Std. Deviation</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>
x1-Invoiced Consumption (MWh)	6.290.560,04	3.893.568,91	75.065.449,78	879.856	40.452.119
x2-Total Installed Power (MW)	1.965,17	2.002,95	1.328,02	100	4.527
x3-Line Length (Km)	24.853,73	20.782,00	14.186,71	10.593	71.709
x4-Population	2.116.510,47	1.362.698,00	2.665.698,78	767.848	15.067.724
<b>Outputs</b>	<b>Mean</b>	<b>Median</b>	<b>Std. Deviation</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>
y1-Total Generation (MWh)	6.388.647,71	5.690.800,06	5.434.535,62	16.639	18.584.686
y2-Number of Consumers	1.114.852,00	705.365,00	1.411.251,58	282.108	7.883.441
y3-GDP per capita	8.261,07	7.666,00	3.294,46	3.382	16.707

**Table 3.** Estimated input and output parameters of 2018

	<b>x1</b>	<b>x2</b>	<b>x3</b>	<b>x4</b>	<b>y1</b>	<b>y2</b>	<b>y3</b>
ADANA	15,71863	8,259919	10,23225	14,61307	16,72174	13,89078	8,838697
ANKARA	16,47614	7,947527	11,00471	15,52098	16,2819	14,89265	9,450144
ANTALYA	15,92878	7,550624	10,72322	14,7019	15,37748	14,34382	9,204825
AYDIN	14,79935	7,213547	9,926813	13,90877	15,54773	13,45426	8,826294
BALIKESİR	15,01754	7,949247	9,807362	14,01974	16,21013	13,76917	8,97221
BURSA	16,28544	7,876471	9,857025	14,91229	15,98165	14,30661	9,305741
DENİZLİ	15,0751	7,478481	9,965147	13,84291	15,57676	13,27341	9,116579
DİYARBAKIR	14,82812	7,734121	9,807307	14,36502	15,36927	13,19688	8,360539
ERZURUM	13,68751	6,202596	9,774233	13,55135	14,11538	12,81392	8,645762
ESKİŞEHİR	14,90925	6,560125	9,411565	13,67761	13,85659	13,29199	9,221379
GAZİANTEP	15,82764	6,528689	9,609787	14,52284	13,76599	13,5022	8,873608
HATAY	15,33529	7,918425	9,806536	14,29166	16,52292	13,53636	8,780941
İSTANBUL	17,51563	8,014197	11,18037	16,52807	15,94592	15,88028	9,696586
İZMİR	16,61626	8,416362	10,44599	15,27889	16,73785	14,72486	9,34688
KAHRAMANMARAŞ	15,211	8,417715	9,74373	13,95079	16,01713	13,08671	8,649974
KAYSERİ	15,11067	6,818793	10,10135	14,14458	14,40703	13,47854	8,983565
KOCAELİ	16,14421	7,651577	9,380421	14,46072	15,61601	13,73824	9,723583
KONYA	15,66414	6,725058	10,74231	14,60651	13,96152	13,9752	8,932609
MALATYA	14,31964	5,123369	10,07234	13,58866	12,56287	12,98026	8,583917
MANİSA	15,34944	7,758163	9,980078	14,17294	16,05141	13,62902	9,149634
MARDİN	14,37754	5,096018	9,338558	13,62821	9,719519	12,55005	8,485496
MERSİN	15,30502	6,958306	9,93953	14,4113	15,09836	13,82598	8,956351
MUĞLA	15,10634	7,74119	10,16439	13,78246	16,26748	13,34397	9,139703
ORDU	14,0491	6,172869	10,10545	13,55665	13,96561	13,17894	8,596374
SAKARYA	15,13731	7,838182	9,417111	13,82615	16,47421	13,18572	9,120525
SAMSUN	14,97997	8,276003	10,23218	14,10498	15,76155	13,61079	8,781555
ŞANLIURFA	15,3735	8,211953	10,29675	14,5264	15,56095	13,33635	8,129175
TEKİRDAĞ	15,71038	7,374942	9,267949	13,845	14,8575	13,31559	9,393162
TRABZON	14,22131	6,355013	9,94415	13,6022	14,21329	13,25662	8,929568
VAN	13,77971	4,602567	9,776903	13,93221	12,05714	12,81033	8,126223

**Table 4.** Estimated input and output parameters of 2019

	x1	x2	x3	x4	y1	y2	y3
ADANA	15,72576	8,26380	10,25171	14,62107	16,68923	13,91799	8,77550
ANKARA	16,46120	7,91317	11,02580	15,54523	16,07575	14,91065	9,34991
ANTALYA	15,96831	7,61494	10,75081	14,73647	15,42432	14,37155	9,12706
AYDIN	14,80828	7,18267	9,95802	13,92075	15,67355	13,48459	8,76695
BALIKESİR	15,03267	7,98557	9,81891	14,02140	16,06117	13,79342	8,92656
BURSA	16,28476	7,89266	9,88466	14,93266	15,81965	14,33795	9,24257
DENİZLİ	15,05028	7,52474	9,98806	13,85204	15,53683	13,31178	9,06347
DİYARBAKIR	14,76965	7,74527	9,84776	14,37875	16,01321	13,24440	8,28864
ERZURUM	13,69901	6,78294	9,77968	13,54378	14,05736	12,84174	8,60290
ESKİŞEHİR	14,91706	6,50031	9,48189	13,69614	13,96560	13,32437	9,15011
GAZİANTEP	15,88966	6,52258	9,63763	14,54275	14,02400	13,54389	8,83407
HATAY	15,29485	7,91739	9,83162	14,30341	16,42892	13,56610	8,74715
İSTANBUL	17,49228	7,94069	11,18238	16,55759	15,79041	15,90287	9,62791
İZMİR	16,55707	8,58435	10,47813	15,28964	16,42709	14,75890	9,29779
KAHRAMANMARAŞ	15,17722	8,42674	9,75063	13,95883	16,15144	13,12572	8,59841
KAYSERİ	15,10096	6,81161	10,13539	14,15726	14,61633	13,51981	8,88784
KOCAELİ	16,11513	7,62393	9,40179	14,48490	15,20160	13,77604	9,65778
KONYA	15,63730	6,80549	10,78230	14,61858	14,33773	14,00989	8,84645
MALATYA	14,30469	5,21602	10,08134	13,59257	13,02776	12,99926	8,51945
MANİSA	15,28788	8,01597	10,01118	14,18058	16,32692	13,65599	9,13580
MARDİN	14,36473	5,20872	9,36152	13,63970	11,34265	12,60175	8,42247
MERSİN	15,34276	7,01728	9,97562	14,42551	15,33807	13,85243	8,88854
MUĞLA	15,05618	7,75022	10,19062	13,79851	16,33687	13,37487	9,06843
ORDU	14,02365	6,19644	10,11286	13,53341	14,11983	13,21284	8,58093
SAKARYA	15,10651	7,84569	9,43052	13,84361	14,55491	13,22862	9,04674
SAMSUN	14,92495	8,14014	10,24409	14,11453	15,64022	13,65184	8,72328
ŞANLIURFA	15,36226	8,23454	10,32302	14,54480	16,28768	13,38375	8,07689
TEKİRDAĞ	15,74325	7,36822	9,44668	13,86944	14,46854	13,35311	9,33061
TRABZON	14,21124	6,39145	9,94228	13,60352	14,11226	13,27810	8,88672
VAN	13,81124	4,86738	9,80797	13,94369	12,44851	12,85042	8,07372

**Table 5.** Correlation coefficients between variables

		x1	x2	x3	x4	y1	y2	y3
x1	Pearson Correlation	1	,379*	,731**	,971**	,321	,971**	,708**
	Sig. (2-tailed)		,039	,000	,000	,083	,000	,000
	N	30	30	30	30	30	30	30
x2	Pearson Correlation	,379*	1	,274	,316	,819**	,316	,238
	Sig. (2-tailed)	,039		,142	,089	,000	,089	,204
	N	30	30	30	30	30	30	30
x3	Pearson Correlation	,731**	,274	1	,792**	,209	,811**	,383*
	Sig. (2-tailed)	,000	,142		,000	,267	,000	,037
	N	30	30	30	30	30	30	30
x4	Pearson Correlation	,971**	,316	,792**	1	,251	,991**	,576**
	Sig. (2-tailed)	,000	,089	,000		,181	,000	,001
	N	30	30	30	30	30	30	30
y1	Pearson Correlation	,321	,819**	,209	,251	1	,272	,300
	Sig. (2-tailed)	,083	,000	,267	,181		,146	,107
	N	30	30	30	30	30	30	30
y2	Pearson Correlation	,971**	,316	,811**	,991**	,272	1	,623**
	Sig. (2-tailed)	,000	,089	,000	,000	,146		,000
	N	30	30	30	30	30	30	30
y3	Pearson Correlation	,708**	,238	,383*	,576**	,300	,623**	1
	Sig. (2-tailed)	,000	,204	,037	,001	,107	,000	
	N	30	30	30	30	30	30	30

**Table 6.** Estimated results of 2018

	<b>CCR</b>	<b>BCC</b>	<b>SFA</b>
ADANA	0.8994	1.0000	0.7225
ANKARA	0.9802	1.0000	0.7806
ANTALYA	1.0000	1.0000	0.8963
AYDIN	0.9824	0.9859	0.7243
BALIKESİR	1.0000	1.0000	0.6466
BURSA	1.0000	1.0000	0.7985
DENİZLİ	0.8548	0.8752	0.8538
DİYARBAKIR	0.6529	0.8149	0.3987
ERZURUM	1.0000	1.0000	0.4585
ESKİŞEHİR	1.0000	1.0000	0.8429
GAZİANTEP	0.8059	0.9255	0.8599
HATAY	1.0000	1.0000	0.6701
İSTANBUL	1.0000	1.0000	0.7444
İZMİR	0.9929	1.0000	0.8140
KAHRAMANMARAŞ	0.6627	0.8072	0.6908
KAYSERİ	0.7822	0.7848	0.8049
KOCAELİ	1.0000	1.0000	0.8803
KONYA	0.8941	0.9042	0.8992
MALATYA	1.0000	1.0000	0.8870
MANİSA	0.8958	0.9117	0.7936
MARDİN	1.0000	1.0000	0.6797
MERSİN	0.9772	0.9941	0.7210
MUĞLA	1.0000	1.0000	0.8948
ORDU	1.0000	1.0000	0.6904
SAKARYA	1.0000	1.0000	0.7734
SAMSUN	0.8111	0.8267	0.5942
ŞANLIURFA	0.4435	0.5172	0.5698
TEKİRDAĞ	1.0000	1.0000	0.9281
TRABZON	1.0000	1.0000	0.6991
VAN	1.0000	1.0000	0.4699

**Table 7.** Estimated results of 2019

	<b>CCR</b>	<b>BCC</b>	<b>SFA</b>
ADANA	0.9508	1.0000	0.7135
ANKARA	0.9204	1.0000	0.7387
ANTALYA	0.9994	1.0000	0.8849
AYDIN	1.0000	1.0000	0.7480
BALIKESİR	1.0000	1.0000	0.5371
BURSA	1.0000	1.0000	0.7641
DENİZLİ	0.8602	0.8785	0.7684
DİYARBAKIR	1.0000	1.0000	0.3407
ERZURUM	1.0000	1.0000	0.2405
ESKİŞEHİR	1.0000	1.0000	0.7561
GAZİANTEP	0.8436	0.9461	0.9203
HATAY	1.0000	1.0000	0.6447

İSTANBUL	1.0000	1.0000	0.7011
İZMİR	0.9694	1.0000	0.6517
KAHRAMANMARAŞ	0.9614	1.0000	0.4940
KAYSERİ	0.8142	0.8142	0.7132
KOCAELİ	1.0000	1.0000	0.8444
KONYA	0.8784	0.9023	0.8290
MALATYA	1.0000	1.0000	0.9035
MANİSA	1.0000	1.0000	0.6817
MARDİN	1.0000	1.0000	0.3925
MERSİN	0.9994	0.9994	0.7631
MUĞLA	1.0000	1.0000	0.9997
ORDU	1.0000	1.0000	0.5616
SAKARYA	0.9212	1.0000	0.3825
SAMSUN	0.8551	0.9016	0.3762
ŞANLIURFA	0.7385	0.7396	0.4742
TEKİRDAĞ	1.0000	1.0000	0.9520
TRABZON	1.0000	1.0000	0.5284
VAN	1.0000	1.0000	0.3729

Table 8. Analysis results of Cobb-Douglas production function model

Parameter	Coefficient	Standard Error	T Ratio
$\beta_0$	2.283	1.930	1.182
$\beta_1$	0.320	0.205	1.563
$\beta_2$	-0.399	0.138	-2.884
$\beta_3$	1.126	0.148	7.610
$\beta_4$	-0.072	0.131	-0.548
$\sigma^2$	0.202	0.103	1.954
$\gamma$	0.850	0.243	3.497
<b>Log-likelihood</b>	-6.064		
<b>LR test of the one-sided error</b>	3.768		

The average results of Table 6 and Table 7 are presented and discussed under Table 9. In Table 8 the Cobb-Douglas production function analysis results can be observed. According to Table 8 the parameter  $\gamma=0.850$  represents statistical significance at the 1% level. That means most sources of inefficiency, in combined error term ( $\epsilon$ ) caused with 85% of technical inefficiency and 15% of random errors. In this context, although the technical inefficiency has a high rate within the combined error term, the existence of random errors cannot be ignored. The likelihood ratio test shows that inefficiency scores are statistically significant according to urban energy efficiency among metropolitans were identified. In Table 8 parameter coefficients of independent variables are also significant. The one-sided error LR test to evaluate the technical efficiency of DMUs can be taken into consideration. LR ratio was found to be approximately 3.768 and this value should be

compared with the table value of 2.706 in the Kodde-Palm with a restriction of 1 at 0.05 significance level [32].

$$H_0 : \gamma = 0$$

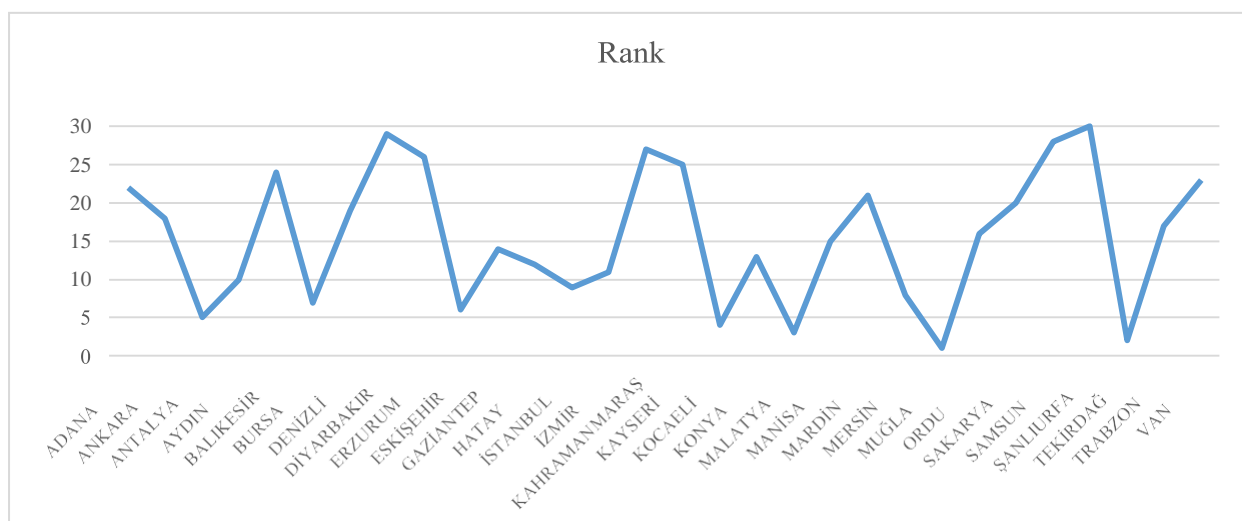
$$H_1 : \gamma \neq 0$$

Since 3.768 score is bigger than the table value of 2.706 in the Kodde-Palm,  $H_0$  hypothesis is rejected. This situation implies that, there is a statistically significant technical inefficiency in the model. The analyzed coefficients are also consistent with results from literature studies; for example, economically and socially underdeveloped cities inefficient according to developed ones.

Table 9 and Figure 1 show us average estimated 2018 and 2019 results and ranks of the CCR, BCC and SFA models.

**Table 9.** Average efficiency estimated results of models

	CCR	BCC	SFA	Rank
ADANA	0.9251	1.0000	0.7180	22
ANKARA	0.9503	1.0000	0.7596	18
ANTALYA	0.9997	1.0000	0.8906	5
AYDIN	0.9912	0.9929	0.7361	10
BALIKESİR	1.0000	1.0000	0.5918	24
BURSA	1.0000	1.0000	0.7813	7
DENİZLİ	0.8575	0.8768	0.8111	19
DİYARBAKIR	0.8265	0.9074	0.3697	29
ERZURUM	1.0000	1.0000	0.3495	26
ESKİŞEHİR	1.0000	1.0000	0.7995	6
GAZİANTEP	0.8248	0.9358	0.8901	14
HATAY	1.0000	1.0000	0.6574	12
İSTANBUL	1.0000	1.0000	0.7227	9
İZMİR	0.9812	1.0000	0.7328	11
KAHRAMANMARAŞ	0.8121	0.9036	0.5924	27
KAYSERİ	0.7982	0.7995	0.7590	25
KOCAELİ	1.0000	1.0000	0.8623	4
KONYA	0.8863	0.9032	0.8641	13
MALATYA	1.0000	1.0000	0.8952	3
MANİSA	0.9479	0.9558	0.7376	15
MARDİN	1.0000	1.0000	0.5361	21
MERSİN	0.9883	0.9967	0.7420	8
MUĞLA	1.0000	1.0000	0.9472	1
ORDU	1.0000	1.0000	0.6260	16
SAKARYA	0.9606	1.0000	0.5779	20
SAMSUN	0.8331	0.8641	0.4852	28
ŞANLIURFA	0.5910	0.6284	0.5220	30
TEKİRDAĞ	1.0000	1.0000	0.9400	2
TRABZON	1.0000	1.0000	0.6137	17
VAN	1.0000	1.0000	0.4214	23



**Figure 2.** Average efficiency estimated ranks of models for each metropolitan.

As seen in Table 9 in which average results and ranks of DMUs are included, Balıkesir, Bursa, Erzurum, Eskişehir, Hatay, İstanbul, Kocaeli Malatya, Mardin, Muğla, Ordu, Tekirdağ, Trabzon, Van are permanently efficient metropolitans in both the deterministic input-oriented CCR and BCC models. That is, they are technical efficient under constant returns to scale conditions when data errors are ignored. On the other hand, in deterministic framework Adana, Ankara, Antalya, İzmir, Sakarya are BCC efficient but, CCR inefficient DMUs. CCR model evaluates global and technical efficiencies of units according to the efficiency frontier. BCC model evaluates local and pure technical efficiencies. In summary, while the CCR model calculates both technical and scale efficiency scores, the BCC model estimates pure technical efficiency of units against the efficiency production function. Therefore, technical efficiency results of the BCC results are either higher than or equal to the CCR results. As can be seen from the deterministic results, it is easier for a decisionmaking unit to be BCC efficient than CCR efficient. Therefore, CCR efficient DMUs are also efficient in BCC model. The opposite is not always true for input oriented models. According to the results of the study, the efficiency values in the BCC model were equal to or greater than the CCR model. Since there is no significant difference between deterministic CCR and BCC technical efficiency results, Turkey's metropolitans have urban energy efficiency in scale except Aydın, Denizli, Diyarbakır, Gaziantep, Kahramanmaraş, Kayseri, Konya, Manisa, Mersin, Samsun, Şanlıurfa. These cities are inefficient in both models.

According to results of Cobb-Douglas output maximization stochastic frontier Tekirdağ and Muğla have the best performance. Diyarbakır, Erzurum, Samsun, Van have the lowest scores, and the other energy efficiency performances are higher than fifty percentages in stochastic framework. In addition, Erzurum and Van are locally and globally efficient in deterministic CCR and BCC models but their performance is under fifty percentages in stochastic framework. This confirms the situation of our  $\gamma$  parameter in which most sources of stochastic inefficiency, caused with technical operations and some sources caused with random errors. Consequently, study can inference that reliable urban energy efficiency evaluation highly relates with stochastic models.

Considering the inputs and outputs of models, the number of customers, population, total generation, invoiced consumption that impact unregistered energy usage because of loss-leakage ratio and energy supply-demand imbalance, GDP that impacts the correct investment decisions, line length that impacts the low amount of energy distribution issues seem to be the cause of inefficiency, but it can be said that the

inefficiency will be eliminated by increasing the values of these parameters.

## V. CONCLUSION

Evaluation of urban energy efficiency performance has different forms, aims and implementations. It can be seen from literature, there is no definite methodology to evaluate energy efficiency on urban researches. To the best of our knowledge, this is the first study estimating the urban energy efficiency of Turkey's metropolitans with both parametric and nonparametric, deterministic and stochastic models.

The CCR model compares companies that have operations in homogenous or non-homogeneous way and creates an overall/global efficiency scores, while the BCC model compares companies with operations in homogeneous way and creates local efficiency scores. By the study, it has been shown that the uncertainty of the data causes stochastic inefficiency. These results suggest that more attention should be paid to error levels to evaluate stochastic efficiency.

According to the results, permanently inefficient cities need agricultural irrigation in large areas due to the regions where they are located. This situation causes excessive waste due to unregistered electricity use in agricultural irrigation. The wasteful consumption leads excessive load on power lines and transformers. There is also loss-leakage in energy usage in these cities. Loss-leakage ratio, causes unregistered electricity use and this means high load on power lines also. The other inefficiency reasons are; insufficient line lengths in large areas, investment that is not well planned and not on time, supply-demand imbalance due to the excess number of subscribers and loss- leakage ratio.

The issues that causes inefficiency can be overcome with; increasing investments in networks through inspection, directing the audits in a way that minimizes the inputs and maximizes the outputs of the cities, making legal and deterrent regulations in combating unregistered electricity use, increasing service quality by renewing network infrastructures and commissioning new technology projects and facilities, taking into account the parameters as area, line length, population and number of subscribers while making the investment decision.

As a result; examining the effect of uncertainty with a high tendency in societies such as our country, avoiding uncertainty is important in terms of predicting reactive or proactive approaches of organizations in uncertain environments. This study shows us that, stochastic models, which take into account uncertainties and random variables, can be used to measure the urban energy efficiency for reliable decision making in energy policies. Study can offer for policy implications; using remote, smart electricity



meters, e-invoice applications, taking into account the loss ratios differences of electricity consumption, gaining available and beneficial data because of registering the accurate consumption. In future studies, the application of random variables to other stochastic models for the urban energy efficiency of decision making units and the effect of changes in input and output parameters on modeling can be examined.

## REFERENCES

- [1] International Energy Agency. World Energy Outlook (2008). Head of Communication and Information Office, France.
- [2] Li, M., Tao, W., (2017). Review of methodologies and polices for evaluation of energy efficiency in high energy-consuming industry. *Applied Energy* 187, 203–215.
- [3] Patterson MG. (1996). What is energy efficiency: concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*. 24(5):377–90.
- [4] Hjalmarsson, L., Kumbhakar, S.C., Heshmati, A., (1996). DEA, DFA and SFA: A comparison. *Journal of Productivity Analysis* 7 (2/3), 303+328.
- [5] Charnes A, Cooper WW, Rhodes E. (1981). Evaluating program and managerial efficiency: an application of data envelopment analysis to program follow through. *Manage Sci*;27:668–97.
- [6] Keirstead, J. (2007). Selecting sustainability indicators for urban energy systems. *International Conference on Whole Life Urban Sustainability and its Assessment*. Glasgow.
- [7] Keirstead, J. (2007). *Towards Urban Energy System Indicators*. London: Imperial College London.
- [8] Keirstead, J. (2013). Benchmarking Urban Energy Efficiency. *Energy Policy*, 575- 587.
- [9] Doherty, M., Nakanishi, H., Bai, X., & Meyers, J. (2013). Relationships between form, morphology, density and energy in urban environments. Canberra, Australia: CSIRO Sustainable Ecosystems.
- [10] WEC. (2010). *Energy and Urban Innovation*. London: World Energy Council.
- [11] Forsström, J., Lahti, P., Pursiheimo, E., Rämä, M., Shemeikka, J., Sipilä, K., (2011). *Measuring Energy Efficiency: Indicators and Potentials in Buildings, Communities and Energy Systems*. Finland: VTT.
- [12] Dizdarevic, N. V., & Segota, A. (2012). Total-factor energy efficiency in the EU Countries. *Zb. rad. Ekon. fak. Rij*, 247-265.
- [13] Yang, Z., Roth, J., Jain, R. (2018). DUE-B: Data-driven urban energy benchmarking of buildings using recursive partitioning and stochastic frontier analysis. *Energy and Buildings* 163, 58-69.
- [14] Baycan, T., İlhan, C. (2015). *Measuring Urban Energy Efficiency in Turkey*. Thesis (M.Sc.), Istanbul Technical University -Institute of Science and Technology.
- [15] Kuosmanen, T., Saastamoinen, A., Spilainen, T. (2013). What is the best practice for benchmark regulation of electricity distribution? Comparison of DEA, SFA and StONED methods. *Energy Policy* 61, 740-750.
- [16] Moutinho, V., Madaleno, M., Macedo, P. (2020). The effect of urban air pollutants in Germany: eco-efficiency analysis through fractional regression models applied after DEA and SFA efficiency predictions. *Sustainable Cities and Society* 59, 102204
- [17] Yetkin, O. (2020). *The Structure and Future of Metropolitan Municipality in Turkey*. *Akademik Düşünce Dergisi* 1.
- [18] Li MJ, Song CX, Tao WQ., (2016). A hybrid model for explaining the short-term dynamics of energy efficiency of China's thermal power plants. *Applied Energy*. 169:738–47.
- [19] Farrell MJ., (1957). The measurement of productive efficiency. *J R Stat Soc Ser A. Gen*,120,253-90.
- [20] Charnes, A., Cooper, WW., Rhodes, E., (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research* 2 , 429-444.
- [21] Banker, R.D., Charnes, A., Cooper, W.W.,(1984). Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science*, 30, 1078– 1092.
- [22] Gil, D. R. G., Costa, M. A., Lopes, A. L. M. , Mayrink V. D.,(2017). Spatial statistical methods applied to the 2015 Brazilian energy distribution benchmarking model: Accounting for unobserved determinants of inefficiencies. *Energy Economics*, 64, 373-383.
- [23] Lopes, A.L.M., Mesquita, R.B., (2015). Tariff regulation of electricity distribution: A comparative analysis of regulatory benchmarking models. *The 14th European Workshop on Efficiency and Productivity Analysis, Helsinki. Proceedings of the 14th European Workshop on Efficiency and Productivity Analysis*
- [24] Farrell MJ. (1957). The measurement of productive efficiency. *J Royal Statist Soc (A, General)*;120 (3):253–81.
- [25] Aigner, D.J., and Chu, S.F. (1968), On Estimating the Industry Production Function, *American Economic Review*, 58(4), 826–39.
- [26] Aigner D, Lovell CK, Schmidt P. (1977) Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *J Econ* 1977;6(1):21–37.
- [27] Broeck, V., Meeusen, W. (1977). Efficiency Estimation from Cobb-Douglas Production Functions with Composed Error. *International Economic Review* Vol. 18, No. 2 , 435-444

- 
- [28] Coelli, T.J., Rao, D.S.P., O'Donnell, C.J., and Battese, G.E. (2005), *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*, 2nd edition, Springer
- [29] G.E. Battese, G.S. Corra, (1977). Estimation of a production frontier model: with application to the pastoral zone of eastern Australia, *Aust. J. Agric. Econ.* 21 169–179
- [30] G.E. Battese, T.J. Coelli, (1992) Frontier production functions, technical efficiency and panel data: with application to paddy farmers in India, *J. Product. Anal.* 3 153–169
- [31] Hu JL, Wang SC. (2006). Total-factor energy efficiency of regions in China. *Energy Policy*;34(17):3206–17.
- [32] Coelli, T. J. (1995). Estimators and hypothesis tests for a stochastic frontier function: A monte carlo analysis. *Journal of Productivity Analysis*, 6, 247-268.
- [33] Lau, L. (1986). “Functional Forms of Econometric Model Building.” In Griliches, Z. And Intriligator, M.D. eds., *Handbook of Econometrics*, V.3, pp.1513-1566.

## Solution Proposals for Fires Occuring in the Laminatoin Units of Inline Lamination Machines

*İnline Laminasyon Makinalarının Laminasyon Ünitelerinde Meydana Gelen Yangınlar İçin Çözüm Önerileri*

Hasan Uğur ÖNCEL<sup>1</sup> , Emre RESULOĞLU<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>TC İstanbul Gedik Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, 34906, İstanbul, Türkiye  
<sup>2</sup>TC İstanbul Gedik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 34906, İstanbul, Türkiye

### Abstract

In general, a flexible packaging factory consists of extrusion machines for film production, printing machines for printing on packaging (using inks), lamination machines for making multilayer structures with various substrates (using adhesives) and slitting machines to bring the produced packaging to the final dimensions for use in the food product packing process.

The inks and adhesives used in printing and laminating machines must be dissolved and diluted in order to be applied and ethyl acetate is commonly used as a solvent. The mixture ratio of solvent in the total solution can reach up to 80%. Ethyl acetate, a highly flammable substance, is the cause of many fires in the printing industry. Although printing and lamination are traditionally two separate processes done independently of each other, increasing competition and productivity requirements have guided machine manufacturers to make these two processes on a single machine and eventually led to the realization of inline printing-laminating machines. Such machines operate continuously, using automatic splicing of reels of base material to keep running without stopping or even slowing down.

In the flexible packaging sector, ethyl acetate fires generally occur in the enterprises' printing and lamination machines, along with ink and adhesive preparation areas. In this study, the causes of fires occurring in an inline rotogravure printing machine's lamination units after the automatic splice during lamination of printed polypropylene with metallized polypropylene are examined and the precautions to be taken to prevent these fires are discussed.

**Keywords :** Inline printing-lamination machines, fire, ethyl acetate, adhesives, packaging factory, safety

### Öz

Genel olarak bir esnek ambalaj fabrikası, film üretimi için ekstrüzyon makinalarından, mürekkep kullanarak ambalaj üzerine baskı yapan baskı makinalarından, çeşitli yapıştırıcılar vasıtasıyla çok katmanlı yapılar elde edilmesini sağlayan laminasyon makinalarından ve üretilen ambalajları ürünlerin paketlenmesine el verecek şekilde nihai boyutlara getiren kesme makinalarından oluşur.

Baskı ve Laminasyon makinalarında kullanılan mürekkeplerin ve yapıştırıcıların uygulanabilmesi için çözülmesi ve seyreltilmesi gerekir ki etil asetat bu işlem için kullanılan solventler arasında en yaygın olanıdır. Çözücünün toplam çözücü içerisindeki karışım oranı %80'e kadar ulaşabilir. Son derece yanıcı bir madde olan etil asetat, baskı endüstrisindeki birçok yangının nedenidir. Baskı ve laminasyon geleneksel olarak birbirinden bağımsız olarak yapılan iki ayrı işlem olmasına rağmen, artan rekabet ve verimlilik gereksinimleri makina üreticilerini bu iki işlemi tek bir makinada yapmaya yönlendirmiş ve nihayetinde inline baskı-laminasyon makinalarının hayata geçmesine yol açmıştır. Bu tür makinalar durmadan hatta yavaşlamadan, birbiri ardına gelen hammadde bobinlerini otomatik olarak birbirine eklemeyerek sürekli olarak çalışırlar.

Esnek ambalaj sektöründe etil asetat yangınları genellikle işletmelerin baskı ve laminasyon makinalarında, mürekkep ve tutkal hazırlama alanlarında meydana gelmektedir. Bu çalışmada, bir inline rotogravür baskı-laminasyon makinasının laminasyon ünitesinde, baskılı polipropilen filmin metalize polipropilen film ile laminasyonu sırasında otomatik ekleme sonrası oluşan yangınların nedenleri incelenmiş ve bu yangınları önlemek için alınması gereken tedbirler tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler :** Inline baskı-laminasyon makinaları, yangın, etil asetat, yapıştırıcı, ambalaj fabrikası, iş güvenliği

## I. INTRODUCTION

The main inputs for the printing and lamination operations used to make packaging films are film, ink and adhesive. Inks and adhesives used in the printing industry can be water or solvent-based, meaning that either water or organic solvent is the type of solvent used for a given ink or adhesive. Solvent-based inks and adhesives are widely used in rotogravure printing and lamination machines due to their ability to evaporate and dry quickly with less energy than needed for water.

Chemicals such as acetone, ethanol, ethyl acetate, propanol, propyl acetate, methyl ethyl ketone and toluene are included in the group of solvents.

Ethyl acetate is the preferred type of solvent used in rotogravure printing machines due to ease of use with many ink and adhesive systems, availability of recovery systems, cost advantages, and relatively minor impact on employee health compared to other organic solvents. The use of this highly flammable and combustible solvent brings with it many safety risks, especially the risk of fire. Therefore, the prevention of fires involving ethyl acetate is of vital importance in the printing industry [1].

The three essential elements for a fire to occur are combustible material, oxygen, and heat.

In this study, the combustible material is ethyl acetate, which is used extensively in printing and lamination machines.

Another of the three main components required for a fire to occur is oxygen. Analysis reveals that the probability of ignition of ethyl acetate at a concentration of 2.5% at 1 bar and 100°C is 10% when the oxygen concentration is 9.40%, and 50% when the oxygen concentration is 9.46%.

Considering that the production in the printing sector takes place under normal atmospheric conditions and the oxygen content in the air under these conditions is considered to be 21%, it can be clearly seen that ethyl acetate vapor with a concentration between LEL-UEL can easily be ignited if it encounters a sufficient heat source [2].

The last of the conditions for the fire to occur is the heat source. The energy sources that cause ethyl acetate to ignite in printing and lamination machines can be listed as static electricity, the heat generated by friction and flame sources.

Fires caused by ethyl acetate are frequently reported in factories operating in the flexible packaging industry [3].

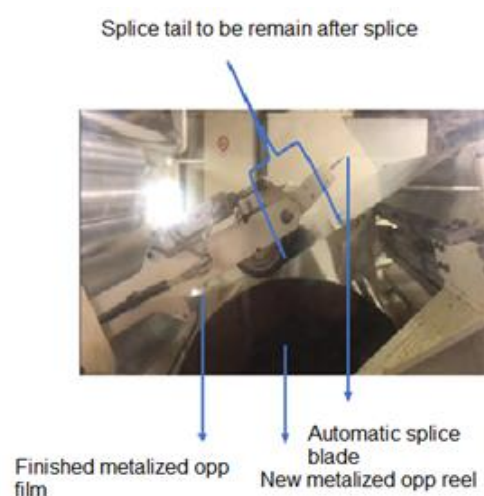
These frequent fires give rise to significant costs, serious productivity loss and sometimes loss of life and property.

In this study, fires occurring at the entrance to the drying tunnel of an inline rotogravure printing machine's lamination unit, following the automatic splice during lamination of printed oriented polypropylene ("printed OPP") with metallized oriented polypropylene ("metallized OPP"), are examined to determine causes and to discuss potential solutions. Such fires were reported in several factories of a global packaging company and became a chronic

problem in the Turkey factory.

## II. MATERIALS AND METHODS

In this study, reports for fires occurring at the entrance to the drying tunnel in several factories were examined, along with fire reports and in-situ evaluation of fires with printed OPP/metallized OPP that occurred in the Turkey factory. Other film types subject to the same process were also evaluated. Repetitive fire incidents were observed to occur during the passage of the splice between the finished and the new reel of metallized OPP through the drying tunnel. The "tail" of the new reel from the unwinder unit is attached to the film unwinding from the finished reel with double-sided tape. This combined "splice tail" then passes through the first drying tunnel of the 11th unit.



**Figure 1.** Automatic splicing unit

At a machine speed of 250 metres/minute, the splice tail reaches the lamination unit approximately 5 seconds after the automatic splice takes place. For reasons of food safety, the metallized surface of the metallized OPP should not come into contact with the food product, therefore the metallized surface is the one making with contact the adhesive cylinder to be coated with solvent-based adhesive before entering the drying tunnel. Fires were observed to occur synchronously with the entrance of the splice tail into the tunnel.

After drying, the metallized OPP film (with dried but still tacky adhesive) and the printed OPP film are brought into contact in the lamination roller group located in the second drying tunnel of the 11th unit. No flames were observed at any time in the second drying tunnel.

Following the fire, the film breaks; the machine then detects the loss of tension in the film via a load cell and automatically stops. With the machine stopped, the fire in the tunnel itself ends but continues to propagate onto the adhesive trolley.

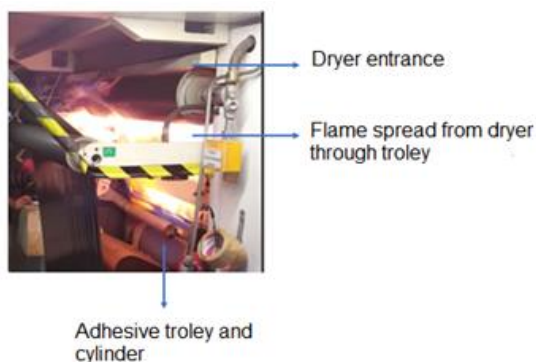


Figure 2. Fire incident experienced

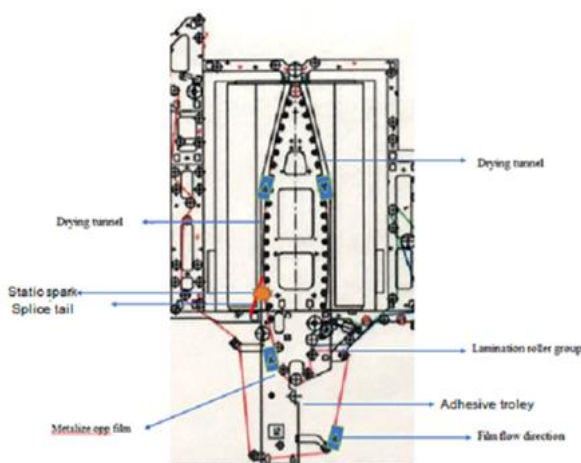


Figure 3. Lamination unit with fire

In light of the data obtained from the observations, the root cause analysis of the recurrent fires was made, and the result was reached by applying the Ishikawa method.

2.1. Measurement

Indications of friction (scratches, lines, discolouration etc) were searched for in the dryer tunnel and adhesive trolley and no evidence was found. Temperature measurements of the roller bearings in the unit were made, and the values were found below 36 °C which is accepted normal in printing industry considering the boiling temperature is 77 °C for ethyl acetate. Before the dryer enters the tunnel, a device (Fraser 710 static meter) was used to measure the level of static electricity on the metallized OPP film in units of kV from a distance of 100mm. The static electric charge on the film was measured as 0 kV. The average ethyl acetate LEL values in the dryer tunnel were determined to be between 22-27% by utilizing the Honeywell catalytic LEL sensors in the dryer tunnel. These values were recorded for each ignition experienced at different times.

The surface and insulation resistance of the printing impression rollers used during the fires that occurred in the unit were measured using a Megger MIT 420

resistance measurement device. It was seen that a refurbished (“covered”) sleeve was used in all but one of the flashes, but one fire also occurred when a new (“original”) sleeve was used.

Table 1. Resistance values of the printing impression rollers used in the lamination unit at times of fire accidents.

Sleeve Type	Surface resistance 1	Surface resistance 2	Surface resistance 3	Insulation resistance
Covered	39,6 (MΩ)	41,6 (MΩ)	63,6 (MΩ)	8,2 (MΩ)
Original	20 (kΩ)	20 (kΩ)	20 (kΩ)	< 1(MΩ)

The humidity level of the working environment was measured by two digital moisture measuring devices in order to verify against each other. The relative humidity of the production environment varied between 17-39% during the periods when fires occurred. The electrostatic printing assist system's voltage value were obtained from the machine control panel and was determined as 27 kV. It was observed that the system was switched off (no voltage applied) in the unit where the fire occurred.

2.2. Material

Flames occur only when the splice tail passes through the first tunnel shortly after the metallized OPP film and the new film are spliced, from which point the splice goes to the lamination unit to bring together the printed OPP and metallized OPP film. The surface of the laminated metallized OPP film is covered with aluminum. After the splice, the OPP surface of the tail part remaining behind the joint is in contact with the metallized surface of the film to which it is connected by double-sided tape. Although printing and lamination of materials such as OPP-opaque OPP, polyester-opaque OPP, OPP-OPP, co-extruded polypropylene-metallized polyester were performed on the same machine and with the same production method, no ignitions were observed with any film type other than metallized OPP film.

It is known that the impression roller, which ensures the film makes contact with the steel cylinder providing the adhesive transfer, was refurbished as a result of wear. This roller was linked with one sequence of repeated fires. However, in one of the ignition cases it was determined that a non-refurbished roller with surface and insulation resistance values below the 1 MΩ value recommended by the sleeve manufacturer was used.

The grounding condition of the adhesive unit and the equipment in the chamber was checked and resistance was not detected, indicating that grounding condition was good which is below 1 ohm.

The lamination adhesive consists of 30% solid substances mixed with 70% ethyl acetate solvent.

### 2.3. Machine

The machine consists of 12 units in total, with the first 10 units for printing, the 11th unit for lamination, and the 12th unit for application of cold seal (a kind of water-based coating). The 11th and 12th units each have two drying tunnels. Ignitions were experienced in the first drying tunnel of the 11th unit of the machine.

The machine was manufactured in 2006 under the relevant European standards and was installed in a factory of the enterprise in Belgium. No fire had been reported for the 11th or 12th units of the machine by the factory in Belgium, which did not produce a product that requires cold seal application after lamination and used the 12th unit as a lamination unit.

In 2017, the machine manufacturer revised the 12th unit to apply cold seal and the 11th unit was modified to also complete the lamination process. However, all units' parameters are the same, and both units are connected to the same exhaust line on which the same ventilation fan works. Other factories throughout the enterprise used machines without revisions, i.e. no modifications to do lamination in the 11th unit, yet several fires were reported during the lamination of OPP-metallized OPP films on both these same-brand unmodified machines and also on other brands of machine. Therefore, it is believed that the modification of the units in the Istanbul machine did not exacerbate the problem with fires.

All units are connected to the suction line of the recovery facility to send their exhaust gases to the solvent recovery system.

Inside the drying tunnel of the 11th unit, there are teflon coated aluminum rollers with a distance of 20 cm between them. The machine can automatically combine the reels to make 40-50 cm additional tail. There are static neutralization bars at the entrance and exit of the machine's 11th unit, and the electrostatic printing assistant (which applies controlled levels of static electricity to aid ink pick-up by the film) was not active in this unit.

In the first period where fires were often occurring in the dryers, positive pressure was being applied, meaning that the amount of hot drying air blown into the tunnel was greater than the air removed by the exhaust.

When negative pressure was applied in the tunnel fires also occurred, but the duration of observation of flames from the outside of the tunnel was prolonged and the severity of the fires decreased dramatically. As evaporated ethyl acetate suction is limited in dryer under positive pressure condition, combustible

material accumulation causes both to be LEL level exceeded and fire to be large and severe. Conversely as negative pressure means sucked air is more than blown air, in the dryer under negative pressure condition, evaporated ethyl acetate accumulation would be less, as a result, possibility to be reached LEL level unlikely or possible fire intensity would be lower.

### 2.4. Method

In the production process where fires occurred, printed OPP film and metallized-OPP film were laminated in the 11th unit with the metallized surface "sandwiched" in the middle.

The finished laminated film and the new reel are automatically spliced to each other, and a 40-50 cm long tail is formed during the splicing. The OPP surface of the bottom makes contact with the metallized surface of the film to which it is attached.

The width of the lamination film is 1 m.

Machine speed is 250 m / min.

In the lamination unit, the adhesive is applied so as to leave 2.5 g / m<sup>2</sup> of solid material on the film after the drying process. Therefore, before entering the drying tunnel, there is liquid adhesive on the film at 8.33 g / m<sup>2</sup> per square meter.

The 11th unit dries the applied adhesive layer by evaporating ethyl acetate at 110° C in the first drying tunnel and 80° C in the second tunnel.

In the second drying tunnel, the average LEL value decreases to 12%. Therefore, it is understood that the largest part of ethyl acetate evaporates in the 1st drying tunnel.

### 2.5. Human factors

The machine senses that the tension on the ruptured film has reduced to zero after the fire, and automatically stops. Starved of fuel (no further liquid adhesive entering), the fire in the tunnel ends.

The ongoing fire in the unit trolley caused by propagation of flames out of the bottom of the dryer tunnel was extinguished manually by operators using CO<sub>2</sub> extinguishers. The automatic fire extinguishing system was activated in only one case, that being due to a delay in manual intervention.

There was no human intervention in the process during the time period when an increased number of fires were occurring in the relevant unit.

Support has been received from the machine manufacturer for ensuring the pressure balance between blowing and suction in the unit.

## 2.6. Environment factors

Production environment is kept constant between 20°-30° C in all seasons of the year using heaters and coolers.

Ignitions are generally occurring between March and November in Turkey. There are no cases in the summer. Flames occurred when the ambient humidity values were in the range of 17% -39%.

## III. RESULTS AND DISCUSSION

Ignition sources while ethyl acetate concentration in between LEL-UEL and measures should be taken in printing machines' around or dryers are listed below briefly:

- a- Flames : Cutting, welding, grinding etc... activities creates flame or sparks and can be the ignition source in explosive atmosphere. Therefore these kind of activities must not be done around printing unit while flammable gases and liquid are exist in working area.
- b- Static electric : Static generation in printing machine might be stemmed from human, equipment, liquid and materials such as cleaning rags, plastic bottles etc... Measures to be taken to eliminate static electricity are ;
  - work place should be clean, ink splash should be avoided, all solvent cans should be closed and quantity of solvent should be minimised
  - shoe foot test plates must be in place for employees to test their shoes for static dissipative properties daily
  - employees' cloths should be made of fabric that will not produce static electric.
  - any flammables at the press must be adequately grounded, testing regularly is imperative. Earthing/grounding clamps must be clean and tested.
  - machine body and machine parts must be grounded properly, be tested regularly
  - work environment humidity should be appropriate with the product's insulation/conductivity characteristics
  - trolleys used for transporting flammable liquids must be clean with adequate grounding straps in place
  - active and passive static neutralizers must be installed in the relevant machines to avoid static generation on film product and be tested regularly
- zero tolerance for plastics being used for flammable liquids. (I.E. buckets, jugs, cleaning containers such as floor mop buckets)
- solvent flow speed in pipe line should be limited to allow to discharge of static load according to relaxation time for each type of solvent
- c- Friction : Friction can cause spark and over heating on machine parts. Additionally over heating can reach a temperature which might be autoignition temperature for solvents. Therefore all set-ups should be done properly, moving parts of machinery should be checked and heat controls must be done regularly. Tools which can create spark when contact with should be used in flammable atmosphere.
- d- Electrical devices : Electrical equipment must be suitable for flammable atmosphere and tested regularly.

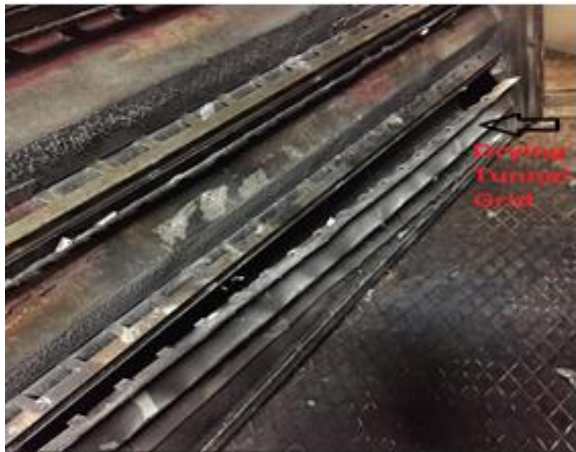
In this study the fuel source is the solvent vapor emitted at the entrance and middle part of the dryer tunnel. Although the average LEL value in the tunnel does not reach 100%, the measurement is taken by sampling the air in the dryer recirculation duct, which is a blend of air from all parts of the dryer tunnel.

This average does not adequately reflect the situation in the dryer, because the LEL value is not the same at every point of the tunnel. Also, there is a high concentration of ethyl acetate in the form of a thin layer at every point on the film surface.

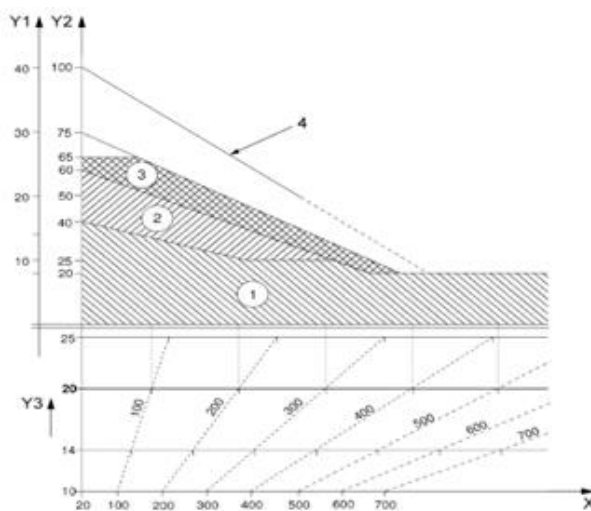
As a result of the drying air blown at 110° C temperature, ethyl acetate will evaporate rapidly due to having a boiling point of 77° C. Due to the application of 5.8 grams per square meter of ethyl acetate on the film moving at 250 m / min, it was calculated that the concentration of ethyl acetate in air could be within the range 2%-11.5% (the LEL-UEL values for ethyl acetate), especially just after the entrance of the tunnel.

An ethyl acetate-air mixture at this concentration and temperature has an ignition energy of 0.46 mJ. If it encounters an energy source above this level it can easily be ignited. During the investigation of fire cases, the damage detected in the grate where the blowing nozzles at the entrance of the tunnel and the carbonization on its surface are proof that the flames started at the bottom of the tunnel [3] [4] [5] [6].

It must not be forgotten that, as the temperature in the dryer tunnel increases, the LEL% value at which ignition occurs decreases (Figure 5).



**Figure 4.** Damage and darkening of the dryer tunnel sub-grids after fire.



**Figure 5.** Maximum acceptable concentration and temperature values for inflammable substances

X) Maximum drying temperature

Y1) Concentration g / m<sup>3</sup>

Y2) LEL%

Y3) Δ LEL% / 100 K

The chart above (Fig. 5) is taken from the BS EN 1539:2015 standard for the design of dryers and ovens operating with substances that produce highly flammable/flammable gases. As can be understood from the graph, as the temperature increases in the environment with solvent vapor, the LEL% value required for explosion/flammability decreases. Since the starting point of the graph is 20 °C and at this temperature a solvent at 100% LEL level can reach the ignition level, when there is a temperature increase to 100 °C, ignitions can occur at 80% measured LEL [7].

In the trial studies carried out on the machine following the first fire incident, there was positive pressure in the tunnel. Flames became visible on the

trolley some 2 seconds after the splice tape entered the tunnel, and this event occurred in the same way each time.

After ventilation adjustments were made to reduce the solvent concentration in the dryer tunnel, negative pressure was created in the tunnel. No fire was observed during the passage of the splice tail in on-site observations made under conditions of negative pressure.

However, under these conditions, fire incidents still occurred in the tunnel at various other times; these cases were investigated through video recordings made by the cameras available in the production area. In cases of negative pressure in the tunnel, the time for flames to spread out of the dryer extended and reached up to 27 seconds.

When there was positive pressure in the tunnel, each passage of a splice resulted in a fire; while with negative pressure in the tunnel both the frequency and intensity of fires decreased.

There is no evidence of friction that can create a heat source in the unit or dryer, and there is no electronic equipment in the tunnel that may cause a fire.

Since the static electricity voltage difference value measured on the film is zero, static electricity discharge due to the film itself was ruled out.

Fires occurred only during the splice. After the splice, a 40-50cm long tail is created. Fires also occurred when the tail's length was reduced to 10 cm by widening the tape area used for attaching the films to each other. Many electrostatic discharges may be the result of the accumulation of energy at individual points on a charged, non-conductive solid material, which may cause the initiation of ignition [6].

Fires occur only in processes where metallized OPP film is used as lamination material and the automatic splicing function of the machine is activated.

It has been observed that fires occur in the autumn and winter months when the humidity in the atmosphere is low, but not in the summer months, and moisture appears to be the main factor in the emergence of an ignition source resulting in the the conditions of a fire. Following this finding, a humidification system that will stabilize the humidity in the production environment at 50% and above in seasons when atmospheric humidity is low was installed in the production building. No ignition case was encountered in the period from 14.01.2020, which is the system's commissioning date, until the writing date of this article.





**Figure 6.** (7x0.17mm ) Pulverized spraying equipment and pump assembly

In addition to the conditioning system installed in the production environment, an atomized water spray system was installed in the 11th unit at the entrance of the first drying tunnel. This helped prevent the remaining 10 cm tail part from fluctuating while at the same time the conductivity of the film surface was increased. In addition, the ethyl acetate concentration at the tunnel entrance was further reduced.

For the system, the pump has a water spraying capacity of 1 liter per minute, feeding water to 5x0.15mm spray nozzles at the point where the film comes out of the nip between the impression roller and the application cylinder. The water spray from these nozzles helps to ensure surface conductivity. A further 2x0.15mm nozzles spray water to act as a barrier between the tail and the main film at the time of entering the tunnel, with an additional set of 5x0.15mm nozzles, intended to reduce the ethyl acetate concentration, installed at the tunnel entrance.

Friction and pressure occur in the tunnel between the OPP surface of the leading part of the splice tail, which tends to be negatively loaded, and the aluminum surface of the trailing part of the splice tail, which tends to be positively loaded. This situation causes electron transfer between the two materials. With the airflow effect in the tunnel, the two films are constantly and alternately brought into contact with each other and separated. Since the two films have different triboelectric properties, a static charge accumulates. Discharge occurs between the two materials when the charge is large enough to force the

two layers to stabilize their charges. The static discharge created is considered to be the energy source of the fires that occurred [8].



**Figure 7.** Dryer tunnel inlet pulverized water spray system.

**Table 2.** Tribo Electric series

Positive ↑	Glass Mica Polyamide (Nylon 6,6) Rock salt (NaCl) Wool Fur Silk Aluminum Poly(vinyl alcohol) (PVA) Poly(vinyl acetate) (PVAc) Paper Cotton Steel Wood Amber Poly(methyl methacrylate) (PMMA) Copper Silver Gold Poly(ethylene terephthalate) (Mylar) Epoxy resin Natural rubber Polyacrylonitrile (PAN) Poly(bisphenol A carbonate) (Ilexan, PC) Poly(vinylidene chloride) (Saran) Polystyrene (PS) Polyethylene (PE) Polypropylene (PP) Poly(vinyl chloride) (PVC) Polytetrafluoroethylene (Teflon, PTFE)	↑ Positive TiO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub> HfO <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
↓ Negative		

According to the results of the tests carried out by Bill W. Lee and David E. Orr, it is seen that the polypropylene film tends to be negatively charged during rubbing with the metallized surface in the triboelectric table. As a result of 1 Joule of frictional energy, 90 NC equivalent electron charge passes from metal to polypropylene, and the film is negatively charged [9].

**IV. CONCLUSION**

The relative humidity and temperature values of the production environment highly affect the mass and surface conductivity values of the materials. With environmental humidity, the surface resistance of many materials can be controlled. At 65% and higher

relative humidity levels, many materials can absorb enough moisture to provide enough surface conductivity to prevent static electricity accumulation. The same materials at a humidity level of less than 30% become very good insulators and the accumulation of static electricity increases. Likewise, in an environment with humidity levels lower than 30%, the film becomes insulating and static electricity is charged. In the study, it was observed that no static discharge occurred in between OPP and metallized OPP film as both materials did not produce static discharge by gaining sufficient conductivity in a working environment with a relative humidity of 50% or more [10].

When the drying tunnels (which take their fresh air from the production environment), bring in ambient air at high humidity levels, the humidity of the air in the dryer will weaken the possibility of ethyl acetate reaching the LEL level required for ignition. In the observations made, it was observed that the average LEL value inside the tunnel was 22% in a production environment at 36% humidity and 20% in a production environment at 50% humidity.

The positive pressure in the dryer tunnel increases the possibility of fire due to the excessive concentration of solvent in the tunnel, increases the fire's intensity, and increases the possibility that the flames will rapidly exit from the tunnel to ignite the materials in the unit and its surroundings. Therefore, negative pressure should be created in tunnels where easily flammable materials such as ethyl acetate are dried and tunnel pressure should be checked regularly.

In products where metallized OPP film is used as a lamination material, the tail length should be zeroed or minimized as far as possible in order to prevent static accumulation and discharge.

Although the unit cost is higher and the energy requirement for its evaporation is higher compared to the solvent, water-based adhesive should be considered for use.

To prevent static electricity build-up on the film, grounding of machinery and equipment should be provided. Rotating equipment should have low surface and insulation resistance, and care should be taken to ensure that the oils used in bearings are conductive [6].

## REFERENCES

- [1] National Fire Protection Association (NFPA), "NFPA 30: Flammable and Combustible Liquid Code," 2008 ed.
- [2] Osterberg, Paul M., Niemeier, Jeffrey K., Welch, Christopher J., Hawkins, Joel M., Martinelli, Joseph R., Johnson, Thomas E., Root, Thatcher W., Stahl, Shannon S. (2014). "Experimental Limiting Oxygen Concentrations for Nine Organic Solvents at Temperatures and Pressures Relevant to Aerobic Oxidations in the Pharmaceutical Industry " Organic Process Research Development ACS Publications Special Issue: Oxidation and Oxidative Reactions" 19, 1537-1543, <https://doi.org/10.1021/op500328f>
- [3] Bijay N. Pattanaik, Hireen C. Mandalia. (2011). Ethyl acetate: properties, production processes and applications. International Journal of Current Research and Review. Vol. 03 issue 12.
- [4] European Solvents Industry Group. Flammability : A Safety Guide for Users- Safe Working with Industrial Solvents, Best Practice Guidelines no4 version3, June 2013.
- [5] NFPA ® 497, Recommended Practice for the Classification of Flammable Liquids, Gases, or Vapors and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas, 2008 Edition.
- [6] Wiechula, B. M. (2013) The incendivity hazards of electrostatic discharges from charged, non-conductive solid materials. Review. Fire Safety Journal 60, 46-55.
- [7] BS En 1539: 2015 Dryers and Ovens, in which Flammable Substances are Released- Safety Requirements. BSI Standards Publication.
- [8] Kim, Yeon Joo, Lee, Jaejun, Park, Sangwon, Park, Chanho, Park, Cheolmin, Choi, Heon-Jin (2017) " Effect of the Relative Permittivity of Oxides on the Performance of TriboelectricNanogenerators" RSC Advances, 7, 49368, <https://doi.org/10.1039/c7ra07274k>
- [9] Haiyyang Zou, Ying Zhang, Litong Guo, Peihong Wang, Xu He, Guzhang Dai, Haiwu Zheng, Choyu Chen, Aurelia Chi Wang, Cheng Xu, and Zhong Lin Wang. Quantifying the triboelectric series, *Nat Commun.* 2019; 10: 1427, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09461-x>
- [10] NFPA ® 77, Recommended Practice on Static Electric, 2007 Edition.

## Polipropilen/Üzüm Sapı-Çeltik Polimer Kompozitinin Mekanik Özelliklerinin Atık Cam Elyaf ile Geliştirilmesi

*Improving the mechanical properties of polypropylene/grape stalk/paddy polymer composite with waste glass fiber*

Münir TAŞDEMİR<sup>1</sup> , Elif Gülcan ŞEN<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Böl., İstanbul, 34722, Türkiye

<sup>2</sup>Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst., Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Böl., İstanbul, 34722, Türkiye

### Öz

Bu deneysel araştırmada; polipropilen (PP) üzüm sapı ve çeltik karışımlarının özelliklerinin atık cam elyaf ilavesi ile geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Atık olan üzüm sapı ve çeltiğin yeniden kullanılabilir bir malzeme olma potansiyeli diğer merak edilen bir konuyu oluşturmuştur. Polipropilen üzüm sapı ve çeltik çift vidalı ekstrüderde homojen bir karışım sağlamak için karıştırılmıştır. Çeltik; pirinç kabuğu olarak bilinmektedir. PP içerisine %20 oranında üzüm sapı-çeltik katılmıştır. Cam elyaf ise %10-15 ve 20 oranlarında katılmıştır. Daha sonra enjeksiyon makinesinde test numuneleri basılmıştır. Kalıplanan numunelere; çekme, sertlik, darbe, yoğunluk ve taramalı elektron mikroskopisi testleri yapılmıştır. Testlerin sonuçları incelenerek üzüm sapı-çeltik ve cam elyaf miktarının polipropilen üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Polipropilen, üzüm sapı, çeltik, mekanik özellikler, polimer kompozit.

### Abstract

In this experimental research; It has been studied to improve the properties of polypropylene grape stalk and paddy mixtures by adding waste glass fiber. The potential of waste grape stalk and paddy to be a reusable material has created another curious subject. Polypropylene grape stalk and paddy were mixed in a twin screw extruder to provide a homogeneous mixture. Paddy; It is known as rice husk. Grape stalk-paddy was added to the PP at the rate of 20%. Glass fiber was added at 10-15% and 20% rates. Then the test samples were molded on the injection machine. Molded samples; Tensile, hardness, impact, density and scanning electron microscopy tests were performed. By examining the results of the tests, the effects of grape stalk-paddy and glass fiber amount on polypropylene were determined.

**Key words:** Polypropylene, grape stem, rice husk, mechanical properties, polymer composite.

## I. GİRİŞ

Dünya çapında polimer bilimi hızlı bir biçimde gelişmektedir. Bunun en büyük delili sürekli güncellenen formülasyonlar ve karışımlar olarak gösterilebilir. Polipropilen içerisine odunsu lif veya tozlarının katıldığı çeşitli çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Odun kökenli malzemelerden lif ya da öğütülerek toz haline getirilen selüloz bazlı bu malzemeler, polimerlere katılarak odun plastik kompozitler olarak adlandırılan kompozit malzeme grubunu oluşturmaktadır. Son yıllarda odun plastik kompozitler diğer kompozit grupları arasında belirli bir pazar payı edinmeye başlamıştır. Öğütülmüş plastik ve ahşap atıklarının belli oranlarda ve sıcaklıklarda birleştirilmesi sonucu elde edilen odun plastik kompozitler, endüstride farklı amaçlarda kullanılmak üzere malzeme biliminde yerini almaya başlamıştır [1]. Literatür incelendiğinde odun lifi ya da tozu %70 seviyelerine kadar katılabilmektedir. Akçaağaç ve çam gibi odun malzemelerinin yapısında selüloz ve lignin bulunur [2]. Odun malzemenin yüksek sıcaklıkta kalıplanması bozunmaya sebebiyet vereceğinden kullanılacak plastik malzemenin de düşük erime sıcaklığında olmasını gerektirir. Odun plastik kompozit üretimde selüloz kökenli ürünlerden kenaf, çeltik, kenevir, keten ve buğday samanı gibi farklı türde materyaller kullanılır. Üretimde kullanılan odun lifi ve tozlarının lif boyutları ve parçacık büyüklükleri değişkenlik göstermektedir. Üretimde kullanılan odun lif oranı ve boyutunun odun plastik kompozitlerinin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkisi vardır [3]. Odun plastik kompozitlerin özelliklerini kullanılan odun veya lif yapısı, polimerin molekül ağırlığı, katkı maddesi ve uyum sağlayıcı maddeler oluşturur [4]. Sürtünmeyi azaltmak için kalıp ve eriyik arasında %1 ila 5 arasında kaydırıcı maddeler kullanılmakta ve bu madde odun plastik kompozitlerinin bazı özelliklerini etkileyebilmektedir. Bunlara ek olarak performans artırıcı bileşenler ve çeşitli bağlama ajanları da bazı formülasyonlarda ilave edilebilmektedir [5]. Odun plastik kompozit üretiminde kullanılan hammaddeler, termoplastik reçineler (yüksek yoğunluklu polietilen, polipropilen polivinil klorür ve polistrien) ve odun unu, odun lifleri diğer doğal lifler gibi dolgu maddeleridir. Odun plastik kompozitlerinin sertlik ve dayanımını arttıran

etken dolgu maddesi olarak odun unu ve lifleri ile diğer doğal lifler kullanılmasıdır. Bunun dışında polimerler ana bileşen olarak odun plastik kompozitleri güneş, hava ve su gibi dış etkilere karşın da koruma sağlar [6]. Kompozit üretiminde; ucuz maliyet, düşük yoğunluk, üretim esnasında aşınmanın az olması, yüksek mukavemet, doğada kolayca bozulabilmesi gibi özellikler lignoselülozik esaslı liflerin kullanılmasını cazip hale getirmiştir [7]. Polimerik malzemelerin odun lifi ve tozu ile karıştırılması bazen farklı türde katkı maddesinin kullanımını beraberinde getirebilir. Üretimi gerçekleştirilecek kompozitin mekanik özelliklerini arttırmak ve birbiri içerisinde kolay dağılımını sağlamak için uyum sağlayıcı malzemeler de kullanılmaktadır. Birçok uygulamada polimerlerin içindeki odunsu materyalin mekanik özelliklerini geliştirmek için uyum sağlayıcı gerekemeyebilir, buna ek olarak sıcaklık ve UV dayanımı gibi özellikleri arttırmak için de gerekebilir. Bu durumda uyumlaştırıcı olarak maleik anhidrid ile aşılınmış polipropilen veya maleik anhidrid ile aşılınmış polietilen kullanılır. Bunların dışında estetik görünümü sağlama ve renklendirme için de bir takım katkı maddeleri katılmaktadır. Selüloz bazlı polimer kompozitlerin iyi şekilde renklendirilebilmesi için çift vidalı ekstrüzyon makinesi kullanımı gerekmektedir [8]. Odun plastik kompozit üretiminde geri dönüşümle kazanılmış termoplastikler kullanılabilirdiği gibi odun atığı ve ilave katkılar da kullanılabilir. Odun plastik kompozit yapısında odun katkısı oranı genellikle %30-70 arasındadır [9]. Lignoselülozik bazlı malzemelerin doğada bol miktarda bulunması ve ekonomik oluşu günümüzde bu malzemelerden kompozit yapımında kullanımını artırmıştır. Biyolojik olarak parçalanabilir olması bir avantaj da sağlamaktadır. Selüloz bazlı malzemelerin polimer matrisine katılmalarında uyumluluk maddesi kullanımı polimer kompozitinin mukavemet değerlerine pozitif etki yaptığına dair literatürde çalışmalar mevcuttur [10-11]. Termoplastiklerde selülozik bazlı odun tozu kullanımı günümüzde ahşap plastik kompozit üretimini artırmıştır [12]. Chen ve arkadaşlarının maleik anhidrid ile aşılınmış polietilen'in bazalt lifi-odun plastik kompozitlerinin mekanik özelliklerini arttırdığı yönünde bir çalışma yapmışlardır. Maleik anhidrid ile aşılınmış polietilen ilavesiyle elde edilen polimer kompozitinin çekme ve eğilme mukavemeti değerlerinin %5 ila 8 oranında arttığını belirlemiştir. Aynı zamanda yazarlar, % uzamanın başlangıçta hızlı, sonra yavaş olduğunu belirlemişler ve mikroyapı incelemeleri sonucunda ise maleik anhidrid ile aşılınmış polietilen eklenmesiyle odun ile polietilen arasında iyi bir adezyonun sağlandığını rapor etmişlerdir [13]. Huda ve arkadaşları ise, polilaktik asit polimerine odun life katarak bir polimer kompoziti elde etmişlerdir. Odun liflerinin ilavesiyle elde ettikleri polimer kompozitin mekanik özelliklerinin iyileştirdiğini çalışmalarında rapor etmişlerdir. Bunun dışında maleiklendirilmiş

polipropilen uyumlaştırıcısının mekanik özelliklerini daha da iyileştirdiğini belirlemiştir. Mikroyapı analizlerinde ise arayüzey bağlanmasının kompozitlerde iyi olduğunu tespit etmişlerdir [14]. Demir ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [15], cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemenin aşınma davranışını incelemiştir. Elyaf cinsinin, numuneler üzerine uygulanan yükün, kayma hızının ve mesafesinin kompozitlerin tribolojik davranışlarına etkisi araştırılmıştır. Sonuçta karbon elyaf takviyeli kompozitlerdeki sürtünme katsayısının arttığını belirlemiştir. Buna ek olarak cam elyaf takviyesinin aşınma testinde kütle kaybının düşmesine sebep olduğunu ortaya koymuşlardır. Buna ek olarak yükün, kayma hızının ve mesafesinin artması kütle kaybının artmasına sebep olduğunu tespit edilmiştir. Kurniawan ve arkadaşlar ise bazalt lifi/polilaktik asit kompozitleri üretmiş ve bunların mekanik ve termal özelliklerini test etmişlerdir. Plasma aktivasyonu yapılan bazalt lifleriyle üretilen polilaktik asit kompozitlerin elastiklik modül değerinde %18 oranında bir artışın olduğunu belirlemiştir [16]. Taşdemir ve arkadaşları yapmış oldukları bir çalışmada ise geri dönüşümlü poliamid-6 polimerine atık pamuk ve ipek katarak elde ettikleri polimer kompozitinde fiber boyutlarının etkilerini incelemiştir [17].

Bu çalışmada; polipropilen üzüm sapı ve çeltik karışımlarının özelliklerinin atık cam elyaf ile geliştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, üzüm sapı ve çeltiğin polimerlerde dolgu maddesi olarak yeniden kullanılması hedeflenmiştir

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Kompozisyon ve Malzemeler

Üzüm sapı, çeltik ve cam elyafın polipropilen içerisindeki oranları değiştirilerek beş farklı grup hazırlanmıştır. Aşağıda Tablo 1' de elde edilen polimer kompozitinin oranları verilmiştir. Kullanılan polipropilen Emaş A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Emoplen CP-M 8081 kodlu üründür. Erime akış indisi 8 g/10 dak., çekme modülü 1600 MPa, çekme mukavemeti 20 MPa, kopma uzaması % 8, Izod çentikli darbe mukavemeti 6 kJ/m<sup>2</sup>, sertliği 63 Shore D, yoğunluğu 0,9200 g/cm<sup>3</sup>, ısı çarpılma sıcaklığı değeri (1,85 MPa) 85 °C olan ve vicat yumuşama sıcaklığı değeri ise 90 °C olan bir üründür [18]. Üzüm sapsarı Kayseri ve çeltik ise Trakya bölgesinde yaşayan yerel halktan temin edilmiştir. Atık cam elyaf ise Bursa'daki bir firmadan temin edilmiştir.

### 2.2. Numune hazırlama

Üzüm sapı ve çeltikten toz şeklinde partiküller üretmek için Mertest marka öğütücü kullanılmış olup öğütme işlemi kuru olarak yapılmıştır. Partikül boyut aralığı 100-150 mikron seviyesindedir. Şekil 1'de bu yöntemin fotoğrafları verilmiştir. Daha sonra bu tozlar Yamato ADP-31 tipi fırında 105 °C' de 24 saat boyunca kurutulmuştur. Elde edilen polimer

kompozitinin granülleri bir karıştırıcıda (Patterson marka) 15 dak. boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra çift vidalı ekstrüderde (Mikrosan marka) 25-35 bar basınç altında, 25 dev/dak dönüş hızında ve 200-240 °C arasındaki sıcaklıklarda eritilerek karışımları gerçekleştirilmiştir. Daha sonra fırında 85 °C' de 12 saat kurutulmuştur. Test numuneleri, enjeksiyon sıcaklığı 200–240 °C, enjeksiyon basıncı 700-900 bar ve vida dönme hızı 25 dev/dak olan bir enjeksiyon makinesinde basılmıştır.

**Tablo 1.** Karışım oranları

Gruplar	Polipropilen (%)	Üzüm sapı-çeltik (50-50) (%)	Cam elyaf (%)
1	100	-	-
2	80	20	-
3	70	20	10
4	65	20	15
5	60	20	20



Üzüm sapı



Çeltik



Öğütücü



Toz

**Şekil 1.** Üzüm sapı ve çeltiğin öğütülmesi

### 2.3. Karakterizasyon

Her grup için beş adet numune test edilmiş ve ortalamaları verilmiştir. Çekme testleri ASTM D638 standardına göre yapılmıştır. Çekme deneyi 50 mm/dak çekme hızında ve 10 kN yük kapasitesine sahip bir Zwick Z010 (Almanya) marka test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çekme mukavemeti, kopma mukavemeti, kopma uzaması ve elastiklik modülü değerleri bu test yönteminden elde edilmiştir. Darbe davranışını incelemek için Zwick B5113 darbe

test cihazı ile ASTM D256 yöntemine göre oda sıcaklığında Izod darbe testi (çentikli) yapılmıştır. Sertlik testi, Zwick sertlik ölçüm cihazı ile ASTM D2240 yöntemine göre yapılmıştır. Yoğunluk testi, ISO 2781 test standardına göre yapılmıştır. Darbe numunelerinden elde edilen kırık yüzeyler, Polaron SC 7620 (Gala Instrumente GmbH, Almanya) cihazı ile elektriksel yüklenmeyi önlemek için altın (Au) (%80)/paladyum (Pd) (%20) alaşımı ile yaklaşık 10 nm kalınlığında kaplanmıştır. Hazırlanan numunelerin mikro yapıları, 10 kV voltaj altında JEOL-JSM 5910 LV (JEOL Ltd., Japonya) taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

## III. BULGULAR VE TARTIŞMA

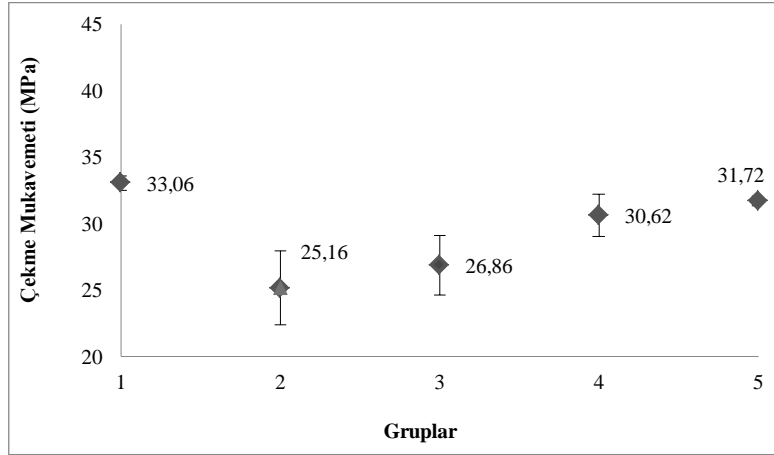
### 3.1. Mekanik Özellikler

Aşağıdaki Tablo 2'de çekme mukavemeti değerleri ve Şekil 2'de ise bu değerlerin grafiksel gösterimi verilmiştir. Şekil 2'de de görüldüğü gibi maksimum çekme mukavemeti değeri 1. gruba aittir. Grafik incelendiğinde, polipropilen içerisinde çeltik ve üzüm sapı %20 oranında ilavesi ile çekme mukavemeti değerinin 25,16 MPa olduğu ve saf polipropilen ile kıyaslandığında bu değer %23,89 oranında azaldığı görülmektedir. Kompozitin içerisine %10 oranında cam elyaf katıldığında çekme mukavemeti değerinin 26,86 MPa olduğu ve saf polipropilen ile kıyaslandığında çekme mukavemeti değerinde %6,75 oranında bir artış olduğu görülmektedir. Buna ek olarak polipropilen içerisine %20 oranında cam elyaf ilavesi ile çekme mukavemetinde saf polipropilene kıyasla %26,07 oranında bir artış olduğu anlaşılmaktadır. Öksüz ve arkadaşlarının yapmış oldukları bir çalışmada polipropilen içerisine kattıkları cam elyaf oranının artmasıyla çekme mukavemeti değerinin arttığını belirlemişlerdir [19]. Korkmaz ve arkadaşları yüksek yoğunluklu polietilen içerisine enginar yaprağı tozu katarak bir polimer kompoziti elde etmişler ve enginar yaprağı tozu oranının artmasıyla kompozitin çekme mukavemeti değerinin arttığını belirlemişlerdir [20]. Teke ve arkadaşlarının yapmış oldukları bir çalışmada polipropilen içerisine portakal kabuğu tozları katarak bir polimer kompoziti elde etmişlerdir. Çalışmalarında portakal kabuğu tozu oranının artmasıyla çekme mukavemeti değerinde bir düşüşün olduğunu belirlemişlerdir [21]. Başka bir çalışmada Ulutaş ve arkadaşları geri dönüşümlü polipropilen içerisine çeltik ilave ederek bir polimer kompoziti elde etmişlerdir. Elde ettikleri kompozitte çeltik tozlarının oranının artmasıyla çekme mukavemeti değerlerinin de arttığını belirlemişlerdir [22].

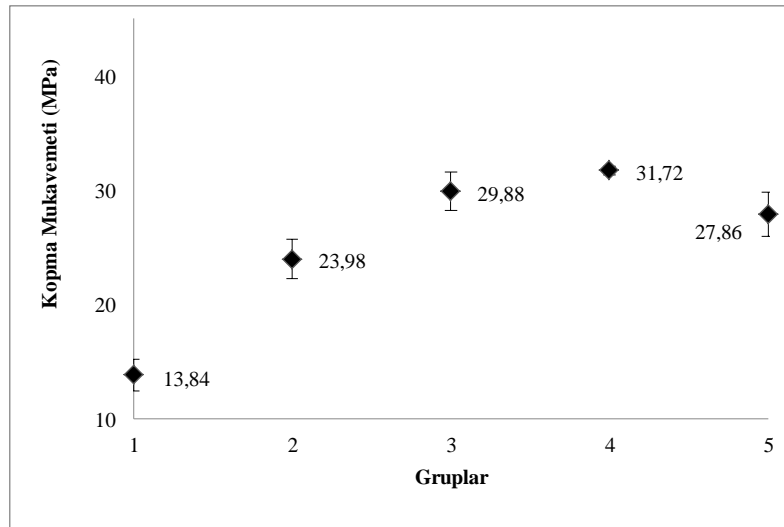
Aşağıdaki Tablo 3'de kopma mukavemeti değerleri ve Şekil 3'de ise bu değerlerin grafiksel gösterimi verilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde maksimum kopma mukavemeti değerinin 31,72 MPa ile 4. gruba ait olduğu görülmektedir.

**Tablo 2.** PP/üzüm sapı-çeltik/cam elyaf polimer kompozitinin çekme mukavemeti değerleri

Gruplar	Test Numune Sayısı					Ort.	St. Sapma
	1	2	3	4	5		
Grup 1	32,8	32,6	32,6	33,8	33,5	33,06	0,55
Grup 2	28,5	23,2	27,7	24	22,4	25,16	2,75
Grup 3	26,2	25,5	28,3	29,9	24,4	26,86	2,21
Grup 4	31,1	32,7	28,9	29,1	31,3	30,62	1,60
Grup 5	32	31,9	31,2	31,5	32	31,72	0,35

**Şekil 2.** PP/üzüm sapı-çeltik/cam elyaf polimer kompozitinin çekme mukavemeti değerlerinin grafiksel gösterimi**Tablo 3.** PP/üzüm sapı-çeltik/cam elyaf polimer kompozitinin kopma mukavemeti değerleri

Gruplar	Test Numune Sayısı					Ort.	St. Sapma
	1	2	3	4	5		
Grup 1	15,3	13,2	12,3	15,3	13,1	13,84	1,37
Grup 2	28,5	23,2	25,4	24	21,5	23,98	1,73
Grup 3	31,1	30,7	28,9	27,4	31,3	29,88	1,67
Grup 4	32	31,9	31,2	31,5	32	31,72	0,35
Grup 5	26,2	25,5	28,3	29,9	29,4	27,86	1,93

**Şekil 3.** PP/üzüm sapı-çeltik/cam elyaf polimer kompozitinin kopma mukavemeti değerlerinin grafiksel gösterimi

Grafik incelendiğinde, polipropilen içerisinde %20 oranında çeltik-üzüm sapı ilavesi ile kopma mukavemeti değerlerinin 23,98 MPa çıktığı görülmektedir. Bu değeri saf polipropilen ile kıyasladığımızda %73,26 'lık bir artışın olduğu anlaşılmaktadır. Kompozitin içerisine ayrıca %10 oranında cam elyaf eklendiğinde kopma mukavemeti değerinin 29,88 MPa'la çıktığı görülmektedir. Saf polipropilen ile bu değer kıyasla %24,60 oranında artışın olduğu görülmektedir. 4. Grubun kopma mukavemeti değeri 31,72 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer saf polipropilene kıyasla %32,77 oranında artmıştır. 5. grupta kopma mukavemeti değeri bir miktar azalarak 27,86 MPa değerinde çıkmıştır. Öksüz [19], Teke [21], Uluştas [22] ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalarda da kopma mukavemeti değerinin arttığını belirlemişlerdir. Aka ve arkadaşlarının yapmış oldukları bir çalışmada yüksek yoğunluklu polietilen içerisine karbonize edilmiş ve edilmemiş mısır püskülünü toz haline getirip katmışlardır. Elde ettikleri kompozitte mısır püskülü tozlarının oranının artmasıyla kopma mukavemeti değerinin arttığını tespit etmişlerdir [23].

Aşağıdaki Tablo 4'de kopma uzaması değerleri ve Şekil 4'de ise bu değerlerin grafiksel gösterimi verilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde en yüksek kopma uzaması değerinin saf polipropilene ait olduğu görülmektedir. Polipropilen içerisine %20 oranında çeltik-üzüm sapı ilavesi ile kopma uzaması değerinin düştüğü ve saf polipropilene kıyaslandığında bu değer %90,06 oranında azaldığı görülmektedir. Çeltik-üzüm sapı ilavesine ek olarak %10 oranında cam elyaf eklendiğinde kopma uzaması değerinin %3,16 olduğu ve saf polipropilene kıyasla bu değer %47,50 oranında azaldığı görülmektedir. Kompozit malzeme içerisinde cam elyaf oranının gittikçe artmasıyla kopma uzama değerinin de buna paralel olarak azaldığı görülmektedir. Bu durum numunelerin gevrek davranış gösterdiği anlamına gelmektedir. Literatür incelendiğinde değişik türlerde selüloz bazlı ürünler toz haline getirilmiş ve polimer matris içerisine katılmışlardır. Selüloz bazlı bu malzemelerin matris içerisindeki oranının artmasıyla kopma uzama değerinin düştüğü belirlenmiştir [14, 19-24].

Aşağıdaki Tablo 5'de elastiklik modül değerleri ve Şekil 5'de ise bu değerlerin grafiksel gösterimi verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde maksimum elastiklik modülü değerinin 1558 MPa değeri ile 5. gruba ait olduğu görülmektedir. Polipropilen içerisine %20 oranında çeltik-üzüm sapı ilavesi ile elastiklik modülü değerinin 890,6 MPa olduğu görülmektedir. Bu değer saf polipropilenin elastiklik modül değeri ile kıyaslandığında %1,2 oranında bir artışın olduğu görülmektedir.

Çeltik ve üzüm sapı ilavesine ek olarak %10 oranında cam elyaf eklendiğinde elastiklik modülü değerinin

1096,8 MPa olduğu ve saf polipropilene kıyasla bu değer %23,15 oranında arttığı tespit edilmiştir. En yüksek elastiklik modül değeri ise 5. grupta görülmüştür. Bu değer saf polipropilenin elastiklik modül değeri ile kıyaslandığında %31,59 oranında bir artışın olduğu anlaşılmaktadır.

Literatür incelendiğinde değişik türlerde selüloz bazlı ürünler toz haline getirilmiş ve polimer matris içerisine katılmışlardır. Selüloz bazlı bu malzemelerin matris içerisindeki oranının artmasıyla elastiklik modül değerinin de arttığı belirlenmiştir [19-21, 23 ].

Aşağıdaki Tablo 6'da darbe mukavemeti değerleri ve Şekil 6'da ise bu değerlerin grafiksel gösterimi verilmiştir. Şekil 6'ya bakıldığında maksimum darbe mukavemeti değerinin saf polipropilene ait olduğu görülmektedir. Grafik incelendiğinde polipropilen içerisine %20 oranında çeltik-üzüm sapının ilavesi ile darbe mukavemeti değerinin 3,42 kJ/m<sup>2</sup>'ye düştüğü görülmektedir. Bu değer saf polipropilenin darbe mukavemeti değeri ile kıyaslandığında %47'lik bir azalmanın olduğu anlaşılmaktadır.

Çeltik-üzüm sapı ilavesine ek olarak %10 oranında cam elyaf eklendiğinde darbe mukavemeti değerinin 3,94 kJ/m<sup>2</sup>'ye çıktığı ve saf polipropilene göre %15,20 oranında arttığı görülmektedir. Huda [14], Öksüz [19], Ulutaş [22] Aka [23], Taşdemir [24], ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmalarda darbe mukavemeti değerinin arttığını belirlemişlerdir.

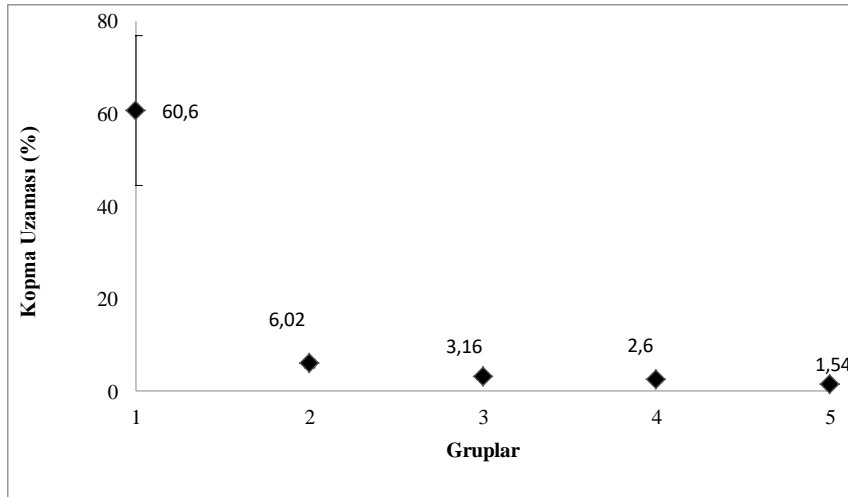
Aşağıdaki Tablo 7'de sertlik değerleri ve Şekil 7'de ise bu değerlerin grafiksel gösterimi verilmiştir. Şekil 7'ye bakıldığında maksimum sertlik değerinin 5. gruba ait olduğu görülmektedir. Polipropilen içerisine %20 oranında çeltik-üzüm sapı ilavesi ile sertlik değerinin bir miktar artarak 64,5 çıktığı görülmektedir. Saf polipropilene kıyasla bu artış oranı %3,2 'dir. Şekilden de anlaşıldığı gibi kompozit içerisindeki cam elyaf oranının artışıyla sertlik değerinin de giderek arttığı görülmektedir.

### 3.2. Yoğunluk

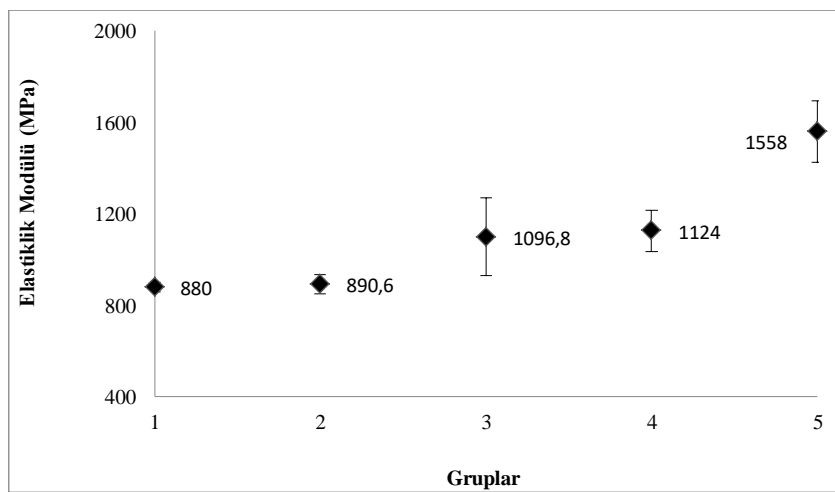
Aşağıdaki Tablo 8'de yoğunluk değerleri ve Şekil 8'de ise bu değerlerin grafiksel gösterimi verilmiştir. Şekil 8'e bakıldığında maksimum yoğunluk değerinin 1,01 gr/cm<sup>3</sup> ile, 5. gruba ait olduğu görülmektedir. PP içerisinde çeltik ve üzüm sapı %20 oranında ilavesi ile yoğunluk değerinin saf polipropilene kıyasla %2,29 oranında arttığı anlaşılmaktadır. Polipropilen içerisine cam elyaf oranının artmasıyla yoğunluk miktarının giderek arttığı da şekilden görülmektedir. Ulutaş ve arkadaşları geri dönüşümlü polipropilen içerisine çeltik ilave ederek bir polimer kompoziti elde etmişlerdir. Elde ettikleri kompozitte çeltik tozlarının oranının artmasıyla yoğunluk değerlerinin de arttığını belirlemişlerdir [22].

**Tablo 4.** PP/üzüm sapı-çeltik/cam elyaf polimer kompozitinin kopma uzaması değerleri

Gruplar	Test Numune Sayısı					Ort.	St. Sapma
	1	2	3	4	5		
Grup 1	67	69	74	33	60	60,6	16,22
Grup 2	7,6	5,1	6,1	5,4	5,9	6,02	0,96
Grup 3	2,6	4	3,3	3,5	2,4	3,16	0,65
Grup 4	2,7	2,7	2,2	2,5	2,9	2,6	0,26
Grup 5	1,5	1,4	1,5	1,6	1,7	1,54	0,11

**Şekil 4.** PP/üzüm sapı-çeltik/cam elyaf polimer kompozitinin kopma uzaması değerlerinin grafiksel gösterimi**Tablo 5.** PP/üzüm sapı-çeltik/cam elyaf polimer kompozitinin elastiklik modül değerleri

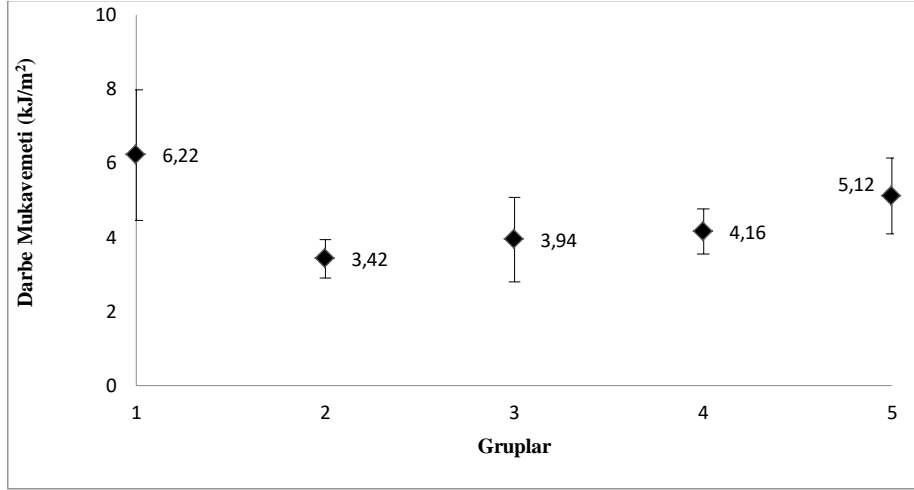
Gruplar	Test Numune Sayısı					Ort.	St. Sapma
	1	2	3	4	5		
Grup 1	858	868	870	906	898	880	20,78
Grup 2	926	888	935	836	868	890,6	40,99
Grup 3	1160	914	960	1110	1340	1096,8	169,88
Grup 4	1060	1010	1240	1150	1160	1124	90,16
Grup 5	1530	1580	1680	1660	1340	1558	136,08

**Şekil 5.** PP/üzüm sapı-çeltik/cam elyaf polimer kompozitinin elastiklik modül değerlerinin grafiksel gösterimi

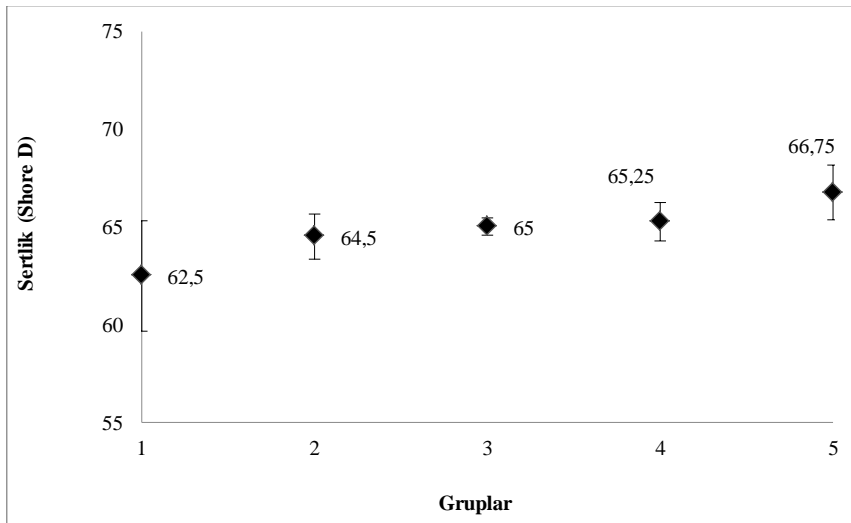


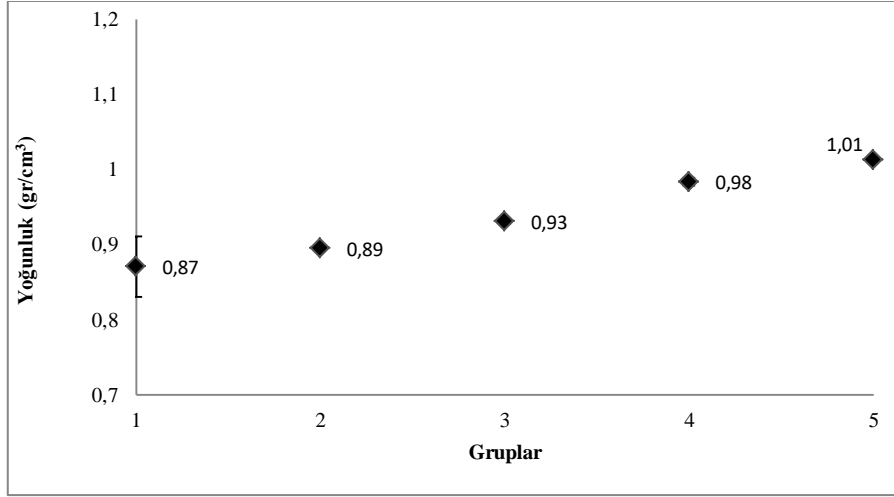
**Tablo 6.** PP/üzüm sapı-çeltik/cam elyaf polimer kompozitinin darbe mukavemeti değerleri

Gruplar	Test Numune Sayısı					Ort.	St. Sapma
	1	2	3	4	5		
Grup 1	9,3	5,7	5	5,9	5,2	6,22	1,75
Grup 2	4,2	3,4	3	3,6	2,9	3,42	0,52
Grup 3	3,8	3,4	3,6	5,9	3	3,94	1,13
Grup 4	3,8	4,2	5,2	3,8	3,8	4,16	0,60
Grup 5	5,9	5,2	5,9	5,2	3,4	5,12	1,02

**Şekil 6.** PP/üzüm sapı-çeltik/cam elyaf polimer kompozitinin darbe mukavemeti değerlerinin grafiksel gösterimi**Tablo 7.** PP/üzüm sapı-çeltik/cam elyaf polimer kompozitinin sertlik değerleri

Gruplar	Test Numune Sayısı					Ort.	St. Sapma
	1	2	3	4	5		
Grup 1	65	65	65	63	58,5	58,5	62,5
Grup 2	65	65	66	63	64	64	64,5
Grup 3	64	65	65	65	65	66	65
Grup 4	66	64	65	66,5	65	65,5	65,25
Grup 5	65	67	67	69	67	65,5	66,75

**Şekil 7.** PP/üzüm sapı-çeltik/cam elyaf polimer kompozitinin sertlik değerlerinin grafiksel gösterimi



Şekil 8. PP/üzüm sapı-çeltik/cam elyaf polimer kompozitinin yoğunluk değerleri

Tablo 8. PP/üzüm sapı-çeltik/cam elyaf polimer kompozitinin yoğunluk değerleri

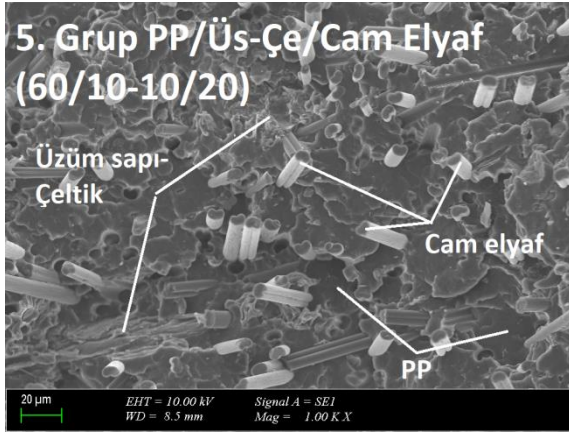
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )						
		Havada	Alkolde	Yoğunluk	Ortalama	Std.Sapma
Grup 1	1.Numune	1,2267	0,1586	0,907305	0,87	0,04
	2.Numune	1,2154	0,1201	0,876624		
	3.Numune	1,14	0,0514	0,827301		
Grup 2	1.Numune	1,1104	0,1318	0,896399	0,89	0,002
	2.Numune	1,1043	0,1299	0,895317		
	3.Numune	1,1182	0,1279	0,892031		
Grup 3	1.Numune	1,3173	0,195	0,927263	0,93	0,003
	2.Numune	1,319	0,2002	0,931364		
	3.Numune	1,2968	0,1992	0,933375		
Grup 4	1.Numune	1,362	0,2697	0,985059	0,98	0,005
	2.Numune	1,3597	0,2605	0,977223		
	3.Numune	1,3893	0,2777	0,987358		
Grup 5	1.Numune	1,3942	0,3076	1,013637	1,01	0,003
	2.Numune	1,4014	0,3095	1,013926		
	3.Numune	1,3999	0,3032	1,008408		

### 3.3. Mikroyapı Özellikleri

Saf polipropilen ve içerisine değişik oranlarda katılan üzüm sapı, çeltik ve cam elyaf ile oluşturulan polimer kompozitinin mikroyapı fotoğrafı Şekil 9' da verilmiştir. Çift vidalı ekstrüzyon kullanımı polipropilen, üzüm sapı, çeltik ve cam elyafın homojen olarak karışımını sağladığı şekilden görülmektedir. Polipropilen apolar karakterdedir. Üzüm sapı ve çeltik ise polardır. Bu yüzden uyumsuzdurlar ve uyumlu hale getirilmeleri gerekmektedir. Bu durumda sisteme yüzey modifikasyonunu artıran uyumluluk maddeleri

eklenmektedir. Böylelikle matris ve dolgu yüzeyi arasında bir yapışma sağlanır. Bu çalışmada herhangi bir arayüzey uyumluluk maddesi ve yağlayıcı bu aşamada kullanılmamıştır. Polipropilen ve cam elyaf arasında uyumluluk maddesi kullanılmadığından zayıf bir bağlantı olduğu ve matrise olan zayıf bağlanmadan dolayı bazı elyafların yerlerinden çıktıkları görülmektedir. Mikroyapıdaki boşluklar cam elyafın matrise olan zayıp adezyonundan dolayı kayıp çıkmaları sonucu oluşmuştur. Matris ile cam elyaf arasındaki adezyonu arttırmak için maleik anhidrit polietilen (MAPE) gibi bir uyumluluk maddesi

kullanımı yapışmayı artıracağından mekanik özelliklerde de daha iyi sonuçlar alınmasına sebebiyet verecektir. Bu polimer kompozitinde üzüm saptarı ve çeltik dolgu malzemesi olarak kullanımı hedeflenmiştir. Tabiki bu dolgu maddelerinin ilavesi bazı mekanik değerlerde düşüşe sebebiyet vermektedir. Bunu bertaraf etmek için kompozite atık cam elyaf ilavesi yapılmıştır. Zhang ve arkadaşları [25] yapmış oldukları bir çalışmada polipropilen/selüloz polimer kompozitinde polipropilen ile selüloz arasında maleik anhidrit aşılı polipropilen (MAPP) ve metil akrilik asit glisidil ester aşılı polipropilen kullanmışlardır. Bir başka çalışmada Kızıltaş ve arkadaşları [26] polietilen tereftalat ve politrimetilen tereftalat polimerlerine selüloz katıp bir polimer kompoziti elde etmişler ve daha kolay kalıplanması için struktol ticari isimli bir malzeme de kullanmışlardır.



Şekil 9. PP/üzüm sapı-çeltik/cam elyaf polimer kompozitinin mikroyapı fotoğrafı

#### IV. SONUÇLAR

1. Atık üzüm sapı ve çeltikten elde edilen tozların polipropilen türü malzemelerde potansiyel bir dolgu maddesi olarak kullanımını bu çalışma ortaya koymuştur. Bunun yanı sıra bu atık malzemelerin yeniden değerlendirilmesi sağlanmıştır.
2. Atık cam elyafın polimer kompozitlerinde yeniden kullanımı sağlanmış ve cam elyaf oranının kompozit içerisindeki oranının artması mekanik özelliklerde iyileşme sağlamıştır. Burada MAPE gibi bir uyumluluk maddesi kullanımı matris ve cam elyaf arasında adezyonu artıracağından mekanik değerlerin daha iyi sonuç vereceği öngörülmektedir.
3. Üzüm sapı- çeltik ve cam elyaf ilavesi, polimer kompozitinin mekanik özelliklerinde önemli değişimler sağlamıştır. Örneğin, kopma mukavemeti ve elastiklik modül değerleri artmış buna karşılık kopma uzaması ve darbe mukavemeti değerleri ise düşmüştür.

4. Bu çalışma üzüm sapı, çeltik ve cam elyafın atık birer malzeme olması ve bunların polimerlerde dolgu veya takviye malzemesi olarak yeniden kullanımının sağlaması konusuna dikkati çekmektedir. Buna ek olarak petrol ürünü olan polimerik malzemelerin daha az oranda kullanımını sağlamaktadır.

#### KAYNAKLAR

- [1] Tufan, M., Mengeloğlu, F. (2010). *III. Ulusal karadeniz ormancılık kongresi* 20-22 mayıs, cilt: IV sayfa 1658- 1664
- [2] Rude, E. (2007). Evaluation of coupling mechanisms in wood plastic composites, Master of science in material and engineering department of mechanical and materials engineering. Washington state university pp 1–4
- [3] Balma, A. (1999). Evaluation of bolted connections in wood plastic composites. Master of science in civil Engineering, Washington State University, Department of civil and environmental engineering pp.1
- [4] Mengelolu, F. (2006). Wood/thermoplastic composites. *I. Polimerik kompozitler sempozyumu ve dergisi*, TMMOB kimya mühendisleri odası, İzmir. 471-480
- [5] Gupta, B. (2006). Development of a coating technology for wood plastic composites, Washington state university master of science in materilas science and engineering pp.130
- [6] Chen, L., (2009). Extrudable melamine resin for wood plastic composite Master of science, civil engineering. Washington state University, department of civil and environmental engineering, pp.8–9
- [7] Karakuş, K., Başboğa, İ.H., Mengeloğlu, F., (2014). Termoplastik esaslı polimer kompozitlerin üretilmesinde orman budama atıklarının değerlendirilmesi, *II. Ulusal akdeniz orman ve çevre sempozyumu* 22-24 Ekim Isparta
- [8] Rowell, R. M. (2006). Advances and challenges of wood polymer composites, *proceedings of the 8th pacific rimbio-based composites symposium*, 20 – 23 November, Kuala Lumpur, Malezya, 1–10
- [9] Perhac, D., (2007). An applied statistical reliability analysis of the modulus of elasticity and the modulus of rupture for wood-plastic composites masters thesis, The university of tennessee, Knoxville
- [10] Salmen, L. & Burgert, I. (2008). Cell wall features with regard to mechanical performance. A review cost action E35 2004–2008: Wood machining – micromechanics and fracture. *Holzforchung*, 63 (2), 121-129
- [11] Tasdemir, M., (2017). Effects of olive pit and almond shell powder on polypropylene *Key Engineering Materials* vol. 733, 65-68

- [12] Mehmood, S., Khaliq, A., Ranjha, S.A. (2010). The use of post consumer plastic waste for the production of wood plastic composites: A Review, *Third international symposium on energy from biomass and waste Venice*. Venice, Italy, November 8- 11
- [13] Chen, J., Wang, Y., Gu, C., Liu, J., Liu, Y., Li, M., Lu, Y. (2013). Enhancement of the mechanical properties of basalt fiber-wood plastic composites via maleic anhydride grafted high-density polyethylene (MAPE) addition, *Materials*, 6 (6), 2483- 2496
- [14] Huda, M.S., Drzal, L.T., Misra, M., Mohanty, A.K. (2005). Wood-fiber reinforced poly(lactic acid) composites: Evaluation of the physicomechanical and morphological properties, *Journal of Applied Polymer Science*, 102, 4856-4869
- [15] Demir M. E., Çelik Y. H. ve Kılıçkap E., (2019). Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf cinsinin, yükün, kayma hızı ve mesafesinin abrasiv aşınmaya etkisi, *Politeknik dergisi*, 22(4): 811-817
- [16] Kurniawan, D., Kim, B.S., Lee, H.Y., Lim, J.Y. (2012). Atmospheric pressure glow discharge plasma polymerization for surface treatment on sized basalt fiber/poly(lactic acid) composites, *Composites part B-engineering*, 43 (3), 1010-1014
- [17] Tasdemir, M., Koçak, D., Merdan, N., Usta, İ., Akalın, M., (2013). Recycled polyamide-6/waste silk & cotton fibre polymer composites: Effect of fibre length, *Fen bilimleri dergisi*, 25(4) 157-166
- [18] <https://www.materialdatacenter.com/ms/en/Emoplen/Emas+Plastik+San/EMOPLen+CPM+8081/9caa5af9/7572>, Erişim:2021
- [19] Öksüz, A., Taşdemir, M., (2018). Değişik oranlarda cam elyaf takviyeli polipropilen polimer kompozitine etilen vinil asetat ilavesi ile mekanik değerlerdeki değişimlerin incelenmesi, sayfa 1014-1023, *International conference on multidisciplinary sciences (icomus)* 15-16 Aralık İstanbul medipol üniversitesi/İstanbul/Türkiye
- [20] Korkmaz, B., Özhan, A., Peksanlı, A., Tepeyurt, G.N., Taşdemir, M., (2018). Investigation on physical and mechanical properties of high density polyethylene/artichoke leaf powder polymer composites, *International conference on physical chemistry and functional materials*, Fırat university, Elazığ-Turkey, pp:136-140, June 10-21
- [21] Teke, Z., Sırtıkara, M., Şahin, K.A., Taşdemir, M., (2019). The investigation of the effects of carbonized and uncarbonized orange peel powder on the mechanical properties of polypropylene, *The international conference on materials science, Mechanical and automotive engineering and technology*, 21-23 Jun Kapadokya/Nevşehir/Turkey
- [22] Ulutaş, E., Taşdemir, M., Koçak, E.D., (2019). Investigation of mechanical properties of recycled polypropylene/rice husk polymer composites, *The international conference on materials science, Mechanical and automotive engineering and technology*, 21-23 Jun Kapadokya/Nevşehir/Turkey
- [23] Aka, A., Tekerek, A.Y., Güler, G., Taşdemir, M., (2019). High density polyethylene/uncarbonized and carbonized waste corn husk polymer composites: physical and wear behaviors *35<sup>th</sup> International conference of the polymer processing society (PPS-35)* 26 - 30 May Radisson blu resort & Spa, Çeşme-İzmir/Turkey
- [24] Taşdemir, M., (2019). Mechanical properties of polypropylene biocomposites with sea weeds, *Nanomaterials science and engineering*, vol 1, no. 1 pp. 22-29
- [25] Zhang, X., Shen, J., Yang, H., Lin, Z., Tan, S., (2011). Mechanical properties, morphology, thermal performance, crystallization behavior, and kinetics of PP/microcrystal cellulose composites compatibilized by two different compatibilizers *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 24(6), 735-753.
- [26] Kızıltas, A., Gardner, D.J., Han, Y., Yang, H.S., (2010). Determining the mechanical properties of microcrystalline cellulose (MCC) filled PET/PTT blend composites, *Wood Fiber Sci.* 42(2), 165-176.

## Some Morphometric Measurements of the Critically Endangered Angular Roughshark *Oxynotus centrina* (Linnaeus, 1758) Caught by Trammel Nets in the Sea of Marmara

*Marmara Denizi'nde Fanyalı Uzatma Ağlarına Yakalanan Kritik Tehlike Altındaki Domuz Köpek Balığının Oxynotus centrina (Linnaeus, 1758) Bazı Morfometrik Özellikleri*

Yusuf ŞEN<sup>1</sup> , Uğur ÖZEKİNCİ<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Çanakkale Onsekiz Mart University, Faculty of Marine Science and Technology, 17020, Çanakkale, Turkey

### Abstract

Angular roughshark (*Oxynotus centrina*) is a rare occurrence and one of the critically endangered species. In our study, some morphometric measurements of angular roughshark individual caught as bycatch with trammel nets was investigated in the Southern coasts of the Marmara Sea, Turkey. The weight of this species, which was caught in these nets, was weighed as 212 gr due to the degradation by parasites. The actual weight before degradation was estimated as 2623 gr from the length-weight relationship formulation. Some morphometric measurements of the species were performed and compared with previous studies. In fisheries, there is a need for all kinds of information about endangered species such as angular rough sharks, which are accidentally caught. Fishing techniques should be developed to prevent these species from being caught in fishing gears, and their survival should be ensured with appropriate protection measures.

**Keywords:** Angular Rough Shark, Trammel Nets, By-catch, Marmara Sea, Oxynotidae

### Öz

Domuz köpek balığı, nadir bulunan ve kritik yok olma tehlikesi altında bir türdür. Çalışmamızda Marmara Denizi'nin güney kıyılarında fanyalı uzatma ağları ile tesadüfi olarak yakalanan domuz köpek balığı bireyinin bazı morfometrik ölçümleri araştırılmıştır. Ağlara yakalanan türe parazitik canlıların zarar vermesi nedeniyle ağırlığı 212 gr tartılmıştır. Bozulmadan önceki gerçek ağırlığının ise boy-ağırlık ilişkisi formülasyonuna göre 2623 gr olduğu tahmin edilmiştir. Türün morfometrik ölçümleri gerçekleştirilerek, önceki çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Balıkçılıkta domuz köpek balığı gibi tesadüfen yakalanan nesli tehlikede olan türler hakkında her türlü bilgiye ihtiyaç vardır. Bu türlerin av araçlarına yakalanmaması için avlanma teknikleri geliştirilmeli ve uygun koruma önlemleri ile yaşamaları sağlanmalıdır.

**Anahtar kelimeler:** Domuz Köpekbalığı, Fanyalı Uzatma Ağları, Hedefdışı Av, Marmara Denizi, Oxynotidae

## I. INTRODUCTION

The angular rough shark, *Oxynotus centrina* (Linnaeus, 1758) (Chondrichthyes: Oxynotidae), is a rare occurrence species [1-3]. So, there is very limited information about this species [4]. The size of this species ranges from 50 to 70 cm TL, with a maximum size of 150 cm TL [3, 5, 6]. It is a sluggish shark that exists across continental shelves and upper slopes at depths ranging between 30 and 800 m [1, 7].

*O. centrina* can be found in the Eastern Atlantic from Norway to Portugal, as well as the Madeira and Canary Islands, Morocco, Mauritania, the Guinea region, Gabon, Angola, Namibia, and South Africa. Also, except for the coasts of the Black Sea, throughout the Mediterranean Sea [1-3, 6, 8]. *O. centrina* is currently considered as “vulnerable” all across the globe and “critically endangered” in the Mediterranean, listed in the IUCN Red List [9, 10]. Its population shows a constant decrease [9, 10].

Despite its scarcity, *O. centrina* can be caught as bycatch in a variety of fishing activities [3, 6, 8, 11, 12]. It is generally thrown out to the sea by fishermen because it is not commercially valuable. In addition to this it is known that its caught bycatch via purse seine nets, longline, bottom trawl and beam trawl in Turkey fisheries [13-21]. *O. centrina*'s large spiny dorsal fins and relatively large body size make it particularly vulnerable to be captured by nets [3, 6]. Trammel nets used to catch demersal fish are soaking time for nearly 10 days in the Sea of Marmara. The purpose of commercial fishermen keep these nets for a long time is to increase fishing efficiency [22]. But in this way, sharks can catch in the trammel nets.

The information caught is crucial to our understanding of deep-sea Chondrichthyans in the Mediterranean Sea, so every new piece of information about deep-sea sharks in the Sea of Marmara is vitally important. In this scientific research, one of the *O. centrina* was caught by trammel nets and recorded. Previous records of this *O. centrina* was in Turkish seas were open to debate once again.

## II. MATERIAL and METHOD

In this study one of the critically endangered species, Angular roughshark caught as bycatch in trammel nets was investigated in the Southern coasts of the Marmara Sea, Turkey. This species caught as dead in 42 mm mesh size in the 5 days soaking time trails in Southern coasts of Marmara Sea on December 23, 2020 (Coordinates of sampling area: 40° 27' N - 27° 03' E) was a critically endangered species in the Mediterranean Sea (Figure 1). This species was

identified according to Compagno [1] and investigated. Morphometric measurements and weight were obtained and photographed (Figure 2). Due to the degradation of this species, its actual weight could not be measured accurately.

The length-weight relationship is a frequently used analytical tool in fisheries management and fisheries biology [23, 25]. This equation has been widely utilized to estimate weight from more readily quantifiable variables such as length [24, 25]. Thus, to get the needed weight (W) of this shark, the length-weight connection has been used in the formalization of  $W=a.L^b$ . W was computed using the a, b, and total length (L) values found in Güven et al.,[26], which is the only research in the literature that establishes the length-weight relationship for this species.

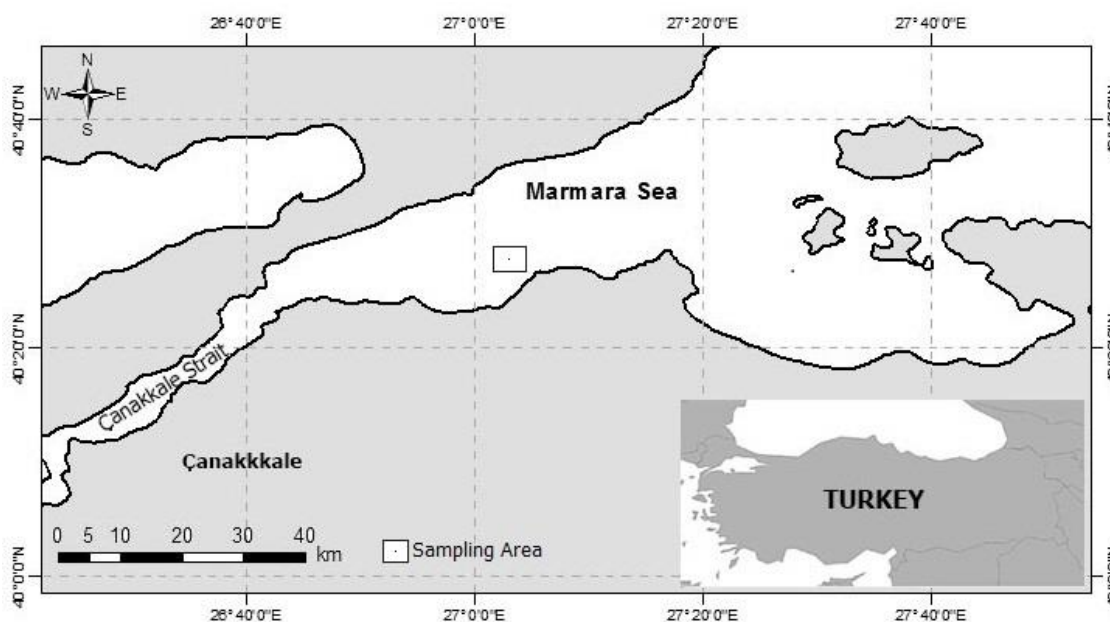


Figure 1. Sampling area of the *O. centrina* in the Marmara Sea.



Figure 2. *O. centrina* caught from the Marmara Sea.

### III. RESULTS and DISCUSSION

The measured total length of *O. centrina* caught during the trials was 558 mm and its weight was 212 gr. This individual was obtained in nets haul from the sea in 5 days. The actual time of capture was unknown and some parasites (isopods) were detected in this individual. The lack of excess tissue loss in the individual's skin supported that the individual had recently been caught and the weight loss was due to parasites rather than visible rot in the postmortem meat.

The required weight of this individual by the values  $a=0.0151$  and  $b=3$  in Güven et al., [26] was calculated as 2623 gr. In some of the previous studies, Kabasakal [20] mentions that an individual caught by commercial

fishermen at 50 m depths in the northeast of the Marmara Sea has a total length of 45 cm and a weight of 1200 gr. In the North-East Aegean Sea, Öztekin et al., [30] also mentioned that an individual they caught with a long line (in the western coast of the Gallipoli peninsula) had a total length of 41 cm and a weight of 810 gr. Kousteni and Megalofonou [4] measured two individuals of *O. centrina* whose length 533 mm and 565 mm, weight 1649 gr and 1703 gr respectively. But it should not be forgotten that the weight of the fish caught is related to the condition factor. The morphometric measurements (mm) of this species and the comparative results measured in previous studies conducted are shown in table 1.

**Table 1.** Morphometric measurements of *O. centrina* caught in the Marmara Sea and other areas (ca=calculated).

Morphometric characteristics (mm, g)	This study	[19]	[27]	[11]	[4]		
	South Marmara Sea	Saros Bay, The North Aegean Sea	Eastern Mediterranean Sea	Adriatic Sea	Specimen 1 NE Aegean Sea	Specimen 2 NE Aegean Sea	Specimen 3 Korinthiakas Gulf
Total length	558	651	690	800	533	565	790
Total weight	2623 (ca)	4652	4000	7883	1649	1703	5020
Fork length	544	620	640	760	-	-	-
Head length	98	118	104	120	105	111	131
Interdorsal space	123	113	146	145	87	112	141
Precaudal length	457	522	560	630	-	-	-
Prefirst dorsal fin length	147	155	165	173	118	122	142
Presecond dorsal fin length	359	422	425	480	302	353	421
Prepectoral fin length	115	120	103	125	91	102	128
Pectoral fin anterior margin	84	112	132	130	-	-	-
First dorsal anterior margin	114	123	133	165	-	-	-
First dorsal height	68	80	94	103	76	78	83
First dorsal base	87	82	86	145	95	102	138
Second dorsal anterior margin	68	98	104	125	-	-	-
Second dorsal height	48	66	112	82	44	64	66
Second dorsal posterior margin	46	56	69	95	-	-	-
Second dorsal base	46	65	63	95	62	79	86
Pelvic anterior margin	52	54	69	77	-	-	-
Pelvic height	48	45	63	61	-	-	-
Pelvic posterior margin length	44	62	73	101	-	-	-
Pelvic base	38	52	50	65	-	-	-
Dorsal caudal margin	104	122	119	140	-	-	-
Terminal caudal margin	26	35	40	49	-	-	-
Reventral caudal margin	53	75	78	90	-	-	-
Caudal peduncle height	25	27	28	31	22	25	31
Head height	64	89	58	70	65	93	89
Trunk height	80	110	126	160	90	103	103
Abdomen height	90	122	100	140	92	122	146
Eye length	18	24	25	25	-	-	-

When we investigate the previous records, we see that *O. centrina* was especially caught by trawl fisheries in Turkey in the last twenty years [15, 16, 19, 20, 28-32]. There is one record showing the catch by gill nets through the same period [20]. Also, it had been reported that individuals caught in the Marmara Sea were generally caught in the north of the Marmara Sea. This study is the first record showing that this species can be accidentally caught by trammel nets used to catch demersal species in the South of the Marmara Sea.

Some Turkish fishermen leave their trammel nets in the water for extended periods without lifting them. On the shores of the Southern Marmara Sea, this period can last up to 7 days. At the same time, these nets continue to capture fish and other marine animals under the control of a fisherman in those periods. This situation causes the effect of ghost fishing or derelict fishing gear "lost or abandoned fishing gear and continues to capture fish" [33-35]. In addition to commercial species, endangered non-commercial species such as *O. centrina* may be caught in these nets. Fishermen state that some of these species caught in the net is released alive. Even though the species caught in the net are hardy and can live for a long time, removing the nets for a long soaking time can cause significant damage or death. In addition, the long stay of the nets in the water causes the fish caught in these nets to be attacked and damaged by parasites (isopods) species in the region. Scientific researches show that some species of isopods pose a threat to Turkey fisheries [36, 37]. The same situation was observed in our study, and the captured shark individual was found to have been attacked by some parasites.

The focus of this research is on the occurrence of *O. centrina* as bycatch in trammel net fishing. As a result, some biologic parameters of critically endangered species, such as limited information about angular rough shark as bycatch in fisheries should be investigated. Fishing methods will prevent catching angular rough sharks are improved and their survival should be ensured through appropriate protective measures.

## ACKNOWLEDGEMENT

This study was obtained from the thesis of Yusuf ŞEN, PhD student of Çanakkale Onsekiz Mart University School of Graduate Studies, Department of Fishing and Processing Technology. The authors would like to thank the research project (FDK-2020-3411) was supported by Çanakkale Onsekiz Mart University Scientific Coordination Unit.

## REFERENCES

- [1] Compagno, L.J.V. (1984). FAO Species catalogue. sharks of the world. An annotated

and illustrated catalogue of sharks species known to date. Part 1. Hexanchiformes to Lamniformes. *FAO Fish Synopsis*, 125(4), 24-129.

- [2] Serena, F. (2005). Field identification guide to the sharks and rays of the Mediterranean and Black Sea. Food and Agriculture Organization of the United Nation. ISSN 1020-6868.
- [3] Ebert, D.A. & Stehmann, M.F. (2013). Sharks, batoids and chimaeras of the North Atlantic. FAO Species Catalogue for Fishery Purposes 7. Rome: FAO. 523 p.
- [4] Kousteni, V. & Megalofonou, P. (2010). Occurrence of the rare angular rough shark, *Oxynotus centrina*, (Chondrichthyes: Oxynotidae) in the Greek Seas. *GFCM-Transversal Expert Meeting on the Status of Elasmobranches in the Mediterranean and the Black Sea*. Tunisia, Salammbô, 20-22 September 2010, 23 p.
- [5] Compagno, L., Dando, M. & Fowler, S. (2005). A field guide to the sharks of the world. Harper Collins, London. 368 p.
- [6] Guallart, J. & Soldo, A. (2015). *Oxynotus centrina*. The IUCN Red List of threatened species Europe 2015. e.T63141A48921792. <https://www.iucnredlist.org/species/63141/97834254> (July 2021).
- [7] Sion, L., Bozzano, A., D'Onghia, G., Capezzuto, F. & Panza, M. (2004). Chondrichthyes species in deep waters of the Mediterranean Sea. *Scientia Marina*, 68(3), 153-162.
- [8] FAO. (2021). Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Fisheries Division. Species Fact Sheets*. <http://www.fao.org/fishery/species/2843/en> (July 2021).
- [9] Bradai, M.N., Serena, F., Bianchi, I. & Ebert, D.A. (2007). *Oxynotus centrina*. The IUCN Red List of threatened species 2007: e.T63141A12622296.(July 2021).
- [10] Soldo, A. & Guallart, J. (2016). *Oxynotus centrina*. The IUCN Red List of threatened species 2016: e.T63141A97834254. <https://www.iucnredlist.org/species/63141/97834254> (July 2021).
- [11] Dragičević, B., Dulčić, J. & Capapé, C. (2009). Capture of a rare shark, *Oxynotus centrina* (Chondrichthyes: Oxynotidae) in the Eastern Adriatic Sea. *Journal of Applied Ichthyology*, 25(1), 56-59.
- [12] FAO. (2009). Sharks and rays of the Mediterranean and Black Sea. FAO Species Identification Cards. Rome, FAO. 113 p.
- [13] Eryılmaz, L. (2003). A study on the fishes of Bozcaada Island (North Aegean Sea). *Turkish Journal of Marine Sciences*, 9(2), 121-137.



- [14] Kabasakal, H. & Kabasakal, E. (2004). Sharks captured by commercial fishing vessels off the coast of Turkey in the Northern Aegean Sea. In *Annales, Series Historia Naturalis*, 14(2), 171-180.
- [15] Bayhan, Y.K., Çiçek, E., Ünlüer, T. & Akkaya, M. (2006). Güneydoğu Marmara'da algarna ile karides avcılığında av kompozisyonu ve hedef dışı av. *Ege Üniversitesi Su Ürünleri Dergisi*, 23(3-4), 277-283.
- [16] Ismen, A., Yigin, C.C., Inceoglu, H., Arslan, M., Daban, B., Kale, S., Kocabas, E. & Sirin, M. (2013). Chondrichthyan bycatches in the beam trawl shrimp fishery of the Marmara Sea. *Conference: CIESM*, France, 2 pp.
- [17] Öztekin, A., Özekinci, U. & Daban, İ.B. (2016). Length-weight relationships of 26 fish species caught by longline from the Gallipoli Peninsula, Turkey (Northern Aegean Sea). *Cahiers de Biologie Marine*, 57(4), 335-342.
- [18] Yiğın, C.Ç., İşmen, A., Önal, U. & İhsanoğlu, M.A. (2016a). Elasmobranchs of the Sea of Marmara: Catch, biodiversity and conservation. The Sea of Marmara: Marine Biodiversity, Fisheries, Conservation and Governance. *Turkish Marine Research Foundation*. 42, 644-654.
- [19] Yiğın, C.Ç., İşmen, A. & Önal, U. (2016b). Occurrence of a rare shark, *Oxynotus centrina* (Chondrichthyes: Oxynotidae), from Saros Bay, North Aegean Sea, Turkey. *Journal of the Black Sea/Mediterranean Environment*, 22(1), 103-109.
- [20] Kabasakal, H. (2017). Remarks on incidental capture of deep-sea sharks in Marmara shelf waters. In *Annales: Series Historia Naturalis*, 27(2), 137-144.
- [21] Bengil, E.G.T. & Başusta, N. (2018). Chondrichthyan species as by-catch: A review on species inhabiting Turkish waters. *Journal of the Black Sea/Mediterranean Environment*, 24(2), 288-305.
- [22] Şen, Y., Özekinci, U., Ayaz, A., Altınağaç, U. & Öztekin, A., (2021). Balıkçılıkta kontrollü hayalet avcılık. *4th International Congress on Agriculture, Environment and Health*, 20 - 22 May 2021, Aydın, Turkey, 49.
- [23] Sinovic, G., Franicevic, M., Zorica, B. & Ciles-Kec, V. (2004). Length-weight and length-length relationships for 10 pelagic fish species from the Adriatic Sea (Croatia). *J. of Applied Ichthyology*, 20: 156-158.
- [24] Mendes, B., Fonseca, P. & Campos, A. (2004). Weight-length relationships for 46 fish species of the Portuguese west coast. *J. of Applied Ichthyology*, 20: 355-361.
- [25] Ismen, A., Ozen, O., Altinagac, U., Ozekinci, U. & Ayaz, A. (2007), Weight-length relationships of 63 fish species in Saros Bay, Turkey. *Journal of Applied Ichthyology*, 23: 707-708.
- [26] Güven, O., Kebapçioğlu, T. & Deval, M.C. (2012). Length-weight relationships of sharks in Antalya Bay, Eastern Mediterranean. *Journal of Applied Ichthyology*, 28(2), 278-279.
- [27] Megalofonou, P. & Damalas, D. (2004). Morphological and biological characteristics of a gravid angular roughshark (*Oxynotus centrina*) and its embryos from the Eastern Mediterranean Sea. *Cybiurn*, 28(2), 105-110.
- [28] Kabasakal, H. (2003). Historical and contemporary records of sharks from the Sea of Marmara, Turkey. In *Annales, Series Historia Naturalis*, 13(1), 1-12.
- [29] Dalyan, C. (2012). Levant Denizi (Doğu Akdeniz) kuzeydoğusunun üst kıta yamacı balıklarının dağılımları. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora Tezi, İstanbul. 120 s.
- [30] Başusta, N., Turan, C. & Başusta, A. (2015). New Records of gravid female and adult male of the angular rough shark, *Oxynotus centrina* (Oxynotidae) from the Northeastern Mediterranean. *Journal of the Black Sea/Mediterranean Environment*, 21(1), 92-95.
- [31] Gökçe, G., Saygu, I. & Eryaşar, A.R. (2016). Catch composition of trawl fisheries in Mersin Bay with emphasis on catch biodiversity. *Turkish Journal of Zoology*, 40(4), 522-533.
- [32] Yaglıoğlu, D., Deniz, T., Gurlek, M., Erguden, D. & Turan, C. (2015). Elasmobranch bycatch in a bottom trawl fishery in the Iskenderun Bay, Northeastern Mediterranean. *Cahiers de Biologie Marine*, 56(3), 237-243.
- [33] NOAA. (2015). *Impact of "Ghost fishing" via derelict fishing gear*. NOAA Marine Debris Program Report. Silver Spring, MD. 1-25 pp.
- [34] Ayaz, A., Ünal, V. ve Özekinci, U. (2004). İzmir Körfezi'nde hayalet avcılığa neden olan kayıp uzatma ağı miktarının tespitine yönelik bir araştırma. *Ege Üniversitesi Su Ürünleri Dergisi*, 21(1), 35-38.
- [35] Ayaz, A., Acarli, D., Altinagac, U., Ozekinci, U., Kara, A. & Ozen, O. (2006). Ghost fishing by monofilament and multifilament gillnets in Izmir Bay, Turkey. *Fisheries Research*, 79(3), 267-271.
- [36] Kirkim, F., Horton, T., Akyol, O. & Ceyhan, T. (2019). *Natatolana neglecta* (Isopoda, Cirolanidae): an increasing threat for artisanal fishing in the Turkish Aegean Sea. *Crustaceana*, 92(7), 881-887.

- [37] Öndes, F. (2019). Quantification of the problem caused by isopods in the small scale fishery in the Southern Aegean Sea, Turkey. *International Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 12(1), 20-22.

## Potential Application of *Trachystemon orientalis* L. Extracts in the Cosmetic Industries: Skincare, Photoprotective and Antiaging Ingredients

*Trachystemon orientalis* L. Ekstraktlarının Kozmetik Endüstrisinde Kullanım Potansiyeli: Cilt Koruyucu, Güneş Koruyucu ve Yaşlanma Karşıtı İçerikleri

Gamze KURTULUŞ<sup>1</sup> , Orçun TOKSÖZ<sup>2</sup> , Nüzhet Cenk SESAL<sup>3</sup> 

<sup>1,2</sup>Marmara University, Institute of Pure and Applied Sciences, Department of Biology, Goztepe Campus, 34722 Istanbul, Turkey

<sup>3</sup>Marmara University, Science and Arts Faculty, Department of Biology, Goztepe Campus, 34722 Istanbul, Turkey

### Abstract

In recent years, it has become more preferable for the products to be used in cosmetics to be of herbal origin. In particular, plants with high antioxidant properties are preferred to be the source for cosmetic products. Wild edible plants, which are used only by the local people, will be more profitable economically if they are grown for use in different industries, especially in cosmetics. *T.orientalis* is a wild species that grows in the Black Sea region of Turkey. This study aims to show that these plant extracts have the potential for use in the cosmetic industry. For this purpose, firstly the stem, flower, and leaf parts of *T.orientalis* were extracted with acetone and their antioxidant activities were measured. According to the results, antioxidant activity was especially high in stem extracts (DPPH 57,12 mg L-ascorbic acid/g; total phenol 288,10 ± 8,55 mg/g dry weight). Then, the antibacterial and anti-biofilm activity of the extracts on *S. aureus* was investigated. As a result, no effective activity was found. In addition, SPF values and collagenase, tyrosinase, and elastase inhibiting activities were measured. The best results were observed in the stem (SPF 31,18 ± 0,18%; anti-collagenase 87,25%; anti-tyrosinase 11,47%; anti-elastase 57,64%) and leaf extracts (SPF 31,27 ± 0,24%; anti-collagenase 97,57%; anti-tyrosinase 15,03%; anti-elastase ND). As a result, it has been seen that especially the stem parts of *T.orientalis* can be used as an ingredient for photoprotective and antiaging purposes in cosmetics.

**Keywords:** Cosmetics, Herbal sources, Sun protection factor, Photoprotective, Antioxidant, Antiaging.

### Öz

Son yıllarda kozmetik alanında kullanılan ürünlerin bitkisel kaynaklı olması daha çok tercih edilmektedir. Özellikle antioksidan özelliği yüksek bitkilerin kozmetik ürünlerin içeriğinde yer alması öncelikli istek haline gelmiştir. Genelde sadece yöre halkı tarafından kullanılan yabancı bitki türleri, başta kozmetik olmak üzere farklı endüstrilerde kullanılmak üzere yetiştirilirse ülke ekonomisine katkıda bulunacağı aşikârdır. *T.orientalis*, Türkiye'nin Karadeniz bölgesinde yetişen yabancı bir türdür. Bu çalışma, bu bitki ekstraktlarının kozmetik endüstrisinde kullanım potansiyeline sahip olduğunu göstermeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla öncelikle *T.orientalis*'in gövde, çiçek ve yaprak kısımları aseton ile ekstrakte edilmiş ve antioksidan aktiviteleri ölçülmüştür. Sonuçlara göre antioksidan aktivite özellikle gövde ekstraktlarında (DPPH 57,12 mg L-askorbik asit/g; toplam fenol 288,10 ± 8,55 mg/g kuru ağırlık) yüksek bulunmuştur. Daha sonra ekstraktların *S. aureus* üzerindeki antibakteriyel ve anti-biofilm aktiviteleri araştırılmıştır fakat etkili bir aktivite bulunamamıştır. Ayrıca SPF değerleri ve kollajenaz, tirozinaz ve elastaz inhibe edici aktiviteleri ölçülmüştür. En iyi sonuçlar gövde (SPF 31,18 ± %0,18; anti-kollajenaz %87,25; anti-tirozinaz %11,47; anti-elastaz %57,64) ve yaprak ekstraktlarında (SPF 31, %27 ± 0,24; anti-kollajenaz %97,57; anti-tirozinaz %15,03; anti-elastaz ND) tespit edilmiştir. Sonuç olarak, *T.orientalis*'in özellikle gövde kısımlarının kozmetikte fotokoruyucu ve yaşlanma karşıtı olarak kullanılabileceği ön görülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Kozmetik, Bitkisel kaynaklar, Güneş koruyucu faktör, Fotokoruyucu, Antioksidan, Yaşlanma karşıtı.

## I. INTRODUCTION

The estimated growth of the cosmetics market globally in 2020 is 335.6 billion US dollars [1]. Various sunscreen creams, lotions, oils, and gels are produced in the cosmetics industry to avoid the damaging effects of solar ultraviolet (UV) radiation. These sunscreens absorb (chemical sunblock) or reflect (physical sunblock) UV radiations and help protect against suntan, photoaging, and sunburn [2,3]. Chemical UV filters in sunscreens for example oxybenzone and octinoxate have become disputed because of their potential risks to the environment and human healthiness [4]. Instead of these, inorganic filters are used as an alternative. There are two inorganic filters approved by U.S. Food and Drug Administration (FDA); titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) and zinc oxide (ZnO) particles [5]. However, these filters are hazardous to human skin in case of constant application and these

nanoparticles can cause oxidative DNA damage by high activities of Reactive Oxygen Species (ROS) [6]. Moreover, it has been reported in many studies that sunscreens are not completely safe for sun protection due to their ingredients [7,8,9]. Therefore, studies on the use of natural sources for the cosmetic industry will be very important for both environmental and human health.

According to World Cancer Research Fund, skin cancer (melanoma and non-melanoma) is the most common cancer globally [10]. The increase in skin cancers over the past decades is especially related to overexposure to the Sun's rays. Presently, 2 -3 million non-melanoma and 132,000 melanoma skin cancers occur worldwide every year (WHO/World Health Organization) [11]. Exposure to UV radiation is the primary reason for skin cancer. Additionally, photoaging is one of the reasons for skin melanoma, and risk is seen higher in the fair skin people, with about 90% of the European and North American people prevalent to skin photoaging [12]. In order to decrease the risk of skin cancer and to prevent photoaging, many types of research and products are being developed in the field of cosmetics. Natural components have been lately considered as potential sources for agents with sunscreen properties due to their absorption in UV radiation and high antioxidant activities [9, 13]. Phenolic contents (TPC) and flavonoid contents (TFC) in plants can absorb UV and play an essential role against UV radiation [14,15]. The research of cosmetic products containing antioxidant and anti-aging activities and natural sunscreen ingredients has accelerated [1]. Besides, WHO states that accordingly 80% of the world population depends on natural herbal sources as their main treatments [16].

The Solar UV region is divided into 3 subcategories which are, UV-C (200-290 nm), UV-B (290-320 nm), and UV-A (320-400 nm). UV-A and UV-B radiation is the main reason for the generation of ROS and nitrogen centered species and related oxidative stress [17]. Free radicals and oxidative stress caused by UV radiation are important causes of skin photoaging, as they cause oxidation of lipids and proteins in the chemical structure of skin cells. In particular, the effect of UV-induced ROS on the structural proteins of the skin which are collagen and elastin are responsible for preserving the elasticity of the skin, play a significant role in the aging of the skin [18]. Collagen degradation in humans begins with collagenase activation. In addition, oxidative stress causes an increase in collagen destruction with the activation of collagenases, as well as a decrease in collagen synthesis. For this reason, many studies on the avoidance of skin aging focus on the inhibition of collagenase activity [19,20]. Similarly, inhibition of elastase activity induced by UV or ROS can also be applied as a useful method against skin diseases and

aging [21,22]. Inhibition of collagenase and elastase activities by natural herbal contents may be a promising approach to prevent skin aging [23].

In Turkey, there are many plants with high antioxidant content used for medical, cosmetic, and food. Among them, *Trachystemon orientalis* (L.) G. Don (early blooming borage), is a plant whose high antioxidant activity, high TPC and TFC have been reported before [24-27]. However, there is no research on the sunscreen or photoprotective activities of *T. orientalis*. This plant, whose flowering branches, leaves and young stems are consumed as a vegetable by the local people, is wild edible in the Black Sea region. The effects of the plant are not fully known since detailed scientific studies have not been done. In this respect, the main purpose of this study is to examine whether these plant extracts have the potential to be used as photoaging and sunscreen in the cosmetic industry.

## II. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Plant Material

The leaf, stem and flower parts of *T. orientalis* were obtained from local growers of northern Turkey (Sinop Province) was used in this study. In May 2021, plants were obtained and identified using botanical and morphological characteristics. The flower branches, stem, and leave parts were separated, cleaned and then dried for one week at 25 °C.

### 2.2. Preparation of Extracts

A total of 20 g of plant parts was soaked for 24 hours in 200 mL of pure acetone (Merck), changing the solvent three times. Then, the solution was filtered with Whatman filter paper. Solvent removal was carried out under reduced pressure with the aid of a rotary evaporator and acetone extracts of the plants were obtained and stored at 4°C.

### 2.3. Determination of Antioxidant Activity

TPC was measured spectrophotometrically with Cytation-3 (Biotek) using the Folin-Ciocalteu technique [28]. 10 µl of plant extract (1 mg/ml obtained in methanol (Merck)), 100 µl of Folin-Ciocalteu Reagent (Sigma) diluted in distilled water (1:10), and 75 µl of 7,5% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (Merck) were mixed and left in the dark for 1h. The absorbance was read at 750 nm. The tests were repeated ten times. The standard curve was prepared using a 1 mg/ml solution of gallic acid (Merck) in dimethyl sulfoxide (DMSO) (Merck). The concentration of total phenolic content was calculated using the equation derived from the gallic acid standard curve.

TFC was calculated by the aluminum calorimetric method [29]. In order to create a calibration curve, serial solutions of Rutin (Merck) were done starting from 1 mg/mL to 0.0625.(0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1 mg/mL). The plant extracts of ethanol solution (50 µl, 0.3 mg/mL) was added with 150 µl 2% (w/v) AlCl<sub>3</sub>

(SIGMA) in 96-well plates. After 15 minutes of incubation, the absorbance was read at 435 nm. The total flavonoid content of the extracts was calculated as rutin equivalent [mg Rutin equivalent (QE) g<sup>-1</sup> dry extract weight] per dry weight of the extract.

1,1-Diphenyl-2-picryl hydrazyl (DPPH) was used to assay the free radical-scavenging activity of the plant extracts [28]. 20 µl of the plant extracts were diluted with DMSO and the final concentration was obtained as 1 mg/ml. Then, they were mixed with 180 µl of DPPH solution (SIGMA) (40 µg/ml in methanol) in a 96-well plate. After the plates were kept in the dark for 30 minutes, their absorbance was measured at 540 nm with Cytation-3 (Biotek). DMSO was used as a blank instead of the test sample. L-ascorbic acid, dissolved in DMSO, was used as a standard. The results were calculated according to equation (1) given below and the DPPH scavenging effects of the extracts were expressed as a percentage.

$$\text{DPPH}\% = \frac{(\text{Abs}_{\text{control}} - \text{Abs}_{\text{sample}})}{\text{Abs}_{\text{control}}} \times 100 \quad (1)$$

#### 2.4. In Vitro Determination of Sun Protection Factor (SPF)

SPF values of plant extracts were measured according to Mansur's method [30]. 1 mg of plant extracts was weighed and dissolved in 1 ml of ethanol and then, screened by UV spectrophotometer (Beckman Coulter Du730 Spectrophotometer) from 290 to 320 nm. Absorption spectra of the samples were measured in quartz tubes in 3 repetitions. Ethanol was used as the blank. After the measurements, SPF values were calculated according to the following equation (2) given below:

$$\text{SPF} = \text{CF} \times \sum_{320-290} \text{EE}(\lambda) \times \text{I}(\lambda) \times \text{ABS}(\lambda) \quad (2)$$

- CF = 10 (correction factor)
- EE(λ) = erythemalogenic effect
- I(λ) = Sun intensity
- ABS(λ) = absorbance

#### 2.5. Tyrosinase Inhibition Assay

Tyrosinase from mushroom (Sigma) was used as an enzyme and L-DOPA (Cayman Chemicals) was used as a substrate [31]. 150 µl of phosphate buffer (0.05 M, pH=6.8), 10 µl of 1 mg/ml plant extracts, and 20 µl of enzyme solution were added to the wells in the microplate. The microplate was shaken for 3 minutes in the Cytation-3 and the first absorbance was read at 475 nm. And then, this solution was incubated at 37°C for 10 minutes. After incubation period, 20 µl of the substrate (8.5 Mm, L-DOPA) was added and incubated again at 37°C for 10 minutes to obtain the final absorbance value at 475 nm. Kojic acid (Cayman Chemicals) was utilized as a positive control in this experiment.

Inhibition % of the tyrosinase enzyme was determined using equation (3):

$$\text{Inhibition \%} = \frac{(\text{A}_{\text{control}} - \text{A}_{\text{sample}})}{\text{A}_{\text{control}}} \times 100 \quad (3)$$

#### 2.6. Collagenase Inhibition Assay

Collagenase from *Clostridium histolyticum* (ChC) (Sigma) was dissolved in the 50 mM Tricine buffer (10 mM CaCl<sub>2</sub> and 400 mM NaCl, pH 7.5) (Fisher Scientific) for use at an initial concentration of 0.8 units/ml. The synthetic substrate, N-[3-(2-furyl)akriolil]-Leu-Gly-Pro-Ala (FALGPA), (Sigma) was dissolved in the Tricine buffer to 2 mM. The tests were performed in 96-well microplates. Sample extracts (25 µl Tricine buffer, 25 µl extracts (1 mg/ml)) were incubated with the enzyme (25 µl ChC) in the buffer for 15 minutes before adding substrate. After the incubation, 50 µl of the substrate (FALGPA) was added to the wells, and absorbances were measured at 340 nm for 20 minutes. Measurements were made for each sample in triplicate. The positive control in this experiment was (-) Epigallocatechin gallate (EGCG) (Acros). The enzyme inhibition value was determined according to the following equation (4) [32].

$$\text{Inhibition}\% = \frac{(\text{A}_{340\text{control}} - \text{A}_{340\text{sample}})}{\text{A}_{340\text{control}}} \times 100 \quad (4)$$

#### 2.7. Elastase Inhibition Assay

For the measurement of elastase activity, elastase obtained from pig pancreas was used as the enzyme source and N-Succinyl-Ala-Ala-Ala-p-nitroanilide (SANA) (Sigma) was used as a substrate. A concentration of 3.33 mg/ml was obtained by dissolving the enzyme in 0.2 mM Tris-HCl (Sigma) buffer at pH 8.0. The substrate was also dissolved in the same buffer solution at a concentration of 1.6 mM. plant extracts, 10 µl of the enzyme, 10 µl of extract, and 120 µl of Tris-HCl were incubated with the enzyme at 25°C for 20 minutes, then 10 µl of substrate solution was added. The absorbance at 410 nm was measured in comparison to the control. EGCG, 250 mM (0.115 mg/ml) was used for positive controls [22].

Calculations for elastase activity determination were made as follows equation (5):

$$\text{Enzyme inhibition activity (\%)} = \frac{(\text{A}_{\text{control}} - \text{A}_{\text{sample}})}{\text{A}_{\text{control}}} \times 100 \quad (5)$$

#### 2.8. Determination of Antibacterial Activity and Biofilm

For the determination of antibacterial activity, *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 was incubated overnight at 37 °C in the Tryptic Soy (TS) (Merck) broth. The antibacterial activity tests were performed in 96-well microplates. TS broth and serial dilutions of the plant extracts were added to each well. The final

concentrations of all plant extracts were 240, 120, and 60 µg/ml. The tests were performed in four replicates. The ratios of bacterial growth were measured at an optical density (OD) of 450-600 nm with the Cytation 3 microplate reader.

For the biofilm experiment, *S. aureus* ATCC 25923 was incubated at 37°C for 24 hours in the Tryptic Soy (TS) broth. The potential anti-biofilm activities of the plant extracts at the concentrations of 120, 60, 30 µg/ml were analyzed in 96 well microplates. The tests were performed in four replicates. To screen biofilm formations and possible anti-biofilm efficacy of the tested extracts, the microplates were stained with 0.1% crystal violet (Sigma) and measured at OD 590 nm by using Cytation 3-Biotek microplate reader.

## 2.9. Statistical analyses

The statistical analyses were performed in triplicate using One-way Anova analysis of variance followed by Tukey's test. The significance of the applications was designated at the  $P < 0.05$  level. The data presented are means  $\pm$  Standard Deviation (SD).

## III. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1. Determination of Antioxidant Activity

It is known that ROS caused by environmental factors such as UV rays cause skin problems such as wrinkles and hyperpigmentation. For this reason, most of the plants are used in the cosmetics industry because they have natural antioxidant content [33]. *T.orientalis*, which is a wild edible plant in the Black Sea Region of Turkey, is only used as food by the local people and there are not many studies other than antioxidants and TPC/TFC of this plant [24-27]. In previous studies, it has been reported that *T. orientalis* extract is a natural antioxidant source due to its flavonoid, phenolic, and anthocyanin compounds.

DPHH radical scavenging assay was used to determine the antioxidant activities of acetone crude extracts of *T.orientalis* as shown in Table 1. According to our results, the highest DPPH activity was found in the stem parts of *T. orientalis* (57,12 mg/ml-ascorbic acid/g), while the medium activity was observed in the leaf parts (13,21 mg/l ascorbic acid/g) and the least activity was observed in the flower parts (0,98 mg/L ascorbic acid/g). In a previous study, Saçan [26] reported that the leaves of *T. orientalis* showed a high radical scavenging potential with an  $81.99 \pm 7.45\%$  DPPH inhibition percentage. In another study, radical removal activities of Butylated hydroxytoluene (BHA), butylated hydroxyanisole (BHT), leaf and stem extracts were determined as  $85.2 \pm 3.2\%$ ,  $79.3 \pm 2.9\%$ ,  $65.1 \pm 2.4\%$  and  $59.4 \pm 2.7\%$ , respectively [27]. When the results obtained in this study were compared with the

literature, the acetone extract of the stem of *T.orientalis* showed higher activity than the leaves.

The amount of TPC in acetone extracts of *T. orientalis* was ranged from  $67,93 \pm 4,86$  to  $288,10 \pm 8,55$  mg GAE/g (Table 1). The stem parts of *T. orientalis* extracts showed the highest TPC values of  $288,10 \pm 8,55$  mg GAE/g. In literature, the maximum level of TPC in the water extract of edible body parts of *T. orientalis* was reported to be 90 mgGA/g [25]. In another study, it was reported that *T. orientalis* leaf extract contains  $36.00 \pm 0.59$  µg pyrocatechol/mg TPC [26]. Moreover, Ayhan [27] reported that, TPC of methanolic leaf and stem extracts of *T. orientalis* as 67.01 mg GAE/g and 54.04 mg GAE/g, respectively. Lastly, Demir [34] reported that TPC of methanol, ethanol and pure water extracts of *T. orientalis* as 0.749 mg GAE/g, 1.81 mg GAE/g and 3.62 mg GAE/g, respectively. When the results obtained in this study were compared with the literature, a much higher TPC was observed, especially in the acetone extract of the stem of *T.orientalis*.

The amount of TFC in acetone extracts of *T. orientalis* was ranged from  $28,45 \pm 1,98$  to  $406,65 \pm 9,59$  mg Rutin/g (Table 1). The leaf parts of extracts from *T. orientalis* showed the highest TFC values of  $406,65 \pm 9,59$  mg Rutin/g. In a previous study, TFC of dry weight of *T. orientalis* were determined as  $82.1 \pm 1.5$  mg pyrocatechol/g [24]. In another study, the maximum level of TFC in the water extract of edible body parts of *T. orientalis* was reported to be 56.88 mg catechin/g [25]. Moreover Saçan [26] reported that *T. orientalis* leaf extract contains  $29.34 \pm 0.62$  µg TFC. Finally, Ayhan [27] reported a phenol concentration of 68.9 mg pyrogallat/g and 17.5 mg pyrogallat/g respectively in water and ethanolic extracts. When the results obtained in this study were compared with the literature, much higher TFC was observed specially in the acetone extract of the leaf of *T.orientalis*.

It is reported that in many plants antioxidant activities correlate positively with TPC [35]. According to our results, we observed that there is a correlation between antioxidant activity and the TPC of the extracts. The presence of high TFC/TPC in the plant extracts may attribute to their antioxidant activities. From this point of view, extracts obtained from the roots of *T.orientalis* can be used as a potential sunscreen as they give more successful results than extracts obtained from other parts of the plant. Therefore, it can be suggested that the use of *T.orientalis* has advantages for the cosmetics sector, as it is not only consumed as a vegetable by the local people but also an easily grown plant.

**Table 1.** Antioxidant activity of acetone extracts from *T.orientalis*

	DPPH% (mg L-ascorbic acid /g)	Total phenolics (mg Gallic acid/g)	Total flavonoids (mg Rutin/g)
L-Ascorbic Acid	74,20		
<i>T. orientalis</i> (Leaf)	13,21 <sup>b</sup>	79,70±4,93 <sup>a</sup>	406,65±9,59 <sup>c</sup>
<i>T. orientalis</i> (Stem)	57,12 <sup>a</sup>	288,10±8,55 <sup>b</sup>	141,49±1,02 <sup>b</sup>
<i>T. orientalis</i> (Flower)	0,98 <sup>c</sup>	67,93±4,86 <sup>a</sup>	28,45±1,98 <sup>a</sup>

The results were shown as mean ± SD of the assays. The data which are shown as a, b, c are significantly different ( $p < 0.05$ ).

### 3.2. Photoprotective activity/ Sun Protection Factor (SPF)

The sunscreen activities of plants are determined by measuring their SPF values. According to FDA, SPF is a data of how much UV radiation is required to cause sunburn on protected skin [36]. Additionally, SPF is related to the amount of solar energy required to produce sunburn on unprotected skin. Therefore SPF number is important data for quantifying the effectiveness of sunscreen.

The SPF values of the leaf, stem, and flower parts of *T.orientalis* are shown in Table 2. The results showed that the leaves and stems of *T. orientalis* had the highest SPF value (about 31 mg/ml). The SPF values of the leaf parts of *T.orientalis* were found to be approximately 12 mg/ml.

**Table 2.** Photoprotective activity/ Sun Protection Factor (SPF) of *T.orientalis*

	Sun Protection Factor (SPF 1 mg/ml)
Rutin	32,11 ± 0,04 <sup>b</sup>
<i>T. orientalis</i> (Leaf)	31,27 ± 0,24 <sup>b</sup>
<i>T. orientalis</i> (Stem)	31,18 ± 0,18 <sup>b</sup>
<i>T. orientalis</i> (Flower)	12,03 ± 0,01 <sup>a</sup>

The results were shown as mean ± SD of the assays. The data which are shown as a, b are significantly different ( $p < 0.05$ ).

SPF values are considered as a minimum (2–12), moderate (12–30), and high ( $\geq 30$ ) [37]. According to our results, the plant extracts had both high and moderate sunscreen activities. Whereas we observed the highest SPF activity in leaf extracts of *T.orientalis* (31.27 ± 0,24 mg/ml), the lowest SPF activity was observed in flower extracts of *T. orientalis* with a medium protection effect by a value of 12,03 ± 0,01 mg/ml.

The possible correlation between SPF values with TPC and TFC was indicated in the literature [38,39,13]. There are several studies investigating the correlation between SPF values and the amount of

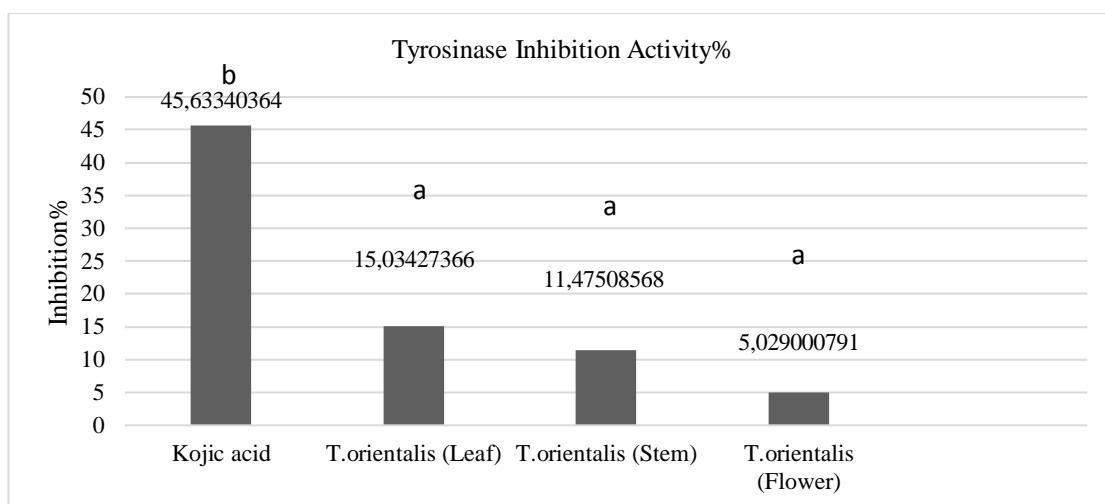
antioxidant and TFC/TPC of medicinal plants [9]. Researchers reported that there was a link between SPF and TPC, but no correlation between flavonoid and antioxidant activity and SPF. However, our results suggest that there is a correlation between antioxidant activity and the total flavonoid/phenolic compounds and also SPF values of the extracts.

### 3.3. Tyrosinase Inhibition Activity

Tyrosinase inhibitors reduce hyperpigmentation in human skin, especially caused by environmental factors. Tyrosinase inhibitory activities of various agents such as kojic acid are reported [40]. In this study, potential tyrosinase inhibitory activities of the acetone extracts of *T. orientalis* were investigated and kojic acid was utilized as a positive control. Tyrosinase inhibitory activity of many plant extracts was carried out to find new sources of anti-tyrosinase compounds [41]. Due to the increasing use of herbal resources in cosmetic products, tyrosinase inhibitory activities of different parts of the herbal material have been reported by several studies [42-44]. In particular, medicinal plants from traditional medicine systems have the potential to be used for the treatment of hyperpigmentation and as tyrosinase inhibitors [45].

The anti-tyrosinase activities of the leaf, stem, and flower parts of *T.orientalis* are shown in Figure 1. Our results demonstrated that the leaf extracts of *T.orientalis* showed more successful inhibition compared to stem and flower extracts. On the other hand, the lowest inhibition was observed in the extracts obtained from flower parts of *T.orientalis*.

Skin pigmentation is an important mechanism for preventing UV radiation damage. Melanin absorbs UV radiation, thus protecting skin cells from UV radiation damage. Tyrosinase plays a role in catalyzing skin pigmentation and is directly related to pigmentation disorders in human [41]. Our data obtained from the experiments for in vitro SPF values and tyrosinase inhibition activity show that leaf and stem extracts of *T. orientalis* have a potential to be used effectively in the cosmetic industry.



**Figure 1.** Tyrosinase inhibition activity of *T.orientalis*

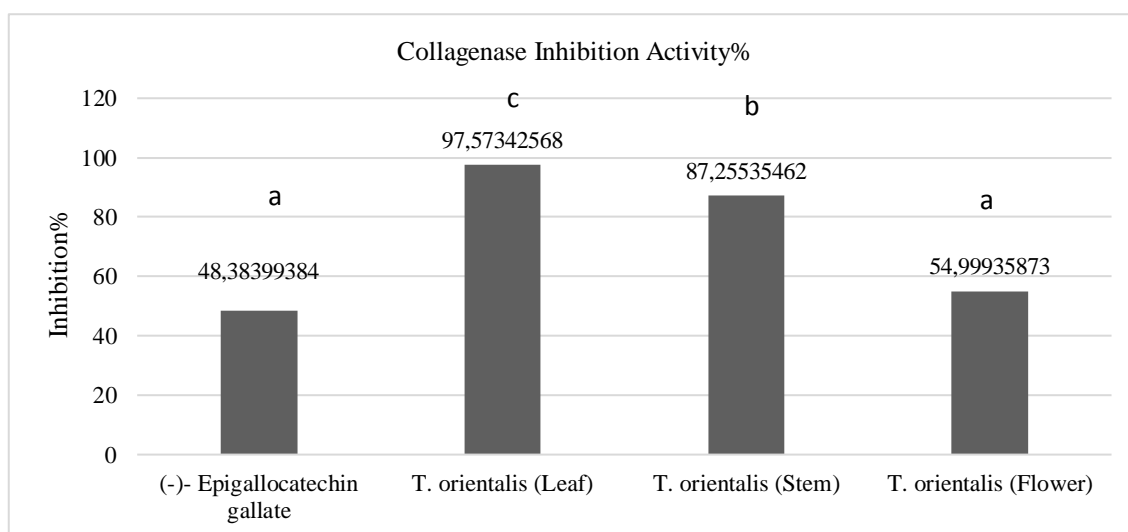
The results were shown as mean  $\pm$  SD of the assays. The data which are shown as a, b are significantly different ( $p < 0.05$ ).

### 3.4. Anti-Collagenase Activity

It is known that UV radiation promotes ROS production and increases collagen degradation. As a result of collagen degradation, skin aging occurs. [46]. For this reason, the effects of inhibitors that will prevent collagen degradation are very important. The inhibitory effect of acetone extracts of different parts of *T.orientalis* (leaf, stem, flower) on collagenase activity was evaluated using collagenase enzyme obtained from *Clostridium histolyticum* (Figure 2). The best inhibition was observed in the leaf extracts of *T.orientalis*. Moreover, the stem extracts also had considerably high collagenase inhibitory activity with the inhibition ratio of 87.25%. The high efficiency (54.99%) was also recorded for the acetone extracts from flower parts of *T.orientalis*. The results obtained are higher than the positive control, indicating that the inhibition activities are very high. The reason for the results to be higher than the positive control is thought

to be due to the synergistic effect of the substances in *T.orientalis* extracts.

To our best of knowledge, there is no study evaluating the anti-collagenase activity of the extracts from different parts of *T.orientalis*. In a study, collagenase and elastase activities were investigated by extracting different parts of plants belonging to Asphodeline with different solvents, which is endemic in Turkey and consumed as a local food [47]. According to the results of the researchers, they observed that these activities varied depending on the different parts of the plant. They reported that the plants consumed as food on a local basis may have potential importance for the cosmetic sector. According to the our results, the anti-collagenase activity of *T.orientalis* was noticeably higher especially in leaf extracts as well as stem extracts. Similarly, this plant is thought to have the potential for use in the cosmetic industry.



**Figure 2.** Anti-collagenase activity of *T.orientalis*

The results were shown as mean  $\pm$  SD of the assays. The data which are shown as a, b, c are significantly different ( $p < 0.05$ ).



### 3.5. Elastase Inhibition Activity

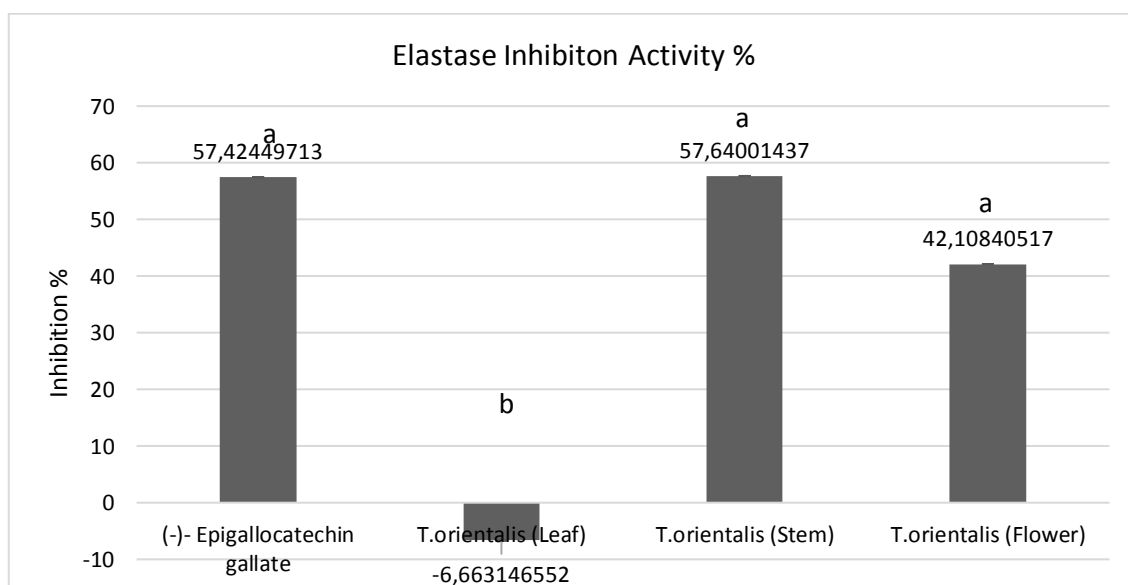
Elastase is usually found in connective tissue and disrupts the elastic fibers that give the skin its elasticity, and therefore elastic fiber degeneration is thought to be related to the formation of wrinkles [48]. In recent studies, it has been shown that especially some local endemic and wild plant species have inhibitory efficiencies on elastase activities [49,50].

The anti-elastase activities of the acetone extracts of leaf, stem, and flower parts of *T.orientalis* are shown in Figure 3. The best anti-elastase activity was observed in the stem extracts of *T. orientalis* with the inhibition ratio of 57.64%. Moreover, the flower extracts also had considerably high elastase inhibitory

activity with an inhibition ratio of 42.11%.

The results obtained are similar to the positive control, indicating that the inhibition activities are high. When the leaf extract was compared with the positive control, it was determined that there was no inhibition activity.

According to our results, elastase inhibition activity of *T.orientalis* was observed in the stem and flower extracts, but not in the leaf extracts. From this point of view, it can be suggested that stem and flower extracts of *T. orientalis* can be used in the cosmetic industry due to their potential elastase inhibitory activities.



**Figure 3.** Elastase inhibition activity of *T.orientalis*

The results were shown as mean  $\pm$  SD of the assays. The data which are shown as a, b, c are significantly different ( $p < 0.05$ ).

### 3.6. Determination of Antibacterial Activity and Biofilm

In the present study, we also tested antibacterial activities of the acetone extracts of leaf, stem, and flower parts of *T.orientalis* against *S.aureus* ATCC 25923, but we observed no antibacterial efficacy at tested concentrations of 60, 120, and 240  $\mu\text{g/ml}$ . Similar to our results, either very low or no antibacterial activity was reported against *S.aureus* ATCC 25923 in previous studies [27,51]. In a study evaluating the antimicrobial activities of ethanol and petroleum ether extracts of various plants collected from the Sakarya region on different microorganisms by disc diffusion methods, it was demonstrated that both *T.orientalis* extracts had no activity against *S.aureus*. However, they reported that only *T.orientalis* ethanol extract was effective against *E.coli* [51]. In another study, researchers tested the antimicrobial activities of leaf and stem extracts of *T.orientalis* against some Gram-negative bacteria and Gram-positive bacteria. They reported that the highest

antimicrobial activity was against *E.coli* and *B. subtilis*. On the other hand, the lowest antimicrobial activity was detected against *S.aureus* [27].

Inhibition of biofilm formation was conducted on the acetone extracts of leaf, stem, and flower parts of *T.orientalis*. There is no inhibition was recorded for extracts. Since there were no previous antibiofilm studies, no comparison could be made with *T.orientalis*.

The reason why we could not detect any antimicrobial activity and biofilm inhibition for the extracts of *T.orientalis* against *S.aureus* may be due to the insufficient concentrations of the extracts or the variability of antibacterial and biofilm activity according to the bacterial species.

It has been demonstrated that stem extracts of *T. orientalis* have the highest anti-elastase, SPF and antioxidant activities. The leaf extracts had the highest anti-collagenase activity. Moreover, leaf extracts also

had considerably high SPF and antioxidant activities. Finally, flower extracts had effective anti-collagenase and anti-elastase activities. Our data obtained from the experiments show that especially leaf and stem extracts of *T. orientalis* have a potential to be used effectively in the cosmetic industry.

#### IV. CONCLUSION

In conclusion, total phenolic content of *T. orientalis* indicates that it can be used as a natural source of natural antioxidants and sunscreen in pharmaceutical or cosmetic formulations. Due to the high total phenolic content (TPC) and total flavonoid content (TFC) of *T. orientalis*, it can be suggested that absorption of UV radiation and prevention of skin damage can be successfully achieved by using this plant in formulations. The TPC and TFC in plant extracts degrade ROS damage caused by exposure of skin to UV radiation and reduce the negative effects of sunburn. Considering the potential inhibitory efficacies of *T. orientalis* for collagenase, elastase, and tyrosinase activities, it could be suggested that *T. orientalis* may be a potential source of anti-aging in the field of cosmetics. The fact that this plant grows easily in nature as wild species is an important positive aspect. It is predicted that if it is cultured, it can be used as a potential resource for the cosmetics industry. In summary, *T. orientalis* extracts, especially obtained from stem parts of the plant, has the potential for use as photoaging and sunscreen in the cosmetic industry.

#### REFERENCES

- [1] Khuaneekkaphan, M., Noysang, C., & Khobjai, W. (2020). Anti-aging potential and phytochemicals of *Centella asiatica*, *Nelumbo nucifera*, and *Hibiscus sabdariffa* extracts. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 11(4), 174.
- [2] Hubbard, G., Kyle, R. G., Neal, R. D., Marmara, V., Wang, Z., & Dombrowski, S. U. (2018). Promoting sunscreen use and skin self-examination to improve early detection and prevent skin cancer: quasi-experimental trial of an adolescent psycho-educational intervention. *BMC Public Health*, 18(1), 1-15.
- [3] Sharma, T., Tyagi, V., & Bansal, M. (2020). Determination of sun protection factor of vegetable and fruit extracts using UV-Visible spectroscopy: A green approach. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 18, 100347.
- [4] Schneider, S. L., & Lim, H. W. (2019). A review of inorganic UV filters zinc oxide and titanium dioxide. *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine*, 35(6), 442-446.
- [5] Osmond, M. J., & Mccall, M. J. (2010). Zinc oxide nanoparticles in modern sunscreens: an analysis of potential exposure and hazard. *Nanotoxicology*, 4(1), 15-41.
- [6] Tyagi, N., Srivastava, S. K., Arora, S., Omar, Y., Ijaz, Z. M., Ahmed, A. G., ... & Singh, S. (2016). Comparative analysis of the relative potential of silver, Zinc-oxide and titanium-dioxide nanoparticles against UVB-induced DNA damage for the prevention of skin carcinogenesis. *Cancer letters*, 383(1), 53-61.
- [7] Vainio, H., Miller, A. B., & Bianchini, F. (2000). An international evaluation of the cancer-preventive potential of sunscreens.
- [8] Westerdahl, J., Ingvar, C., Måsbäck, A., & Olsson, H. (2000). Sunscreen use and malignant melanoma. *International journal of cancer*, 87(1), 145-150.
- [9] Ebrahimzadeh, M. A., Enayatifard, R., Khalili, M., Ghaffarloo, M., Saeedi, M., & Charati, J. Y. (2014). Correlation between sun protection factor and antioxidant activity, phenol and flavonoid contents of some medicinal plants. *Iranian journal of pharmaceutical research: IJPR*, 13(3), 1041.
- [10] Clinton, S. K., Giovannucci, E. L., & Hursting, S. D. (2020). The world cancer research fund/American institute for cancer research third expert report on diet, nutrition, physical activity, and cancer: impact and future directions. *The Journal of nutrition*, 150(4), 663-671.
- [11] Skin cancers. World Health Organization. <https://www.who.int/uv/publications/en/primaryteach> Date accessed: October 21, 2021
- [12] Shah, H., & Mahajan, S. R. (2013). Photoaging: New insights into its stimulators, complications, biochemical changes and therapeutic interventions. *Biomedicine & Aging Pathology*, 3(3), 161-169.
- [13] Hashemi, Z., Ebrahimzadeh, M. A., & Khalili, M. (2019). Sun protection factor, total phenol, flavonoid contents and antioxidant activity of medicinal plants from Iran. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 18(7), 1443-1448.
- [14] de Oliveira-Junior, R. G., Souza, G. R., Guimarães, A. L., de Oliveira, A. P., de Souza Araújo, C., Silva, J. C., ... & da Silva Almeida, J. R. G. (2015). Photoprotective, antibacterial activity and determination of phenolic compounds of *Neoglaziovia variegata* (Bromeliaceae) by high performance liquid chromatography-diode array detector (HPLC-DAD) analysis. *African Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 9(22), 576-584.
- [15] Oliveira, M. B., Valentim, I. B., Santos, T. R., Xavier, J. A., Ferro, J. N., Barreto, E. O., ... & Goulart, M. O. (2021). Photoprotective and antiglycation activities of non-toxic *Cocos nucifera* Linn.(Arecaceae) husk fiber ethanol extract and its phenol chemical composition. *Industrial Crops and Products*, 162, 113246.
- [16] Shukri, S. M., Pardi, F., & Sidik, N. J. (2021).

- In Vitro* anti-collagenase activity and total phenolic content of five selected herbs: a review. *Science Letters*, 15(1), 117-127.
- [17] Piccinino, D., Capecechi, E., Tomaino, E., Gabellone, S., Gigli, V., Avitabile, D., & Saladino, R. (2021). Nano-Structured Lignin as Green Antioxidant and UV Shielding Ingredient for Sunscreen Applications. *Antioxidants*, 10(2), 274.
- [18] Era, B., Floris, S., Sogos, V., Porcedda, C., Piras, A., Medda, R., ... & Pintus, F. (2021). Anti-Aging Potential of Extracts from *Washingtonia filifera* Seeds. *Plants*, 10(1), 151.
- [19] Ganceviciene, R., Liakou, A. I., Theodoridis, A., Makrantonaki, E., & Zouboulis, C. C. (2012). Skin anti-aging strategies. *Dermato-endocrinology*, 4(3), 308-319.
- [20] Nantarat, N., Mueller, M., Lin, W. C., Lue, S. C., Viernstein, H., Chansakaow, S., ... & Leelapornpisid, P. (2020). Sesaminol diglucoside isolated from black sesame seed cake and its antioxidant, anti-collagenase and anti-hyaluronidase activities. *Food Bioscience*, 36, 100628
- [21] Lee, J. H., & Kim, T. Y. (1999). Relationship between constitutive skin color and ultraviolet light sensitivity in Koreans. *Photodermatology, photoimmunology & photomedicine*, 15(6), 231-235.
- [22] Chompoo, J., Upadhyay, A., Fukuta, M., & Tawata, S. (2012). Effect of *Alpinia zerumbet* components on antioxidant and skin diseases-related enzymes. *BMC complementary and alternative medicine*, 12(1), 1-9.
- [23] Deniz, F. S. S., Orhan, I. E., & Duman, H. (2021). Profiling cosmeceutical effects of various herbal extracts through elastase, collagenase, tyrosinase inhibitory and antioxidant assays. *Phytochemistry Letters*, 45, 171-183.
- [24] Özen, T. (2010). Antioxidant activity of wild edible plants in the Black Sea Region of Turkey. *Grasas y aceites*, 61(1), 86-94.
- [25] Çol Ayvaz, M. (2015). Antioxidant activity of *Trachystemon orientalis* (L.) G. Don (Borage) grown and eaten as food in Ordu, Turkey. *Herba Polonica*, 61(4).
- [26] Sacan, O. (2018). Antioxidant Activity, Total Phenol and Total Flavonoid Contents of *Trachystemon orientalis* (L.) G. Don. *European Journal of Biology*, 77(2), 70-75.
- [27] Ayhan, B. S., Yalçın, E., Çavuşoğlu, K., & Acar, A. (2019). Antidiabetic potential and multi-biological activities of *Trachystemon orientalis* extracts. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13(4), 2887-2893.
- [28] Clarke, G., Ting, K. N., Wiart, C., & Fry, J. (2013). High correlation of 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging, ferric reducing activity potential and total phenolics content indicates redundancy in use of all three assays to screen for antioxidant activity of extracts of plants from the Malaysian rainforest. *Antioxidants*, 2(1), 1-10.
- [29] Yang, Y. C., Lii, C. K., Lin, A. H., Yeh, Y. W., Yao, H. T., Li, C. C., ... & Chen, H. W. (2011). Induction of glutathione synthesis and heme oxygenase 1 by the flavonoids butein and phloretin is mediated through the ERK/Nrf2 pathway and protects against oxidative stress. *Free Radical Biology and Medicine*, 51(11), 2073-2081
- [30] Mansur, J. D. S., Breder, M. N. R., Mansur, M. C. D. A., & Azulay, R. D. (1986). Determinação do fator de proteção solar por espectrofotometria. *An. Bras. Dermatol*, 121-4.
- [31] Chiari, M. E., Joray, M. B., Ruiz, G., Palacios, S. M., & Carpinella, M. C. (2010). Tyrosinase inhibitory activity of native plants from central Argentina: Isolation of an active principle from *Lithrea molleoides*. *Food chemistry*, 120(1), 10-14.
- [32] Van Wart, H. E., & Steinbrink, D. R. (1981). A continuous spectrophotometric assay for *Clostridium histolyticum* collagenase. *Analytical biochemistry*, 113(2), 356-365.
- [33] Kusumawati, I., & Indrayanto, G. (2013). Natural antioxidants in cosmetics. In *Studies in natural products chemistry* (Vol. 40, pp. 485-505). Elsevier.
- [34] Demir, E. Profile of fatty acids, vitamins, phytosterols and phenolic acids in *Trachystemon orientalis* L. and evaluation of their antioxidant activity. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (33), 112-118.
- [35] Kızıl, G., Kızıl, M., Yavuz, M., Emen, S., & Hakimoğlu, F. (2008). Antioxidant Activities of Ethanol Extracts of *Hypericum triquetrifolium* and *Hypericum scabroides*. *Pharmaceutical Biology*, 46(4), 231-242.
- [36] Sun Protection Factor (SPF). Center for Drug Evaluation and Research. Food and Drug Administration <https://www.fda.gov/about-fda/center-drug-evaluation-and-research-cder/sun-protection-factor-spf> Date accessed: October 21, 2021
- [37] Ratnasooriya, W. D., Pathirana, R. N., Dissanayake, A. S., Samanmali, B. L. C., & Desman, P. K. (2016). Evaluation of invitro sun screen activities of salt marshy plants *Suaeda monoica*, *Suaeda maritima* and *Halosarcia indica*. *International Journal of Pharmaceutical Research & Allied Sciences*, 5(2)
- [38] Khazaeli, P., & Mehrabani, M. (2010). Screening of sun protective activity of the ethyl

- acetate extracts of some medicinal plants. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*, (1), 5-9.
- [39] Yasmeen, S. H. A. G. U. F. T. A., & Gupta, P. R. O. M. I. L. A. (2016). *In vitro* demonstration of *Dalbergia sissoo* (Indian rosewood) methanolic extracts as potential agents for sunscreens and DNA nick prevention. *Int J Pharm Pharm Sci*, 8(6), 175-81.
- [40] Saidi, I., Nimbarte, V. D., Schwalbe, H., Waffo-Téguo, P., Harrath, A. H., Mansour, L., ... & Jannet, H. B. (2020). Anti-tyrosinase, anti-cholinesterase and cytotoxic activities of extracts and phytochemicals from the Tunisian *Citharexylum spinosum* L.: Molecular docking and SAR analysis. *Bioorganic Chemistry*, 102, 104093.
- [41] Zolghadri, S., Bahrami, A., Hassan Khan, M. T., Munoz-Munoz, J., Garcia-Molina, F., Garcia-Canovas, F., & Saboury, A. A. (2019). A comprehensive review on tyrosinase inhibitors. *Journal of enzyme inhibition and medicinal chemistry*, 34(1), 279-309.
- [42] Chatatikun, M., Supjaroen, P., Promlat, P., Chantarangkul, C., Waranuntakul, S., Nawarat, J., & Tangpong, J. (2020). Antioxidant and Tyrosinase Inhibitory Properties of an Aqueous Extract of *Garcinia atroviridis* Griff. ex. T. Anderson Fruit Pericarps. *Pharmacognosy Journal*, 12(1).
- [43] Bakhouché, I., Aliat, T., Boubellouta, T., Gali, L., Şen, A., & Bellik, Y. (2021). Phenolic contents and *in vitro* antioxidant, anti-tyrosinase, and anti-inflammatory effects of leaves and roots extracts of the halophyte *Limonium delicatulum*. *South African Journal of Botany*, 139, 42-49.
- [44] Chelly, S., Chelly, M., Occhiuto, C., Cimino, F., Cristani, M., Saija, A., ... & Antonio, S. (2021). Evaluation of antioxidant, anti-inflammatory and antityrosinase potential of extracts from different aerial parts of *Rhanterium suaveolens* from Tunisia. *Chemistry & Biodiversity*.
- [45] Mukherjee, P. K., Biswas, R., Sharma, A., Banerjee, S., Biswas, S., & Katiyar, C. K. (2018). Validation of medicinal herbs for anti-tyrosinase potential. *Journal of herbal medicine*, 14, 1-16.
- [46] Iwamoto, A., Yamauchi, R., Oogai, S., Tsuruta, Y., Keisuke, T., Nagata, Y., & Yanagita, T. (2022). Lotus root extract inhibits skin damage through suppression of collagenase production *in vitro*. *Cytotechnology*, 1-9.
- [47] İlhan, M., Zengin, G., Küpeli Akkol, E., Aktümsek, A., & Süntar, I. (2016). The importance of Asphodeline species on enzyme inhibition: anti-elastase, anti-hyaluronidase and anti-collagenase potential. *Turk. J. Pharm. Sci*, 13, 323-327.
- [48] Kim, S. Y., Go, K. C., Song, Y. S., Jeong, Y. S., Kim, E. J., & Kim, B. J. (2014). Extract of the mycelium of *T. matsutake* inhibits elastase activity and TPA-induced MMP-1 expression in human fibroblasts. *International journal of molecular medicine*, 34(6), 1613-1621.
- [49] Chiochio, I., Mandrone, M., Sanna, C., Maxia, A., Tacchini, M., & Poli, F. J. I. C. (2018). Screening of a hundred plant extracts as tyrosinase and elastase inhibitors, two enzymatic targets of cosmetic interest. *Industrial crops and products*, 122, 498-505.
- [50] Gangadharan, A. (2021). Free radical scavenging and elastase inhibitory activity of different extracts of *Leucas aspera* (Willd.) Link-An *in vitro* study. *Indian Journal of Natural Products and Resources (IJNPR)[Formerly Natural Product Radiance (NPR)]*, 12(1), 61-67.
- [51] Uzun, E., Sariyar, G., Adsersen, A., Karakoc, B., Ötük, G., Oktayoglu, E., & Pirildar, S. (2004). Traditional medicine in Sakarya province (Turkey) and antimicrobial activities of selected species. *Journal of ethnopharmacology*, 95(2-3), 287-296.

# Bakır İzabe Curufu Flotasyon Atığından FeS<sub>2</sub> İlaveli Asit Kavurma, Liç ve Manyetik Ayırma ile Baz Metal ve Manyetik Ürün Eldesinin Araştırılması

*Investigation of Base Metals and Magnetic Product Extraction from Copper Smelter Slag Flotation Tailing by FeS<sub>2</sub> Added Acid Baking, Leaching and Magnetic Separation*

Elif UZUN KART<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 34854, İstanbul, Türkiye

## Öz

Bakır izabe curufu flotasyon atığına (CFA) daha önce literatürde ve endüstride hiç uygulanmamış pirit ilaveli asit kavurma işlemi sonrası liç ile baz metallerin ve liç atığı manyetik ayırma ile manyetik ürünlerin kazanımı çalışılmıştır. Çalışmadaki CFA, Türkiye'nin kuzeyinde bulunan sülfürlü bakır madeninin izabesi sırasında açığa çıkan curufun %87 bakır geri kazanılan flotasyonu sonucu kalan fayalit (FeO·SiO<sub>2</sub>) faz ve bu faza nüfuz etmiş (%0,34) Cu, (%4,16) Zn ve (%0,15) Co baz metallerini içeren çözünmeyen/refrakter camı/amorf yapıdır. Piritli, pirit ilaveli asitli kavurma işlemlerinin optimizasyonu için sıcaklıklar değiştirilirken (350° C-650 °C), asit miktarı 10ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> olarak ve kavurma süresi 1s olarak sabit tutulmuştur. Asitsiz yapılan pirit kavurmada fayalit fazının bozunmadığı, 450° C'de yapılan kavurma ile 500° C, 550° C ve 650° C sıcaklıklarda elde edilen kalsinlerin X ışını kırınımı desenlerinin benzer olduğu tespit edilen CFA için 350° C, 400° C, 450° C sıcaklıklarda 10 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve 1:4 pirit/CFA oranında pirit ilavesi yapılarak FeS<sub>2</sub> ilaveli asit kavurma işlemi uygulanmıştır. Optimum piritli asit kavurma sıcaklığının tespit edilmesi için liç edilen kalsinlerin liç atıklarının X ışını kırınımı desenleri incelenmiş ve ana fazların manyetit, vustit, hematit ve fayalit olduğu görülmüştür. Liç atıklarının da değerlendirilebilmesi için gerekli olan manyetik ürünlerden vustit ve manyetit fazlarının en fazla görüldüğü koşulun 400° C'de yapılan piritli asit kavurmada açığa çıktığı tespit edilmiştir. Manyetik ayırma gerçekleştirilen liç atığı ile elde edilen manyetik ürünün analizi sonucunda ana fazların manyetit olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Bakır izabe curufu, piritli kavurma, asit kavurma, baz metaller, liç, manyetik ayırma.

## Abstract

Copper smelter slag flotation tailing's (SFT) that has not been evaluated yet pyrite additive acid baking phase transformation and water leaching of base metals behaviour and magnetite product by magnetic separation were investigated. The SFT in the study consists of the residual fayalite (FeO·SiO<sub>2</sub>) phase from the flotation, with a copper recovery of 87%, of the slag released during the smelting of the copper sulphide mine in northern Turkey, and the non-soluble glassy/amorphous structure containing the 0.34% Cu, 4.16% Zn and 0.15% Co base metals locked and doped to this phase. While the temperatures were changed (350° C -650 °C) for the optimization of acid baking processes with and without pyrite, the amount of acid was kept constant as 10ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and the baking time as 1h. It was determined that the fayalite phase did not decompose in acid-free pyrite roasting, and the X-ray diffraction patterns of the calcines obtained at 500° C, 550° C and 650° C temperatures by roasting at 450° C were similar. For this reason, an acid baking process with the addition of FeS<sub>2</sub> was applied by adding 10 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and 1:4 pyrite/SFT ratio of pyrite at 350° C, 400° C, 450° C temperatures. In order to determine the optimum pyrite acid baking temperature, the X-ray diffraction patterns of the leachates of the calcines were examined and it was observed that the main phases were magnetite, wustite, hematite and fayalite. It has been determined that the magnetic products required for the beneficiation of leachates, wustite and magnetite phases, are most common in pyrite acid roasting at 400° C. As a result of the analysis of the magnetic product obtained with the leachates, which was magnetic separation, it was seen that the main phases were magnetite.

**Keywords:** Copper smelter slag, roasting with pyrite, acid baking, base metals, leaching, magnetic separation.

## I. GİRİŞ

Dünya kaynaklarının tükenmesi, endüstrinin yönü, teknolojik gelişmenin yönlendirilmesi ve kurumsal değişimin uyum içinde olduğu ve insan ihtiyaçlarını ve isteklerini karşılayabilme potansiyelinin hem günümüzde hem de gelecek için korunduğu dengeli bir ortamda değişimin sağlanması olarak ortaya çıkan bir tanım olarak sürdürülebilirlik, metalurjik atıkların değerlendirilmesini de önemli kılmıştır. Yerkabuğunda azalan cevher rezervlerine hali hazırda var olan alternatifler sunmak ve atıkların çevreye verdiği olumsuz etkileri azaltmak, bunun yanında ekonomik büyümeyi kolaylaştırmak ve teşvik etmek, doğal kaynakların kullanımını

sürdürülebilirlik stratejisinin önemli bir noktasına getirmektedir [1]. Bu stratejisi ile atıkların değerlendirilmesi küresel olarak yaygınlaşmıştır [2]. Dünya çapında yılda yaklaşık 37.7 milyon ton üretilen bakır izabe curuflarının potansiyel ekonomik değerleri ve çevresel etkilerinin olumsuzluğu söz konusu olduğunda, bu atıkların bertaraf edilmesinin yanı sıra sıfır atık stratejisi ile tekrar değerlendirilmesine odaklanılmıştır [3-5]. Bakır, kobalt ve çinko gibi değerli metalleri içeren bakır izabe curuflarının ikincil hammadde olarak kullanılması atık yönetimi için uygun bir seçenek olarak görülmektedir [6]. Bu bağlamda, bakır izabe curuflarının içeriğinde bulunan değerli metallerin düşük maliyetli ve çevre dostu yöntemlerle geri kazanımı, hem metal tedariği hem de atık bertarafı sorunlarının çözülmesi için etkili bir geri dönüşüm stratejisi olarak kabul edilmektedir [4]. Bakır izabe curuflarının mineralojik bileşimi, işlenen cevherin tipi, kullanılan fırın çeşidi ve soğutma yöntemleri gibi birçok faktöre bağlı olarak farklılık göstermektedir [7]. Bu sebeple izabe curuflarından değerli metallerin kazanımı çeşitli ekstraktif metalurji yöntemleri kullanılarak yapılmaktadır [3]. Bakır izabe curufları içerisinde kaçak olarak geçen metalik bakırın ve sülfürlü bakır bileşiklerinin endüstriyel olarak tekrar kazanımı için flotasyon yöntemi kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemle camsı curuf yapısı içerisinde ani kapanım ile nüfuz eden baz metallerin (Co, Zn, Ni gibi) ya da oksit formlarının kazanımı yapılamamaktadır [8]. Flotasyon yöntemiyle metalik bakır ve sülfür minerallerinin %85-88'inin geri kazanımının ardından fayalit (ana) ve manyetit (nadir) fazlarında %32-52 Fe içerikli curuf flotasyon atığı (CFA) açığa çıkmaktadır [9]. Fayalit (FeO·SiO<sub>2</sub>), Co, Zn, Ni, Cu gibi metalleri kristal kafes yapısında bulunduran amorf bir yapıdır [10]. Fayalit yapısında bulunan baz metaller amonyum klorür [11], amonyum sülfat [12], [13], demir sülfat [14], pirit [15] ve sülfürik asit [8], [9], [16], [17], ilaveleriyle kavurma işlemi takip eden su liçi yöntemleriyle kazanılmıştır. Ancak bu çalışmaların çoğu izabe curufuna direk uygulanmış olup izabe curuf flotasyonu atığından kazanım çalışmaları nadiren görülmektedir [8], [9].

Kalkopirit cevherine flotasyon yöntemi ile zenginleştirme işlemi uygulamasının ardından gang minerali olarak açığa çıkan pirit içeriğindeki yüksek miktardaki kükürtten dolayı sülfürik asit üretimi yapılan endüstriyel tesislerde kükürt kaynağı olarak kullanılmaktadır [18]. Literatürde, demir cevheri rezervlerinin azalması ve bu cevherlere artan talep doğrultusunda ve yüksek demir içeriği sebebi ile piritin değerlendirilmesi çalışmaları yapılmış ve kavurma ile manyetite dönüştürülen piritten, manyetik ayırma uygulamaları ile manyetit (FeO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) elde edilmiştir [19-21]. Bu bağlamda CFA ve pirit gibi ikincil hammadde potansiyeline sahip atıklardan katma değeri yüksek ürünlerin eldesi için yeni nesil yöntemlerin kullanımı; düşük enerji tüketimi, dünyanın sınırlı kaynaklarını koruma ve atıkların

çevre üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılması ile sorumlu üretim için büyük önem arz etmektedir.

Literatürde CFA'dan baz metallerin kazanımına ek olarak manyetik ayırma yöntemi ile manyetit eldesinin gerçekleştiği bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma kapsamında CFA'ya asitle kavurma işlemine ek olarak atık olarak bulunan piritin de kavurma işlemine ilavesi ile baz metallerin kazanımı üzerine çalışılmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında piritin yüksek kükürt/demir içeriği sebebi ile kavurmada ihtiyaç duyulan kükürte bir kaynak (kullanılan asit miktarını füzyon tepkimelerinin başlatıcı olacak kadar en aza indirebilmek), aynı zamanda da kükürdünden arındırılan demirin, demir-çelik sektörü için ayrı bir kaynak olarak değerlendirilebilirliği de araştırılmıştır. Asit kavurma işlemine yapılan pirit ilavesi, literatürde daha önce denenmemiş kavurma sıcaklıklarında yapılmıştır. Kavruulan malzemelere (kalsin) uygulanan su liçi sonrası kalan liç atıklarına manyetik ayırma işlemi uygulanarak elde edilen manyetit fazın özellikleri araştırılmıştır.

## II. DENEYSEL METODOLOJİ

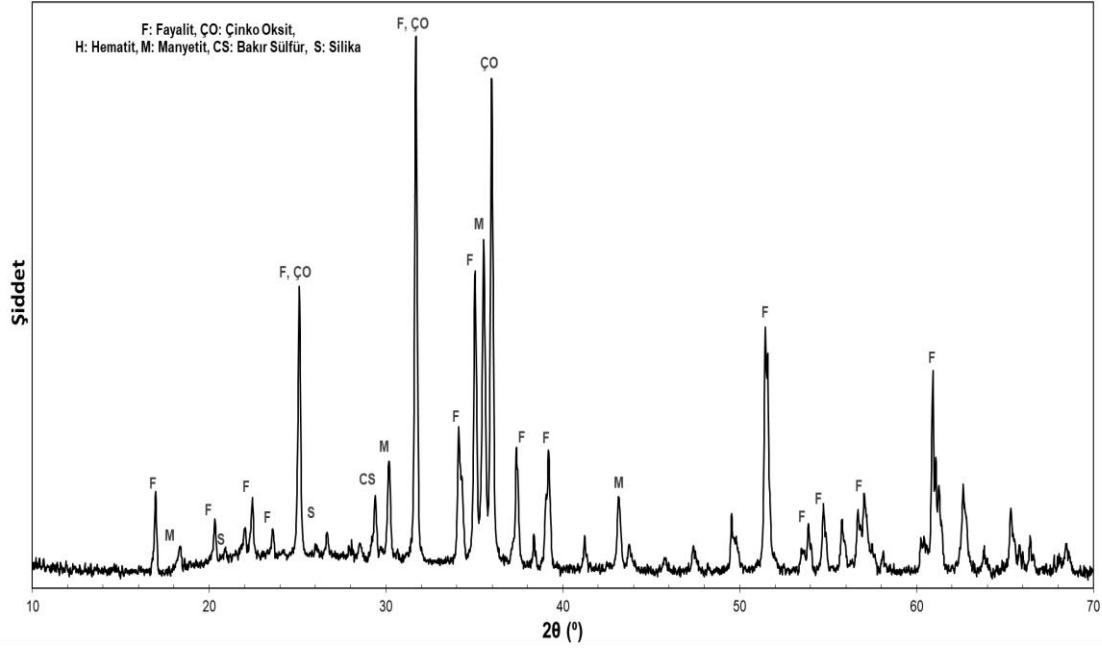
### 2.1. Kullanılan malzemeler ve analizler

Deneysel çalışmalarda, Cu, Zn ve Co içerikli CFA ve aynı cevherin flotasyonu sonrası gang minerali olarak açığa çıkan %45 Fe, % 45-50 S ve %2 SiO<sub>2</sub> içerikli pirit kullanılmıştır. CFA'nın ve piritin kantitatif mineralojik analizi X-ışını kırınımı (XRD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. CFA ve pirit numunelerinin mineralojik analizi sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir.

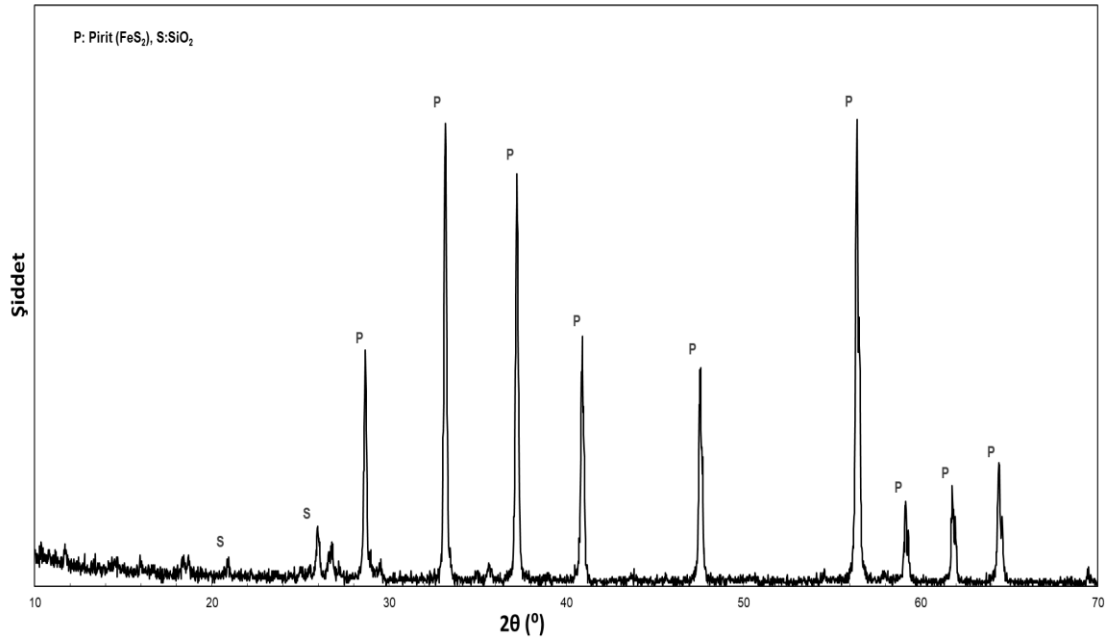
CFA numunesinin Şekil 1'de verilen XRD deseninde başlıca 17, 20, 23, 25, 31, 34, 35, 37, 39, 51, 53, 54, 57, 60 θ'daki (ref. kod. 01-087-0625) fayalit, 18, 30, 35, 43 θ'daki (ref. kod. 01-075-1609) manyetit ve 25, 31, 36 θ'daki (ref. kod.01-079-0208) çinko oksit minerallerinden oluştuğu gösterilmiştir. Ayrıca numunede 20, 26 θ'da (ref. kod. 01-083-2466) silika ve 29 θ'da (ref. kod. 01-084-0209) ise az miktarda bakır sülfür (ref. kod. 01-084-0209) minerali bulunmaktadır. Kimyasal analizi Tablo 1'de verilen CFA'nın elementel analizi ICP-AES kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ICP-AES analizi sonucu 38.08% Fe, 0.35% Cu, 4.48% Zn, %0.16 Co ve %0.37 S içerdiği tespit edilmiştir. XRD analizinde düşük miktarda pik veren silikanın ICP-AES analizi sonucu %32.5 silika içermesi silikanın çoğunluğunun fayalit (FeO·SiO<sub>2</sub>) yapısında bulunmasından kaynaklanmaktadır. Fayalitte bulunan %0.37 S ise bakır sülfürde bulunan kükürtten kaynaklanmaktadır. XRD analizinde Fe, Si, Cu ve Zn içeren mineral pikleri görülürken Co içeren serbest mineral pikine rastlanmamıştır. Fakat Tablo 1.'de ICP-AES analizi sonucu %0,16 Co sonucu tespit edilmesi amorf yapıyı fayalitin kristal kafes yapısı içerisinde bulunduğu düşüncesini vurgulamaktadır [9]. Pirit numunesinin

Şekil 2'de verilen XRD deseni incelendiğinde ise numune 28, 33, 37, 40, 47, 56, 59, 61, 64  $\theta$ 'da (ref. kod. 01-071-2219) pik veren pirit ve 20 ve 26  $\theta$ 'da pik

veren (ref. kod. 01-083-2465) silika minerallerinden oluşmaktadır.



Şekil 1. CFA'nın XRD deseni.



Şekil 2. Piritin XRD deseni.

Tablo 1. CFA'nın minerolojik ve kimyasal bileşimi

Fe (%)	Cu (%)	Zn (%)	Co (%)	S (%)	FeO <sub>(toplam)</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
38.08	0.35	4.48	0.16	0.37	49.9	32.5	0.10	2.63

Yapılan asit kavurma ve su liçi deneylerinde Merck kalite H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (%96, d: 1.84 g/cm<sup>3</sup>) ve de-iyonize su kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan CFA kalsinlerinin ve liç atıklarının minerolojik yapıları XRD analiziyle tespit edilmiştir.

## 2.2. Yöntem

Deneysel çalışmada, asit kavurma deneyleri 24 saat boyunca 105 °C sıcaklıkta fiziksel suyu uzaklaştırılmış ve vakumlu kaplarda saklanmış ve kavurma işlemi katı beslemesinin pirit/CFA oranı 0.25 olacak şekilde ayarlanmıştır. Uzun Kart [9], CFA'ya, 350-650 °C sıcaklık aralığında 6, 8, 10 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ilaveleriyle yapılan asit kavurma uygulamasının ardından artan sıcaklık ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> miktarı ile metal kazanım verimlerinin arttığını gözlemlemiştir. Tümen ve Bailey [15], 400-750 °C sıcaklık aralığında farklı oranlarda pirit ilavesi yaparak kavurma işlemi uyguladığı bakır izabe curuflarından, 0.25 pirit/CFA üzerindeki oranlarda pirit ilavesinin metal kazanım verimlerinde büyük bir değişim göstermediğini vurgulamıştır. Literatürde pirit ve CFA'da bulunan demirin asitle kavrulması sonrasında yüksek sıcaklıklarda hematite dönüşmesi ve manyetik ayırma işlemi için uygun olmadığı vurgulanmıştır. Bu sebeple pirit ilaveli asit kavurma fayalite bulunan baz

metallerin sülfatlaşma davranımının incelenmesi amacıyla 350, 400 ve 450 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Yüksek baz metal kazanımı ve manyetik ürün eldesinin amaçlandığı bu çalışmada H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> miktarı, pirit miktarı ve kavurma süresi sabit tutularak (10 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0.25 pirit/CFA, 1saat) 350, 400 ve 450 °C sıcaklıklarda kavurma yapılarak kalsinler elde edilmiştir.

CFA kalsinlerin çözünme ve manyetik ayırma davranımının incelenmesi için 10 g kalsin 50 °C sıcaklıkta, de-iyonize su kullanılarak 1/10 (k/s) katı-sıvı oranında 1 saat süreyle atmosferik koşullarda su liçine tabi tutulmuştur. Liç deneylerinin tamamlanmasının ardından, vakum filtre yardımıyla filtrasyon işlemi gerçekleştirilerek katı atık ve yüklü çözelti elde edilmiştir. Elde edilen yüklü çözelti balon joje içerisinde muhafaza edilirken, yıkanmış katı atık 65 °C'de 24 saat süreyle kurutulmuş ve neminden tamamen uzaklaştırılmıştır. Kurutma işleminden ardından katı atıkların manyetik davranımının incelenmesi amacıyla kuru manyetik ayırma işlemi yapılmıştır. Deneysel çalışmanın akım şeması Şekil 3'te ve deneysel çalışmanın asit kavurma koşulları ise Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Deneysel koşulları.

Pirit Miktarı	Sıcaklık (° C)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> miktarı (ml)	Süre (dk)
%100	450	0	60
	450		
	500		
	550		
	650		
0 (Piritsiz)	350	10	60
	400		
	450		
	500		
	550		
%0,25	400	10	60
	450		

## III. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Fayalitin kristal kafes yapısında bulunan Cu, Zn ve Co gibi metaller, kükürt içeren bir asit ve katkı maddeleriyle asit kavurma işlemi uygulanmasının ardından suda çözünebilir metal tuzlarına dönüştürülerek geri kazanılabilmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde fayalitin silikat refrakter yapısı, amonyum klorür [11], amonyum sülfat [12], [13], demir sülfat [14], pirit [15] ve sülfürik asit [8], [9], [16], [17] gibi çeşitli sülfat kaynaklarıyla bozundurulup, metal kazanımları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında CFA'dan baz metallerin kazanımının gerçekleştirilebilmesi için sülfat kaynağı olarak FeS<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> tercih edilmiştir. FeS<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'ün birlikte kullanıldığı bu çalışma, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'ün kimyasal füzyon ile fayalit yapısını bozundurması ve buna ek olarak piritin yapısında bulunan kükürtün SO<sub>2</sub>'ye yükseltgenmesiyle bozunmuş fayalitin içerdiği baz metalleri daha düşük sıcaklıklarda sülfat bileşiklerine dönüştürülmesi amacıyla yapılmıştır. Asit kavurma

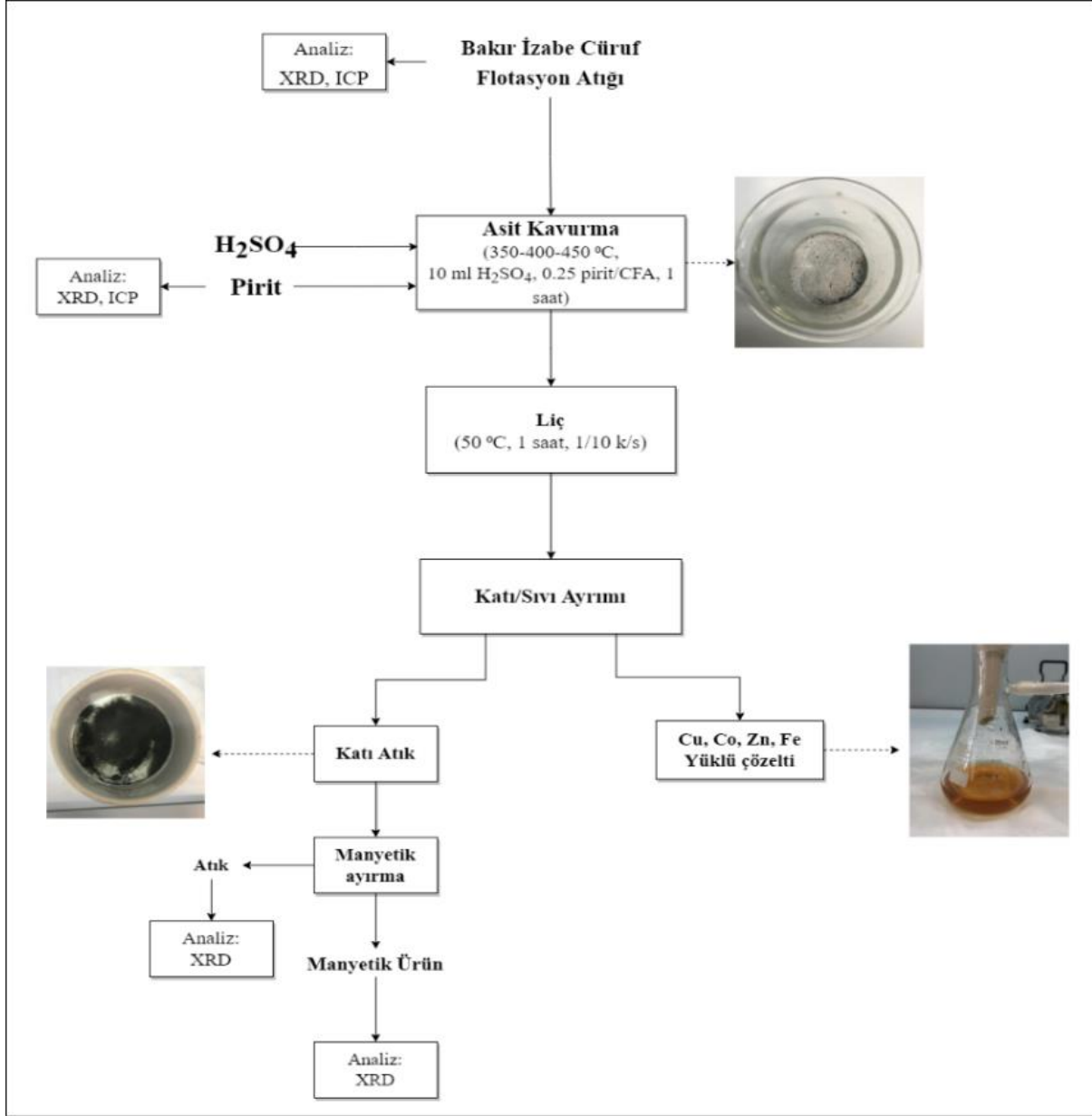
işleminin 500 °C'nin altındaki sıcaklıklarda yapılabilirliğinin gösterilmesi enerji tüketiminin azaltılması açısından önem arz etmektedir [22]. Ayrıca yapılan çalışmalar incelendiğinde piritte uygulanan ısı işlem ile manyetit oluşumunun gerçekleştiği ve manyetitlerin, manyetik ayırma yoluyla ayrılabilirdiği vurgulanmıştır [20], [21]. Waters vd., [21], piritte 200 °C'de ısı işlem uyguladığında yaklaşık %20 verimle manyetik ayırma yapmıştır ve sıcaklık 400 °C'ye çıkarıldığında manyetik ayırma veriminin yaklaşık %80'e yükseldiğini vurgulamıştır. Schorr ve Everhart [23], ise piritte uyguladığı ısı işlem sonrası 420°C ve üzerindeki sıcaklıklarda piritin hematit dönüşümünün gerçekleştiğini vurgulamıştır. Tüm bunlar dikkate alındığında düşük sıcaklıklarda baz metal kazanımının haricinde liç işlemi sonrası çözünmeyen katıya manyetik ayırma işlemi uygulanması da bu çalışma kapsamında araştırılmıştır.

Tümen ve Bailey [15], bakır izabe curuflarına 400-750 °C sıcaklık aralığında farklı oranlarda pirit ilavesi yaparak 550° C, 1:4pirit/bakır izabe curuf oranında



maksimum baz metal kazanımı elde etmiştir. Uzun Kart [9], CFA'ya 350-650° C sıcaklık aralığında asit kavurma işlemi uygulayarak; 650° C sıcaklıkta 10 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ilavesiyle maksimum baz metal kazanımı elde etmiştir. Uzun Kart vd., [8], ise CFA'ya uyguladığı asit kavurma sonrası 650 ° C üzerindeki sıcaklıklarda hematitleşmenin arttığını vurgulamıştır. Yüksek

sıcaklıklarda pirit ve CFA'da hematit oluşumunun manyetik ayırma verimini düşürmesi sebebi ile CFA 350° C, 400° C, 450 ° C sıcaklıklarda 10 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve 1:4pirit/CFA oranında pirit ilavesi yapılarak asit kavurma işlemine tabi tutulmuştur.



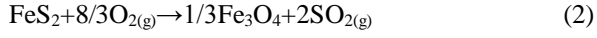
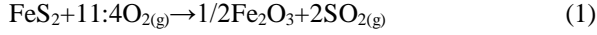
Şekil 3. Deneysel çalışmanın genel akım şeması

### 3.1. CFA kalsinlerinin mineralojik analizi

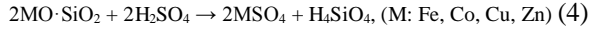
CFA'ya asitsiz, yalnızca pirit kavurması yapıldıktan sonra (1:4 pirit/CFA, 450 ° C, 1 s) elde edilen kalsin için XRD deseni çıkartılmış, işlem görmemiş CFA ve işlem görmemiş pirit XRD deseni ile Şekil 4'te kıyaslamalı bir şekilde verilmiştir. XRD desenleri incelendiğinde 450 ° C'de yapılan asitsiz pirit kavurması ile elde edilen kalsin, CFA ve pirit ile kıyaslandığında özellikle; 17, 20, 23, 25, 31, 34, 35, 37, 39, 51, 53, 54, 57, 60 θ (ref. kod. 01-087-

0625)'daki fayalit fazının bozunmadığı yani dönüşüme uğramadığı tespit edilmiştir. Yine aynı desenlerde, kavurma ile elde edilen kalsinde pirit piklerinin kaybolması, piritin yerine 33 θ'da hematitin (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (ref. kod. 00-039-1346), 37 θ'da manyetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) (ref. kod 01-075-1609) görülmesi, kükürtün bu sıcaklıkta uzaklaştığını ve piritin oksitlendiğini göstermektedir. Ancak bu XRD desenlerinde herhangi bir sülfatlı metal pikine rastlanmamıştır. Bu da 450° C yalnızca pirit ile kavurmanın sülfatlaşmayı

başlatamadığının tespiti olmuştur. Kavurma sırasında meydana gelen hematit ve manyetit oluşum reaksiyonları aşağıda verilmiştir (**Eşitlik 1-2**) [18]:

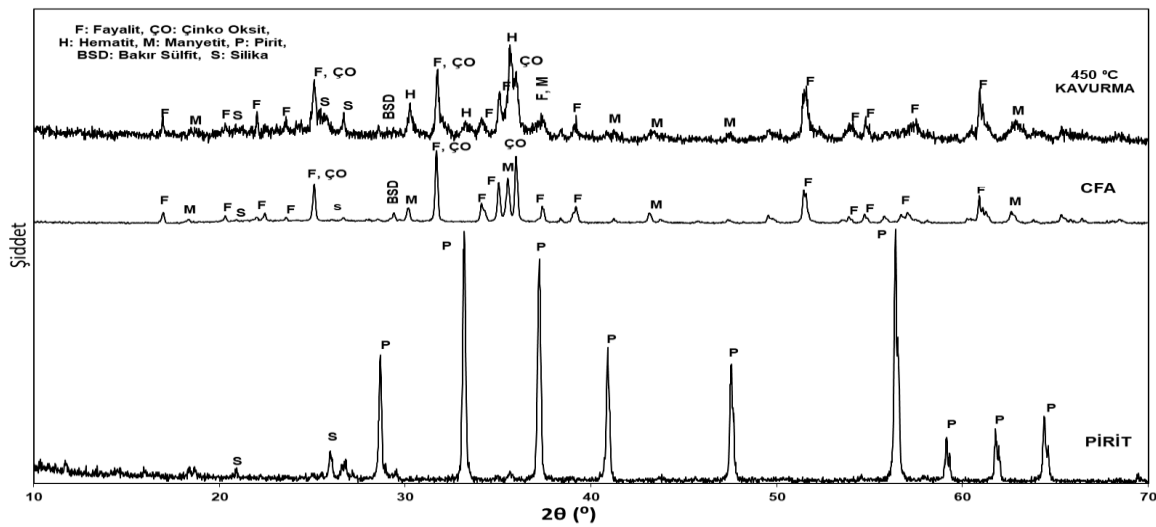
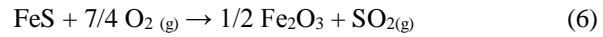
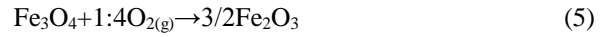


Literatürde piritin 420°C ve üzerindeki sıcaklıklarda hematite dönüşümü, 450 ° C'de yapılan kavurma sonrası hematit oluşumu ile uyumludur [23]. Bu sebeple 450 ° C'de 1:4 pirit/CFA oranında yapılan kavurma işleminin ardından piritte bulunan kükürtün oksidasyonu ile oluşan SO<sub>2</sub>'nin fayalit yapısındaki bazı metallerin sülfat tuzlarına dönüşümü için yeterli olmadığı tespit edilmiştir. Sıcaklığın yetersiz olduğu düşünülerek 450 ° C haricinde 500, 550 ve 650° C sıcaklıklarda kavurma işlemi gerçekleştirilmiştir. 500, 550 ve 650° C sıcaklıklarda yapılan kavurma işlemi ile 450° C'de yapılan kavurma işlemi kalsinlerinde hemen hemen aynı mineralojik dönüşümler meydana gelmiştir. Bu sebeple 450 ° C'de yapılan kavurma işleminin bu çalışma kapsamında incelenmesi yeterli görülmüştür. Bu durumda fayalit yapısının bozundurulması için kimyasal füzyon etkisini başlatacak bir ajana yani H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanımının gerekliliğine karar verilmiştir. Asit kavurma sırasında meydana gelen tepkimeler aşağıda verilmiştir (**Eşitlik 3-4**) [14]:



CFA 350° C, 400° C, 450° C sıcaklıklarda 10 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve 1:4 pirit/CFA oranında pirit ilavesi yapılarak FeS<sub>2</sub> ilaveli asit kavurma işlemine tabi tutulmuştur. Uygulanan kavurma işlemleri sonrası elde edilen kalsinlerin XRD desenleri Şekil 5'te verilmiştir. XRD desenleri FeS<sub>2</sub> ilaveli asit kavurma

nedeniyle fayalitin bazı metal sülfatlara, demir sülfata ve manyetitten hematite, çinko oksitten çinko sülfata, bakır sülfürden bakır sülfata dönüşümünü göstermektedir. 350° C'de yapılan kavurma XRD deseni incelendiğinde, fayalitin kristal kafes yapısında bulunan fakat XRD deseninde (Şekil 1) pik vermeyen kobalt metali, fayalit yapısının bozunmasıyla camı yapıdan ayrılarak 21, 30 θ'da (ref. kod. 01-072-1454) kobalt sülfat (CoSO<sub>4</sub>) olarak pik vermiştir. CFA'nın XRD deseninde (Şekil 1) 29 θ'da bulunan bakır sülfür (CuS), 28 θ'da (ref. kod. 01-072-0090) bakır sülfata (CuSO<sub>4</sub>); 25 ve 36 θ'da serbest halde bulunan çinko oksit (ZnO) ise 24, 36 θ'da (ref. kod. 36 01-080-2210) çinko sülfata (ZnSO<sub>4</sub>) dönüştüğü tespit edilmiştir. Fakat 350° C'de 25 ve 37 θ'da fayalit piklerinin bulunması fayalit yapılarının tamamen bozunmadığını ve kısmi bir bozunma gerçekleştiğini göstermektedir [9]. 350° C'de bulunan 28 ve 33 θ'da bulunan piritin, 400 ° C'de yapılan kavurmanın ardından 33 θ'da (ref. kod. 01-080-1028) FeS'ye ve 37 θ'da ise manyetite dönüştüğü (**Eşitlik 2**) tespit edilmiştir. Piritin FeS ve manyetite dönüşümü, ortamdaki SO<sub>2</sub> miktarının artmasına sebep olacaktır [18]. Bu sebeple 400° C'de yapılan asit kavurma işleminin XRD deseni incelendiğinde, sıcaklık arttıkça 25 ve 37 θ'da bulunan fayalit piklerinin de sırasıyla kobalt sülfat ve çinko sülfata dönüşümü piritin ortamdaki SO<sub>2</sub> miktarını arttırmasının bir sonucu olarak vurgulanmıştır [9], [10]. Ayrıca 25 θ'da silikanın oluşumu fayalitin bozunmasıyla silikanın yapıdan ayrılmasından kaynaklanmaktadır. 450° C'de 30 ve 35 θ'da bulunan manyetitin ve 33 θ'da bulunan FeS'in hematite dönüşümü gerçekleşmektedir. Manyetit ve FeS'in hematite dönüşümü sırasında meydana gelen tepkimeler aşağıda verilmiştir (**Eşitlik 5-6**) [18]:



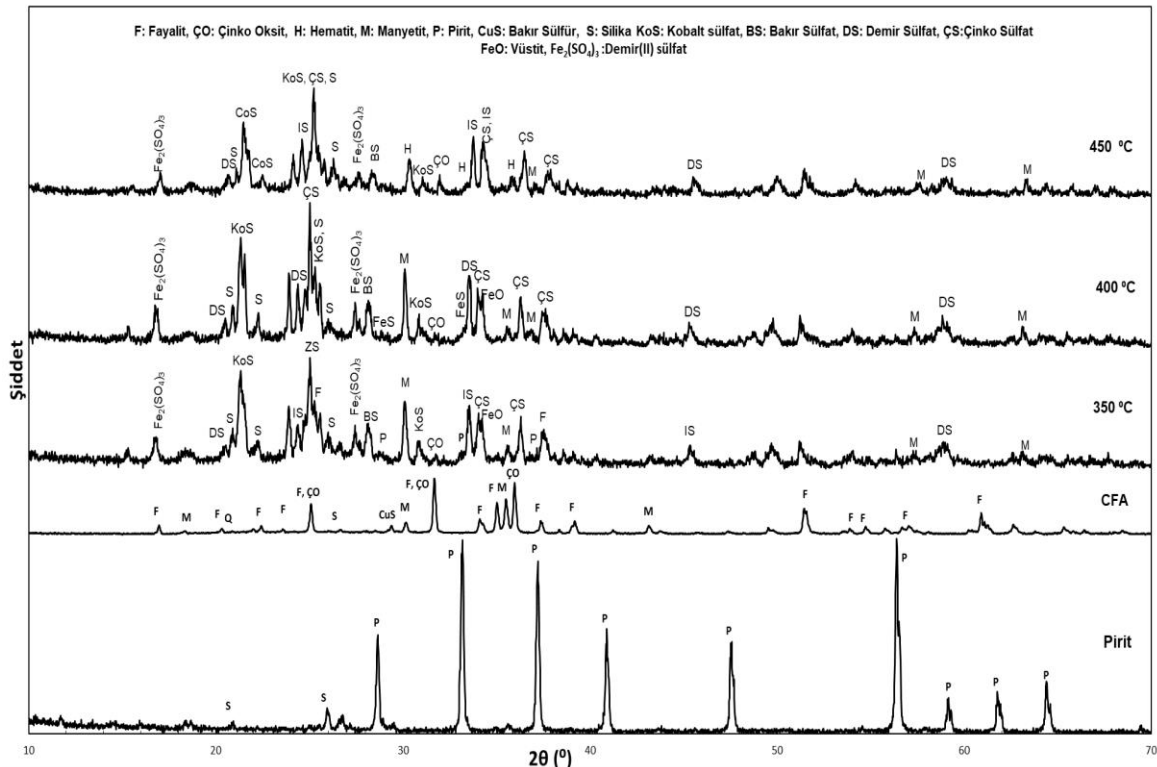
Şekil 4. 450 ° C'de yapılan kavurma işlemi sonrası elde edilen kalsinin XRD deseni.

### 3.2. Liç ve manyetik ayırma davranımının incelenmesi

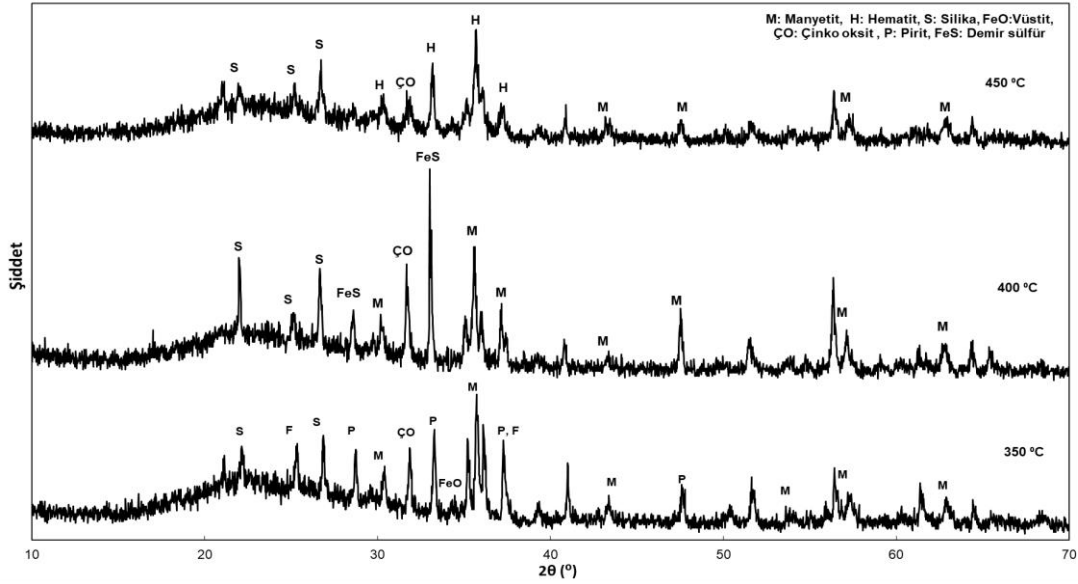
Farklı sıcaklıklarda FeS<sub>2</sub> ilaveli asit kavurma uygulanan CFA'nın minerolojik dönüşümleri gerçekleştiikten sonra çözünme ve manyetik ayırma davranımının incelenmesi amacıyla kalsinlere, 10 g kalsin, de-iyonize su kullanılarak 50 ° C'de 1:10 katı/sıvı oranında 1 saat süreyle liç işlemi uygulanmıştır. Liç işlemi sonrası çözünmeden kalan katı atıkların XRD desenleri Şekil 6'da verilmiştir. FeS<sub>2</sub> ilaveli asit kavurma sonrası metal sülfat tuzları liç işlemi ile çözeltiye alındıktan sonra kalan katı atığa manyetik ayırma uygulanabilmesi için asit kavurma sonrası manyetit dönüşümlerinin gerçekleşmesi gerekmektedir. Bu sebeple 350 ° C'de yapılan asit kavurma işlemi sonrası kalan katı atığın XRD deseni incelendiğinde 30, 35 43, 53, 57, 63 θ'da (ref. kod 01-075-1609) manyetit pikleri gözlenmiştir. Fakat 25, 37 θ'da fayalit piklerinin bulunması fayalitin kısmi bozunmaya uğradığını ve bu durumda çözeltiye geçen baz metal miktarının düşük olacağını ifade etmektedir [8]. Ayrıca fayalit, SiO<sub>2</sub>'nin vüstit (FeO) ve manyetit (FeO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ile kompleks oluşturması nedeniyle manyetik özelliğe sahiptir [24]. Bu sebeple fayalit ve 32 θ'da bulunan FeO, manyetik özellikleri sebebiyle manyetik ayırım sırasında manyetit ile birlikte

ayrılabilir [25]. 400° C'de yapılan kavurma işlemi sonrası kalan katı atığın XRD deseninde 37 ve 47 θ'da manyetit pikleri piritin kavurma sırasında dönüşümünden kaynaklanmaktadır (Eşitlik 2) [18].

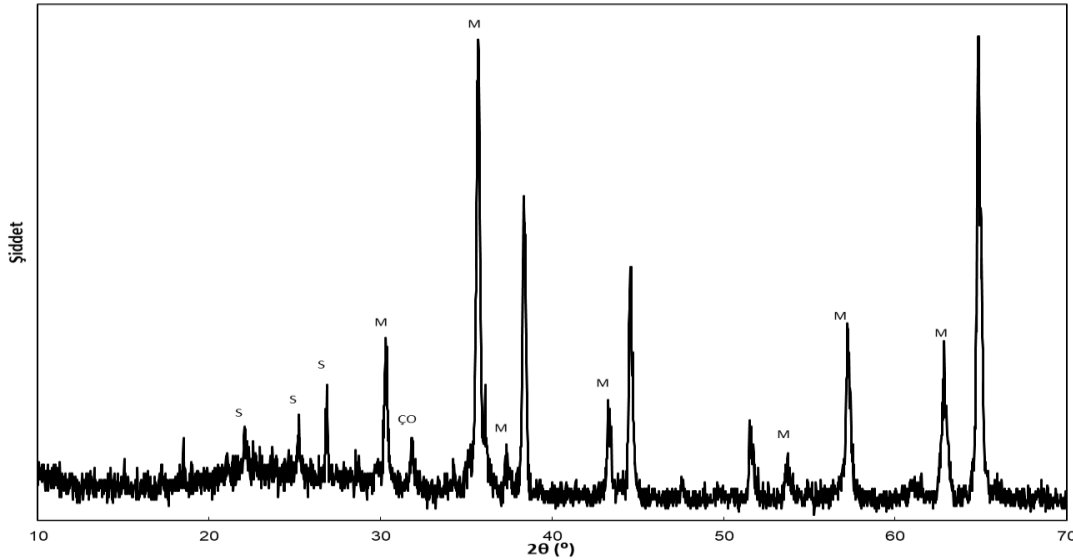
Bu dönüşüm manyetitleşmenin kavurma sonrası sıcaklığın etkisiyle arttığını vurgulamaktadır. 450 ° C'de yapılan asit kavurma işlemi sonrası çıkan katı atıkta ise 47 θ'da manyetit pikinin yoğunluk değerindeki azalma ve 30, 35 ve 37 θ'da hematit piklerinin varlığı hematitleşmenin arttığını ifade etmektedir. Bu sebeple manyetitleşmenin en yüksek olduğu sıcaklık 400 ° C'de olarak tespit edilmiştir. 400° C'de yapılan kavurma işlemi sonrası kalan katı atığa manyetik ayırım uygulanarak elde edilen manyetik ürüne analiz yapılmış ve XRD deseni Şekil 7'de verilmiştir. XRD deseni incelendiğinde ana fazın 30, 35, 43, 53, 57 ve 62 θ'da (ref. kod. 01-075-1609) bulunan manyetit olduğu gözlenmiştir. Ayrıca manyetik üründe 22, 25, 26 θ'da (ref. kod. 01-083-2471) bulunan silika ve 32 θ'da (ref. kod.01-079-0208) bulunan çinko oksit fazları da mevcuttur. Bu durumda ana fazın manyetit olması sebebiyle 400 °C'de yapılan asit kavurma işleminin manyetik ayırım yapılabilmesi için uygun olduğu teyitlenmiştir.



Şekil 5. CFA'ya farklı sıcaklıklarda uygulanan FeS<sub>2</sub> ilaveli H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kavurma ile elde edilen kalsinlerin XRD desenleri.



Şekil 6. Kalsinlere uygulanan liç işleminin sonrası 1 katı atıkların XRD deseni.



Şekil 7. Liç atığına uygulanan manyetik ayırma sonucu elde edilen manyetik ürünün XRD deseni.

#### IV. SONUÇ

Flotasyon ile tekrar bakır kaynağı olarak kullanılmış curufun atığındaki büyük bir kısmı fayalit yapı içinde hapsolmuş baz metallerin (Cu:0,34%, Zn:4,16%, Co:0,15%) kazanımı için FeS<sub>2</sub> ilaveli asitli kavurma, atmosferik su liçi ve manyetit konsantre eldesi için manyetik ayırma deneyleri yapılmıştır. Öncelikli olarak çözünmeyen camsı yapılı curuf içerisine hapsolmuş baz metallerin sülfatlaşması için 0.25 pirit/CFA oranında 10ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ilavesi ile 1 saat süreyle 350, 400 ve 450° C sıcaklıklarda FeS<sub>2</sub> ilaveli asitli kavurma işlemi uygulanmıştır. 450° C'de yapılan asitsiz pirit kavurması ile elde edilen kalsindeki fayalit fazının bozunmadığı yani dönüşüme uğramadığı ancak hematit ve manyetit piklerinin varlığı tespit edilmiş ve piritteki kükürtün uzaklaştığı ancak fayalit yapısı bozunmadığı için baz metallere sülfat oluşturmadığı görülmüştür. Bu sebeple fayalit yapısının bozundurulabilmesi için kimyasal füzyon

etkisini başlatacak olan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ajanı kullanılarak 0.25 pirit/CFA oranında 350, 400 ve 450° C sıcaklıklarda asit kavurma işlemi gerçekleştirilmiştir. 350° C sıcaklıkta fayalitin kısmi bozunmasıyla baz metal sülfat, demir sülfat dönüşümleri gerçekleşmiş fakat fayalit yapılarının tamamen bozunması, piritin de FeS ve manyetite dönüşümünün etkisiyle (ortamdaki SO<sub>2</sub> miktarının artırması sebebiyle) 400° C sıcaklıkta gerçekleşmiştir. Sıcaklık 450° C'ye ulaştığında fayalit yapısının tamamen bozunmasına ek olarak, manyetit ve FeS'nin, hematite dönüşümü gerçekleşmiştir. 350° C'de baz metal kazanımının fayalitin kısmi bozunmasından kaynaklı olarak düşük olması ve 450° C'de manyetitlerin hematite dönüşümü, asit kavurma deneylerinin ardından manyetit konsantre eldesi için uygun görülmemiştir. Bu sebeple manyetit dönüşümlerinin en yüksek olduğu asit kavurma sıcaklığı 400° C olarak tespit edilmiş ve bu sıcaklıkta elde edilen kalsinin liç atığına kuru manyetik

ayırma işlemi uygulanmıştır. Liç atığına uygulanan kuru manyetik ayırma sonrası ana fazı manyetit olan manyetik ürün eldesi gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak; düşük sıcaklıklarda yüksek baz metal kazanımı ve manyetit konsantrasyonunun araştırıldığı bu çalışma kapsamında, asit kavurma işlemi sonrası fayalit yapılarının tamamının bozunduğu ve yüksek oranda manyetit dönüşümlerinin gerçekleştiği optimum deney koşullarının 0.25 pirit/CFA oranında, 10ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ilavesi ile 1 saat süreyle 400 ° C sıcaklık olduğu tespit edilmiştir.

### Kısaltmalar ve Semboller

CFA: Curuf flotasyon atığı

XRD: X-Işını Kırınımı

Cu: Bakır

Zn: Çinko

Fe: Demir

Al: Alüminyum

Θ: Teta

### KAYNAKLAR

- [1] Behrens, A., Giljum, S., Kovanda, J., & Niza, S. (2007). The material basis of the global economy. Worldwide patterns of natural resource extraction and their implications for sustainable resource use policies.
- [2] Yin, Z., Sun, W., Hu, Y., Zhang, C., Guan, Q., & Wu, K. (2018). Evaluation of the possibility of copper recovery from tailings by flotation through bench-scale, commissioning, and industrial tests. *Journal of Cleaner Production*, 171, 1039–1048. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.020>
- [3] Gorai, B., Jana, R. K., & Premchand. (2003). Characteristics and utilisation of copper slag - A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 39(4), 299–313. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00171-4](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00171-4)
- [4] Phiri, T. C., Singh, P., & Nikoloski, A. N. (2021). The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review – Part II. *Minerals Engineering*, 172(July), 107150. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107150>
- [5] Tian, H., Guo, Z., Pan, J., Zhu, D., Yang, C., Xue, Y., Li, S., & Wang, D. (2021). Comprehensive review on metallurgical recycling and cleaning of copper slag. *Resources, Conservation and Recycling*, 168(September 2020), 105366. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105366>
- [6] Alp, I., Devenci, H., & Süngün, H. (2008). Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production. *Journal of Hazardous Materials*, 159(2–3), 390–395.
- [7] Shen, H., & Forsberg, E. (2003). An overview of recovery of metals from slags. *Waste Management*, 23(10), 933–949. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00164-2](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00164-2)
- [8] Kart, E. U., Yazgan, Z. H., & Gumuşsoy, A. (2021). Investigation of iron selectivity behavior of copper smelter slag flotation tailing with hematitization baking and base metals leaching methods. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 57(5), 164–175. <https://doi.org/10.37190/PPMP/141947>
- [9] Kart, E. U. (2021). Evaluation Of Sulphation Baking And Autogenous Leaching Behaviour Of Turkish Metallurgical Slag Flotation Tailings. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 57(4), 107–116. <https://doi.org/10.37190/PPMP/138839>
- [10] Z. Yang, M. Rui-Lin, N. Wang-Dong, and W. Hui, “Selective leaching of base metals from copper smelter slag,” *Hydrometallurgy*, vol. 103, no. 1–4, pp. 25–29, 2010, doi: 10.1016/j.hydromet.2010.02.009.
- [11] Nadirov, R. K., Syzdykova, L. I., Zhussupova, A. K., & Ussebaev, M. T. (2013). Recovery of value metals from copper smelter slag by ammonium chloride treatment. *International Journal of Mineral Processing*, 124, 145–149. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.07.009>
- [12] Hamamci, C., & Ziyadağullari, B. (1991). Effect of Roasting with Ammonium Sulfate and Sulfuric Acid on the Extraction of Copper and Cobalt from Copper Converter Slag. *Separation Science and Technology*, 26(8), 1147–1154. <https://doi.org/10.1080/01496399108050520>
- [13] Sukla, L. B., Panda, S. C., & Jena, P. K. (1986). Recovery of cobalt, nickel and copper from converter slag through roasting with ammonium sulphate and sulphuric acid. *Hydrometallurgy*, 16(2), 153–165. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(86\)90040-X](https://doi.org/10.1016/0304-386X(86)90040-X)
- [14] Altundoğan, H. S., & Tümen, F. (1997). Metal recovery from copper converter slag by roasting with ferric sulphate. *Hydrometallurgy*, 44(96).
- [15] Tümen, F., Bailey, N. T. (1990). Recovery of metal values from copper smelter slags by roasting with pyrite. *Hydrometallurgy*, 25, 317–328. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-386X\(90\)90047-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-386X(90)90047-6)
- [16] Arslan, C., & Arslan, F. (2002). Recovery of copper, cobalt, and zinc from copper smelter and converter slags. *Hydrometallurgy*, 67(1–3), 1–7. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00139-1](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00139-1)
- [17] Dimitrijevic, M. D., Urosevic, D. M., Jankovic, Z. D., & Milic, S. M. (2016). Recovery of copper from smelting slag by sulphation roasting and water leaching. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 52(1), 409–421. <https://doi.org/10.5277/ppmp160134>
- [18] Zhang, Y., Li, Q., Liu, X., Xu, B., Yang, Y., & Jiang, T. (2019). A thermodynamic analysis on the roasting of pyrite. *Minerals*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/min9040220>
- [19] Silva, R. G., Silva, J. M., Souza, T. C., Bianchetti, M., Guimarães, L., Reis, L., & Oliveira, E.

- (2021). Enhanced process route to produce magnetite pellet feed from copper tailing. *Minerals Engineering*, 173(August). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107195>
- [20] Wang, L., Pan, Y. X., Li, J. H., & Qin, H. F. (2008). Magnetic properties related to thermal treatment of pyrite. *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 51(8), 1144–1153. <https://doi.org/10.1007/s11430-008-0083-7>
- [21] Waters, K. E., Rowson, N. A., Greenwood, R. W., & Williams, A. J. (2008). The effect of heat treatment on the magnetic properties of pyrite. *Minerals Engineering*, 21(9), 679–682.
- [22] Kim, B., Park, C., Cho, K., Kim, J., Choi, N., & Lee, S. (2021). Sulfuric acid baking—water leaching for gold enrichment and arsenic removal from gold concentrate. *Minerals*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/min11121332>
- [23] Schorr, J. R., & Everhart, J. O. (1969). Thermal Behavior of Pyrite and Its Relation to Carbon and Sulfur Oxidation in Clays. *Journal of the American Ceramic Society*, 52(7), 351–354.
- [24] Li, S., Pan, J., Zhu, D., Guo, Z., Xu, J., & Chou, J. (2019). A novel process to upgrade the copper slag by direct reduction-magnetic separation with the addition of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> and CaO. *Powder Technology*, 347, 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.02.046>
- [25] Zhang, P., Cohen, R. E., & Haule, K. (2017). Magnetic phase diagram of FeO at high pressure. *Journal of Physics: Conference Series*, 827(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/827/1/012006>

# Projections of Future Change of Climatology and Extreme Weather Events in the Mediterranean Basin, by the HIRHAM5 Regional Climate Model

*HIRHAM5 Bölgesel İklim Modeli Kullanılarak Akdeniz Havzası'nın Gelecek Klimatolojisi ve Uç Hava Olaylarındaki Değişikliklerin Projeksiyonları*

Tugba OZTURK<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup> Department of Physics, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Isik University, 34980, Istanbul, Turkey

<sup>2</sup> Center for Climate Change and Policy Studies, Bogazici University, 34342, Istanbul, Turkey

## Abstract

In this study, changes in temperature and precipitation climatology and extreme weather events over the Mediterranean Basin including Turkey were investigated using HIRHAM5 driven by global climate models such as EC-EARTH, HadGEM2-ES, and NorESM1-M for 2011-2100 compared to 1971-2000. RCP4.5 and RCP8.5 scenario outputs of global climate models were used as forcing data. Daily mean temperature and precipitation variables are used to compute extreme indices. Extreme indices were calculated for the period of 2071-2100 compared to the reference period. According to the results, the severity of temperature- and precipitation-based indices will be expected to increase throughout the century with increasing radiative forcing. Minimum of minimum temperatures will increase more pronounced over the northern Mediterranean, which is referred to as climate change hot spots, whereas the increase in a maximum of maximum temperatures is moderate over land areas. A decrease in total wet-day precipitation is expected while the number of dry days is expected to increase. Therefore, the Mediterranean Basin and Turkey will have warmer and drier conditions compared to present climate conditions.

**Keywords:** Climate change, Extreme weather events, HIRHAM5, Regional climate modeling, The Mediterranean Basin, Turkey.

## Öz

Bu çalışmada, 1971-2000 referans dönemine göre 2011-2100 gelecek dönemi için Türkiye'nin de dahil olduğu Akdeniz Havzası üzerinde sıcaklık ve yağış klimatolojilerinde ve aşırı hava olaylarındaki öngörülen değişiklikler, EC-EARTH, HadGEM2-ES ve NorESM1-M olmak üzere üç küresel iklim modeli çıktılarıyla koşulan HIRHAM5 bölgesel iklim modeli benzetimleri kullanılarak değerlendirildi. Küresel iklim modellerinin RCP4.5 ve RCP8.5 senaryo çıktıları kullanıldı. Ekstrem iklim indekslerini hesaplamak için sıcaklık ve yağış değişkenlerinin günlük ortalamaları kullanıldı. Ekstrem iklim indekslerindeki değişim yüzyılın sonu olan 2071-2100 yıllarında 1971-2000 referans dönemine göre hesaplandı. Sonuçlara göre, artan ısınmsal zorlamayla birlikte yüzyıl boyunca sıcaklık ve yağış temelli ekstrem hava olaylarının daha şiddetlenmesi beklenmektedir. Minimum sıcaklıklardaki artış, iklim değişikliğinin en önemli sıcak noktalarından biri olması beklenen Akdeniz Havzası'nın kuzey kesiminde daha belirginken, maksimum sıcaklıklardaki artış ise karalar üzerinde ılımlıdır. Art arda gelen kurak günlerin sayısındaki artışla birlikte toplam yağışlı gün sayılarında azalma beklenmektedir. Bu nedenle, Akdeniz Havzası ve Türkiye üzerindeki iklim koşullarının daha sıcak ve daha kurak olması öngörülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Akdeniz Havzası, Aşırı Hava Olayları, Bölgesel İklim Modellemesi, HIRHAM5, İklim Değişikliği, Türkiye.

## I. INTRODUCTION

Climate change is a major problem for human beings in this century. Climate change, which has a different impact in different regions of the world, affects many different areas such as human health, agriculture and food supply, freshwater resources, and sea-level rise and it threatens not only human beings but also all living organisms. Additionally, changes in the frequency and intensity of extreme events have been observed. According to the latest report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR6), it is certain that human influence warms the atmosphere, ocean, and soil. Widespread and rapid changes have occurred in the atmosphere, ocean, cryosphere, and biosphere, and human influence has warmed the climate at an unprecedented rate in at least the last 2,000 years and those changes are unprecedented for centuries and millennia. Each of the last 4 decades since 1850 has been warmer than the decade that preceded it [1].

Results of the climate model projections show that the larger Mediterranean Basin including Turkey has been specified as the climate change hot spot by previous studies [2-7]. According to the model results, warming will

be expected to occur over the Mediterranean in this century [8-15]. Interannual temperature variability is also projected to increase in summer [5][8]. Because of an increase in temperature variability with the strong mean warming, the severity of extreme temperatures and the frequency of heatwaves are expected to increase [16]. Model projections agree that in the Mediterranean region, the increase in temperature will be 20% warmer than the global temperature change, and a higher increase is expected to occur in summer. Temperatures in the day are anticipated to increase more than temperatures in the night, indicating an increase in the magnitude of the diurnal range [7].

There will also be an escalation of heat stress in the Mediterranean Basin and the frequency and severity of heatwave days will increase because of projected changes in extreme climate indices for temperature [17-24]. Heat stress is expected to intensify due to right-skewed temperature distribution. According to the projections, larger increases are anticipated in the 95th percentile maximum and minimum temperatures than that of the 75th percentile [18]. The number of occurrences of a heatwave is projected to highly increase in the Mediterranean region changing from about 2 days per summer for the reference period of 1961–1990 to around 6–24 days in 2021–2050 and 27–67 days in 2071–2100 [21]. According to the projections based on CMIP5 multi-model ensembles under RCP8.5, for the Mediterranean region, the highest temperatures are found to increase about 7 °C in summer which is among the greatest across all subregions around the world. Tropical nights will also increase by approximately 80 days in the Mediterranean under RCP8.5 [22].

Turkey is also a vulnerable region to climate change since it is one of the Mediterranean countries. Studies on climate change and variability for the Mediterranean Basin by simulating global and regional climate models based on both observation data and various greenhouse gas emission scenarios show that the Mediterranean Basin will be adversely affected by climate change in the future [25-30]. Accordingly, an increase in the number of extremely hot days, the frequency and continuity of heatwaves is expected in the Mediterranean Region [31-37]. There are not many climate model projection studies over Turkey and surrounding regions. Almost all studies were based on results of the regional climate model, RegCM [38-53]. Results based on RegCM driven by different global climate models show warming and drying over Turkey. The temperature will increase from on average 1 °C up to 4 °C for the period of 2020-2050. According to the results of RegCM driven by HadGEM2-ES under RCP4.5, there will be a 4.0 °C increase in temperature for summer in all parts of the region and a 2.0 °C increase in temperature for winter. According to the model results except ones

driven by HadGEM2-ES under RCP 8.5, precipitation will decrease almost all over the domain which is already dry [54].

Studies of regional climate projections based only on one regional climate model (RegCM) for Turkey and surrounding regions are not adequate. The ensemble approach which is based on the ensemble mean of multi-model results has been an approved technique for several years in the regional modeling community. This leads to international projects involving many model working groups such as PRUDENCE [55-56], ENSEMBLES [57-58] and CORDEX [59-60], providing an opportunity for a better understanding of the change in future climate. The most important reason for the lack of literature in this regard over Turkey is that the regional climate models are not open source and are mostly used by developing centers. HIRHAM5 (a model developed by the Danish Meteorological Institute) was used in this study to obtain 12.5 km simulations [61]. HIRHAM5 has been effectively used as a regional model and applied to the EURO-CORDEX domain including the Mediterranean Basin [62-66]. Simulations are performed by driving the model with EC-EARTH, HadGEM2-ES, NorESM1-M global climate model which has medium, high and low climate sensitivity respectively, under RCP4.5 and RCP8.5. Monthly mean values of temperature and precipitation were used to investigate the change in climatology for 2011-2100 relative to the base period of 1971-2000. Daily minimum, maximum temperature, and precipitation fields were also used to calculate climate indices defined by ETCCDI. Results of HIRHAM5 were also compared with the results of a different model, RegCM [67-68].

## II. MATERIALS AND METHOD

In this study, HIRHAM5 was used to project temperature and precipitation climatology over the Mediterranean and Turkey. The HIRHAM is a regional atmospheric climate model based on the HIRLAM [69] and ECHAM models [70], combining the dynamics of the former model with the physical parameterization schemes of the latter. The HIRLAM model – High-Resolution Limited Area Model - is a numerical short-range weather forecasting system (<http://hirlam.org>) and has been used for routine weather forecasting at various meteorological institutes, i.e. DMI (Denmark), FMI (Finland), IMS (Iceland), KNMI (The Netherlands), met.no (Norway), INM (Spain), and SMHI (Sweden). Results of the model were compared with ERA-interim [71] reanalysis datasets and CRU observational datasets to test its performance [72]. EC-EARTH, HadGEM2-ES, and NorESM1-M global climate models were used as forcing data for future simulations under two RCPs [73-75]. In this study, climate variables for the Mediterranean region and Turkey were simulated via HIRHAM5 under the two different RCPs [75].



RCP4.5, which is a medium-low emission scenario, stabilizes after 2100 at  $4.5 \text{ W/m}^2$  without overshoot pathway, while RCP8.5 is the highest of the four reaches at  $8.5 \text{ W/m}^2$  in 2100 on a rising trajectory.

The spatial changes in lowest of minimum temperatures (TNn) and highest of maximum temperatures (TXx), the temporal evolution of cold days, cold nights, warm days, and warm nights, and spatial patterns of change in total wet day precipitation and consecutive dry days (CDD) were computed for all datasets and scenario outputs [76-78]. The percentile indices are presented as the percentage of days that exceed the thresholds calculated as percentiles of the 1971-2000 base period. Cold nights, cold days and warm nights, and warm days, which are represented as the percentage of days where TN or TX is less than the 10th or more than the 90th percentile, respectively were considered. In the warm spell duration index (WSDI), the number of days of a year when the daily maximum temperature is more than the 90th percentile for at least six consecutive days were counted. CDD is described by the duration of the longest period of dry days occurred consecutively in a year. Extreme weather indices were calculated for the future period of 2071-2100 compared to the period of 1971-2000.

**Table 1.** Extreme Climate Indices recommended by ETCCDI.

Label	Index Name	Definition	Unit
TNn	Min TN	Annual minimum of minimum temperature	°C
TXx	Max TX	Annual maximum of maximum temperature	°C
TN10p	Cold Nights	The percentage of days in a year is determined where $TN < 10^{\text{th}}$ percentile of minimum temperature	%
TX10p	Cold Days	The percentage of days in a year is determined where $TX < 10^{\text{th}}$ percentile of maximum temperature.	%
TN90p	Warm Nights	The percentage of days in a year is determined where $TN > 90^{\text{th}}$ percentile of minimum temperature.	%
TX90p	Warm Days	The percentage of days in a year is determined where $TX > 90^{\text{th}}$ percentile of maximum temperature.	%
WSDI	Warm Spell Duration	Annual count of days with at least 6 consecutive days when $TX > 90^{\text{th}}$ percentile of maximum temperature.	days
PRCPTOT	Total wet-day precipitation	Annual total precipitation in wet days.	mm
CDD	Consecutive Dry Days	The largest number of consecutive days where $PR < 1 \text{ mm}$ .	days

### III. RESULTS AND DISCUSSIONS

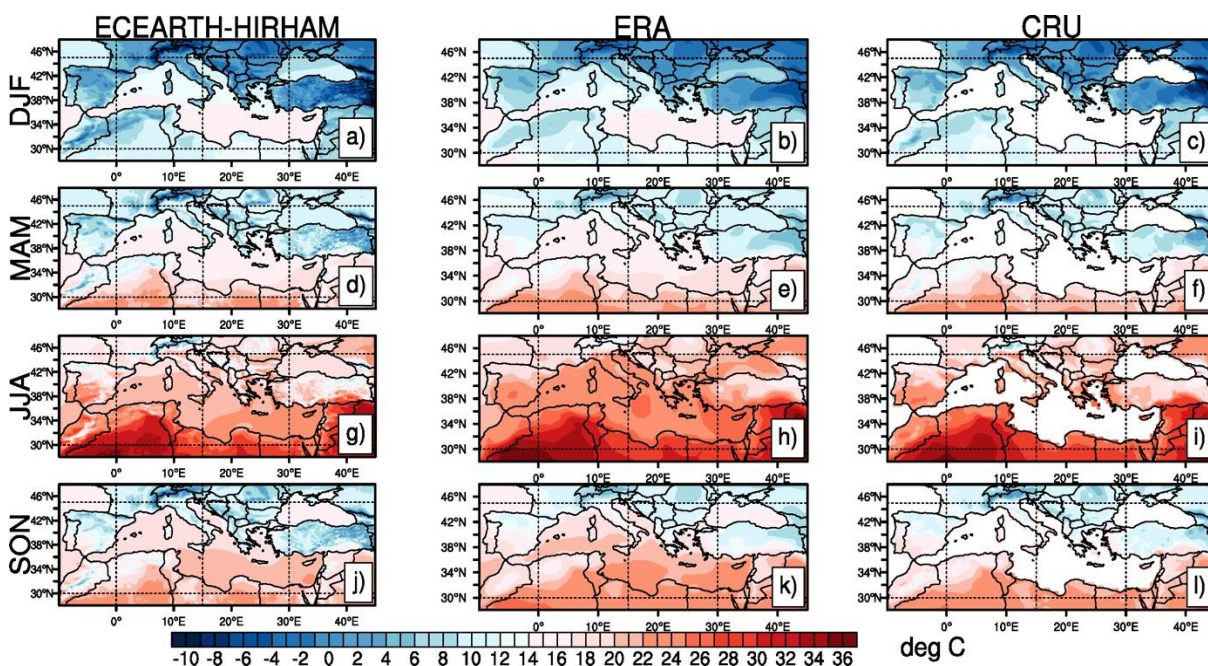
#### 3.1. Model Performance for Temperature

RCM's performance in simulating present climate conditions was investigated by comparing model results with ERA-interim and CRU for 1971-2000. Results of ERA-Interim are given for 1980-2000 due to the availability of data. Outputs of HIRHAM5, driven by EC-EARTH, HadGEM2-ES, and NorESM1-M are represented in Figure 1-3 together with ERA-interim and CRU respectively. The climatology of model results was calculated for a period of 1971–2000. The results of the model show a much more detailed temperature distribution due to higher resolution ( $0.11^{\circ}$ - $12.5 \text{ km}$ ) compared to ERA-interim ( $0.75^{\circ}$ ) and CRU ( $0.5^{\circ}$ ) dataset. Comparisons with the observational dataset (CRU) were also given as statistics including bias, Root Mean Square Error (RMSE), and correlation coefficient for mean temperature, maximum and minimum temperature, and precipitation weighted over the domain for each season (Table 2-5). Regional climate model, HIRHAM forced by all three global climate models simulates the spatial and temporal (seasonal) distribution of temperature over the domain. All three model outputs show similar temperature distribution throughout the region except HadGEM2-ES shows warmer temperatures over the Mediterranean Sea and North Africa could be due to high equilibrium climate sensitivity of global climate model HadGEM2-ES. Results of each model produce colder temperatures compared to reanalysis and observational dataset around high topographical regions of the domain like the Alpine region and southeastern Turkey. We also observed this cold bias in outputs of RegCM. This might be because of error in measurements at the stations which were generally built-in valleys of mountains of the region [53]. Excluding the mountainous parts of the domain, HIRHAM5 gives similar results with reanalysis data and observation.

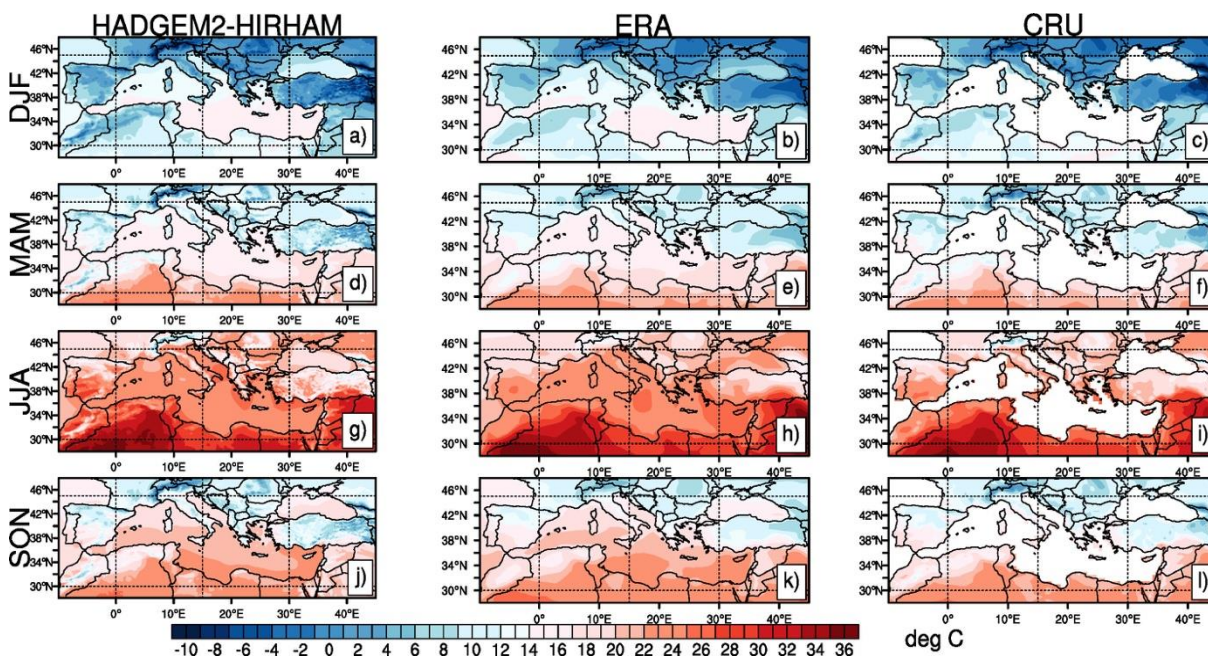
Spatial statistics for seasonal mean temperature were given in Table 1. Results of the ERA-interim dataset and the HIRHAM5 model were compared with the CRU observational datasets. The performance of the reanalysis dataset is better compared to the regional model as expected. A cold bias is seen in the results of EC-EARTH driven HIRHAM5 for every season whereas warm bias is seen in HadGEM2-ES and NorESM1-M driven HIRHAM5 except for summer in NorESM1-M driven HIRHAM5. Even though the results of HIRHAM5 driven by different GCMs are quite similar in magnitude, HadGEM2-ES driven HIRHAM5 model results show better performance compared to other models except for winter if we look at the RMSE values. Winter has larger RMSE values than the other seasons likely due to cold bias around the mountainous region. It is also shown that model results are highly correlated with the observational dataset. Maximum and minimum temperature results of HIRHAM5 driven by three GCMs were also given

in Table 3 and Table 4, respectively. Each model result has cold biases for every season regardless of driven GCM for maximum temperature. This could be indicating that future changes in maximum temperature are underestimated by model results. RMSEs are higher than that of mean temperature which is anticipated since the magnitude of maximum temperature is larger than mean temperature. Summer values of RMSE are larger than other seasons in which

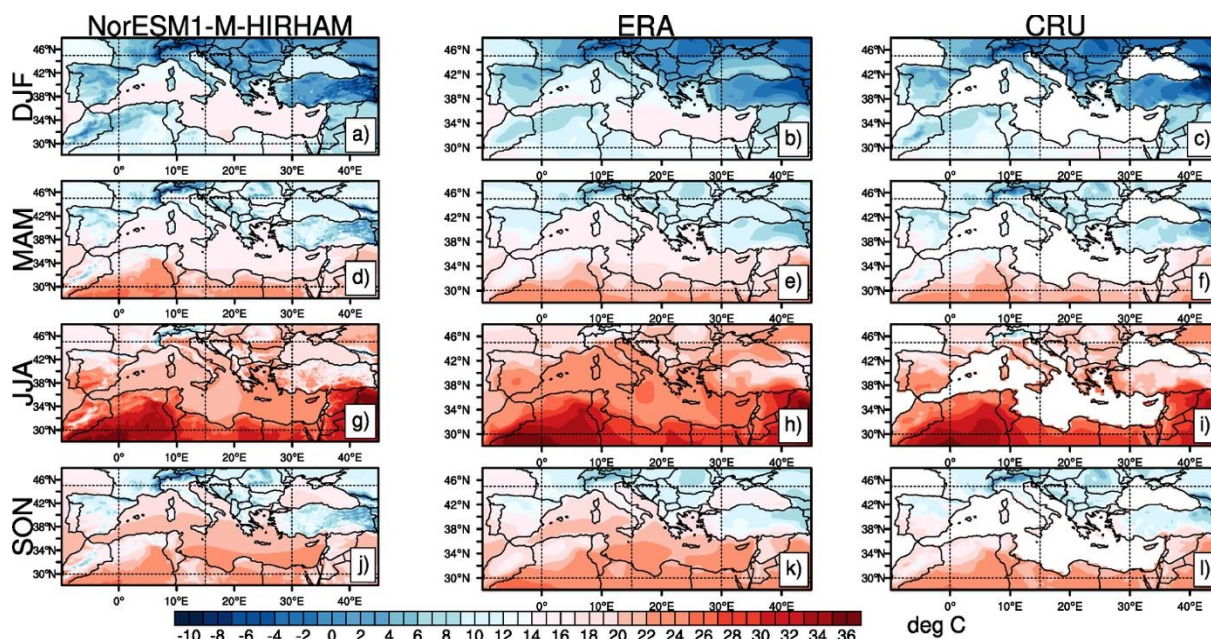
stronger magnitudes are observed. On the other hand, minimum temperatures are overestimated by the model (Table 4). EC-EARTH driven HIRHAM5 has the highest performance out of the three models according to RMSE values. Both maximum and minimum temperature results are found to be highly correlated with the observational values.



**Figure 1.** Average temperatures (°C) by HIRHAM5 with EC-EARTH dataset for 1971–2000 (1<sup>st</sup> column), by ERA-Interim dataset for 1980–2000 (2<sup>nd</sup> column) and CRU observational temperature dataset for 1971–2000 (3<sup>rd</sup> column) for winter (a-c), spring (d-f), summer (g-i), autumn (j-l).



**Figure 2.** Average temperatures (°C) by HIRHAM5 with HadGEM2-ES dataset for 1971–2000 (1<sup>st</sup> column), by ERA-Interim dataset for 1980–2000 (2<sup>nd</sup> column) and CRU observational temperature dataset for 1971–2000 (3<sup>rd</sup> column) for winter (a-c), spring (d-f), summer (g-i), autumn (j-l).



**Figure 3.** Average temperatures (°C) by HIRHAM5 with NorESM1-M dataset for 1971–2000 (1<sup>st</sup> column), by ERA-Interim dataset for 1980–2000 (2<sup>nd</sup> column) and CRU observational temperature dataset for 1971–2000 (3<sup>rd</sup> column) for winter (a-c), spring (d-f), summer (g-i), autumn (j-l).

**Table 2.** Statistics for seasonal mean temperature (°C) weighted over the whole domain for the period of 1980-2000 for ERA-interim, and 1971-2000 for HIRHAM5 driven by three global climate models compared to CRU observational dataset.

		ERA-interim	EC-EARTH-HIRHAM	HadGEM2-ES-HIRHAM	NorESM1-M-HIRHAM
DJF	Bias	0.448	-0.321	0.114	1.301
	RMSE	1.244	2.490	2.593	2.882
	Correlation	0.975	0.900	0.881	0.877
MAM	Bias	0.424	-0.624	0.504	0.857
	RMSE	1.042	1.606	1.553	1.777
	Correlation	0.977	0.958	0.955	0.951
JJA	Bias	0.482	-1.700	0.500	-0.660
	RMSE	1.231	2.548	1.809	2.217
	Correlation	0.970	0.944	0.937	0.928
SON	Bias	0.535	-1.160	0.288	0.163
	RMSE	1.068	2.087	1.847	1.835
	Correlation	0.982	0.944	0.937	0.931

**Table 3.** Statistics for seasonal mean maximum temperature (°C) weighted over the whole domain for the period of 1971-2000 for HIRHAM5 driven by three global climate models compared to CRU observational dataset.

		EC-EARTH-HIRHAM	HadGEM2-ES-HIRHAM	NorESM1-M-HIRHAM
DJF	Bias	-1.776	-1.370	-0.329
	RMSE	2.922	2.880	2.642
	Correlation	0.921	0.907	0.901
MAM	Bias	-2.517	-1.322	-1.079
	RMSE	3.110	2.366	2.388
	Correlation	0.940	0.930	0.920
JJA	Bias	-4.046	-1.896	-3.023
	RMSE	4.848	3.211	4.210
	Correlation	0.901	0.885	0.880
SON	Bias	-3.303	-1.876	-2.043
	RMSE	3.719	2.608	2.829
	Correlation	0.950	0.944	0.935

**Table 4.** Statistics for seasonal mean minimum temperature (°C) weighted over the whole domain for the period of 1971-2000 for HIRHAM5 driven by three global climate models compared to CRU observational dataset.

		EC-EARTH-HIRHAM	HadGEM2-ES-HIRHAM	NorESM1-M-HIRHAM
DJF	Bias	1.389	1.881	3.148
	RMSE	3.230	3.448	4.197
	Correlation	0.895	0.879	0.874
MAM	Bias	1.393	2.448	2.916
	RMSE	2.468	3.120	3.454
	Correlation	0.937	0.938	0.940
JJA	Bias	0.857	3.053	1.883
	RMSE	2.209	3.569	2.836
	Correlation	0.938	0.935	0.925
SON	Bias	1.282	2.727	2.624
	RMSE	2.583	3.553	3.429
	Correlation	0.924	0.917	0.914

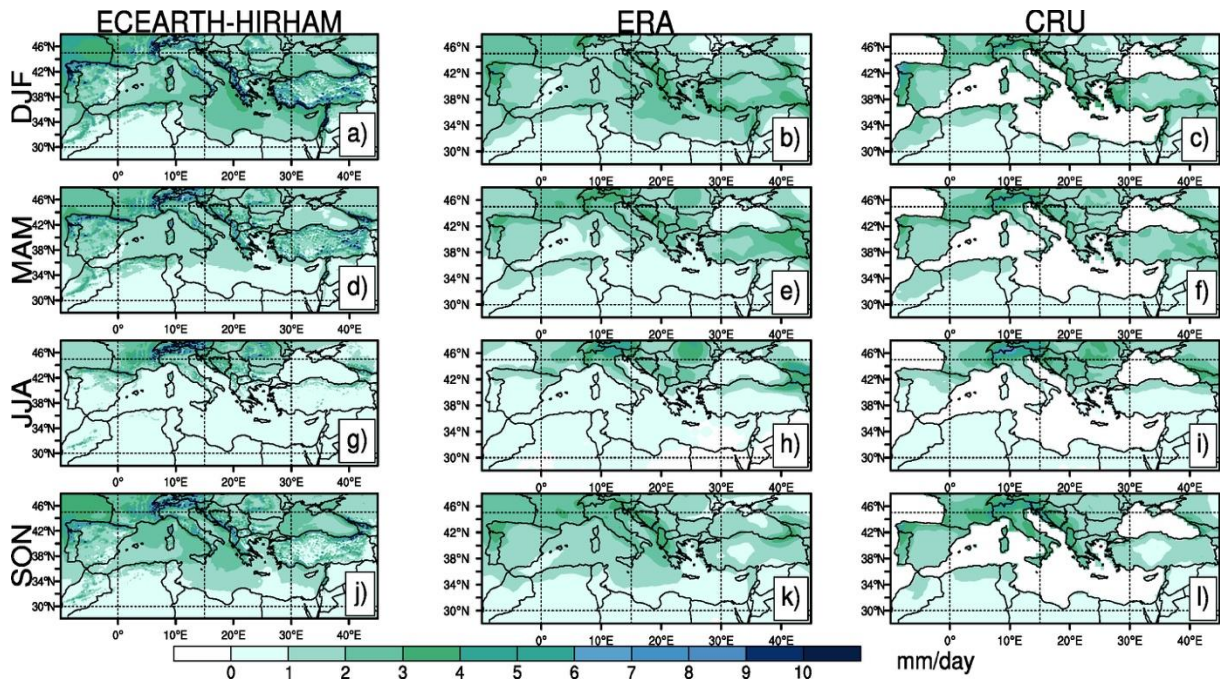
### 3.2. Model Performance for Precipitation

Average precipitation obtained from the HIRHAM5, driven by EC-EARTH, HadGEM2-ES, and NorESM1-M global dataset, together with ERA-interim and the CRU, is presented in Figure 4-6 respectively. Results give very similar values for each HIRHAM5 output driven by three different global models. We observe slightly more precipitation in the spring season over the Mediterranean Sea for HIRHAM5 driven by EC-EARTH model data than other model results (Figure 4d). Even though the regional climate model reproduces seasonal variability reasonably well, it overestimates precipitation compared to the observation, especially over high plateau regions during the spring, autumn, and winter seasons. Overestimation is independent of the global climate model used to drive the regional climate model, HIRHAM5. This wet bias is also observed in outputs of regional climate model RegCM. It might be because of the bias in the observational dataset as we observed it in temperature outputs as well. However, model outputs agree with reanalysis and observations for summer over Turkey where precipitation amounts have already low values.

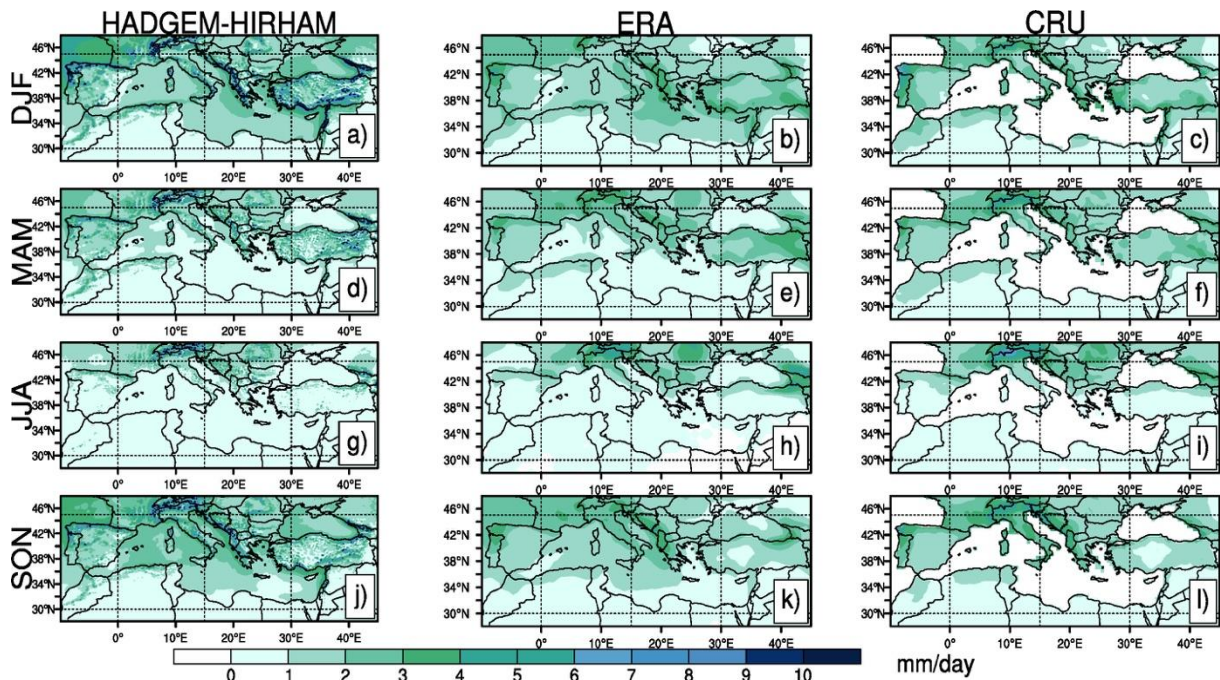
Model performance for precipitation was also investigated by looking at spatial statistics over the whole domain given by Table 5. Results were compared with the CRU observational dataset for mean precipitation as well. Negative bias is seen in the ERA-interim results for every season. Model results differ in direction of bias except for negative bias in summer. There is a positive bias for winter in all outputs of HIRHAM5 indicating that it overestimates the precipitation. Bias and RMSE values are smaller for summer since this season is drier compared to other seasons in the region. Winter has higher values of RMSE even if the bias is small possibly because of an overestimation of precipitation values. EC-EARTH driven HIRHAM5 has the lowest RMSE for winter and autumn when the region takes more precipitation compared to other seasons. Even though it is less than temperature, precipitation values are also correlated with the observation.

### 3.3. Changes in Temperature

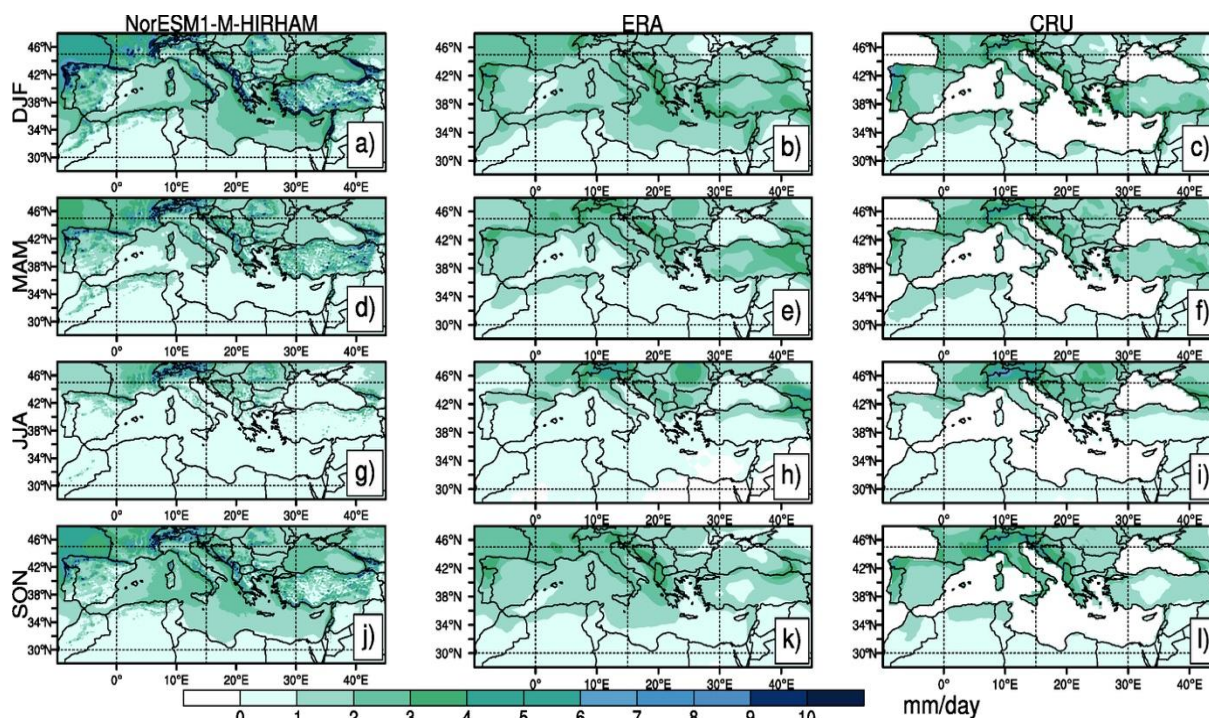
Projections of temperature obtained from HIRHAM5 forced by EC-EARTH, HadGEM2-ES, and NorESM1-M based on the RCP4.5 scenario are presented in Figure 7, Figure 9, and Figure 11. Outputs based on RCP8.5 scenarios are also presented in Figure 8, Figure 10, and Figure 12. First, general warming is projected over all parts of the domain throughout the century. Projected warming is increasing and becoming stronger with time and strongest warming is expected in the end-century period. The outputs of all three global model datasets show similar changes with each other. However, the HadGEM2-ES global model has more severe results than EC-EARTH and NorESM1-M especially under RCP8.5 for 2071–2100 very likely due to high climate sensitivity (Figure 12). According to RCP8.5 model scenario results of EC-EARTH and NorESM1-M, the highest warming of 5 °C is found to be in southeast Europe, Turkey, Morocco, Algeria, and the Iberian Peninsula, in summer (Figure 12-g, i) for end century period. HadGEM2-ES model gives more than 6 °C increase over all parts of the domain for summer (Figure 12-h). More warming in Central Europe and North Africa will be observed in winter (Figure 12-a, b). Temperatures will be expected to increase from 3.5 up to 5 °C for spring and autumn (Figure 12-d,e,f and j,k,l). According to RCP4.5 results, warming will be expected to be between 1.5 °C and 5 °C for the period of 2071-2100 (Figure 11). The maximum temperature increase is projected in summer mainly over the regions including Morocco, Algeria, and the Iberian Peninsula (Figure 11-g,h,i). The warming temperature pattern is similar for both scenarios and all periods with summer being the warmest and winter less warm season. Therefore, it is anticipated that the change in temperature over the region will be towards warmer temperatures as time passes. Moreover, the changes will be more severe for RCP8.5 compared to RCP4.5. The regional climate model results of temperature are generally in line with AR6 [1, 29].



**Figure 4.** Precipitation (mm/day) by HIRHAM5 with EC-EARTH dataset for 1971–2000 (1<sup>st</sup> column), by ERA-Interim dataset for 1980–2000 (2<sup>nd</sup> column) and CRU observational temperature dataset for 1971–2000 (3<sup>rd</sup> column) for winter (a-c), spring (d-f), summer (g-i), autumn (j-l).



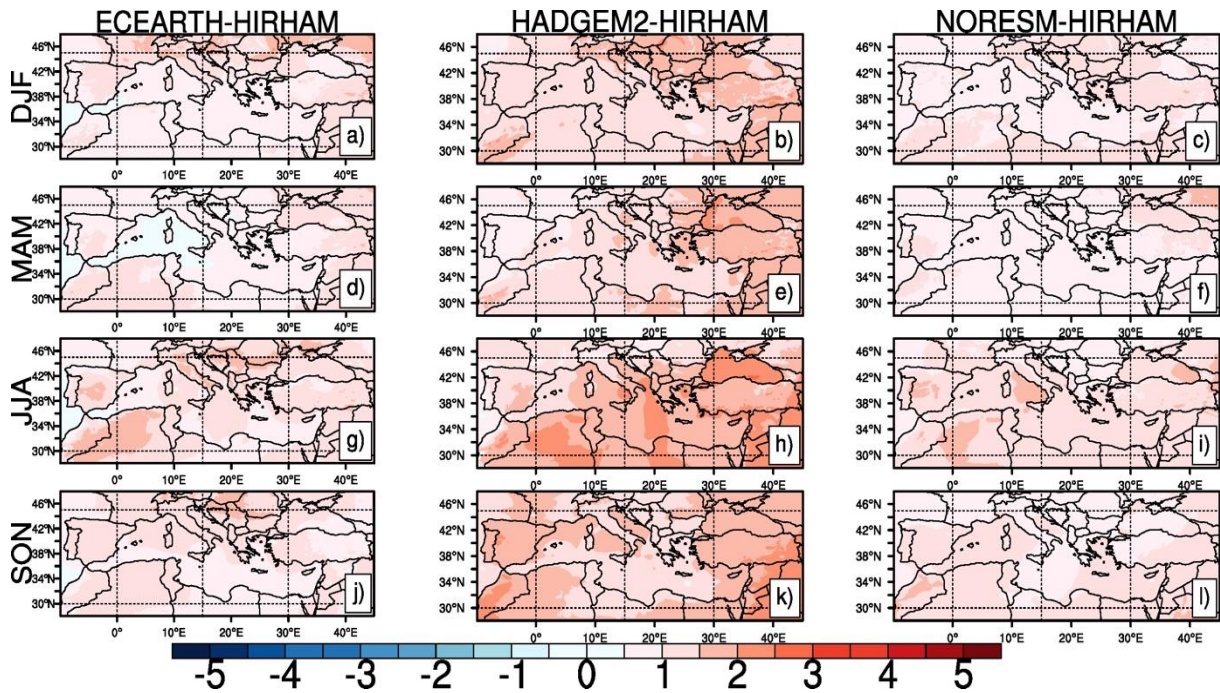
**Figure 5.** Precipitation (mm/day) by HIRHAM5 with HadGEM2-ES dataset for 1971–2000 (1<sup>st</sup> column), by ERA-Interim dataset for 1980–2000 (2<sup>nd</sup> column) and CRU observational temperature dataset for 1971–2000 (3<sup>rd</sup> column) for winter (a-c), spring (d-f), summer (g-i), autumn (j-l).



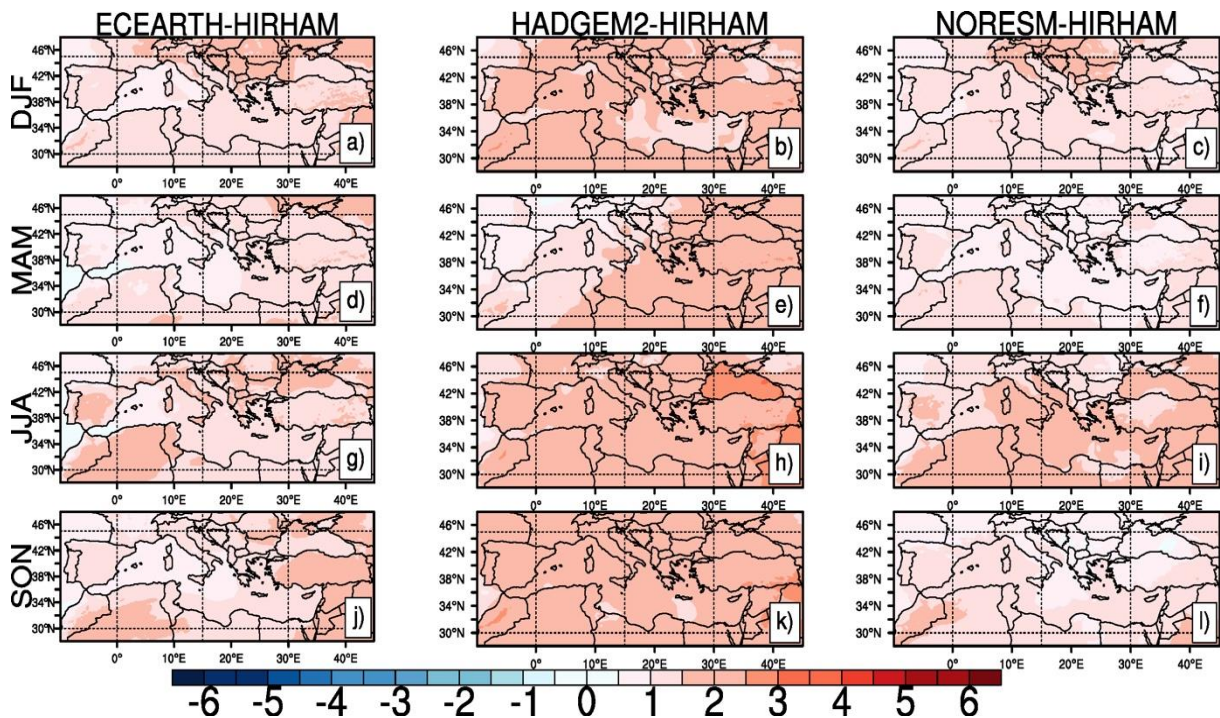
**Figure 6.** Precipitation (mm/day) by HIRHAM5 with NorESM1-M dataset for 1971–2000 (1<sup>st</sup> column), by ERA-Interim dataset for 1980–2000 (2<sup>nd</sup> column) and CRU observational temperature dataset for 1971–2000 (3<sup>rd</sup> column) for winter (a-c), spring (d-f), summer (g-i), autumn (j-l).

**Table 5.** Statistics for seasonal mean precipitation (mm/day) weighted over the whole domain for the period of 1980-2000 for ERA-interim, and 1971-2000 for HIRHAM5 driven by three global climate models compared to CRU observational dataset.

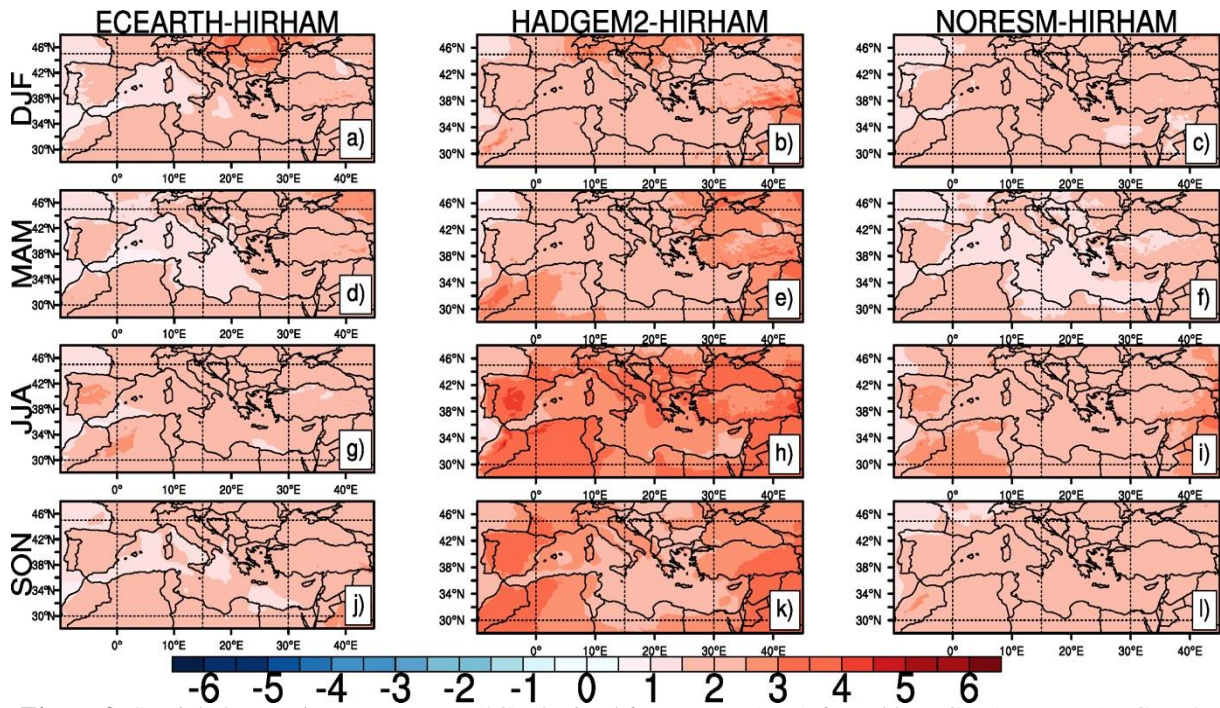
		ERA-interim	EC-EARTH-HIRHAM	HadGEM2-ES-HIRHAM	NorESM1-M-HIRHAM
DJF	Bias	-0.362	0.368	0.380	0.583
	RMSE	0.650	1.768	1.949	2.286
	Correlation	0.877	0.652	0.614	0.631
MAM	Bias	-0.201	0.268	-0.093	0.089
	RMSE	0.451	1.334	1.089	1.362
	Correlation	0.902	0.716	0.711	0.716
JJA	Bias	-0.156	-0.015	-0.241	-0.197
	RMSE	0.423	0.850	0.712	0.809
	Correlation	0.935	0.812	0.812	0.797
SON	Bias	-0.314	0.171	0.267	0.206
	RMSE	0.548	1.145	1.245	1.301
	Correlation	0.920	0.744	0.731	0.722



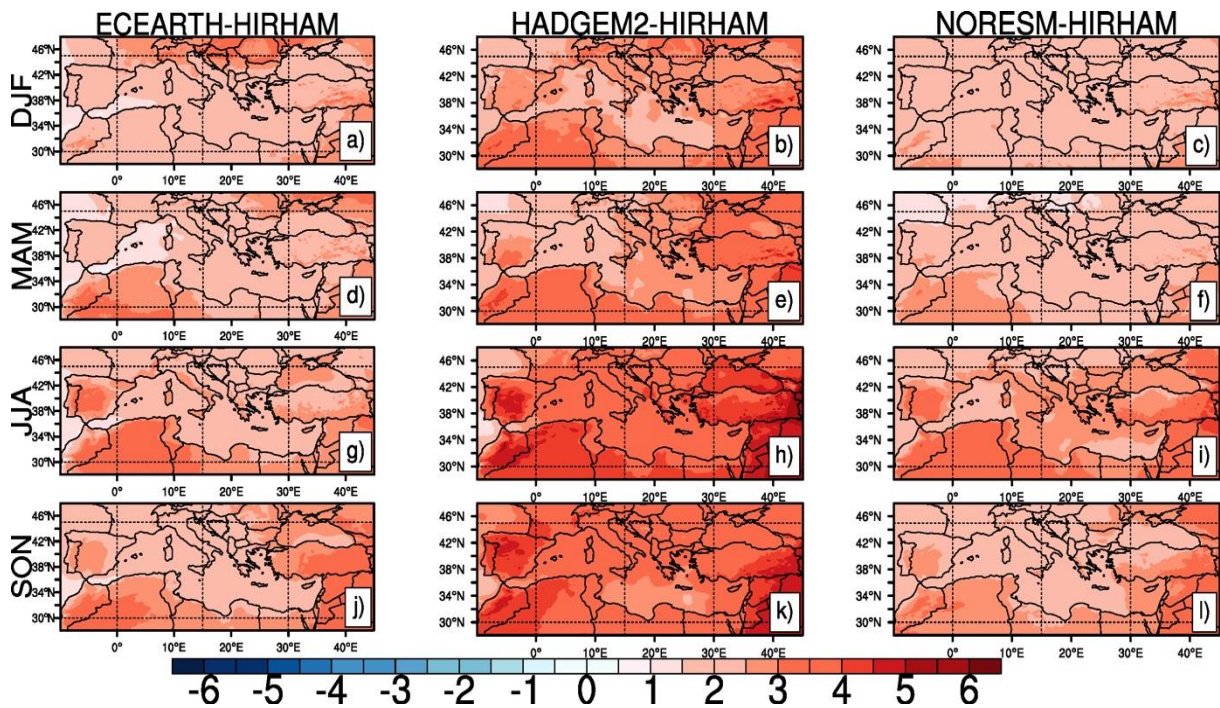
**Figure 7.** Spatial changes in temperatures (°C) obtained from HIRHAM5, forced by EC-EARTH, HADGEM2-ES, and NORESM1-M with RCP4.5 for 2011–2040, with respect to 1971–2000: (a-c) winter, (d-f) spring, (g-i) summer, (j-l) autumn, respectively.



**Figure 8.** Spatial changes in temperatures (°C) obtained from HIRHAM5, forced by EC-EARTH, HADGEM2-ES, and NORESM1-M with RCP8.5 for 2011–2040, with respect to 1971–2000: (a-c) winter, (d-f) spring, (g-i) summer, (j-l) autumn, respectively.

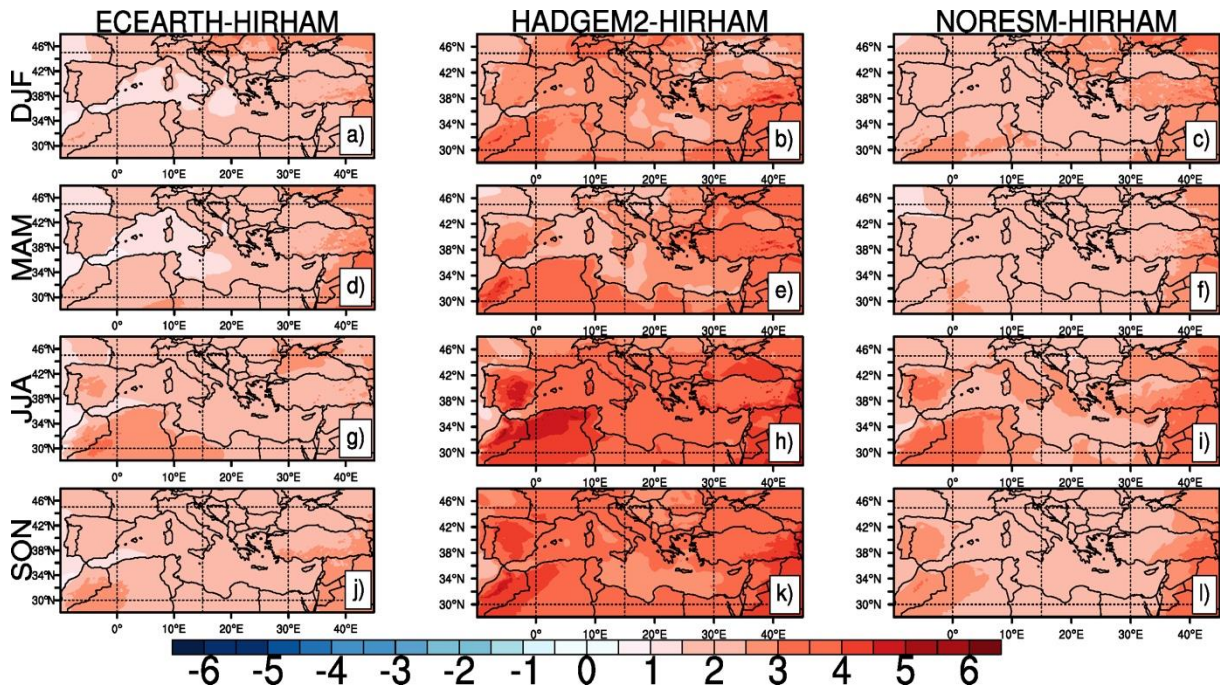


**Figure 9.** Spatial changes in temperatures (°C) obtained from HIRHAM5, forced by EC-EARTH, HADGEM2-ES, and NORESM1-M with RCP4.5 for 2041–2070, with respect to 1971–2000: (a-c) winter, (d-f) spring, (g-i) summer, (j-l) autumn, respectively.

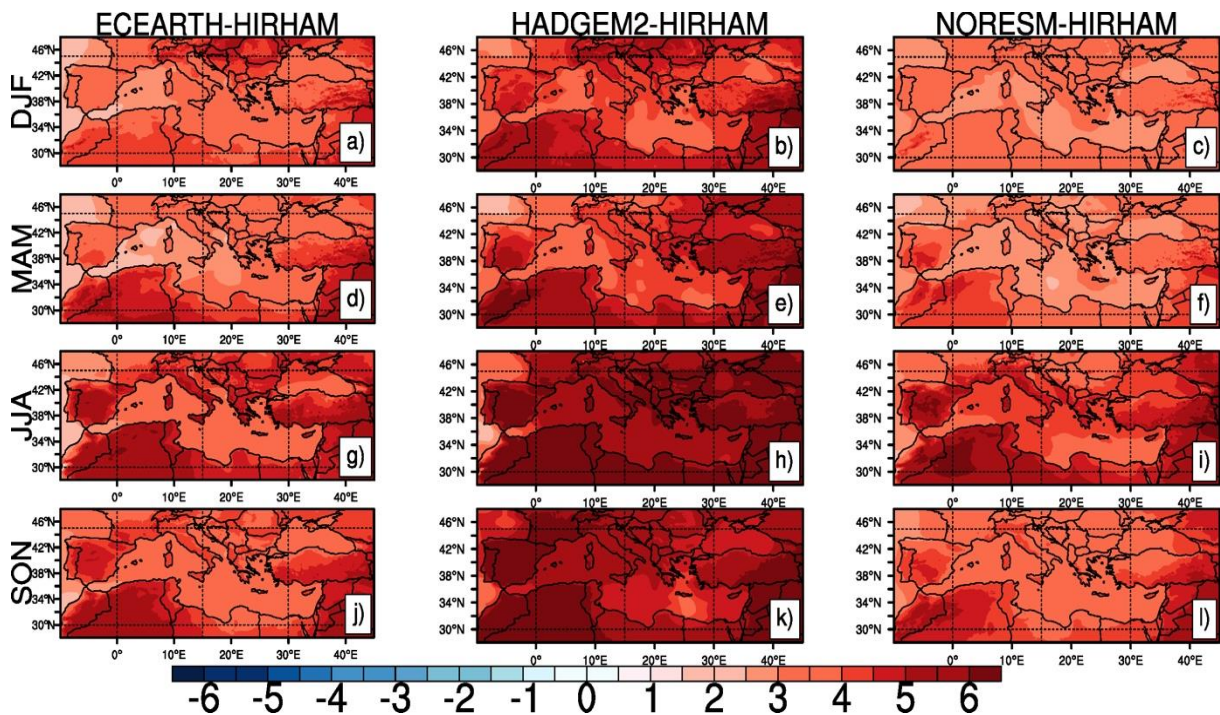


**Figure 10.** Spatial changes in temperatures (°C) obtained from HIRHAM5, forced by EC-EARTH, HADGEM2-ES, and NORESM1-M with RCP8.5 for 2041–2070, with respect to 1971–2000: (a-c) winter, (d-f) spring, (g-i) summer, (j-l) autumn, respectively.





**Figure 11.** Spatial changes in temperatures (°C) obtained from HIRHAM5, forced by EC-EARTH, HADGEM2-ES, and NORESM1-M with RCP4.5 for 2071–2100, with respect to 1971–2000: (a-c) winter, (d-f) spring, (g-i) summer, (j-l) autumn, respectively.



**Figure 12.** Spatial changes in temperatures (°C) obtained from HIRHAM5, forced by EC-EARTH, HADGEM2-ES, and NORESM1-M with RCP8.5 for 2071–2100, with respect to 1971–2000: (a-c) winter, (d-f) spring, (g-i) summer, (j-l) autumn, respectively.

### 3.4. Changes in Precipitation

The projection of precipitation changes based on the RCP4.5 is presented in Figures 13, 15, and 17 respectively. Outputs based on RCP8.5 scenarios are also presented in Figure 14, Figure 16, and Figure 18. Even though no pronounced change in the amount of precipitation will be expected over the domain, especially for the near-future period of 2011-2040, the direction of the change is negative except slight increase given by HadGEM2-ES results for the winter over southern Europe and the Iberian Peninsula for both emission scenarios RCP4.5 and RCP8.5 (Figures 13 and 14). The magnitude of decrease in precipitation is projected to be larger for the mid-future period especially over the Iberian Peninsula, and the Alpine region in autumn with a strong decrease simulated by HadGEM2-ES driven HIRHAM (Figure 15 and 16). A decrease in precipitation in the southwest coasts of Turkey will be expected much in the winter for the end-century period (Figure 18-a,b,c). However, models give an increase of precipitation in the north part of Turkey and the Alpine region for winter. Drier conditions will be expected to occur for Turkey for all seasons except winter. Model outputs of RCP8.5 show more intense values than RCP4.5 output. A decrease in precipitation amounts in the Mediterranean Basin will be expected for summer and autumn. This decrease will occur over the north part of the Mediterranean region including the Balkans, France, Italy, and Caucasia. These results are also in line with AR6, stating that South Europe and the Mediterranean Basin will receive a less amount of average precipitation [1, 29].

### 3.5. Future Changes in Extreme Indices

#### 3.5.1. Absolute temperature indices

Future changes in TXx and TNn for 2071-2100 relative to 1971-2000 for two RCPs are presented in Figures 19 and 20, respectively. The projected changes in TNn and TXx differ from each other spatially. The increase in TNn is higher in northern parts of the region such as central and southern Europe. The highest increase in TNn, up to 12 °C, is projected in RCP8.5 in regions such as the south Balkans and especially the southeastern part of Turkey (Figure 20). Larger changes in TNn in high topographical regions might be associated with snow cover retreatment. Changes in TXx are only moderate over land. The increase in TXx over the Iberian Peninsula is remarkable compared to other land areas, especially for regional climate model outputs driven by the HadGEM2-ES global model. HadGEM2-ES has more severe results than other models for TXx and TNn as well in both RCPs. Nevertheless, TXx warming over the Mediterranean is about 7 °C. Therefore, summer extreme temperatures will be pronouncedly increasing over the region.

#### 3.5.2. Duration temperature index

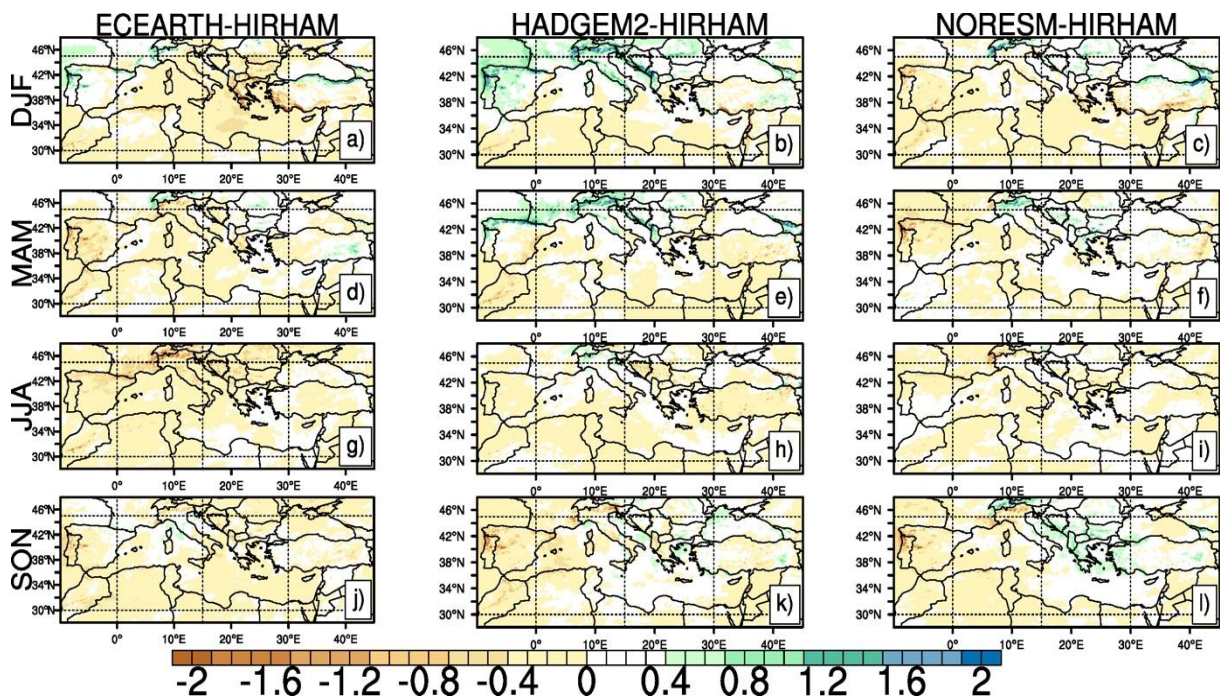
Projected changes in the warm spell duration over the period of 2071-2100 relative to the base period of 1971-2000 for two RCPs are presented in Figure 21. Consistent with the changes in extreme temperatures, WSDI is expected to increase in both RCPs. Changes in RCP8.5 are again stronger for all simulation results. The greatest increase in WSDI occurs in the Mediterranean Sea and this might be related to WSDI being sensitive to temperature variability which is small in the Mediterranean Sea surface [22]. Results indicate that the duration of warm spell will be more than 100 days longer for the worst-case scenario at the end of the century. This increase will be more in the south part of the Iberian Peninsula and Northern African countries. The southeastern part of Turkey will have around 180 days longer warm spell according to the projections.

#### 3.5.3. Percentile temperature indices

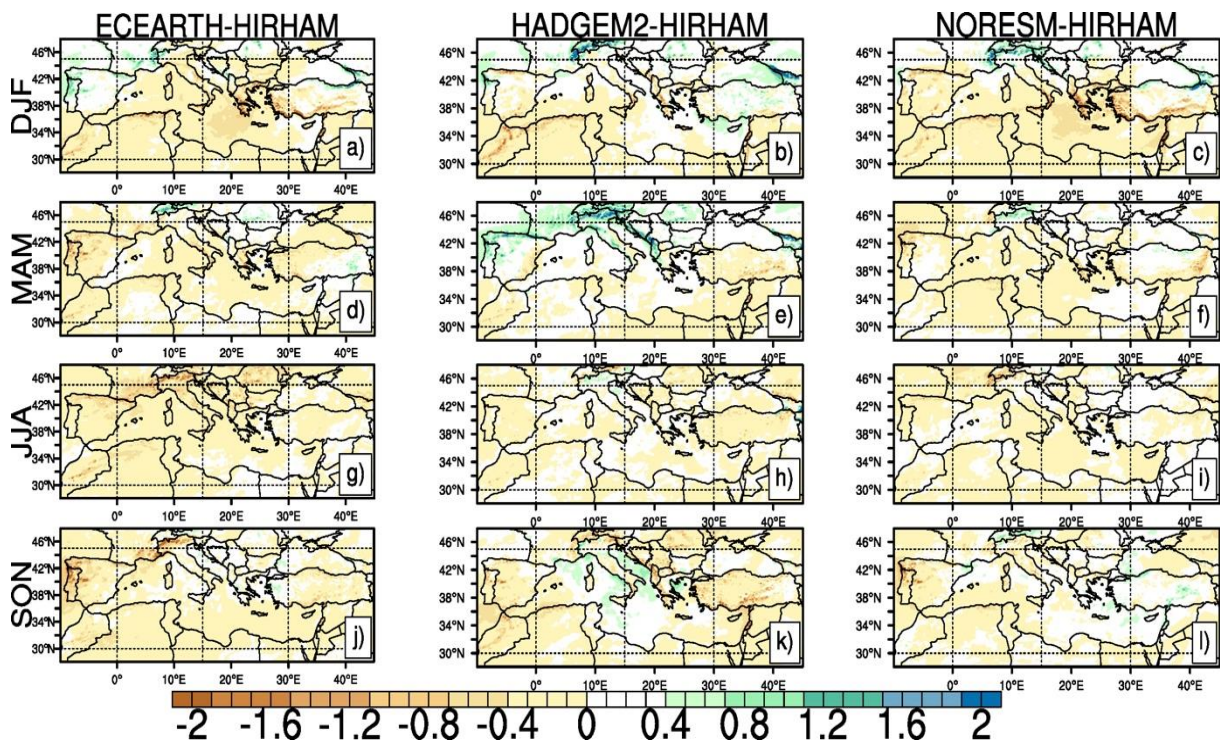
The percentile indices are represented as a percentage of days relative to 1971-2000 (Figure 22). A decrease in the number of cold nights and cold days is projected from the 1970s throughout the century in all model results. The decrease is generally more pronounced in HadGEM2-ES results starting from 2010 (red line). The responses for RCP8.5 are showing a very strong decrease in TN10p and TX10p from about 12% to 0.3%, throughout the century. These results show that almost no cold nights or cold days will occur by the end of the century. Warm nights and days will be expected to increase throughout the 21st century (Figure 22a, b). The increase is again higher in HadGEM2-ES results than the results of other models. The positive change in the number of warm nights and days for RCP8.5 scenarios is from about 10% in 1971-2000 to 84.6%, 76.4%, and 74.9% by 2100 for HadGEM2-ES, EC-EARTH, and NorESM1-M model results, respectively. Results show that more than 75% of the days and nights will be warmer than the 90<sup>th</sup> percentile of 1971-2000 by the end of the century.

#### 3.5.4. Precipitation indices

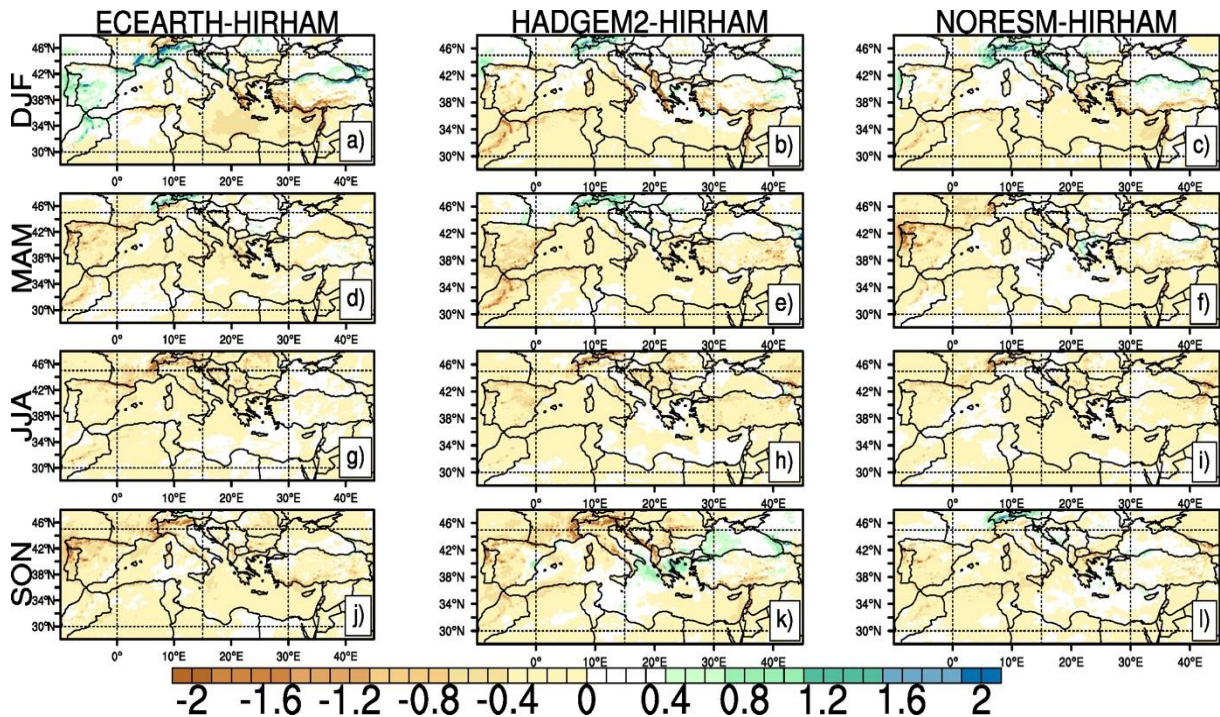
Total wet-day precipitation is defined by the amount of precipitation on the day whose precipitation is at least 1 mm. Results are given for the period of 2071-2100 relative to the base period 1971-2000 in % for both scenario outputs in Figure 23. Projected change in CDD is shown in Figure 24. For the end of the century, total wet-day precipitation decreases significantly over southern parts of the region in both RCPs relative to 1971-2000. There is also a slight increase in total wet-day precipitation over southern Europe. Regions in which decreases in total wet-day precipitation are projected will also observe a pronounced increase in CDD. Pronounced increases of CDD occur particularly in northern Africa, the Iberian Peninsula, and the inner regions of Turkey (Figure 24). Slight decreases in CDD are also expected to occur in the Alpine region.



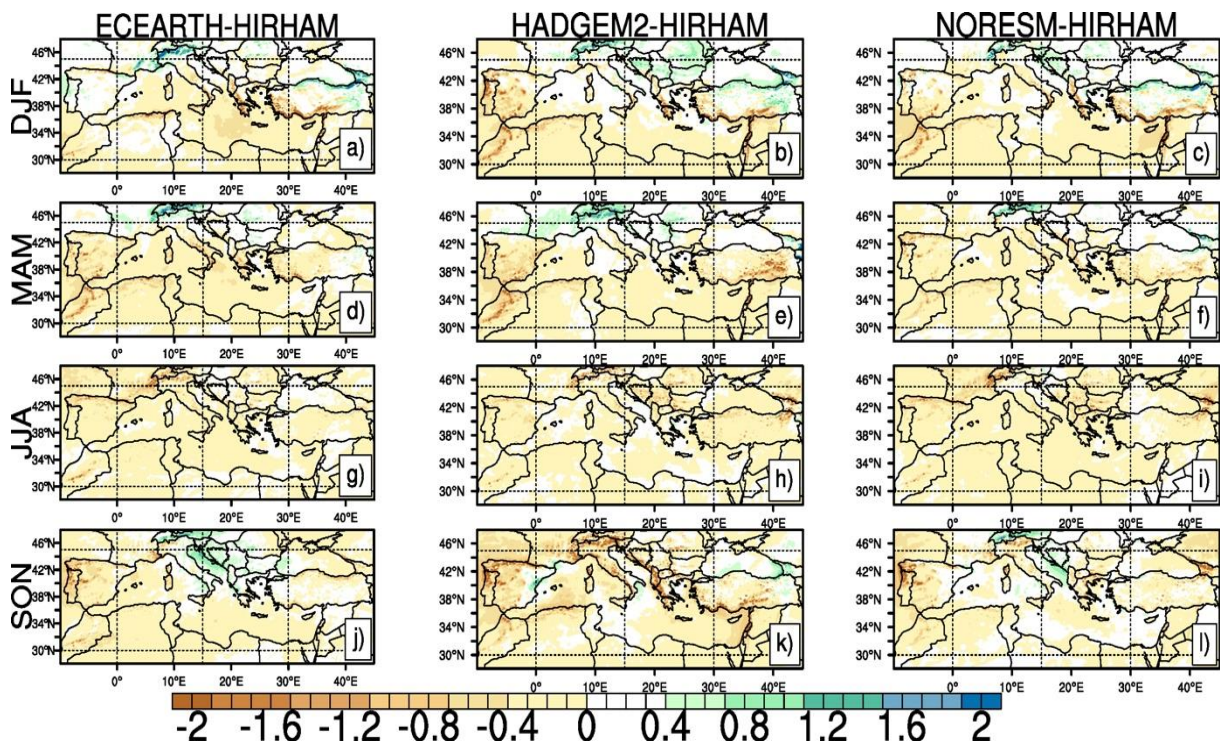
**Figure 13.** Spatial changes in precipitation (mm/day) obtained from HIRHAM5, forced by EC-EARTH, HADGEM2-ES, and NORESM1-M with RCP4.5 for 2011–2040, with respect to 1971–2000: (a-c) winter, (d-f) spring, (g-i) summer, (j-l) autumn, respectively.



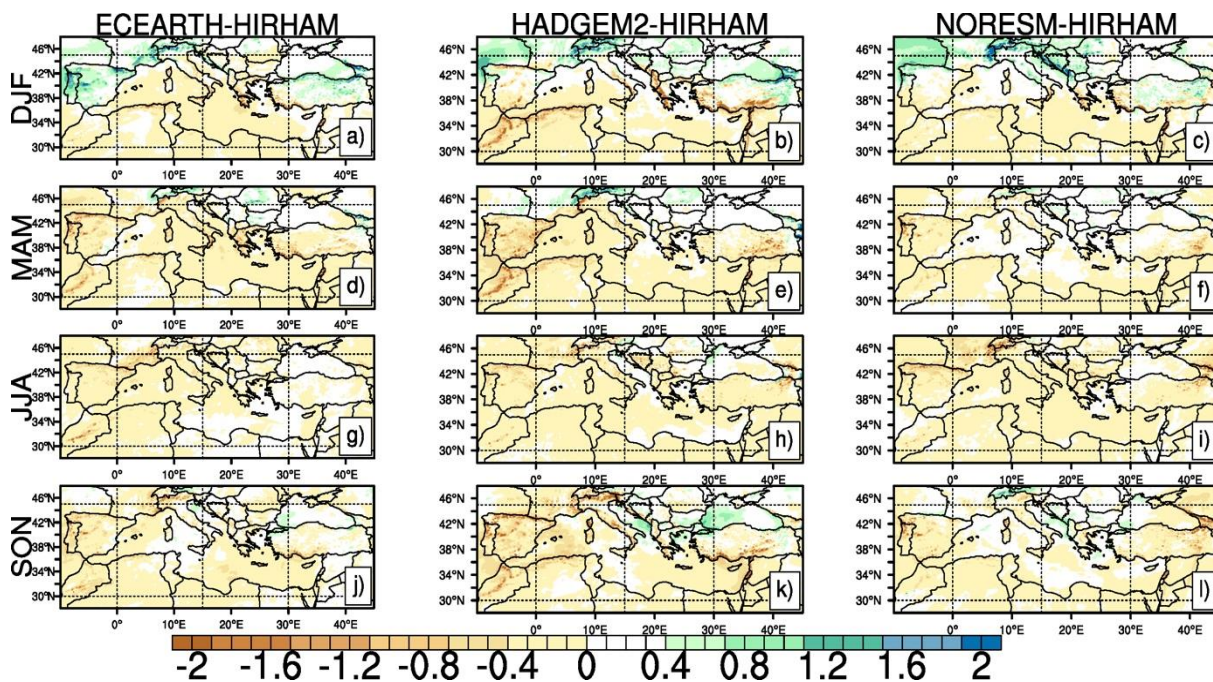
**Figure 14.** Spatial changes in precipitation (mm/day) obtained from HIRHAM5, forced by EC-EARTH, HADGEM2-ES, and NORESM1-M with RCP8.5 for 2011–2040, with respect to 1971–2000: (a-c) winter, (d-f) spring, (g-i) summer, (j-l) autumn, respectively.



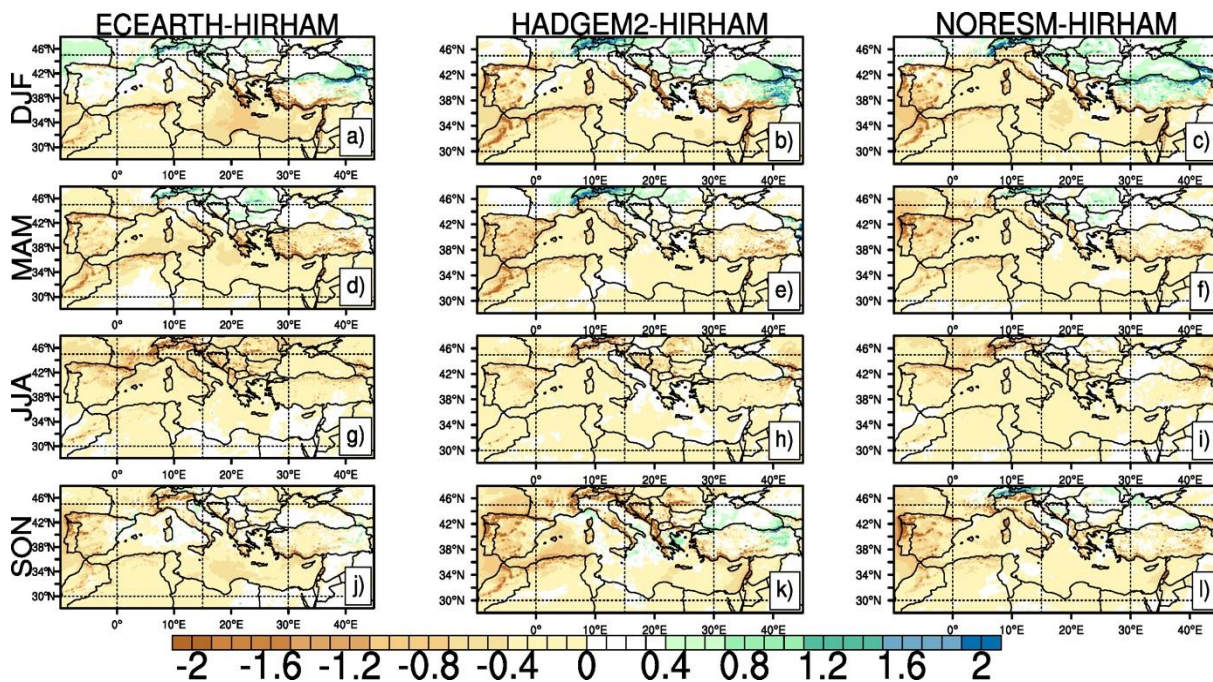
**Figure 15.** Spatial changes in precipitation (mm/day) obtained from HIRHAM5, forced by EC-EARTH, HADGEM2-ES, and NORESM1-M with RCP4.5 for 2041–2070, with respect to 1971–2000: (a-c) winter, (d-f) spring, (g-i) summer, (j-l) autumn, respectively.



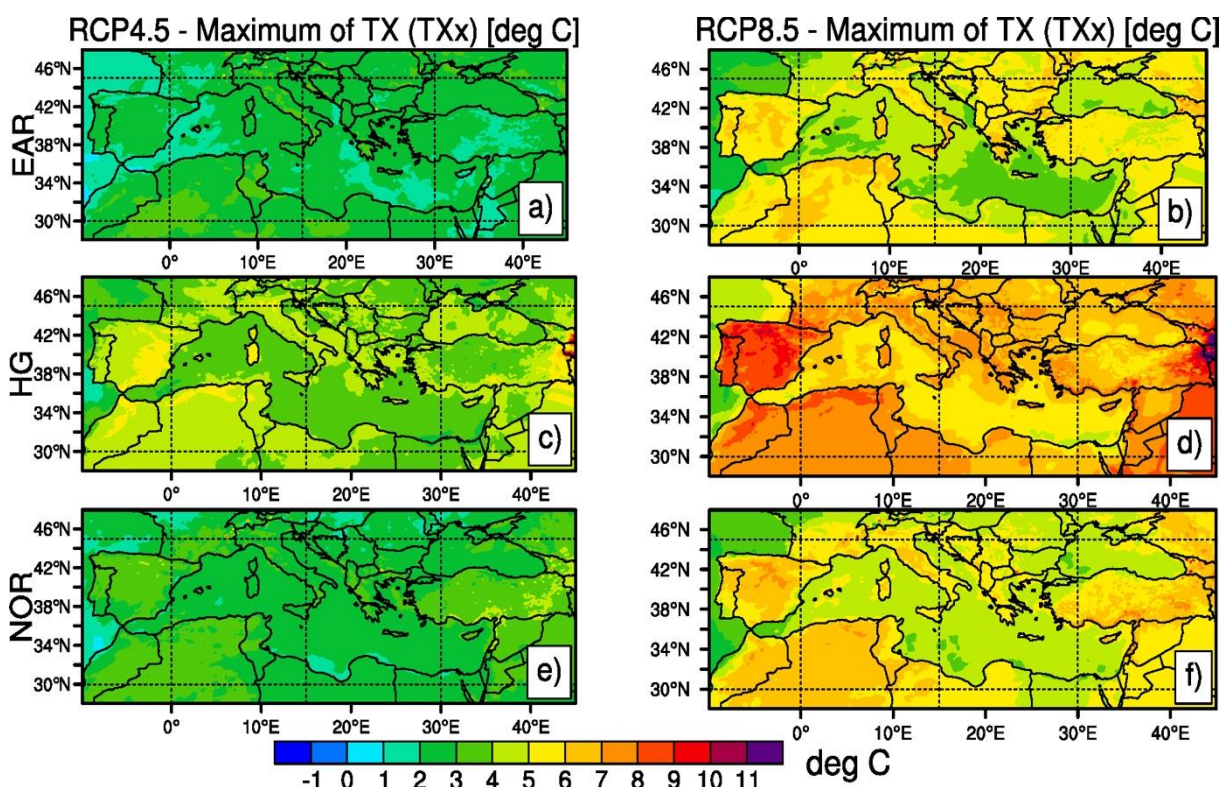
**Figure 16.** Spatial changes in precipitation (mm/day) obtained from HIRHAM5, forced by EC-EARTH, HADGEM2-ES, and NORESM1-M with RCP8.5 for 2041–2070, with respect to 1971–2000: (a-c) winter, (d-f) spring, (g-i) summer, (j-l) autumn, respectively.



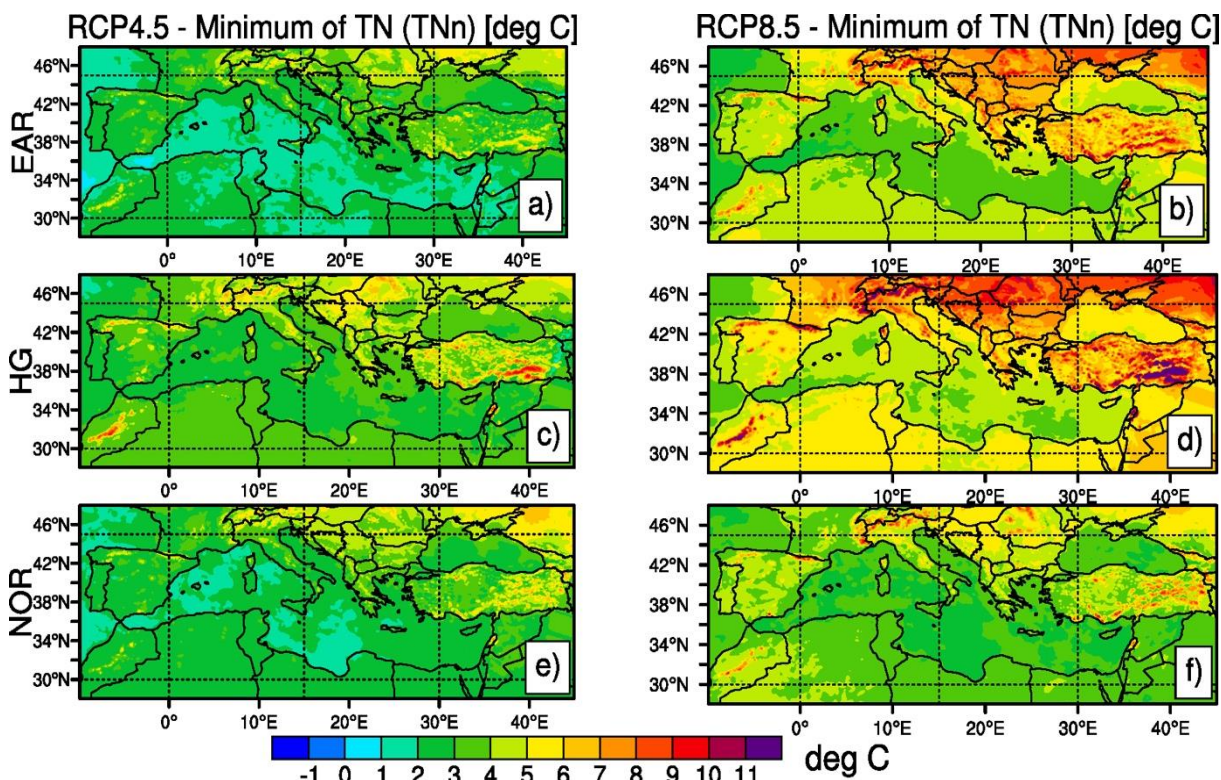
**Figure 17.** Spatial changes in precipitation (mm/day) obtained from HIRHAM5, forced by EC-EARTH, HADGEM2-ES, and NORESM1-M with RCP4.5 for 2071–2100, with respect to 1971–2000: (a-c) winter, (d-f) spring, (g-i) summer, (j-l) autumn, respectively.



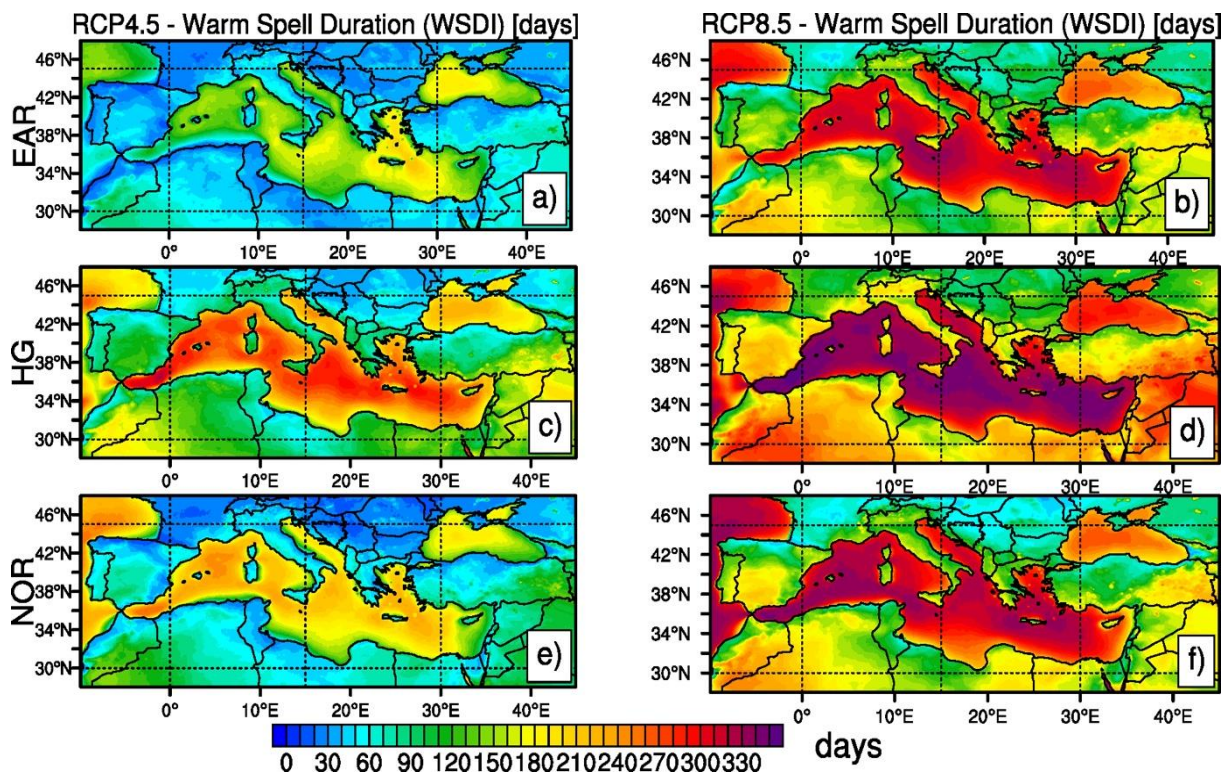
**Figure 18.** Spatial changes in precipitation (mm/day) obtained from HIRHAM5, forced by EC-EARTH, HADGEM2-ES, and NORESM1-M with RCP8.5 for 2071–2100, with respect to 1971–2000: (a-c) winter, (d-f) spring, (g-i) summer, (j-l) autumn, respectively.



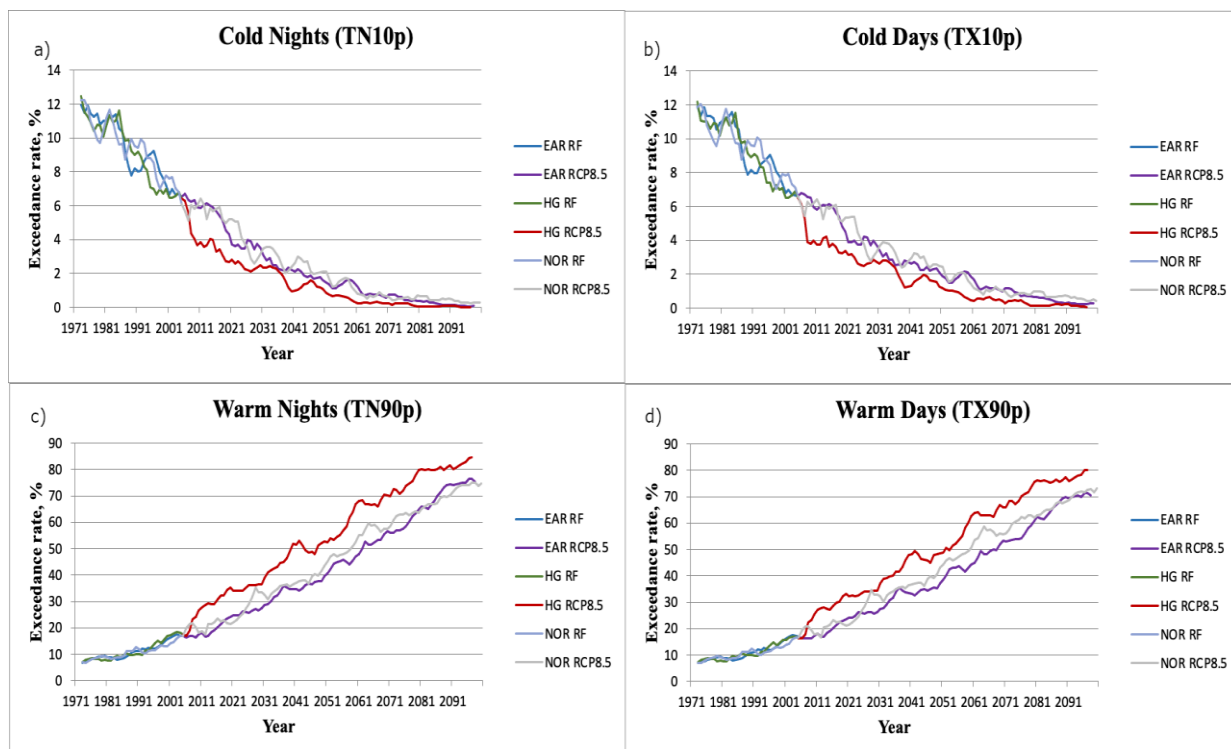
**Figure 19.** The temporally averaged changes in the TXx (°C) for 2071–2100 presented as differences compared to 1971–2000 under RCP4.5 (1<sup>st</sup> column), and RCP8.5 (2<sup>nd</sup> column) by using outputs of HIRHAM5 driven EC-EARTH (the first row), HadGEM2-ES (the second row) and NorESM1-M (the third row).



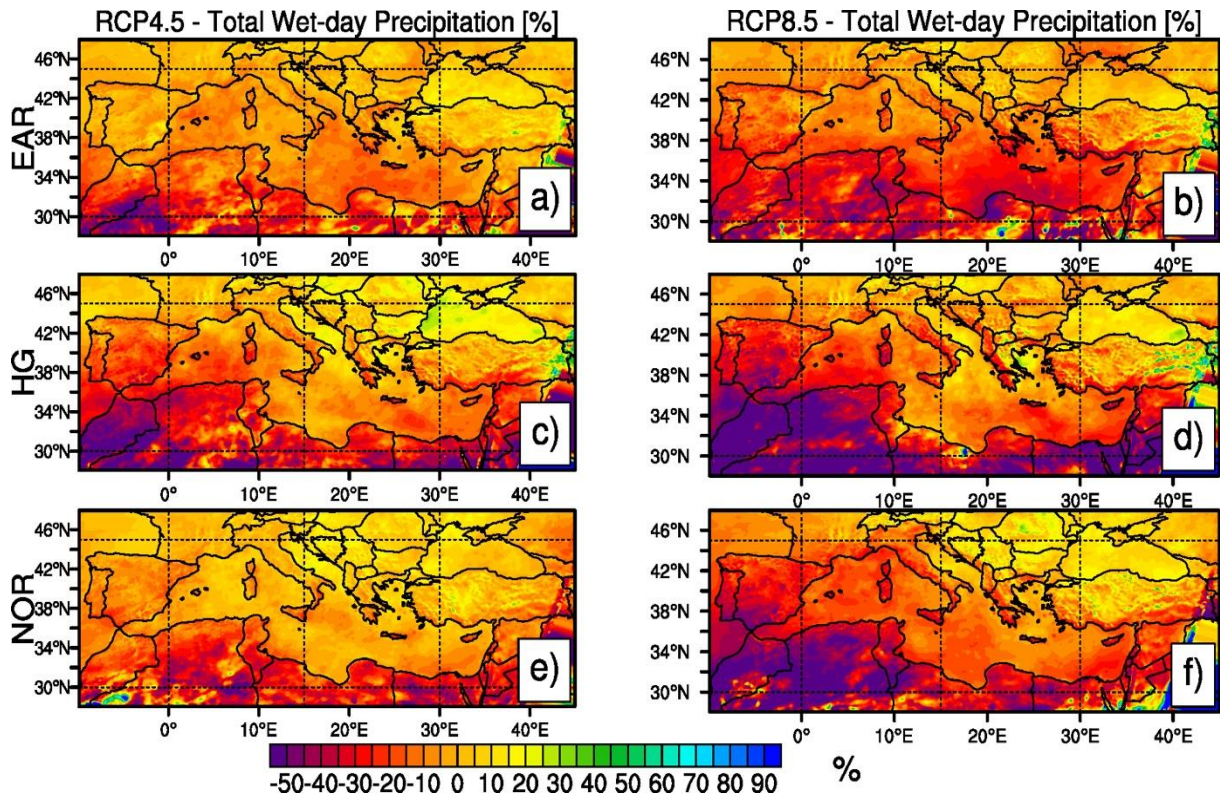
**Figure 20.** The temporally averaged changes in the TNn (°C) for 2071–2100 presented as differences compared to 1971–2000 under RCP4.5 (1<sup>st</sup> column), and RCP8.5 (2<sup>nd</sup> column) by using outputs of HIRHAM5 driven EC-EARTH (the first row), HadGEM2-ES (the second row) and NorESM1-M (the third row).



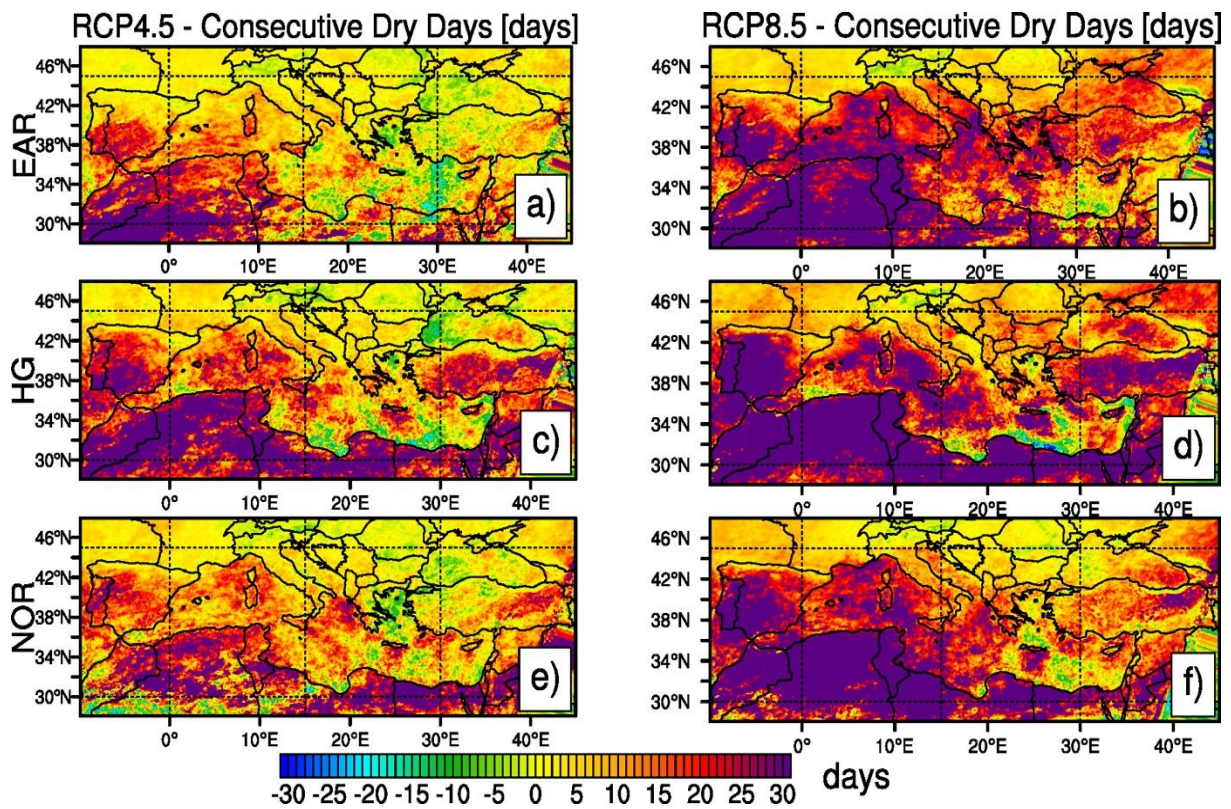
**Figure 21.** The temporally averaged changes in the WSDI (in days) for 2071–2100 presented as differences compared to 1971–2000 under RCP4.5 (1<sup>st</sup> column), and RCP8.5 (2<sup>nd</sup> column) by using outputs of HIRHAM5 driven EC-EARTH (the first row), HadGEM2-ES (the second row) and NorESM1-M (the third row).



**Figure 22.** Spatial averages of cold nights (TN10p) (a), cold days (TX10p) (b), warm nights (TN90p) (c), and warm days (TX90p) (d) over the region as simulated by the model results for the RCP8.5. Data is smoothed by a taking 5-year running mean.



**Figure 23.** The temporally averaged changes in total wet-day precipitation for 2071–2100 displayed (in %) compared to 1971–2000 for RCP4.5 (1<sup>st</sup> column), and RCP8.5 (2<sup>nd</sup> column) by using outputs of HIRHAM5 driven EC-EARTH (the first row), HadGEM2-ES (the second row) and NorESM1-M (the third row).



**Figure 24.** The temporally averaged changes in consecutive dry days for 2071–2100 displayed (in days) compared to 1971–2000 for RCP4.5 (1<sup>st</sup> column), and RCP8.5 (2<sup>nd</sup> column) by using outputs of HIRHAM5 driven EC-EARTH (the first row), HadGEM2-ES (the second row) and NorESM1-M (the third row).



#### IV. CONCLUSION

In this study, future change in temperature and precipitation climatology and extreme climate indices over the Mediterranean Basin including Turkey were investigated using HIRHAM5 forced by EC-EARTH, HadGEM2-ES, and NorESM1-M global climate models for three future periods of 2011–2040, 2041–2070, and 2071–2100. First, the ability of the HIRHAM5 in reproducing the observed conditions was investigated for 1971–2000 compared to ERA-interim and CRU datasets. Performance of HIRHAM5 is reasonable except cold bias around mountainous regions and wet bias has already been observed in the RegCM result. According to results, an increase in temperatures over all parts of the domain with stronger warming for summer will be expected. Results of the HadGEM2-ES global climate model mostly show more warming than the results of EC-EARTH and NorESM1-M global model projections. This result could be very likely because of the high response of HadGEM2-ES to the doubling of CO<sub>2</sub> concentrations in the atmosphere. It is important to see all range of changes in future climate over the region. A decrease in precipitation will likely occur in almost all parts of the region except in winter. Most of the drier weather conditions will be expected especially in winter over western and southern Turkey. This result is essential because those parts of Turkey usually get most of its precipitation in the winter. A relative decrease in the precipitation is not severe in the model outputs since the region is already arid and semi-arid in the summer months.

Projected changes in extreme climate indices defined by ETCCDI were also investigated by using outputs of HIRHAM5. Results show that an intensification of extreme weather events will be expected with increasing radiative forcing. Increase TN<sub>n</sub> are more pronounced particularly over the northern part of the Mediterranean Basin. On the other hand, increases in TX<sub>x</sub> are moderate over land areas. Stronger increases will be observed in summer over the region. The temporal evolutions of extreme climate indices show that changes will be stronger with the time and will be the strongest at the end of the century. According to the results, a decrease in total wet-day precipitation is anticipated. Longer dry spells are projected to occur as indicated by CDD results.

Model results are also in line with regional climate model RegCM driven by HadGEM2-ES which simulates an increase of between 3 °C and 7 °C in mean air temperatures of Turkey depending on the scenario. This warming will be more severe in warm seasons than in cold seasons [30]. The results obtained in this study show that Turkey and the Mediterranean region will be greatly affected by climate change due to generally increasing air temperatures and decreasing precipitation. The southern and mid-south regions of Turkey which have already low

precipitation and very hot climate will be expected to have drier and warmer weather conditions. All these results also clearly reveal that Turkey's level of vulnerability to future human-induced climate change and to its possible consequences is very high.

#### ACKNOWLEDGEMENT

The author is grateful to Jens Hesselbjerg Christensen for valuable suggestions, comments, and support, and also to Fredrik Boberg and Ole Bøssing Christensen from Danish Meteorological Institute for data provided for this study. The author was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under the program TUBITAK 2219 - International Postdoctoral Research Fellowship.

#### REFERENCES

- [1] IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- [2] Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.*, 33(8). L08707, <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>.
- [3] Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., Boscolo, R., Alpert, P., Artale, V., Li, L., ... and Xoplaki, E. (2006). The Mediterranean climate: an overview of the main characteristics and issues. In: Lionello P, Malanotte-Rizzoli P, Boscolo R (eds) *Mediterranean Climate Variability*. Amsterdam, Elsevier, pp 1–26. [https://doi.org/10.1016/S1571-9197\(06\)80003-0](https://doi.org/10.1016/S1571-9197(06)80003-0)
- [4] Lionello, P., Abrantes, F., Congedi, L., Dulac, F., Gacic, M., Gomis, D., ... and Xoplaki, E. (2012). Introduction: mediterranean climate—background information. In *The climate of the Mediterranean region: From the past to the future* (pp. xxxv-xc). Elsevier Inc. ISBN: 9780124160422. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416042-2.00012-4>.
- [5] Giorgi, F., and Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Glob. Planet. Chang.*, 63(2-3), 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>
- [6] Diffenbaugh, N. S., and Giorgi, F. (2012). Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble. *Clim.*

- Chang.*, 114(3), 813-822. doi:10.1007/s10584-012-0570-x.
- [7] Lionello, P., and Scarascia, L. (2018). The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. *Reg. Environ. Change*, 18(5), 1481-1493.
- [8] Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., ... and Whetton, P. (2007). Regional climate projections. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds) *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [9] Christensen, J. H., and Christensen, O. B. (2007). A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Clim. Change*, 81(1), 7-30.
- [10] Planton, S., Lionello, P., Artale, V., Aznar, R., Carrillo, A., Colin, J., ... and Tsimplis, M. (2012). The Climate of the Mediterranean Region in Future Climate Projections in The Climate of the Mediterranean Region. From the Past to the Future. From the Past to the Future. Elsevier (NETHERLANDS), projections, Amsterdam, pp 449–502. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416042-2.00008-2>.
- [11] Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J. L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., ... and Booth, B. B. (2013). Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. In *Climate Change 2013-The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1029-1136). Cambridge University Press.
- [12] Gualdi, S., Somot, S., May, W., Castellari, S., Déqué, M., Adani, M., ... and Xoplaki, E. (2013). Future climate projections. In *Regional assessment of climate change in the Mediterranean* (pp. 53-118). Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5781-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5781-3_3).
- [13] Dubrovský, M., Hayes, M., Duce, P., Trnka, M., Svoboda, M., and Zara, P. (2014). Multi-GCM projections of future drought and climate variability indicators for the Mediterranean region. *Reg. Environ. Change*, 14(5), 1907-1919. doi:10.1007/s10113-013-0562-z.
- [14] Mariotti, A., Pan, Y., Zeng, N., and Alessandri, A. (2015). Long-term climate change in the Mediterranean region in the midst of decadal variability. *Climate Dyn.*, 44(5-6), 1437-1456. doi:<https://doi.org/10.1007/s00382-015-2487-3>.
- [15] Ozturk, T., Ceber, Z. P., Türkeş, M., and Kurnaz, M. L. (2015). Projections of climate change in the Mediterranean Basin by using downscaled global climate model outputs. *International Journal of Climatology*, 35(14), 4276-4292.
- [16] Schär, C., Vidale, P. L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M. A., and Appenzeller, C. (2004). The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427(6972), 332-336.
- [17] Sánchez, E., Gallardo, C., Gaertner, M. A., Arribas, A., and Castro, M. (2004). Future climate extreme events in the Mediterranean simulated by a regional climate model: a first approach. *Global and Planetary Change*, 44(1-4), 163-180.
- [18] Diffenbaugh, N. S., Pal, J. S., Giorgi, F., and Gao, X. (2007). Heat stress intensification in the Mediterranean climate change hotspot. *Geophysical Research Letters*, 34(11).
- [19] Goubanova, K., and Li, L. (2007). Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean basin in an ensemble of future climate scenario simulations. *Global and Planetary Change*, 57(1-2), 27-42.
- [20] Meehl, G. A., Stocker, T. F., Collins, W. D., Friedlingstein, P., Gaye, A. T., Gregory, J. M., ... and Zhao, Z. C. (2007). Global climate projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [21] Fischer, E. M., and Schär, C. (2010). Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nature geoscience*, 3(6), 398-403.
- [22] Sillmann, J., Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., and Bronaugh, D. (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(6), 2473-2493.
- [23] Lelieveld, J., Proestos, Y., Hadjinicolaou, P., Tanarhte, M., Tyrlis, E., and Zittis, G. (2016). Strongly increasing heat extremes in the Middle East and North Africa (MENA) in the 21st century. *Climatic Change*, 137(1), 245-260.

- [24] Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Fnais, M., and Lelieveld, J. (2016). Projected changes in heat wave characteristics in the eastern Mediterranean and the Middle East. *Regional environmental change*, 16(7), 1863-1876.
- [25] Öno, B., and HM Semazzi, F. (2009). Regionalization of climate change simulations over the Eastern Mediterranean. *Journal of Climate*, 22(8), 1944-1961.
- [26] Türkeş, M., Kurnaz, M. L., Öztürk, T., Altınsoy, H. 2011. "Climate changes versus 'security and peace' in the Mediterranean macro climate region: are they correlated?". In: Proceedings of International Human Security Conference on Human Security: New Challenges, New Perspectives, p.625-639, CPRS Turkey, 27-28 October 2011: İstanbul.
- [27] Sen, B., Topcu, S., Türkeş, M., Sen, B. and Warner, J. F. 2012. "Projecting climate change, drought conditions and crop productivity in Turkey", *Climate Research* 52, 175–191.
- [28] Türkeş, M. 2012. "Küresel İklim Değişikliği ve Çölleşme". İçinde: Günümüz Dünya Sorunları – Disiplinlerarası Bir Yaklaşım (ed. N. Özgen), s.1-42. Eğitim Kitap: Ankara.
- [29] IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- [30] Ozturk, T., Türkeş, M., Kurnaz, M.L. 2014. "Analysing Projected Changes in Future Air Temperature and Precipitation Climatology of Turkey by Using RegCM4.3.5 Climate Simulations", *Aegean Geographical Journal*, 20, 17-27.
- [31] Türkeş, M., Sümer, U. M., Demir, I. 2002, "Re-evaluation of Trends and Changes in Mean, Maximum and Minimum Temperatures of Turkey for the Period 1929–1999", *International Journal of Climatology*, 22, 947–977.
- [32] Xoplaki, E., Gonzalez-Rouco, J. F., Luterbacher, J., Wanner, H. 2003. "Mediterranean Summer Air Temperature Variability and Its Connection to the Large-Scale Atmospheric Circulation and SSTs". *Climate Dynamics*, 20, 723–739.
- [33] Meehl, G. A., Tebaldi, C. 2004. "More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century", *Science*, 305 (5686), 994-997.
- [34] Diaz, J., Garcia-Herrera, R., Trigo, R. M., Linares, C., Valente, M. A., De Migule, J. M., Hernandez, E. 2006. "The Impact of the Summer 2003 Heat Wave in Iberia: How Should We Measure It?", *International Journal of Biometeorology*, 50, 159–166.
- [35] Della-Marta, P. M., Haylock, M. R., Luterbacher, J., Wanner, H. 2007. "Doubled Length of Western European Summer Heat Waves Since 1880", *Journal of Geophysical Research*, 112, D15103.
- [36] Fischer, E. M., Schar, C. 2010. "Consistent Geographical Patterns of Changes in High-Impact European Heatwaves", *Nature Geoscience*, 3(6), 398-403.
- [37] Kuglitsch, F. G., Toreti, A., Xoplaki, E., Della-Marta, P. M., Zerefos, C. S., Türkeş, M., Luterbacher, J. 2010. "Heat Wave Changes in the Eastern Mediterranean Since 1960", *Geophysical Research Letters*, 37(4), L04802.
- [38] Gao, X., and Giorgi, F. (2008). Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model. *Global and Planetary Change*, 62(3-4), 195-209.
- [39] Bozkurt, D., and Sen, O. L. (2011). Precipitation in the Anatolian Peninsula: sensitivity to increased SSTs in the surrounding seas. *Climate dynamics*, 36(3-4), 711-726.
- [40] Bozkurt, D., Turuncoglu, U., Sen, O. L., Onol, B., and Dalfes, H. N. (2012). Downscaled simulations of the ECHAM5, CCSM3 and HadCM3 global models for the eastern Mediterranean–Black Sea region: evaluation of the reference period. *Climate dynamics*, 39(1), 207-225.
- [41] Öno, B. (2012). Effects of coastal topography on climate: high-resolution simulation with a regional climate model. *Climate Research*, 52, 159-174.
- [42] Ozturk, T., Altınsoy, H., Türkeş, M., and Kurnaz, M. L. (2012). Simulation of temperature and precipitation climatology for the Central Asia CORDEX domain using RegCM 4.0. *Climate Research*, 52, 63-76.
- [43] Öno, B., and Unal, Y. S. (2014). Assessment of climate change simulations over climate zones of Turkey. *Regional Environmental Change*, 14(5), 1921-1935.
- [44] Bozkurt, D., and Sen, O. L. (2013). Climate change impacts in the Euphrates–Tigris Basin based on different model and scenario simulations. *Journal of hydrology*, 480, 149-161.

- [45] Önoğlu, B., Bozkurt, D., Turuncoglu, U. U., Sen, O. L., and Dalfes, H. N. (2014). Evaluation of the twenty-first century RCM simulations driven by multiple GCMs over the Eastern Mediterranean–Black Sea region. *Climate dynamics*, 42(7-8), 1949-1965.
- [46] Ozturk, T., Türkeş, M., and Kurnaz, M. L. (2014). Analysing projected changes in future air temperature and precipitation climatology of Turkey by using RegCM4.3.5 climate simulations. *Aegean Geographical Journal*, 20, 17-27.
- [47] Turp, M. T., Ozturk, T., Türkeş, M., and Kurnaz, M. L. (2014). Investigation of projected changes for near future air temperature and precipitation climatology of Turkey and surrounding regions by using the regional climate model RegCM4.3.5. *Aegean Geographical Journal*, 23(1), 1-24.
- [48] Gürkan, H., Arabacı, H., Demircan, M., Eskioglu, O., Şensoy, S., and Yazıcı, B. (2016). Temperature and precipitation projections based on GFDL-ESM2M using RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for Turkey. *Turkish Journal of Geographical Sciences*, 14(2), 77- 88.
- [49] Demircan, M., Gürkan, H., Eskioglu, O., Arabacı, H., and Coşkun, M. (2017). Climate Change Projections for Turkey: Three Models and Two Scenarios. *Turkish Journal Of Water Science and Management*, 1(1), 22-43.
- [50] Ozturk, T., Turp, M. T., Türkeş, M., and Kurnaz, M. L. (2017). Projected changes in temperature and precipitation climatology of Central Asia CORDEX Region 8 by using RegCM4. 3.5. *Atmospheric Research*, 183, 296-307.
- [51] Ozturk, T., Turp, M. T., Türkeş, M., and Kurnaz, M. L. (2018). Future projections of temperature and precipitation climatology for CORDEX-MENA domain using RegCM4. 4. *Atmospheric Research*, 206, 87-107.
- [52] Oğuz, K., and Akın, B. S. (2018). Evaluation of temperature, precipitation and dust aerosol simulations for Turkey. *International Journal of Current Research*, 10, (09), 73225-73233.
- [53] Turkes, M., Turp, M. T., An, N., Ozturk, T., and Kurnaz, M. L. (2020). Impacts of climate change on precipitation climatology and variability in Turkey. In *Water resources of Turkey* (pp. 467-491). Springer, Cham.
- [54] Ozturk, T., Tufan Turp, M., Türkeş, M., and Kurnaz, M. L. (2017, April). Investigation of high-resolution climate projections over Turkey and its surrounding regions using RegCM4. 4. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 8020).
- [55] Christensen, J. H., Carter, T. R., Giorgi, F. 2002. “PRUDENCE employs new methods to assess European climate change”, *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 83,147, doi: 10.1029/2002EO000094.
- [56] Christensen, J. H., Christensen, O. 2007. “A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century”, *Climatic Change*, 81, 7–30. doi: 10.1007/s10584-006- 9210-7.
- [57] Van der Linden, P., Mitchell, J. e. 2009. “ENSEMBLES: Climate Change and Its Impacts-Summary of Research and Results from the ENSEMBLES Project”, Exeter: Met Office Hadley Centre.
- [58] Christensen, J. H., Kjellström, E., Giorgi, F., Lenderink, G., Rummukainen, M. 2010. “Weight assignment in regional climate models”, *Climate Research*, 44, 179–194, doi: 10.3354/cr00916.
- [59] Giorgi, F., Gutowski, W. J. 2015. “Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative”, *Annual Review of Environment and Resources*, 40, 467–490, doi: 10.1146/annurev-environ-102014-021217.
- [60] Gutowski, J. W. J., Giorgi, F., Timbal, B., Frigon, A., Jacob, D., Kang, H., Raghavan, K., et al. 2016. “WCRP COordinated Regional Downscaling EXperiment (CORDEX): a diagnostic MIP for CMIP6”, *Geoscientific Model Development*, 9, 4087–4095, doi: 10.5194/gmd-9-4087-2016.
- [61] Christensen, O. B., Drews, M., Christensen, J. H., Dethloff, K., Ketelsen, K., Hebestadt, I., Rinke, A. 2006. “The HIRHAM regional climate model version 5 (β)”, Tech Rep 06-17, Danish Meteorological Institute, Copenhagen.
- [62] Box, J. E., and Rinke, A. (2003). Evaluation of Greenland ice sheet surface climate in the HIRHAM regional climate model using automatic weather station data. *Journal of Climate*, 16(9), 1302-1319.
- [63] Beniston, M., Stephenson, D. B., Christensen, O. B., Ferro, C. A., Frei, C., Goyette, S., ... and Woth, K. (2007). Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic change*, 81(1), 71-95.
- [64] May, W. (2008). Potential future changes in the characteristics of daily precipitation in Europe simulated by the HIRHAM regional climate model. *Climate Dynamics*, 30(6), 581-603.
- [65] Christensen, J. H., Boberg, F., Christensen, O. B., and Lucas-Picher, P. (2008). On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. *Geophysical Research Letters*, 35(20).

- [66] Kotlarski, S., Keuler, K., Christensen, O. B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., ... and Wulfmeyer, V. (2014). Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development*, 7(4), 1297-1333.
- [67] Giorgi, F., Bates, G. T., and Nieman, S. J. (1993). The multiyear surface climatology of a regional atmospheric model over the western United States. *Journal of Climate*, 6(1), 75-95.
- [68] Giorgi, F., Marinucci, M.R., and Bates, G.T. (1993). Development of a second generation regional climate model (regcm2) boundary layer and radiative transfer processes. *Mon. Weather Rev.*, 121, 2794-2813.
- [69] Undén, P., Rontu, L., Järvinen, H., Lynch, P., Calvo, J., Cats, G., Cuxart, J., Eerola, K., Fortelius, C., Garcia-Moya, J. A., Jones, C., Lenderink, G., McDonald, A., McGrath, R., Navascues, B., Woetman Nielsen, N., Ødegaard, V., Rodrigues, E., Rummukainen, M., Rööm, R., Sattler, K., Hansen Sass, B., Savijärvi, H., Wichers Schreur, B., Sigg, R., The, H., and Tijn, A. (2002). HIRLAM-5 Scientific Documentation. Scientific Report. <http://hirlam.org>.
- [70] Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Kornbluh, L., Manzini, E., Rhodin, A., Schlese, U., Schulzweida, U., and Tompkins, A. (2003). The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part 1. Model description. Report no. 349, Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M).
- [71] Simmons, A. S., Uppala, D. D., and Kobayashi, S. (2007). ERA-Interim: new ECMWF reanalysis products from 1989 onwards, *ECMWF Newsl.*, 110, 29-35.
- [72] Mitchell, T.D. and Jones, P.D. (2005). An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int J Climatol*, 25(6), 693-712.
- [73] Collins, W.J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Hinton, T., Jones, C.D., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Totterdell, I., Woodward, S., Reichler, T., and Kim, J. (2008). Evaluation of the HadGEM2 model. Met Office Hadley Centre Technical Note No. HCTN 74.
- [74] Bentsen, M., Bethke, I., Debernard, J. B., Iversen, T., Kirkevåg, A., Seland, Ø., Drange, H., Roelandt, C., Seierstad, I. A., Hoose, C., and Kristjánsson, J. E. (2013). The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 1: Description and basic evaluation of the physical climate, *Geosci. Model Dev.*, 6, 687-720, <https://doi.org/10.5194/gmd-6-687-2013>, 2013.
- [75] Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... and Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109(1), 5-31.
- [76] Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G., ... and Vazquez-Aguirre, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5).
- [77] Klein Tank, A. M. G., F. W. Zwiers, and X. Zhang (2009). Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation, Climate data and monitoring WCDMP-No. 72, WMO-TD No. 1500, 56pp.
- [78] Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., ... and Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6), 851-870.